

T.C.
GEBZE YÜKSEK TEKNOLOJİ ENSTİTÜSÜ
MÜHENDİSLİK ve FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İLERİ OSMOZ/MEMBRAN DİSTİLASYON SİSTEMİNDE
DENİZ SUYUNUN SEYRELTİLMESİ VE TEMİZ SU ELDESİ

ŞERİF ÇAKMAK
YÜKSEK LİSANS TEZİ
ÇEVRE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

GEBZE
2014

T.C.
GEBZE YÜKSEK TEKNOLOJİ ENSTİTÜSÜ
MÜHENDİSLİK ve FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İLERİ OSMOZ/MEMBRAN
DİSTİLASYON SİSTEMİNDE DENİZ
SUYUNUN SEYRELTİLMESİ VE TEMİZ SU
ELDESİ

ŞERİF ÇAKMAK
YÜKSEK LİSANS TEZİ
ÇEVRE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

DANIŞMANI
DOÇ.DR. COŞKUN AYDINER

GEBZE
2014



**GEBZE YÜKSEK
TEKNOLOJİ ENSTİTÜSÜ**

YÜKSEK LİSANS JÜRİ ONAY FORMU

GYTE Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun 27/01/2014 tarih ve 2014/06 sayılı kararıyla oluşturulan jüri tarafından 05/02/2014 tarihinde tez savunma sınavı yapılan Şerif ÇAKMAK'ın tez çalışması Çevre Mühendisliği Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS tezi olarak kabul edilmiştir.

JÜRİ

ÜYE

(TEZ DANIŞMANI) : Doç.Dr. Coşkun AYDINER

ÜYE

: Doç.Dr. Mehmet Salim ÖNCEL

ÜYE

:Yrd.Doç.Dr. Esra CAN DOĞAN

ONAY

GYTE Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun tarih ve/..... sayılı kararı.

İMZA/MÜHÜR

ÖZET

Bu çalışmada, yenilikçi entegre bütünlüğe haiz “İleri Osmoz/Direkt Temas Membran Distilasyon” (İO/DTMD) bütünleşik membran sistemi kullanılarak, farklı İO besleme suları (distile su, göl suyu, yeraltı suyu) ile deniz suyundan içme suyu elde edilmesi incelenmiştir. İO prosesinde çekme suyu olarak kullanılan deniz suyu farklı besleme suları ile seyreltilmiş, seyreltilmiş deniz suyu MD prosesinde işlenerek içme suyu eldesi sağlanmıştır. İO prosesinde, deniz suyunun seyreltilmesinde, besleme suyu olarak distile su, yüzeysel su kaynağı olarak göl suyu ve yeraltı suyu kullanılmıştır.

Bu çalışmada, öncelikle İO prosesinin distile su, yeraltı suyu ve göl suyu besleme akımları için çekme çözeltisi olarak kullanılacak deniz suyunu seyreltme performansları araştırılmıştır. İO deneyleri, membran yerleşim modu (normal ve ters mod), sıcaklık, akış hızı ve mikrofiltrasyon ve ultrafiltrasyon ile ön arıtmanın etkisinin araştırıldığı kapsamda yürütülmüştür. İO deneyleri ile belirlenen en uygun işletme şartları altında, farklı seyrelme oranlarında deniz suyunun seyreltilmesi işlemleri yerine getirilmiştir. Son adımda ise, seyreltilmiş deniz suyu MD prosesinde işlenerek temiz su elde etme performansları belirlenmiştir. Seyreltilmemiş ham deniz suyu da MD prosesinde işlenerek temiz su elde edilmesi sayesinde, seyrelmiş ve seyrelmemiş deniz suyundan MD ile temiz su elde etme performansları kıyaslanmıştır. İO ile seyreltmenin MD performansını ve çıkış suyu kalitesini ne yönde etkileyeceği İO/MD bütünleşik membran sistemi bütününde değerlendirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Deniz Suyundan Temiz Su Eldesi, İleri Osmoz/Direkt Temas Membran Distilasyon (İO/DTMD).

SUMMARY

In this study, an innovative integrated wholeness having ‘Forward Osmosis/Direct Contact Membrane Distillation’ (FO/DCMD) integrated membrane system is studied in order to obtain drinking water from sea water by using different FO supply waters (distilled water, lake water, groundwater). Sea water which is used as draw solution in the forward osmosis process is diluted by different feed solutions and the diluted sea water is processed in membrane distillation in order to obtain drinking water. In the forward osmosis process, distilled water, lake water and groundwater are used to dilute sea water.

In this study, firstly, sea water dilution performance of the different feed solutions (distilled water, lake water, groundwater) for forward osmosis is examined. Forward osmosis experiments are conducted in a framework researching the membrane location mode (normal and reverse modes), temperature, flow rate and the effect of microfiltration and ultrafiltration pretreatment performance, with the suitable operation conditions which are determined by forward osmosis experiments, sea water is diluted to different dilution proportions. In the last step, the performance of obtaining drinking water by diluted sea water with membrane distillation is determined. The raw sea water, which is not diluted, is also processed in membrane distillation in order to compare the performance of obtaining drinking water with membrane distillation by the raw sea water and the diluted sea water. The way of the effect of the diluted by forward osmosis process on the membrane distillation and on the quality of the membrane distillation permeate is examined in the framework of FO/MD wholeness membrane system.

Key Words: Obtain Water from Sea Water, Forward Osmosis/Direct Contact Membrane Distillation (FO/DCMD).

TEŞEKKÜR

2012 yılından bu yana birlikte çalıştığım, yüksek lisans eğitimimde yardımlarını hiçbir zaman esirgemeyip bilgisi ile bu çalışmanın oluşmasının yolunu açan saygıdeğer danışman hocam Sayın Doç.Dr. Coşkun AYDINER’e,

Bu çalışma, 111Y279 numaralı ve “İleri Osmoz/Direkt Temas Membran Distilasyon Bütünleşik Membran Sistemi ile Deniz Suyundan İçme Suyu Eldesinin Tekno Ekonomik Analizi” başlıklı TÜBİTAK Projesi kapsamında gerçekleştirilmiş çalışmalardan elde edilmiş sonuçlardan üretilmiş olup; desteklerinden ötürü TÜBİTAK’a,

Tez çalışmam boyunca deniz, göl, yeraltı suları teminimizi sağlayan aynı zamanda metal ölçümlerimizi yapan, Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü (GYTE) Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı nezdinde Öğretim Üyesi Doç.Dr. Mehmet Salim ÖNCEL’e ve Araştırma Görevlisi Emin Ender ÇELEBİ’ye,

Aynı zamanda çalışmalarım boyunca bana yardım eden ve GC-MS ölçümlerimizi yapan, İstanbul Teknik Üniversitesi Çevre Mühendisliği Bölümü Öğretim Üyesi Doç.Dr. Derya Yüksel İMER’e ve GYTE çalışanı Araştırma Mühendisi İnci TÜRK’e,

TOK ve ÇOK ölçümlerimizi yapan Sakarya Üniversitesi Çevre Mühendisliği Bölümü Öğr.Gör. Nazire Pınar TANATTI’ya,

Tez çalışmam boyunca bana destek olan ve bana yardım eden değerli çalışma arkadaşlarım Ali Oğuzhan NARCI’ya ve Tuğba Nur Yılmaz’a,

Benim bu aşamalara gelmemde tartışılmaz katkısı olan aileme, sevgi, destek ve güvenlerinden dolayı, en içten dileklerimle teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	iv
SUMMARY	v
TEŞEKKÜR	vi
İÇİNDEKİLER	vii
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	x
ŞEKİLLER DİZİNİ	xii
TABLolar DİZİNİ	xvii
1. GİRİŞ	1
1.1. Amaç	1
1.2. Kapsam	1
2. LİTERATÜR İNCELEMESİ	3
2.1. Kuramsal Temeller	3
2.1.1. İleri osmoz (İO) Prosesi	3
2.1.1.1. İO Teknolojileri	3
2.1.1.2. Su ve Atıksu Arıtımında Uygulamalar	6
2.1.1.3. Deniz Suyu Arıtımı Uygulamaları	7
2.1.2. Membran Distilasyon (MD) Prosesi	9
2.1.2.1. MD Teknolojileri	9
2.1.2.1.1. Direkt Temas Membran Distilasyonu (DTMD)	10
2.1.2.1.2. Hava Geçişli Membran Distilasyonu (HGMD)	11
2.1.2.1.3. Süpürücü Gaz Membran Distilasyonu (SGMD)	12
2.1.2.1.4. Vakum Membran Distilasyonu (VMD)	12
2.1.2.2. Çeşitli MD Uygulamaları	13
2.1.2.3. Deniz Suyu Arıtımı Uygulamaları	15
2.2. Literatür Değerlendirmesi	18
3. MALZEME VE YÖNTEM	21
3.1. Deneysel Yöntemler	21
3.2. Besleme Sularının ve Çekme Suyunun Karakterizasyonu	22
3.3. Membranlar ve Özellikleri	25

3.4. Kimyasallar	25
3.5. Analitik Yöntemler	26
3.5.1. Su Kalite Analizleri	26
3.6. Deneysel Çalışma Sistemleri	28
3.6.1. İleri Osmoz Deney Sistemi	28
3.6.2. Mikrofiltrasyon-Ultrafiltrasyon Deney Sistemi	28
3.6.3. Direkt Temas Membran Distilasyon Deney Sistemi	29
3.7. Deneysel Çalışma Esasları	30
3.7.1. İleri Osmoz Prosesi	30
3.7.2. Direkt Temas Membran Distilasyon Prosesi	30
3.8. Proses Performans Hesaplamaları	31
3.8.1. İleri Osmoz Performans Hesaplamaları	31
3.8.2. Direkt Temas Membran Distilasyon Performans Hesaplamaları	33
4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA	34
4.1. İleri Osmoz Prosesi Deneysel Çalışma Bulguları	34
4.1.1. Distile Su Kullanılarak Deniz Suyunun Seyreltilmesi	34
4.1.1.1. Membran İşletme Modu	34
4.1.1.2. Akış Hızı	38
4.1.1.3. Sıcaklık	43
4.1.1.4. Ön Arıtma	47
4.1.2. Yeraltı Suyu Kullanılarak Deniz Suyunun Seyreltilmesi	54
4.1.2.1. Membran İşletme Modu	54
4.1.2.2. Akış Hızı	58
4.1.2.3. Sıcaklık	63
4.1.2.4. Ön Arıtma	68
4.1.3. Göl Suyu Kullanılarak Deniz Suyunun Seyreltilmesi	75
4.1.3.1. Membran İşletme Modu	75
4.1.3.2. Akış Hızı	80
4.1.3.3. Sıcaklık	85
4.1.3.4. Ön Arıtma	91
4.1.4. İleri Osmoz Prosesi Besleme Çözeltileri Karakterizasyon Sonuçları	98
4.2. Membran Distilasyon Prosesinde Deniz Suyundan Temiz Su Eldesi	99
4.2.1. Deniz Suyunun Uygun Seyrelme Oranının Tespiti	99
4.2.2. Farklı Besleme Çözeltileri ile Seyreltilmiş ve Seyreltilmemiş Deniz	

Sularından Temiz Su Eldesi	100
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	103
KAYNAKLAR	105
ÖZGEÇMİŞ	109

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler ve Açıklamalar

Kısaltmalar

DTMD	: Direkt Temas Membran Distilasyonu
HGMD	: Hava Geçişli Membran Distilasyonu
İO	: İleri Osmoz
MD	: Membran Distilasyonu
MF	: Mikrofiltrasyon
NF	: Nanofiltrasyon
SGMD	: Süpürücü Gaz Membran Distilasyonu
TO	: Ters Osmoz
UF	: Ultrafiltrasyon
VMD	: Vakum Membran Distilasyonu

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Şekil No:</u>	<u>Sayfa</u>
2.1: İO/TO kombine sistemi.	4
2.2: NH ₃ /CO ₂ İO kombine sistemi.	5
2.3: 4 farklı MD teknolojisinin şematik gösterimi, a)DTMD b)HGMD c)SGMD d)VMD.	10
2.4: 2005 yılına kadar yayımlanmış kaynaklarda, farklı MD konfigürasyonlarının yüzdeleri.	13
2.5: MD proste akı-seyrelme ilişkisi, a)HGMD prosesinde farklı NaCl konsantrasyonlarında değişen çözelti sıcaklık farkları için akı grafiği ve b)DTMD prosesinde farklı NaCl konsantrasyonları için elde edilmiş.	20
3.1: Kullanılan besleme sularının ve çekme suyunun alındığı merkezler.	23
3.2: İleri Osmoz Deney Düzeneği, 1)Çekme Çözeltisi Tankı 2)Besleme Tankı 3)Peristaltik Pompa 4)Su Banyosu 5)Membran Modül Sıkıştırıcı 6)Membran Modülü 7)Akış Ölçer.	28
3.3: MF ve UF Deney Düzeneği, 1)Yüksek Basınç Pompası 2)Besleme Tankı 3)Basınç Ölçerler 4)Su Banyosu 5)Membran Modül Sıkıştırıcı 6)Membran Modülü 7)Terazi 8)Bilgisayar 9)Dijital Akış Ölçer 10)Sıkıştırma Kolu.	29
3.4: Kesikli DTMD Deney Düzeneği, 1)Besleme Tankı 2)Süzüntü Tankı 3)Peristaltik Pompa 4)Su Banyosu 5)Membran Modül Sıkıştırıcı 6)Membran Modülü 7)Akış Ölçer.	30
4.1: İO prosesiyle distile su kullanılarak deniz suyunun seyreltilmesinde membran işletme moduna bağlı olarak İO prosesinde sürücü kuvvet etkisinin zamanla değişimi (akış hızı:300 L/sa, sıcaklık:25 °C, deney süresi:6 saat) (Semboller ◇, □ ve Δ sırasıyla distile su, deniz suyu ve proste net osmotik basınçtır).	34
4.2: İO prosesinde distile su kullanılarak deniz suyunun seyreltilmesi üzerine membran işletme modunun etkisi, a)çekme çözeltisine geçen su hacmi, b)çekme çözeltisinde hacimsel seyrelme oranı, c)su akısı	36

- ve d)tuz akısı, (akış hızı:300 L/sa, sıcaklık:25 °C, deney süresi:6 saat).
- 4.3: İO prosesiyle distile su kullanılarak deniz suyunun seyreltilmesinde 39
akış hızına bağlı olarak İO prosesinde sürücü kuvvet etkisinin
zamanla değişimi (membran yerleşimi:ters mod, sıcaklık:25 °C,
deney süresi:3 saat) (Semboller $\diamond$, $\square$ ve Δ sırasıyla distile su, deniz
suyu ve prosesteki net osmotik basınçtır).
- 4.4: İO prosesinde distile su kullanılarak deniz suyunun seyreltilmesi 40
üzerine akış hızının etkisi, a)çekme çözeltisine geçen su hacmi, b)
çekme çözeltisinde hacimsel seyrelme oranı, c)su akısı ve d)tuz akısı,
(membran yerleşimi:ters mod, sıcaklık:25 °C, deney süresi:3 saat).
- 4.5: İO prosesiyle distile su kullanılarak deniz suyunun seyreltilmesinde 43
sıcaklığa bağlı olarak İO prosesinde sürücü kuvvet etkisinin zamanla
değişimi (membran yerleşimi:ters mod, akış hızı:300 L/sa, deney
süresi: 3 saat) (Semboller $\diamond$, $\square$ ve Δ sırasıyla distile su, deniz suyu ve
prosesteki net osmotik basınçtır).
- 4.6: İO prosesinde distile su kullanılarak deniz suyunun seyreltilmesi 44
üzerine sıcaklığın etkisi, a)çekme çözeltisine geçen su hacmi, b)
çekme çözeltisinde hacimsel seyrelme oranı, c)su akısı ve d)tuz akısı,
(membran yerleşimi:ters mod, akış hızı:300 L/sa, deney süresi:3
saat).
- 4.7: İO prosesiyle distile su kullanılarak deniz suyunun seyreltilmesinde 48
ön arıtma (MF veya UF) yapılıp yapılmamasına bağlı olarak İO
prosesinde sürücü kuvvet etkisinin zamanla değişimi (membran
yerleşimi:ters mod, akış hızı:300 L/sa, sıcaklık:25 °C, deney süresi: 6
saat) (Semboller $\diamond$, $\square$ ve Δ sırasıyla distile su, deniz suyu ve
prosesteki net osmotik basınçtır).
- 4.8: Distile su kullanılarak deniz suyunun seyreltilmesi üzerine MF ve UF 49
prosesleriyle ön arıtma yapılmasının İO prosesi performansı üzerine
etkisi, a)çekme çözeltisine geçen su hacmi, b)çekme çözeltisinde
hacimsel seyrelme oranı, c)su akısı ve d)tuz akısı, (membran
yerleşimi:ters mod, akış hızı:300 L/sa, sıcaklık:25 °C, deney süresi:6
saat).

4.9:	İÖ prosesi öncesinde deniz suyunun ön arıtılması işleminde MF ve UF prosesleri süzüntü akıllarının zamanla değışimleri.	52
4.10:	İÖ prosesiyle yeraltı suyu kullanılarak deniz suyunun seyreltilmesinde membran işletme moduna bağılı olarak İÖ prosesinde sürücü kuvvet etkisinin zamanla değışimi (akış hızı:300 L/sa, sıcaklık:25 °C, deney süresi:6 saat) (Semboller ◇, □ ve Δ sırasıyla yeraltı suyu, deniz suyu ve prodesteki net osmotik basınçtır).	54
4.11:	İÖ prosesinde yeraltı suyu kullanılarak deniz suyunun seyreltilmesi üzerine membran işletme modunun etkisi, a)çekme çözeltilisine geçen su hacmi, b)çekme çözeltilisinde hacimsel seyrelme oranı, c)su akısı ve d)tuz akısı, (işletme şartları:akış hızı:300 L/sa, sıcaklık:25 °C, deney süresi:6 saat).	55
4.12:	İÖ prosesiyle yeraltı suyu kullanılarak deniz suyunun seyreltilmesinde akış hızına bağılı olarak İÖ prosesinde sürücü kuvvet etkisinin zamanla değışimi (membran yerleşimi:ters mod, sıcaklık:25 °C, deney süresi:3 saat) (Semboller ◇, □ ve Δ sırasıyla yeraltı suyu, deniz suyu ve prodesteki net osmotik basınçtır).	59
4.13:	İÖ prosesinde yeraltı suyu kullanılarak deniz suyunun seyreltilmesi üzerine akış hızının etkisi, a)çekme çözeltilisine geçen su hacmi, b) çekme çözeltilisinde hacimsel seyrelme oranı, c)su akısı ve d)tuz akısı, (membran yerleşimi:ters mod, sıcaklık:25 °C, deney süresi:3 saat).	60
4.14:	İÖ prosesiyle yeraltı suyu kullanılarak deniz suyunun seyreltilmesinde sıcaklığa bağılı olarak İÖ prosesinde sürücü kuvvet etkisinin zamanla değışimi (membran yerleşimi:ters mod, akış hızı:300 L/sa, deney süresi:3 saat) (Semboller ◇, □ ve Δ sırasıyla yeraltı suyu, deniz suyu ve prodesteki net osmotik basınçtır).	64
4.15:	İÖ prosesinde yeraltı suyu kullanılarak deniz suyunun seyreltilmesi üzerine sıcaklığın etkisi, a)çekme çözeltilisine geçen su hacmi, b) çekme çözeltilisinde hacimsel seyrelme oranı, c)su akısı ve d)tuz akısı, (membran yerleşimi:ters mod, akış hızı:300 L/sa, deney süresi:3 saat).	65
4.16:	İÖ prosesiyle yeraltı suyu kullanılarak deniz suyunun seyreltilmesinde ön arıtma (MF veya UF) yapıp yapılmamasına	69

- bağlı olarak İO prosesinde sürücü kuvvet etkisinin zamanla değişimi (membran yerleşimi:ters mod, akış hızı:300 L/sa, sıcaklık:25 °C, deney süresi: 6 saat) (Semboller $\diamond$, $\square$ ve Δ sırasıyla yeraltı suyu, deniz suyu ve prosesteeki net osmotik basınçtır).
- 4.17: Yeraltı suyu kullanılarak deniz suyunun seyreltilmesi üzerine MF ve UF prosesleriyle ön arıtma yapılmasının İO prosesi performansı üzerine etkisi, a)çekme çözeltisine geçen su hacmi, b)çekme çözeltisinde hacimsel seyrelme oranı, c)su akısı ve d)tuz akısı, (membran yerleşimi:ters mod, akış hızı:300 L/sa, sıcaklık:25 °C, deney süresi:6 saat). 70
- 4.18: İO prosesi öncesinde deniz suyunun ön arıtılması işleminde MF ve UF prosesleri süzüntü akılarının zamanla değişimleri. 74
- 4.19: İO prosesiyle göl suyu kullanılarak deniz suyunun seyreltilmesinde membran işletme moduna bağlı olarak İO prosesinde sürücü kuvvet etkisinin zamanla değişimi (akış hızı:300 L/sa, sıcaklık:25 °C, deney süresi:6 saat) (Semboller $\diamond$, $\square$ ve Δ sırasıyla göl suyu, deniz suyu ve prosesteeki net osmotik basınçtır). 76
- 4.20: İO prosesinde göl suyu kullanılarak deniz suyunun seyreltilmesi üzerine membran işletme modunun etkisi, a)çekme çözeltisine geçen su hacmi, b)çekme çözeltisinde hacimsel seyrelme oranı, c)su akısı ve d)tuz akısı, (akış hızı:300 L/sa, sıcaklık:25 °C, deney süresi:6 saat). 77
- 4.21: İO prosesiyle göl suyu kullanılarak deniz suyunun seyreltilmesinde akış hızına bağlı olarak İO prosesinde sürücü kuvvet etkisinin zamanla değişimi (membran yerleşimi:ters mod, sıcaklık:25 °C, deney süresi:3 saat) (Semboller $\diamond$, $\square$ ve Δ sırasıyla göl suyu, deniz suyu ve prosesteeki net osmotik basınçtır). 81
- 4.22: İO prosesinde göl suyu kullanılarak deniz suyunun seyreltilmesi üzerine akış hızının etkisi, a)çekme çözeltisine geçen su hacmi, b) çekme çözeltisinde hacimsel seyrelme oranı, c)su akısı ve d)tuz akısı, (membran yerleşimi:ters mod, sıcaklık:25 °C, deney süresi:3 saat). 82
- 4.23: İO prosesiyle göl suyu kullanılarak deniz suyunun seyreltilmesinde sıcaklığa bağlı olarak İO prosesinde sürücü kuvvet etkisinin zamanla 86

- değişimi (membran yerleşimi:ters mod, akış hızı:300 L/sa, deney süresi:3 saat) (Semboller $\diamond$, $\square$ ve Δ sırasıyla göl suyu, deniz suyu ve prosesteki net osmotik basınçtır).
- 4.24: İO prosesinde göl suyu kullanılarak deniz suyunun seyreltilmesi üzerine sıcaklığın etkisi, a)çekme çözeltisine geçen su hacmi, b) çekme çözeltisinde hacimsel seyrelme oranı, c)su akısı ve d)tuz akısı, (membran yerleşimi:ters mod, akış hızı:300 L/sa, deney süresi:3 saat). 87
- 4.25: İO prosesiyle göl suyu kullanılarak deniz suyunun seyreltilmesinde ön arıtma (MF veya UF) yapılıp yapılmamasına bağlı olarak İO prosesinde sürücü kuvvet etkisinin zamanla değişimi (membran yerleşimi:ters mod, akış hızı:300 L/sa, sıcaklık:25 °C, deney süresi:6 saat) (Semboller $\diamond$, $\square$ ve Δ sırasıyla göl suyu, deniz suyu ve prosesteki net osmotik basınçtır). 91
- 4.26: Göl suyu kullanılarak deniz suyunun seyreltilmesi üzerine MF ve UF prosesleriyle ön arıtma yapılmasının İO prosesi performansı üzerine etkisi, a)çekme çözeltisine geçen su hacmi, b)çekme çözeltisinde hacimsel seyrelme oranı, c)su akısı ve d)tuz akısı, (membran yerleşimi:ters mod, akış hızı:300 L/sa, sıcaklık:25 °C, deney süresi:6 saat). 92
- 4.27: İO prosesi öncesinde deniz suyunun ön arıtılması işleminde MF ve UF prosesleri süzüntü akılarının zamanla değişimleri. 96
- 4.28: Tekli DTMD prosesinde deniz suyundan temiz su üretimi üzerine deniz suyunun seyreltilmesinin etkisi (membran: PTFE-0,22 μ m, sıcaklık:Deniz suyu (60 °C)-distile su (30 °C), akış hızı:270 L/sa (deniz suyu)-360 L/sa (distile su), ΔT :30 °C, deney süresi:6 saat). 99
- 4.29: Farklı besleme çözeltileriyle seyreltilmiş ve seyreltilmemiş deniz sularının MD prosesinde elde edilen sonuçlar. 100

TABLÖLAR DİZİNİ

<u>Tablo No:</u>	<u>Sayfa</u>
2.1: Laboratuvar ölçekte MD proseslerinin başarıyla uygulandığı alanlar.	15
3.1: Her bir besleme ve çekme suyu için İO ve MD prosesinde izlenen parametreler.	21
3.2: Çalışılan besleme sularının ve çekme suyunun özellikleri.	23
3.3: İO, UF, MF membranları ve özellikleri.	25
3.4: MD membranlarının özellikleri.	25
3.5: Su kalitesi analiz parametreleri için kullanılan ölçüm metotları/yöntemleri.	26
3.6: İO prosesinde izlenen işletme parametreleri, değerleri ve deneysel şartları.	31
4.1: Distile su kullanılarak deniz suyunun seyreltilmesinde normal modda ve ters modda işletilen İO prosesinin performansı (akış hızı:300 L/sa, sıcaklık:25 °C, deney süresi:6 saat, hacim:4L).	37
4.2: Distile su kullanılarak deniz suyunun seyreltilmesinde 150, 300, 450, 600 L/saat'te işletilen İO prosesinin performansı (membran yerleşimi:ters mod, sıcaklık:25 °C, deney süresi:3 saat, hacim:4 L).	41
4.3: Distile su kullanılarak deniz suyunun seyreltilmesinde 15, 20, 25 ve 30 °C 'te işletilen İO prosesinin performansı (membran yerleşimi: ters mod, akış hızı:300 L/sa, deney süresi:3 saat, hacim:4 L).	46
4.4: MF ve UF ile ön arıtma yapılmış deniz suyunun distile su kullanılarak seyreltilmesinde İO prosesinin performansı (membran yerleşimi:ters mod, akış hızı:300 L/sa, sıcaklık:25 °C, deney süresi:6 saat, hacim:4 L).	50
4.5: İO prosesi öncesinde deniz suyunun MF ve UF prosesleriyle ön arıtılması performansları.	53
4.6: Yeraltı suyu kullanılarak deniz suyunun seyreltilmesinde normal ve ters modda işletilen İO prosesinin performansı (akış hızı:300 L/sa, sıcaklık:25 °C, hacim:4 L, deney süresi:6 saat).	58
4.7: Yeraltı suyu kullanılarak deniz suyunun seyreltilmesinde 150, 300,	62

450 ve 600 L/saat'te işletilen İO prosesinin performansı (membran yerleşimi:ters mod, sıcaklık:25 °C, hacim:4 L, deney süresi:3 saat).	
4.8: Yeraltı suyu kullanılarak deniz suyunun seyreltilmesinde 15, 20, 25 ve 30 °C 'de işletilen İO prosesinin performansı (membran yerleşimi:ters mod, akış hızı:300 L/sa, hacim:4L, deney süresi:3 saat).	67
4.9: MF ve UF ile ön arıtma yapılmış deniz suyunun yeraltı suyu kullanılarak seyreltilmesinde İO prosesinin performansı (membran yerleşimi:ters mod, akış hızı:300 L/sa, sıcaklık:25 °C, hacim:4 L, deney süresi:6 saat).	72
4.10: İO prosesi öncesinde deniz suyunun MF ve UF prosesleriyle ön arıtılması performansları.	75
4.11: Göl suyu kullanılarak deniz suyunun seyreltilmesinde normal ve ters modda işletilen İO prosesinin performansı (akış hızı:300 L/sa, sıcaklık:25 °C, hacim:4 L, deney süresi:6 saat).	79
4.12: Göl suyu kullanılarak deniz suyunun seyreltilmesinde 150, 300, 450, 600 L/saat'te işletilen İO prosesinin performansı (membran yerleşimi:ters mod, sıcaklık:25 °C, hacim:4 L, deney süresi:3 saat).	84
4.13: Göl suyu kullanılarak deniz suyunun seyreltilmesinde 15, 20, 25 ve 30 °C'de işletilen İO prosesinin performansı (membran yerleşimi:ters mod, akış hızı:300 L/sa, hacim:4 L, deney süresi:3 saat).	89
4.14: MF ve UF ile ön arıtma yapılmış deniz suyunun göl suyu kullanılarak seyreltilmesinde İO prosesinin performansı (membran yerleşimi:ters mod, akış hızı:300 L/sa, sıcaklık:25 °C, hacim:4 L, deney süresi:6 saat).	94
4.15: İO prosesi öncesinde deniz suyunun MF ve UF prosesleriyle ön arıtılması performansları.	97
4.16: Besleme çözeltilerinin deney sonu karakterizasyon sonuçları.	98
4.17: Farklı besleme çözeltileriyle seyreltilmiş ve seyreltilmemiş deniz suyunun MD prosesi sonunda elde edilen deney sonu karakterizasyon sonuçları.	102

1. GİRİŞ

1.1. Amaç

Bu çalışmanın amacı, membran distilasyon (MD) prosesi öncesinde ön arıtma amaçlı ileri osmoz (İO) prosesi kullanılarak deniz suyundan temiz su (içme ve/veya kullanma suyu) elde edilmesidir. Bu amaçla, yenilikçi entegre bütünlüğe haiz “İleri Osmoz/Direkt Temas Membran Distilasyon” (İO/DTMD) bütünleşik membran sistemi kullanılarak, farklı İO besleme suları (distile su, göl suyu, yeraltı suyu) ile deniz suyundan içme suyu elde edilmesi temeli üzerine inşa edilmiştir. İO prosesinde çekme suyu olarak kullanılacak deniz suyu farklı besleme suları ile seyreltilerek, seyreltilmiş deniz suyu MD prosesinde işlenerek içme suyu eldesi sağlanmıştır. İO prosesinde, deniz suyunun seyreltilmesinde, besleme suyu olarak distile su, yüzeysel su kaynağı olarak göl suyu ve yeraltı suyu kullanılmıştır. Bu şekliyle geniş yelpazede besleme suları kullanılarak bütünleşik sistem işletiminin gayesi ise; İO prosesinin distile su ile referans proses performanslarını tespit ederek, su temini yapılan doğal sulara (göl suyu ve yeraltı suyu) önerilen entegre arıtma sisteminin ne düzeyde bir başarı ile uygulanabileceğini ortaya koymaktır.

1.2. Kapsam

Tezin amacına ulaşılabilmesi için çalışmalar, öncelikle İO prosesinin distile su, yeraltı suyu ve göl suyu besleme akımları için çekme çözeltisi olarak kullanılacak deniz suyunu seyreltme performansları araştırılmıştır. İO deneyleri, membran yerleşim modu (normal ve ters mod), sıcaklık, akış hızı ve mikrofiltrasyon ve ultrafiltrasyon ile ön arıtmanın etkisinin araştırıldığı kapsamda yürütülmüştür. İO deneyleri ile belirlenen en uygun işletme şartları altında, farklı seyrelme oranlarında deniz suyunun seyreltilmesi işlemleri yerine getirilmiştir. Son adımda ise, seyreltilmiş deniz suyu MD prosesinde işlenerek temiz su elde etme performansları belirlenmiştir. Seyreltilmemiş deniz suyu da MD prosesinde işlenerek temiz su elde edilmesi sayesinde, seyrelmiş ve seyrelmemiş deniz suyundan MD ile temiz su elde etme performansları kıyaslanmıştır. İO ile seyreltmenin MD performansını ve çıkış

suyu kalitesini ne yönde etkileyeceği İO/MD bütünleşik membran sistemi bütününde değerdendirilmiştir.

2. LİTERATÜR İNCELEMESİ

2.1. Kuramsal Temeller

2.1.1. İleri osmoz (İO) Prosesi

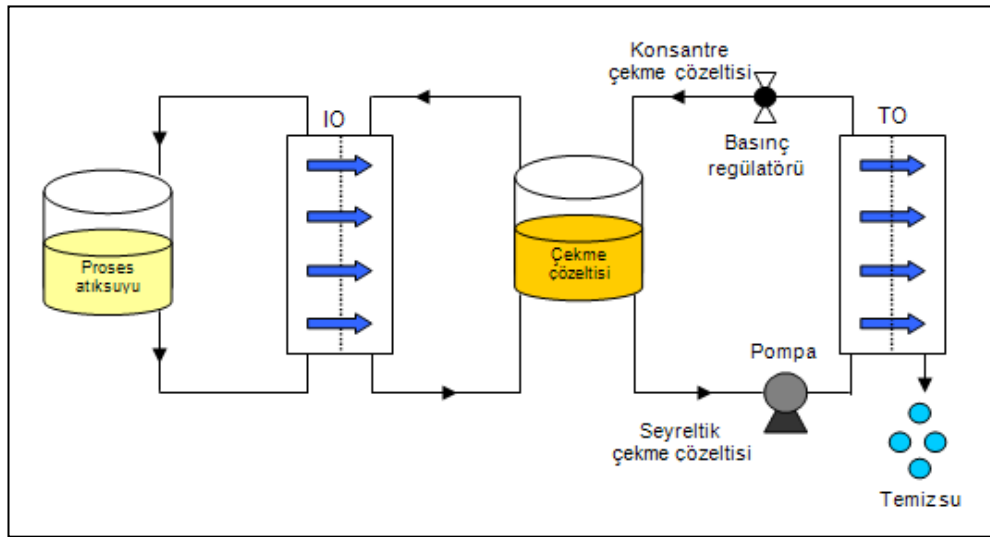
Osmoz, fiziksel bir proses olup osmotik basınç farkına bağlı olarak suyun yarı geçirgen bir membrandan hareketi olarak tanımlanır. Seçici geçirgen bir membran suyun geçişine izin verirken çözünmüş molekül veya iyonların geçişine izin vermez [31]. Osmotik basınç, bir zar (membran) ile ayrılmış olan az mineralli (az tuzlu) suyun daha çok mineral içeren su tarafına doğru geçişini sağlamak için tuzlu su tarafına uygulanan basınçtır. Osmotik basınç, belirli bir hacim çözücü içinde çözünmüş madde moleküllerinin konsantrasyonuyla doğru orantılıdır. Ters osmozda uygulanan hidrolik basınç, membran boyunca kütle taşınımı gerçekleştiren etkin güçtür. İleri osmozda ise osmotik basıncın bizzat kendisi kütle taşınımı için etkin güçtür [5].

2.1.1.1. İO Teknolojileri

İO prosesinde tek tip bir teknolojik uygulama söz konusu olsa da, çekme çözeltisini konsantre etme ve su kazanımı uygulamasına bağlı olarak farklı işletimde kombine çekme çözeltisi konsantre etme ve su geri kazanım sistemleri kullanılabilir. İO işleminde etkin gücün kaynağı, membranın süzüntü tarafındaki konsantre çözeltisidir [27]. Bu çözelti literatürde draw solüsyon, osmotik ajan, osmotik ortam, etkin solüsyon, osmotik motor, örnek solüsyon veya tuzlu su gibi terimlerle ifade edilmektedir [5]. Etkin gücün kaynağı olması dolayısıyla çekme çözeltisi seçilirken uygulamaya bakılmaksızın inert, kararlı, nötr veya nötr pH'a yakın ve toksik olmama gibi genel kriterler göz önünde bulundurulmalıdır [31]. Ayrıca ideal bir çekme çözeltisi yüksek osmotik etkinliğe sahip olmalıdır. Yüksek osmotik basınca sahip olabilmesi için düşük moleküler ağırlıkta olması ve sudaki çözünürlüğünün yüksek olması gerekmektedir. Aynı zamanda, membrana kimyasal (reaksiyon, çözünme veya adsorbsiyon aracılığıyla) veya fiziksel olarak zarar

vermemesi, çevreye veya insan sağlığına minimum etkilere sahip olması da beklenir. Ayrıca ucuz olması, yüksek çözünürlüğe ve besleme çözeltisinden daha yüksek osmotik basınca sahip olması istenir. İleri osmoz için diğer önemli bir kriter, işletim sırasında seyreltilen çekme çözeltisini tekrar konsantre edecek uygun bir prosesin seçilmesidir. Bunun için yüksek çözünürlüğü ve ters osmoz işlemiyle yüksek konsantrasyona tekrar konsantre edilmesi daha basit olduğu için genellikle NaCl çözeltisi kullanılır. Literatürde çekme çözeltisi olarak çeşitli kimyasallar (sodyum klorür, konsantre edilmiş atıksu çıkışı, sükroz, amonyum bikarbonat), özellikle deniz suyunun saflaştırılması uygulamalarında kullanılmıştır. Selüloz asetat membran ve çekme çözeltisi olarak glikoz kullanarak ileri osmoz işlemiyle deniz suyundan su elde edilmiştir [20].

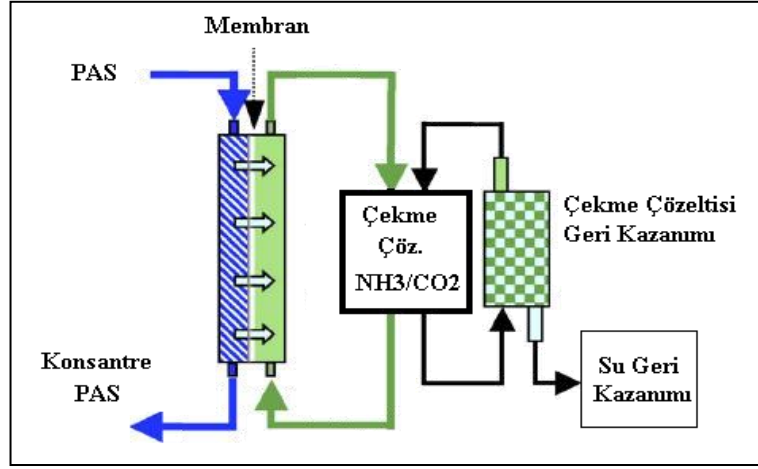
Yaygın kullanılan İO prosesi tek değerlikli suda yüksek çözünürlüğe sahip (örn.; NaCl veya KCl) tuzlar kullanılarak işletilen İO/TO kombine sistemidir. TO prosesi, çekme çözeltisini konsantre etme ve su eldesi amacıyla kullanılmaktadır. Ancak çekme çözeltisinde yüksek tuz konsantrasyonlarında, su eldesi için iki ya da üç kademeli TO uygulaması gerekli olabilmekte, ayrıca yüksek kirlenme ve buna bağlı düşük işletme akısıyla TO sistemi işletilebilmektedir (Şekil 2.1).



Şekil 2.1: İO/TO kombine sistemi.

Bir diğer uygulama biçiminde, amonyum bikarbonat çekme çözeltisi ile sistem işletilmekte; Çekmeye alınan suyun kazanımı, bir yandan 60 °C ve üzerinde amonyum bikarbonatın amonyak ve karbondioksit gazlarına dönüştürülerek çekme çözeltisine devrettirilmeleri suretiyle sistemin sürekliliği sağlanırken, diğer taraftan

amonyum bikarbonatın sudan giderilmesi suretiyle temiz su eldesi sağlanabilmektedir (Şekil 2.2).



Şekil 2.2: NH_3/CO_2 İO kombine sistemi.

İleri osmoz işleminin temel avantajları, düşük kirlenme eğilimine sahip olması, hidrolik basıncın oldukça küçük olmasından dolayı kalıcı kirlenme etkisinin az olması, kirlenici maddeleri çok yüksek oranda reddetme kapasitesine sahip olması, besleme çözeltilerinin geniş aralıktaki olması, enerji gereksiniminin ve dizayn maliyetlerinin az olması şeklinde sıralanabilir. Basınç sürücülü membran proseslerde, kirlenici basıncın etkisinden dolayı membran üzerinde birikir ve membran yüzeyinde bir sıkışma meydana gelir. Bu nedenle ileri osmoz sistemlerinde, hidrolik basıncın etkin olduğu membran sistemlerine göre daha düşük membran kirlenmesi problemlerinin görüldüğü rapor edilmektedir. İO işleminde yer alan tek basınç, membran modülündeki akış direncinden kaynaklandığı için kullanılan malzemeler basittir ve membranın desteklenmesi pek sorun oluşturmaz. Besleme akımını konsantre etmede, besleme çözeltisine zarar verecek yüksek basınç veya ısıya gereksinim duyulmaması, İO sisteminin kullanımını değerli hale getirmektedir. İO prosesinin en büyük dezavantajı ise, çekme çözeltisinin tekrar konsantre edilme ihtiyacıdır. Bu dezavantaj da ileri osmoz ve ters osmoz sistemlerinin kombine kullanılmasıyla ortadan kaldırılmaktadır. Ayrıca çekme çözeltisi olarak deniz suyunun kullanılabildiği uygulamalar ise, amaçlanan hedefler doğrultusunda eğer etkin işletilebilirlerse, İO prosesi ile ulaşılan maliyetlerin çok düşük olması avantajını beraberinde getirmektedir [9], [19], [27], [30], [37], [39].

2.1.1.2. Su ve Atıksu Arıtımında Uygulamalar

Ters osmoz prosesi, su arıtımında ve deniz suyunu tuzsuzlaştırma işlemlerinde günümüzde yaygın olarak ve başarılı bir şekilde uygulanmaktadır. Bu sistemlerde yüksek enerji gereksinimine bağlı olarak maliyet giderleri de fazladır [30]. İleri osmoz gibi düşük enerji gereksinimine ve yüksek geri kazanım özelliğine sahip osmotik basınçlı membran sistemleri, son yıllarda alternatif bir proses olarak sınırlı sayıdaki araştırmacılar tarafından çalışılmaktadır. İleri osmoz günümüzde, deniz suyunun saflaştırılması ile depolama alanı sızıntı sularının, seyreltik endüstriyel atıksuların ve anaerobik çamur çürütücü sıvılarının konsantre edilmesinde uygulanmaktadır [9], [19].

İleri osmoz, atıksu arıtımında nihai bir işlem olmaktan çok saflaştırma işlemi öncesinde bir ön arıtım işlemi olarak kullanılmaktadır. Oldukça farklı özelliklere sahip depolama alanı sızıntı sularının arıtımı, özellikle yüksek çıkış suyu kalitesinin hedeflendiği durumlarda güçtür. Organik bileşikler, çözünmüş ağır metaller, organik ve inorganik azot ve toplam çözünmüş katılar, kompleks yapıya sahip olan bu çözümlerde genel kirleticiler olarak bulunur. Bu tür atıksuların arıtımında genellikle organiklerin, azotun ve ağır metallerin giderimi üzerine yoğunlaşmakta, hatta bu amaçla uygulanan arıtım işlemleri toplam çözünmüş katı içeriğini bazı durumlarda arttırabilmektedir. Mekanik buharlaştırma ve membran prosesler atıksudan toplam çözünmüş katı gideriminde uygulanan arıtma işlemleridir. İleri osmoz kullanılarak yapılan toplam çözünmüş katı madde giderim çalışmasında kirleticilerin yüksek oranda membrandan geçişine izin verilmediği ve su geri kazanımının % 94-96 oranında sağlandığı görülmüştür. Ayrıca ham sızıntı suyunun işlenmesi boyunca akı azalması görülmezken konsantre sızıntı suyu için % 30-50 aralığında akı düşüşü gözlemlendiği kaydedilmiştir [5].

Gıda endüstrisinde içecekler ve sıvı gıdaların konsantre edilmesinde İO işleminin tat, aroma, renk ve besinsel değerlerin yüksek oranda kalmasını sağlayacak düşük ısı ve basınçlarda işlem yapabilme olanağına sahip olması ve potansiyel olarak hidrolik basınçlı membran proseslerine göre düşük membran kirlenmesinin gözlenmesi gibi pek çok avantajları vardır. Ancak İO'un gıda endüstrisinde tam ölçekli uygulanmasının önünde, membran optimizasyonunun bulunmaması ve çekme çözeltisi için etkili bir geri kazanım prosesinin olmayışı gibi bazı engeller vardır [5].

İO prosesi, tıbbi ilaçların içindeki ilgili bileşiklerin doğal yapısı bozulmadan yoğunlaştırılması ve protein bakımından zenginleştirilmesinde başarıyla kullanılmış ve portakal kabuğu sıkma sıvısını susuzlaştırmak için bir alternatif olarak sunulmuştur [4], [41]. Son zamanlarda İO-MD kombine uygulaması ile protein çözeltilerinin sürekli işletme şartları altında kararlı bir şekilde işletilebileceği belirlenmiş ve yakın bir gelecekte ilaç veya protein çözeltilerinin konsantre edilmesi için gelecek vaat eden bir bütünleşik membran sistemi olduğu ifade edilmiştir [40].

2.1.1.3. Deniz Suyu Arıtımı Uygulamaları

Günümüzde kullanılan saflaştırma işlemleri, su kaynaklarının azalmasına bağlı olarak deniz suyu ve hafif tuzlu su gibi alternatif kaynaklardan temiz su elde etme düşüncesini benimsemektedir. Saflaştırma uygulamaları, ters osmoz sonucu ortaya çıkan konsantre atığın bertaraf maliyeti ve alıcı ortam üzerine olan etkileri nedeniyle sınırlanmaktadır. Sahil bölgelerinde işlem sonucu ortaya çıkan konsantre atık denize deşarj edilmektedir. Ancak sahilden uzak iç kesimlerde, saflaştırma sistemleri, atık hacmini azaltmak için atığın kanalizasyona veya yüzey sularına verilmesi, elektrodializ kullanarak konsantre edilmesi gibi çeşitli arıtım seçeneklerini kullanmaktadır. Bu seçenekler özellikle sahilden uzak iç kesimlerde bulunan saflaştırma işletmelerinde toplam saflaştırma maliyetinin önemli bir kısmını oluşturmaktadır [37].

İleri osmoz, deniz suyunun tuzsuzlaştırılması alanında artarak önem kazanan bir teknolojidir. Yapılan bir çalışmada, deniz suyunun arıtımında, farklı amonyak-karbondiyoksit çekme çözeltileri ve farklı membranlara bağlı ileri osmoz prosesinin performansı incelenmiştir. Kullanılan çekme çözeltileri karşılaştırıldığında, amonyak karbondiyoksit yerine, selüloz triasetat membranının beklenenin aksine şeker çözeltisiyle daha yüksek akıya sahip olduğu görülmüştür. Eğer yine de amonyak karbondiyoksitin çekme çözeltisi olarak kullanılması gerekiyorsa da, % 40'lık daha yüksek akı vermesi sebebiyle amonyum karbonatın tercih edilmesi gereği vurgulanmıştır. Farklı membranların performansları çalışıldığında ise, İO membranının diğer iki nanofiltrasyon membranına göre daha etkin bir performans sunduğu tespit edilmiştir. İO membranı aynı zamanda iç konsantrasyon polarizasyon açısından daha düşük bir kirlenme sergilemiştir [25].

[12], yaptıkları çalışmada, deniz suyu desalinasyonu için ileri osmoz ve ters osmoz kombine bir sistem olarak kullanmışlar ve bu çalışmada basit bir film teori modeli uygulanmıştır. Bu çalışma ile, ileri osmoz ve ters osmoz proseslerinin etkilerinin incelenmesi ve sonuçta deniz suyu tuzsuzlaştırılmasında optimum İO ve TO hibrit sistemi geliştirmek amaçlanmıştır. Film teori modelinin deneysel İO verileriyle daha iyi uyum sağladığı belirlenmiştir. İO modunda TO membranının süzüntü akısının, iç konsantrasyon polarizasyondan dolayı 3 M çekme çözeltisi ile 3 L/m².sa'ten daha az olduğu tespit edilmiştir. Beslemede tuz konsantrasyonu artarken, süzüntü akısı, yüksek konsantrasyonlardaki çekme çözeltisinde bile azalmıştır. Artan çapraz akış hızı, konsantrasyon polarizasyonunun artmasıyla daha yüksek bir akı ile sonuçlanmıştır. Yine araştırmaya göre, İO ve TO'nun kombinasyonu ile, yalnızca İO ya da sadece TO sistemlerinden daha iyi bir performans sağlanabileceği ortaya konmuştur. Çünkü İO ve TO'nun birlikte kullanımında belirli bazı işletme şartlarında süzüntü akısında artış sağlanmakta olduğu görülmüştür.

Son zamanlarda laboratuvar ölçekli çalışmalarda, uygun bir İO membranı (örneğin: CTA membran) ve güçlü bir çekme çözeltisi kullanıldığında, deniz suyunun İO ile etkili bir şekilde arıtıldığı açıklanmıştır [27]-[29]. [28], yapılan çalışmada, çekme çözeltisi özel oranlarda amonyum hidroksit ve amonyum karbonatla karıştırılarak amonyum bikarbonat, amonyum karbonat ve amonyum karbamat içeren çekme çözeltisi hazırlanmıştır. Proses analizi tuz konsantrasyonu 2 M olan NaCl ile besleme suyu için 127 bara kadar yüksek ve tuz konsantrasyonu 5 M olan NaCl ile besleme suyu için 238 bar kadar yüksek bir osmotik basınç sürücü kuvvetinin, amonyak/karbondioksit çekme çözeltisi ile de elde edilebileceğini ortaya konmuştur. Deniz suyunun tuzsuzlaştırılmasında 2 M NaCl düşünüldüğünde, yaklaşık % 70 su geri kazanımında oldukça yüksek bir itici güçtür. Bu sistemde su seyreltilmiş amonyak-karbondioksit çekme çözeltisinden ve deniz suyundan alınabilmektedir. Yaklaşık 60 °C civarında ısıtıldığında, çekme çözeltisi amonyak ve karbondioksite ayrılır. Seyreltilmiş çekme çözeltisinden temiz ürün suyunun ayrılması çeşitli ayırma metodlarıyla (örnek: kolon distilasyonu veya membran distilasyon (MD)) elde edilebilir. Geride kalan amonyak ve karbondioksit gazları çekme çözeltisine alınmış nihai çözelti, saf ürün sudur ve distilat, İO tuzsuzlaştırma prosesinde yeniden kullanım için uygun, yeniden konsantre edilmiş bir çekme çözeltisidir. Laboratuvar ölçekli İO verileri göstermiştir ki, amonyak karbondioksit

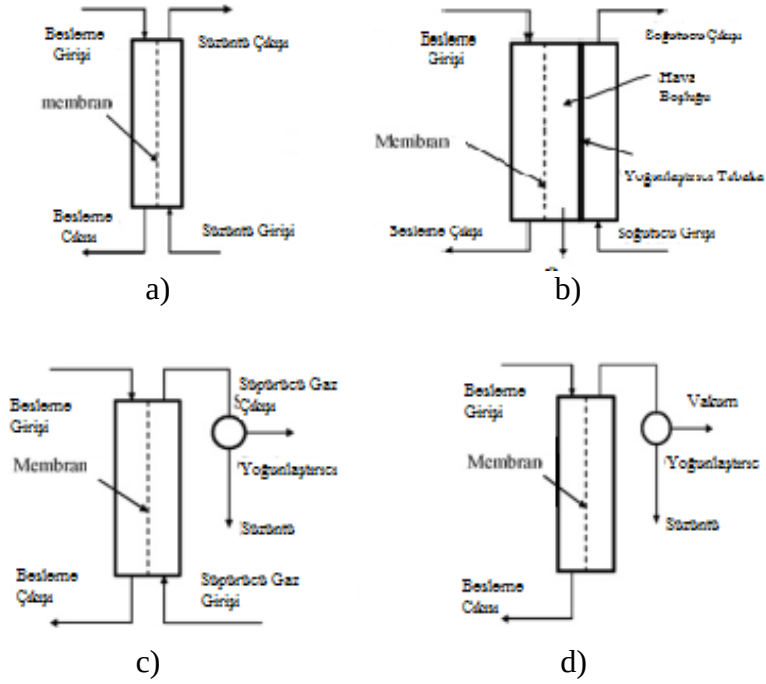
prosesi uygulanabilir bir tuzsuzlaştırma prosesidir. Tuz rejeksiyonu % 95'ten daha fazla ve 25 L/m².sa gibi yüksek akılar, 200 bardan daha fazla hesaplanmış bir itici güçle İO CTA membranıyla elde edilebilmiştir. Tüm bunların sonucunda, İO'nun eksiklikleri, yüksek performanslı bir membran gerektirmesi ve çekme çözeltisinin kolayca ayrılabilir olmasının gerekliliği olarak saptanmıştır. Dahası, İO prosesi doğrudan deniz suyundan su eldesi amaçlı kullanılacaksa ve özellikle yüksek su geri kazanımı istendiğinde, çekme çözeltisinin deniz suyundan çok daha yüksek bir osmotik basınca sahip olması kaydıyla bu prosesden faydalanabileceği sonucuna varılmıştır.

2.1.2. Membran Distilasyon (MD) Prosesi

Membran distilasyonu, sürücü kuvveti sıcaklık olan bir membran prosesi çeşididir. Membran distilasyonunda mikro gözenekli hidrofobik membran yardımıyla sıcak ve soğuk su akışı birbirinden ayrılır. Hidrofobik yapıdaki membran, sıvı haldeki su akışının gözeneklerden geçmesini engellerken su buharının geçmesine izin verir. Sıcaklık farkı ile su buharının membran üzerinden geçmesi ve soğuk yüzey ya da alan üzerinde yoğunlaşması sağlanarak buhar basıncı farkı meydana gelir. Sonuç olarak, uçucu olmayan bileşenlerin sürüklenmesine veya su buharına karışmasına izin verilmeyerek, geleneksel distilasyonun aksine çok yüksek saflıkta süzüntü/distilat elde edilir [10].

2.1.2.1. MD Teknolojileri

MD proseste süzüntü toplama çeşidi, membran kütle transferi ve sürücü kuvvet uygulama şekillerinde gösterdiği farklılıklar sayesinde çeşitli yöntemler ile gerçekleştirilebilmektedir. Proses yapılandırmasına bağlı olarak, 4 çeşit MD sistemi bulunmaktadır. Bunlar; direkt temas membran distilasyonu (DTMD), hava geçişli membran distilasyonu (HGMD), süpürücü gaz membran distilasyonu (SGMD) ve vakum membran distilasyonundan (VMD) oluşmaktadır (Şekil 2.3) [23].



Şekil 2.3: 4 farklı MD teknolojisinin şematik gösterimi, a)DTMD b)HGMD c)SGMD d)VMD.

2.1.2.1.1. Direkt Temas Membran Distilasyonu (DTMD)

DTMD konfigürasyonunda iki ayrı hazne mikro gözenekli bir membran aracılığıyla ayrılır. Yüksek sıcaklıktaki besleme akımı ve düşük sıcaklıktaki süzöntü akımı iki hazneden birbirlerine aynı veya çapraz olacak şekilde bir akış gösterir. Besleme tarafında sıvı-buhar ara yüzeyi içinde, daha fazla uçucu olan bileşenler buharlaşır ve membrandan süzöntü tarafındaki sıvı-buhar ara yüzeyine geçerek yoğunlaşır. Burada “direkt temas”, haznelerdeki besleme ve süzöntü sıvılarının membran ile direkt temasını ifade etmektedir. DTMD laboratuvar içinde montaj kolaylığı ve diğer MD konfigürasyonlarına göre yeterli düzeyde yüksek akıya sahip olmasından dolayı 4 MD teknolojisi arasında en kapsamlı ve en çok çalışılan konfigürasyon çeşididir. Bununla birlikte, endüstriyel bazda düşünüldüğünde, DTMD uygulamasının bazı dezavantajları bulunmaktadır. Bunlardan ilki, DTMD’lerde, soğutma haznesindeki süzöntü akısının membranla direkt temas halinde olmasından dolayı ısı kaybı diğer konfigürasyonlara göre daha fazladır. Bu yüzden DTMD’lerde termal etkinlik diğerlerine oranla daha küçüktür. Bu da maliyeti arttıran önemli faktör olmaktadır. İkinci olarak işletimin çalıştırılmasında soğutma

haznesi üzerinden akış gerçekleşirken, membranla direkt temasını sağlamak için önceden yeterli seviyede süzüntü sıvısı hazırlanmalıdır. İkinci adımda yeterli süzüntü sıvısı hazırlanarak soğutma odasına beslenir ve membranla doğrudan temas edecek şekliyle işletimi sağlanır. Son olarak, yoğunlaşma, soğutma haznesinde sıvı ile karışık olduğundan dolayı, membranda sızıntı veya ıslanmayı tespit etmek kolay değildir. Bütün bunlara rağmen, sahip olduğu büyük avantajlardan dolayı DTMD, tuzsuzlaştırma veya portakal suyunun üretimi gibi ana süzüntü bileşeninin su olduğu sulu çözeltilerin konsantre edilmesi işlemleri için uygun bulunmaktadır.

2.1.2.1.2. Hava Geçişli Membran Distilasyonu (HGMD)

Hava geçişli membran distilasyon konfigürasyonunda, soğutma haznesi membrandan bir plaka yardımıyla ayrılarak arada bir hava boşluğu oluşturulur. Bu yapılandırma, membran gözeneklerinden dışarı geçiş yapan buhar molekülleri hava boşluğundan geçmek zorunda bırakılır ve sonrasında plaka üzerinde yoğunlaşır. Yoğunlaşan kısım yerçekimi etkisiyle hava boşluğundan atılır. Soğutma haznesinde buharın sıvıya yoğunlaşması sırasında açığa çıkan gizli ısıyı (latent heat) gidermek için soğutma suyu kullanılır. Hava boşluğunda bulunan durgun havanın varlığı kütle transferinde membrandan düşük kütle akısı geçmesine neden olan yeni bir direnç meydana getirir. Çünkü çoğu zaman hava boşluğunun kalınlığı membrandan çok daha fazladır. Dolayısıyla HGMD’de hava boşluğundan taşınım süreci genellikle kontrol edici basamağı oluşturmaktadır. Buna rağmen, havanın düşük ısı iletkenliğinden dolayı, hava boşluğu (ısı iletimi sırasındaki) ısı kaybını bir hayli düşürmektedir. Bu nedenle HGMD’de termal etkinlik, DTMD’den daha büyüktür. Ürünün direkt elde edilebilmesinden dolayı, ürün kompozisyonu analiz edilerek bir membran sızıntısı veya ıslanması olup olmadığına karar vermek kolay olur. Diğer taraftan, diğer MD konfigürasyonları ile kıyaslandığında, HGMD ürünü tam ve doğru bir şekilde tartılabilmektedir. Bu avantajlar, HGMD’yi deneysel çalışmalarda öne çıkarmaktadır. DTMD’nin uygulama yelpazesi genişliğinin yanı sıra, HGMD sulu çözeltilerden uçucu iz bileşenlerinin giderilmesinde de kullanılabilmektedir.

2.1.2.1.3. Süpürücü Gaz Membran Distilasyonu (SGMD)

Yukarıda da bahsedildiği gibi HGMD'nin DTMD'den avantajı, süzüntü tarafında oluşan hava boşluğu sebebiyle yüksek termal verimliliğe sahip olmasıdır. Buna rağmen, bu avantaj düşük kütle transfer katsayısı ile dezavantaja dönüşebilmektedir. Çünkü durgun havanın varlığı kütle transferinde yeni bir direnç oluşturmakta ve hava boşluğundan taşınım süresince kontrol edici basamak olmaktadır. Bu sorunun üstesinden gelmek için uygulanan bir yaklaşım, bu bölgedeki kütle transferinin geliştirmesi (arttırılması) üzerinedir. SGMD'de bu olay, soğutma haznesi içerisine hava gönderilerek (blowing air) ve membran ve yoğunlaşma yüzeyinin durgun bir hava ile bölünmesi yerine membran yüzeyi boyunca teğetsel (tangentially) bir hava akışı oluşturulması ile gerçekleştirilir. Böylece durgun hava tabakası ile kıyaslandığında, hava akımındaki kütle transferi daha iyi hale getirilmiş olur. Uçucu bileşenlerin buharı hava akımı ile hazne dışarısına alınır ve sonrasında harici bir yoğunlaştırıcıda yoğunlaştırılır.

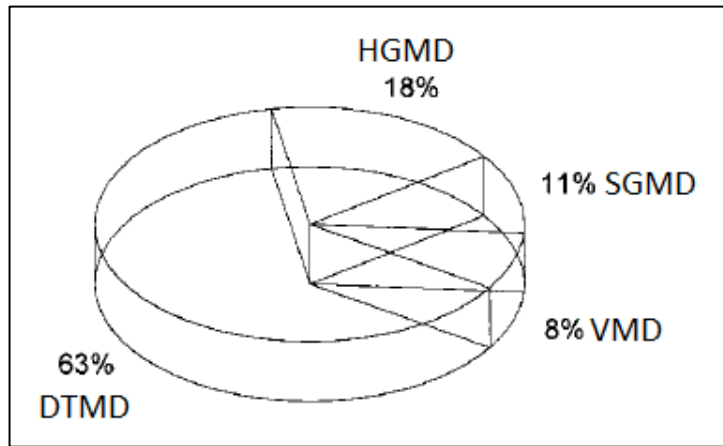
Dolayısıyla, SGMD, yüksek kütle transferi katsayısına sahip DTMD ve düşük ısı kayıplı HGMD'nin bir kombinasyonu olarak görülebilir. Buna rağmen, SGMD üzerine çok az bir çalışma yapılmıştır. Bunun sebebi olarak süzüntünün harici bir yoğunlaştırıcıda toplanması, önemli süzüntü miktarına ulaşabilmek için büyük süpürücü gaz akışı gereksinimi ve gaz taşınması ile ilgili ekstra maliyet harcanması gösterilebilmektedir. SGMD sulu çözeltilerden çözünmüş gazların veya uçucu organik bileşenlerin giderimi için uygun kullanım alanına sahiptir.

2.1.2.1.4. Vakum Membran Distilasyonu (VMD)

VMD'de, membran yüzeyi ile direkt temas halinde bulunan besleme çözeltilisinin basıncı minimum giriş basıncından (LEP) daha düşük seviyelerde tutulmakta; membranın diğer tarafında, süzüntü basıncı ise genellikle bir vakum pompasıyla denge buhar basıncının altında korunmaktadır. SGMD'ye benzer olan bu konfigürasyonda, süzülen buharın soğutma haznesinde yoğunlaştırılması yerine vakum ile dışarı alınması sağlanarak harici bir yoğunlaştırıcıda yoğunlaşması gerçekleştirilmektedir. Membranın iki tarafı arasındaki toplam basınç farkı gözeneklerden kütle akışı taşınımına neden olur ve bu VMD'nin toplam kütle

transferine katkıda bulunur. Buna karşılık, DTMD ve HGMD’de membran gözenekleri içerisinde uçucu bileşenlerin sadece difüze akısı bulunmaktadır. Dolayısıyla, VMD’nin kütle akısı genellikle diğer MD konfigürasyonlarından daha büyüktür. VMD’nin diğer bir avantajı membranın süzöntü tarafında çok düşük basınç olmasından dolayı, membrandan ihmal edilebilir bir ısı iletiminin gelmesidir. Bu avantaj VMD’yi yüksek termal etkinlikle yapmaktadır. Bununla birlikte, VMD’yi açıklayan matematiksel model basittir.

Şekil 2.4’de, 2005 yılına kadar yayımlanmış kaynaklarda, farklı MD konfigürasyonlarının yüzdeleri verilmektedir. DTMD’nin daha fazla kullanılmasının nedeni olarak kurulumun kolay gerçekleşmesi ve kabul edilebilir bir kütle akısına sahip olması gösterilebilmektedir. VMD ise en az çalışılmış konfigürasyon çeşididir. Bunun nedeni olarak ise bir vakum ekipmanına ihtiyaç duyulması ve membran boyunca kütle akısının ölçüm zorluğunun olması gösterilebilmektedir [23].



Şekil 2.4: 2005 yılına kadar yayımlanmış kaynaklarda, farklı MD konfigürasyonlarının yüzdeleri.

2.1.2.2. Çeşitli MD Uygulamaları

Tuzsuzlaştırma için membranın diğer tarafında bulunan su ile besleme suyu arasında oluşan buhar basıncı farkı ana sürücü kuvveti oluşturur iken diğer tuzsuzlaştırma proseslerinde sürücü kuvvet toplam basınçtır. Su kaynağı ısıtıldığı zaman buhar basıncı eğimi oluşturulur. Membran distilasyonunun avantajları ise şu şekildedir:

- Onarım ve bakım 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

Membran distilasyonu birbirinden farklı tuzsuzlaştırma teknolojileri arasında düşük enerji ihtiyacı, düşük işletme basıncı ve sıcaklığı, ters osmoz ve distilasyon gibi geleneksel teknolojilere göre daha düşük maliyetli bir alternatif olması ile ön plana çıkmaktadır. Membran distilasyonu kalıcı organiklerin hepsini gidererek içme suyu eldesinde etkili saflaştırma işlemlerinde kullanılabilmektedir [34].

MD teknolojisi, endüstrilerin tasarruf ettiği ve geliştirmekte olan süreçlere yatırım için istekli olmadığı zamanlarda gündeme gelmiş bir teknolojidir. Bazıları bunu sıcaklık/konsantrasyon polarizasyonunun ve yüzey membran kirlenmesinin yetersiz bir şekilde anlaşılmasına bağlamıştır. Diğer MD araştırmacıları, MD'nin ısı transferi anlayışının hala noksan olduğunu iddia etmektedirler ve diğerleri bunun MD membranlarının ve modüllerin dizaynına ve gelişimine bağlamaktadır. Bununla birlikte, membran distilasyonunun endüstriyel olarak uygulanmasından önce uzun dönemli MD performansı, membran kirliliği, MD membranları ve modüllerinin mühendisliği, enerji ve bakım maliyeti analizleri, özellikle membran gözenek boyutunun MD çeşidinin debisinin değişimi üzerindeki etkisi için sistemik bir çalışma ihtiyacı, teorik ısı ve kütle transferi modellerinde bazı bakışlar ve ek olarak gözenek çarpıklılığının bütün MD konfigürasyonlarındaki debi çeşitlerinin üzerindeki etkisini içeren çeşitli MD sorunlarının çok kapsamlı bir şekilde araştırılması gerektiği belirtilmektedir [3].

Laboratuvar ölçekli çalışmalarda MD proseslerinin başarıyla uygulandığı alanlar, Tablo 2.1'de özetlenmiştir.

Bir MD prosesinde birim su üretim maliyeti, membran maliyetine çok hassas olarak bağlı olmakta ve örneğin DTMD tesisi için membran maliyeti, toplam yatırım maliyetinin yaklaşık % 50'sini ve işletme/bakım maliyetlerinin yaklaşık % 30'unu oluşturmaktadır. Bu da daha ekonomik MF membranı üretilmesinin, prosesi ne kadar

ekonomik seviyelere çekebileceği ve MD prosesinin pratiğe dönüştürülmesinin önünü açacağı hakkında önemli bir fikir sunmaktadır [3].

Tablo 2.1: Laboratuvar ölçekte MD proseslerinin başarıyla uygulandığı alanlar.

Uygulama Alanı	DTMD	HGMD	SGMD	VMD
Acı sudan saf su üretimi ve tuzsuzlaştırma	✓	✓	✓	✓
Nükleer Endüstri (Radyoaktif çözeltilerin konsantrasyonu ve atıksu arıtımı; saf su üretimi)	✓			
Tekstil Endüstrisi (Boyaların giderimi ve atıksu arıtımı)	✓			✓
Kimya Endüstrisi (Asitlerin konsantrasyonu, sudan uçucu organik karbon giderimi, alkol/su karışımı gibi azeotropik sulu çözeltilerin ayırımı ve kristalleştirme)	✓	✓	✓	✓
Farmasötik ve Biyomedikal Endüstriler (Kandan ve protein çözeltilerinden su giderimi, atıksu arıtımı)	✓			
Besin Endüstrisi (Meyve suyu konsantrasyonu ve süt işleme) ve akışkan proseslerinin bozunumuna sebep olan yüksek sıcaklık uygulamalarının olduğu alanlar	✓	✓		✓

2.1.2.3. Deniz Suyu Arıtımı Uygulamaları

Deniz suyu distilasyonu ve tuzsuzlaştırma işlemi için membran distilasyonu oldukça yeni bir prosestir. Yüksek saflıkta su üretimi, demineralizasyon ve deniz suyunda içme suyu eldesi günümüzdeki ana membran distilasyonu uygulamaları olmakla birlikte, MD prosesi ile uçucu olmayan çözünmüş bileşiklerin %100'ü rejekte edilebilmektedir. 1982'den itibaren, Gore, NaCl sulu çözeltilerinin tuzsuzlaştırılması için iki farklı membran distilasyonu modülü kullanımını önermektedir. Bunlar hava geçişli membran distilasyonu için tabaka membran (üretim hızı: 7 L/m².sa, T_{besleme}=30⁰C, T_{distilat}=20⁰C) ve spiral sarımlı modül (üretim hızı: 3 L/m².sa, T_{besleme}=30⁰C, T_{distilat} =20⁰C) 'den oluşmaktadır. Birkaç yıl sonra, tuzsuzlaştırma prosesleri için membran distilasyonu kullanımı ile ilgili literatür bilgileri katlanarak bir artış göstermiştir. Yapılan bir çalışmada, yüksek NaCl içeren çözeltiden (NaCl brine) saf su elde edimi için mikro gözenekli PTFE membranlar ile direkt temas membran distilasyonu uygulanmıştır. Bu çalışmada sıcaklığın,

akışkanlar dinamiğinin ve tuz konsantrasyonunun sistem verimliliğine etkisi araştırılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre, besleme konsantrasyonunu 0,5 mol/L'den 2 mol/L'ye çıkartıldığında akı değerinde %20'lik bir azalma olur iken besleme akımı sıcaklığı 30 °C'den 50 °C'ye çıkartıldığında membran geçiş akısında yaklaşık %100'lük bir artış gözlemlenmiştir [13].

[1]'de yapılan çalışmada, PVDF membran tabakalarında tuzsuzlaştırma deneyleri için hava geçişli membran distilasyonu kullanılmıştır. TÇK değeri 5 ppm'den daha az olan yüksek saflıkta su elde edilmiştir. [32]'de yapılan çalışmada, TRNSYS solar simülasyon sistemi ile birleştirilmiş membran distilasyon modeli geliştirilerek, direkt temas membran distilasyonu ve güneş enerjisinin birlikte kullanımı araştırılmıştır. Bu çalışma, %60-80 geri kazanım ile güneş enerjili tesisin ekonomik fizibilitesini ispatlamıştır. Yakın zamanda, süzüntü akısının tuzlu suyun sıcaklığına, debiye, tuz konsantrasyonuna ve güneş ışınımına karşı duyarlılığı değerlendirilmiştir [2]. Solar demir çeliği ve membran modülü tarafından aynı anda temiz su üretilmiş ama solar çeliğin katkısı toplam akının %20'sinden fazla olmamıştır. [22]'de yapılan deneysel analizlerde, 75 °C besleme, 20 °C distilat sıcaklığı ve 2,0 mol/m².s'ye ulaşan akı değerleriyle deniz suyu arıtımında direkt temas membran distilasyonunun uygulanabilir bir proses olduğu gösterilmiştir. Burada uygulanan akı değerleri pratikte ters osmozda elde edilen akı değerlerinden iki kat daha büyüktür. Ayrıca süzüntü akımında gerçekleştirilen konsantrasyon ölçümleri NaCl moleküllerinin rejeksiyonunun yalancı toplamını açığa çıkarmıştır. [36]'da yapılan çalışma sonucunda, deniz suyu tuzsuzlaştırma işleminde termal membran distilasyonunun büyük ölçekli çoklu etkili buharlaştırıcılar ile rekabet edemeyeceği bildirilmiştir. Basit tasarımlı ve kolay kullanım sağlayan ve atık ısıyı değerlendiren küçük ve taşınabilir tuzsuzlaştırma üniteleri MD'nin yer alabileceği piyasa talebine uygun olarak belirlenmiştir. Membran distilasyon/kristalleştirme teknolojisinin gelişmesi için en ilginç bakış açısı diğer basınç sürücülü geleneksel membran teknolojilerinin kombine edilmesi imkânı ile bağlantılıdır. [14]'de yapılan çalışmada, tuzsuzlaştırma tesislerinde su geri kazanım faktörünün artırılması için ters osmoz ve membran distilasyonunun entegre edilme imkanı önerilmiştir. Bu iki membran ünitesinin birbirine bağlanmasıyla, genel geri kazanım faktörü %87,6 olarak elde edilmiştir ve ayrıca tuzlu su deşarjının azalmasıyla çevresel etkinin de azalması beklenmektedir. Eğer membran distilasyon ünitelerinin yerine membran

kristalizörler yer alırsa, rejekte edilen tuzlu su çekirdeklenme ve sodyum klorür kristallerinin büyümesini iletirmek için daha fazla konsantre edilebilmektedir [13].

Entegre NF/TO/MD sistemi üzerine gerçekleştirilmiş ayrıntılı enerji ve ekserji analizleri tesisin işletilmesi için 13 kWh/m³'e ihtiyaç duyulduğunu göstermiş, fakat bu değer düşük seviyeli termal enerji mevcut ise 2,6 kWh/m³'e düşürülebilmektedir. Bu durumda, toplam işletme maliyeti 0,56 \$/m³'dür. Gaz-sıvı membran kontaktörü, geleneksel bir çöktürücü ve bir membran kristalizörünün birlikte kullanımı deniz suyunda bulunan tuzların geri kazanımı için nanofiltrasyonun süzülmeyen kısmına başarıyla uygulanmıştır. %89'a kadar kalsiyum karbonat giderilmiş; NF süzülmeyen kısmının hacmi başına (m³), 35,5 kg NaCl ve 8,4 kg MgSO₄.7H₂O elde edilmiştir. Ayrıca, membran kristalizörde distilat kısmında yoğunlaşan su miktarı NF geri kazanım faktörünün %64'den %95'e çıkmasına mücade etmiştir [13].

Vakum destekli DTMD ve İO prosesleri ile ortalama toplam çözünmüş katı madde konsantrasyonları 7500 ve 17.500 mg/L olan TO prosesi konsantrelerinin tuzsuzlaştırılması üzerine çalışılmıştır. Bu çalışmayla, her iki TO konsantresinde de, yüksek bir su kazanımı elde edilmiştir. Membran yüzeyinde inorganik tuzların çökmediği (scaling) belirlenmiştir. Çeşitli temizleme teknikleriyle membran yüzeyindeki bu katmanın kaldırıldığı ve neredeyse başlangıç seviyelerinde su akısının elde edildiği görülmüştür. Sonuçta, TO konsantrelerinden, İO ile % 90'a, vakum destekli DTMD ile % 81'e varan seviyelerde su kazanımı elde edilebilmiştir [26].

[35]'de yapılan çalışmada, besleme çözeltisi olarak ikincil arıtma çıkış suyu ve çekme çözeltisi olarak kızıl deniz suyu kullanılarak, İO ve TO prosesleri, düşük basınç TO uygulaması şekliyle bütünleşik olarak uygulanmıştır. Sistemin, yüksek basınçlı TO desalinasyonu (2,5–4 kWh/m³) için gerekli enerjinin sadece % 50'sini (~1,5 kWh/m³) tükettiği belirlenmiş ve iyi kalitede su üretimi sağlanmıştır. On dört günü aşkın bir süre uzun vadeli deneyler sırasında İO membranlarındaki kirlenmenin, önemli düzeylere ulaşmadığı belirlenmiştir. İO prosesinde 10. günden sonra, başlangıç akısı % 28 azalmıştır. İO membranlarının hava (air scouring) ve temiz su ile temizlenmesiyle İO başlangıç akısı, % 98,8'lere kadar geri kazanılabilmektedir. İO membran modülü, TO prosesi besleme tankında batık olarak uygulanmış ve akış sadece tankta karıştırma ile sağlandığından yüksek İO akısı elde edilememiştir. UF ve düşük basınç TO kombinesiyle suyun yeniden kullanımına kıyasla, ortalama

minimum 10,5 L/m².sa İO akısı ile önerilen sistemin ekonomik uygulanabilir olacağı tespit edilmiştir. Bununla beraber, 5,5 L/m².sa'lık bir İO akısının, deniz suyu TO prosesinden daha düşük maliyetle geri kazanıma dayalı su eldesi yapılabilmesi için yeterli olduğu ortaya koyulmuştur.

2.2. Literatür Değerlendirmesi

Son yıllarda TO metodu, içme suyundan koku, tat, renk, çözünmüş madde ve sertlik gidermede ve içme suyunun kısıtlı olduğu yerlerde deniz suyundan tatlı su elde edilmesinde, yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Çeşitli nitelik ve ölçekte uygulamalarına karşılık, membran yüzeyinde ve içerisinde meydana gelen tıkanma ve kirlenmeler prosesin işletme etkinliğini kısıtlayan en önemli faktör olmaktadır [33].

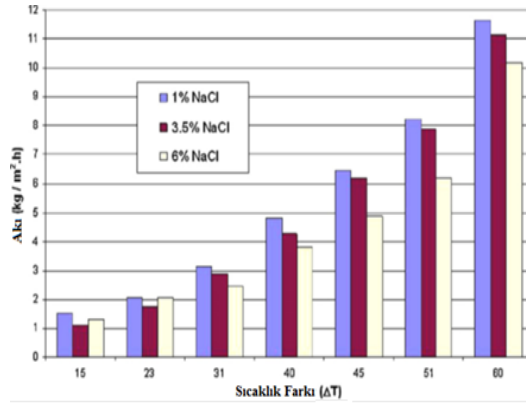
Yaygın kullanımına ve çok yüksek miktarlarda su eldesi amacıyla deniz suyundan içme suyu elde edilmesinde kullanılıyor olmasına rağmen, TO prosesinin, pratikte ortaya koyduğu bazı önemli dezavantajları bulunmaktadır. Bunlar; (i) diğer deniz suyu tuzsuzlaştırma prosesleri için de geçerli olmak üzere atmosfere sera gazı salınımlarını arttıran yüksek enerji tüketim miktarları ve (ii) bertarafı çevresel açıdan oldukça zor olan, deniz ortamına verildiğinde deniz ekolojisi ve biyotası üzerinde olumsuz etkilere sebep olabilen ve bugün itibariyle halen daha çevreye zarar vermeksizin bertarafı pratikte çözümlenememiş bir problem olarak karşımızda duran yüksek tuz ve çeşitli arıtma kimyasalları içerikli deniz suyu konsantresidir [17], [21]. Bunların yanı sıra, proseste yüksek bor giriş konsantrasyonu değerlerinde arzu edilir seviyelerde bor giderimi elde edilememesine bağlı olarak, TO sonrası ilave bor giderimi uygulaması gerekli olabilmektedir (WHO içme suyu bor konsantrasyonu 0,5 mg/L, deniz suyu tipik bor değerleri 1-5 mg/L) [38]. Her ne kadar, beslemede pH kontrolü, ön arıtma uygulamaları, yeni tasarım ve geri yıkama/temizleme stratejileri geliştirilmesi, yenilenebilir enerji kaynakları kullanımı vb. uygulamalar ile prosesin daha ekonomik işletilebilmesine yönelik çalışmalar etkin olarak sürmekte ise de; Yüz binlerce metreküp günlük su üretim kapasitesine haiz olan TO tesislerinden kaynaklanan çevresel olumsuzlukların giderilmesine, bugün itibariyle, tam olarak kesin çözümler getirilememiş bulunmaktadır [11], [16], [24]. Pratikte, gelecek vaat eden bir uygulama olarak, İO/TO bütünleşik sistemi ile farklı su kaynakları

kullanılarak deniz suyundan içme suyu eldesi gerçekleştirilmiş, sistemin ekonomik kazanımlar elde edilerek ve konsantre deniz suyu akımı üretilmeksizin, 200 ve 757 m³/gün kapasiteli bir tesiste ekonomik olarak işletilebileceği hesaplamalar ışığında belirlenmiştir [6], [8].

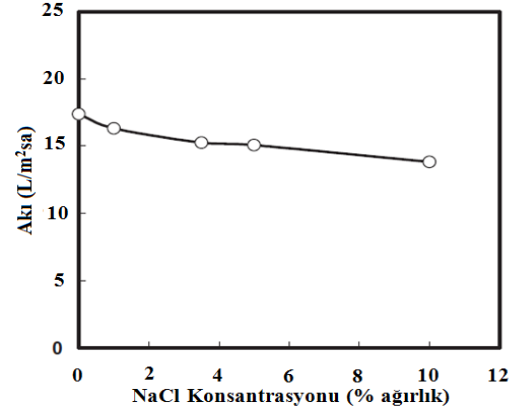
İO-TO ve İO-MD uygulamaları, yenilikçi ve ekonomik uygulanabilir bütünleşik/kombine membran sistemleri olarak son zamanlarda dikkat çekmektedir. İO prosesi ile ön arıtma sağlanarak sonraki adımda TO veya MD prosesinin performansında artış sağlanması, bu sistemleri etkin kılan temel faktör olmaktadır. İO/MD bütünleşik sistem uygulamasının, teorik uygulanabilirliği üzerine bir USA patenti söz konusudur [7]. Yani önerilen sistem, uygulamaya çok değer ekonomik ve çevresel faydalar sağlayacak yenilikçi niteliklere haiz ve konsantre deniz suyu deşarj akımı üretmeyen çevre koruma uygulaması içerikli bir membran arıtma sistemi uygulaması olarak öne çıkmaktadır.

Önerilen sistemle, tek başına MD prosesine nazaran deniz suyundan içme suyu eldesinde başarı elde edilecek olmasına, aşağıda verilen literatür sonuçlarından ulaşılmıştır. Şöyle ki, uygulama amacına bağlı olmakla birlikte, bir membran proseste, besleme akımı tuz konsantrasyonunun azalması ve su geri kazanım oranının artmasıyla, birim zamanda üretilen temiz su hacminin artmasına bağlı olarak, birim su arıtma maliyeti azalacaktır. Bu bağlamda literatür, HGMD prosesinde farklı NaCl konsantrasyonlarında değişen çözelti sıcaklık farkları için (a) ve DTMD prosesinde farklı NaCl konsantrasyonları için elde edilmiş (b) akı grafikleri, Şekil 2.5’de gösterilmiştir [15], [18].

2 farklı MD teknolojisi ile tuzlu sularda elde edilmiş tuz konsantrasyonu-akı grafikleri değişimleri göstermektedir ki, tuz konsantrasyonu 6-10 kat arttıkça, her iki proseste de sadece tuza bağlı olarak yaklaşık % 15-25 aralığında (ortalama % 20 civarında) bir akı azalması söz konusudur. Bu bilgiden, çalışma kapsamında DTMD öncesi deniz suyunun seyreltilmesi ile MD performansında asgari % 20 civarında bir artış beklenebileceği anlamı çıkmaktadır.



a)



b)

Şekil 2.5: MD proste akı-seyrelme İlişkisi, a) HGMD prosesinde farklı NaCl konsantrasyonlarında değişen çözelti sıcaklık farkları için akı grafiği b) DTMD prosesinde farklı NaCl konsantrasyonları için elde edilmiş.

3. MALZEME VE YÖNTEM

3.1. Deneysel Yöntemler

Çalışma kapsamında, İO ve MD prosesindeki deneyler sırasında, besleme ve çekme çözeltisi akımlarında, pH, sıcaklık, iletkenlik, yoğunluk, toplam çözünmüş katı madde, viskozite, osmolalite ve bulanıklık parametrelerinin izlenmesi yapılmıştır. Çekme suyu ve besleme sularının karakterizasyonunda gerçekleştirilmiş olan analizler Tablo 3.1’de verilmiştir.

Tablo 3.1: Her bir besleme ve çekme suyu için İO ve MD prosesinde izlenen parametreler.

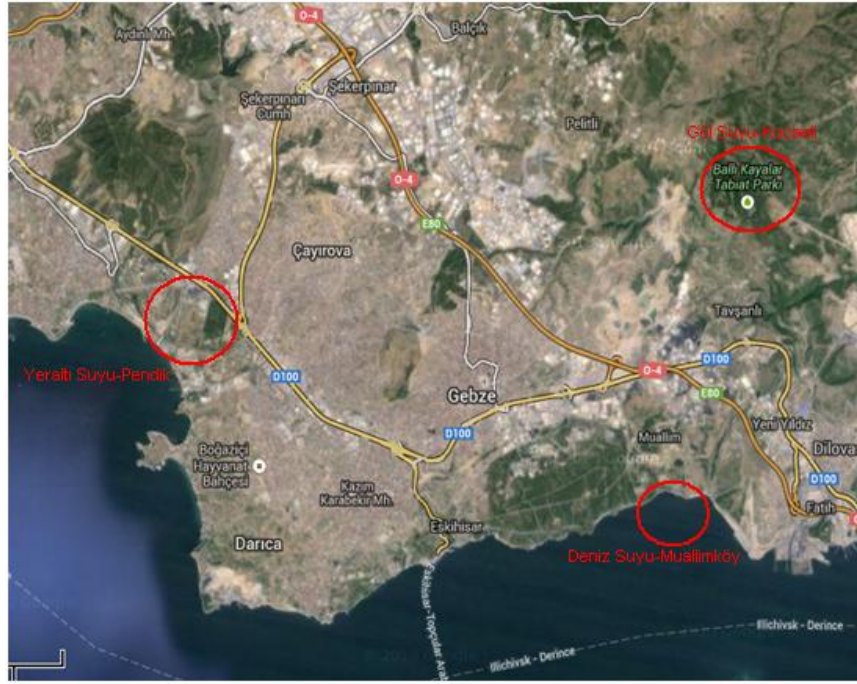
Parametre	Besleme Suyu		Ham Deniz Suyu
	Göl Suyu	Yeraltı Suyu	
KOI ^a	√	√	
TOK ^a	√	√	√
ÇOK ^a	√	√	√
UVA ₂₅₄ ^a	√	√	√
SUVA ^a	√	√	√
Baryum			√
Kalsiyum	√	√	√
Magnezyum	√	√	√
Demir		√	√
Mangan		√	√
Potasyum	√	√	√
Sodyum	√	√	√
Stronsiyum			√
Bor			√
Silisyum	√	√	√
Bikarbonat	√	√	√
Karbonat	√	√	√
Alkalinite	√	√	√
Toplam Sertlik	√	√	√

Tablo 3.1: devam.

AKM	√	√	
Renk	√	√	√
Sülfat	√	√	√
Fosfat	√	√	√
Toplam Fosfor	√	√	√
Klorür	√	√	√
Amonyak	√	√	√
Nitrat	√	√	√
TKN ^a			√
GC-MS ^b	√	√	√
^a KOİ: Kimyasal oksijen ihtiyacı, TOK: Toplam organik karbon, ÇOK: Çözünmüş organik karbon, UVA ₂₅₄ : 254 nm’de morötesi ışık absorbanı, SUVA (L/mg.m): Spesifik morötesi absorpsiyonu (=UVA ₂₅₄ *100/ÇOK), TKN: Toplam Kjeldahl Azotu. ^b GC-MS (Gas Chromatography-Mass Spectrometry): Gaz Kromatografi-Kütle Spektrometrisi.			

3.2. Besleme Sularının ve Çekme Suyunun Karakterizasyonu

Her bir deney setinde, öncelikle çekme suyunun ve kaynağından alınmış olan besleme sularının analizleri, Tablo 3.1’de belirtildiği şekliyle gerçekleştirilmiştir. Deniz suyu GYTE Muallimköy Yerleşkesi-Çevre Mühendisliği Bölümü’nün de yer aldığı Kocaeli/Diliskelesi’ne kıyısı bulunan Muallimköy sahilinden, göl suyu Kocaeli bölgesinde bulunan doğal oluşumlu bir gölden, yeraltı suyu İstanbul/Pendik semtinde evsel ve ticari yerleşim yoğunluklu bir alanda mevcut bulunan bir kuyudan alınmıştır. Alınan besleme sularının ve çekme suyunun yerleri bir harita üzerinde Şekil 3.1’de gösterilmiştir. Distile su hariç diğer besleme sularında ve çekme suyunda gerçekleştirilmiş olan analiz sonuçları Tablo 3.2’de toplu olarak gösterilmiştir.



Şekil 3.1: Kullanılan besleme sularının ve çekme suyunun alındığı merkezler.

Tablo 3.2: Çalışılan besleme sularının ve çekme suyunun özellikleri.

Parametre	Besleme Suyu		Çekme Suyu (Ham Deniz Suyu)	Deniz Suyu Literatür Değeri
	Göl Suyu	Yeraltı Suyu		
Sıcaklık ($^{\circ}\text{C}$)	25,2	24,6	24,1	19,3*
pH	8,04	7,25	8,69	8,1*
İletkenlik ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	297	1093	40.400	49.600*
Yoğunluk (g/cm^3)	0,9969	0,9975	1,0151	1,9**
Bulanıklık (NTU)	3,48	0,51	0,70	1,6*
KOİ (mg/L)	0,8	5,16	n.d	
TOK (mg/L)	9,22	1,28	4,3	0,8*
ÇOK (mg/L)	8,96	1,13	4,1	
UVA ₂₅₄ (cm^{-1})	0,046	0,008	0,050	0,7*
SUVA (L/mg.m)	0,499	0,708	1,220	2,71***
Baryum (mg/L)	n.d	0,034	0,030	0,01*
Kalsiyum (mg/L)	40,7	174	395	441*
Magnezyum (mg/L)	10,05	25,1	696	1371*

Tablo 3.2: devam.

Demir (mg/L)	n.d	0,001	0,007	
Mangan (mg/L)	n.d	0,001	0,018	
Potasyum (mg/L)	23,66	1,2	443	410*
Sodyum (mg/L)	33,55	141,4	8880	10945*
Stronsiyum (mg/L)	n.d	0,83	5,50	6,7*
Bor (mg/L)	n.d	0,29	4,15	5,1*
Silisyum (mg/L)	1,22	8,41	1,08	0,2*
Bikarbonat (mg/L)	113,5	226	300	161*
Karbonat (mg/L)	0,0	0,0	0,0	
Alkalinite (mg/L)	113,5	226	300	
Toplam Sertlik (mg/L)	153,75	549,4	4986	
AKM (mg/L)	4,0	1,0		
Renk (abs)				
436	0,010	0,000	0,030	
525	0,007	0,001	0,002	
620	0,005	0,000	0,003	
Sülfat (mg/L)	80,9	209,2	2314	2965*
Fosfat (mg/L)	0,084	0,0	0,0	0,02*
Toplam Fosfor (mg/L)	0,098	0,0	0,0	
Klorür (mg/L)	13,55	70,9	13.996	20900*
Amonyak (mg/L)	0,15	3,3	< 0,1	
Nitrat (mg/L)	0,17	76,3	0,5	0,2*
Nitrit (mg/L)		0,0	0,0	
TKN (mg/L)	n.d	3,3	0,6	
TN (mg/L)		79,6	1,1	

n.d: ölçülmeyen parametreler için kullanılan kısaltmadır.

*: Jérôme Leparç, Sophie Rapenne, Claude Courties, Philippe Lebaron, Jean Philippe Croué, Valérie Jacquemet, Greg Turner, Water quality and performance evaluation at seawater reverse osmosis plants through the use of advanced analytical tools, Desalination 203 (2007), 243–255.

**: Cecilia M.G. McHugh, Damayanti Gurung, Liviu Giosan, William B.F. Ryan, Yossi Mart, Ummuhan Sancar, Lloyd Burckle, M. Namik Çagatay, The last reconnection of the Marmara Sea (Turkey) to the World Ocean: A paleoceanographic and paleoclimatic perspective, Marine Geology 255 (2008), 64–82.

***: Gianluca Di Profio, Xiaoshen Ji, Efrem Curcio, Enrico Drioli, Submerged hollow fiber ultrafiltration as seawater pretreatment in the logic of integrated membrane desalination systems, Desalination 269 (2011), 128–135.

3.3. Membranlar ve Özellikleri

Deneyisel çalışmalarda kullanılan membranlardan ileri osmoz (İO), ultrafiltrasyon (UF) ve mikrofiltrasyon (MF) membranlarına ilişkin bilgiler Tablo 3.3’de, MD membranlarına ilişkin bilgiler ise Tablo 3.4’de gösterilmiştir.

Tablo 3.3: İO,UF,MF membranları ve özellikleri.

Membran	Üretici Firma	Teknik Özellikler			
		Membran Malzemesi	pH İşletme Aralığı	Tuz Süzme Oranı (%)	Saf su Geçirgenlik Katsayısı, A^b ($m^3/m^2 \cdot h \cdot bar$)
İO	Hydration	Selüloz Asetat	— ^a	95,0	$3,100 \times 10^{-3}$
UP150	Microdyn-Nadir, GmbH-Germany	Polietersülfon (PES)	0-14	-	0,225
MP005	Microdyn-Nadir, GmbH- Germany	Polietersülfon (PES)	0-14	-	0,226
^a veri yok ^b $v=0,6$ m/s, $T=25$ °C şartlarında deneysel olarak belirlenen temiz su akılarından hesap edilmiştir.					

Tablo 3.4: MD membranlarının özellikleri.

Membran	Üretici firma	Teknik özellikler			
		Gözenek boyutu (μm)	Kalınlık (μm)	Temas Açısı ($^\circ$)	Sıvı giriş basıncı (LEP, kPa)
PTFE	Membrane	0,22	160 ± 40	121 ± 10	$121,3 \pm 2,5$
PTFE	Solutions	0,45	160 ± 40	126 ± 10	$81,1 \pm 2,5$

3.4. Kimyasallar

Çalışmada kullanılan kimyasal maddelerin listesi, saflık dereceleri ve temin edildikleri firma isimleri aşağıda verilmektedir.

Sodyum Klorür (NaCl, %99,5-100,5, Merck), Potasyum Dikromat (Cr₂K₂O₇, >%99, BDH Prolabo), Gümüş Nitrat (AgNO₃, Merck), Potasyum Kromat (K₂CrO₄, ≥%99,5, Merck), Fe II Sülfat Heptahidrat (FeSO₄.7H₂O, %101, BDH Prolabo), 1.10-Fenantrolin Monohidrat (Prolabo), Fenolftalein İndikatörü (C₂₀H₁₄O₄, Merck), Sülfirik Asit (H₂SO₄, %95-97, Merck), Hidroklorik Asit (HCl, %37, Merck), Borik Asit (H₃BO₃, %99,5-100,5, Merck), Sodyum Hidroksit (NaOH, ≥%99, Merck), Potasyum Sülfat (K₂SO₄, ≥%99, Merck), Sodyum Tiyosülfat Pentahidrat (Na₂S₂O₃. 5H₂O, %99,5-101, Merck), Metil Kırmızısı (C₁₅H₁₅N₃O₂, Merck), Metil Mavisi (C₁₆H₁₈N₃SCl, Merck), Cıva Sülfat (HgSO₄, Merck), Metil Oranj İndikatörü (C₁₄H₁₄N₃NaO₃S, Merck), Etanol (C₂H₅OH, %95, Merck), Amonyum Klorür (NH₄Cl, ≥%99,8, Merck), Amonyak (NH₃, %25, Merck), Eriochrome Black T (C₂₀H₁₂N₃NaO₇S, Fluka Chemika), Etilen Dinitril Tetra Asetik Asit Disodyum Tuzu (C₁₀H₁₄N₂Na₂O₈.2H₂O, Merck), Gümüş Sülfat (Ag₂SO₄, Prolabo), Amonyum Fe II Sülfat Hekzahidrat (Fe(NH₄)₂ (SO₄)₂.6H₂O, %100,2, Prolabo), Nitrit Kiti (Merck), Sülfat Kiti (Hach Lange), Fosfat Kiti (Hach Lange), TN Kiti (Hach Lange).

3.5. Analitik Yöntemler

3.5.1. Su Kalite Analizleri

Çalışmada su kalite analizleri, ölçüm cihazları, kitler ve standart metotlar kitabında bulunan yöntemler kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışmalar kapsamında analizleri yapılmış olan parametreler için kullanılan ölçüm metotları/yöntemleri Tablo 3.5’de gösterilmiştir.

Tablo 3.5: Su kalitesi analiz parametreleri için kullanılan ölçüm metotları/yöntemleri.

Parametre	Ölçüm Yöntemi
Sıcaklık	Masa üstü multiparametre ölçüm cihazı
pH	Masa üstü multiparametre ölçüm cihazı
İletkenlik	Masa üstü multiparametre ölçüm cihazı
Yoğunluk	El tipi dijital yoğunluk ölçer
Viskozite	Viskozimetre
Çözülmüş oksijen	Masa üstü multiparametre ölçüm cihazı

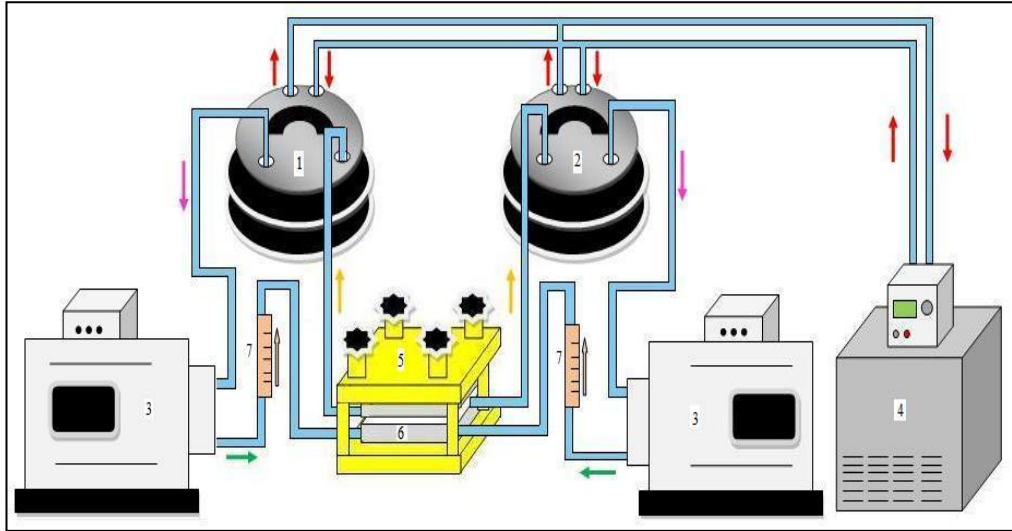
Tablo 3.5: devam.

Osmolalite	Donma noktasının düşürülmesi prensibiyle çalışan osmometre cihazı
Toplam Çözülmüş Katı Madde	Masa üstü multiparametre ölçüm cihazı
Bulanıklık	Türbidimetre
KOİ	5220C kapalı reflux metodu
TOK	Yakma ünitesine sahip tuzlu sularda da yüksek ölçüm performansına sahip TOK cihazı
ÇOK	Yakma ünitesine sahip tuzlu sularda da yüksek ölçüm performansına sahip TOK cihazı
UVA ₂₅₄	UV spektrofotometre cihazı
SUVA	Ölçülmüş UVA ₂₅₄ ve ÇOK değerlerinden birim dönüşümüyle hesapla
Baryum	ICP (Inductively coupled plasma) cihazı
Kalsiyum	ICP (Inductively coupled plasma) cihazı
Magnezyum	ICP (Inductively coupled plasma) cihazı
Demir	ICP (Inductively coupled plasma) cihazı
Mangan	ICP (Inductively coupled plasma) cihazı
Potasyum	ICP (Inductively coupled plasma) cihazı
Sodyum	ICP (Inductively coupled plasma) cihazı
Stronsiyum	AAS (Atomic absorption spectrophotometer) cihazı
Bor	ICP (Inductively coupled plasma) cihazı
Silisyum	AAS (Atomic absorption spectrophotometer) cihazı
Bikarbonat	SM 2320 H ₂ SO ₄ titrimetrik metodu
Karbonat	SM 2320 H ₂ SO ₄ titrimetrik metodu
Alkalinite	SM 2320 H ₂ SO ₄ titrimetrik metodu
Toplam Sertlik	SM 2340C EDTA Titrimetrik yöntemi
AKM	SM 2540 D metodu
Renk	UV spektrofotometre cihazında üç farklı dalga boyunda
Sülfat	UV spektrofotometre cihazı
Fosfat	UV spektrofotometre cihazı
Toplam Fosfor	UV spektrofotometre cihazı
Klorür	Argentometrik Metodu Ölçüm Yöntemi
Amonyak	Amonyak probu
Nitrat	UV spektrofotometre cihazı
TKN	SM 4500 B micro-Kjeldahl metodu

3.6. Deneysel Çalışma Sistemleri

3.6.1. İleri Osmoz Deney Sistemi

Deneysel çalışmalar, Şekil 3.2’de gösterilen laboratuvar ölçekli İO düzeneği kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Düzenek, membran üzerindeki gerilimi azaltmak amacıyla, membran modülde her iki kanaldaki hidrodinamik akış aynı yönde olacağı şekliyle işletilmiştir. Sıvıları pompalamak için iki adet debi kontrollü peristaltik pompa (EW 77111–67, Cole Parmer, IL) kullanılmıştır. Besleme ve çekme hatları üzerinde aynı akış hızlarını sağlamak amacıyla her bir akış hattı, 10 L min⁻¹ maksimum akış hızına sahip iki adet eşdeğer kapasiteli akış ölçer ile donatılmıştır. Proseste, hem besleme (distile su, göl suyu, yeraltı suyu) hem de çekme suyu (deniz suyu) sabit sıcaklık su banyosu ile aynı sıcaklıkta işletilmiştir. Sıcaklık deneylerinde uygulanan sıcaklıklar yine bu su banyoları ile ayarlanmıştır.



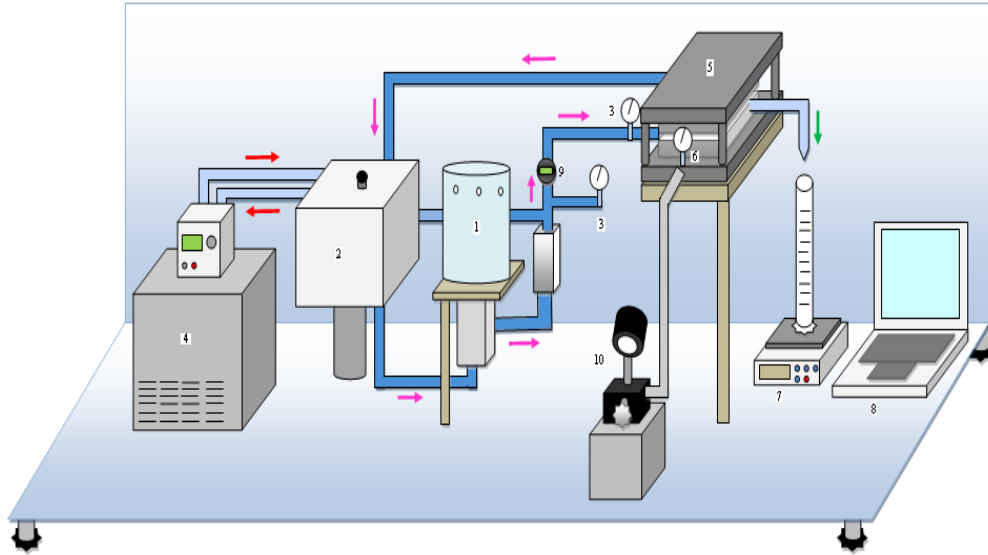
Şekil 3.2: İleri Osmoz Deney Düzeneği, 1) Çekme Çözeltisi Tankı 2) Besleme Tankı 3) Peristaltik Pompa 4) Su Banyosu 5) Membran Modül Sıkıştırıcı 6) Membran Modül 7) Akış Ölçer.

3.6.2. Mikrofiltrasyon-Ultrafiltrasyon Deney Sistemi

MF ve UF deneyleri, laboratuvar ölçeğinde kurulmuş basınç sürücülü membran sistemi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. MF ve UF deneylerinde kullanılan GE

membran modül (GE Osmonics SEPA CF II) patentli ürün olup Amerika'daki ilgili firmadan satın alınmış; basınç sürücülü membran sistemi, bu modülün teknik özelliklerine uygun olarak tasarımı yapılarak sanayide imalatının gerçekleştirilmesi suretiyle teşkil edilmiştir.

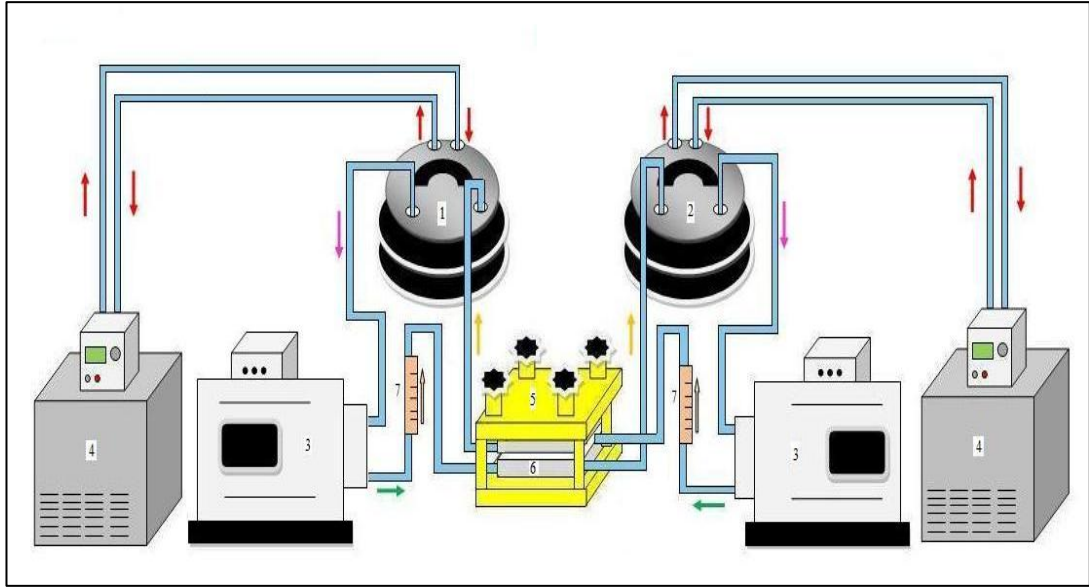
MF/UF sistemi, sıcaklık ayarlamalı ve yerinde pH-iletkenlik ölçümü yapılabilen besleme tankı, 100 bar basma basıncına ve 700 L/sa basma debisine haiz atıksu pompası, pompa gürültü ve titreşim önleme başlığı, akım dağıtıcı ve akış hızı kontrol vanası, dijital akış ölçer, yağ pompası ve GE Osmonics marka membran modülü ile donatılmıştır. Çalışmada kullanılan MF ve UF sistemine ait deney düzeneği, şematik olarak Şekil 3.3'de gösterilmiştir.



Şekil 3.3: MF ve UF Deney Düzeneği, 1)Yüksek Basınç Pompası 2)Besleme Tankı 3)Basınç Ölçerler 4)Su Banyosu 5)Membran Modül Sıkıştırıcı 6)Membran Modülü 7)Terazi 8)Bilgisayar 9)Dijital Akış Ölçer 10)Sıkıştırma Kolu.

3.6.3. Direkt Temas Membran Distilasyon Deney Sistemi

Kesikli DTMD deneylerinde kullanılmış olan deney düzeneği su banyosu ilavesi ve MD modülü değişimi şartında kesikli İO prosesi için kullanılan aynı deneysel düzenektir. Membran modülde her iki kanaldaki hidrodinamik akış çapraz olacak şekilde işletilmiştir. Deney düzeneğin şematik gösterimi Şekil 3.4'de gösterilmiştir.



Şekil 3.4: Kesikli DTMD Deney Düzeneği, 1) Besleme Tankı 2) Süzüntü Tankı 3) Peristaltik Pompa 4) Su Banyosu 5) Membran Modül Sıkıştırıcı 6) Membran Modülü 7) Akış Ölçer.

3.7. Deneysel Çalışma Esasları

3.7.1. İleri Osmoz Prosesi

İÖ prosesinde deniz suyunun seyreltilmesinde izlenen işletme parametreleri ve değerleri, gerçekleştirilen deneysel şartlar ile birlikte Tablo 3.6’da verilmiştir.

3.7.2. Direkt Temas Membran Distilasyon Prosesi

Tekli DTMD prosesinde izlenen ‘deniz suyu seyrelme oranı’ işletme parametresi, %0-10-20-30-40-50 seyrelme oranlarında, PTFE-0,22 μm membran kullanılarak deniz suyu (60 $^{\circ}\text{C}$)- distile su (30 $^{\circ}\text{C}$) ΔT : 30 $^{\circ}\text{C}$ sıcaklık değerlerinde, 270 L/sa (deniz suyu)-360 L/sa (distile su) akış hızlarında ve 5’er L deniz suyu ve distile su hacimlerinde çalışılmıştır. Bu çalışmalarda, deniz suyu doğrudan distile su ile seyreltilmiştir. Ayrıca seyreltilmemiş deniz suyu, %20 oranında doğrudan distile su ile seyreltilmiş deniz suyu, İÖ prosesinde yeraltı suyu ve göl suyuyla %20 oranında seyreltilmiş deniz suyu, PTFE-0,45 μm membran kullanılarak diğer deneysel şartlar aynı kalmak şartıyla DTMD prosesinde çalışmalar yürütülmüştür.

Tablo 3.6: İO prosesinde izlenen işletme parametreleri, değerleri ve deneysel şartları.

İşletme parametreleri	Değerler	Deneysel şartlar
Membranın yerleşme modu	• <u>Normal mod:</u> (membran aktif tabakası çekme suyuna doğru) • <u>Ters mod:</u> (membran aktif tabakası besleme suyuna doğru)	Sıcaklık: 25 °C Çapraz akış hızı: 300 L/sa Deney süresi: 6 sa
Çapraz akış hızı	• 150 L/sa • 300 L/sa • 450 L/sa • 600 L/sa	Yerleşim modu: Ters mod Sıcaklık: 25 °C Deney süresi: 6 sa
Sıcaklığın etkisi*	• 15°C (deniz suyu sıcaklığının kış ayları ortalamasını temsilen) • 20 °C • 25 °C • 30°C (deniz suyu sıcaklığının yaz ayları ortalamasını temsilen)	Çapraz akış hızı: 300 L/sa Yerleşim modu: Ters mod Deney süresi: 6 sa
Ön arıtım işleminin etkisi	• Mikrofiltrasyon • Ultrafiltrasyon	Yerleşim modu: Ters mod Çapraz akış hızı: 300 L/sa Sıcaklık: 25 °C Deney süresi: 6 sa
*Sıcaklığın etkisi besleme ve çekmede aynı sıcaklık değerlerinde çalışılmıştır.		

3.8. Proses Performans Hesaplamaları

3.8.1. İleri Osmoz Performans Hesaplamaları

Bir membran sistemde süzüntü akısı, su hacmi üzerinden aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır.

$$J_w = \frac{1}{A} \cdot \frac{\Delta V}{\Delta t} \quad (3.1)$$

İO sisteminde besleme çözeltisinden çekme çözeltisine geçen su hacmi ve buna bağlı su akıları, hem besleme hem de çekme çözeltilerinin iletkenlik ve osmolalitelerinin deney süresi boyunca belli zaman aralıklarında alınan numunelerde

ölçümleri neticesinde, kütle dengesi üzerinden hesapla belirlenmiştir. Bu şekliyle hesap edilen su hacmi değişimleri, aynı numunelerdeki toplam çözünmüş katılar (TÇK) konsantrasyonlarının ölçümü ile elde edilen sonuçların kütle dengesi üzerinden hesabı ile ayrıca teyyit edilmiş ve sonuçların birbirleriyle uyum içerisinde olduğu belirlenmiştir.

İO proseste hesap edilen beslemeden çekmeye geçen su hacmi ve beslemede ve çekmede ölçülen tuz konsantrasyonlarından hareketle tuz akıları, aşağıdaki formül kullanılarak hesap edilmiştir.

$$J_s = \frac{1}{A} \cdot \frac{\Delta(C_t \cdot V_t)}{\Delta t} \quad (3.2)$$

Proseste net osmotik basınç farkı, besleme ve çekme çözeltileri arasındaki osmotik basınç farkını ifade etmektedir. Net osmotik basınç farkı, her iki çözelti osmolalitelerinin ölçülmesi ve bu değerlerin Van't Hoff denkleminde yerine konarak belirlenen çözelti osmotik basınçları farkından hesapla çıkarılmıştır.

$$\Delta\pi_{net} = \pi_c - \pi_b \quad (3.3)$$

İO prosesinde kullanılan ham deniz suyunun MF veya UF prosesi ile ön arıtmadan geçirilmesi sonrasında İO prosesinde çekme çözeltisi olarak kullanıldığı çalışmalarda MF ve UF proseslerinin süzöntü akısı performansı Denklem (3.1) ve rejeksiyon performansı ise aşağıdaki formül kullanılarak belirlenmiştir.

$$R(\%) = 100 \times \left(\frac{C_b - C_s}{C_b} \right) \quad (3.4)$$

Denklemden C_b ve C_s sırasıyla, basınç sürücülü proseste besleme ve süzöntü akımlarında ölçülen konsantrasyonları ifade etmektedir.

3.8.2. Direkt Temas Membran Distilasyon Performans Hesaplamaları

Bir membran sistemde süzüntü akısı, su hacmi üzerinden aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır.

$$J_w = \frac{1}{A} \cdot \frac{\Delta V}{\Delta t} \quad (3.5)$$

DTMD prosesinde besleme çözeltisinden (deniz suyundan) süzüntüye (distile suya) geçen su hacmi ve buna bağlı su akısı, hem besleme hem de süzüntünün iletkenlik ve osmolalitelerinin deney süresi boyunca belli zaman aralıklarında alınan numunelerde ölçülmeleri neticesinde, kütle dengesi hesabı üzerinden belirlenmiştir. Bu şekliyle hesap edilen su hacmi değişimleri, aynı numunelerdeki toplam çözünmüş katılar (TÇK) konsantrasyonlarının ölçümü ile elde edilen sonuçların kütle dengesi üzerinden hesabı ile ayrıca teyyit edilmiş ve sonuçların birbirleriyle uyum içerisinde olduğu tespit edilmiştir.

Süzme oranı, tutunum veya rejeksiyon performansı ise aşağıdaki denklem kullanılarak belirlenmiştir.

$$R(\%) = 100 \times \left(\frac{C_b - C_s}{C_b} \right) \quad (3.6)$$

Denklemde C_b ve C_s sırasıyla, proste besleme ve süzüntü akımlarında ölçülen konsantrasyonları ifade etmektedir.

4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

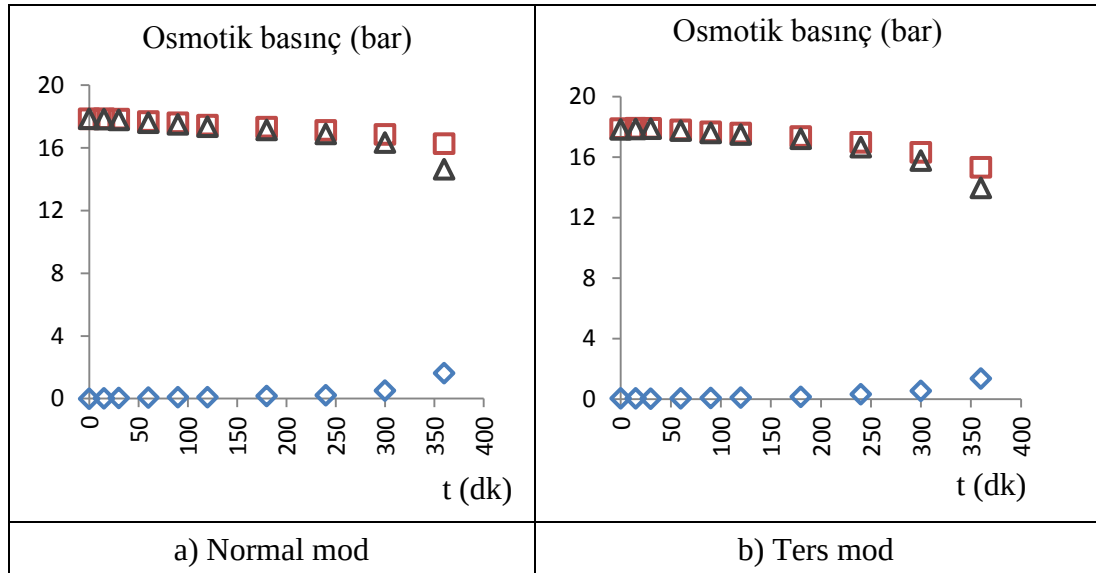
4.1. İleri Osmoz Prosesi Deneysel Çalışma Bulguları

Tekli İO deneyleri, 3 farklı besleme suyu için membran yerleşim modu, akış hızı, sıcaklık ve ön arıtma şartlarının İO performansı üzerine etkisinin belirlenmesi amacıyla ayrı ayrı gerçekleştirilmiş olup, her bir besleme akımı için aşağıda ilgili başlıklar altında gerçekleştirilmiştir.

4.1.1. Distile Su Kullanılarak Deniz Suyunun Seyreltilmesi

4.1.1.1. Membran İşletme Modu

İO prosesinde distile su kullanılarak deniz suyunun seyreltilmesi üzerine membran işletme modunun etkisi kapsamında elde edilmiş, işletme moduna bağlı besleme, çekme ve net (çekme-besleme) osmotik basınçların zamanla değişimleri Şekil 4.1’de gösterilmiştir.



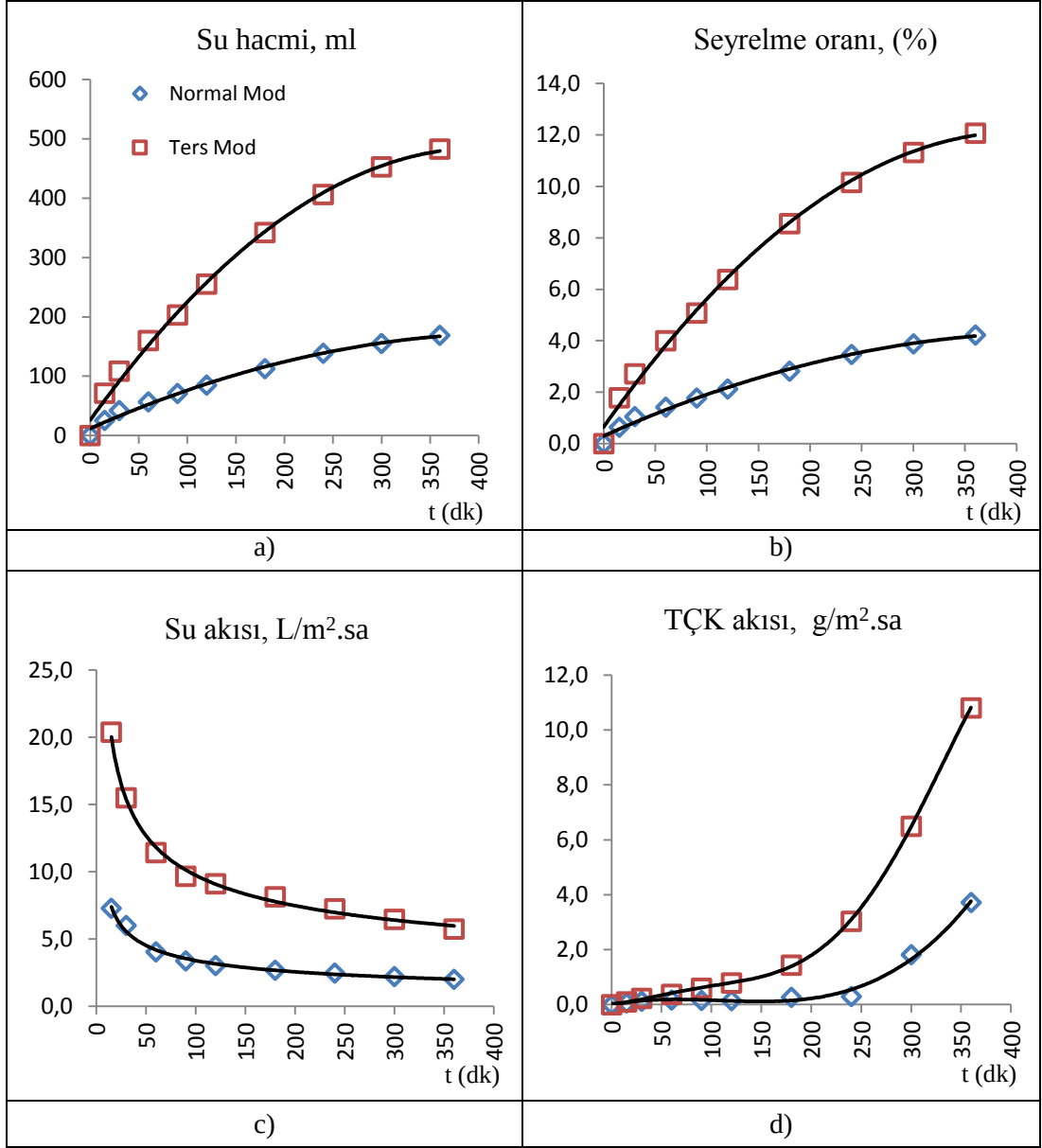
Şekil 4.1: İO prosesinde distile su kullanılarak deniz suyunun seyreltilmesinde membran işletme moduna bağlı olarak İO prosesinde sürücü kuvvet etkisinin zamanla değişimi (akış hızı: 300 L/sa, sıcaklık: 25 °C, deney süresi: 6 saat) (Semboller ◇, □ ve Δ sırasıyla distile su, deniz suyu ve prosesteki net osmotik basınçtır).

İşletme moduna bağlı distile su ile deniz suyunun seyreltilmesi deneylerinde İO prosesi sürücü kuvveti olan net osmotik basınç farkının, deney süresi boyunca yaklaşık 18 bar'lık başlangıç değerinden, 13-14 bar civarına azaldığı görülmüştür. Çekme çözeltisi olan deniz suyundan besleme çözeltisi olan distile suya doğru, su taşınımına ters yönde gerçekleşen çözünmüş madde taşınımına bağlı olarak zamanla beslemedeki osmotik basınç değerinde artış meydana geldiği tespit edilmiştir. Buna rağmen, prosesin uzun işletim şartları için ihtiyaç duyacağı net basınç farkının halen daha sürdürülebileceği görülmüştür.

Proses performansını ifade eden, çekme çözeltisine geçen su hacmi, çekme çözeltisinde hacimsel seyrelme oranı, su akısı ve tuz akısı parametrelerinin zamanla değişimleri Şekil 4.2'de gösterilmiştir.

Proseste membran aktif tabakasının distile suya (besleme çözeltisine) temas halde işletimini ifade eden ters işletim modunda, distile su ile deniz suyunun daha yüksek su geçiş hacmi ve akısı ile seyreltilebildiği belirlenmiştir. Bu deney iki kez tekrar edilmek suretiyle sonuçları doğrulanmıştır. Karşılaşılan bu durumun sebebi, literatürden de bilindiği üzere, membran içerisindeki etkin sürücü kuvvet etkisini yaratan membran içi konsantrasyon farkına dayalı etkin osmotik basınç farkı olmaktadır. Şöyle ki, beslemeden çekmeye geçen su, membran içerisinde aktif tabaka ile temas haldeki besleme çözeltisi hali için aktif tabaka ara yüzeyinde, normal (aktif tabaka çekme çözeltisi ile temas halinde) işletim moduna kıyasla artmış iç konsantrasyon polarizasyonu ve seyrelmiş dış konsantrasyon polarizasyon etkilerini oluşturmakta; bu da aktif tabaka ara yüzeyindeki etkili osmotik sürücü kuvvet etkisinin ters modda daha yüksek seviyede kalması sebebiyle daha fazla su geçişi performansını beraberinde getirmektedir. Bununla beraber, İO prosesinde konveksiyonla su ve difüzyonla çözünmüş madde taşınımları besleme ve çekme çözeltileri arasında eş zamanlı olarak zıt yönlü olarak gerçekleşmektedir. Artan difüzyonal çözünmüş madde taşınımı etkisinin, beraberinde daha fazla su kütlesinin çekmeye taşınmasını getirdiği, genel İO performansı olarak beklenen bir durumdur. Zaten bu husus, yenilikçi ve daha iyi performanslarda İO membranı geliştirme çabalarının da başlangıç dayanağını oluşturmaktadır. 360 dk sonunda normal ve ters modlar için sırasıyla yaklaşık 169 ve 483 ml'lik su geçişleri ile başlangıç 4 L çekme çözeltisinin deney sonunda sırasıyla % 4,2 ve 12,1 seviyelerinde seyreltilmesi işlemleri gerçekleştirilmiştir. Sırasıyla 2,0 ve 5,8 L/m².sa deney sonu su akısı tespit edilen normal ve ters mod işletimlerinde, çekmeden beslemeye geçen çözünmüş

madde akılarının sırasıyla 3,7 ve 10,8 g/m².sa değerlerinde yüksek değerlerde olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 4.2: İO prosesinde distile su kullanılarak deniz suyunun seyreltilmesi üzerine membran işletme modunun etkisi, a) çekme çözeltisine geçen su hacmi b) çekme çözeltisinde hacimsel seyrelme oranı c) su akısı ve d) tuz akısı, (akış hızı: 300 L/sa, sıcaklık: 25 °C, deney süresi: 6 saat).

Ters işletim modunun daha iyi performans sağlamış ve deneylerin 150-200 dk'sı zarfında su akısı azalması değişimlerinin kararlı aşamayı temsil edebilecek yavaş akı azalma fazına ulaşmış olması sebepleriyle bu aşamadan sonraki deneyler, ters modda işletilen İO membran yerleşim modunda ve ön arıtım etkisi şartları hariç

3 saat (180 dk) süresince yürütülmüştür. Deney süresince izlenen besleme ve çekme çözeltileri su kalite parametrelerinin (pH, osmolalite, yoğunluk, iletkenlik, TÇK (toplam çözünmüş katılar), bulanıklık ve viskozite) zamanla değişimleri, normal ve ters işletim modları için Tablo 4.1’de gösterilmiştir.

Tablo 4.1: Distile su kullanılarak deniz suyunun seyreltilmesinde normal modda ve ters modda işletilen İO prosesinin performansı (akış hızı:300 L/sa, sıcaklık: 25 °C, deney süresi: 6 saat, hacim:4L).

Parametre	Birim	Normal Mod				Ters Mod			
		Distile Su		Deniz Suyu		Distile Su		Deniz Suyu	
		Deney Başı	Deney Sonu	Deney Başı	Deney Sonu	Deney Başı	Deney Sonu	Deney Başı	Deney Sonu
pH	-	7,96	8,04	8,33	8,56	6,7	8,1	8,48	8,56
Osmolalite	mosm/kg	0,0	66,0	710	648	2,0	55,0	711	611
Yoğunluk	g/cm ³	0,9969	0,9982	1,0152	1,0135	0,9973	0,9982	1,0156	1,0128
İletkenlik	mS/cm	0,016	3,08	43,1	38,2	0,012	3,67	42,5	33,7
TÇK	g/L	0,0	2,143	26,5	23,3	0,004	1,908	26,0	20,99
Bulanıklık	NTU	0,0	0,016	0,364	0,464	0,0	0,15	0,35	0,62
Viskozite	mPa.s	1,05	1,04	1,1	1,1	1,08	1,01	1,12	1,07

Distile su ile deniz suyunun normal ve ters modda işletimindeki deneyler süresince izlenmiş su kalite parametreleri değişimlerinden aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır.

Proses, besleme ve çekmede eşdeğer istenen sabit sıcaklık değerinde (izotermal şartlarda) işletilmiştir. Deniz suyunda 8,5 pH sabit değerlerde kalmış, distile suda deney süresince dalgalanmalar göstererek yaklaşık başlangıç 8 pH değerine ulaşmıştır.

Deniz suyunun osmolalitesi, yoğunluğu, iletkenliği ve toplam çözünmüş katıları, distile suya doğru çözünmüş madde taşınımı ve distile sudan geçen su ile seyrelme sebebiyle, su ve tuz akılarına bağlı olarak deney süresince azalmıştır. Buna karşın, distile suya çözünmüş katıların taşınımı, distile su tarafı olan besleme akımında bu parametre değerlerinin bir miktar artmasına neden olmuştur. Normal ve ters modda distile sudaki deney sonu iletkenlik ve TÇK değerleri sırasıyla 3,1 mS/cm

ve 2,1 g/L ile 3,7 mS/cm ve 1,9 g/L değerlerine ulaşmıştır. Deniz suyunda başlangıçta 710 mosm/kg civarında olan deniz suyu osmolalitesi, distile su tarafında deney süresi sonunda 55-65 mosm/kg aralığında kalmıştır.

Deniz suyu ve distile suyun deney başlangıcı viskozite değerlerinde normal modda pek bir değişim gözlenmemiş olmakla birlikte, ters modda her iki çözeltide de zamanla bir miktar azalmalar gözlenmiştir. Bununla birlikte, deniz suyunun bulanıklık değerinin 0,35 NTU başlangıç değerinden 0,5-0,6 değerlerine zamanla arttığı görülmüştür. Distile su tarafında ise, 0,016 NTU normal modda ve 0,15 NTU ters modda olmak üzere bulanıklık değerleri ölçülmüştür. Deniz suyu tarafında gözlemlenmiş bulanıklık artışlarının, deniz suyu içerisindeki askıda mikroskobik canlı katılardan kaynaklandığı tahmin edilmektedir.

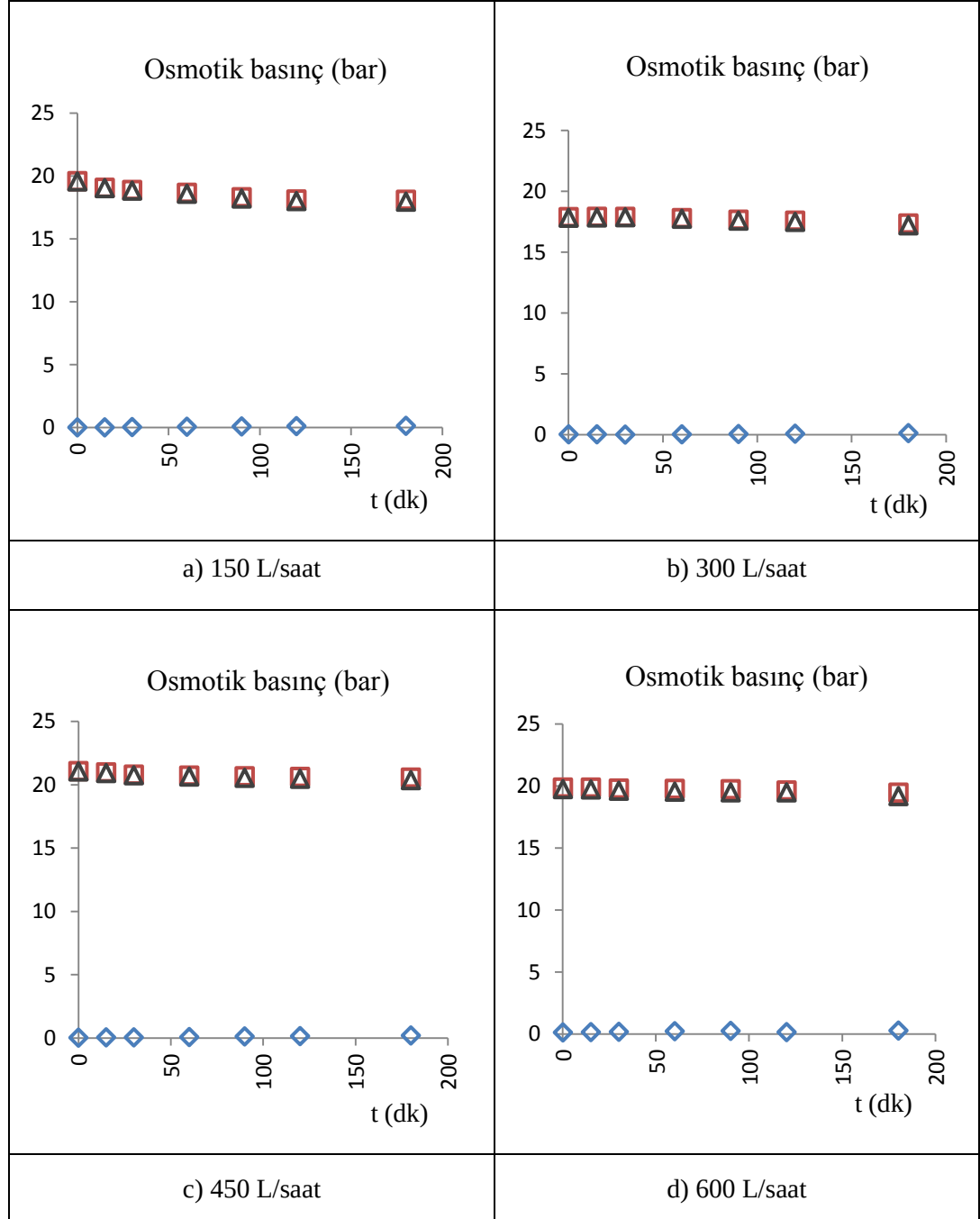
4.1.1.2. Akış Hızı

İO prosesinde distile su kullanılarak deniz suyunun seyreltilmesi üzerine akış hızının etkisi kapsamında elde edilmiş, akış hızlarına bağlı besleme, çekme ve net (çekme-besleme) osmotik basınçların zamanla değişimleri Şekil 4.3’de, proses performansını ifade eden, çekme çözeltisine geçen su hacmi, çekme çözeltisinde hacimsel seyrelme oranı, su akısı ve tuz akısı parametrelerinin zamanla değişimleri ise Şekil 4.4’de gösterilmiştir.

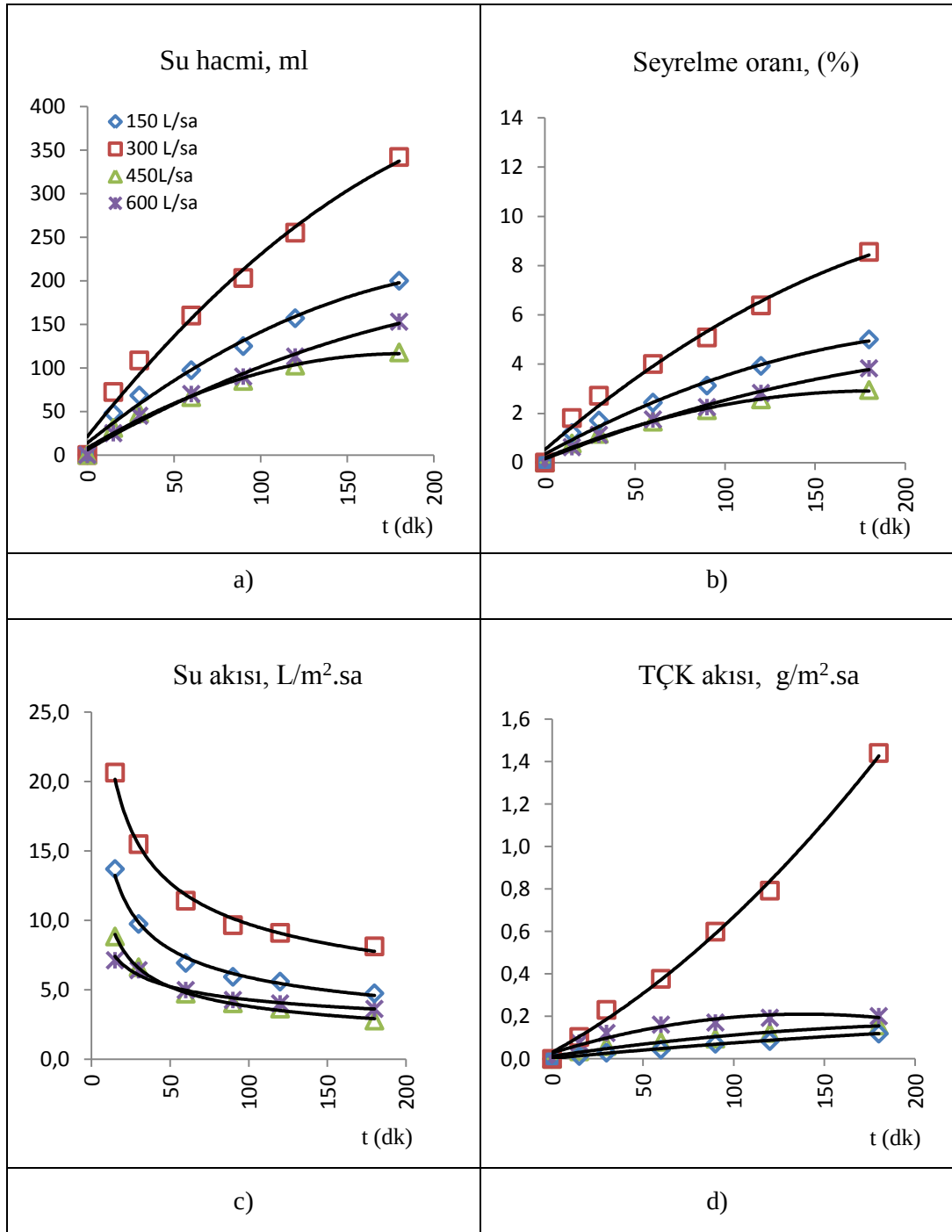
Akış hızına bağlı distile su ile deniz suyunun seyreltilmesi deneylerinde İO prosesi sürücü kuvveti olan net osmotik basınç farkının, deney süresi boyunca yaklaşık 18-21 bar’lık başlangıç değerlerinden, 18-20 bar’lar civarına çok az azaldığı görülmüştür. Çekme çözeltisi olan deniz suyundan besleme çözeltisi olan distile suya doğru, su taşınımına ters yönde gerçekleşen çözünmüş madde taşınımına bağlı olarak zamanla beslemedeki osmotik basınç değerinde, 3 saat zarfında 0,2-0,3 bar’a varan artışlar meydana geldiği tespit edilmiştir.

İO prosesinde 300 L/sa akış hızında, distile su ile deniz suyunun daha yüksek su geçiş hacmi ve akısı ile seyreltilebildiği belirlenmiştir. Su geçiş hacmi, seyrelme oranı ve su akısı değerleri, diğer akış hızları için azalan sırayla 150, 600 ve 450 L/sa olarak görülmüştür. 180 dk işletim sonunda su geçiş hacmi, çekme çözeltisi seyrelme oranı ve su akısı değerleri, 300 L/sa’da sırasıyla 342 ml, % 8,6 ve 8,1 L/m².sa olarak belirlenmişken, en düşük performanslı 450 L/sa için bu değerler sırasıyla 118 ml, % 2,9 ve 2,8 L/m².sa olarak tespit edilmiştir. 300 L/sa’da 1,4 g/m².sa olan çözünmüş

madde akısının, diğer üç akış hızı değerlerinde ise 0,1-0,2 seviyelerinde kaldığı belirlenmiştir. Bu sonuçlardan hareketle, sonraki adımda yer alan sıcaklık etkisinin araştırıldığı deneyler, 300 L/sa akış hızı şartı altında yürütülmüştür.



Şekil 4.3: İO prosesiyle distile su kullanılarak deniz suyunun seyreltilmesinde akış hızına bağlı olarak İO prosesinde sürücü kuvvet etkisinin zamanla değişimi (membran yerleşimi: ters mod, sıcaklık: 25 °C, deney süresi: 3 saat) (Semboller ◇, □ ve Δ sırasıyla distile su, deniz suyu ve prosteki net osmotik basınçtır).



Şekil 4.4: İO prosesinde distile su kullanılarak deniz suyunun seyreltilmesi üzerine akış hızının etkisi, a) çekme çözeltisine geçen su hacmi b) çekme çözeltisinde hacimsel seyrelme oranı c) su akısı ve d) tuz akısı, (membran yerleşimi: ters mod, sıcaklık: 25 °C, deney süresi: 3 saat).

Deney süresince izlenen besleme ve çekme çözeltileri su kalite parametrelerinin (pH, osmolalite, yoğunluk, iletkenlik, TÇK (toplam çözünmüş katılar), bulanıklık ve viskozite) zamanla değişimleri, 150, 300, 450 ve 600 L/saat akış hızı değerleri için Tablo 4.2’de gösterilmiştir.

Tablo 4.2: Distile su kullanılarak deniz suyunun seyreltilmesinde 150, 300, 450, 600 L/saat'te işletilen İO prosesinin performansı (membran yerleşimi: ters mod, sıcaklık: 25 °C, deney süresi: 3 saat, hacim:4 L).

Parametre	Birim	150 L/sa				300 L/sa				450 L/sa				600 L/sa			
		Distile Su		Deniz Suyu		Distile Su		Deniz Suyu		Distile Su		Deniz Suyu		Distile Su		Deniz Suyu	
		Deney Başı	Deney Sonu	Deney Başı	Deney Sonu	Deney Başı	Deney Sonu	Deney Başı	Deney Sonu	Deney Başı	Deney Sonu	Deney Başı	Deney Sonu	Deney Başı	Deney Sonu	Deney Başı	Deney Sonu
pH	-	7,34	7,43	8,35	8,42	6,7	8,46	8,48	8,52	7,07	7,4	8,22	8,29	6,83	7,29	8,33	8,2
Osmolalite	mosm/kg	1,0	6,0	779	720	2,0	6,0	711	691	1,0	8,0	837	817	5,0	11,0	788	772
Yoğunluk	g/cm ³	0,997	0,9969	1,0154	1,0155	0,9973	0,9967	1,0156	1,0145	0,9972	0,9969	1,0159	1,0155	0,997	0,9972	1,0173	1,0168
İletkenlik	mS/cm	0,01166	0,0428	40,5	38,7	0,012	0,365	42,5	38,5	0,01	0,1842	37,9	36,6	0,01121	0,1644	42,7	40,9
TÇK	g/L	0,00509	0,02023	25,2	23,7	0,004	0,1708	26	23,6	0,00424	0,0877	23,2	22,8	0,00537	0,0772	26,4	25,2
Bulanıklık	NTU	0,0	0,09	0,4	0,56	0,0	0,04	0,35	0,4	0,0	0,03	0,53	0,50	0,0	0,02	0,47	0,6
Viskozite	mPa.s	1,02	1,02	1,1	1,1	1,01	1,02	1,12	1,10	1,01	1,03	1,14	1,11	1,07	1,09	1,16	1,15

Distile su ile deniz suyunun seyreltilmesinde farklı akış hızlarında işletilen deneyler süresince, su kalite parametreleri değişimlerinden aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır.

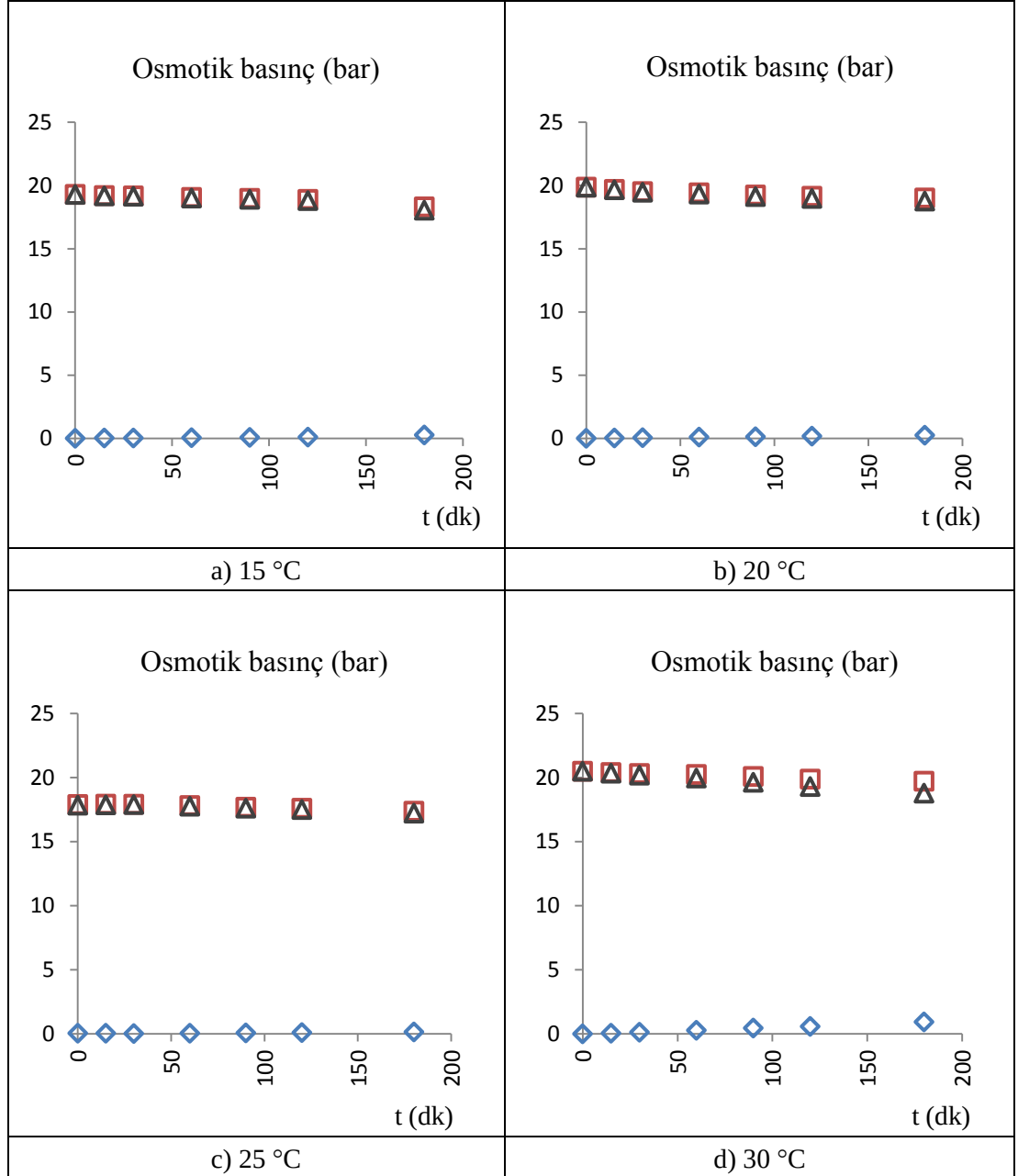
Proses, besleme ve çekmede eşdeğer istenen sabit sıcaklık değerinde (izotermal şartlarda) işletilmiştir. Deniz suyunda pH değeri, 8,3-8,5 aralığında kısmen sabit bir değişim göstermiştir. Distile suda 150, 450 ve 600 akış hızlarında 6,8-7,4 başlangıcından önce artış sonra kararlı seyir ya da kısmen azalmalı seyir ile 7,3-7,5 seviyelerine ulaşmıştır. 300 L/sa'ta distile su pH'sında deniz suyu pH'sı olan yaklaşık 8,5 değerine zamanla artış şeklinde, diğer akış hızlarındakinden farklı bir değişim görülmüştür. Bu sonuçlara göre, distile suya deniz suyundan kütle taşınmasına rağmen distile suda elektro-nötrallite şartlarının sürmesi gerekeceği ve deniz suyunda pH'nın 8,5 civarında sabit kalmış olduğu beraberce dikkate alınarak söylenebilir ki, distile sudan deniz suyuna suyun taşınımı, literatürden de bilindiği üzere su moleküllerinin değil de sudaki hidronyum iyonunun (H_3O^+) taşınımı ağırlıklı gerçekleşmektedir.

Deniz suyunun osmolalitesi, yoğunluğu, iletkenliği ve toplam çözünmüş katıları, distile suya doğru çözünmüş madde taşınımı ve distile sudan geçen su ile seyrelme sebebiyle, su ve tuz akılarına bağlı olarak deney süresince çok az seviyelerde azalmıştır. Buna karşın, distile suya difüzyonel kütle taşınımı, distile su tarafı olan besleme akımında bu parametre değerlerinin bir miktar artmasına neden olmuştur. Distile sudaki deney sonu en yüksek ve en düşük çözünmüş madde değerleri görülmüş 300 ve 150 L/sa akış hızları için iletkenlik ve TÇK değerleri sırasıyla 365 $\mu S/cm$ ve 171 mg/L ile 42,8 $\mu S/cm$ ve 20,2 mg/L olarak tespit edilmiştir. Deniz suyunda başlangıçta 711-819 mosm/kg aralığında olan deniz suyu osmolalitesi, distile su tarafında deney süresi sonunda 6-11 mosm/kg aralığında ölçülmüştür.

Deniz suyu ve distile suyun deney başlangıcı viskozite değerlerinde pek bir değişim gözlenmemiş olmakla birlikte, deniz suyunun bulanıklık değerinin 0,35-0,53 NTU başlangıç değerlerinden 0,4-0,6 NTU değerlerine tüm akış hızı deneylerinde çok az bir artışla değiştiği gözlenmiştir. Normal ve ters mod işletimlerde de benzer hali görülen bu durumun, deniz suyu içerisindeki askıda mikroskobik canlılar esaslı katı maddelerden kaynaklandığı tahmin edilmektedir. Diğer yandan distile su tarafında, akış hızının artması ile 0,09 NTU'dan 0,02 NTU'ya azalmış deney sonu bulanıklık değerleri söz konusu olmuştur.

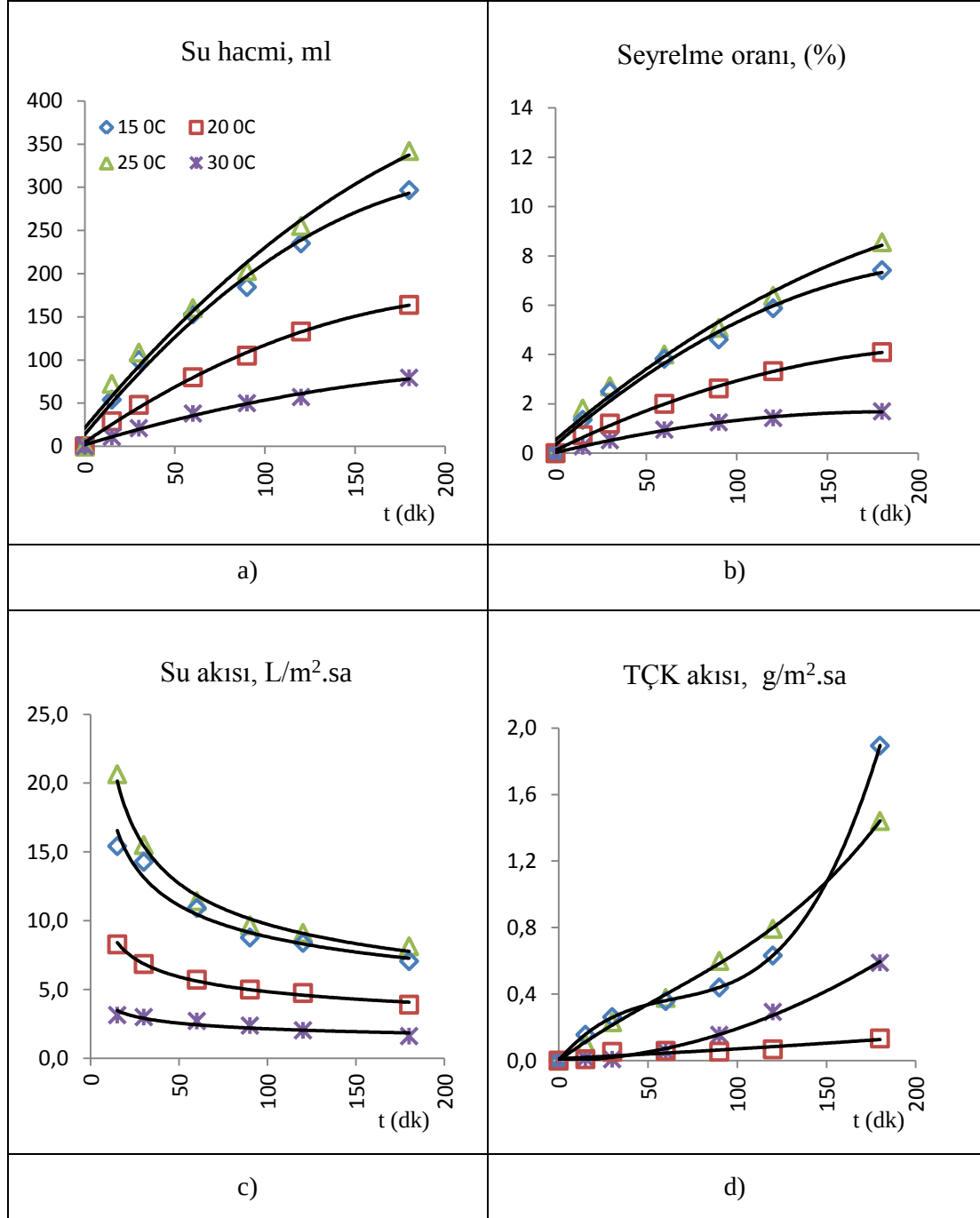
4.1.1.3. Sıcaklık

İO prosesinde distile su kullanılarak deniz suyunun seyreltilmesi üzerine sıcaklığın etkisi kapsamında elde edilmiş, besleme ve çekmede eş zamanlı sıcaklık değişimlerine bağlı besleme, çekme ve net osmotik basınçların zamanla değişimleri Şekil 4.5’de gösterilmiştir.



Şekil 4.5: İO prosesiyle distile su kullanılarak deniz suyunun seyreltilmesinde sıcaklığa bağlı olarak İO prosesinde sürücü kuvvet etkisinin zamanla değişimi (membran yerleşimi: ters mod, akış hızı: 300 L/sa, deney süresi: 3 saat) (Semboller $\diamond$, $\square$ ve Δ sırasıyla distile su, deniz suyu ve prosesteki net osmotik basınçtır).

Proses performansını ifade eden, çekme çözeltisine geçen su hacmi, çekme çözeltisinde hacimsel seyrelme oranı, su akısı ve tuz akısı parametrelerinin zamanla değişimleri Şekil 4.6’da gösterilmiştir.



Şekil 4.6: İO prosesinde distile su kullanılarak deniz suyunun seyreltilmesi üzerine sıcaklığın etkisi, a) çekme çözeltisine geçen su hacmi b) çekme çözeltisinde hacimsel seyrelme oranı c) su akısı ve d) tuz akısı, (membran yerleşimi: ters mod, akış hızı: 300 L/sa, deney süresi: 3 saat).

Sıcaklığa bağlı distile su ile deniz suyunun seyreltilmesi deneylerinde İO prosesi sürücü kuvveti olan net osmotik basınç farkının, deney süresi boyunca yaklaşık 18-20 bar'lık başlangıç değerlerinden, 17-19 bar'lar civarına bir miktar azaldığı görülmüştür. Çekme çözeltisinden besleme çözeltisine doğru gerçekleşen çözünmüş madde taşınımına bağlı olarak, 15 °C'tan 25 °C'a 0,26'dan 0,15 bar'a azalan beslemedeki osmotik basınç değeri, 30 °C'ta 0,9 bar civarına yükselmiştir. Prosesin başlangıç aşamasındaki sürücü kuvvete yakın bir kuvvet etkisi altında sürdürülebildiği belirlenmiştir.

İO prosesinde 25 °C sıcaklıkta, distile su ile deniz suyunun daha yüksek su geçiş hacmi ve akısı ile seyreltilebildiği görülmüştür. Su geçiş hacmi, seyrelme oranı ve su akısı değerlerinin, 15, 20 ve 30 °C sıcaklıklarda azalan sırayla meydana geldiği tespit edilmiştir. 180 dk işletim sonunda su geçiş hacmi, çekme seyrelme oranı ve su akısı değerleri, 25 °C sıcaklıkta sırasıyla 342 ml, % 8,6 ve 8,1 L/m².sa olarak belirlenmişken, en düşük performanslı 30 °C sıcaklık için bu değerler sırasıyla 79 ml, % 1,7 ve 1,6 L/m².sa olarak tespit edilmiştir. 25 °C sıcaklıkta 1,4 g/m².sa olan çözünmüş madde akısı, 15 °C sıcaklıkta 1,9 g/m².sa, 20 ve 30 °C sıcaklıklarda ise sırasıyla 0,1 ve 0,6 g/m².sa olarak gerçekleşmiştir. Bu sonuçlardan hareketle, sonraki adımda yer alan ön arıtma etkisinin araştırıldığı deneyler, 300 L/sa akış hızı ve 25 °C sıcaklık şartları altında yürütülmüştür. Deney süresince izlenen besleme ve çekme çözeltileri su kalite parametrelerinin (pH, osmolalite, yoğunluk, iletkenlik, TÇK (toplam çözünmüş katılar), bulanıklık ve viskozite) zamanla değişimleri 15, 20, 25, 30 °C sıcaklık değerleri için Tablo 4.3'de gösterilmiştir (25 °C sıcaklıkta işletim için değişimler daha önce Tablo 4.2'de de gösterilmiştir).

Distile su ile deniz suyunun farklı izotermal sıcaklık şartları (15, 20, 25 ve 30 °C) altında seyreltilmesi deneyleri süresince, izlenmiş su kalite parametreleri değişimlerinden aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır.

Proseste, istenen sıcaklık değeri için besleme ve çekmede sabit izotermal sıcaklık şartları altında deneysel çalışmalar yürütülmüştür. Deniz suyunda pH değeri, ya sabit kalma ya da kısmen artış ile 8,3-8,5 aralığında değişim göstermiştir. Distile suda ise, farklı sıcaklıklara rağmen 6,5-7,2 başlangıç değerlerinden zamanla artış göstererek 7,5-8,5 değerlerine ulaşmıştır. Bu sonuçlara göre, daha önce de ifade edildiği üzere, distile suda elektro-nötralite şartları ve deniz suyu pH'sının pek değişmemiş olması durumları çerçevesinde, distile sudan deniz suyuna su taşınımının, hidronyum iyonu (H₃O⁺) ağırlıklı su taşınımı şeklinde gerçekleştiği

Tablo 4.3: Distile su kullanılarak deniz suyunun seyreltilmesinde 15, 20, 25 ve 30 °C 'te işletilen İO prosesinin performansı (membran yerleşimi: ters mod, akış hızı: 300 L/sa, deney süresi: 3 saat, hacim:4 L).

Parametre	Birim	15 °C				20 °C				25 °C				30 °C			
		Distile su		Deniz Suyu		Distile su		Deniz Suyu		Distile Su		Deniz Suyu		Distile su		Deniz Suyu	
		Deney Başı	Deney Sonu	Deney Başı	Deney Sonu	Deney Başı	Deney Sonu	Deney Başı	Deney Sonu	Deney Başı	Deney Sonu	Deney Başı	Deney Sonu	Deney Başı	Deney Sonu	Deney Başı	Deney Sonu
pH	-	7,22	7,57	8,26	8,32	6,55	7,8	8,29	8,52	6,7	8,46	8,48	8,52	7,48	7,32	8,36	8,4
Osmolalite	mosm/kg	0,0	11,0	791	751	0,0	10,0	801	767	2,0	6,0	711	691	0,0	37,0	800	770
Yoğunluk	g/cm ³	0,9984	0,9988	1,0187	1,0181	0,9978	0,9978	1,0181	1,0174	0,9973	0,9967	1,0156	1,0145	0,9971	0,9974	1,0165	1,016
İletkenlik	mS/cm	0,00364	0,414	41,6	38,1	0,00969	0,0879	41,8	40,0	0,012	0,365	42,5	38,5	0,00845	0,58	42,5	41,2
TÇK	g/L	0,001706	0,2011	27,2	24,9	0,00489	0,0415	25,9	25,0	0,004	0,1708	26	23,6	0,00425	0,28	26,2	25,4
Bulanıklık	NTU	0,00	0,02	0,38	0,58	0,00	0,03	0,41	0,55	0,00	0,04	0,35	0,40	0,00	0,05	0,48	0,58
Viskozite	mPa.s	1,36	1,44	1,46	1,48	1,22	1,28	1,39	1,38	1,01	1,02	1,12	1,10	0,98	1,04	1,28	1,25

söylenebilir.

Deniz suyunun osmolalitesi, yoğunluğu, iletkenliği ve toplam çözünmüş katıları, distile suya doğru çözünmüş madde taşınımı ve distile sudan geçen su ile seyrelme sebebiyle, su ve tuz akılarına bağlı olarak deney süresince düşük seviyelerde azalmıştır. Buna karşın, distile suya difüzyonal kütle taşınımı, distile su tarafı olan besleme akımında bu parametre değerlerinin bir miktar artmasına neden olmuştur. Distile sudaki deney sonu en yüksek ve en düşük çözünmüş madde değerleri görülmüş 30 ve 20 °C sıcaklıklar için iletkenlik ve TÇK değerleri sırasıyla 580 µS/cm ve 280 mg/L ile 88 µS/cm ve 41,5 mg/L olarak ölçülmüştür. Deniz suyunda başlangıçta 711-801 mosm/kg aralığında olan deniz suyu osmolalitesi, distile su tarafında deney süresi sonunda 6-37 mosm/kg aralığında ölçülmüştür.

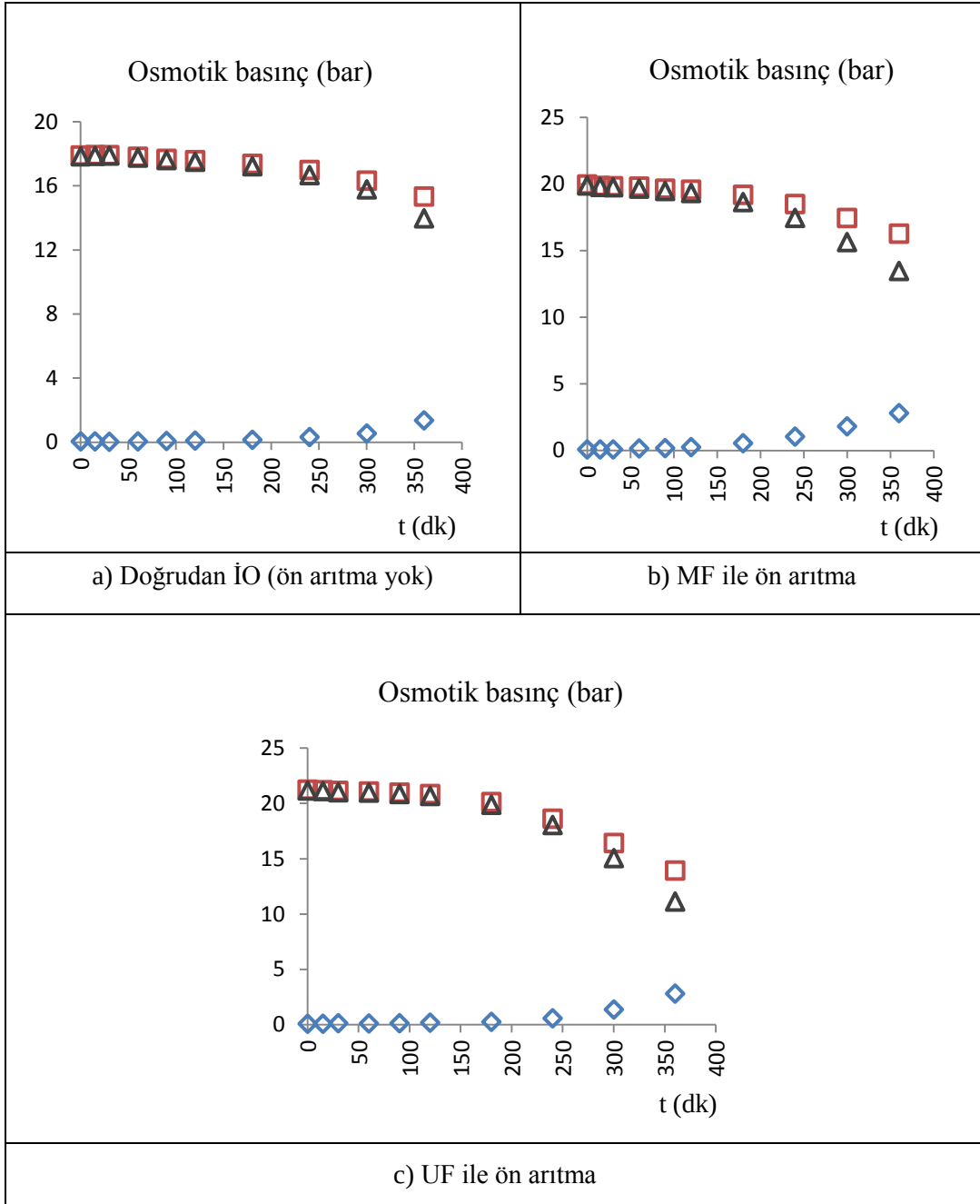
Deniz suyunun viskozite değerlerinde çok düşük azalmalara karşılık, distile suyun viskozite değerlerinde çok düşük artışlar görülmüş olmakla birlikte, deniz suyunun bulanıklık değerinde 0,35-0,48 NTU başlangıç değerlerinden 0,4-0,6 değerlerine tüm sıcaklık deneylerinde çok az bir artış meydana geldiği gözlenmiştir. Daha önceki işletim şartları altında da görülen bu durumun, deniz suyu içerisindeki askıda mikroskobik canlılar esaslı katı maddelerden kaynaklandığı tahmin edilmektedir. Diğer yandan distile su tarafında bulanıklık parametresi değerlerinin, 0,02-0,05 NTU'ya yükseldiği tespit edilmiştir.

4.1.1.4. Ön Arıtma

İO prosesinde distile su kullanılarak deniz suyunun seyreltilmesi üzerine ön arıtma yapılıp yapılmamasının etkisini belirleme çalışmaları kapsamında çalışılan, deniz suyuna doğrudan İO uygulaması (ön arıtma yok), MF ile ön arıtma ve UF ile ön arıtma uygulamaları için İO prosesinde elde edilmiş besleme, çekme ve net osmotik basınçların zamanla değişimleri Şekil 4.7'de verilmiştir.

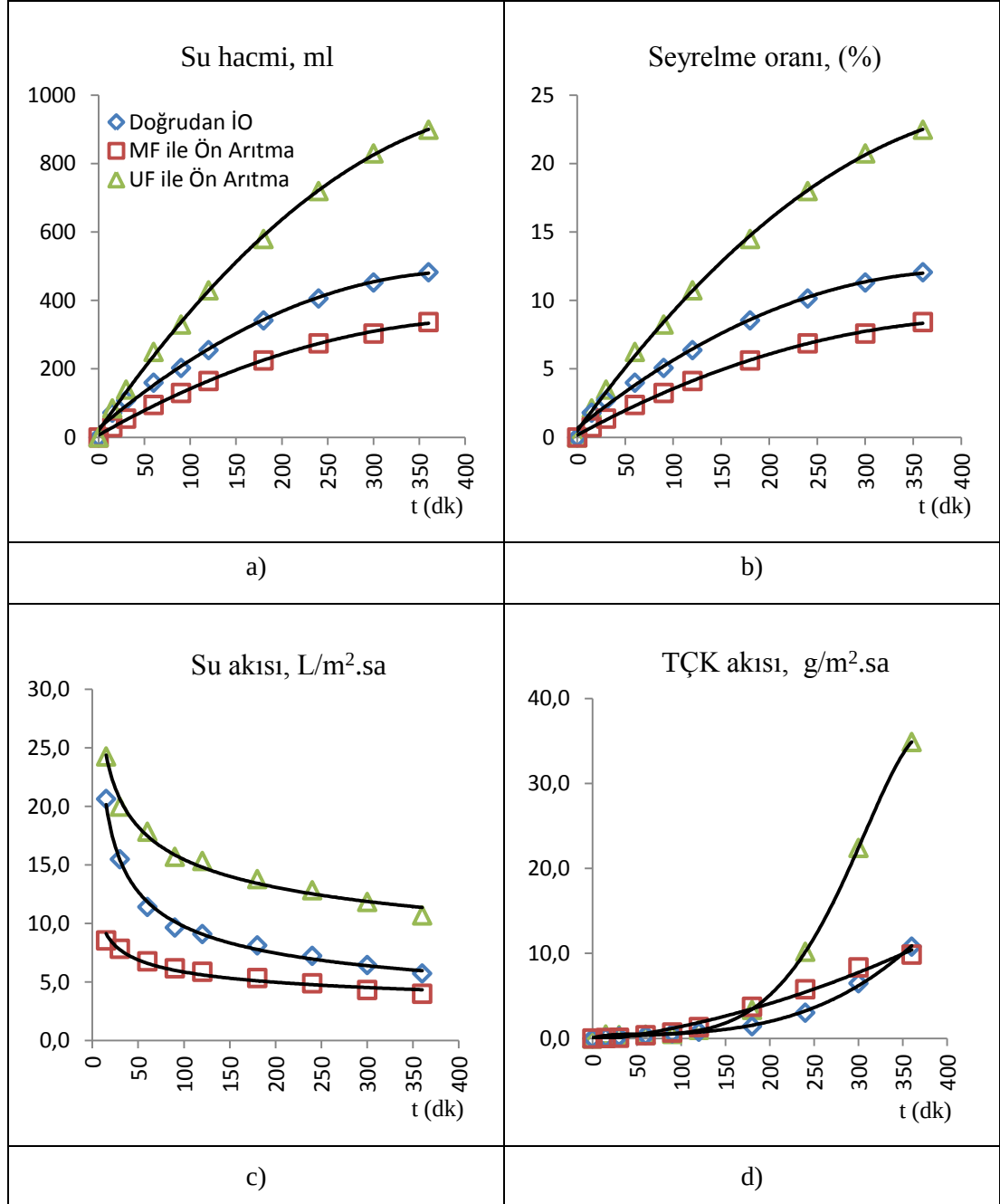
Ön arıtma etkisine bağlı distile su ile deniz suyunun seyreltilmesi deneylerinde İO prosesi sürücü kuvveti olan net osmotik basınç farkının, 6 saatlik deney süresi sonunda yaklaşık 18-21 bar'lık başlangıç değerlerinden, 11-14 bar'lar civarına dikkate değer seviyede azaldığı görülmüştür. Azalmanın özellikle ön arıtma yapılması halinde daha yüksek olduğu görülmüş, en fazla basınç azalması UF ile ön arıtma yapılması durumunda ortaya çıkmıştır. Beslemede ön arıtmasız işletim için 6

saat sonunda ulaşılan osmotik basınç değeri 1,4 civarında gerçekleşmiş iken bu değer, MF ve UF ile ön arıtma sonrası için 2,8 bar olarak tespit edilmiştir.



Şekil 4.7: İO prosesiyle distile su kullanılarak deniz suyunun seyreltilmesinde ön arıtma (MF veya UF) yapıp yapılmamasına bağlı olarak İO prosesinde sürücü kuvvet etkisinin zamanla değişimi (membran yerleşimi: ters mod, akış hızı: 300 L/sa, sıcaklık: 25 °C, deney süresi: 6 saat) (Semboller $\diamond$, $\square$ ve Δ sırasıyla distile su, deniz suyu ve prosesteki net osmotik basınçtır).

Çekme çözeltisine geçen su hacmi, çekme çözeltisinde hacimsel seyrelme oranı, su akısı ve tuz akısı parametrelerinin zamanla değişimleri Şekil 4.8’de gösterilmiştir.



Şekil 4.8: Distile su kullanılarak deniz suyunun seyreltilmesi üzerine MF ve UF prosesleriyle ön arıtma yapılmasının İO prosesi performansı üzerine etkisi, a) çekme çözeltisine geçen su hacmi b) çekme çözeltisinde hacimsel seyrelme oranı c) su akısı ve d) tuz akısı, (membran yerleşimi: ters mod, akış hızı: 300 L/sa, sıcaklık: 25 °C, deney süresi: 6 saat).

İÖ prosesi öncesinde UF ile deniz suyunun ön arıtmadan geçirilmesi sağlanarak, İÖ prosesinde distile su ile ön arıtılmış deniz suyunun seyreltilmesi işleminin daha yüksek su geçiş hacmi ve akısı ile gerçekleştirilmesini sağlamıştır. Bu deney iki kez tekrar edilmek suretiyle sonuçları doğrulanmıştır. Su geçiş hacmi, seyrelme oranı ve su akısı değerlerinin, UF ile ön arıtma sonrası İÖ uygulaması, doğrudan İÖ uygulaması ve MF ile ön arıtma sonrası İÖ uygulaması azalan sırada meydana geldiği tespit edilmiştir. 6 saat işletim süresi sonunda su geçiş hacmi, çekmede seyrelme oranı ve su akısı değerleri, UF ile ön arıtmada sırasıyla 899 ml, % 22,5 ve 10,7 L/m².sa olarak belirlenmişken, en düşük performanslı MF ile ön arıtmada sırasıyla 337 ml, % 8,4 ve 4,0 L/m².sa olarak tespit edilmiştir. Su geçiş performansına bağlı olarak seyreden deney sonu çözünmüş madde akısı değerleri de, azalan sırada 34,9, 10,8 ve 9,9 g/m².sa gibi yüksek değerlerde tespit edilmiştir.

Deney süresince İÖ prosesinde izlenen besleme ve çekme çözeltileri su kalite parametrelerinin (pH, osmolalite, yoğunluk, iletkenlik, TÇK (toplam çözünmüş katılar), bulanıklık ve viskozite) zamanla değişimleri, ön arıtmasız İÖ prosesi için daha önce Tablo 4.1’de verilmiş olup, MF ve UF ile ön arıtma uygulamaları için Tablo 4.4’de verilmiştir.

Tablo 4.4: MF ve UF ile ön arıtma yapılmış deniz suyunun distile su kullanılarak seyreltilmesinde İÖ prosesinin performansı (membran yerleşimi: ters mod, akış hızı: 300 L/sa, sıcaklık: 25 °C, deney süresi: 6 saat, hacim:4 L).

Parametre	Birim	MF				UF			
		Distile Su		Deniz Suyu		Distile Su		Deniz Suyu	
		Deney Başı	Deney Sonu	Deney Başı	Deney Sonu	Deney Başı	Deney Sonu	Deney Başı	Deney Sonu
pH	-	7,22	8,43	8,3	8,17	7,43	8,2	8,18	8,15
Osmolalite	mosm/kg	3,0	113	792	648	3,0	113	842	556
Yoğunluk	g/cm ³	0,9967	0,9993	1,0168	1,0129	0,9967	0,9993	1,0176	1,0103
İletkenlik	mS/cm	0,0244	6,73	44,0	35,6	0,01512	6,37	43,7	29,3
TÇK	g/L	0,01164	3,59	27,4	21,5	0,00729	3,4	27,0	17,53
Bulanıklık	NTU	0,00	0,12	0,35	0,43	0,00	0,05	0,54	0,47
Viskozite	mPa.s	0,86	0,97	1,03	0,96	0,93	0,94	1,01	0,98

Deniz suyunun MF ve UF membran prosesleriyle ön arıtmadan geçirilip geçirilmeksizin distile su ile seyreltilmesi İO deneyleri süresince, izlenmiş su kalite parametreleri değişimlerinden aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır.

Proseste, sabit izotermal sıcaklık şartları (besleme ve çekmede 25 ± 1 °C) altında deneysel çalışmalar yürütülmüştür. Deniz suyunda pH değeri, doğrudan İO ve UF ön arıtmalı İO proseslerinde 8,5 ve 8,2 değerlerinde zamanla pek değişmez bir seyir göstermişken, MF ön arıtmalı İO prosesinde deneyin ilk 2 saati içerisinde 8,3 başlangıç değerinden 8 değerine sinüzoidal bir dalgalanma göstererek 8,2 deney sonu değerine ulaşmıştır. Burada esas dikkat çeken pH değişimi ise, distile suda gözlenmiştir. Ön arıtmasız uygulamada 6,7'den deney ortasına dek 8,5 civarına artarak sonrasında 8,1'e azalan pH değişimi, MF ve UF ön arıtmalı uygulamalarda deneylerin hemen başlangıcında 7,2-7,4 başlangıç seviyelerinden 9,7-9,8 seviyelerine keskin bir artış sonrası zamanla azalarak deney sonu deniz suyu pH'sına yakın 8,2-8,4 seviyelerine düşmüştür. Deniz ve distile suyun pH'larındaki bu değişimler, distile suda elektro-nötralite şartları ve deniz suyu pH'sının pek değişmemiş olması durumları çerçevesinde, distile sudan deniz suyuna su taşınımının, daha önceki şartlarda da görüldüğü şekliyle hidronyum iyonu (H_3O^+) ağırlıklı su taşınımı şeklinde gerçekleştiğini ortaya koymaktadır.

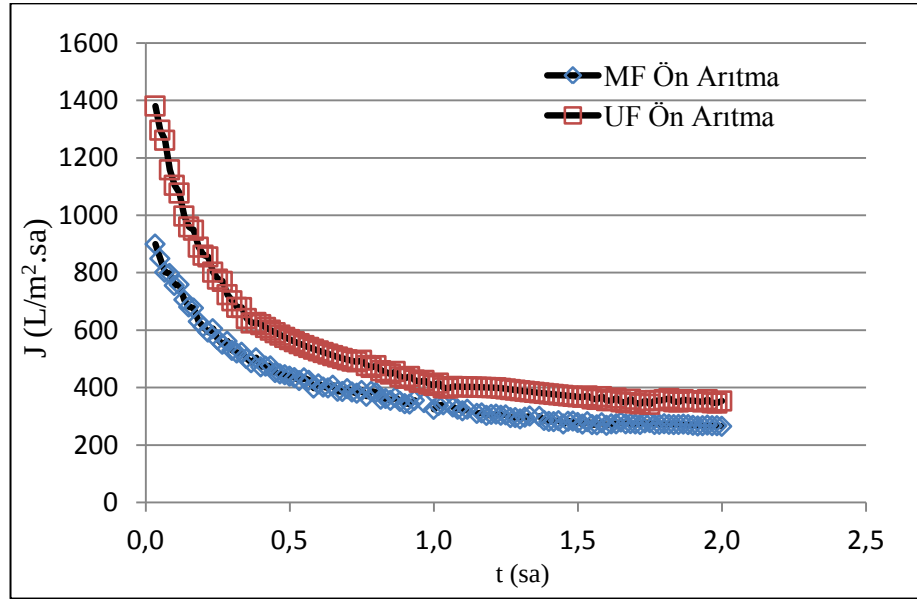
Deniz suyunun osmolalitesi, yoğunluğu, iletkenliği ve toplam çözünmüş katıları, distile suya doğru çözünmüş madde taşınımı ve distile sudan geçen su ile seyrelme sebebiyle, su ve tuz akılarına bağlı olarak deney süresince önemli derecelere varan seviyelerde azalmıştır. Aynı zamanda, distile suya difüzyonal kütle taşınımı ile, distile su tarafı olan besleme akımında bu parametre değerleri dikkate değer seviyelerde artmıştır. Distile sudaki deney sonu en yüksek ve en düşük çözünmüş madde değerleri görülmüş MF ile ön arıtma ve ön arıtmasız İO uygulamaları için iletkenlik ve TÇK değerleri sırasıyla 6,73 mS/cm ve 3,59 g/L ile 3,67 mS/cm ve 1,91 g/L olarak ölçülmüştür. Deniz suyunda başlangıçta 711-833 mosm/kg aralığında olan deniz suyu osmolalitesi değerleri, distile su tarafında deney süresi sonunda 55-113 mosm/kg aralığında ölçülmüştür.

Deniz suyunun viskozite değerlerinde fark edilir seviyelerdeki azalmalara karşılık, distile suyun viskozite değerlerinde ham deniz suyunun işlenmesi halinde bir miktar azalma görülürken, ön arıtmadan geçirilmiş deniz suyunun işlenmesi sırasında dikkate değer artışlar gözlenmiştir. Deniz suyunun bulanıklık değerinde 0,35-0,54 NTU başlangıç değerlerinden 0,43-0,62 NTU değerlerine az bir artış

meydana geldiği gözlenmiştir. Daha önceki işletim şartları altında da görülen bu durumun, deniz suyu içerisindeki askıda mikroskobik canlılar esaslı katı maddelerden kaynaklandığı tahmin edilmektedir. Diğer yandan distile su tarafında bulanıklık değerleri, ön arıtmaz, MF ön arıtmalı ve UF ön arıtmalı işletimler için sırasıyla 0,15, 0,12 ve 0,05 NTU olarak tespit edilmiştir.

Sonuç olarak, ham deniz suyunun UF ile işlenmesi sonrasında İO prosesinde distile su ile seyreltilmesinin, ham deniz suyunun seyreltilmesiyle kıyaslandığında, İO prosesinin daha etkin işletilmesine katkı sağlıyor olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Uygun proses işletme şartları, ters mod (membranın aktif tabakası distile suya (besleme çözeltisine) doğru) membran yerleşimi, 300 L/sa akış hızı ve izotermal şartlarda 25 °C işletme sıcaklığıdır.

MF ve UF prosesleriyle İO prosesinde deniz suyunun seyreltilmesi öncesinde deniz suyunun ön arıtmaya tabi tutulması neticesinde elde edilen MF ve UF prosesleri süzöntü akılarının zamanla değişimleri Şekil 4.9’da gösterilmiştir.



Şekil 4.9: İO prosesi öncesinde deniz suyunun ön arıtılması işleminde MF ve UF prosesleri süzöntü akılarının zamanla değişimleri.

Şekilden görüleceği üzere, çalışılan deniz sularındaki başlangıç su kalitesi içeriklerinin kısmi değişimlerine bağlı olarak MF ve UF proseslerde, sırasıyla 900 ve 1400 L/m².sa başlangıç akı değerlerinden 300 ve 350 L/m².sa’lık deney sonu süzöntü akısı değerlerine ulaşılmıştır. Proseslerin yaklaşık 2 saat zarfında kararlı bir işletim akısı şartına ulaştığı tespit edilmiştir. MF ve UF proseslerde zamana karşı akı

performanslarının, membran gözenek büyüklüklerinin etkisi altında birbirleriyle benzer seyrinde gerçekleştiği sonucuna varılmıştır. Her iki proseste elde edilen deniz suyu arıtma performansı sonuçları ise Tablo 4.5’de verilmiştir.

Tablo 4.5: İO prosesi öncesinde deniz suyunun MF ve UF prosesleriyle ön arıtılması performansları.

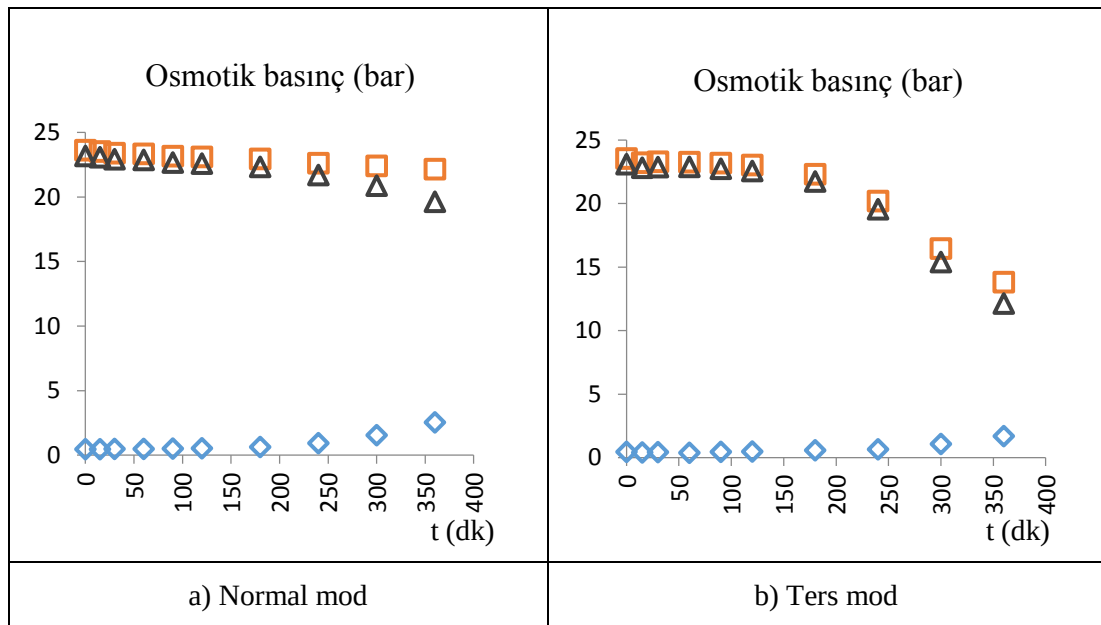
Parametre	Birim	MF Ön Arıtma				UF Ön Arıtma			
		Besleme (t=0. sa)	Besleme (t=2. sa)	Süzüntü	Süzme Verimi (%)	Besleme (t=0. sa)	Besleme (t=2. sa)	Süzüntü	Süzme Verimi (%)
Sıcaklık	°C	25,1	25,6	25,3	-	25,4	25,2	25,1	-
pH	-	8,28	8,20	8,35	-	8,33	8,42	8,20	-
İletkenlik	mS/cm	43,5	44,6	43,3	2,91	42,0	42,1	42,7	-1,43
Yoğunluk	g/cm ³	1,017	1,017	1,0169	0,01	1,0170	1,0173	1,0170	0,03
Viskozite	mPa.s	1,03	1,01	0,98	2,97	1,10	1,12	1,02	8,93
Osmolalite	mosm/kg	786	788	784	0,51	838	853	833	2,34
Bulanıklık	NTU	0,33	0,37	0,35	5,41	0,42	1,02	0,54	47,06
TÇK	g/L	27,0	27,0	26,9	0,37	26,4	26,1	26,5	-1,53

Tablodan anlaşılmaktadır ki, deniz suyunda bulanıklık giderimi UF proseste daha etkin gerçekleştirilebilmekte olup, yaklaşık sabit işletme sıcaklığı altında giriş ve çıkış akımlarında % 0,5-3 civarlarında pH, iletkenlik, viskozite ve osmolalite değişimlerinin meydana geldiği gözlenmiştir. Deniz suyunun osmotik basıncının İO prosesi öncesinde İO performansını etkileyecek seviyede azalmamış olduğu görülmüştür. Besleme ve süzöntü akımlarında, deniz suyu yoğunluğunda önemli değişimler olmadığı görülmüştür. UF proseste konsantrasyon polarizasyon etkisi altında membran yüzey konsantrasyonu artışına bağlı olarak TÇK ve iletkenlik parametrelerinde negatif rejeksiyon belirlenmiştir. Deniz suyunun MF ve UF ile ön arıtma işlemine tabi tutulması neticesinde, bulanıklık hariç deniz suyu kalitesinde önemli değişimler oluşmaksızın deniz suyunun arıtılabildiği gözlenmiştir.

4.1.2. Yeraltı Suyu Kullanılarak Deniz Suyunun Seyreltilmesi

4.1.2.1. Membran İşletme Modu

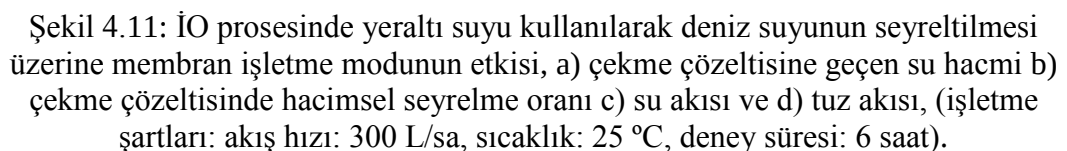
İO prosesinde yeraltı suyu kullanılarak deniz suyunun seyreltilmesi üzerine membran işletme modunun etkisi kapsamında elde edilmiş, işletme moduna bağlı besleme, çekme ve net (çekme-besleme) osmotik basınçların zamanla değişimleri Şekil 4.10'da, proses performansını ifade eden, çekme çözeltisine geçen su hacmi, çekme çözeltisinde hacimsel seyrelme oranı, su akısı ve tuz akısı parametrelerinin zamanla değişimleri ise Şekil 4.11'de gösterilmiştir.



Şekil 4.10: İO prosesiyle yeraltı suyu kullanılarak deniz suyunun seyreltilmesinde membran işletme moduna bağlı olarak İO prosesinde sürücü kuvvet etkisinin zamanla değişimi (akış hızı: 300 L/sa, sıcaklık: 25 °C, deney süresi: 6 saat) (Semboller $\diamond$, $\square$ ve Δ sırasıyla yeraltı suyu, deniz suyu ve prosesteki net osmotik basınçtır).

İşletme moduna bağlı yeraltı suyu ile deniz suyunun seyreltilmesi deneylerinde İO prosesi sürücü kuvveti olan net osmotik basınç farkının, deney süresi boyunca yaklaşık 23 bar'lık başlangıç değerinden, normal ve ters mod işletimler neticesinde sırasıyla 19,6 ve 12,1 bar değerlerine azaldığı belirlenmiştir. Bu durum, ters modda normal moda kıyasla, yeraltı suyundan deniz suyuna daha fazla hacimde su taşınımına bağlı hacimsel seyrelme etkisi ve ters yönde yeraltı suyuna doğru

Çekme çözeltisi olan deniz suyundan besleme çözeltisi olan yeraltı suyuna doğru, su taşınımına ters yönde gerçekleşen çözünmüş madde taşınımına bağlı olarak zamanla beslemedeki osmotik basınç değerinde artış meydana geldiği tespit edilmiştir. Besleme çözeltisi osmotik basınç değerlerinin normal modda 2,5, ters modda 1,7 bara çıktığı görülmüştür.



Proseste membran aktif tabakasının yeraltı suyuna (besleme çözeltisi) temas halde işletimini ifade eden ters işletim modunda, yeraltı suyu ile deniz suyunun çok daha yüksek su geçiş hacmi ve akısı ile seyreltilebildiği belirlenmiştir. Bu deney iki kez tekrar edilmek suretiyle sonuçları doğrulanmıştır.

Karşılaşılan bu durumun sebebi, literatürden de bilindiği üzere, membran içerisindeki etkin sürücü kuvvet etkisini yaratan membran içi konsantrasyon farkına dayalı etkin osmotik basınç farkı olmaktadır. Bu durum, daha önce distile su-deniz suyu deneylerinde de karşılaşıldığı ve açıklandığı üzere, normal moda kıyasla ters modda, artan iç ve seyrelmiş dış konsantrasyon polarizasyon etkileri altında aktif tabaka ara yüzeyinde etkili osmotik sürücü kuvvet etkisinin daha yüksek seviyede kalması sebebiyle ortaya çıkmaktadır.

360 dk sonunda normal ve ters modlar için sırasıyla yaklaşık 188 ve 1430 ml'lik su geçişleri ile (distile suda 169 ve 483 ml gerçekleşmişti) başlangıç 4 L çekme çözeltisinin deney sonunda sırasıyla % 4,7 ve 35,8 seviyelerinde seyreltilmesi işlemleri gerçekleştirilmiştir.

Normal mod performansı, distile su ile yaklaşık aynı seviyeler olmasına rağmen, ters mod için yeraltı suyunda distile su kullanımına nazaran yaklaşık 4 katlık bir su geçiş hacmi artışı olduğu görülmüştür. Bu durumun, proseslerin aynı osmotik sürücü kuvvet etkisi altında olması dolayısıyla, her iki duruma ait membran kirlenmelerinin ve etkili sürücü kuvvet değerlerinin oldukça farklı seviyelerde olması sebebiyle meydana geldiği düşünülmektedir.

Yeraltı suyundaki çözünmüş madde içerik ve dağılımları, daha az membran kirlenmesini sağlamakla birlikte etkili sürücü kuvveti membran aktif tabakada yüksek tutarak prosesi daha etkin işletmeyi sağlamaktadır. Sırasıyla 2,2 ve 17,0 L/m².sa deney sonu su akısı tespit edilen normal ve ters mod işletimlerinde, çekmeden beslemeye geçen çözünmüş madde akılarının sırasıyla 5,8 ve 22,4 g/m².sa (distile suda bu değerler 3,7 ve 10,8 g/m².sa) değerlerinde yüksek değerlerde olduğu tespit edilmiştir.

Ters işletim modunun daha iyi performans sağlamış ve deniz suyu seyrelmesi için temel belirteç olan proses su akıları itibariyle deneylerin 150-200 dk'sı zarfında su akısı azalması değişimlerinin kararlı aşamayı temsil edebilecek yavaş akı azalma fazına ulaşmış olması sebepleriyle bu aşamadan sonraki deneyler, ters modda işletilen İO membran yerleşim modunda ve ön arıtım etkisi şartları hariç 3 saat (180 dk) süresince yürütülmüştür.

Deney süresince izlenen besleme ve çekme çözeltileri su kalite parametrelerinin (pH, osmolalite, yoğunluk, iletkenlik, TÇK (toplam çözünmüş katılar), bulanıklık ve viskozite) zamanla değişimleri, normal ve ters işletim modları için Tablo 4.6’da gösterilmiştir.

Yeraltı suyu ile deniz suyunun normal ve ters modda işletimindeki deneyler süresince, izlenmiş su kalite parametreleri değişimlerinden aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır.

Proses, termal sürücü kuvvet etkisinden bağımsız kılınarak sadece konsantrasyon farkı sürücü kuvvet etkisi altında tutulmak amacıyla, besleme ve çekme çözeltilerinde sabit ($25 \pm 0,5$ °C) izotermal şartlarda işletilmiştir.

Deniz suyu pH’sı 8,4-8,5 aralığında sabit kalmış, yeraltı suyu pH’sı ise 7,8-8,1 başlangıç değerlerinden zamanla artış göstererek 8,6 deney sonu değerine ulaşmıştır. Suyun hidronyum iyonu (H_3O^+) içerikli yapıda deniz suyuna taşınımının yeraltı suyunda pH artışının sebebi olduğu düşünülmektedir.

Deniz suyunun osmolalitesi, yoğunluğu, iletkenliği ve toplam çözünmüş katıları, yeraltı suyuna doğru çözünmüş madde taşınımı ve yeraltı suyundan geçen su ile seyrelme sebebiyle, su ve tuz akılarına bağlı olarak deney süresince azalmıştır. Ancak bu azalma, difüzyonal kütle taşınımı etkisi ters modda daha düşük kaldığı için (daha yüksek deney sonu TÇK akısına rağmen beslemede deney sonu için ölçülmüş daha az iletkenlik ve TÇK dolayısıyla) esasen su geçişinin etkisi altında olmak üzere ters modda belirgin olarak gerçekleşmiştir. Buna karşın, yeraltı suyuna çözünmüş katıların taşınımı, yeraltı suyunda bu parametre değerlerinin bir miktar artmasına neden olmuştur. Normal ve ters modda yeraltı suyundaki deney sonu iletkenlik ve TÇK değerleri sırasıyla 5,9 mS/cm ve 3,1 g/L ile 4,0 mS/cm ve 2,1 g/L (distile su için 3,1 mS/cm ve 2,1 g/L ile 3,7 mS/cm ve 1,9 g/L idi) değerlerine ulaşmıştır.

Deniz suyunda başlangıçta 930 mosm/kg civarında olan deniz suyu osmolalitesi, yeraltı suyu tarafında deney süresi sonunda normal ve ters modlar için sırasıyla 102 ve 68 mosm/kg olarak gerçekleşmiştir.

Deniz suyu viskozite değerlerinde normal modda pek bir değişim gözlenmemiş olmakla birlikte, ters modda deniz suyu viskozitesi yüksek seyrelme etkisi ile azalmış; yeraltı suyunun viskozitesi ise her iki işletim modunda da zamanla bir miktar azalma göstermiştir.

Deniz suyunun bulanıklık değerinin 0,4-0,5 NTU başlangıç değerlerinden 0,5-0,8 değerlerine zamanla arttığı görülmüştür. Yeraltı suyu tarafında ise, 0,5 NTU

bulanıklık değeri, deney sonunda 0,5-0,6 aralığına bir miktar yükselmiştir. Deniz suyundaki bulanıklık artışının seyrelme etkisine karşın mikrobiyal üreme etkisi altında gerçekleştiği, yeraltı suyunda bulanıklık artışının ise konsantre olma etkisinin yanı sıra mikrobiyal üreme etkisi altında da gerçekleşmiş olabileceği tahmin edilmektedir.

Tablo 4.6: Yeraltı suyu kullanılarak deniz suyunun seyreltilmesinde normal ve ters modda işletilen İO prosesinin performansı (akış hızı: 300 L/sa, sıcaklık: 25 °C, hacim:4 L, deney süresi: 6 saat).

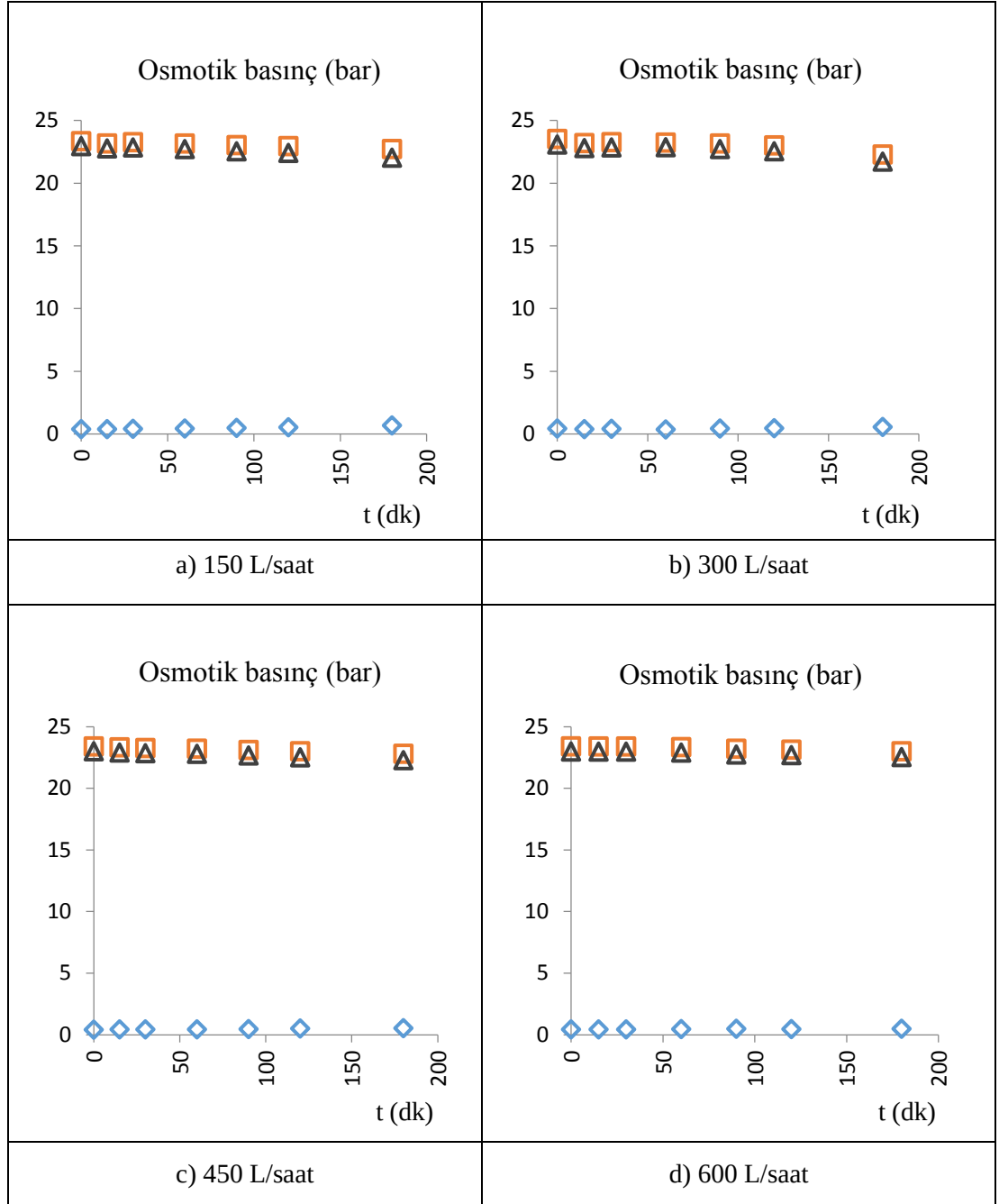
Parametre	Birim	Normal Mod				Ters Mod			
		Yeraltı Suyu		Deniz Suyu		Yeraltı Suyu		Deniz Suyu	
		Deney Başı	Deney Sonu	Deney Başı	Deney Sonu	Deney Başı	Deney Sonu	Deney Başı	Deney Sonu
pH	-	7,79	8,6	8,48	8,37	8,06	8,59	8,37	8,41
Osmolalite	mosm/kg	18	102	934	877	18	68	931	551
Yoğunluk	g/cm ³	0,9977	0,9996	1,0206	1,0193	0,9974	0,9985	1,0204	1,0111
İletkenlik	mS/cm	0,993	5,87	42,2	39,7	1,002	3,97	42,2	22,9
TÇK	g/L	0,489	3,1	26,0	24,2	0,482	2,065	26,0	12,89
Bulanıklık	NTU	0,47	0,5	0,51	0,76	0,5	0,56	0,41	0,52
Viskozite	mPa.s	0,98	0,94	1,07	1,07	1,02	0,99	1,09	1,04

4.1.2.2. Akış Hızı

İO prosesinde yeraltı suyu kullanılarak deniz suyunun seyreltilmesi üzerine akış hızının etkisi kapsamında elde edilmiş, akış hızlarına bağlı besleme, çekme ve net (çekme-besleme) osmotik basınçların zamanla değişimleri Şekil 4.12’de gösterilmiştir.

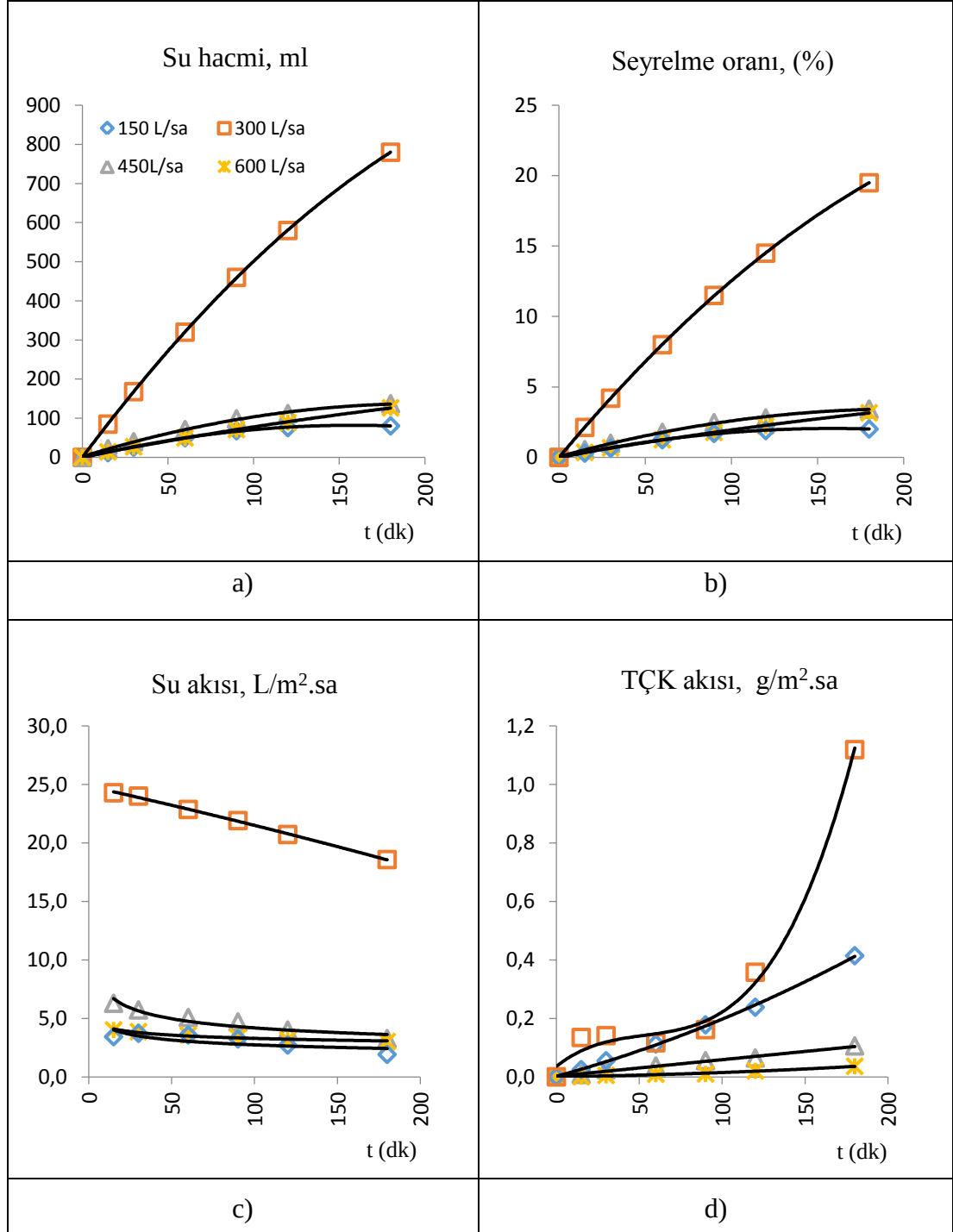
Akış hızına bağlı yeraltı suyu ile deniz suyunun seyreltilmesi deneylerinde İO prosesi sürücü kuvveti olan net osmotik basınç farkının, deney süresi boyunca yaklaşık 23 bar’lık başlangıç değerinden, 21-22 bar civarına çok az seviyede azaldığı görülmüştür. Çekme çözeltisi olan deniz suyundan besleme çözeltisi olan yeraltı suyuna doğru, su taşınımına ters yönde gerçekleşen çözünmüş madde taşınımına bağlı olarak zamanla beslemedeki osmotik basınç değerinde, 3 saat zarfında 0,5-0,7

bar'a (distile suda bu değer 0,2-0,3 bar idi) varan artışlar meydana geldiği tespit edilmiştir.



Şekil 4.12: İO prosesiyle yeraltı suyu kullanılarak deniz suyunun seyreltilmesinde akış hızına bağlı olarak İO prosesinde sürücü kuvvet etkisinin zamanla değişimi (membran yerleşimi: ters mod, sıcaklık: 25 °C, deney süresi: 3 saat) (Semboller $\diamond$, $\square$ ve Δ sırasıyla yeraltı suyu, deniz suyu ve prosesteki net osmotik basınçtır).

Proses performansını ifade eden, çekme çözeltisine geçen su hacmi, çekme çözeltisinde hacimsel seyrelme oranı, su akısı ve tuz akısı parametrelerinin zamanla değişimleri Şekil 4.13’de gösterilmiştir.



Şekil 4.13: İO prosesinde yeraltı suyu kullanılarak deniz suyunun seyreltilmesi üzerine akış hızının etkisi, a) çekme çözeltisine geçen su hacmi b) çekme çözeltisinde hacimsel seyrelme oranı c) su akısı ve d) tuz akısı, (membran yerleşimi: ters mod, sıcaklık: 25 °C, deney süresi: 3 saat).

İO prosesinde, çalışılan diğer akış hızı değerlerine kıyasla 300 L/sa akış hızında, yeraltı suyu ile deniz suyunun daha yüksek su geçiş hacmi ve akısı ile seyreltilebildiği belirlenmiştir. Su geçiş hacmi, seyrelme oranı ve su akısı değerleri, diğer akış hızları için azalan sırayla 450, 600 ve 150 L/sa (distile suda 150, 600 ve 450 L/sa) olarak görülmüştür. Yeraltı suyunda akış hızı değişiminin performans üzerine etkisi, distile sudaki referans performansına kıyasla, 300 L/sa şartı hariç diğer akış hızlarında distile su ile ters yönde bir düzende gerçekleşmiştir. 180 dk işletim sonunda su geçiş hacmi, çekme çözeltisi seyrelme oranı ve su akısı değerleri, 300 L/sa'ta sırasıyla 780 ml, % 19,5 ve 18,6 L/m².sa (distile su için 342 ml, % 8,6 ve 8,1 L/m².sa) olarak belirlenmişken, en düşük performanslı 150 L/sa için bu değerler sırasıyla 80 ml, % 2,0 ve 1,9 L/m².sa olarak tespit edilmiştir. 300 L/sa'ta 1,12 g/m².sa (distile su için 1,4 g/m².sa) olan çözünmüş madde akısının, diğer üç akış hızı değerlerinde ise 0,04-0,41 aralığında kaldığı görülmüştür. Bu sonuçlardan hareketle, sonraki adımda yer alan sıcaklık etkisinin araştırıldığı deneyler, distile su ile seyrelme deneylerinde olduğu gibi, en yüksek su geçişi ve deniz suyu seyrelme performansını veren 300 L/sa akış hızı şartı altında yürütülmüştür.

Deney süresince izlenen besleme ve çekme çözeltileri su kalite parametrelerinin (pH, osmolalite, yoğunluk, iletkenlik, TÇK (toplam çözünmüş katılar), bulanıklık ve viskozite) zamanla değişimleri, 150, 300, 450 ve 600 L/saat akış hızı değerleri Tablo 4.7'de gösterilmiştir. Yeraltı suyu ile deniz suyunun seyreltilmesinde farklı akış hızlarında (150, 300, 450 ve 600 L/sa) işletilen deneyler süresince, su kalite parametreleri değişimlerinden aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır.

Proses, besleme ve çekmede eşdeğer istenen sabit (25±0,5 °C) sıcaklık değerinde (izotermal şartlarda) işletilmiştir. Deniz suyu pH'sı 8,4-8,5 aralığında sabit kalmış, yeraltı suyu pH'sı ise 150 ve 450 L/sa akış hızlarında 8,3 civarında yaklaşık sabit kalmakla birlikte 600 L/sa'ta 8,4 başlangıç değerinden 8,3'e azalmış, 300 L/sa en yüksek hacimli su geçiş şartında ise hidronyum iyonu ağırlıklı su taşınımı etkisi altında 8,1 civarından 8,6'ya yükselmiştir. Bununla birlikte, her iki çözeltideki deney başı ve sonu pH değerlerinin birbirlerine yakın seyrettiği görülmüştür.

Deniz suyunun osmolalitesi, yoğunluğu, iletkenliği ve toplam çözünmüş katıları, yeraltı suyuna doğru çözünmüş madde taşınımı ve yeraltı suyundan geçen su ile seyrelme sebebiyle, su ve tuz akılarına bağlı olarak deney süresince farklı akış hızlarında kısmen farklı fakat çok az seviyelerde azalmalar göstermiştir.

Tablo 4.7: Yeraltı suyu kullanılarak deniz suyunun seyreltilmesinde 150, 300, 450 ve 600 L/saat’te işletilen İO prosesinin performansı (membran yerleşimi: ters mod, sıcaklık: 25 °C, hacim:4 L, deney süresi: 3 saat).

Parametre	Birim	150 L/sa				300 L/sa				450 L/sa				600 L/sa			
		Yeraltı Suyu		Deniz Suyu		Yeraltı Suyu		Deniz Suyu		Yeraltı Suyu		Deniz Suyu		Yeraltı Suyu		Deniz Suyu	
		Deney Başı	Deney Sonu	Deney Başı	Deney Sonu	Deney Başı	Deney Sonu	Deney Başı	Deney Sonu	Deney Başı	Deney Sonu	Deney Başı	Deney Sonu	Deney Başı	Deney Sonu	Deney Başı	Deney Sonu
pH	-	8,28	8,26	8,53	8,37	8,06	8,55	8,37	8,4	8,28	8,26	8,5	8,38	8,43	8,26	8,46	8,42
Osmolalite	mosm/kg	16	28	924	900	18	23	931	883	16	21	925	902	17	19	925	910
Yoğunluk	g/cm ³	0,9977	0,9977	1,0204	1,0196	0,9974	0,9976	1,0204	1,0192	0,9975	0,9975	1,0205	1,0198	0,9974	0,9974	1,0207	1,0198
İletkenlik	mS/cm	1,046	1,735	42,4	41,0	1,002	1,328	42,2	40,0	1,055	1,191	42,4	41,6	1,04	1,115	42,5	41,7
TÇK	g/L	0,516	0,873	26,5	25,6	0,482	0,659	26,0	24,4	0,52	0,591	26,6	25,6	0,515	0,551	26,8	25,9
Bulanıklık	NTU	0,5	0,49	0,6	0,65	0,5	0,54	0,41	0,45	0,50	0,50	0,65	0,64	0,50	0,51	0,60	0,58
Viskozite	mPa.s	0,95	0,94	1,0	0,99	1,02	0,99	1,09	1,05	0,99	0,97	1,02	1,03	0,97	0,98	1,04	1,04

Buna karşın, yeraltı suyuna difüzyonal kütle taşınımı, yeraltı suyunda bu parametre değerlerinin bir miktar artmasına neden olmuştur. Yeraltı suyundaki deney sonu en yüksek ve en düşük çözünmüş madde değerleri görülmüş 150 ve 600 L/sa akış hızları için iletkenlik ve TÇK değerleri sırasıyla 1735 $\mu\text{S/cm}$ ve 873 mg/L ile 1115 $\mu\text{S/cm}$ ve 551 mg/L olarak tespit edilmiştir. En yüksek su geçişli 300 L/sa'ta bu değerler sırasıyla 1328 $\mu\text{S/cm}$ ve 659 mg/L (distile suda 365 $\mu\text{S/cm}$ ve 171 mg/L) olarak gerçekleşmiştir. Deniz suyunda başlangıçta 924-931 mosm/kg aralığında olan deniz suyu osmolalitesi 883-910 mosm/kg değerine azalmışken, yeraltı suyunda 16-18 mosm/kg olan başlangıç osmolalitesi deney süresi sonunda 19-28 mosm/kg (distile suda 6-11 mosm/kg idi) değerine az bir miktar artış göstermiştir.

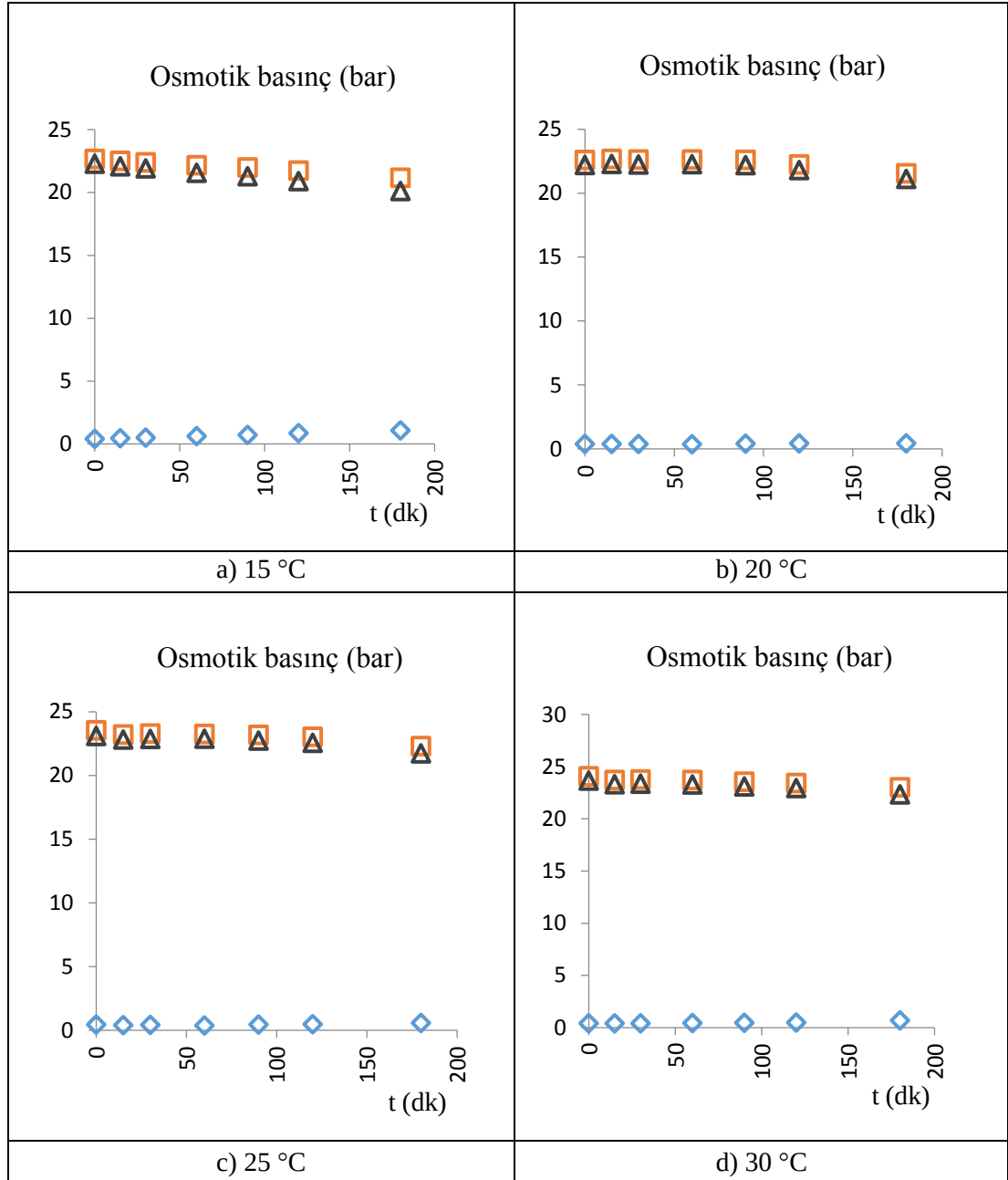
Deniz suyu viskozite değerlerinde 300 L/sa'ta rölatif olarak daha yüksek seyrelme etkisi ile kısmen azalmalar görülmüş (1,09 mPa.s'den 1,05 mPa.s'ye), diğer akış hızlarında deney başı sonu değişimler arasında önemli farklılıklar oluşmamıştır. Yeraltı suyu viskozite değerlerinin ise diğer akış hızlarında pek değişmemiş olmakla birlikte yine 300 L/sa'ta azalma gösterdiği (1,02 mPa.s'den 0,99 mPa.s'ye) belirlenmiştir. Deniz suyunun bulanıklık değerinin 0,41-0,65 NTU başlangıç değerlerinden 0,45-0,65 deney sonu değerlerine tüm akış hızı deneylerinde pek değişmediği gözlenmiştir. Yeraltı suyu tarafında ise, 0,5 NTU başlangıç bulanıklık değeri, deney sonunda 0,5-0,6 aralığına bir miktar yükselmiştir.

4.1.2.3. Sıcaklık

İO prosesinde yeraltı suyu kullanılarak deniz suyunun seyreltilmesi üzerine sıcaklığın etkisi kapsamında elde edilmiş, besleme ve çekmede eş zamanlı sıcaklık değişimlerine bağlı besleme, çekme ve net osmotik basınçların zamanla değişimleri Şekil 4.14'de gösterilmiştir.

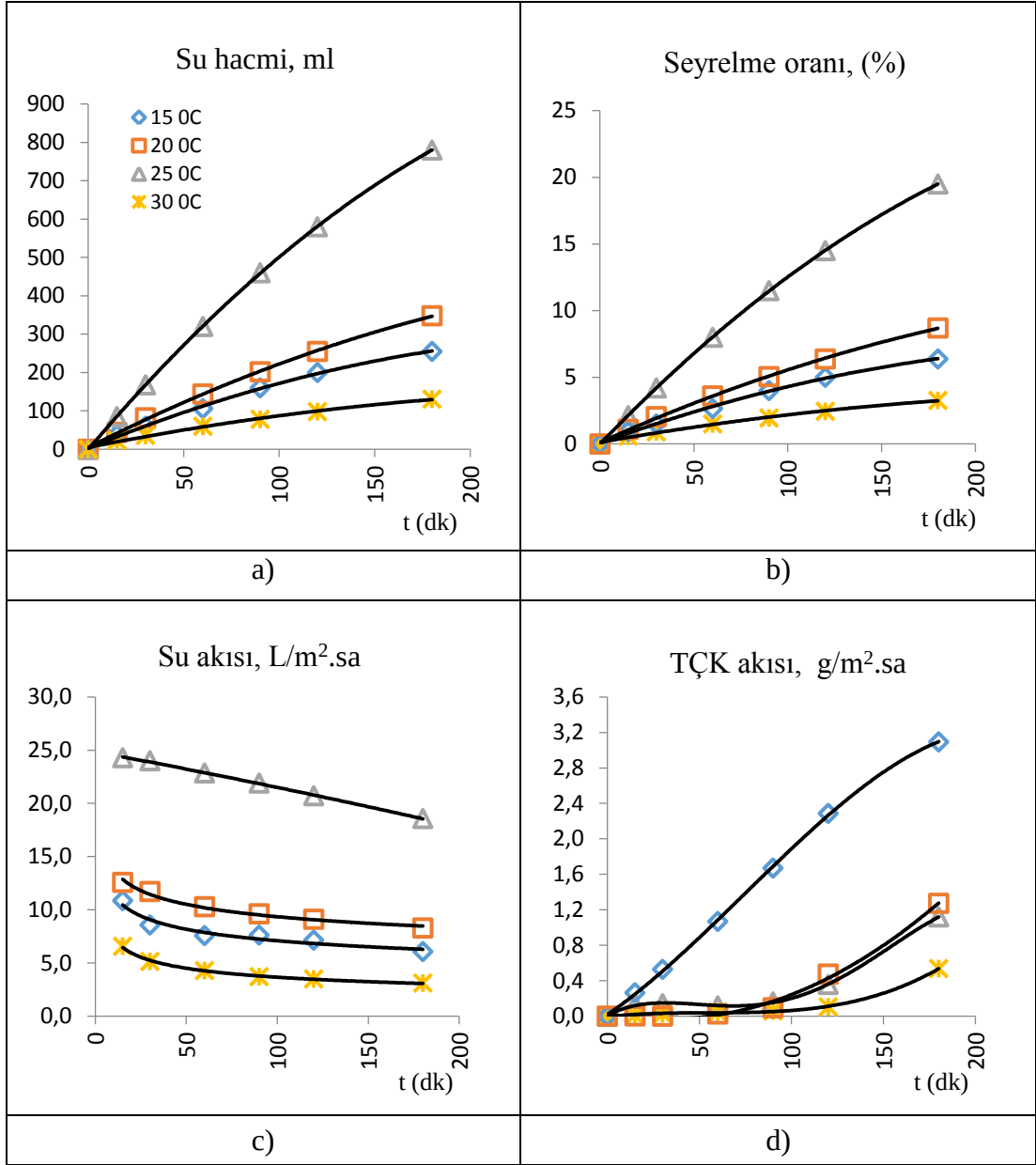
Sıcaklığa bağlı yeraltı suyu ile deniz suyunun seyreltilmesi deneylerinde İO prosesi sürücü kuvveti olan net osmotik basınç farkının, deney süresi boyunca yaklaşık 22-24 bar'lık başlangıç değerlerinden, 21-22 bar'lar civarına bir miktar azaldığı görülmüştür. Çekme çözeltisinden besleme çözeltisine doğru gerçekleşen çözünmüş madde taşınımına bağlı olarak, 3 saat zarfında 0,4-1,0 bar'a (distile su ile yapılan sıcaklık etkisi deneylerinde bu değer 0,2-0,9 bar aralığında idi) varan artışlar meydana geldiği tespit edilmiştir. Buna göre, değişen sıcaklık işletme şartlarına

rağmen prosesin başlangıç aşamasındaki sürücü kuvvete yakın bir kuvvet etkisi altında sürdürülebildiği belirlenmiştir.



Şekil 4.14: İO prosesiyle yeraltı suyu kullanılarak deniz suyunun seyreltilmesinde sıcaklığa bağlı olarak İO prosesinde sürücü kuvvet etkisinin zamanla değişimi (membran yerleşimi: ters mod, akış hızı: 300 L/sa, deney süresi: 3 saat) (Semboller $\diamond$, $\square$ ve Δ sırasıyla yeraltı suyu, deniz suyu ve prostedeki net osmotik basınçtır).

Proses performansını ifade eden, çekme çözeltisine geçen su hacmi, çekme çözeltisinde hacimsel seyrelme oranı, su akısı ve tuz akısı parametrelerinin zamanla değişimleri Şekil 4.15’de gösterilmiştir.



Şekil 4.15: İO prosesinde yeraltı suyu kullanılarak deniz suyunun seyreltilmesi üzerine sıcaklığın etkisi, a) çekme çözeltisine geçen su hacmi b) çekme çözeltisinde hacimsel seyrelme oranı c) su akısı ve d) tuz akısı, (membran yerleşimi: ters mod, akış hızı: 300 L/sa, deney süresi: 3 saat).

İO prosesinde 25 °C sıcaklıkta, yeraltı suyu ile deniz suyunun daha yüksek su geçiş hacmi ve akısı ile seyreltilebildiği görülmüştür. Su geçiş hacmi, seyrelme oranı ve su akısı değerlerinin, azalan sırayla 20, 15 ve 30 °C sıcaklıklarda (distile suda 15, 20 ve 30 °C) meydana geldiği tespit edilmiştir. Yeraltı suyunda sıcaklık değişiminin performans üzerine etkisi, distile sudaki referans performansa kıyasla, 15 ve 20 °C sıcaklıklar arasında değişen sırada olmak üzere aynı düzende gerçekleşmiştir. 180 dk işletim sonunda su geçiş hacmi, çekme seyrelme oranı ve su akısı değerleri, 25 °C

sıcaklıkta sırasıyla 780 ml, % 19,5 ve 18,6 L/m².sa (distile su için 342 ml, % 8,6 ve 8,1 L/m².sa) olarak belirlenmişken, en düşük performanslı 30 °C sıcaklık için bu değerler sırasıyla 131 ml, % 3,3 ve 3,1 L/m².sa (distile su için 79 ml, % 1,7 ve 1,6 L/m².sa) olarak tespit edilmiştir. Bu sonuçlar göstermektedir ki, farklı sıcaklıklar etkisi altında İO prosesinde deniz suyunu seyreltme performansı, yeraltı suyu kullanılması durumunda distile suya nazaran daha yüksek seviyede gerçekleştirilmiştir. 25 °C sıcaklıkta 1,1 g/m².sa (distile su için 1,4 g/m².sa) olan çözünmüş madde akısı, 15 °C sıcaklıkta 3,1 g/m².sa (distile su için 1,9 g/m².sa), 20 ve 30 °C sıcaklıklarda ise sırasıyla 1,3 ve 0,5 g/m².sa (distile su için sırasıyla 0,1 ve 0,6 g/m².sa) olarak gerçekleşmiştir. Bu sonuçlardan hareketle, sonraki adımda yer alan ön arıtma etkisinin araştırıldığı deneyler, 300 L/sa akış hızı ve 25 °C sıcaklık şartları altında yürütülmüştür.

Deney süresince izlenen besleme ve çekme çözeltileri su kalite parametrelerinin (pH, osmolalite, yoğunluk, iletkenlik, TÇK (toplam çözünmüş katılar), bulanıklık ve viskozite) zamanla değişimleri, 15, 20, 25, 30 °C sıcaklık değerleri için Tablo 4.8’de gösterilmiştir (25 °C sıcaklıkta işletim için değişimler daha önce Tablo 4.7’de de gösterilmişti). Yeraltı suyu ile deniz suyunun farklı izotermal sıcaklık şartları altında seyreltilmesi deneyleri süresince, izlenmiş su kalite parametreleri değişimlerinden aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır.

Proseste, besleme ve çekmede $\pm 0,5$ °C ile istenen sıcaklık değeri için izotermal sıcaklık şartları altında deneysel çalışmalar yürütülmüştür. Deniz suyunda pH değeri, 20 ve 25 °C sıcaklıklarda 8,4 civarında sabit bir değişim göstermiş olmakla birlikte 15 ve 30 °C sıcaklıklarda 8,5-8,6 başlangıç değerlerinden 8,4 değerine azalmıştır. Yeraltı suyu pH’sı ise 25 °C hariç 8,2-8,4 aralığında değişim göstermiş olmakla birlikte, çalışılan sıcaklıklar arasında en yüksek hacimli su geçiş şartını vermiş 25 °C sıcaklıkta hidronyum iyonu ağırlıklı su taşınımı etkisi altında 8,1 civarından 8,6’ya yükselmiştir. Her iki çözeltideki deney başı ve sonu pH değerlerinin birbirlerine yakın seyrettiği görülmüştür.

Tablo 4.8: Yeraltı suyu kullanılarak deniz suyunun seyreltilmesinde 15, 20, 25 ve 30 °C 'de işletilen İO prosesinin performansı (membran yerleşimi: ters mod, akış hızı: 300 L/sa, hacim: 4L, deney süresi: 3 saat).

Parametre	Birim	15 °C				20 °C				25 °C				30 °C			
		Yeraltı Suyu		Deniz Suyu		Yeraltı Suyu		Deniz Suyu		Yeraltı Suyu		Deniz Suyu		Yeraltı Suyu		Deniz Suyu	
		Deney Başı	Deney Sonu	Deney Başı	Deney Sonu	Deney Başı	Deney Sonu	Deney Başı	Deney Sonu	Deney Başı	Deney Sonu	Deney Başı	Deney Sonu	Deney Başı	Deney Sonu	Deney Başı	Deney Sonu
pH	-	8,26	8,31	8,57	8,39	8,37	8,32	8,34	8,40	8,06	8,55	8,37	8,4	8,33	8,23	8,48	8,36
Osmolalite	mosm/kg	16	44	926	866	16	18	912	868	18	23	931	883	16	27	937	897
Yoğunluk	g/cm ³	0,9987	0,9994	1,022	1,0204	0,9980	0,9986	1,0171	1,0194	0,9974	0,9976	1,0204	1,0192	0,9972	0,9968	1,0196	1,0188
İletkenlik	mS/cm	1,036	2,69	42,1	38,3	1,03	1,614	43,8	40,0	1,002	1,328	42,2	40,0	1,048	1,624	43,7	42,1
TÇK	g/L	0,513	1,378	26,2	23,5	0,506	0,806	27,1	24,4	0,482	0,659	26,0	24,4	0,516	0,814	27,1	25,9
Bulanıklık	NTU	0,45	0,47	0,43	0,46	0,50	0,53	0,60	0,63	0,5	0,54	0,41	0,45	0,40	0,43	0,48	0,58
Viskozite	mPa.s	1,15	1,12	1,26	1,23	1,02	1,02	1,16	1,11	1,02	0,99	1,09	1,05	0,85	0,84	0,89	0,89

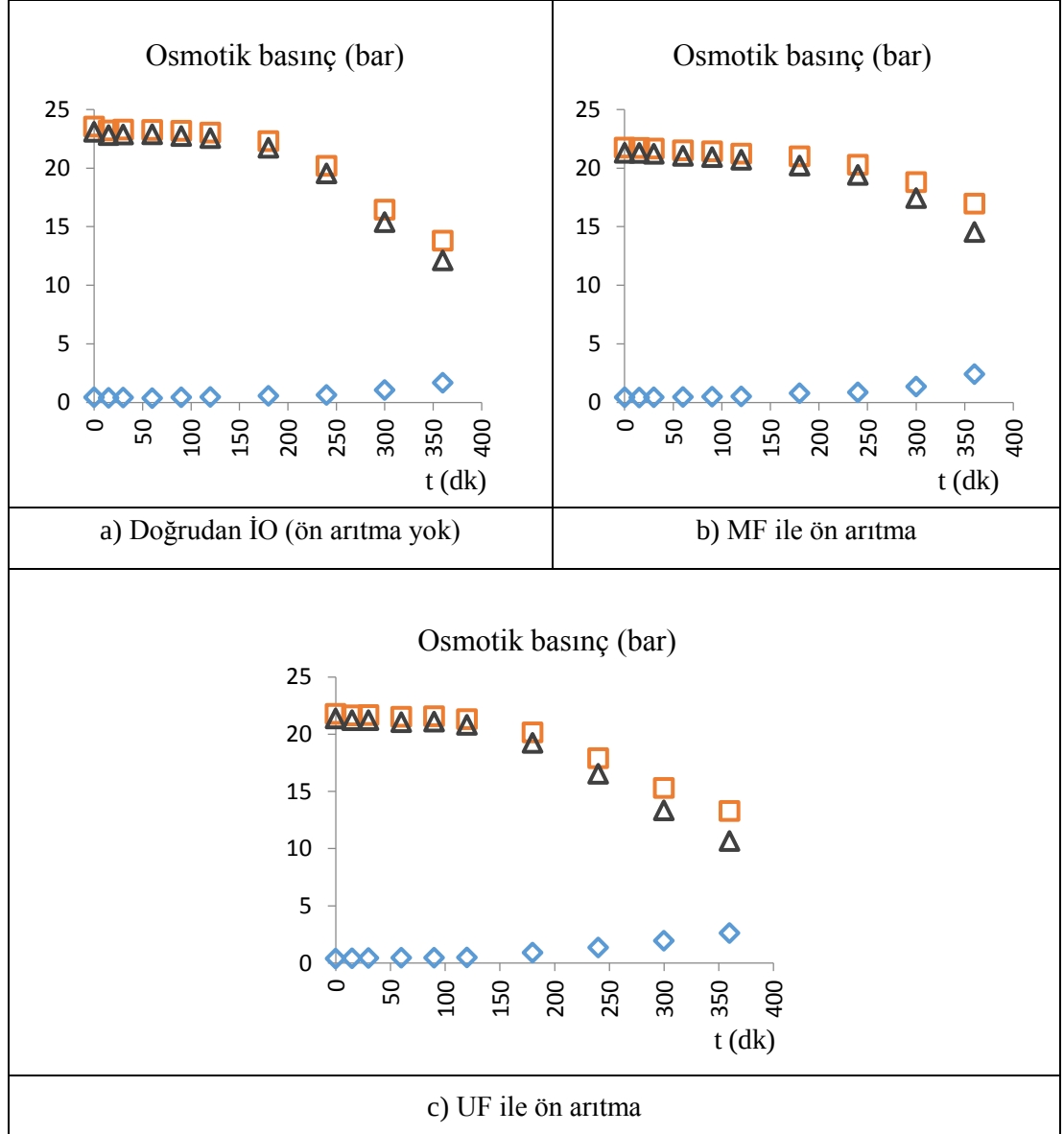
Deniz suyunun osmolalitesi, yoğunluğu, iletkenliği ve toplam çözünmüş katıları, yeraltı suyuna doğru çözünmüş madde taşınımı ve yeraltı suyundan geçen su ile seyrelme sebebiyle, su ve tuz akılarına bağlı olarak deney süresince düşük seviyelerde azalmıştır. Buna karşın, yeraltı suyuna deniz suyundan difüzyonal kütle taşınımı, yeraltı suyunda bu parametre değerlerinin artması durumunu beraberinde getirmiştir. Yeraltı suyunda deney sonu en yüksek ve en düşük çözünmüş madde değerleri görölmüş 15 ve 25 °C sıcaklıklar için iletkenlik ve TÇK değerleri sırasıyla 2690 µS/cm ve 1378 mg/L ile 1328 µS/cm ve 659 mg/L (25 °C için distile suda 365 µS/cm ve 171 mg/L idi) olarak ölçölmüştür. Deniz suyunda başlangıçta 912-937 mosm/kg aralığında olan deniz suyu osmolalitesi 866-897 mosm/kg aralığına azalmışken, yeraltı suyunda 16-18 mosm/kg olan başlangıç osmolalitesi deney süresi sonunda 18-44 mosm/kg (distile suda 6-37 mosm/kg idi) değerine bir miktar artış göstermiştir.

Deney süresince sabit viskozite değişimi görölen 30 °C hariç deniz suyunun viskozite değerlerinde çok düşük azalmalar meydana gelmiş, deney sonunda başlangıç değerine önce çok az miktar artarak sonra azalma görölen 20 °C hariç yeraltı suyunun viskozite değerlerinde çok düşük miktarlarda azalmalar gözlenmiştir. Genel olaraksa sıcaklıkla deney başı ve sonu değerleri arasında önemli farklılıklar gözlenmemiştir. Tüm sıcaklık deneylerinde, deniz suyunun bulanıklık değerinin 0,41-0,60 NTU başlangıç değerlerinden 0,46-0,63 değerlerine, yeraltı suyunun bulanıklık değerinin ise 0,40-0,50 NTU başlangıç değerlerinden 0,43-0,54 deney sonu değerlerine pek değişmediği tespit edilmiştir.

4.1.2.4. Ön Arıtma

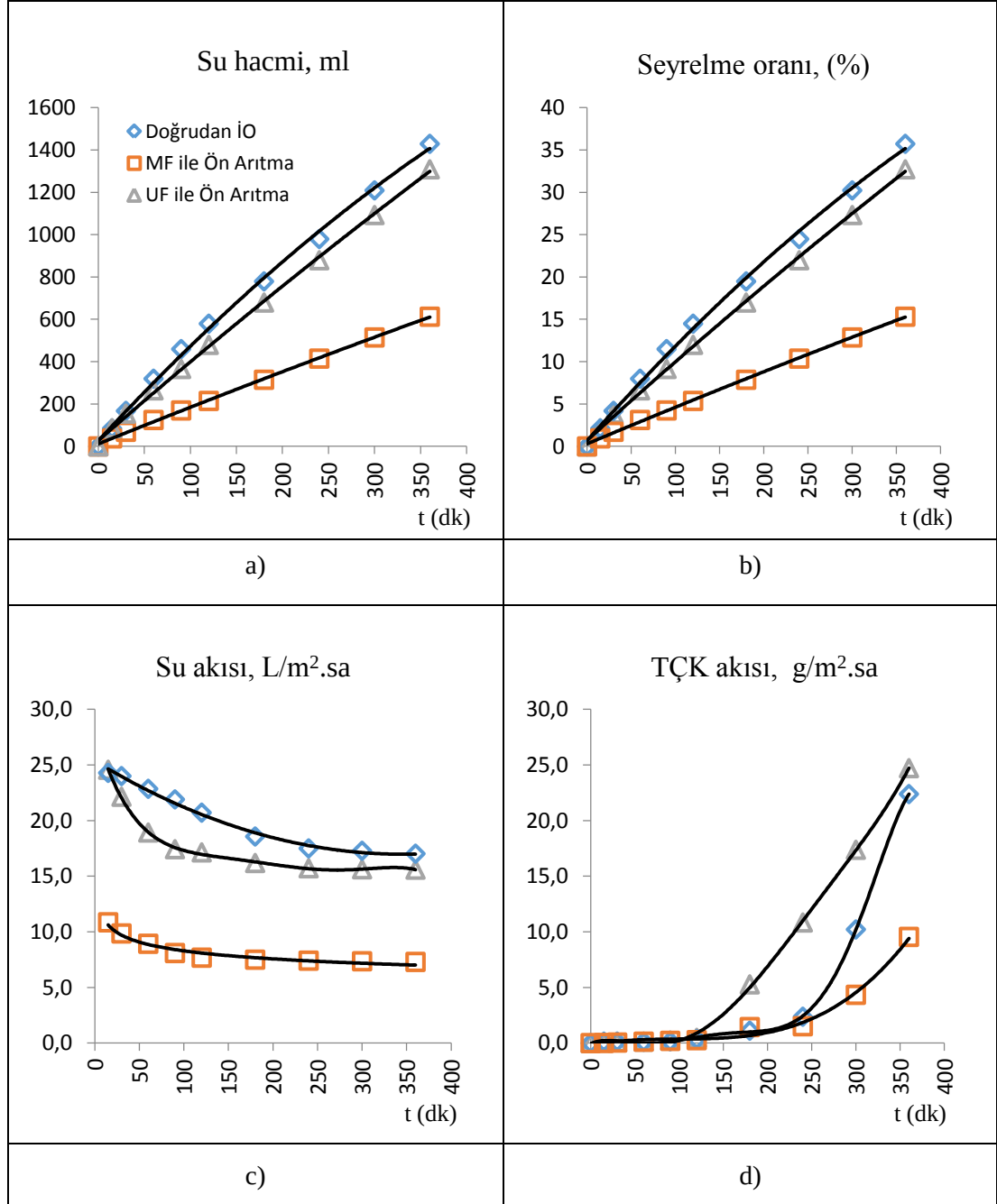
İO prosesinde yeraltı suyu kullanılarak deniz suyunun seyreltilmesi üzerine ön arıtma yapıp yapılmamasının etkisini belirleme çalışmaları kapsamında çalışılan, deniz suyuna doğrudan İO uygulaması (ön arıtma yok), MF ile ön arıtma ve UF ile ön arıtma uygulamaları için İO prosesinde elde edilmiş besleme, çekme ve net osmotik basınçların zamanla değişimleri Şekil 4.16'da verilmiştir. Ön arıtma etkisine bağlı yeraltı suyu ile deniz suyunun seyreltilmesi deneylerinde İO prosesi sürücü kuvveti olan net osmotik basınç farkının, 6 saatlik deney süresi sonunda yaklaşık 21-23 bar'lık başlangıç değerlerinden, 11-15 bar'lar civarına dikkate değer seviyede

azaldığı görülmüştür. Azalmanın özellikle ön arıtmasız (doğrudan İO prosesi) ve UF ile ön arıtma yapılması hallerinde daha yüksek olduğu görülmüş, en fazla basınç azalması UF ile ön arıtma yapılması durumunda ortaya çıkmıştır. Beslemede ön arıtmasız işletim için 6 saat sonunda ulaşılan osmotik basınç değeri 1,7 bar (distile su için 1,4 bar) civarında gerçekleşmiş iken bu değer, MF ve UF ile ön arıtma sonrası için sırasıyla 2,4 ve 2,6 bar (distile su için 2,8 bar) olarak tespit edilmiştir.



Şekil 4.16: İO prosesiyle yeraltı suyu kullanılarak deniz suyunun seyreltilmesinde ön arıtma (MF veya UF) yapıp yapılmamasına bağlı olarak İO prosesinde sürücü kuvvet etkisinin zamanla değişimi (membran yerleşimi: ters mod, akış hızı: 300 L/sa, sıcaklık: 25 °C, deney süresi: 6 saat) (Semboller $\diamond$, $\square$ ve Δ sırasıyla yeraltı suyu, deniz suyu ve prostesteki net osmotik basınçtır).

Proses performansını ifade eden, çekme çözeltisine geçen su hacmi, çekme çözeltisinde hacimsel seyrelme oranı, su akısı ve tuz akısı parametrelerinin zamanla değişimleri ise Şekil 4.17’de gösterilmiştir.



Şekil 4.17: Yeraltı suyu kullanılarak deniz suyunun seyreltilmesi üzerine MF ve UF prosesleriyle ön arıtma yapılmasının İO prosesi performansı üzerine etkisi, a) çekme çözeltisine geçen su hacmi b) çekme çözeltisinde hacimsel seyrelme oranı c) su akısı ve d) tuz akısı, (membran yerleşimi: ters mod, akış hızı: 300 L/sa, sıcaklık: 25 °C, deney süresi: 6 saat).

İO prosesi öncesinde UF ile deniz suyunun ön arıtmadan geçirilmesi sonrasında İO prosesinde yeraltı suyu ile ön arıtılmış deniz suyunun seyreltilmesi işlemi, İO'da daha yüksek su geçiş hacmi ve akısı vermiş ise de, bu düzende yeraltı suyu için doğrudan İO performansına yakın ancak biraz daha düşük İO performansı elde edilmiştir. Yeraltı suyu ile seyreltme işlemlerinde su geçiş hacmi, seyrelme oranı ve su akısı değerlerinin, doğrudan İO uygulaması, UF ile ön arıtma sonrası İO uygulaması, ve MF ile ön arıtma sonrası İO uygulaması azalan sırasında meydana geldiği tespit edilmiştir. 6 saat işletim süresi sonunda su geçiş hacmi, çekmede seyrelme oranı ve su akısı değerleri, doğrudan İO uygulamasında sırasıyla 1430 ml, % 35,8 ve 17,0 L/m².sa (distile su için sırasıyla 483 ml, % 12,1 ve 5,8 L/m².sa) olarak belirlenmişken, en düşük performanslı MF ile ön arıtmada sırasıyla 613 ml, % 15,3 ve 7,3 L/m².sa (distile su için sırasıyla 337 ml, % 8,4 ve 4,0 L/m².sa) olarak tespit edilmiştir. Bu performanslar distile su ve yeraltı suyu ikilisi için UF ile ön arıtma sonrasında sırasıyla 899 ve 1310 ml, % 22,5 ve 32,7 ve 10,7 ve 15,6 L/m².sa olarak bulunmuştur. Su geçiş performansına bağlı olarak seyreden deney sonu çözünmüş madde akısı değerleri de, azalan sırada 24,7 (UF/İO), 22,4 (İO) ve 9,5 (MF/İO) g/m².sa (distile su için 34,9 (UF/İO), 10,8 (İO) ve 9,9 (MF/İO) g/m².sa) gibi yüksek değerlerde tespit edilmiştir.

Deney süresince İO prosesinde izlenen besleme ve çekme çözeltileri su kalite parametrelerinin (pH, osmolalite, yoğunluk, iletkenlik, TÇK (toplam çözünmüş katılar), bulanıklık ve viskozite) zamanla değişimleri, ön arıtmasız İO prosesi için daha önce Tablo 4.6'da verilmiş olup, MF ve UF ile ön arıtma uygulamaları için Tablo 4.9'da gösterilmiştir. Deniz suyunun MF ve UF membran prosesleriyle ön arıtmadan geçirilip geçirilmeksizin yeraltı suyu ile seyreltilmesi İO deneyleri süresince, izlenmiş su kalite parametreleri değişimlerinden aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır.

Proses, termal sürücü kuvvet etkisinden bağımsız kılınarak sadece konsantrasyon farkı sürücü kuvvetinin etkisi altında tutulmak amacıyla, besleme ve çekme çözeltilerinde sabit (25±1 °C) izotermal şartlarda işletilmiştir.

İO prosesinde kullanılan deniz suyunun pH değeri, ön arıtma olsun ya da olmasın deneyler süresince 8,4-8,5 aralığında yaklaşık sabit bir değişim göstermiştir. Proseste kullanılan yeraltı suyunda ise pH'nın zamanla arttığı görülmüştür. Ön arıtmasız, MF ön arıtmalı ve UF ön arıtmalı uygulamalar için bu artışlar sırasıyla, 8,1'den 8,6'ya, 8,3'ten 8,5'e ve 8,2'den 8,6'ya şeklinde gerçekleşmiş olup, deney

sonu yeraltı suyu ve deniz suyu pH'ları birbirlerine yakın değerlerde son bulmuştur. Deniz suyu ve yeraltı suyunun pH'larındaki bu değişimler, daha önceki yeraltı suyu çalışma şartları ve distile su ile yapılan çalışmalarda da görüldüğü şekliyle, yeraltı suyunda elektro-nötralite şartları ve deniz suyu pH'sının pek değişmemiş olması durumları da dikkate alınarak; yeraltı suyundan deniz suyuna su taşınımının, hidronyum iyonu (H_3O^+) içerikli olarak gerçekleştiğini ortaya koymaktadır.

Tablo 4.9: MF ve UF ile ön arıtma yapılmış deniz suyunun yeraltı suyu kullanılarak seyreltilmesinde İÖ prosesinin performansı (membran yerleşimi: ters mod, akış hızı: 300 L/sa, sıcaklık: 25 °C, hacim: 4 L, deney süresi: 6 saat).

Parametre	Birim	MF				UF			
		Yeraltı Suyu		Deniz Suyu		Yeraltı Suyu		Deniz Suyu	
		Deney Başı	Deney Sonu	Deney Başı	Deney Sonu	Deney Başı	Deney Sonu	Deney Başı	Deney Sonu
pH	-	8,3	8,48	8,45	8,45	8,21	8,55	8,41	8,48
Osmolalite	mosm/kg	18	98	863	676	16	106	863	531
Yoğunluk	g/cm ³	0,9974	0,9961	1,0169	1,0128	0,9974	0,9991	1,0184	1,0104
İletkenlik	mS/cm	1,034	5,3	42,6	33,5	1,013	5,95	42,4	24,2
TÇK	g/L	0,507	2,77	26,6	20,18	0,499	3,464	26,1	14,09
Bulanıklık	NTU	0,52	0,58	0,55	0,55	0,52	0,59	0,54	0,34
Viskozite	mPa.s	0,92	0,92	1,02	1,02	0,94	0,96	1,03	1,02

Deniz suyunun osmolalitesi, yoğunluğu, iletkenliği ve toplam çözünmüş katıları, yeraltı suyuna çözünmüş madde taşınımı ve yeraltı suyundan deniz suyu tarafına geçen su ile seyrelme sebebiyle, su ve tuz akılarına bağlı olarak deney süresince önemli derecelere varan seviyelerde azalmıştır. Deney sonu en yüksek ve en düşük çözünmüş madde değerleri görülmüş UF ile ön arıtma ve ön arıtmasız İÖ uygulamaları için iletkenlik ve TÇK değerleri sırasıyla 5,95 mS/cm ve 3,46 g/L ile 3,97 mS/cm ve 2,07 g/L (distile suda MF ile ön arıtma ve ön arıtmasız İÖ uygulamaları için iletkenlik ve TÇK değerleri sırasıyla 6,73 mS/cm ve 3,59 g/L ile 3,67 mS/cm ve 1,91 g/L) olarak ölçülmüştür. Bu sonuçlar, distile su ve yeraltı suyu tarafında ulaşılan çözünmüş madde konsantrasyonu bakımından ön arıtma yapıp yapılmamasına bağlı önemli farklılıklar oluşmadığını göstermektedir. Deniz suyunda

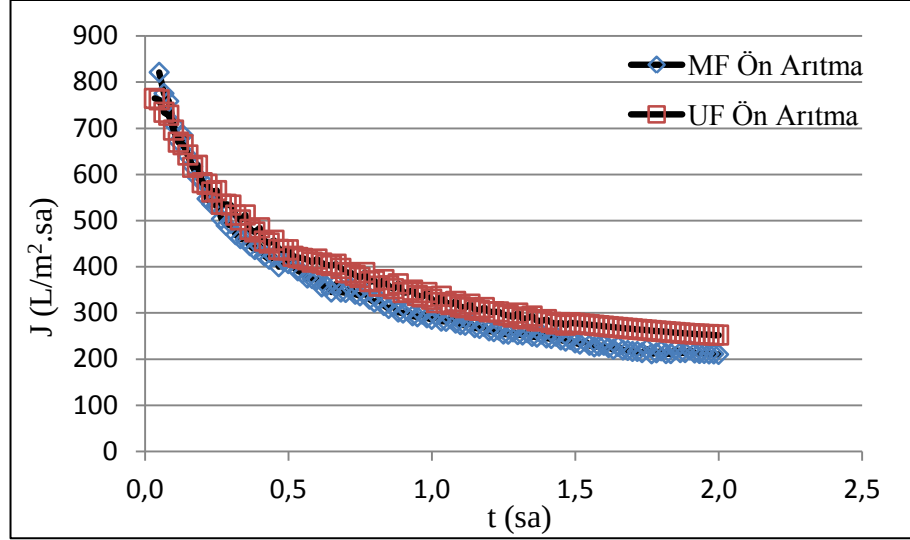
başlangıçta 863-931 mosm/kg aralığında olan deniz suyu osmolalitesi değerleri, deney süresi sonunda, yüksek seviyelerdeki seyrelme etkisi altında 531-676 mosm/kg değerlerine azalmıştır. Yeraltı suyunda ise başlangıçta 16-18 mosm/kg aralığında olan osmolalite değerleri, deney süresi sonunda, su geçişi sebebiyle yeraltı suyunun konsantre olması ve yeraltı suyuna doğru deniz suyu tarafından kütle taşınımına bağlı olarak 68-106 mosm/kg (distile su için 55-113 mosm/kg) aralığına artmıştır.

Deniz suyunun viskozite değerlerinde doğrudan İO uygulaması durumunda fark edilir seviyelerdeki azalmalara karşılık, ön arıtma yapılması halinde pek değişmeyen bir zaman seyri gözlenmiştir. Yeraltı suyunun viskozitesi ön arıtmasız ve UF ile ön arıtma uygulamalarında deneylerin 50-120 dk'ları arasında dalgalanma sergilemiş, ön arıtmasızda deney başı değerine ulaşan viskozite değeri, UF ön arıtmada bir miktar artış göstermiştir. MF ön arıtma uygulamasında ise önemli bir değişim seyri gözlenmemiştir. Deniz suyunun bulanıklık değerinin, MF/İO'da 0,55 NTU civarında sabit kaldığı, UF/İO'da 0,54 NTU'dan 0,34 NTU'ya azaldığı, doğrudan İO'da ise 0,41 NTU'dan 0,52 NTU'ya arttığı tespit edilmiştir. Ön arıtma yapılan deniz suyunun, İO prosesinde bulanıklık artışı olmadan seyretiltebildiği, ancak distile su deneylerinde de daha önce görüldüğü üzere, yeraltı suyu ile doğrudan İO seyreltmesi yapılması durumunda bir miktar bulanıklık artışının ortaya çıkabileceğidir. Bu artışın da deniz suyundaki mikrobiyal büyüme kaynaklı olduğu tahmin edilmektedir. Diğer yandan yeraltı suyu tarafındaki bulanıklık değerlerindeki değişimler, ön arıtmasız, MF ön arıtmalı ve UF ön arıtmalı işletimler için sırasıyla 0,50 NTU'dan 0,56 NTU'ya, 0,52 NTU'dan 0,58 NTU'ya ve 0,52 NTU'dan 0,59 NTU'ya artış şeklinde kendini göstermiştir.

Sonuç olarak, her ne kadar distile su ile deniz suyunun seyretilmesinde UF/İO kombinasyonu daha yüksek İO performansı sağlamış ise de, deniz suyunun ön arıtmaya tabi tutulmaksızın yeraltı suyu (besleme)-deniz suyu (çekme) düzenindeki İO prosesinde ön arıtma uygulanmaksızın doğrudan seyretilmesi, İO prosesinin ekonomisi ve pratikliği bakımından doğru bir seçim olacaktır. Proses işletme şartları ters mod membran yerleşimi, 300 L/sa akış hızı ve izotermal şartlarda 25 °C işletme sıcaklığıdır. Proseste kesikli şartlarda ulaşılan seyrelme hacimleri (% 30-35) için geri yıkama süresi 6 saat azami olarak belirlenmiştir.

MF ve UF prosesleriyle İO prosesinde deniz suyunun seyretilmesi öncesinde deniz suyunun ön arıtmaya tabi tutulması neticesinde elde edilen MF ve UF

prosesleri süzüntü akılarının zamanla değişimleri Şekil 4.18’de gösterilmiştir. Her iki proseste elde edilen deniz suyu arıtma performansı sonuçları ise Tablo 4.10’da verilmiştir.



Şekil 4.18: İO prosesi öncesinde deniz suyunun ön arıtılması işleminde MF ve UF prosesleri süzüntü akılarının zamanla değişimleri.

Çalışılan deniz sularındaki başlangıç su kalitesi içeriklerinin kısmi değişimlerine bağlı olarak, MF ve UF proseslerde, sırasıyla 830 ve 750 L/m².sa başlangıç akı değerlerinden 210 ve 260 L/m².sa’lik deney sonu süzüntü akısı değerlerine ulaşılmıştır. Proseslerin yaklaşık 2 saat zarfında kararlı bir işletim akısı şartına ulaştığı tespit edilmiştir. MF ve UF proseslerde zamana karşı akı performansları, membran gözenek büyüklüklerinin etkisi altında birbirleriyle benzer seyrinde gerçekleşmiştir.

Deniz suyunda bulanıklık gideriminin UF proseste daha etkin gerçekleştirilebildiği, yaklaşık sabit işletme sıcaklığı altında, giriş ve çıkış akımlarında % 2-5 civarlarında iletkenlik, viskozite ve TÇK değişimlerinin meydana geldiği gözlenmiştir. Besleme ve süzüntü akımlarında, deniz suyu pH, osmolalite ve yoğunluklarında önemli değişimler olmadığı görülmüştür. Bu sebeple İO prosesi öncesinde, beklenen şekliyle İO performansını olumsuz etkileyecek bir deniz suyu kalitesinin (İO çözeltileri arasında rölatif olarak daha düşük osmotik basınç etkisi) oluşmadığı sonucuna varılmıştır. Deniz suyunun MF ve UF ile ön arıtma işlemine tabi tutulması neticesinde, bulanıklık hariç deniz suyu kalitesinde önemli değişimler oluşmaksızın deniz suyunun ön arıtma işleminden geçirilebildiği tespit edilmiştir.

Tablo 4.10: İO prosesi öncesinde deniz suyunun MF ve UF prosesleriyle ön arıtılması performansları.

Parametre	Birim	MF Ön Arıtma				UF Ön Arıtma			
		Besleme (t=0. sa)	Besleme (t=2. sa)	Süzüntü	Süzme Verimi (%)	Besleme (t=0. sa)	Besleme (t=2. sa)	Süzüntü	Süzme Verimi (%)
Sıcaklık	°C	24,8	25,5	25,2	-	25,0	25,0	25,4	-
pH	-	8,44	8,43	8,46	-	8,42	8,44	8,41	-
İletkenlik	mS/cm	42,0	42,2	40,1	4,98	42,9	43,3	42,4	2,04
Yoğunluk	g/cm ³	1,0176	1,0176	1,0175	0,01	1,0184	1,0186	1,0186	0,00
Viskozite	mPa.s	1,01	1,09	1,06	2,75	1,08	1,10	1,04	5,45
Osmolalite	mosm/kg	868	871	868	0,34	867	869	866	0,35
Bulanıklık	NTU	0,40	0,40	0,39	2,50	0,78	2,28	0,63	72,37
TÇK	g/L	24,8	25,4	24,5	3,54	30,2	30,4	30	1,32

4.1.3. Göl Suyu Kullanılarak Deniz Suyunun Seyreltilmesi

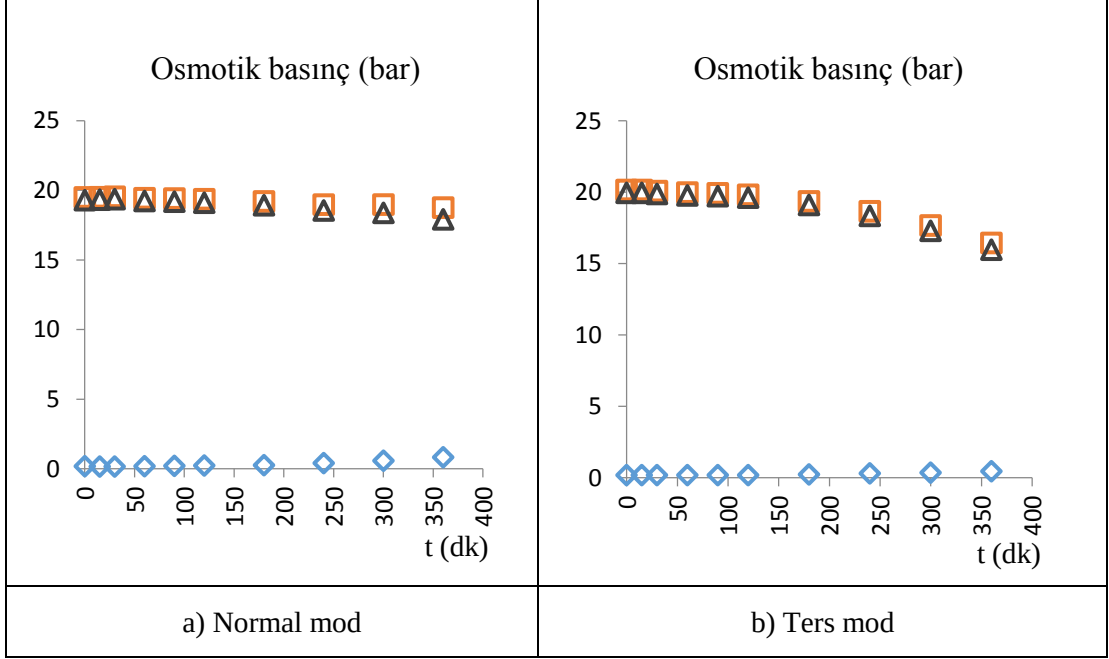
4.1.3.1. Membran İşletme Modu

İO prosesinde göl suyu kullanılarak deniz suyunun seyreltilmesi üzerine membran işletme modunun etkisi kapsamında elde edilmiş, işletme moduna bağlı besleme, çekme ve net (çekme-besleme) osmotik basınçların zamanla değişimleri Şekil 4.19’da gösterilmiştir.

İşletme moduna bağlı göl suyu ile deniz suyunun seyreltilmesi deneylerinde İO prosesi sürücü kuvveti olan net osmotik basınç farkının, deney süresi boyunca yaklaşık 19,3 ve 20,0 bar’lık başlangıç değerlerinden, normal ve ters mod işletimler neticesinde sırasıyla 17,9 ve 16,0 bar değerlerine azaldığı belirlenmiştir. Bu durum, ters modda normal moda kıyasla, göl suyundan deniz suyuna daha fazla hacimde su taşınımına bağlı hacimsel seyrelme etkisi ve ters yönde göl suyuna doğru çözünmüş katı taşınımına bağlı deniz suyundaki kütsel seyrelme etkisi altındaki proses sürücü kuvvetinin azalması neticesinde ortaya çıkmıştır.

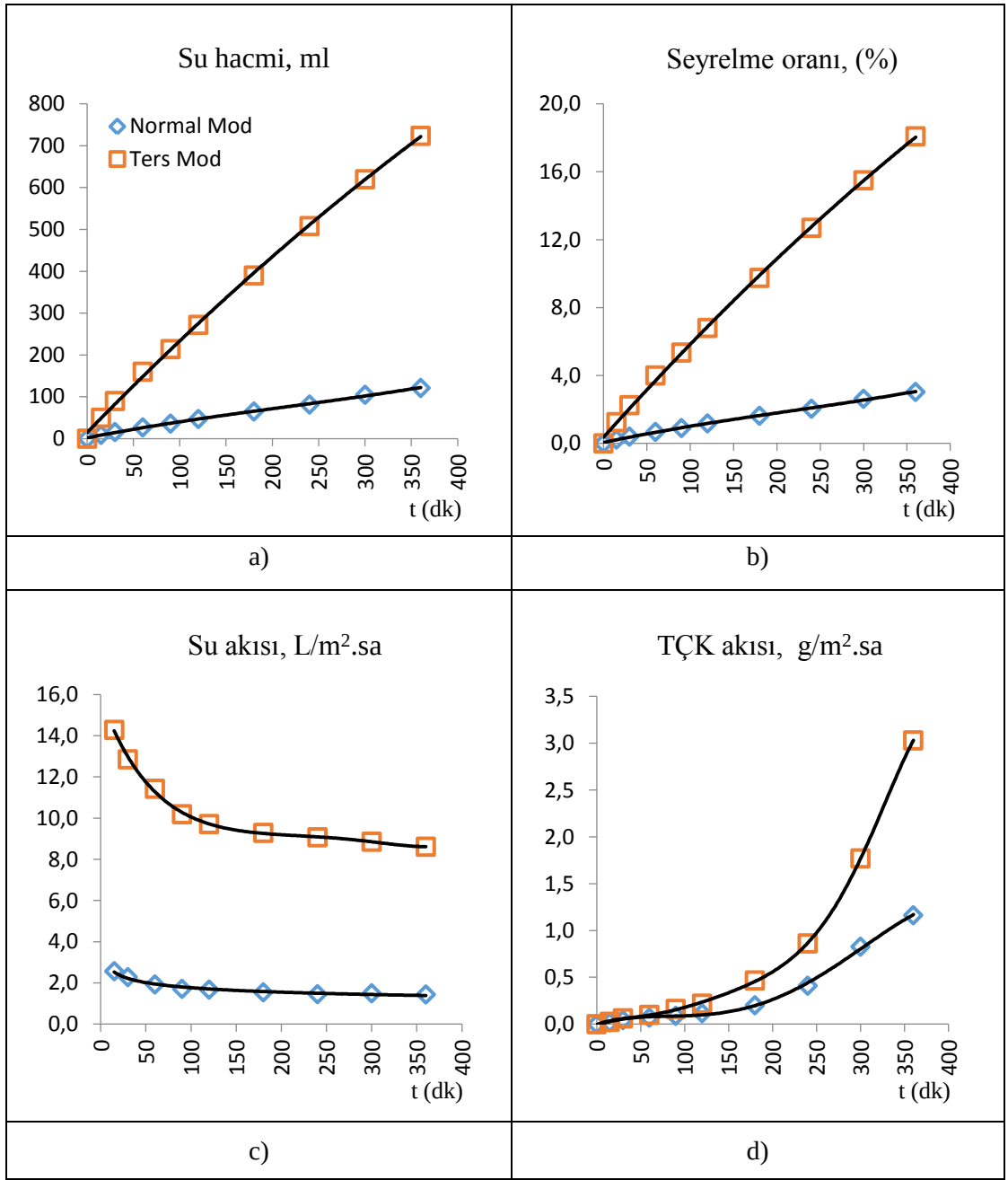
Çekme çözeltisi olan deniz suyundan besleme çözeltisi olan göl suyuna doğru, su taşınımına ters yönde gerçekleşen çözünmüş madde taşınımına bağlı olarak

zamanla beslemedeki osmotik basınç değerinde artış meydana geldiği tespit edilmiştir. Besleme çözeltisi osmotik basınç değerlerinin normal modda 0,8, ters modda 0,5 bara çıktığı görülmüştür.



Şekil 4.19: İO prosesiyle göl suyu kullanılarak deniz suyunun seyreltilmesinde membran işletme moduna bağlı olarak İO prosesinde sürücü kuvvet etkisinin zamanla değişimi (akış hızı: 300 L/sa, sıcaklık: 25 °C, deney süresi: 6 saat) (Semboller ◇, □ ve Δ sırasıyla göl suyu, deniz suyu ve prosesteki net osmotik basınçtır).

Proses performansını ifade eden, çekme çözeltisine geçen su hacmi, çekme çözeltisinde hacimsel seyrelme oranı, su akışı ve tuz akışı parametrelerinin zamanla değişimleri ise Şekil 4.20’de gösterilmiştir. Proseste ters işletim modunda, göl suyu ile deniz suyunun çok daha yüksek su geçiş hacmi ve akışı ile seyreltilebildiği belirlenmiştir. Bu deney iki kez tekrar edilmek suretiyle sonuçları doğrulanmıştır. Karşılaşılan bu durumun sebebi, daha önce distile su ve yeraltı suyu ile ayrı ayrı gerçekleştirilmiş deniz suyu seyreltme çalışmalarından da görüldüğü ve literatürden de bilindiği üzere, membran içerisindeki etkin sürücü kuvvet etkisini yaratan membran içi konsantrasyon farkına dayalı etkin osmotik basınç farkı olmaktadır. Bu durum, normal moda kıyasla ters modda, artan iç ve seyrelmiş dış konsantrasyon polarizasyon etkileri altında aktif tabaka ara yüzeyinde etkili osmotik sürücü kuvvet etkisinin daha yüksek seviyede kalması sebebiyle ortaya çıkmaktadır. 360 dk sonunda normal ve ters modlar için sırasıyla yaklaşık 121 ve 724 ml’lik su geçişleri



Şekil 4.20: İO prosesinde göl suyu kullanılarak deniz suyunun seyreltilmesi üzerine membran işletme modunun etkisi, a) çekme çözeltisine geçen su hacmi b) çekme çözeltisinde hacimsel seyrelme oranı c) su akısı ve d) tuz akısı, (akış hızı: 300 L/sa, sıcaklık: 25 °C, deney süresi: 6 saat).

ile (distile suda 169 ve 483 ml, yeraltı suyunda 188 ve 1430 ml olarak gerçekleşmişti) başlangıç 4 L çekme çözeltisinin deney sonunda sırasıyla % 3,0 ve 18,1 seviyelerinde seyreltilmesi işlemleri gerçekleştirilmiştir. Normal mod performansı, distile su ve yeraltı suyu ile yaklaşık kıyaslanabilir seviyelerde olmasına rağmen, ters mod için göl suyu için yeraltı suyu ve distile su kullanımına nazaran sırasıyla yaklaşık 0,5 ve 1,5 katlık bir su geçiş hacmi değişimi olduğu görülmüştür.

Bu durumun, proseslerin aynı osmotik sürücü kuvvet etkisi altında olması dolayısıyla, her iki duruma ait membran kirlenmelerinin ve etkili sürücü kuvvet değerlerinin oldukça farklı seviyelerde olması sebebiyle membran kirlenmesi etkisinde meydana geldiği düşünülmektedir. Göl suyundaki çözünmüş madde bileşen ve konsantrasyonları, distile suya nazaran daha az membran kirlenmesini sağlamakla birlikte etkili sürücü kuvveti membran aktif tabakada yüksek tutarak prosesi daha etkin işletmeyi sağlamaktadır. Ancak temiz su kaynağı olarak değerlendirilen yeraltı suyu ile kıyaslandığında tersi bir durumun varlığı ortada bulunmaktadır. Sırasıyla 1,4 ve 8,6 L/m².sa deney sonu su akısı tespit edilen normal ve ters mod işletimlerinde (distile suda 2,0 ve 5,8 L/m².sa ve yeraltı suyunda 2,2 ve 17,0 L/m².sa), çekmeden beslemeye geçen çözünmüş madde akılarının sırasıyla 1,2 ve 3,0 g/m².sa (distile suda 3,7 ve 10,8 g/m².sa ve yeraltı suyunda 5,8 ve 22,4 g/m².sa) değerlerinde literatürden bilinen ortalama değerlerde olduğu tespit edilmiştir. Ters işletim modunun daha iyi performans sağlamış ve deniz suyu seyrelmesi için temel belirteç olan proses su akıları itibarıyla deneylerin 150-200 dk'sı zarfında su akısı azalması değişimlerinin kararlı aşamaya veya bu aşamayı temsil edebilecek yavaş akı azalma fazına ulaşmış olması sebepleriyle bu aşamadan sonraki deneyler, ters modda işletilen İO membran yerleşim modunda ve ön arıtım etkisi şartları hariç 3 saat (180 dk) süresince yürütülmüştür. Deney süresince izlenen besleme ve çekme çözeltileri su kalite parametrelerinin (pH, osmolalite, yoğunluk, iletkenlik, TÇK (toplam çözünmüş katılar), bulanıklık ve viskozite) zamanla değişimleri, normal ve ters işletim modları için Tablo 4.11'de verilmiştir.

Göl suyu ile deniz suyunun normal ve ters modda işletimindeki deneyler süresince, izlenmiş su kalite parametreleri değişimlerinden aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır.

Proses, termal sürücü kuvvet etkisinden bağımsız kılınarak sadece konsantrasyon farkı sürücü kuvvet etkisi altında tutulmak amacıyla, besleme ve çekme çözeltilerinde sabit (25±0,5 °C) izotermal şartlarda işletilmiştir.

Deniz suyu pH'sı 8,0-8,2 aralığında kısmen artışı olarak sabit kalmış, göl suyu pH'sı ise normal ve ters modlar için sırasıyla 7,8 ve 8,0 başlangıç değerlerinden zamanla artış göstererek 8,4 deney sonu değerine ulaşmıştır. Göl suyundaki pH artışının, suyun hidronyum iyonu (H₃O⁺) formu içerikli deniz suyuna taşınımından kaynaklandığı sonucuna ulaşılmıştır.

Tablo 4.11: Göl suyu kullanılarak deniz suyunun seyreltilmesinde normal ve ters modda işletilen İO prosesinin performansı (akış hızı:300 L/sa, sıcaklık: 25 °C, hacim: 4 L, deney süresi: 6 saat).

Parametre	Birim	Normal Mod				Ters Mod			
		Göl Suyu		Deniz Suyu		Göl Suyu		Deniz Suyu	
		Deney Başı	Deney Sonu	Deney Başı	Deney Sonu	Deney Başı	Deney Sonu	Deney Başı	Deney Sonu
pH	-	7,95	8,36	8,0	8,11	8,16	8,41	8,01	8,12
Osmolalite	mosm/kg	8	34	774	746	8	19	800	655
Yoğunluk	g/cm ³	0,9968	0,9975	1,0166	1,0152	0,9968	0,9971	1,0171	1,0138
İletkenlik	mS/cm	0,301	1,894	44,7	41,8	0,285	1,062	44,3	36,4
TÇK	g/L	0,1449	0,956	27,55	25,9	0,1361	0,518	27,6	22,2
Bulanıklık	NTU	1,65	2,09	0,65	0,66	1,11	1,2	0,6	0,53
Viskozite	mPa.s	0,86	0,9	0,94	0,96	0,97	0,98	1,1	0,96

Deniz suyunun osmolalitesi, yoğunluğu, iletkenliği ve toplam çözünmüş katıları, göl suyuna doğru çözünmüş madde taşınımı ve göl suyundan geçen su ile seyrelme sebebiyle, su ve tuz akılarına bağlı olarak deney süresince azalmıştır. Ancak bu azalmanın, difüzyonal kütle taşınımı etkisi altında ters modda daha düşük kaldığı için (normal moda kıyasla daha yüksek deney sonu TÇK akısına rağmen beslemede deney sonu için ölçülmüş daha az iletkenlik ve TÇK dolayısıyla) esasen su geçişinin etkisi altında olmak üzere, ters modda belirgin olarak gerçekleştiği sonucuna ulaşılmıştır. Buna karşın, göl suyuna çözünmüş katıların taşınımı, göl suyunda bu parametre değerlerinin bir miktar artmasına neden olmuştur. Normal ve ters modda göl suyundaki deney sonu iletkenlik ve TÇK değerleri sırasıyla 1,9 mS/cm ve 1,0 g/L ile 1,1 mS/cm ve 0,5 g/L (distile su için 3,1 mS/cm ve 2,1 g/L ile 3,7 mS/cm ve 1,9 g/L; yeraltı suyu için 5,9 mS/cm ve 3,1 g/L ile 4,0 mS/cm ve 2,1 g/L idi) değerlerine ulaşmıştır.

Deniz suyunda normal ve ters modlar için başlangıçta sırasıyla 774 ve 800 mosm/kg civarında olan deniz suyu osmolaliteleri, 746 ve 655 mosm/kg deney sonu değerlerine azalmış; göl suyu tarafında ise başlangıçta 8 mosm/kg olan değer, normal ve ters modlar için sırasıyla 34 ve 19 mosm/kg değerlerine artmıştır.

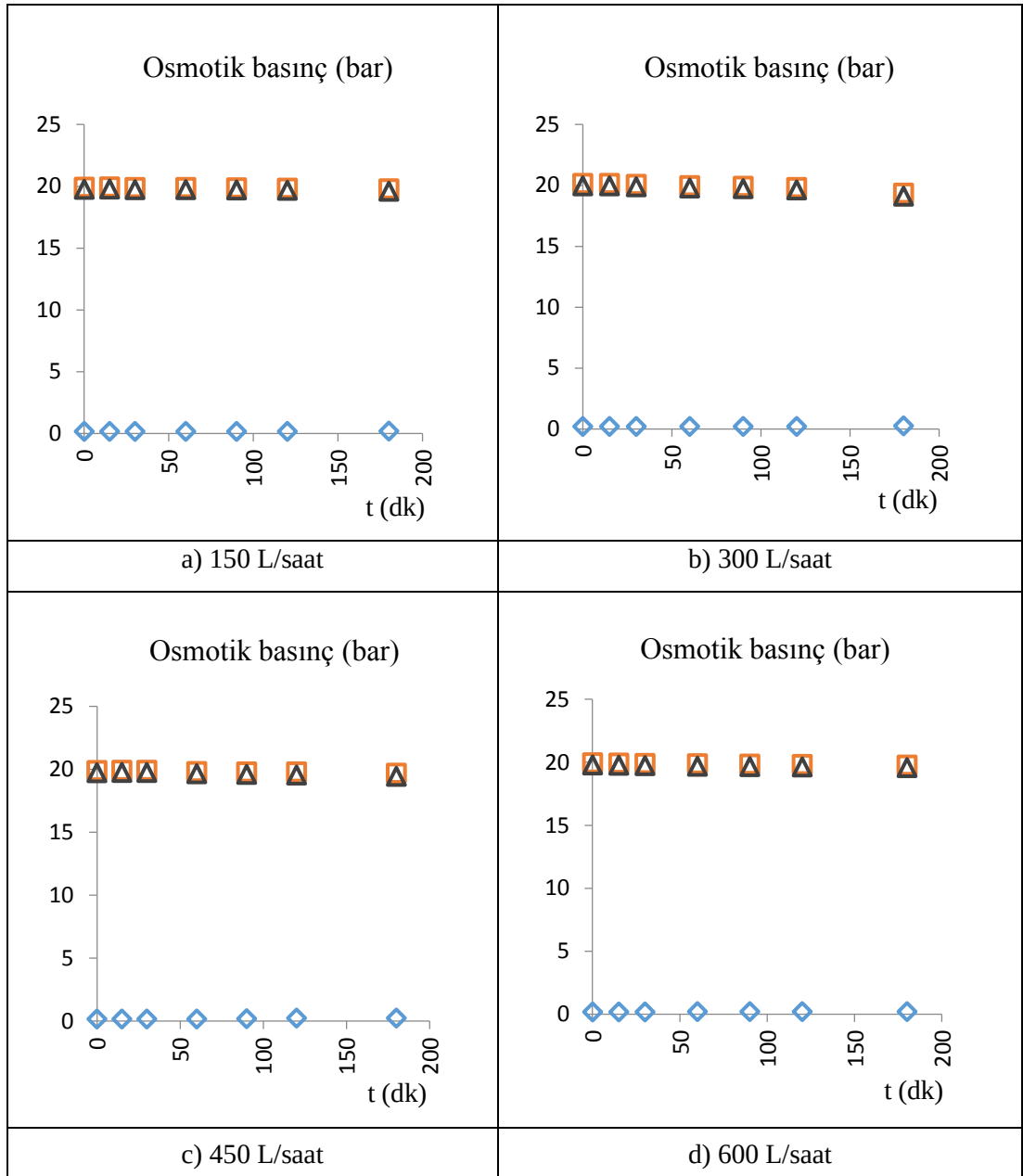
Deniz suyu viskozite değerlerinde normal modda pek bir değişim gözlenmemiş olmakla birlikte, ters modda deniz suyu viskozitesi seyrelme etkisi ile azalmış; göl suyunun viskozitesi ise ters modda pek değişim göstermemişken normal modda bir miktar artış göstermiştir.

Deniz suyunun bulanıklık değerinin 0,60-0,65 NTU başlangıç değerlerinden 0,53-0,66 değerlerine zamanla pek bir değişim göstermemiştir. Göl suyu tarafında ise, normal ve ters mod işletimlerdeki sırasıyla 1,7 ve 1,1 NTU bulanıklık değerleri, deney sonunda 2,1 ve 1,2 değerlerine bir miktar yükselmiştir. Yeraltı suyunun ilgili deneylerinde de belirlendiği üzere, deniz suyundaki bulanıklık artışının seyrelme etkisine karşın mikrobiyal üreme etkisi altında gerçekleştiği, yeraltı suyunda bulanıklık artışının ise konsantre olma etkisi ile birlikte mikrobiyal üreme etkisi altında da gerçekleşmiş olabileceği tahmin edilmektedir.

4.1.3.2. Akış Hızı

İO prosesinde göl suyu kullanılarak deniz suyunun seyreltilmesi üzerine akış hızının etkisi kapsamında elde edilmiş, akış hızlarına bağlı besleme, çekme ve net (çekme-besleme) osmotik basınçların zamanla değişimleri Şekil 4.21’de gösterilmiştir.

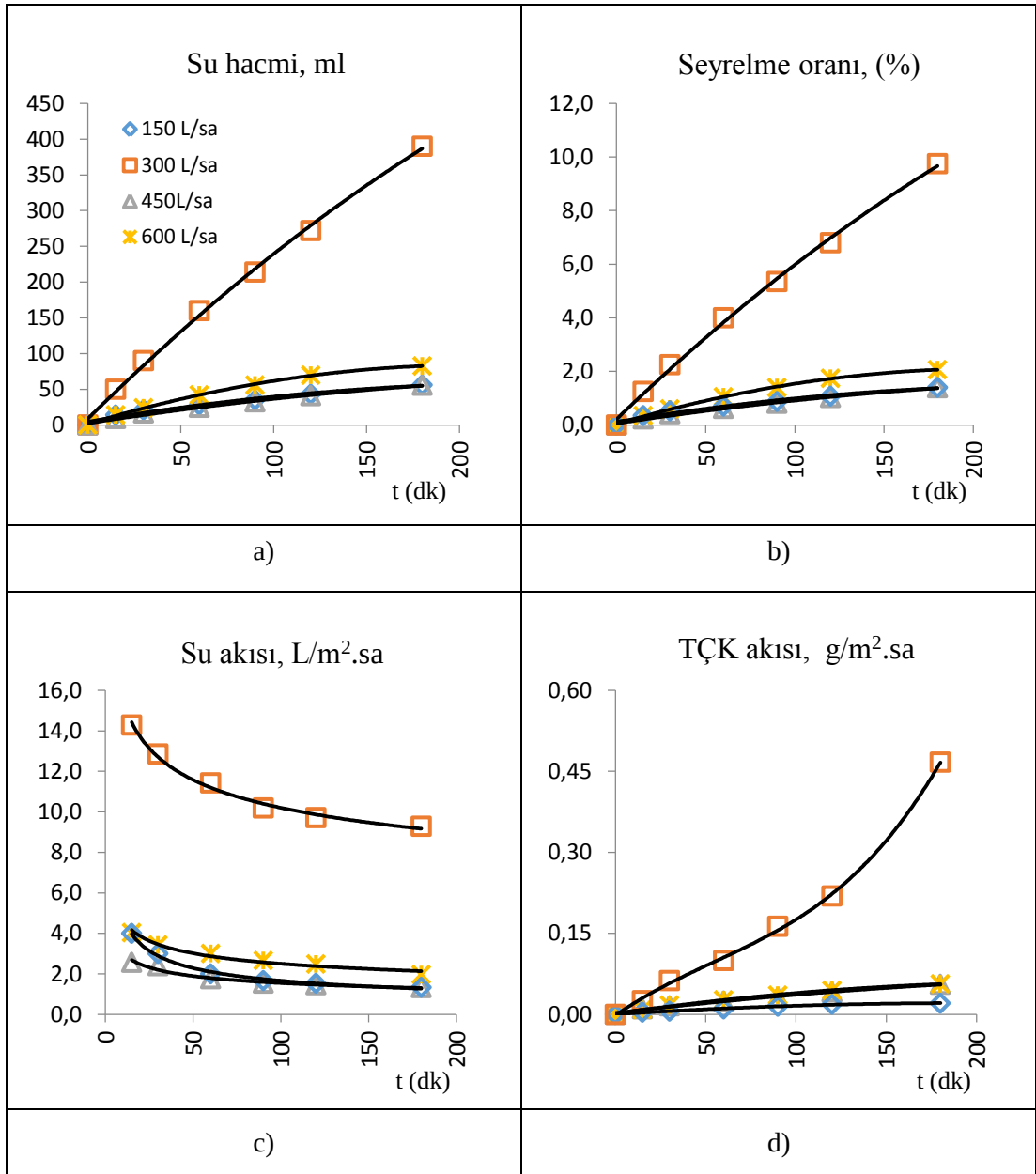
Akış hızına bağlı göl suyu ile deniz suyunun seyreltilmesi deneylerinde İO prosesi sürücü kuvveti olan net osmotik basınç farkının, deney süresi boyunca yaklaşık 20 bar’lık başlangıç değerinden, 19,1-19,6 bar civarına çok az seviyede azaldığı görülmüştür. Çekme çözeltisi olan deniz suyundan besleme çözeltisi olan göl suyuna doğru, su taşınımına ters yönde gerçekleşen çözünmüş madde taşınımına bağlı olarak zamanla beslemedeki osmotik basınç değerinde, 3 saat zarfında 0,20-0,25 bar’a (distile suda 0,20-0,30 bar, yeraltı suyunda 0,50-0,70 bar) varan çok düşük artışlar meydana geldiği tespit edilmiştir.



Şekil 4.21: İO prosesiyle göl suyu kullanılarak deniz suyunun seyreltilmesinde akış hızına bağlı olarak İO prosesinde sürücü kuvvet etkisinin zamanla değişimi (membran yerleşimi: ters mod, sıcaklık: 25 °C, deney süresi: 3 saat) (Semboller $\diamond$, $\square$ ve Δ sırasıyla göl suyu, deniz suyu ve prosesdeki net osmotik basınçtır).

Proses performansını ifade eden, çekme çözeltisine geçen su hacmi, çekme çözeltisinde hacimsel seyrelme oranı, su akışı ve tuz akışı parametrelerinin zamanla değişimleri Şekil 4.22’de gösterilmiştir.

İO prosesinde, çalışılan diğer akış hızı değerlerine kıyasla 300 L/sa akış hızında, göl ile deniz suyunun diğer akış hızlarına rölatif olarak çok daha yüksek (yaklaşık 5-7 kat) su geçiş hacmi ve akışı ile seyreltilebildiği belirlenmiştir.



Şekil 4.22: İO prosesinde göl suyu kullanılarak deniz suyunun seyreltilmesi üzerine akış hızının etkisi, a) çekme çözeltisine geçen su hacmi b) çekme çözeltisinde hacimsel seyrelme oranı c) su akısı ve d) tuz akısı, (membran yerleşimi: ters mod, sıcaklık: 25 °C, deney süresi: 3 saat).

Su geçiş hacmi, seyrelme oranı ve su akısı değerleri, diğer akış hızları için azalan sırayla 600, 150=450 L/sa (distile suda 150, 600 ve 450 L/sa, yeraltı suyunda 450, 600 ve 150 L/sa) olarak görülmüştür. 180 dk işletim sonunda su geçiş hacmi, çekme çözeltisi seyrelme oranı ve su akısı değerleri, 300 L/sa'ta sırasıyla 390 ml, % 9,8 ve 9,3 L/m².sa (distile su için 342 ml, % 8,6 ve 8,1 L/m².sa, yeraltı suyu için 780 ml, % 19,5 ve 18,6 L/m².sa) olarak belirlenmişken, en düşük performanslı 150=450 L/sa akış hızları için bu değerler sırasıyla 56 ml, % 1,4 ve 1,3 L/m².sa olarak tespit

edilmiştir. 300 L/sa'ta 0,5 g/m².sa (distile su için 1,4 g/m².sa, yeraltı suyu için 1,12 g/m².sa) olan çözünmüş madde akısının, diğer üç akış hızı değerlerinde ise 0,02-0,06 gibi çok düşük değer aralığında kaldığı görülmüştür. Bu sonuçlardan hareketle, sonraki adımda yer alan sıcaklık etkisinin araştırıldığı deneyler, distile su ve yeraltı suyu ile seyrelme deneylerinde olduğu gibi, en yüksek su geçişini ve deniz suyu seyrelme performansını veren 300 L/sa akış hızı şartı altında yürütülmüştür.

Deney süresince izlenen besleme ve çekme çözeltileri su kalite parametrelerinin (pH, osmolalite, yoğunluk, iletkenlik, TÇK (toplam çözünmüş katılar), bulanıklık ve viskozite) zamanla değişimleri, 150, 300, 450 ve 600 L/saat akış hızı değerleri için Tablo 4.12'de gösterilmiştir. Göl suyu ile deniz suyunun seyreltilmesinde farklı akış hızlarında (150, 300, 450 ve 600 L/sa) işletilen deneyler süresince, su kalite parametreleri değişimlerinden aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır.

Proses, besleme ve çekmede eşdeğer istenen sabit (25±0,5 °C) sıcaklık değerinde (izotermal şartlarda) işletilmiştir. Deniz suyu pH'sı 8,0 başlangıç değerinden 8,1'e çok az artış göstermiş, göl suyu pH'sı ise 8,0-8,2 başlangıç değerlerinden hidronyum iyonu içerikli su taşınımının etkisi altında 8,3-8,4 civarından yükselmiştir. Bununla birlikte, her iki çözeltideki deney başı ve sonu pH değerlerinin birbirlerine yakın seyrettiği görülmüştür.

Deniz suyunun osmolalitesi, yoğunluğu, iletkenliği ve toplam çözünmüş katıları, göl suyuna doğru çözünmüş madde taşınımı ve göl suyundan geçen su ile seyrelme sebebiyle, su ve tuz akılarına bağlı olarak deney süresince farklı akış hızlarında kısmen farklı fakat çok az seviyelerde azalmalar göstermiştir. Buna karşın, göl suyuna difüzyonal kütle taşınımı, göl suyunda bu parametre değerlerinin bir miktar artmasına neden olmuştur. Göl suyundaki deney sonu en yüksek ve en düşük çözünmüş madde değerleri görülmüş 300 ve 150 L/sa akış hızları için iletkenlik ve TÇK değerleri sırasıyla 417 µS/cm ve 201 mg/L ile 326 µS/cm ve 157 mg/L (300 L/sa için distile suda 365 µS/cm ve 171 mg/L, yeraltı suyunda 1328 µS/cm ve 659 mg/L) olarak tespit edilmiştir. Deniz suyunda başlangıçta 790-800 mosm/kg aralığında olan deniz suyu osmolalitesi 769-786 mosm/kg değerine azalmışken, göl suyunda 7-8 mosm/kg olan başlangıç osmolalitesi deney süresi sonunda 8-10 mosm/kg (distile suda 6-11 mosm/kg, yeraltı suyunda 19-28 (başlangıç 16-18) mosm/kg idi) değerine çok az bir miktarda değişim göstermiştir.

Tablo 4.12: Göl suyu kullanılarak deniz suyunun seyreltilmesinde 150, 300, 450, 600 L/saat'te işletilen İO prosesinin performansı (membran yerleşimi: ters mod, sıcaklık: 25 °C, hacim: 4 L, deney süresi: 3 saat).

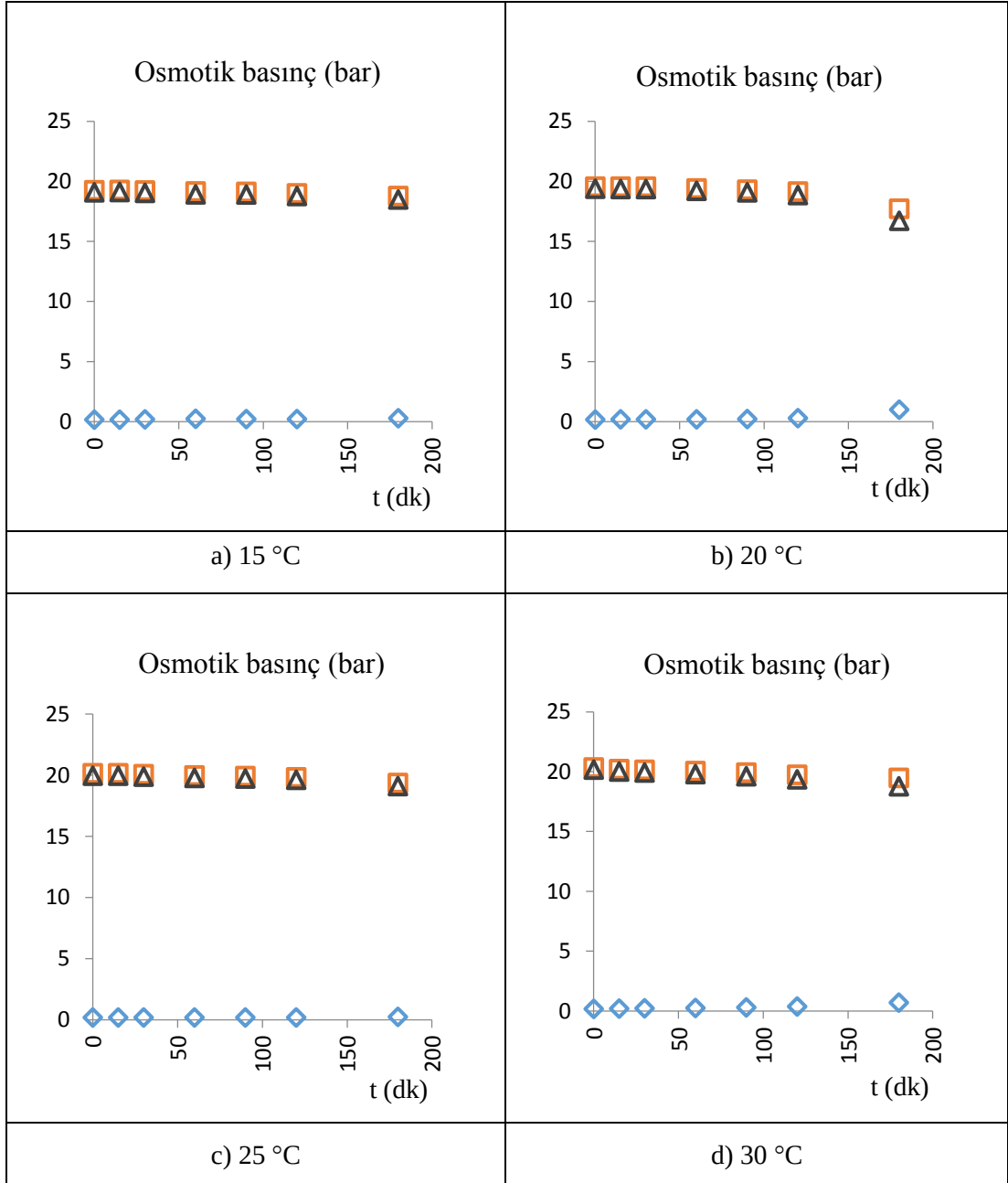
Parametre	Birim	150 L/sa				300 L/sa				450 L/sa				600 L/sa			
		Göl Suyu		Deniz Suyu		Göl Suyu		Deniz Suyu		Göl Suyu		Deniz Suyu		Göl Suyu		Deniz Suyu	
		Deney Başı	Deney Sonu	Deney Başı	Deney Sonu	Deney Başı	Deney Sonu	Deney Başı	Deney Sonu	Deney Başı	Deney Sonu	Deney Başı	Deney Sonu	Deney Başı	Deney Sonu	Deney Başı	Deney Sonu
pH	-	8,03	8,33	8,02	8,09	8,16	8,3	8,01	8,14	8,21	8,39	8,0	8,04	8,06	8,41	7,95	8,14
Osmolalite	mosm/kg	7	8	791	786	8	10	800	769	7	10	790	782	7	8	792	785
Yoğunluk	g/cm ³	0,9968	0,9967	1,0169	1,0166	0,9968	0,9967	1,0171	1,0162	0,9967	0,9967	1,0172	1,0166	0,9971	0,9968	1,0174	1,0169
İletkenlik	mS/cm	0,289	0,326	43,9	43,3	0,285	0,417	44,3	42,6	0,283	0,372	43,7	43,0	0,284	0,351	43,8	43,1
TÇK	g/L	0,139	0,1565	27,3	26,9	0,1361	0,2011	27,6	26,4	0,1352	0,1792	27,3	26,8	0,1361	0,1677	27,4	26,8
Bulanıklık	NTU	1,11	1,14	0,5	0,55	1,11	1,22	0,6	0,53	1,02	1,06	0,55	0,71	1,33	1,34	0,48	0,74
Viskozite	mPa.s	0,9	0,91	0,99	1,0	0,97	1,0	1,1	1,00	0,95	0,96	1,01	1,0	0,92	0,93	1,0	0,99

Deniz suyu viskozite değerlerinde 300 L/sa'ta rölatif olarak daha yüksek seyrelme etkisi ile kısmen azalmalar görülmüş (1,1 mPa.s'den 1,0 mPa.s'ye), diğer akış hızlarında deney başı sonu değişimler arasında önemli farklılıklar oluşmamıştır. Göl suyu viskozite değerlerinin ise diğer akış hızlarında pek değişmemiş olmakla birlikte yine 300 L/sa'ta artış gösterdiği (0,97 mPa.s'den 1,0 mPa.s'ye) belirlenmiştir. Deniz suyunun bulanıklık değerinin, 300 L/sa'ta 0,6 NTU'dan seyrelme etkisi altında 0,53'e azaldığı, diğer akış hızlarında ise, 0,50-0,55 NTU değerlerinden mikrobiyal üreme etkisi altında 0,55-0,74 NTU değerlerine bir miktar arttığı görülmüştür. Göl suyu tarafında ise, 1,1-1,3 NTU aralığındaki başlangıç bulanıklık değerlerinin deney süresince konsantre olma etkisine rağmen aynı deney sonu değerlerinde kaldığı tespit edilmiştir. Bu durum, sudaki kolloidal/mikrobiyal bileşenlerle membran etkileşiminin göl suyunda daha etkili gerçekleşebildiği durumunu beraberinde getirmektedir.

4.1.3.3. Sıcaklık

İO prosesinde göl suyu kullanılarak deniz suyunun seyreltilmesi üzerine sıcaklığın etkisi kapsamında elde edilmiş, besleme ve çekmede eş zamanlı sıcaklık değişimlerine bağlı besleme, çekme ve net osmotik basınçların zamanla değişimleri Şekil 4.23'de gösterilmiştir.

Sıcaklığa bağlı göl suyu ile deniz suyunun seyreltilmesi deneylerinde İO prosesi sürücü kuvveti olan net osmotik basınç farkının, deney süresi boyunca yaklaşık 19,1-20,2 bar'lık başlangıç değerlerinden, 16,7-19,1 bar aralığına azaldığı belirlenmiştir. Çekme çözeltisinden besleme çözeltisine doğru gerçekleşen çözünmüş madde taşınımına bağlı olarak, 3 saat zarfında 0,3-1,0 bar'a (distile suda 0,2-0,9 bar, yeraltı suyunda 0,4-1,0 bar aralığında idi) varan artışlar meydana geldiği tespit edilmiştir. Buna göre, değişen sıcaklık işletme şartlarına rağmen prosesin başlangıç aşamasındaki sürücü kuvvete yakın bir kuvvet etkisi altında sürdürülebildiği belirlenmiştir.

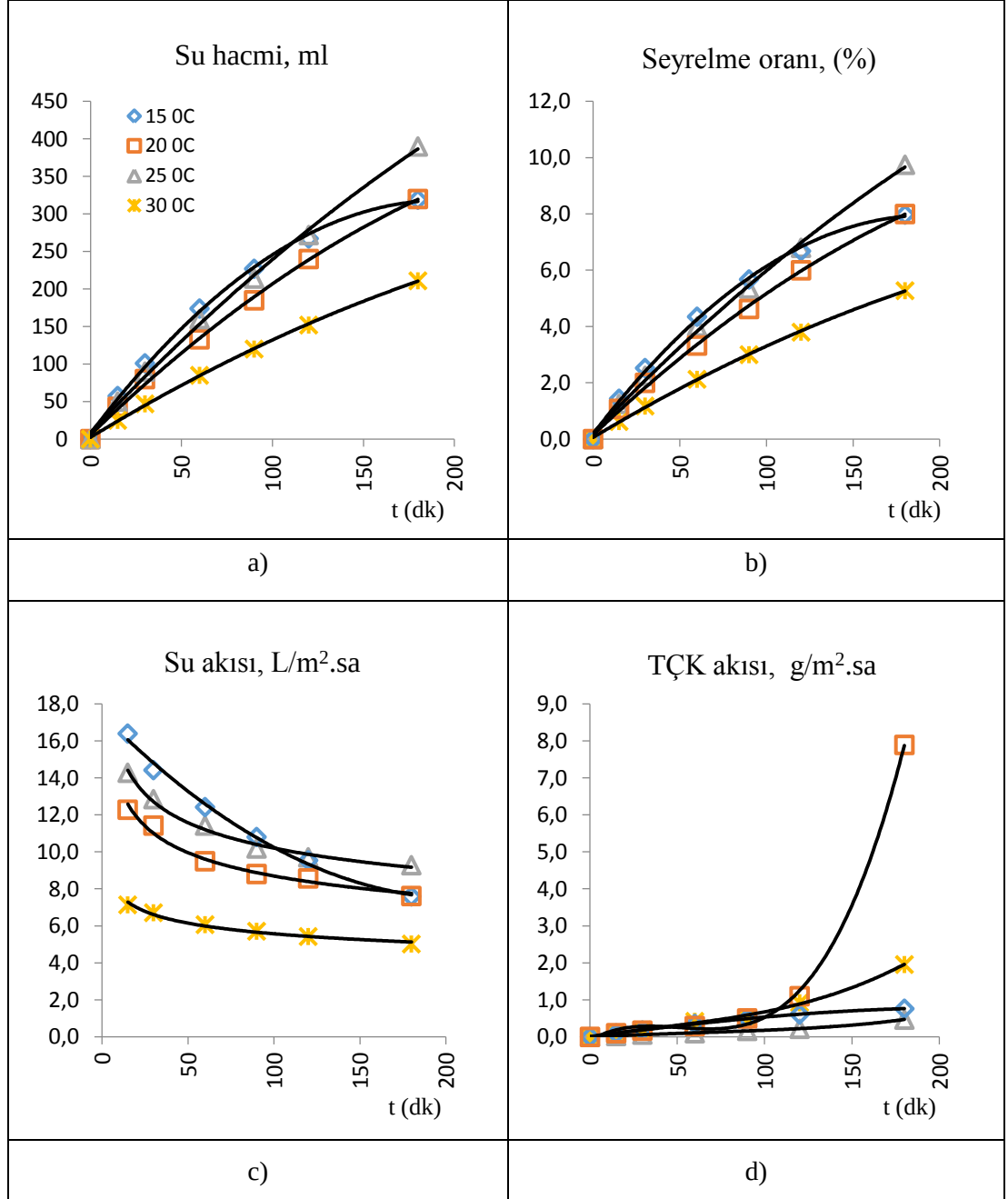


Şekil 4.23: İO prosesiyle göl suyu kullanılarak deniz suyunun seyreltilmesinde sıcaklığa bağlı olarak İO prosesinde sürücü kuvvet etkisinin zamanla değişimi (membran yerleşimi: ters mod, akış hızı: 300 L/sa, deney süresi: 3 saat) (Semboller $\diamond$, $\square$ ve Δ sırasıyla göl suyu, deniz suyu ve prosesteki net osmotik basınçtır).

Proses performansını ifade eden, çekme çözeltisine geçen su hacmi, çekme çözeltisinde hacimsel seyrelme oranı, su akısı ve tuz akısı parametrelerinin zamanla değişimleri Şekil 4.24’de gösterilmiştir.

İO prosesinde 25 °C sıcaklıkta, distile su ve yeraltı suyu deneylerinde de olduğu gibi, göl suyu ile deniz suyunun daha yüksek su geçiş hacmi ve akısı ile seyreltilebildiği görülmüştür. Su geçiş hacmi, seyrelme oranı ve su akısı değerlerinin,

azalan sırayla 20 $\pm$ 15 ve 30 °C sıcaklıklarda (distile suda 15, 20 ve 30 °C, yeraltı suyunda 20, 15 ve 30 °C) meydana geldiği tespit edilmiştir. Göl suyunda sıcaklık değişiminin performans üzerine etkisi, yeraltı suyundaki referans performansa kıyasla, 15 ve 20 °C sıcaklıklar arasında yaklaşık eşit olmak üzere aynı düzende gerçekleşmiştir.



Şekil 4.24: İO prosesinde göl suyu kullanılarak deniz suyunun seyreltilmesi üzerine sıcaklığın etkisi, a) çekme çözeltisine geçen su hacmi b) çekme çözeltisinde hacimsel seyrelme oranı c) su akısı ve d) tuz akısı, (membran yerleşimi: ters mod, akış hızı: 300 L/sa, deney süresi: 3 saat).

180 dk işletim sonunda su geçiş hacmi, çekme seyrelme oranı ve su akışı değerleri, 25 °C sıcaklıkta sırasıyla 390 ml, % 9,8 ve 9,3 L/m².sa (distile su için 342 ml, % 8,6 ve 8,1 L/m².sa, yeraltı suyu için 780 ml, % 19,5 ve 18,6 L/m².sa) olarak belirlenmişken, en düşük performanslı 30 °C sıcaklık için bu değerler sırasıyla 211 ml, % 5,3 ve 5,0 L/m².sa (distile su için 79 ml, % 1,7 ve 1,6 L/m².sa, yeraltı suyu için 131 ml, % 3,3 ve 3,1 L/m².sa) olarak tespit edilmiştir.

Bu sonuçlar göstermektedir ki, farklı sıcaklıklar etkisi altında İO prosesinde deniz suyunu seyreltme performansı, en başarılı işletim olan 25 °C sıcaklıkta göl suyu kullanılması durumunda, yeraltı suyuna nazaran daha düşük, distile suya nazaran ise biraz daha iyi seviyede gerçekleştirilmiştir. 25 °C sıcaklıkta 0,5 g/m².sa (distile su için 1,4 g/m².sa, yeraltı suyu için 1,1 g/m².sa) olan çözünmüş madde akışı, 15 °C sıcaklıkta 0,8 g/m².sa (distile su için 1,9 g/m².sa, yeraltı suyu için 3,1 g/m².sa), 20 ve 30 °C sıcaklıklarda ise sırasıyla 7,9 ve 2,0 g/m².sa (distile su için sırasıyla 0,1 ve 0,6 g/m².sa, yeraltı suyu için sırasıyla 1,3 ve 0,5 g/m².sa) olarak gerçekleşmiştir. Bu sonuçlardan hareketle, sonraki adımda yer alan ön arıtma etkisinin araştırıldığı deneyler, ters modda işletim İO membranı için 300 L/sa akış hızı ve 25 °C sıcaklık şartları altında yürütülmüştür.

Deney süresince izlenen besleme ve çekme çözeltileri su kalite parametrelerinin (pH, osmolalite, yoğunluk, iletkenlik, TÇK (toplam çözünmüş katılar), bulanıklık ve viskozite) zamanla değişimleri, 15, 20, 25, 30 °C sıcaklık değerleri için Tablo 4.13’de gösterilmiştir (25 °C sıcaklıkta işletim için değişimler daha önce Tablo 4.12’de de gösterilmişti).

Şekil 4.24 ve Tablo 4.13’de göl suyu ile deniz suyunun farklı izotermal sıcaklık şartları (15, 20, 25 ve 30 °C) altında seyreltilmesi deneyleri süresince, izlenmiş su kalite parametreleri değişimlerinden aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır.

Proseste, besleme ve çekmede $\pm 0,5$ °C ile istenen sıcaklık değeri için izotermal sıcaklık şartları altında deneysel çalışmalar yürütülmüştür.

Deniz suyunda pH değeri, tüm sıcaklıklarda çok az bir artış ve sonrasında düşük bir azalmalı zaman değişimi altında 7,74- 8,1 başlangıç aralığından 8,0-8,1 aralığına değişim göstermiştir. Göl suyu pH’sı ise 8,0-8,2 başlangıç aralığından hidronyum iyonu ağırlıklı su taşınımı etkisi altında 8,3-8,4 aralığına az bir artış göstermiştir. Her iki çözeltildeki deney başı ve sonu pH değerlerinin birbirlerine yakın seyrettiği görülmüştür.

Tablo 4.13: Göl suyu kullanılarak deniz suyunun seyreltilmesinde 15, 20, 25 ve 30 °C’de işletilen İO prosesinin performansı (membran yerleşimi: ters mod, akış hızı: 300 L/sa, hacim: 4 L, deney süresi: 3 saat).

Parametre	Birim	15 °C				20 °C				25 °C				30 °C			
		Göl Suyu		Deniz Suyu		Göl Suyu		Deniz Suyu		Göl Suyu		Deniz Suyu		Göl Suyu		Deniz Suyu	
		Deney Başı	Deney Sonu	Deney Başı	Deney Sonu	Deney Başı	Deney Sonu	Deney Başı	Deney Sonu	Deney Başı	Deney Sonu	Deney Başı	Deney Sonu	Deney Başı	Deney Sonu	Deney Başı	Deney Sonu
pH	-	7,97	8,26	7,74	7,99	8,15	8,32	8,15	8,12	8,16	8,3	8,01	8,14	8,08	8,38	7,95	8,06
Osmolalite	mosm/kg	7	12	790	771	7	41	789	716	8	10	800	769	7	28	795	762
Yoğunluk	g/cm ³	0,9980	0,9981	1,0183	1,0175	0,9977	0,9986	1,0179	1,0161	0,9968	0,9967	1,0171	1,0162	0,9958	0,9958	1,016	1,0148
İletkenlik	mS/cm	0,278	0,514	43,6	40,6	0,282	2,34	43,2	38,5	0,285	0,417	44,3	42,6	0,314	1,587	43,8	42,6
TÇK	g/L	0,1327	0,252	27,2	24,9	0,135	1,183	26,8	23,6	0,1361	0,2011	27,6	26,4	0,1509	0,795	27,6	26,1
Bulanıklık	NTU	2,2	1,88	0,69	0,79	2,21	2,00	0,85	0,70	1,11	1,22	0,6	0,53	2,21	2,04	0,72	0,93
Viskozite	mPa.s	1,13	1,12	1,23	1,20	1,02	1,04	1,09	1,08	0,97	1,0	1,1	1,00	0,83	0,82	0,92	0,92

Deniz suyunun osmolalitesi, yoğunluğu, iletkenliği ve toplam çözünmüş katıları, göl suyuna doğru çözünmüş madde taşınımı ve göl suyundan geçen su ile seyrelme sebebiyle, su ve tuz akılarına bağlı olarak deney süresince düşük seviyelerde azalmıştır. Buna karşın, göl suyuna deniz suyundan difüzyonal kütle taşınımı, göl suyunda bu parametre değeriinin artması durumunu beraberinde getirmiştir. Göl suyunda deney sonu en yüksek ve en düşük çözünmüş madde değeri görülmüş 20 ve 25 °C sıcaklıklar için iletkenlik ve TÇK değeri sırasıyla 2340 µS/cm ve 1183 mg/L ile 417 µS/cm ve 201 mg/L (25 °C için distile suda 365 µS/cm ve 171 mg/L, yeraltı suyunda 1328 µS/cm ve 659 mg/L idi) olarak ölçülmüştür.

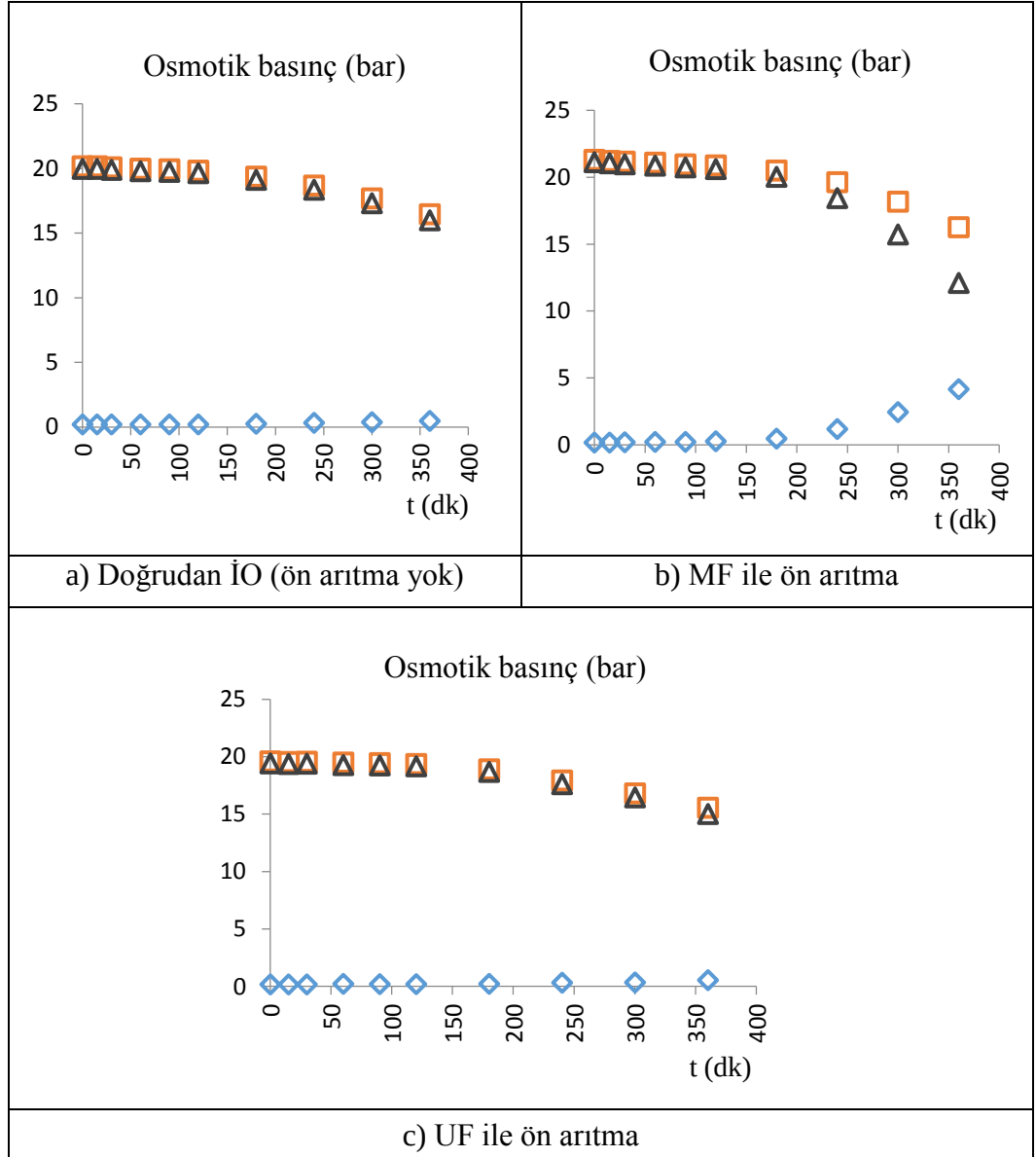
Deniz suyunda başlangıçta 790-800 mosm/kg aralığında olan deniz suyu osmolalitesi 716-771 mosm/kg aralığına azalmışken, göl suyunda 7-8 mosm/kg olan başlangıç osmolalitesi deney süresi sonunda 10-41 mosm/kg (distile suda 6-37 mosm/kg, yeraltı suyunda 18-44 (başlangıçta 16-18) mosm/kg idi) değeriine bir miktar artış göstermiştir.

Deniz suyunda deney süresince ya sabit (20 ve 30 °C) ya da azalan (15 ve 25 °C) şeklindeki viskozitesi değışimleri, göl suyunda, 20 ve 25 °C sıcaklık işletimlerinde bir miktar artmış, 15 ve 30 °C sıcaklık işletimlerinde ise kısmen dalgalı ancak zamanla sabit bir seyir göstermiştir. Genel olarak sıcaklıkla deney başı ve sonu değeri arasında önemli farklılıklar gözlenmemiştir.

Tüm sıcaklık deneylerinde, deniz suyu bulanıklık değeriinin 20 ve 25 °C sıcaklıkta sırasıyla 0,85 NTU'dan 0,70 NTU'ya ve 0,60 NTU'dan 0,53 NTU'ya seyrelme etkisi altında azaldığı, diğer sıcaklıklarda ise mikrobiyal üreme etkisi altında yaklaşık 0,70 NTU başlangıç değeriinden 0,80-0,93 NTU değeriine arttığı gözlenmiştir. Göl suyunun bulanıklık değeri ise 25 °C sıcaklıkta konsantre olma etkisi altında 1,11 NTU başlangıç değeriinden 1,22 NTU deney sonu değeriine çok az artış göstermişken, diğer sıcaklıklarda çalışılmış 2,2 NTU başlangıç değeriinden 1,88-2,04 NTU deney sonu değeriine, koloidal/mikrobiyal bileşenlerin membranlarla etkileşmesi (membranda tutunma) altında, bir miktar azalma göstermiştir. Bu değışimler, farklı işletimler altında farklı membran-katı madde etkileşimlerinin varlığını ayrıca ortaya koymaktadır.

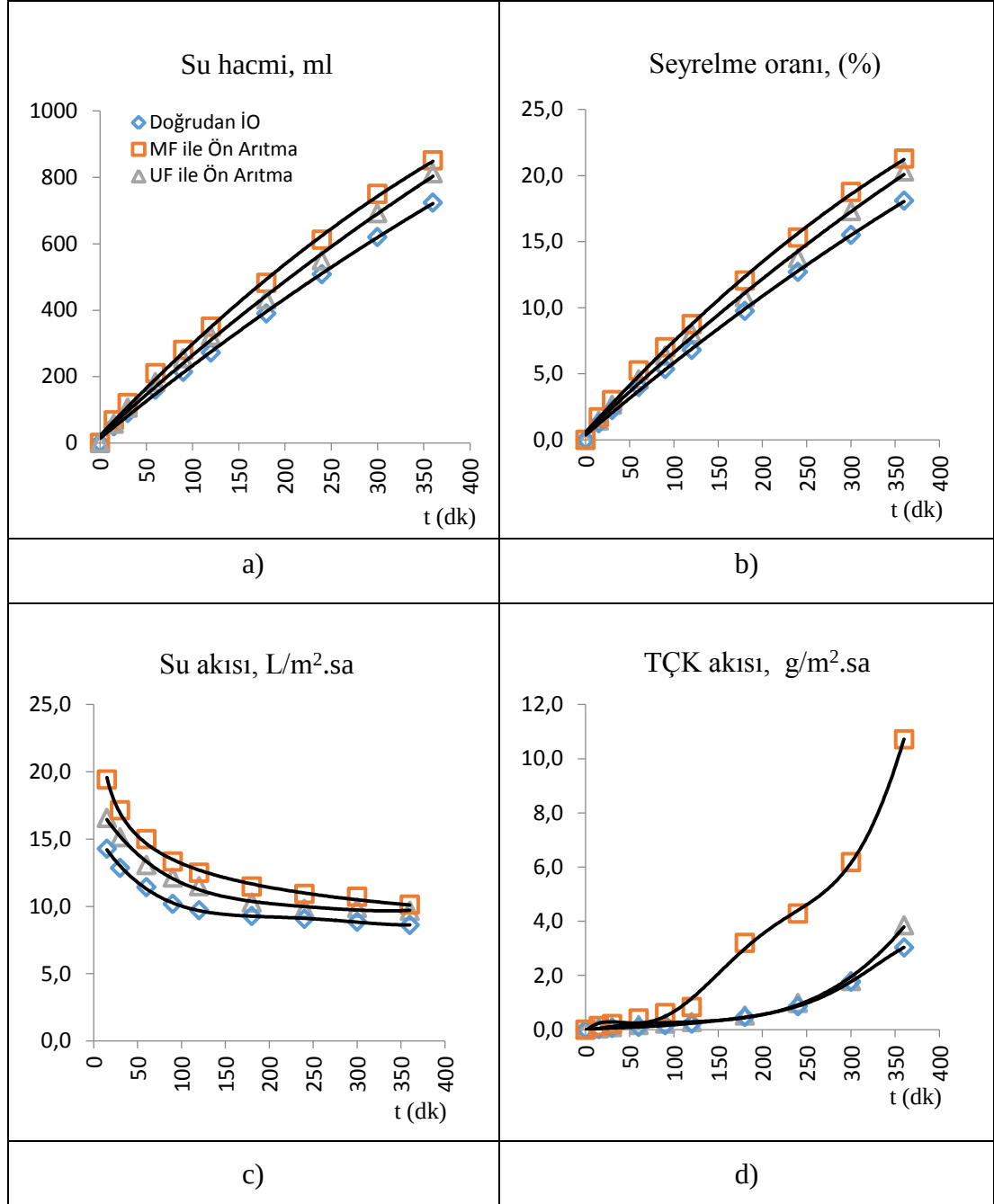
4.1.3.4. Ön Arıtma

İO prosesinde göl suyu kullanılarak deniz suyunun seyreltilmesi üzerine ön arıtma yapılıp yapılmamasının etkisini belirleme çalışmaları kapsamında çalışılan, deniz suyuna doğrudan İO uygulaması (ön arıtma yok), MF ile ön arıtma ve UF ile ön arıtma uygulamaları için İO prosesinde elde edilmiş besleme, çekme ve net osmotik basınçların zamanla değişimleri Şekil 4.25’de verilmiştir.



Şekil 4.25: İO prosesiyle göl suyu kullanılarak deniz suyunun seyreltilmesinde ön arıtma (MF veya UF) yapılıp yapılmamasına bağlı olarak İO prosesinde sürücü kuvvet etkisinin zamanla değişimi (membran yerleşimi: ters mod, akış hızı: 300 L/sa, sıcaklık: 25 °C, deney süresi: 6 saat) (Semboller ◇, □ ve Δ sırasıyla göl suyu, deniz suyu ve prosesteki net osmotik basınçtır).

Proses performansını ifade eden, çekme çözeltisine geçen su hacmi, çekme çözeltisinde hacimsel seyrelme oranı, su akısı ve tuz akısı parametrelerinin zamanla değişimleri Şekil 4.26’da gösterilmiştir.



Şekil 4.26: Göl suyu kullanılarak deniz suyunun seyreltilmesi üzerine MF ve UF prosesleriyle ön arıtma yapılmasının İO prosesi performansı üzerine etkisi, a) çekme çözeltisine geçen su hacmi b) çekme çözeltisinde hacimsel seyrelme oranı c) su akısı ve d) tuz akısı, (membran yerleşimi: ters mod, akış hızı: 300 L/sa, sıcaklık: 25 °C, deney süresi: 6 saat).

Ön arıtma etkisine bağlı göl suyu ile deniz suyunun seyreltilmesi deneylerinde İO prosesi sürücü kuvveti olan net osmotik basınç farkının, 6 saatlik deney süresi sonunda yaklaşık 19,4-21,1 bar'lık başlangıç değerlerinden, 12,1-16,0 bar'lar civarına dikkate değer seviyede azaldığı görülmüştür. Azalmanın her üç uygulamada da birbirine yakın oransal değerlerde gerçekleştiği tespit edilmiştir. Beslemede ön arıtmasız işletim için 6 saat sonunda ulaşılan osmotik basınç değeri 0,5 bar (distile su için 1,4 bar, yeraltı suyu için 1,7 bar) civarında gerçekleşmiş iken bu değer, MF ve UF ile ön arıtma sonrası için sırasıyla 4,2 ve 0,5 bar (distile su için 2,8 bar, yeraltı suyu için 2,4 ve 2,6 bar) olarak tespit edilmiştir.

İO prosesi öncesinde MF ile deniz suyunun ön arıtmadan geçirilmesi sonrasında İO prosesinde göl suyu ile ön arıtılmış deniz suyunun seyreltilmesi işlemi, İO'da daha yüksek su geçiş hacmi ve akısı vermiş ise de, doğrudan İO uygulamasına ait performanstan çok da yüksek olmayan bir performans belirlenmiştir. Göl suyu ile seyreltme işlemlerinde su geçiş hacmi, seyrelme oranı ve su akısı değerlerinin, MF ile ön arıtma sonrası İO uygulaması, UF ile ön arıtma sonrası İO uygulaması, doğrudan İO uygulaması azalan sırada meydana geldiği tespit edilmiştir. 6 saat işletim süresi sonunda su geçiş hacmi, çekmede seyrelme oranı ve su akısı değerleri, doğrudan İO uygulamasında sırasıyla 724 ml, % 18,1 ve 8,6 L/m².sa (distile su için sırasıyla 483 ml, % 12,1 ve 5,8 L/m².sa ve yeraltı suyu için sırasıyla 1430 ml, % 35,8 ve 17,0 L/m².sa) olarak belirlenmişken, en yüksek performanslı MF ile ön arıtmada sırasıyla 851 ml, % 21,3 ve 10,1 L/m².sa (distile su için sırasıyla 337 ml, % 8,4 ve 4,0 L/m².sa ve yeraltı suyu için sırasıyla 613 ml, % 15,3 ve 7,3 L/m².sa) olarak tespit edilmiştir. Bu performanslar, UF ile ön arıtma sonrasında göl suyu için 812 ml, % 20,3 ve 9,7 L/m².sa (distile su ve yeraltı suyu ikilisi için 899 ve 1310 ml, % 22,5 ve 32,7 ve 10,7 ve 15,6 L/m².sa idi) tespit edilmiştir.

Su geçiş performansına bağlı olarak seyreden deney sonu çözünmüş madde akısı değerleri de, azalan sırada 10,7 (MF/İO), 3,9 (UF/İO) ve 3,0 (İO) g/m².sa (distile su için 34,9 (UF/İO), 10,8 (İO) ve 9,9 (MF/İO) g/m².sa, yeraltı suyu için 24,7 (UF/İO), 22,4 (İO) ve 9,5 (MF/İO) g/m².sa) gibi MF/İO hariç ortalama değerlerde tespit edilmiştir.

Deney süresince İO prosesinde izlenen besleme ve çekme çözeltileri su kalite parametrelerinin (pH, osmolalite, yoğunluk, iletkenlik, TÇK (toplam çözünmüş katılar), bulanıklık ve viskozite) zamanla değişimleri, ön arıtmasız İO prosesi için

daha önce Tablo 4.11’de verilmiş olup, MF ve UF ile ön arıtma uygulamaları için Tablo 4.14’de gösterilmiştir.

Tablo 4.14: MF ve UF ile ön arıtma yapılmış deniz suyunun göl suyu kullanılarak seyreltilmesinde İÖ prosesinin performansı (membran yerleşimi: ters mod, akış hızı: 300 L/sa, sıcaklık: 25 °C, hacim: 4 L, deney süresi: 6 saat).

Parametre	Birim	MF				UF			
		Göl Suyu		Deniz Suyu		Göl Suyu		Deniz Suyu	
		Deney Başı	Deney Sonu	Deney Başı	Deney Sonu	Deney Başı	Deney Sonu	Deney Başı	Deney Sonu
pH	-	7,97	8,18	8,17	8,11	8,23	8,28	8,06	8,09
Osmolalite	mosm/kg	7	168	846	649	7	22	778	620
Yoğunluk	g/cm ³	0,9969	1,0007	1,0168	1,0122	0,9967	0,9971	1,0164	1,0127
İletkenlik	mS/cm	0,298	2,438	42,9	33,2	0,284	1,147	43,2	34,0
TÇK	g/L	0,1425	1,239	26,7	19,89	0,1352	0,568	26,8	20,79
Bulanıklık	NTU	2,33	1,85	0,26	0,47	1,5	1,7	0,24	0,43
Viskozite	mPa.s	1,02	1,02	1,07	1,07	1,02	0,98	1,12	0,97

Tablo 4.11 (ters mod), Tablo 4.14’de deniz suyunun MF ve UF membran prosesleriyle ön arıtmadan geçirilip geçirilmeksizin göl suyu ile seyreltilmesi İÖ deneyleri süresince, izlenmiş su kalite parametreleri değişimlerinden aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır.

Proses, termal sürücü kuvvet etkisinden bağımsız kılınarak sadece konsantrasyon farkı sürücü kuvvetinin etkisi altında tutulmak amacıyla, besleme ve çekme çözeltilerinde sabit (25±1 °C) izotermal şartlarda işletilmiştir.

İÖ prosesinde kullanılan deniz suyunun pH değeri, ön arıtma olsun ya da olmasın deneyler süresince 8,1-8,2 aralığında yaklaşık sabit bir değişim göstermiştir. Proseste kullanılan göl suyunda ise pH’nın 8,0-8,2 başlangıç değerlerinden 8,3-8,4 değerlerine zamanla arttığı görülmüştür. Deniz suyu ve göl suyunun pH’larındaki bu değişimler, daha önceki yeraltı suyu çalışma şartları ve distile su ile yapılan çalışmalarda da görüldüğü şekliyle, göl suyunda elektro-nötrallite şartları ve deniz suyu pH’sının pek değişmemiş olması durumları da dikkate alınarak; göl suyundan

deniz suyuna su taşınımının, hidronyum iyonu (H_3O^+) içerikli olarak gerçekleştiğini ortaya koymaktadır.

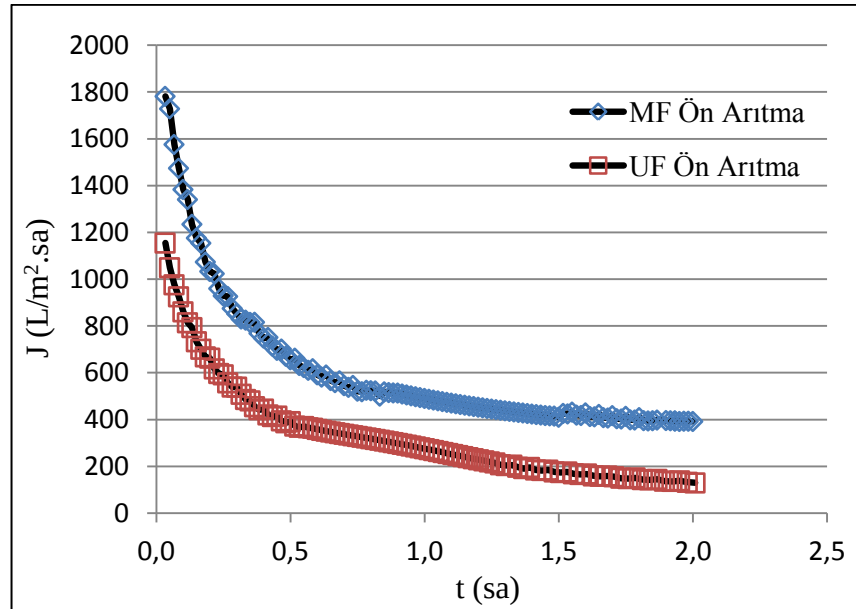
Deniz suyunun osmolalitesi, yoğunluğu, iletkenliği ve toplam çözünmüş katıları, göl suyuna çözünmüş madde taşınımı ve göl suyundan deniz suyu tarafına geçen su ile seyrelme sebebiyle, su ve tuz akılarına bağlı olarak deney süresince önemli derecelere varan seviyelerde azalmıştır. Deney sonu en yüksek ve en düşük çözünmüş madde değerleri görülmüş MF ile ön arıtma ve ön arıtmasız İO uygulamaları için iletkenlik ve TÇK değerleri sırasıyla 2,44 mS/cm ve 1,24 g/L ile 1,06 mS/cm ve 0,518 g/L (ön arıtmasız İO uygulamaları için distile suda 3,67 mS/cm ve 1,91 g/L, yeraltı suyunda 3,97 mS/cm ve 2,07 g/L) olarak ölçülmüştür. Bu sonuçlar, distile su ve yeraltı suyu tarafında ulaşılan çözünmüş madde konsantrasyonu bakımından ön arıtma yapıp yapılmamasına bağlı önemli farklılıklar oluşmadığını göstermesine rağmen, göl suyu için daha düşük çözünmüş madde geçişi etkisi altında İO prosesinin işletilebileceğini ortaya koymaktadır. Deniz suyunda başlangıçta 778-846 mosm/kg aralığında olan deniz suyu osmolalitesi değerleri, deney süresi sonunda, seyrelme etkisi altında 620-655 mosm/kg değerlerine azalmıştır. Göl suyunda ise başlangıçta 7-8 mosm/kg seviyesinde olan osmolalite, deney süresi sonunda, göl suyunun su geçişi sebebiyle konsantre olması ve göl suyuna doğru deniz suyu tarafından kütle taşınımına bağlı olarak 19-168 mosm/kg (distile su için 55-113 mosm/kg, yeraltı suyu için 68-106 (başlangıçta 16-18) mosm/kg) aralığına artmıştır.

İO prosesi deniz suyunun viskozite değerlerinde İO ve UF/İO uygulamalarında fark edilir seviyelerdeki azalmalara karşılık, MF/İO uygulaması halinde pek değişmeyen bir zaman seyri gözlenmiştir. Göl suyunun viskozitesi İO'da önce artıp sonrasında yaklaşık deney başlangıcı değerlerine azalmış, MF/İO'da pek değişmemiş, UF/İO'da ise zamanla azalmıştır. Deniz suyunun bulanıklık değerinin, MF/İO'da 0,26 NTU'dan 0,47 NTU'ya, UF/İO'da ise 0,24 NTU'dan 0,43 NTU'ya arttığı, doğrudan İO'da ise 0,60 NTU'dan 0,53 NTU'ya azaldığı tespit edilmiştir. Ön arıtma yapılan deniz suyunun, İO prosesinde bulanıklık artışı altında seyretilerildiği görülmüş olmakla birlikte bulanıklık artış ve azalışlarının yüksek değerlerde olmadığı, bu değişimlerin de, deniz suyundaki mikrobiyal aktiviteler ile askıda ve kolloidal maddelerin membranda tutulma/tutulmama etkilerinden kaynaklandığı tahmin edilmektedir. Diğer yandan göl suyu tarafındaki bulanıklık değerlerindeki değişimler, ön arıtmasız, MF ön arıtmalı ve UF ön arıtmalı işletimler için sırasıyla

1,1 NTU'dan 1,2 NTU'ya artış, 2,33 NTU'dan 1,85 NTU'ya azalış ve 1,5 NTU'dan 1,7 NTU'ya artış şeklinde kendini göstermiştir.

Sonuç olarak, her ne kadar distile su ile deniz suyunun seyreltilmesinde UF/İO kombinasyonu daha yüksek İO performansı sağlamış ise de; yeraltı suyu ile seyreltme uygulaması için de tercih edileceği belirlenmiş olduğu üzere, deniz suyunun ön arıtmaya tabi tutulmaksızın göl suyu (besleme)-deniz suyu (çekme) düzenindeki İO prosesinde ön arıtma uygulanmaksızın doğrudan seyreltilmesi, İO prosesinin ekonomisi ve pratikliği bakımından doğru bir seçim olacaktır. Proses işletme şartları ters mod membran yerleşimi, 300 L/sa akış hızı ve izotermal şartlarda 25 °C işletme sıcaklığıdır. Proseste kesikli şartlarda ulaşılan seyrelme hacimleri (% 18-21) için geri yıkama süresi azami 20-30 saat olarak belirlenmiştir.

MF ve UF prosesleriyle İO prosesinde deniz suyunun seyreltilmesi öncesinde deniz suyunun ön arıtmaya tabi tutulması neticesinde elde edilen MF ve UF prosesleri süzüntü akılarının zamanla değişimleri Şekil 4.27'de gösterilmiştir. Her iki proseste elde edilen deniz suyu arıtma performansı sonuçları ise Tablo 4.15'de verilmiştir.



Şekil 4.27: İO prosesi öncesinde deniz suyunun ön arıtılması işleminde MF ve UF prosesleri süzüntü akılarının zamanla değişimleri.

Her iki prosesteki deniz sularının başlangıç su kalitesi içeriklerinin birbirlerine göre az bir miktarlık değişimlerine bağlı olarak, MF ve UF proseslerde, sırasıyla 1800 ve 1170 L/m².sa başlangıç akı değerlerinden 400 ve 160 L/m².sa'lık deney sonu

süzüntü akısı değerlerine ulaşılmıştır. Proseslerin yaklaşık 2 saat zarfında kararlı bir işletim akısı şartına ulaştığı tespit edilmiştir. MF ve UF proseslerde zamana karşı akı performansları, membran gözenek büyüklüklerinin etkisi altında birbirleriyle benzer seyirde gerçekleşmiş olmakla birlikte; değişen deniz suyu kalitesi içerikleri (özellikle bulanıklık ve izlenmemiş olmakla birlikte mikroskobik canlı içerikleri) sebebiyle daha önce distile su ve yeraltı suyu deneylerindeki ön arıtmaya tabi tutulan deniz sularında elde edilen UF'in daha büyük MF akısı durumunun buradaki uygulamada tersi durum gözlenmiştir.

Tablo 4.15: İO prosesi öncesinde deniz suyunun MF ve UF prosesleriyle ön arıtılması performansları.

Parametre	Birim	MF Ön Arıtma				UF Ön Arıtma			
		Besleme (t=0. sa)	Besleme (t=2. sa)	Süzüntü	Süzme Verimi (%)	Besleme (t=0. sa)	Besleme (t=2. sa)	Süzüntü	Süzme Verimi (%)
Sıcaklık	°C	25,2	25,3	25,2	-	25,2	25,3	25,2	-
pH	-	8,00	8,01	8,01	-	8,15	8,2	8,15	-
İletkenlik	mS/cm	42,0	42,0	42,0	0,00	43,2	43,3	43,0	0,69
Yoğunluk	g/cm ³	1,0168	1,0171	1,0168	0,03	1,0168	1,017	1,0168	0,02
Viskozite	mPa.s	1,10	1,14	1,07	6,14	1,10	1,14	1,12	1,75
Osmolalite	mosm/kg	847	851	843	0,94	780	783	778	0,64
Bulanıklık	NTU	0,48	0,53	0,26	50,94	0,36	0,40	0,23	42,50
TÇK	g/L	26,0	26,0	26,0	0,00	26,8	26,8	26,6	0,75

Yaklaşık sabit işletme sıcaklığı altında, deniz suyunda bulanıklık gideriminin hem MF hem de UF proste % 50 performanslarda gerçekleştirilebildiği, giriş ve çıkış akımları arasında % 1'in altında osmolalite, % 0,0-0,6/0,8 aralığında pH, iletkenlik ve TÇK değişimleri gözlenmiştir. Özellikle MF sonrası deniz suyu viskozitesinin % 6 civarında değişim gösterdiği belirlenmiştir. Osmolalite değişiminin daha önceki uygulamalardaki gibi çok düşük seviyede olması, beklenen şekliyle sonraki adımda İO performansını olumsuz etkileyecek bir deniz suyu kalitesinin (İO çözeltileri arasında rölatif olarak daha düşük osmotik basınç etkisi) oluşmadığı sonucunu ortaya koymaktadır. Deniz suyunun MF ve UF ile ön arıtma

işlemine tabi tutulması neticesinde, bulanıklık hariç deniz suyu kalitesinde önemli değişimler oluşmaksızın deniz suyunun ön arıtma işleminden geçirilebildiği tespit edilmiştir.

4.1.4. İleri Osmoz Prosesi Besleme Çözeltileri Karakterizasyon Sonuçları

Deniz suyunun ileri osmoz prosesinde, %20 yeraltı ve göl suyu ile ayrı ayrı seyreltilmesi sonucunda elde edilen, deney sonu konsantre edilmiş yeraltı ve göl sularının karakterizasyon sonuçları Tablo 4.16’da gösterilmiştir. Yeraltı suyunda pH, yoğunluk, renk, klorür, toplam sertlik ve sülfat değerlerinin, göl suyunda ise pH, yoğunluk, nitrat, klorür, toplam sertlik ve sülfat değerlerinin arttığı görülmüştür. Alkalinite değerinin çok düştüğü, bunun da esasen karbonat çökelmeleri şeklinde membran üzerinde tutunmaya bağlı olarak su ortamında bikarbonat miktarının azalması sebebiyle oluşabileceği tahmin edilmektedir.

Tablo 4.16: Besleme çözeltilerinin deney sonu karakterizasyon sonuçları.

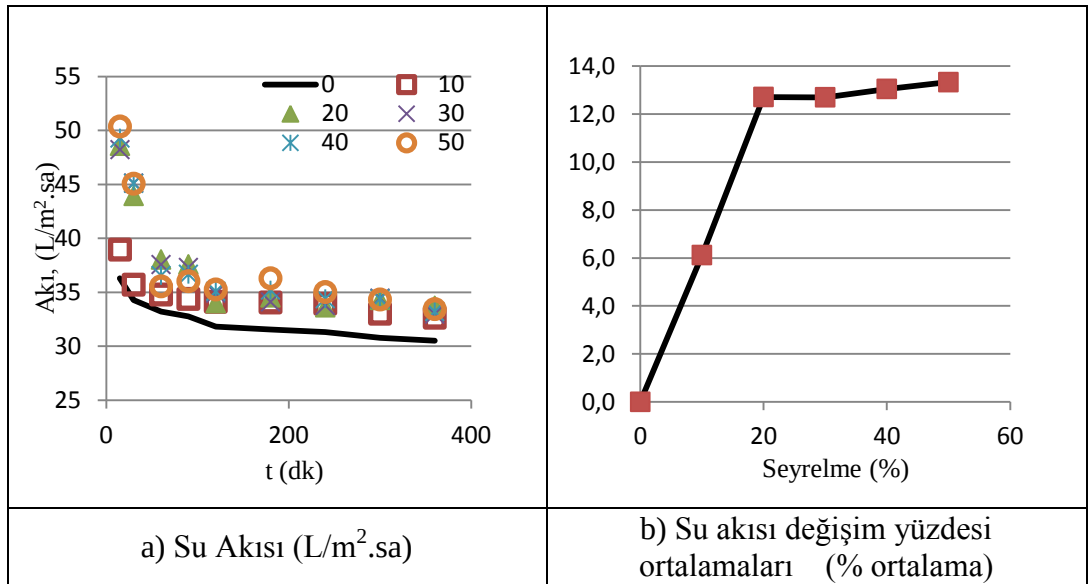
Parametre	Yeraltı Suyu	Göl Suyu
Sıcaklık (°C)	21,1	24,2
pH	7,96	8,47
İletkenlik (mS/cm)	2,99	5,16
TÇK (g/L)	1,535	2,71
Yoğunluk (g/cm ³)	0,9986	0,9991
Osmolalite (mosm/kg)	48	83
Bulanıklık (NTU)	0,24	0,25
Alkalinite (mg/L)	3,2	6,4
Toplam Sertlik (mg/L)	725,7	584,25
Renk (abs)	436 525 620	0,001 0,000 0,000
Sülfat (mg/L)	255,6	207,8
Klorür (mg/L)	390,28	15,30
Nitrat (mg/L)	15,05	0,59

4.2. Membran Distilasyon Prosesinde Deniz Suyundan Temiz Su Eldesi

4.2.1. Deniz Suyunun Uygun Seyrelme Oranının Tespiti

Deniz suyundan İO/DTMD bütünleşik sistemiyle temiz su eldesine dayalı çalışmada, DTMD prosesi öncesinde İO prosesinin DTMD için uygun seyrelme seviyesindeki işletiminin tespit edilmesi amacıyla; deniz suyunun DTMD prosesinde daha önce belirlenmiş en uygun proses işletim şartlarındaki seyrelme deneyleri yerine getirilmiştir. Deniz suyunun referans seyrelme oranının belirlenmesi amacıyla seyrelme işlemleri, distile su kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Seyrelme performansları olarak su akısı ve su akısı değişim yüzdesi ortalamaları dikkate alınmıştır. Su akısı parametresine göre deniz suyu seyrelme performansı, farklı seyrelme oranlarına rağmen birbirine çok yakın su akısı değerlerinin varlığını göstermekte ise de, geçen su akılarının referans su akısına (% 0 seyrelme-ham deniz suyunun artırılması) göre her bir t ölçüm zamanındaki akı değişim yüzdelerinin belirlenerek, bu parametre için tüm deney süresince elde edilmiş verilerin aritmetik ortalamasını ifade etmektedir. Deney sonuçları Şekil 4.28’de gösterilmiştir.

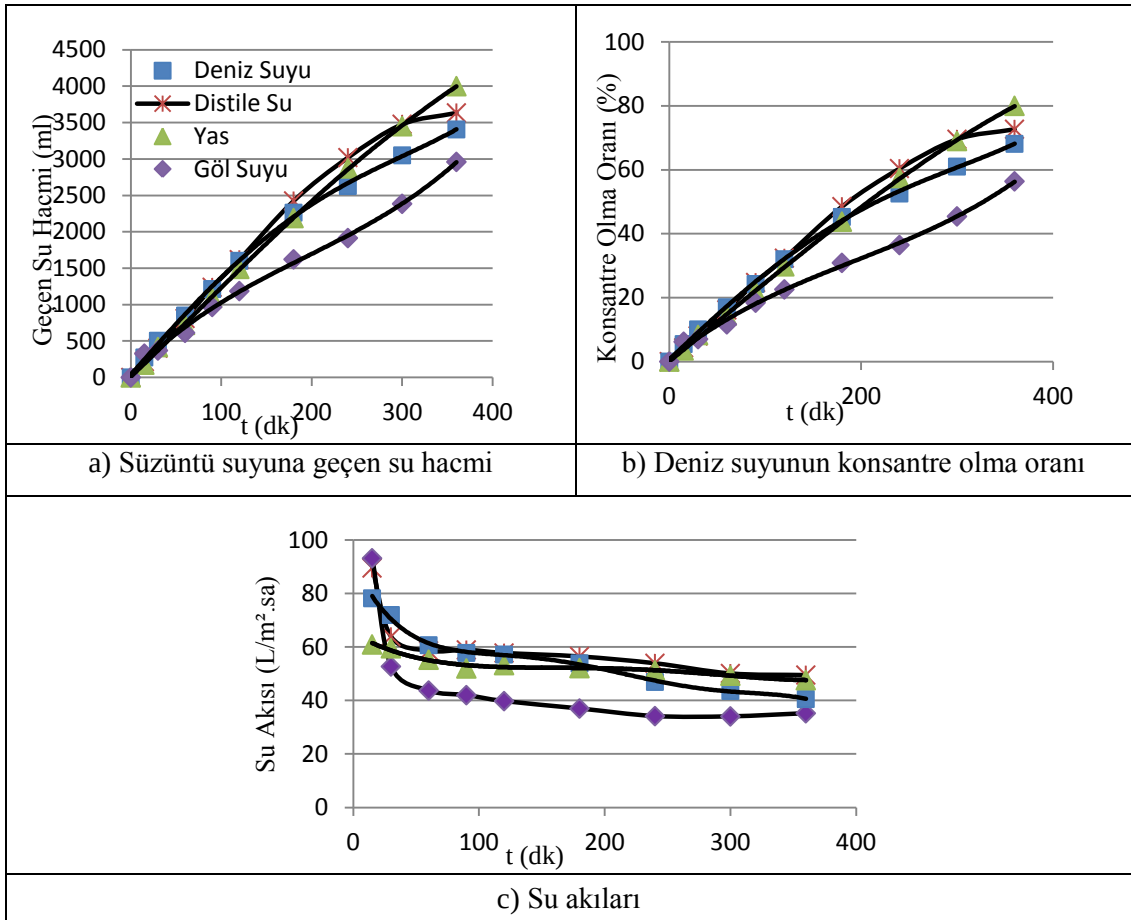


Şekil 4.28: Tekli DTMD prosesinde deniz suyundan temiz su üretimi üzerine deniz suyunun seyreltilmesinin etkisi (membran:PTFE-0,22 μm , sıcaklık:Deniz suyu (60°C)-distile su (30°C), akış hızı: 270 L/sa (deniz suyu)-360 L/sa (distile su), ΔT : 30°C , deney süresi: 6 saat).

En uygun seyrelme oranına % 20'lik seyrelme seviyesinde ulaşıldığı görülmektedir. Daha yüksek seviyelerde seyrelme yapılmasının DTMD su akısı performansı üzerine önemli bir katkısının olmadığı görülmüş olup, bu aynı zamanda saha uygulamasında daha fazla İO membran alanı kullanılması ve dolayısıyla da rölatif olarak daha fazla İO yatırım maliyeti ihtiyacını beraberinde getirecektir.

4.2.2. Farklı Besleme Çözeltileri ile Seyreltilmiş ve Seyreltilmemiş Deniz Sularından Temiz Su Eldesi

Distile su ile doğrudan % 20 oranında seyreltilen deniz suyu, ileri osmoz sisteminde yeraltı ve göl suyu ile % 20 oranında seyreltilen deniz suyu ve ham deniz suyu ayrı ayrı olmak üzere MD prosesinde temiz su eldesi amacıyla filtrasyon işlemine tabi tutulmuştur. MD prosesinde süzüntü suyuna geçen su hacmi, deniz suyunun konsantre olma oranı ve su akıları Şekil 4.29'da gösterilmiştir.



Şekil 4.29: Farklı besleme çözeltileriyle seyreltilmiş ve seyreltilmemiş deniz sularının MD prosesinde elde edilen sonuçlar.

Süzüntü suyuna geçen su hacminin ve buna bağlı deniz suyu konsantre olma oranının, distile su ve yeraltı suyu ile seyreltilmiş deniz suyunda ham deniz suyuna göre sırasıyla yaklaşık % 6,7 ve 17,5 daha fazla olduğu görülürken, göl suyu ile seyreltilmiş deniz suyunda ise yaklaşık % 13,1 ve 17,2 daha az olduğu tespit edilmiştir.

Su akılarına bakıldığında ise, distile su ve yeraltı suyu ile seyreltilmiş deniz sularında ham deniz suyuna göre sırasıyla yaklaşık % 22,2 ve 17,5 daha fazla akı olduğu görülürken, göl suyu ile seyreltilmiş deniz suyunda ise yaklaşık % 13,1 daha az su akısının olduğu görülmüştür.

Farklı besleme sularıyla seyreltilmiş ve seyreltilmemiş deniz suyunun MD prosesi sonunda elde edilen deney sonu karakterizasyon sonuçları Tablo 4.17’de gösterilmiştir.

Temiz suyun pH değerinin 7,18-7,75 arasında olduğu, iletkenliğin 7-292 $\mu\text{s}/\text{cm}$ arasında değiştiği, bulanıklık değerlerinin ise 0,00-0,04 NTU arasında değiştiği, renginin 0,000-0,007 abs arasında değiştiği, buna rağmen elde edilen temiz sularda nitrat ve fosfor değerlerinin bulunmadığı, TOK değerlerinin $< 1 \text{ mg/L}$ olduğu belirlenmiştir. Bu sonuçlardan hareketle berrak, kokusuz, bulanıklık içermeyen içilebilir kalitede temiz su elde edildiği belirlenmiştir.

Tablo 4.17: Farklı besleme çözeltileriyle seyreltilmiş ve seyreltilmemiş deniz suyunun MD prosesi sonunda elde edilen deney sonu karakterizasyon sonuçları.

Parametre	Ham Deniz Suyu			Seyreltilmiş Deniz Suyu								
				Distile Su			Yeraltı Suyu			Göl Suyu		
	Konsantre Deniz Suyu	Temiz Su	Süzme Verimi (%)	Konsantre Deniz Suyu	Temiz Su	Süzme Verimi (%)	Konsantre Deniz Suyu	Temiz Su	Süzme Verimi (%)	Konsantre Deniz Suyu	Temiz Su	Süzme Verimi (%)
Sıcaklık (°C)	22,2	21,0	-	21,9	21,6	-	22,1	21,2	-	24,2	24,4	-
pH	8,19	7,52	-	8,25	7,18	-	8,00	7,75	-	8,72	7,60	-
İletkenlik (mS/cm)	123	0,034	99,9	95,3	0,292	99,7	96,9	0,152	99,8	79,5	0,007	99,9
TÇK (g/L)	79,6	0,0159	99,9	66,0	0,140	99,8	68,4	0,072	99,8	57,2	0,004	99,9
Yoğunluk (g/cm ³)	1,059	0,997	5,9	1,047	0,997	4,8	1,048	0,997	4,9	1,0393	0,9969	4,1
Osmolalite (mosm/kg)	2400	0	100,0	1960	5	99,7	2020	4	99,8	1334	2	99,9
Bulanıklık (NTU)	1,46	0,0	100,0	1,43	0,04	97,2	2,39	0,01	99,6	7,31	0,0	100,0
TOK (mg/L)	8,83	0,62	93,0	6,28	0,68	89,2	6,8	0,72	89,4	10,13	0,49	95,2
ÇOK (mg/L)	6,74	0,48	92,9	4,49	0,51	88,6	4,86	0,53	89,1	7,34	0,40	94,6
UVA ₂₅₄ (cm ⁻¹)	0,205	0,007	96,6	0,152	0,007	95,4	0,177	0,004	97,7	0,217	0,006	97,2
SUVA (L/mg.m)	3,042	1,458	52,1	3,385	1,373	59,4	3,642	0,755	79,3	2,956	1,500	49,3
HCO ₃ (mg/L)	4,2	0,2	95,2	3,6	1,6	55,6	4,0	1,6	60,0	4,0	0,4	90,0
CO ₃ (mg/L)	0,0	0,0	-	0,0	0,0	-	0,0	0,0	-	6,2	0,0	100,0
Alkalinite (mg/L)	4,2	0,2	95,2	3,6	1,6	55,6	4,0	1,6	60,0	10,2	0,4	96,1
Toplam Sertlik (mg/L)	15990	69,7	99,6	12669	55,35	99,6	12300	51,25	99,6	10660	20,5	99,8
Renk (abs)	436 525 620	0,005 0,002 0,002	100,0 100,0 100,0	0,003 0,001 0,001	0,000 0,000 0,000	100,0 100,0 100,0	0,009 0,006 0,004	0,000 0,000 0,000	100,0 100,0 100,0	0,020 0,013 0,011	0,007 0,004 0,001	65,0 69,2 90,9
Sülfat (mg/L)	6334	2,72	99,9	5498	11,54	79,0	4363	2,8	99,9	4057	2,98	99,9
Klorür (mg/L)	47635	7,40	99,9	38887	78,08	99,8	38878	20,79	99,7	30141	3,1	99,9
Nitrat (mg/L)	7,7	0,0	100,0	5,1	0,0	100,0	13,42	0,0	100,0	4,9	0,0	100,0
TP (mg/L)	0,0	0,0	-	0,0	0,0	-	0,0	0,0	-	0,0	0,0	-
Ortofosfat (mg/L)	0,0	0,0	-	0,0	0,0	-	0,0	0,0	-	0,0	0,0	-
TN (mg/L)	9,8	0,185	98,1	13,4	0,440	96,7	15,2	0,131	99,1	6,22	0,234	96,2

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışma, İO/DTMD bütünleşik membran sistemi kullanılarak, farklı İO besleme suları (distile su, göl suyu, yeraltı suyu) ile deniz suyundan içme suyu elde edilmesi temeli üzerine inşa edilmiş olup; İO prosesinin referans proses performansı distile su besleme akımı kullanılarak tespit edilmiş, su temini yapılan doğal sulara (göl suyu ve yeraltı suyu) önerilen entegre arıtma sisteminin ne düzeyde bir başarı ile uygulanabileceği ortaya konmuştur.

İO deneylerinde, membran yerleşim modu (normal ve ters mod), sıcaklık, akış hızı, mikrofiltrasyon ve ultrafiltrasyon ile ön arıtmanın proses performansı üzerine etkisi araştırılmıştır. İO prosesinin en etkin, ters mod membran yerleşim modunda, 25 °C (besleme ve çekme çözeltileri) sıcaklık değerlerinde, 300 L/sa akış hızında işletilebildiği belirlenmiştir. Deniz suyunun MF ve UF ile ön arıtma işlemine tabi tutulması neticesinde, bulanıklık hariç deniz suyu kalitesinde önemli değişimler oluşmaksızın deniz suyunun ön arıtma işleminden geçirilebildiği ortaya konmuştur. Bu sebeple, ilave bir ön arıtma uygulaması yapılmaksızın İO prosesinin doğrudan işletiminin yapılabileceği sonucuna varılmıştır.

MD prosesi öncesinde İO prosesinin, MD için en uygun seyrelme oranına, %20'lik seyrelme seviyesinde ulaştığı tespit edilmiştir. MD prosesi sonunda elde edilen temiz suyun fosfor içermediği, çok düşük renk içeriğine haiz olduğu (0,007 abs), pH değerinin 7,18-7,75 arasında olduğu, aynı zamanda da kokusuz, bulanıklık içermeyen içilebilir kalitede olduğu belirlenmiştir. İO prosesinde farklı doğal su kaynaklarının besleme akımı olarak kullanılmasıyla seyreltilmiş deniz suyundan, MD prosesi kullanılarak elde edilen temiz suyun (7-292 $\mu\text{S/cm}$), ham deniz suyundan doğrudan TO prosesi kullanılarak temiz su eldesi amacıyla elde edilen içme suyu kadar ($<500 \mu\text{S/cm}$ (genelde $<300 \mu\text{S/cm}$)) iyi kalitede içme suyu eldesinin sağlandığı görülmüştür.

Bu sonuçlar yeraltı suyu ile beslenen İO prosesinin MD öncesinde kullanılmasının, MD prosesi su akısını arttırdığını; ancak göl suyu için ise azalttığı sonucunu ortaya koymaktadır. Pratikte MD'nin İO'ya göre çok daha yüksek yatırım ve işletme maliyetleriyle çalıştırılabildiği dikkate alınırsa, İO/MD kombinasyonu ile deniz suyundan içme suyu eldesinin, yeraltı suyu kullanılması durumunda, tek başına MD ile temiz su eldesine nazaran daha ekonomik birim içme suyu eldesi

maliyetlerinde su temini yapılmasına imkan sağlayabileceği öngörülmektedir. Bu anlamda, İO/MD kombinasyonunda İO ve MD proses performanslarının daha uzun süreli işletimlerle izlenerek, elde edilecek performans verileri üzerinden sahada uygulanabilirlik maliyetlerinin belirlenmesinin, bu konuyu aydınlatıcı teknolojik sonuçlar sağlayacağı kanaati taşınmaktadır. Bu bağlamda da, bu tez çalışmasının sonuçları ışığında, öngörülen içerikte bilimsel esaslı bir kombine membran teknolojisi uygulamasının, MD prosesinin sahada tek başına uygulanabilirliğinin yaygınlaştırılmasına önemli katkılar sağlayacağı düşünülmektedir.

KAYNAKLAR

- [1] Banat F. A., Simandl J., (1994), "Theoretical and experimental study in membrane distillation", *Desalination*, 95 (1), 39-52.
- [2] Banat F., Jumah R., Garaibeh M., (2002), "Exploitation of solar energy collected by solar stills from desalination by membrane distillation", *Renewable Energy*, 25 (4), 293-305.
- [3] Bourawi E., Ding Z., Ma R., Khayet M., (2006), "A framework for better understanding membrane distillation separation process", *Journal of Membrane Science*, 285 (2), 4-29.
- [4] Castello E. M. G., McCutcheon J. R., (2010), "Dewatering press liquor derived from orange production by forward osmosis", *Journal of Membrane Science*, 372(1-2), 97-101.
- [5] Cath T. Y., Childress A. E., Elimelech M., (2006), "Forward osmosis: Principles, applications, and recent developments", *Journal of Membrane Science*, 281 (3), 70-87.
- [6] Cath T. Y., Drewes J. E., Lundin C. D., (2009), "A novel hybrid forward osmosis process for drinking water augmentation using impaired water and saline water sources", 24th Annual Water Reuse Symposium, 1-20, Washington, USA, 13-16 September.
- [7] Cath T. Y., Childress A. E., Martinetti C. R., (2010a), "Combined Membrane-Distillation-Forward Osmosis Systems and Methods of Use", USA Patent, US 2010/0224276A1.
- [8] Cath T. Y., Hancock N. T., Lundin C. D., Hoppe-Jones C., Drewes J. E., (2010b), "A multi-barrier osmotic dilution process for simultaneous desalination and purification of impaired water", *Journal of Membrane Science*, 362 (2), 26-417.
- [9] Cath T. Y., (2006), "Emerging applications for water treatment and potable water reuse", International Conference on Environmental Systems, 1-43, Colorado, USA, 17-20 July.
- [10] Charcosset C., (2008), "A review of membrane processes and renewable energies for desalination", *Desalination*, 245 (1), 214-231.
- [11] Choi Y. H., Kweon J. H., Kim D. I., Lee S., (2009b), "Evaluation of various pretreatment for particle and inorganic fouling control on performance of SWRO", *Desalination*, 247 (2), 47-137.
- [12] Choi Y. J., Choi J. S., Oha H. J., Lee S., Yang D. R., Kim J. H., (2009a), "Toward a combined system of forward osmosis and reverse osmosis for seawater desalination", *Desalination*, 247 (3), 46-239.

- [13] Curcio E., Drioli E., (2005), "Membrane distillation and related operations—A Review", *Separation & Purification Reviews*, 34 (1), 35-85.
- [14] Drioli E., Macedonio F., Curcio E., (2007), "Integrated membrane systems for seawater desalination: energetic and exergetic analysis, economic evaluation, experimental study", *Desalination*, 203 (1), 260-261.
- [15] Feng C., Khulbe K. C., Matsuura T., Gopal R., Kaur S., Ramakrishna S., Khayet M., (2008), "Production of drinking water from saline water by air-gap membrane distillation using polyvinylidene fluoride nanofiber membrane", *Journal of Membrane Science*, 311 (2), 1–6.
- [16] Gilau A. M., Small M. J., (2008), "Designing cost-effective seawater reverse osmosis system under optimal energy options", *Renewable Energy*, 33 (5), 30-617.
- [17] Greenlee L. F., Lawler D. F., Freeman B. D., Marrot B., Moulin P., (2009), "Reverse osmosis desalination: Water sources, technology, and today's challenges", *Water Research*, 43 (6), 48-2317.
- [18] He K., Hwang H. J., Woo M. W., Moon I. S., (2011), "Production of drinking water from saline water by direct contact membrane distillation (DCMD) ", *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 17 (2), 8-41.
- [19] Holloway R. W., Childress A. E., Dennett K. E., Cath T. Y., (2007), "Forward osmosis for concentration of anaerobic digester centrate", *Water Research*, 47 (8), 14- 4005.
- [20] Kravath R. E., Davis J. A., (1975), "Desalination of sea water by direct osmosis", *Desalination*, 16 (4), 5-151.
- [21] Lamei A., Van der Zaag P., Von Münch E., (2008), "Basic cost equations to estimate unit production costs for RO desalination and long-distance piping to supply water to tourism-dominated arid coastal regions of Egypt", *Desalination*, 225 (4), 1–12.
- [22] Lawson K. W., Lloyd D. R., (1996), "Membrane distillation. II. Direct contact membrane distillation", *Journal of Membrane Science*, 120 (1), 123-124.
- [23] Lei Z., Chen B., Ding Z., (2005), "Special Distillation Processes", 1st Edition, Elsevier.
- [24] Lorain O., Hersant B., Persin F., Grasmick A., Brunard N., Espenan J. M., (2007), "Ultrafiltration membrane pre-treatment benefits for reverse osmosis process in seawater desalting, quantification in terms of capital investment cost and operating cost reduction", *Desalination*, 203 (2), 85-277.
- [25] Low S. C., (2009), "Preliminary studies of seawater desalination using forward osmosis", *Desalination and Water Treatment*, 7 (1), 6-41.

- [26] Martinetti C. R., Childress A. E., Cath T. Y., (2009), "High recovery of concentrated RO brines using forward osmosis and membrane distillation", *Journal of Membrane Science*, 331 (1), 9-31.
- [27] Mccutcheon J. R., McGinnis R. L., Menachem E., (2005), "A novel ammonia-carbon dioxide forward (direct) osmosis desalination process", *Desalination*, 174 (2), 1-11.
- [28] Mccutcheon J. R., McGinnis R. L., Elimelech M., (2006), "Desalination by a novel ammonia-carbon dioxide forward osmosis process: influence of draw and feed solution concentrations on process performance", *Journal of Membrane Science*, 278 (1), 23-114.
- [29] McGinnis R. L., (2002), "Osmotic Desalination Process (2)", US Patent Pending, PCT/US02/02740.
- [30] Mi B., Elimelech M., (2008), "Chemical and physical aspects of organic fouling of forward osmosis membranes", *Journal of Membrane Science*, 320 (2), 292-302.
- [31] Miller J. E., Evans L. R., (2006), "Forward Osmosis: A New Approach to Water Purification and Desalination", Technical Report No: SAND2006-4634, Sandia National Laboratories, Sandia Corporation, New Mexico.
- [32] Morrison G. L., Sudjito, Fane A.G., Hogan P., (1992), "Solar heated membrane distillation", *Proc. of the Biennial Congr. of the Int. Solar Energy Soc.*, 2329-2334, Sydney, Pergamon, Australia, 3-5 July.
- [33] Öztürk M., (2007), "Ters Osmoz Sistemleri ile Tuzlu/Atık Suların Arıtımı", 1.Baskı, Çevre Orman Bakanlığı Yayınları.
- [34] Pangarkar B. L., Sane M., Guddad M., (2011), "Reverse osmosis and membrane distillation for desalination of groundwater: A Review", *ISRN Materials Science*, 2011(5), 8-9.
- [35] Quintanilla V. Y., Li Z., Valladares R., Li Q., Amy G., (2011), "Indirect desalination of Red Sea water with forward osmosis and low pressure reverse osmosis for water reuse", *Desalination*, 280 (2), 160-166.
- [36] Schneider K., Holz W., Wollbeck R., (1988), "Membranes and modules for transmembrane distillation", *Journal of Membrane Science*, 39 (3), 25-42.
- [37] Tan C. H., Ng H. Y., (2008), "Modified models to predict flux behavior in forward osmosis in consideration of external and internal concentration polarizations", *Journal of Membrane Science*, 324 (1), 19-209.
- [38] Taniguchi M., Fusaoka Y., Nishikawa T., Kurihara M., (2004), "Boron removal in RO seawater desalination", *Desalination*, 167 (2), 26-419.
- [39] Wang K. Y., Chung T. S., Qin J. J., (2007), "Polybenzimidazole (PBI)

nanofiltration hollow fiber membranes applied in forward osmosis process”, *Journal of Membrane Science*, 300 (2), 6–12.

- [40] Wang K. Y., Teoh M., Nugroho A., Chung T. S., (2011), “Integrated forward osmosis–membrane distillation (FO-MD) hybridsystem for the concentration of protein solutions”, *Chemical Engineering Science*, 66 (11), 30-2421.
- [41] Yang Q., Wang K. Y., Chung T. S., (2009), “A novel dual-layer forward osmosis membrane for protein enrichment and concentration”, *Separation and Purification Technology*, 69 (7), 74-269.

ÖZGEÇMİŞ

Şerif ÇAKMAK 1986 yılında Adapazarı'nda doğdu. 2006 yılında başladığı Selçuk Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Çevre Mühendisliği Bölümü'nü 2011 yılında dereceyle tamamlayarak, aynı yıl yüksek lisans eğitimine Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü (GYTE), Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü, Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı'nda başladı. 2012 yılından bu yana GYTE'de Tübitak destekli projede proje asistanı olarak çalışmaktadır.