

T.C.
GEBZE TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ARITILMIŞ KENTSEL ATIKSULARDAN İLERİ
OSMOZ/MEMBRAN DİSTİLASYON SİSTEMİYLE SU GERİ
KAZANIMI

TUĞBA NUR YILMAZ
YÜKSEK LİSANS TEZİ
ÇEVRE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

GEBZE
2015

T.C.
GEBZE TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ARITILMIŞ KENTSEL ATIKSULARDAN
İLERİ OSMOZ/MEMBRAN DİSTİLASYON
SİSTEMİYLE SU GERİ KAZANIMI

TUĞBA NUR YILMAZ
YÜKSEK LİSANS TEZİ
ÇEVRE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

DANIŞMANI
DOÇ.DR. COŞKUN AYDINER

GEBZE
2015

T.R.
GEBZE TECHNICAL UNIVERSITY
GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

**WATER RECOVERY FROM TREATED
MUNICIPAL WASTEWATER BY FORWARD
OSMOSIS/MEMBRANE DISTILLATION SYSTEM**

TUĞBA NUR YILMAZ
A THESIS SUBMITTED FOR THE DEGREE OF
MASTER OF SCIENCE
DEPARTMENT OF ENVIRONMENTAL ENGINEERING

THESIS SUPERVISOR
ASSOC.PROF. DR. COŞKUN AYDINER

GEBZE
2015

GEBZE TEKNİK ÜNİVERSİTESİ

YÜKSEK LİSANS JÜRİ ONAY FORMU

GTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun 07/01/2015 tarih ve 2015/02 sayılı kararıyla oluşturulan jüri tarafından 23/01/2015 tarihinde tez savunma sınavı yapılan Tuğba Nur YILMAZ '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 KOBYA



ÜYE

:Yrd.Doç.Dr. Esra CAN DOĞAN



ONAY

Gebze Teknik Üniversitesi 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, II. evsel arıtma çıkış suyu, III. evsel arıtma çıkış suyu) ile arıtılmış kentsel atıksulardan su geri kazanımı incelenmiştir. İO prosesinde çekme suyu olarak kullanılan deniz suyu farklı besleme suları ile seyreltilmiş, seyreltilmiş deniz suyu MD prosesinde işlenerek su geri kazanımı sağlanmıştır. İO prosesinde, deniz suyunun seyreltilmesinde, besleme suyu olarak distile su, II. evsel arıtma çıkış suyu ve III. evsel arıtma çıkış suyu kullanılmıştır.

Bu çalışmada, öncelikle İO prosesinin distile su, II. evsel arıtma çıkış suyu, III. evsel arıtma çıkış suyu besleme akımları için çekme çözeltisi olarak kullanılarak deniz suyunu seyreltme performansları araştırılmıştır. İO deneyleri, membran yerleşim modu (normal ve ters mod), sıcaklık ve akış hızının etkisinin araştırıldığı kapsamda yürütülmüştür. İO deneyleri ile belirlenen en uygun işletme şartları altında, belirli deniz suyunun seyreltilmesi işlemi gerçekleştirilmiştir. Son adımda ise, seyreltilmiş deniz suyu MD prosesinde işlenerek temiz su elde etme performansları belirlenmiştir. Ham deniz suyu da MD prosesinde işlenerek temiz su elde edilmesi sayesinde, seyrelmiş ve ham deniz suyundan MD ile su geri kazanım performansları kıyaslanmıştır. İO ile seyreltmenin MD performansını ve çıkış suyu kalitesini ne yönde etkileyeceği İO/MD bütünleşik membran sistemi bütününde değerlendirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Arıtılmış Kentsel Atıksulardan Su Geri Kazanımı, 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 water recovery from treated municipal water by using different FO supply waters (distilled water, II. municipal effluent water, III. municipal effluent water). 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 water recovery. In the forward osmosis process, distilled water, .II. municipal effluent water, III. municipal effluent water are used to dilute sea water.

In this study, firstly, sea water dilution performance of the different feed solutions (distilled water, II. municipal effluent water, III. municipal effluent water) 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 performance, with the suitable operation conditions which are determined by forward osmosis experiments, sea water is diluted to determined dilution proportions. In the last step, the performance of water recovery 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 water recovery 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: Water Recovery From Treated Municipal wastewater, Forward Osmosis/Direct Contact Membrane Distillation (FO/DCMD).

TEŞEKKÜR

Yüksek lisansa başladığım süreçten itibaren bana gerek maddi ve manevi desteğini esirgemen sabırla dinleyen çözüm yolu üreten tezimde yol gösteren hocam Doç. DR Coşkun AYDINER’e,

Bu tez çalışması, 111Y279 numaralı ve “İleri Osmoz/Direk 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; bu tezi hazırlamamda destek olan TÜBİTAK’a,

Tez çalışma süresi boyunca deniz ve arıtma çıkış suları temini ile metal analizlerinde yardımcı olan Gebze Teknik Üniversitesi (GTÜ) Öğretim Üyesi Doç. Dr M.Salim ÖNCEL’e ve Araştırma Görevlisi E. Ender ÇELEBİ’ye,

Projeye başladığım ilk günden beri destek olan ve bana bilgi birikimyle ayrıca yardımcı olan İstanbul Teknik Üniversitesi Çevre Mühendisliği Bölümü Doç. Dr. Derya Yüksel İMER’e,

TOK ve ÇOK analizlerinde yardımcı olan Sakarya Üniversitesi Çevre Mühendisliği Bölümü Öğr. Gör. Nazire Pınar TANATTI’ya, Kocaeli Üniversitesi Yrd. Doç. Dr. Esra CAN DOĞAN’a,

Tez çalışmam boyunca beraber çalıştığım çalışma arkadaşlarım Ali Oğuzhan NARCI’ya, Şerif ÇAKMAK’a,

Yüksek lisans boyunca yanımda olan desteklerine esirgemeyen Ayşegül Yağmur GÖREN’e, Ender KARA’ya, Mehmet OKTA’ya, Şeyda AKSU’ya, Duygu TOPALOĞLU’na, Yusuf Küçükağa’ ya, Aynur YAŞAR’a, Zübeyde YEL’e,

Bugüne kadar maddi manevi desteğini esirgemeyen her an yanımda olan aileme teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	v
SUMMARY	vi
TEŞEKKÜR	vii
İÇİNDEKİLER	viii
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	xi
ŞEKİLLER DİZİNİ	xii
TABLolar DİZİNİ	xiv
1. GİRİŞ	1
1.1. Amaç	1
1.2. Kapsam	1
2. LİTERATÜR İNCELEMESİ	3
2.1. Kuramsallar Temelleri	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
2.1.2. Membran Distilasyon (MD) Prosesi	7
2.1.2.1. MD Teknolojileri	8
2.1.2.1.1. Direkt Temas Membran Distilasyonu (DTMD)	8
2.1.2.1.2. Hava Geçişli Membran Distilasyonu (HGMD)	9
2.1.2.1.3. Süpürücü Gaz Membran Distilasyonu (SGMD)	10
2.1.2.1.4. Vakum Membran Distilasyonu (VMD)	10
2.1.2.2. Çeşitli MD Uygulamaları	12
2.1.2.3. Atıksulardan Su Geri Kazanımı Uygulamaları	14
2.2. Literatür Değerlendirmesi	14
3. MALZEME ve YÖNTEM	16
3.1. Deneysel Yöntemler	16
3.2. Besleme Sularının ve Çekme Suyunun Karakterizasyonu	17
3.3. Membran ve Özellikleri	20
3.4. Kimyasallar	20

3.5. Analitik Yöntemler	21
3.5.1. Su Kalite Analizleri	21
3.6. Deneysel Çalışma Sistemleri	23
3.6.1. İleri Osmoz Deney Sistemi	23
3.6.2. Direkt Temas Membran Distilasyon Deney Sistemi	24
3.7. Deneysel Çalışma Esasları	25
3.7.1. İleri Osmoz Prosesi	25
3.7.2. Direkt Temas Membran Distilasyon Prosesi	25
3.8. Proses Performans Hesaplamaları	26
3.8.1. İleri Osmoz Performans Hesaplamaları	26
3.8.2. Direkt Temas Membran Distilasyon Performans Hesaplamaları	27
4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA	29
4.1. İleri Osmoz Prosesi Deneysel Çalışma Bulguları	29
4.1.1. Distile Su Kullanılarak Deniz Suyu Seyreltilmesi	29
4.1.1.1. Membran İşletme Modu	29
4.1.1.2. Akış Hızı	33
4.1.1.3. Sıcaklık	38
4.1.2. II. Evsel Arıtma Çıkış Suyu Kullanılarak Deniz Suyu Seyreltilmesi	43
4.1.2.1. Membran İşletme Modu	43
4.1.2.2. Akış Hızı	47
4.1.2.3. Sıcaklık	53
4.1.3. III. Evsel Arıtma Çıkış Suyu Kullanılarak Deniz Suyu Seyreltilmesi	59
4.1.3.1. Membran İşletme Modu	59
4.1.3.2. Akış Hızı	63
4.1.3.3. Sıcaklık	59
4.1.4. İleri Osmoz Prosesi Besleme Çözeltilerinin Karakterizasyon Sonuçları	77
4.2. Membran Distilasyon Prosesinde Deniz Suyundan Temiz Su Eldesi	77
4.2.1. Farklı Besleme Çözeltileri ile Seyreltilmiş ve Ham Deniz Sularından Temiz Su Eldesi	77
5. SONUÇ ve ÖNERİLER	80

KAYNAKLAR

81

ÖZGEÇMİŞ

84

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler ve Açıklamalar

Kısaltmalar

DTMD	: Direkt Temas Membran Distilasyonu
HGMD	: Hava Geçişli Membran Distilasyonu
İO	: İleri Osmoz
MD	: Membran Distilasyonu
SGMD	: Süpürücü Gaz Membran Distilasyonu
TO	: Ters Osmoz
VMD	: Vakum Membran Distilasyonu

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Sekil 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.	8
2.4: 2005 yılına kadar yayımlanmış kaynaklarda, farklı MD konfigürasyonlarının yüzdeleri.	11
3.1: Kullanılan besleme sularının ve çekme suyunun alındığı merkezler.	18
3.2: İleri Osmoz Deney Düzeneği.	24
3.3: Kesikli DTMD Deney Düzeneği.	25
4.1: İO prosesiyle distile su kullanılarak deniz suyunun seyreltilmesinde membran işletme moduna bağlı olarak İO prosesinde sürücü kuvvet etkisinin zamanla değişimi.	29
4.2: İO prosesinde distile su kullanılarak deniz suyunun seyreltilmesi üzerine membran işletme modunun etkisi.	31
4.3: İO prosesiyle distile su kullanılarak deniz suyunun seyreltilmesinde akış hızına bağlı olarak İO prosesinde sürücü kuvvet etkisinin zamanla değişimi.	34
4.4: İO prosesinde distile su kullanılarak deniz suyunun seyreltilmesi üzerine akış hızının etkisi.	35
4.5: İO prosesiyle distile su kullanılarak deniz suyunun seyreltilmesinde sıcaklığa bağlı olarak İO prosesinde sürücü kuvvet etkisinin zamanla değişimi.	38
4.6: İO prosesinde distile su kullanılarak deniz suyunun seyreltilmesi üzerine sıcaklığın etkisi.	39
4.7: İO prosesiyle II. evsel arıtma çıkış suyu kullanılarak deniz suyunun seyreltilmesinde membran işletme moduna bağlı olarak İO prosesinde sürücü kuvvet etkisinin zamanla değişimi.	43
4.8: İO prosesinde II. evsel arıtma çıkış suyu kullanılarak deniz suyunun seyreltilmesi üzerine membran işletme modunun etkisi.	44
4.9: İO prosesiyle II. evsel arıtma çıkış suyu kullanılarak deniz suyunun	

seyreltilmesinde akış hızına bağlı olarak İO prosesinde sürücü kuvvet etkisinin zamanla değişimi.	48
4.10: İO prosesinde II. evsel arıtma çıkış suyu kullanılarak deniz suyunun seyreltilmesi üzerine akış hızının etkisi.	49
4.11: İO prosesiyle II. evsel arıtma çıkış suyu kullanılarak deniz suyunun seyreltilmesinde sıcaklığa bağlı olarak İO prosesinde sürücü kuvvet etkisinin zamanla değişimi.	53
4.12: İO prosesinde II. evsel arıtma çıkış suyu kullanılarak deniz suyunun seyreltilmesi üzerine sıcaklığın etkisi.	54
4.13: İO prosesiyle III. evsel arıtma çıkış suyu kullanılarak deniz suyunun seyreltilmesinde membran işletme moduna bağlı olarak İO prosesinde sürücü kuvvet etkisinin zamanla değişimi.	59
4.14: İO prosesinde III. evsel arıtma çıkış suyu kullanılarak deniz suyunun seyreltilmesi üzerine membran işletme modunun etkisi.	60
4.15: İO prosesiyle II. evsel arıtma çıkış suyu kullanılarak deniz suyunun seyreltilmesinde akış hızına bağlı olarak İO prosesinde sürücü kuvvet etkisinin zamanla değişimi.	64
4.16: İO prosesinde III. evsel arıtma çıkış suyu kullanılarak deniz suyunun seyreltilmesi üzerine akış hızının etkisi.	65
4.17: İO prosesiyle III. evsel arıtma çıkış suyu kullanılarak deniz suyunun seyreltilmesinde sıcaklığa bağlı olarak İO prosesinde sürücü kuvvet etkisinin zamanla değişimi.	70
4.18: İO prosesinde III. evsel arıtma çıkış suyu kullanılarak deniz suyunun seyreltilmesi üzerine sıcaklığın etkisi.	71
4.19: Farklı besleme çözeltileriyle seyreltilmiş ve ham deniz sularının MD prosesinde elde edilen sonuçlar.	77

TABLÖLAR DİZİNİ

<u>Tablo No:</u>	<u>Sayfa</u>
2.1: Laboratuvar ölçekte MD proseslerinin başarıyla uygulandığı alanlar.	13
3.1: Her bir besleme ve çekme suyu için İO ve MD prosesinde izlenen parametreler.	16
3.2: Çalışılan besleme sularının ve çekme suyunun özellikleri.	18
3.3: İO membran ve özellikleri.	20
3.4: MD membranlarının özellikleri.	20
3.5: Su kalitesi analiz parametreleri için kullanılan ölçüm metotları/yöntemleri.	22
3.6: İO prosesinde izlenen işletme parametreleri, değerleri ve deneysel şartları.	26
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).	32
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).	36
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).	41
4.4: II. evsel arıtma çıkış 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).	46
4.5: II. evsel arıtma çıkış 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).	52
4.6: II. evsel arıtma çıkış 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).	58

4.7:	III. evsel arıtma çıkış 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).	62
4.8:	III. evsel arıtma çıkış 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).	67
4.9:	III. evsel arıtma çıkış 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).	75
4.10:	Besleme çözeltilerinin deney sonu karakterizasyon sonuçları.	76
4.11:	Farklı besleme çözeltileriyle seyreltilmiş ve ham deniz suyunun MD prosesi sonunda elde edilen deney sonu karakterizasyon sonuçları.	79

1.GİRİŞ

1.1. Amaç

Bu çalışmanın amacı, arıtılmış kentsel atıksudan membran distilasyon (MD) prosesi öncesinde ön arıtma amaçlı olarak ileri osmoz (İO) prosesi kullanılarak su geri kazanılmasıdır. Bu amaçla, yenilikçi entegre bütünlüğe haiz “İleri Osmoz/Direkt Temas Membran Distilasyon” (İO/DTMD) bütünleşik membran sistemi kullanılarak, farklı İO besleme suları (distile su, II. evsel arıtma çıkış suyu, III. evsel arıtma çıkış suyu) ile arıtılmış kentsel atıksulardan su geri kazanımı temeli üzerine inşa edilmiştir. İO prosesinde çekme suyu olarak kullanılacak deniz suyu farklı besleme suları ile seyreltilerek, seyreltilmiş deniz suyu MD prosesinde işlenerek su geri kazanımı sağlanmıştır. İO prosesinde, deniz suyunun seyreltilmesinde, besleme suyu olarak distile su, II. (son çöktürme çıkışı) ve III. (ileri N ve P giderimi çıkışı) evsel arıtma çıkış suları kullanılmıştır. Bu şekliyle geniş yelpazede besleme suları kullanılarak bütünleşik sistem işletiminin amacı ise; İO prosesinin distile su ile referans proses performanslarını tespit ederek, II. ve III. evsel arıtma çıkış suları ile 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, II. ve III. evsel arıtma çıkış suları besleme akımları için çekme çözeltisi olarak kullanılacak deniz suyunu seyreltme performansları araştırılmıştır. İO deneyleri, membran yerleşim modu (normal ve ters mod), sıcaklık, akış hızı etkisinin araştırıldığı kapsamda yürütülmüştür. İO deneyleri ile belirlenen en uygun işletme şartları altında, belirlenmiş oranda deniz suyunun seyreltilmesi işlemleri yerine getirilmiştir. Son adımda ise, seyreltilmiş deniz suyu MD prosesinde işlenerek su geri kazanım performansları belirlenmiştir. Ham deniz suyu da MD prosesinde işlenerek su geri kazanımı sayesinde, seyrelmiş ve ham deniz suyundan MD ile su geri kazanım performansları kıyaslanmıştır. İO ile seyreltmenin MD performansını ve

ıkış suyu kalitesini ne yönde etkileyeceği İO/MD bütünleşik membran sistemi bütününde değerlendirilmiştir.

2. LİTERATÜR İNCELEMESİ

2.1. Kuramsal Temeller

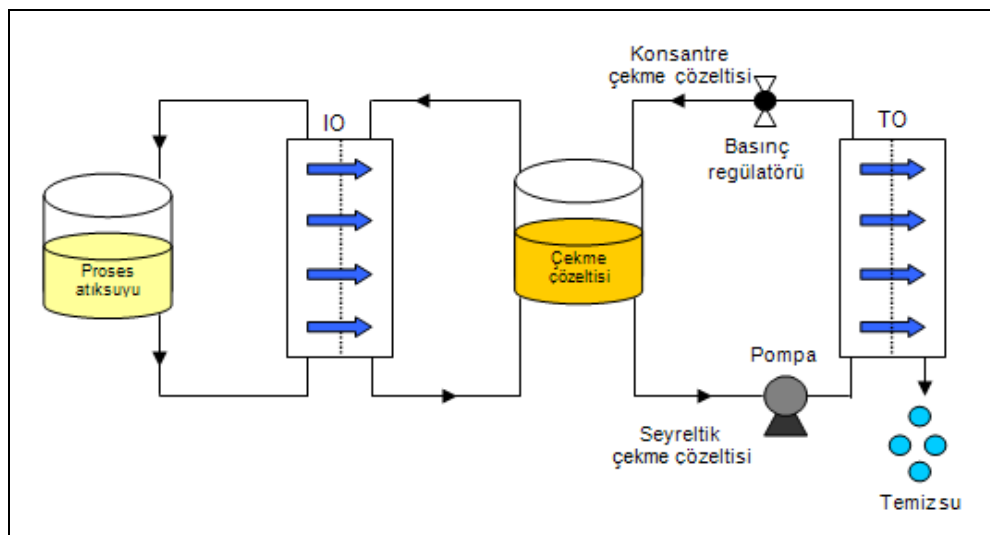
2.1.1. İleri osmoz (İO) Prosesi

Osmoz, osmotik basınç farkına bağlı olarak uygulanan fiziksel bir proses olup suyun yarı geçirgen bir membrandan hareketi olarak tanımlanır. Seçici geçirgen bir membran suyun geçişine izin verirken çözünmüş molekül veya iyonların geçişine izin vermez [1]. 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 güçiken ileri osmoz prosesinde ise osmotik basıncın kendisi kütle taşınımı için etkin güçtür [1].

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 süzöntü tarafındaki konsantre çözeltisidir [2]. Bu konsantre çözelti literatürde çekme solüsyon, osmotik ajan, osmotik ortam, etkin solüsyon, osmotik motor, örnek solüsyon veya tuzlu su gibi terimlerle ifade edilmektedir [1]. Etkin gücün kaynağı olması dolayısıyla çekme çözeltisi seçilirken uygulamaya bakılmaksızın kararlı, nötr veya nötr pH'a yakın ve toksik olmama gibi genel kriterler göz önünde bulundurulmalıdır [1]. 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)

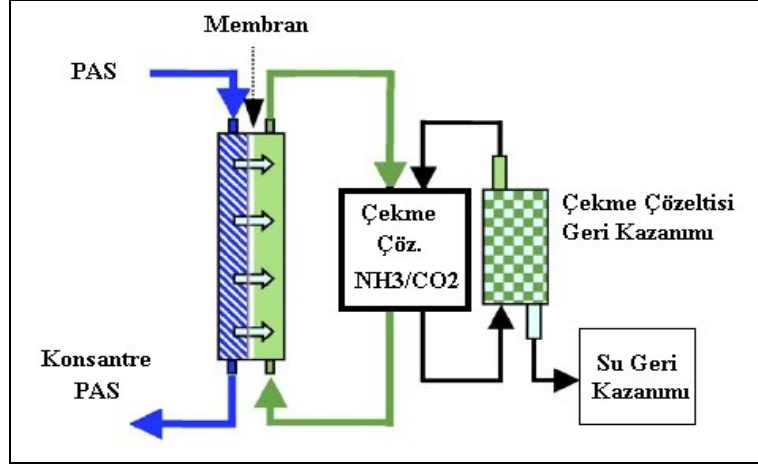
Yaygın kullanılan İO prosesi tek değerlikli suda yüksek çözünürlüğe sahip (örn.; NaCl veya KCl) tuzlar kullanılarak işletilen İO/TO kombine sistemidir. TO prosesi, çekme çözeltisini konsantre etme ve su eldesi amacıyla kullanılmaktadır. Ancak çekme çözeltisinde yüksek tuz konsantrasyonlarında, su eldesi 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)[1].



Şekil 2.1: İO/TO kombine sistemi.

4

çözeltisine devrettirilmeleri suretiyle sistemin sürekliliği sağlanırken, diğer taraftan amonyum bikarbonatın sudan giderilmesi suretiyle temiz su eldesi sağlanabilmektedir (Şekil 2.2)[1].



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, kirleticiler çok yüksek oranda reddetme kapasitesine sahip olması, besleme çözeltilerinin geniş aralıkta olması, enerji gereksiniminin ve dizayn maliyetlerinin az olması şeklinde sıralanabilir. Basınç sürücülü membran proseslerde, kirleticiler 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 [4], [5], [2], [6], [7], [8].

2.1.1.2. Su ve Atıksu Arıtımında Uygulamalar

Ters osmoz prosesi, içme suyu, atıksu ve endüstri işlemlerinde günümüzde yaygın olarak ve başarılı bir şekilde uygulanmaktadır. Bu sistemlerde yüksek enerji gereksinimine bağlı olarak maliyet giderleri de fazladır [6]. 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 [4], [5].

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 çözeltilerde 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 [1].

Quintanilla ve arkadaşlarının yaptığı 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 [9].

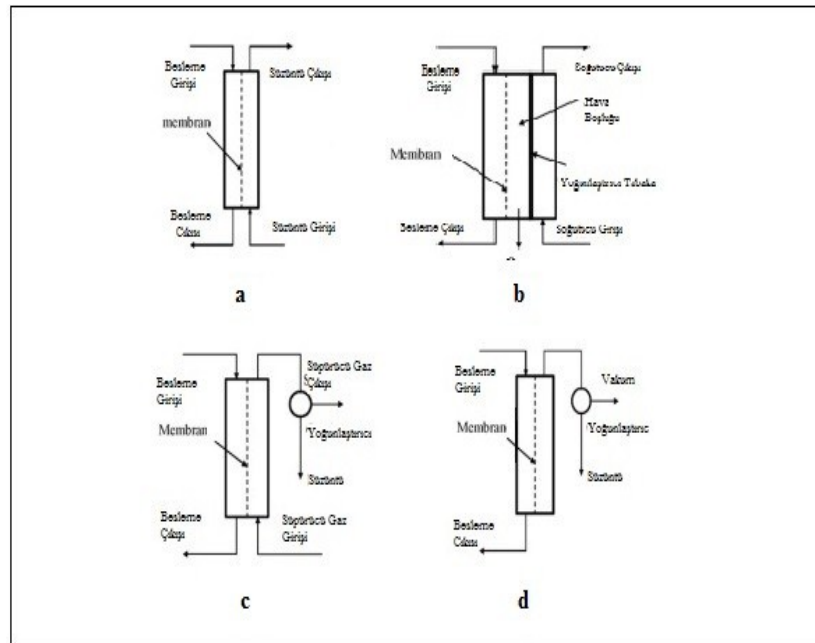
Gıda endüstrisinde içecekler ve sıvı gıdaların konsantre edilmesinde İO işleminin tat, aroma, renk ve besinsel değerlerin yüksek oranda kalmasını sağlayacak düşük ısı ve basınçlarda işlem yapabilme olanağına sahip olması ve potansiyel olarak hidrolik basınçlı membran proseslerine göre düşük membran kirlenmesinin 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 [1]. 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 [10], [11]. 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 [12].

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 farklı 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 [13],[14].

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) [15],[16].



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 süzüntü 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 şekildeyle işlemini sağlar. 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[17],[16].

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 [16].

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.

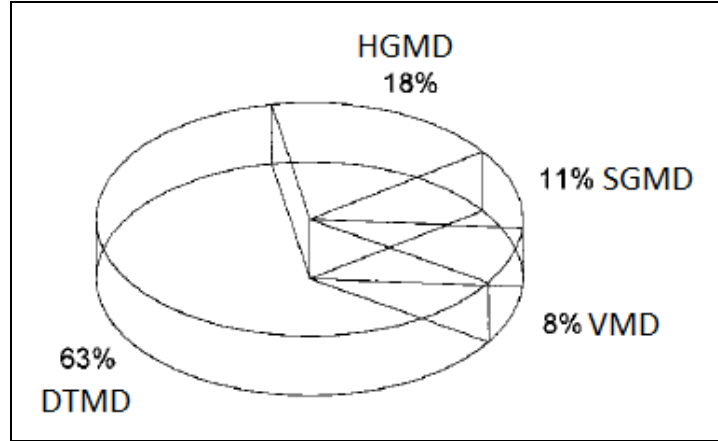
Dolayısıyla, SGMD, yüksek kütle transferi katsayısına sahip DTMD ve düşük ısı kayıplı HGMD'nin bir kombinasyonu olarak görülebilir. Buna rağmen, SGMD üzerine çok az bir çalışma yapılmıştır. Bunun sebebi olarak süzüntünün harici bir yoğunlaştırıcıda toplanması, önemli süzüntü miktarına ulaşabilmek için 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 [16].

2.1.2.1.4. Vakum Membran Distilasyonu (VMD)

VMD'de, membran yüzeyi ile direkt temas halinde bulunan besleme çözeltisinin basıncı minimum giriş basıncından 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 akışı bulunmaktadır. Dolayısıyla, VMD'nin kütle akışı genellikle diğer MD konfigürasyonlarından daha büyüktür. VMD'nin diğer bir avantajı membranın süzüntü 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 [15],[16].



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 kullanılabilir [18].

MD teknolojisi, endüstrilerin tasarruf ettiği ve gelişmekte 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 çarpıklığının bütün MD konfigürasyonlarındaki debi çeşitlerinin

üzerindeki etkisini içeren çeşitli MD sorunlarının çok kapsamlı bir şekilde araştırılması gerektiği belirtilmektedir [19].

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 MD membranı üretilmesinin, prosesi ne kadar ekonomik seviyelere çekebileceği ve MD prosesinin pratiğe dönüştürülmesinin önünü açacağı hakkında önemli bir fikir sunmaktadır [20].

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. Atıksulardan Su Geri Kazanımı Uygulamaları

Günümüzde oluşan popülasyon artışı, endüstriyel faaliyetlerin artışı, bunun sonucunda da oluşan su problemleri dünyanın en önemli problemlerinden biri olmuştur. Bu problemleri çözmek için kullanılan membran teknolojileri ile yüksek kalitede temiz su üretimi sağlandığı literatürden bilinmektedir.

2000 yıllarından itibaren ters osmoz tesisleri (100.000m³/gün) inşa edilmektedir. Ancak su problemlerinin giderek kötüleşmesi dünyadaki insan nüfüsünün giderek artması nedeniyle daha büyük ters osmoz tesislerine ve daha çok su kaynaklarına ihtiyaç duyulmuştur.

Kurihara'nın yaptığı çalışmada Japonya'da megatonluk su sistemi üzerine çalışılmıştır. Bu çalışmada sadece deniz suyundan değil atıksudan da su geri kazanımı üzerine çalışılmıştır. Bu çalışmanın ilk aşamasında deniz suyundan ters osmoz prosesi ile su kazanımı sağlanmakta, çıkan deniz suyu konsantresi atıksu ile karıştırılarak atıksulardan su geri kazanımı sağlanmaktadır [21],[22].

2.2. Literatür Değerlendirmesi

Son yıllarda su kaynaklarının azalması sebebiyle su arıtımında membran prosesler uygulanmaktadır. Tuzlu suların, kentsel atıksuların, sızıntı sularının arıtımı popüler olmaya başlamıştır. Geleneksel arıtma sistemleri su geri kazanımında tercih edilmesine rağmen gittikçe artan su ihtiyacı, temiz su üretimi ve tuzsuzlaştırma işlemleri için yetersiz kalmakta ve bununla ilgili olarak membran proseslerinin tercih edildiği literatürden bilinmektedir.

Günümüzde TO prosesi temiz su üretiminde, tuzsuzlaştırma işleminde yaygın olarak kullanılmaktadır. Yüksek enerji tüketimi, membran kirlenmesi, organik konsantre suyu gibi dezavantajlardan dolayı işletme etkinliğini kısıtlamaktadır.

İO prosesi, atıksudan temiz su eldesi için bir arıtma prosesi yerine ön arıtma olarak uygulanmaktadır. Atıksuda; organik bileşikler, çözünmüş ağır metaller, toplam çözünmüş katılar v.b. gibi genel kirleticiler bulunduğundan dolayı İO prosesiyle yüksek temiz su parametrelerine ulaşmak oldukça güçtür. İO/TO kombinesi yapılan bir çalışmada TO için gerekli enerjiden daha az enerji tüketildiği, daha iyi kalitede su üretildiği görülmüştür. Aynı zamanda TO prosesi sonucu daha

düşük maliyetle geri kazanıma dayalı daha iyi kalitede su üretilmesi için yeterli olduğu görülmüştür [19].

MD prosesi ile su ve atıksu arıtımında yüksek saflıkta su üretimi, demineralizasyon işlemleri uygulanmaktadır. Fakat atıksu arıtımında oluşabilen membran kirlenmesi ve daha iyi daha etkin bir arıtma için ön arıtma yapılması gerektiği literatürde görülmüştür. Bunla ilgili olarak [23]'da yapılan çalışmada İO/MD kombine sistemi uygulamasının incelendiği İO prosesinde gözlemlenen yüksek akı elde edilebilceği, daha dirençli çekme çözeltisinde uygulanabilceği söylenmektedir [24],[25].

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 izlemesi 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.

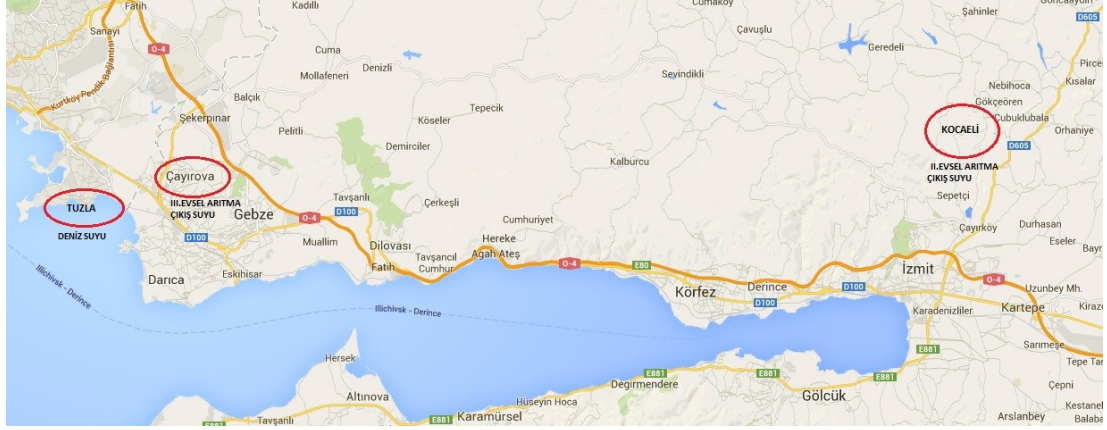
Parametre	Besleme Suyu		Ham Deniz Suyu
	II. evsel arıtma çıkış suyu	III. evsel arıtma çıkış suyu	
KOİ ^a	√	√	
TOK ^a	√	√	√
ÇOK ^a	√	√	√
UVA ₂₅₄ ^a	√	√	√
SUVA ^a	√	√	√
Baryum			√
Kalsiyum	√	√	√
Magnezyum	√	√	√
Demir	√	√	√
Mangan			√
Potasyum	√	√	√
Sodyum	√	√	√
Stronsiyum			√
Bor			√
Silisyum			√

Tablo 3.1: Devam.

Bikarbonat	√	√	√
Karbonat	√	√	√
Alkalinite			√
Toplam Sertlik	√	√	√
AKM	√	√	
Renk	√	√	√
Sülfat	√	√	√
Fosfat	√	√	√
Toplam Fosfor	√	√	√
Klorür	√	√	√
Amonyak	√	√	√
Nitrat	√	√	√
TKN ^a	√	√	√
GC-MS ^b	√	√	√
^a KOİ: Kimyasal oksijen ihtiyacı, TOK: Toplam organik karbon, ÇOK: Çözülmüş organik karbon, UVA ₂₅₄ : 254 nm’de morötesi ışık absorpsiyonu, 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 İstanbul ili Tuzla ilçesinde sahilinden, II.evsel arıtma çıkış suyu Kocaeli ilinden evsel atıksu arıtma tesisinden , III. evsel arıtma çıkış suyu ise Çayırova Evsel atıksu arıtma tesisinden 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 Suyuü		Çekme Suyu (Ham Deniz Suyu)	Deniz Suyu Literatür Değeri
	II. evsel arıtma çıkış suyu	III. evsel arıtma çıkış suyu		
Sıcaklık (°C)	25,0	25,2	25,2	19,3*
pH	8,39	8,34	8,34	8,1*
İletkenlik (µs/cm)	1145	2181	35800	49,600*
Yoğunluk (g/cm ³)	0,9980	0,9978	1,0142	1,9**
Bulanıklık (NTU)	1,38	1,28	0,76	1,6*
KOİ (mg/L)	24,8	18,6	n.d	n.d
TOK (mg/L)	6,27	7,03	3,8	0,8*
ÇOK (mg/L)	4,64	3,53	2,92	
UVA ₂₅₄ (cm ⁻¹)	0,168	0,141	0,034	0,7*
SUVA (L/mg,m)	3,62	3,99	1,16	2,71***
Baryum (mg/L)	n.d	n.d	1,30	0,01*
Kalsiyum (mg/L)	89,11	60,20	309,40	441*
Magnezyum (mg/L)	32,84	24,00	855,00	1371*

Tablo 3.2:Devam.

Demir (mg/L)	0,024	0,012	0,001	
Mangan (mg/L)	n.d	n.d	0,002	
Potasyum (mg/L)	23,24	20,50	265,90	410*
Sodyum (mg/L)	239,20	9,60	7055,00	10945*
Stronsiyum (mg/L)	n.d	n.d	5.15	6,7*
Bor (mg/L)	n.d	n.d	3	5,1*
Silisyum (mg/L)	n.d	n.d	0.30	0,2*
Bikarbonat (mg/L)	144,00	200,20	108,60	161*
Karbonat (mg/L)	0	0	46,80	
Alkalinite (mg/L)	n.d	n.d	155,40	
Toplam Sertlik (mg/L)	175,20	316,00	4332,00	
AKM (mg/L)	25	0,9	n.d	
Renk (abs)				
436	0,015	0,010	0,002	
525	0,007	0,004	0,001	
620	0,006	0,001	0	
Sülfat (mg/L)	36,20	177,00	1804,00	2965*
Fosfat (mg/L)	0	0	0	0,02*
Toplam Fosfor (mg/L)	0	0,15	0	
Klorür (mg/L)	115,00	215,68	10846,64	20900*
Amonyak (mg/L)	11,27	6,22	<0,1	
Nitrat (mg/L)	8,20	4,20	0,28	0,2*
Nitrit (mg/L)	0	0	0	
TKN (mg/L)	4,73	0,80	<0,1	
TN (mg/L)	24,20	11,22	0,30	

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, Efreim 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), membranına ilişkin bilgiler Tablo 3.3’de, MD membranlarına ilişkin bilgiler ise Tablo 3.4’de gösterilmiştir.

Tablo 3.3: İO membran 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	$3,100 \times 10^{-3}$
^a veri yok					

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 Solutions	0,45	160±40	126±10	121,3±2,5
*PTFE:Politetrafloroetilen.					

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 ($K_2Cr_2O_7$, >%99, BDH Prolabo), Gümüş Nitrat ($AgNO_3$, Merck), Potasyum Kromat (K_2CrO_4 , ≥%99,5, Merck), Fe(II) Sülfat Heptahidrat ($FeSO_4 \cdot 7H_2O$, %101, BDH Prolabo), 1.10-Fenantrolin Monohidrat (Prolab), Fenolftalein İndikatörü ($C_{20}H_{14}O_4$, Merck), Sülfirik Asit (H_2SO_4 , %95-97, Merck), Hidroklorik Asit (HCl, %37, Merck), Nitrik Asit (HNO_3 , %65, Merck), Borik Asit (H_3BO_3 , %99,5-100,5, Merck), Sodyum

Hidroksit (NaOH , $\geq\%99$, Merck), Potasyum Sülfat (K_2SO_4 , $\geq\%99$, Merck), Sodyum Tiyosülfat Pentahidrat ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$, $\%99,5-101$, Merck), Sodyum Asetat Trihidrat ($\text{CH}_3\text{COONa} \cdot 3\text{H}_2\text{O}$, Merck), Asetik Asit (CH_3COOH , Merck), Potasyum Dihidrojen Fosfat (KH_2PO_4 , Merck), Kalay Klorür ($\text{SnCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, Sigma Aldrich), Sodyum Karbonat (Na_2CO_3 , Merck), Potasyum Nitrat (KNO_3 , Merck), Kalsiyum Karbonat (CaCO_3 , Merck), Metil Kırmızısı ($\text{C}_{15}\text{H}_{15}\text{N}_3\text{O}_2$, Merck), Metil Mavisi ($\text{C}_{16}\text{H}_{18}\text{N}_3\text{SCl}$, Merck), Cıva Sülfat (HgSO_4 , Merck), Metil Oranj İndikatörü ($\text{C}_{14}\text{H}_{14}\text{N}_3\text{NaO}_3\text{S}$, Merck), Etanol ($\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$, $\%95$, Merck), Amonyum Klorür (NH_4Cl , $\geq\%99,8$, Merck), Amonyak (NH_3 , $\%25$, Merck), Magnezyum Klorür Hekza Hidrat ($\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, Merck), Kalsiyum Karbonat (CaCO_3 , Merck), Eriochrome Black T ($\text{C}_{20}\text{H}_{12}\text{N}_3\text{NaO}_7\text{S}$, Fluka Chemika), Gliserol ($\text{C}_3\text{H}_8\text{O}_3$, Merck), Etilen Dinitril Tetra Asetik Asit Disodyum Tuzu ($\text{C}_{10}\text{H}_{14}\text{N}_2\text{Na}_2\text{O}_8 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, Merck), Gümüş Sülfat (Ag_2SO_4 , Prolabo), Baryum Klorür (BaCl_2 , Merck), Baryum Sülfat (BaSO_4 , Merck), Amonyum Fe II Sülfat Hekzahidrat ($\text{Fe}(\text{NH}_4)_2 (\text{SO}_4)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, $\%100,2$, Prolabo), Amonyum Hepta Molibdat Tetra Hidrat ($(\text{NH}_4)_6\text{Mo}_7\text{O}_{24} \cdot 4\text{H}_2\text{O}$, Merck) Nitrit Kiti (Merck), Nitrat Kiti (Merck), 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 (Hach Lange HQ 440d multi)
pH	Masa üstü multiparametre ölçüm cihazı (Hach Lange HQ 440d multi)
İletkenlik	Masa üstü multiparametre ölçüm cihazı (Hach Lange HQ 440d multi)
Yoğunluk	El tipi dijital yoğunluk ölçer (Kyto elec. DA-130 N)
Viskozite	Viskozimetre (AND VibroViscometer SV-10)
Osmolalite	Donma noktasının düşürülmesi prensibiyle çalışan osmometre cihazı (Advanced İns Model 3250 osmometer)
Toplam Çözülmüş Katı Madde	Masa üstü multiparametre ölçüm cihazı (Hach LangeHQ 440d multi)
Bulanıklık	Türbidimetre (Hach Lange 2100Q)
KOİ	SM 5220C kapalı reflux metodu , Titrimetrik method
TOK	%99.9 saflıkta oksijen ile yakma ünitesine sahip TOK cihazı (Hach Lange IL550 TOC-TN)
ÇOK	%99.9 saflıkta oksijen ile yakma ünitesine sahip TOK cihazı (Hach Lange IL550 TOC-TN)
UVA ₂₅₄	UV spektrofotometre cihazı (Hach Lange DR6000)
SUVA	Ölçülmüş UVA ₂₅₄ ve ÇOK değerlerinden birim dönüşümüyle hesapla
Baryum	ICP (Inductively coupled plasma) cihazı (Perkin Elmer Optima 700D DV Optical Emission Spectrophotometer)
Kalsiyum	AAS (Atomic absorption spectrophotometer) cihazı (Perkin Elmer Atomic Absorption Spectrophotometer 1100)
Magnezyum	ICP (Inductively coupled plasma) cihazı (Perkin Elmer Optima 700D DV Optical Emission Spectrophotometer)
Demir	ICP (Inductively coupled plasma) cihazı (Perkin Elmer Optima 700D DV Optical Emission Spectrophotometer)
Mangan	ICP (Inductively coupled plasma) cihazı (Perkin Elmer Optima 700D DV Optical Emission Spectrophotometer)
Potasyum	ICP (Inductively coupled plasma) cihazı- Perkin Elmer Optima 700D DV Optical Emission Spectrophotometer
Sodyum	ICP (Inductively coupled plasma) cihazı (Perkin Elmer Optima 700D DV Optical Emission Spectrophotometer)
Stronsiyum	ICP (Inductively coupled plasma) cihazı (Perkin Elmer Optima 700D DV Optical Emission Spectrophotometer)
Bor	AAS (Atomic absorption spectrophotometer) cihazı (Perkin Elmer Atomic Absorption Spectrophotometer 1100)
Silisyum	ICP (Inductively coupled plasma) cihazı (Perkin Elmer Optima 700D DV Optical Emission Spectrophotometer)

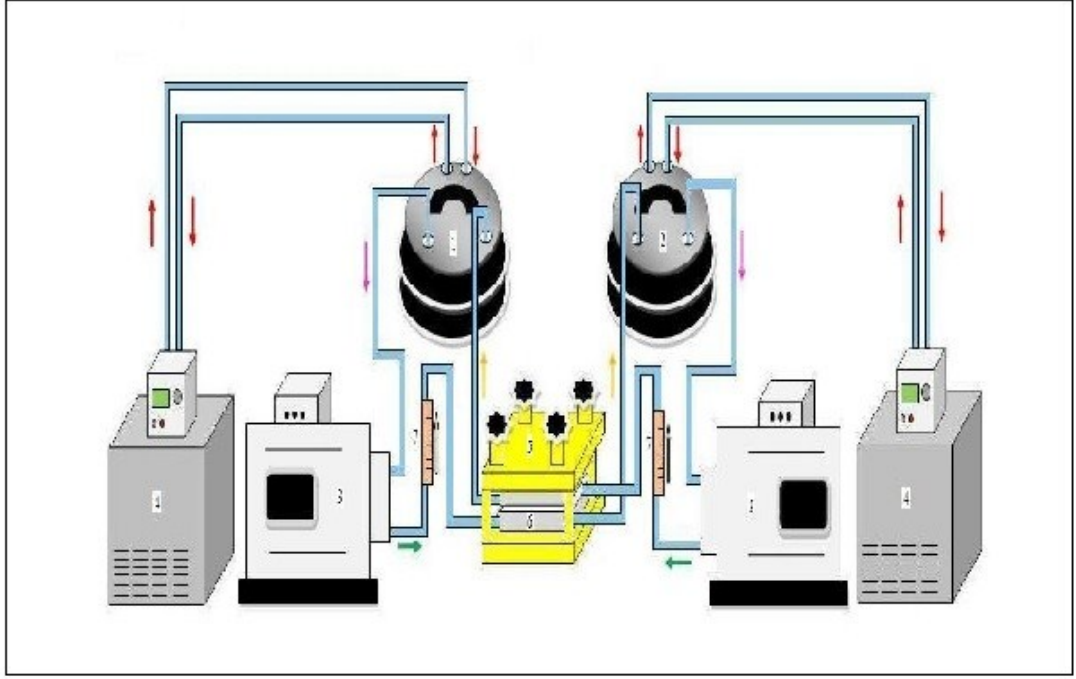
Tablo 3.5:Devam.

Bikarbonat	SM 2320B titrimetrik metodu
Karbonat	SM 2320B titrimetrik metodu
Alkalinite	SM 2320B titrimetrik metodu
Toplam Sertlik	SM 2340C EDTA Titrimetrik yöntemi
AKM	SM 2540D metodu
Renk	SM 2120 spektrofotometrik method (Hach LangeLange DR 6000)
Sülfat	SM 4500E Türbidimetrik metod
Fosfat	SM 4500 D Kalay klorür method (Hach Lange DR 6000)
Toplam Fosfor	SM 4500 D Kalay klorür methodu (Hach Lange DR 6000)
Klorür	SM 4500 B Argenometrik Yöntem (Hach HQ 440d multi)
Amonyak	Amonyak probu (Hach HQ 440d multi)
Nitrat	SM 4500 B UV spektrofotometrik method (Hach HQ 440d multi)
TKN	SM 4500 B micro-Kjeldahl metodu (Hach Lange DR 6000)

3.6. Deneysel Çalışma Sistemleri

3.6.1. İleri Osmoz Deney Sistemi

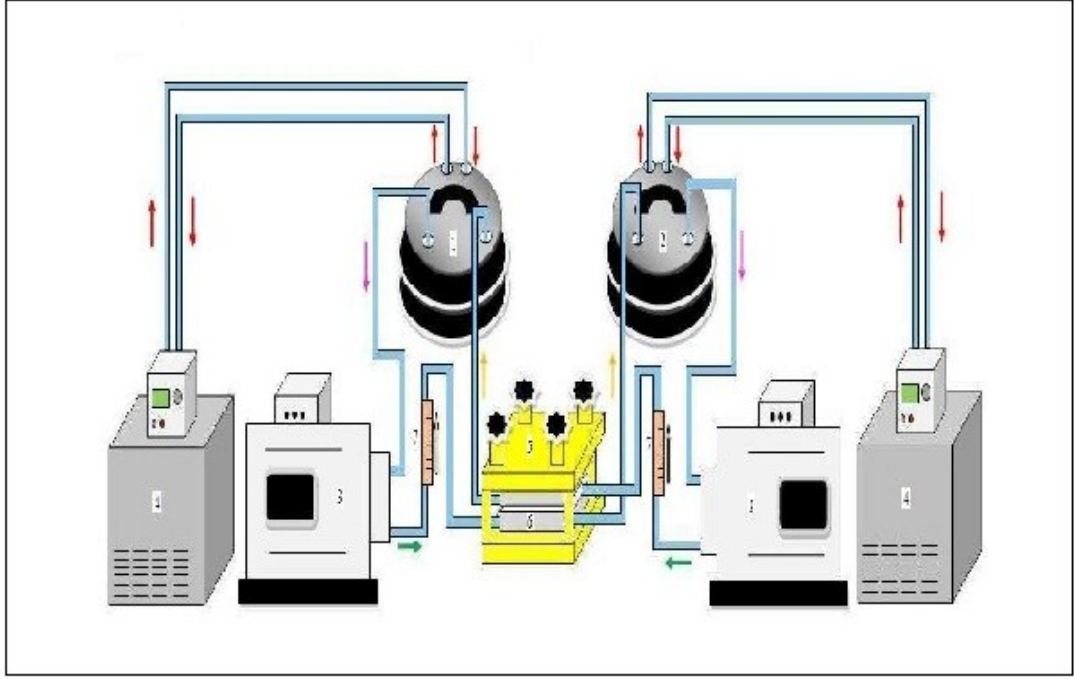
Deneysel çalışmalar, Şekil 3.2’de gösterilen laboratuvar ölçekli İO düzeneği kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Düzenek, membran üzerindeki gerilimi azaltmak amacıyla, membran modülde her iki kanaldaki hidrodinamik akış aynı yönde olacağı şekliyle işletilmiştir. Sıvıları pompalamak için iki adet debi kontrollü peristaltik pompa (EW 77111–67, Cole Parmer, IL) kullanılmıştır. Besleme ve çekme hatları üzerinde aynı akış hızlarını sağlamak amacıyla herbir akış hattı, 10 L.min⁻¹ maksimum akış hızına sahip iki adet eşdeğer kapasiteli akış ölçer ile donatılmıştır. Proseste, hem besleme (distile su, II.evsel arıtma çıkış suyu, III.evsel arıtma çıkış 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 Düzenegi. 1) Çekme Çözeltisi Tankı, 2) Besleme Tankı, 3) Peristaltik Pompa, 4) Su Banyosu, 5) Membran Modül Sıkıştırıcı, 6) Membran Modülü, 7) Akış Ölçer.

3.6.2. Direkt Temas Membran Distilasyon Deney Sistemi

Kesikli DTMD deneylerinde kullanılmış olan deney düzenegi su banyosu ilavesi ve MD modülü değişimi şartında kesikli İO prosesi için kullanılan aynı deneysel düzendir. Membran modülde her iki kanaldaki hidrodinamik akış çapraz olacak şekilde işletilmiştir. Deney düzenegin şematik gösterimi Şekil 3.3’de gösterilmiştir.



Şekil 3.3: 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

İO 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, %20 seyrelme oranlarında[26], PTFE-0,45 μm membran kullanılarak deniz suyu (60 °C)- distile su (30 °C) ΔT : 30 °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 ham deniz suyu, %20 oranında doğrudan distile su ile seyreltilmiş deniz suyu, İO prosesinde II. evsel arıtma çıkış suyu ve III. evsel arıtma çıkış 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
*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 akışı, 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.

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

3.8.2. Direkt Temas Membran Distilasyon Performans Hesaplamaları

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

$$J_w = \frac{1}{A} \cdot \frac{\Delta V}{\Delta t} \quad (3.4)$$

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 ölçümleri 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.

$$R(\%) = 100 \times \left(\frac{C_b - C_s}{C_b} \right) \quad (3.5)$$

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

4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

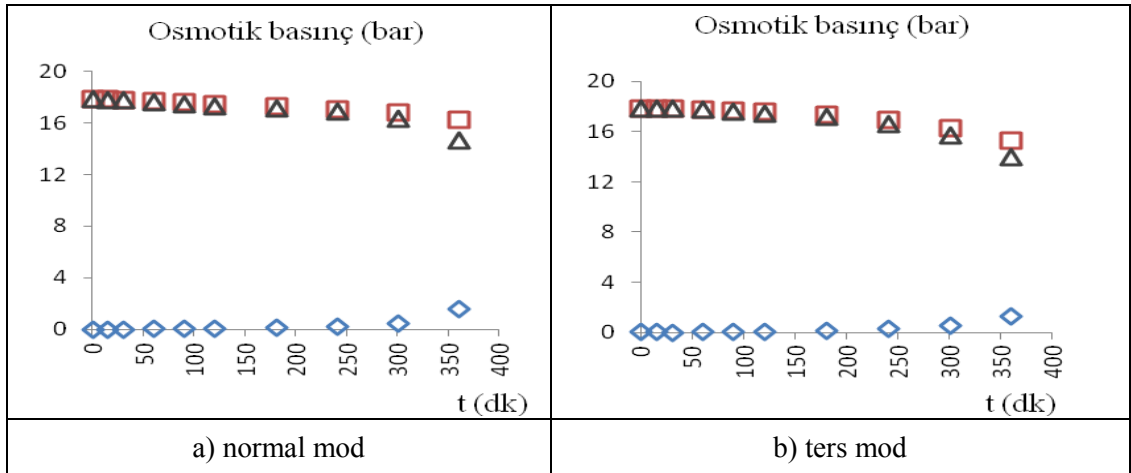
4.1. İleri Osmoz Prosesi Deneysel Çalışma Bulguları

Tekli İO deneyleri, 3 farklı besleme suyu için membran yerleşim modu, akış hızı ve sıcaklık etkisinin 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.



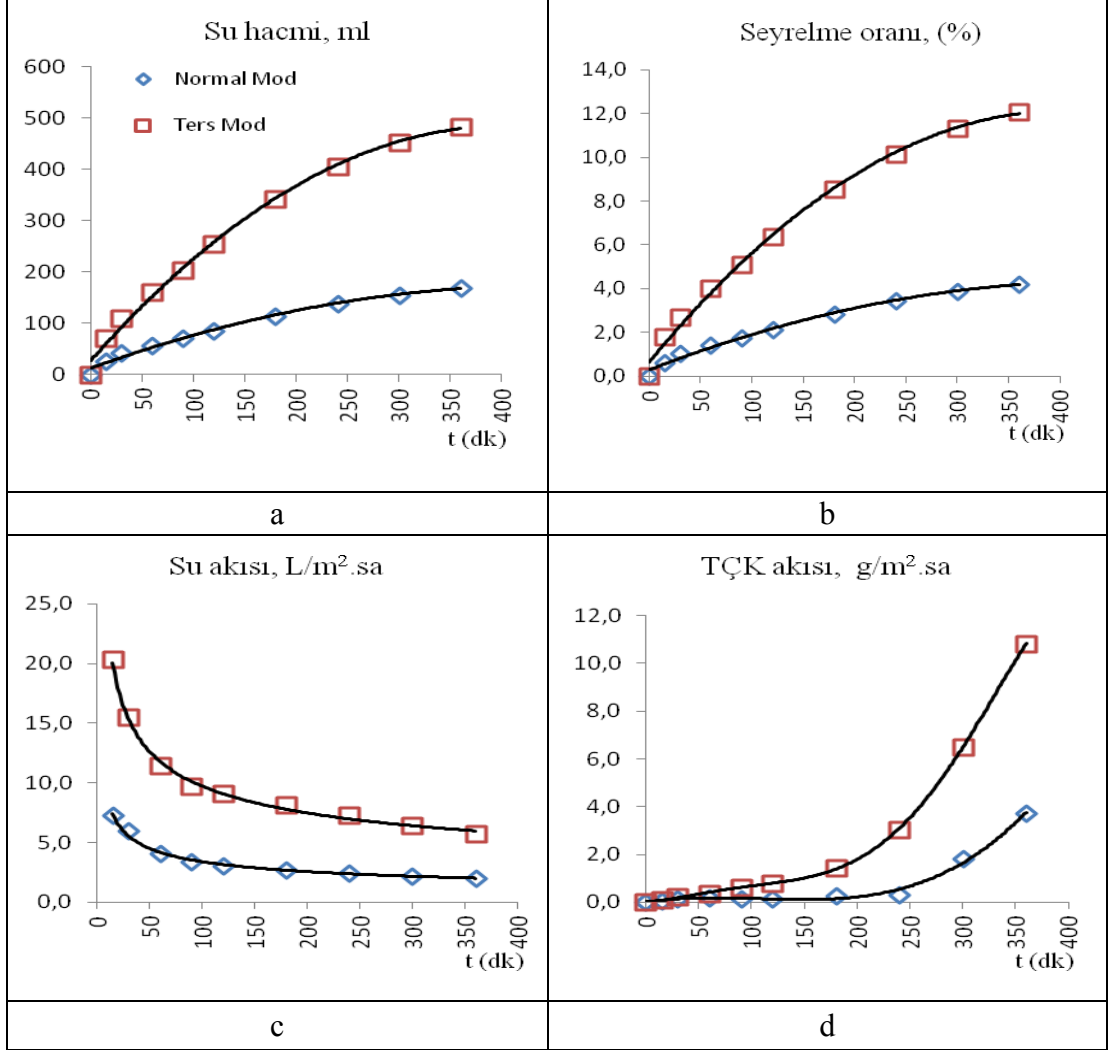
Şekil 4.1: İO prosesinde distile su kullanılarak deniz suyunun seyreltilmesinde membran işletme moduna bağlı olarak İO prosesinde sürücü kuvvet etkisinin zamanla değişimi. (akış hızı: 300 L/sa, sıcaklık: 25 °C, deney süresi: 6 saat) (Semboller ◇, □ ve Δ sırasıyla distile su, deniz suyu ve prosesteki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

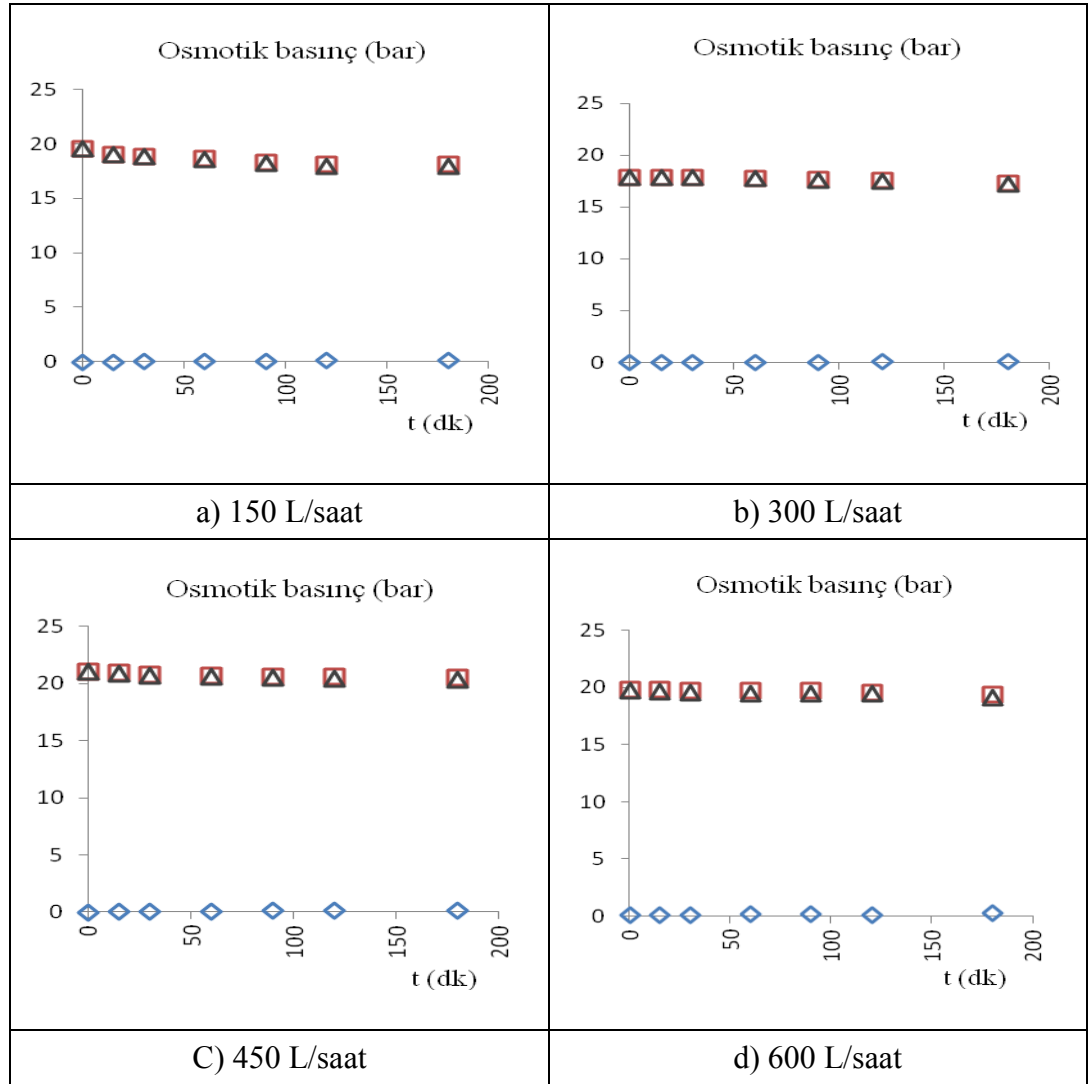
4.1.1.2. Akış Hızı

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.

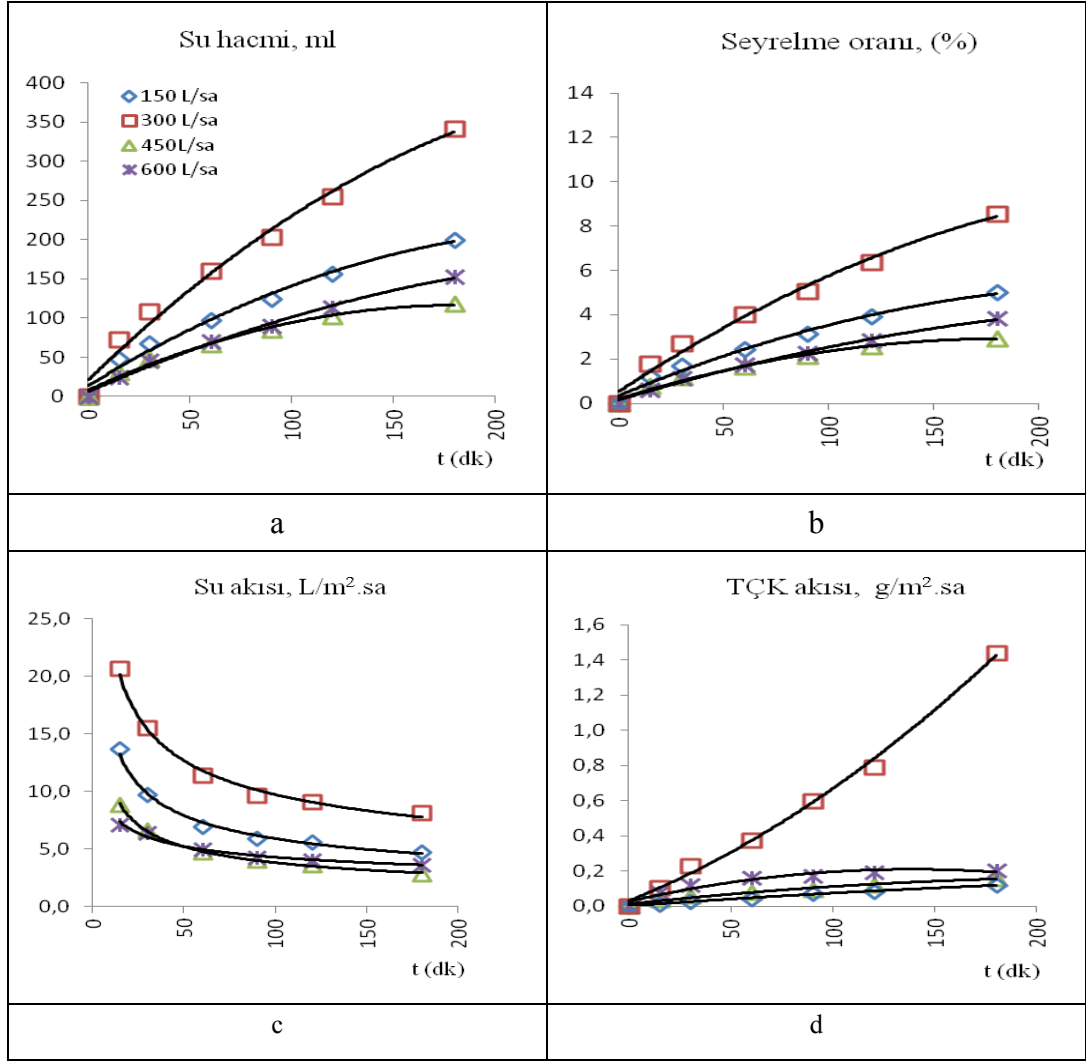
Akış hızına bağlı distile su ile deniz suyunun seyreltilmesi deneylerinde İO prosesi sürücü kuvveti olan net osmotik basınç farkının, deney süresi boyunca yaklaşık 18-21 bar'lık başlangıç değerlerinden, 18-20 bar'lar civarına çok az azaldığı görülmüştür. Çekme çözeltisi olan deniz suyundan besleme çözeltisi 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'ta 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'ta 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 $\diamond$, $\square$ ve Δ sırasıyla distile su, deniz suyu ve prostedeki 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 akışı ve d) tuz akışı. (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

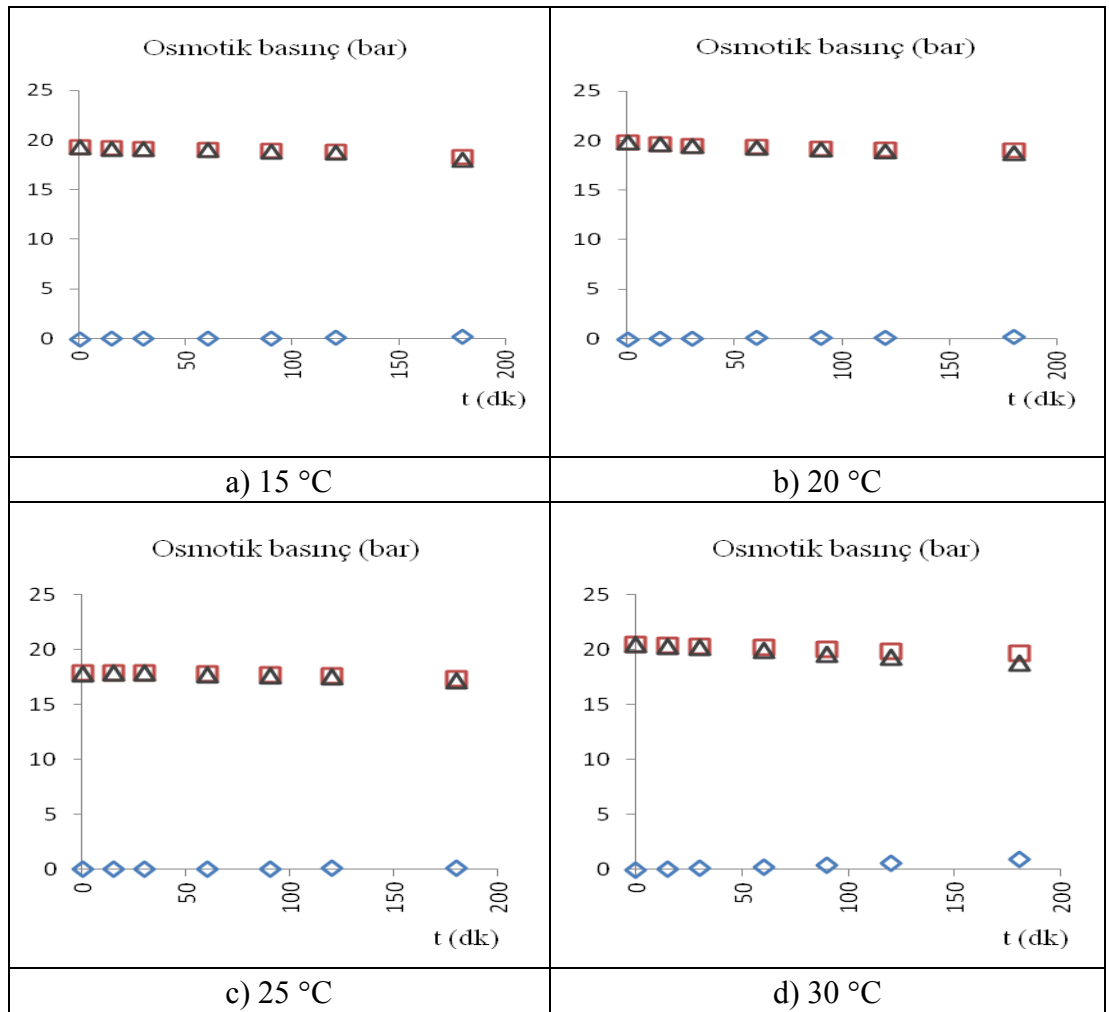
Distile su ile deniz suyunun seyreltilmesinde farklı akış hızlarında çalışılan deneyler süresince, su kalite parametreleri değişimlerinden aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır:

- 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 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 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.

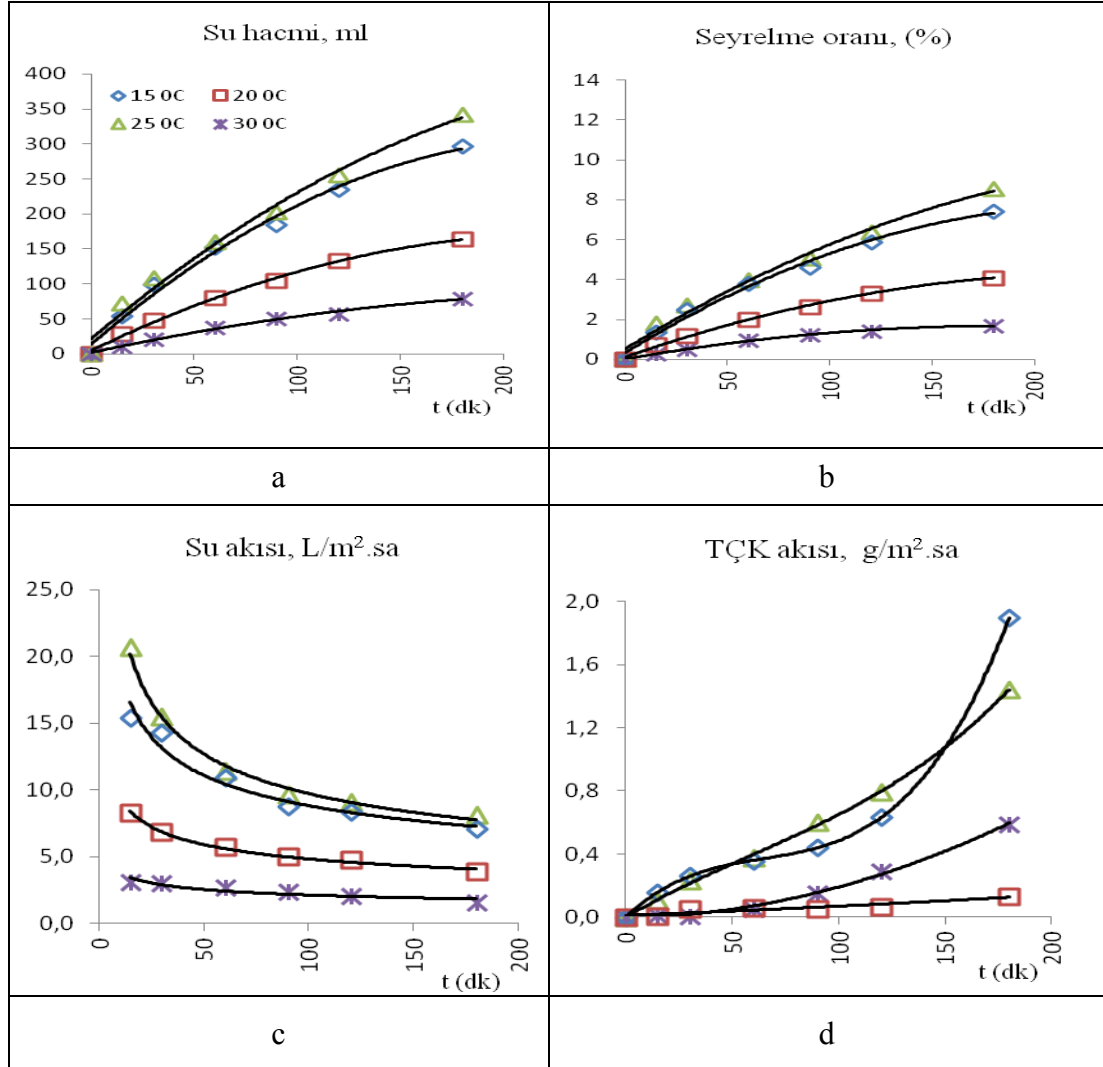
4.1.1.3. Sıcaklık

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 çözülmüş 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 gösterilmişti).

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

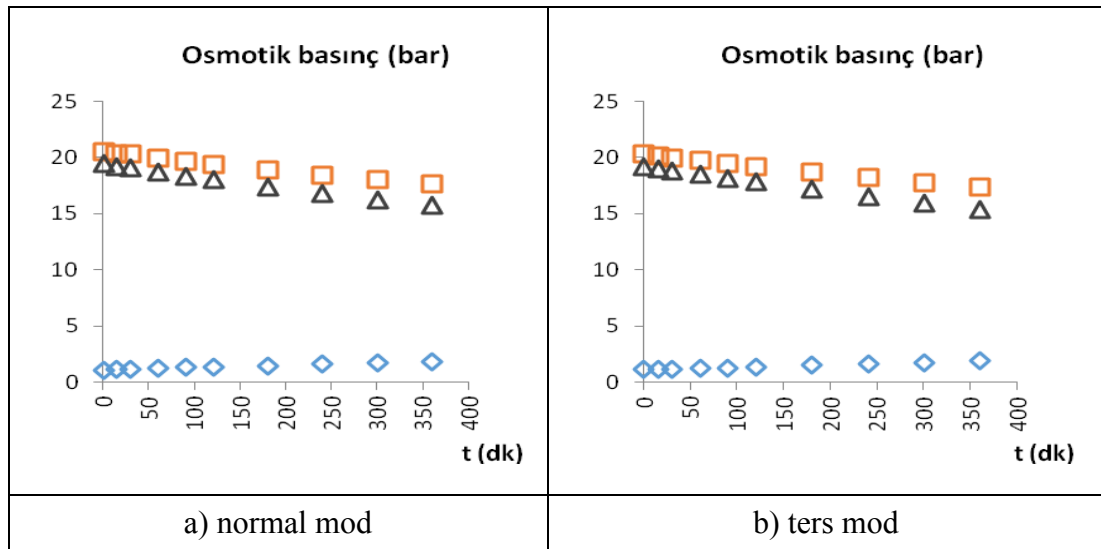
Bu sonuçlara göre, daha önce de ifade edildiği üzere, distile suda elektro-nötralite şartları ve deniz suyu pH'sının pek değişmemiş olması durumları çerçevesinde, önemli değişimler oluşmaksızın distile sudan deniz suyuna su taşınımının, hidronyum iyonu (H_3O^+) ağırlıklı su taşınımı şeklinde gerçekleştiği 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 $\mu S/cm$ ve 280 mg/L ile 88 $\mu S/cm$ 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.

4.1.2. II. Evsel Arıtma Çıkış Suyu Kullanılarak Deniz Suyunun Seyreltilmesi

4.1.2.1. Membran İşletme Modu

İÖ prosesinde II. evsel arıtma çıkış suyu kullanılarak deniz suyunun seyreltilmesi üzerine membran işletme modunun , işletme moduna bağlı besleme, çekme ve net (çekme-besleme) osmotik basınçların zamanla değişimleri Şekil 4.7’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 4.8’de gösterilmiştir.

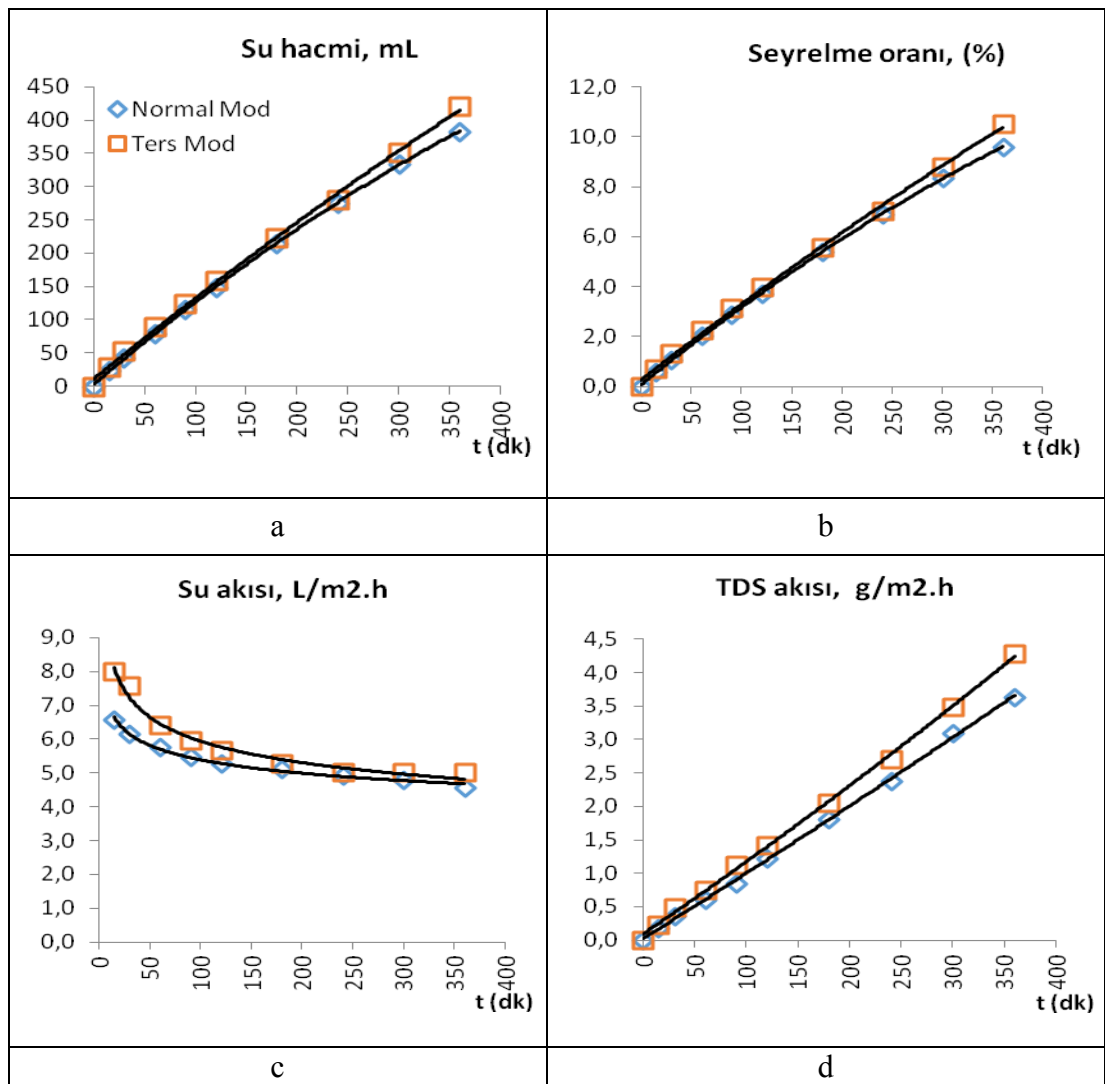


Şekil 4.7: İÖ prosesiyle II. evsel arıtma çıkış suyu kullanılarak deniz suyunun seyreltilmesinde membran işletme moduna bağlı olarak İÖ prosesinde sürücü kuvvet etkisinin zamanla değişimi (akış hızı: 300 L/sa, sıcaklık: 25 °C, deney süresi: 6 saat) (Semboller $\diamond$, $\square$ ve Δ sırasıyla II. evsel arıtma çıkış suyu, deniz suyu ve proses net osmotik basıncıdır).

İşletme moduna bağlı II. evsel arıtma çıkış suyu ile deniz suyunun seyreltilmesi deneylerinde İÖ prosesi sürücü kuvveti olan net osmotik basınç farkının, deney süresi boyunca yaklaşık 20 bar’lık başlangıç değerinden, normal ve ters mod işletimler neticesinde sırasıyla 15.8 ve 15.4 bar’lık yaklaşık eşit değerlere azaldığı görülmüştür. Bu durum, ters modda normal moda kıyasla, II. evsel arıtma çıkış suyundan deniz suyuna çok az daha fazla hacimde su taşınımına bağlı hacimsel

seyrelme etkisi ve ters yönde II. evsel arıtma çıkış suyuna doğru çözünmüş katı taşınımına bağlı olarak ortaya çıkmıştır.

Çekme çözeltisi olan deniz suyundan besleme çözeltisi olan II. evsel arıtma çıkış suyuna doğru, su taşınımına ters yönde gerçekleşen çözünmüş madde taşınımına bağlı olarak, zamanla beslemedeki osmotik basınç değerinde artış meydana gelmiştir. Her iki modda da yaklaşık 2 bara çıkan besleme çözeltisi osmotik basıncı değerlerine rağmen, prosesin sürekli işletim şartları için ihtiyaç duyacağı net basınç farkının 6 saatten daha uzun işletim şartları için de etkin olarak sürdürülebileceği görülmüştür.



Şekil 4.8: İO prosesinde II. evsel arıtma çıkış 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. (işletme şartları: akış hızı: 300 L/sa, sıcaklık: 25 °C, deney süresi: 6 saat).

II. evsel arıtma çıkış suyu ile deniz suyunun İO prosesinde seyreltilmesi sırasında elde edilen su geçişi, deniz suyu seyrelme oranı, su ve tuz akıları performansları ters modda biraz daha etkin olarak işletim sağlanabilir görülmüş olmasına rağmen, membran yerleşim modunun İO prosesinde deniz suyu seyreltme performansı üzerine çok da etkili olmadığı görülmüştür. II. evsel arıtma çıkış suyu bileşiminde bulunan inorganik ve özellikle organik kirleticilerin bu olumsuz etkide, membran içerisinde daha fazla kirlenmesine etki ederek katkı sağlamış olduğu tahmin edilmektedir.

360 dk sonunda normal ve ters modlar için sırasıyla yaklaşık 383 ve 421 mL'lik su geçişleri ile (distile suda 169 ve 483 mL gerçekleşmişti) başlangıç 4 L çekme çözeltisinin deney sonunda sırasıyla % 9.6 ve 10.5 seviyelerinde seyreltilmesi işlemleri gerçekleştirilmiştir. Normal modda, distile sudan 2 kattan daha fazla etkinlikte su geçiş hacmi elde edilmiş olmasına rağmen, ters modda distile su performansına kıyasla yaklaşık % 15'lik düşüş görülmüştür.

Sırasıyla 4.6 ve 5.0 L/m².sa deney sonu su akısı tespit edilen normal ve ters mod işletimlerinde (distile suda 2.0 ve 5.8 L/m².sa), çekmeden beslemeye geçen çözünmüş madde akılarının sırasıyla 3.6 ve 4.3 g/m².sa (distile suda bu değerler 3.7 ve 10.8 g/m².sa) literatür ortalamalarının (2-3 g/m².sa) az üzerinde değerlerde olduğu tespit edilmiştir. Normal mod için distile suya nazaran 2.3 kat artmış su akısına karşın, ters mod için su geçiş hacmi ile özdeş yaklaşık % 15 seviyesinde bir azalma söz konusu olmuştur.

Ters işletim modunun biraz daha iyi performans gözlenmiş ve deniz suyu seyrelmesi için temel olan proses su akıları itibarıyla 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 3 saat (180 dk) süresince yürütülmüştür.

Tablo 4.4: II. evsel arıtma çıkış 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			
		II. evsel arıtma Çıkış Suyu		Deniz Suyu		III. evsel arıtma Çıkış Suyu		Deniz Suyu	
		Deney Başı	Deney Sonu	Deney Başı	Deney Sonu	Deney Başı	Deney Sonu	Deney Başı	Deney Sonu
pH	-	8.01	8.18	8.07	8.11	8.28	8.32	7.98	8.30
Osmolalite	mosm/kg	46	76	817	702	47	78	807	692
Yoğunluk	g/cm ³	0.9977	0.9981	1.0174	1.0145	0.9979	0.9982	1.0172	1.014
İletkenlik	mS/cm	2.63	4.38	44.4	38.9	2.73	4.61	44.7	38.9
TÇK	g/L	1.341	2.28	27.6	23.6	1.391	2.41	27.9	23.9
Bulanıklık	NTU	1.65	1.98	0.36	0.57	3.20	1.78	0.50	1.25
Viskozite	mPa.s	1.01	1.03	1.12	1.10	1.07	1.14	1.21	1.18

II. evsel arıtma çıkış 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 ve sadece konsantrasyon farkı sürücü kuvvet etkisi altında tutulmak suretiyle, besleme ve çekme çözeltilerinde sabit (25±0.5 °C) izotermal şartlarda işletilmiştir.
- Normal modda deniz suyu pH'sı 8.1 civarında sabit kalırken besleme akımı pH'sı hidronyum iyonu (H₃O⁺) içerikli yapıda besleme suyunun deniz suyuna taşınımın etkisi altında 8'den 8.2'ye bir miktar artmıştır. Ters modda ise yaklaşık 8.3 civarında kalan besleme suyu pH'sına karşın 8'den 8.3'e artan bir değişim gözlenmiştir. Deniz suyundaki bu yönlü değişimin, besleme suyuna doğru olan çözülmüş madde taşınımı gerçekleştiği anlaşılmaktadır. Tüm değişimler göstermektedir ki, değişen işletim moduna rağmen besleme ve çekme çözeltilerinde yaklaşık aynı seviyelerde pH değerleri ile İO prosesi işletilebilmektedir.
- Deniz suyunun osmolalitesi, yoğunluğu, iletkenliği ve toplam çözülmüş katıları, II. evsel arıtma çıkış suyuna doğru çözülmüş madde taşınımı ve II. evsel arıtma

çıkış suyundan geçen su ile seyrelme sebebiyle, su ve tuz akılarına bağlı olarak deney süresince azalmıştır. Difüzyonal kütle taşınımı etkisi ters modda daha yüksek kaldığı için (daha yüksek deney sonu TDS akısı ve beslemede deney sonu için ölçülmüş daha yüksek iletkenlik ve TDS dolayısıyla) su geçişinin ve kütle taşınımının ortaklaşa etkisi altında olmak üzere ters modda belirgin olarak gerçekleşmiştir. Normal ve ters modda II. evsel arıtma çıkış suyundaki deney sonu iletkenlik ve TDS değerleri sırasıyla 4.4 mS/cm ve 2.3 g/L ile 4.6 mS/cm ve 2.4 g/L (distile su için 5.1 mS/cm ve 2.1 g/L ile 3.7 mS/cm ve 1.9 g/L idi) değerlerine ulaşmıştır.

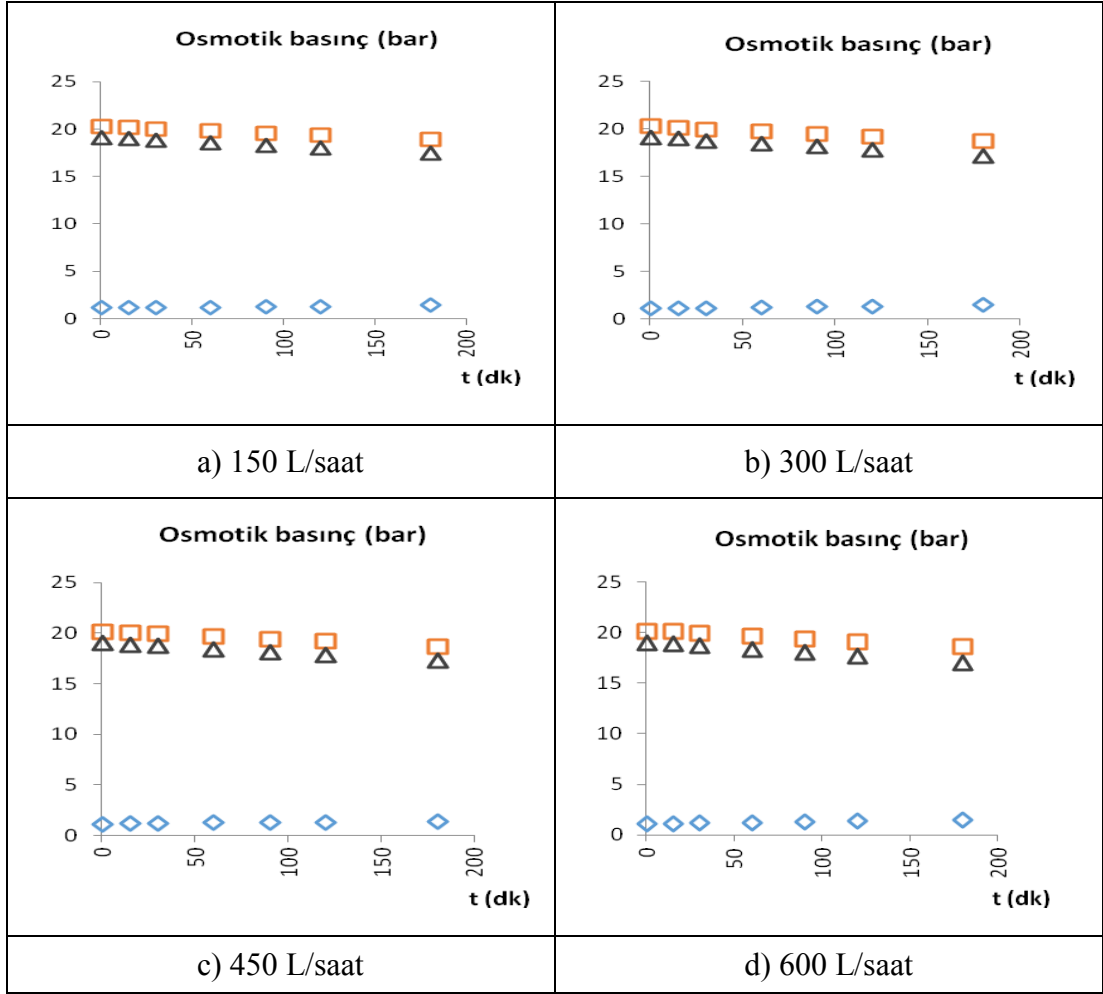
- Deniz suyunda başlangıçta 807-817 mmol/kg civarında olan deniz suyu osmolalitesi seyrelme ve kütle taşınımı etkileri altında 692-702 seviyelerine azalmışken, II. evsel arıtma çıkış suyu tarafında deney süresi sonunda normal ve ters modlar için osmolalite değerleri sırasıyla 76 ve 79 mmol/kg (başlangıç değeri 46 ve 47 mmol/kg) olarak belirlenmiştir.

- Deniz suyu viskozite değerlerinde her iki modda çok az miktarlarda azalma şeklinde değişim gözlenmiş olmakla birlikte; II. evsel arıtma çıkış suyunun viskozitesi ise her iki işletim modunda da konsantre olma etkisi altında zamanla bir miktar artma göstermiştir.

- Deniz suyunun bulanıklık değerinin, normal-ters mod ikilisi için 0.52-0.61 NTU başlangıç değerlerinden 0.56-1.05 değerlerine zamanla bir miktar arttığı görülmüştür. II. evsel arıtma çıkış suyu tarafında ise, 1.50-1.65 NTU başlangıç bulanıklık değerleri, deney sonunda 1.98-1.83 değerlerine bir miktar yükselmiştir. Deniz suyundaki bulanıklık artışının seyrelme etkisine karşın mikrobiyal üreme etkisi altında gerçekleştiği, II. evsel arıtma çıkış suyunda bulanıklık artışının ise konsantre olma etkisinin yanı sıra mikrobiyal üreme etkisi altında da gerçekleşmiş olabileceği tahmin edilmektedir.

4.1.2.2. Akış Hızı

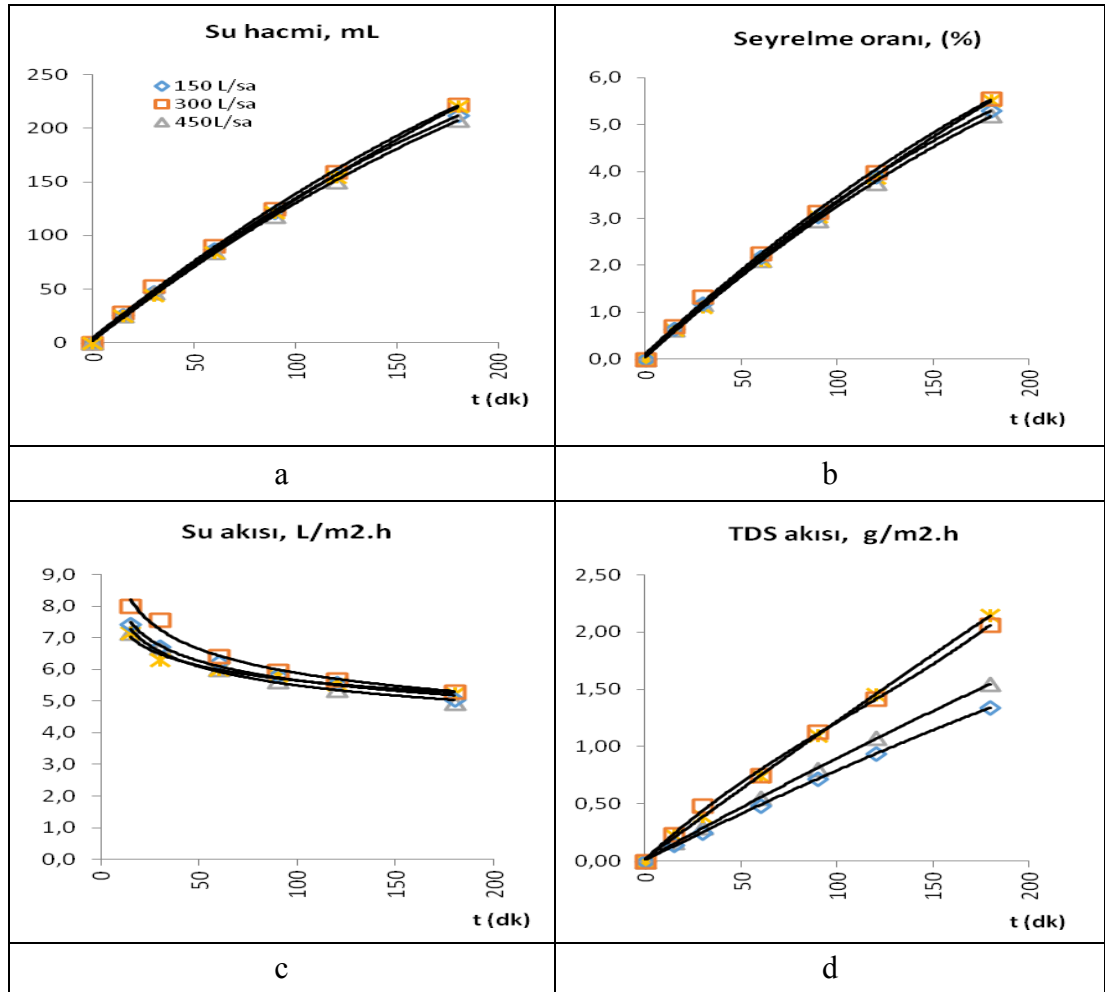
İO prosesinde II. evsel arıtma çıkış suyu kullanılarak deniz suyunun seyreltilmesi üzerine akış hızının, akış hızlarına bağlı besleme, çekme ve net (çekme-besleme) osmotik basınçların zamanla değişimleri Şekil 4.9'da gösterilmiştir.



Şekil 4.9: İO prosesiyle II. evsel arıtma çıkış 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 II. evsel arıtma çıkış suyu, deniz suyu ve prosesdeki net osmotik basınçtır).

Akış hızına bağlı II. evsel arıtma çıkış suyu ile deniz suyunun seyreltilmesi deneylerinde İO prosesi sürücü kuvveti olan net osmotik basınç farkının, deney süresi boyunca yaklaşık 19.0-19.2 bar'lık başlangıç değerinden, 17.1-17.5 bar civarına çok az seviyede azaldığı görülmüştür. Çekme çözeltisi olan deniz suyundan besleme çözeltisi olan II. evsel arıtma çıkış suyuna doğru, su taşınımına ters yönde gerçekleşen çözülmüş madde taşınımına bağlı olarak zamanla beslemedeki osmotik basınç değerinde, 3 saat süresince 1.4-1.6 bar'a (distile suda bu değer 0,2-0,3 bar) varan artışlar meydana geldiği tespit edilmiştir

Proses performansını ifade eden, çekme çözeltisine geçen su hacmi, çekme çözeltisinde hacimsel seyrelme oranı, su akısı ve tuz akısı parametrelerinin zamanla değişimleri Şekil 4.10'da gösterilmiştir.



Şekil 4.10: İO prosesinde II. evsel arıtma çıkış 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, II. evsel arıtma çıkış suyu ile deniz suyunun seyreltilmesi üzerine akış hızlarının çok da önemli etkisi olmadığı görülmüştür. Değişen akış hızı değerlerine rağmen, su geçişi, seyrelme oranı ile su ve tuz akısı parametrelerinde, belirgin farklılıklar gözlenmemiştir. Su geçiş hacmi, seyrelme oranı ve su akısı değerleri, azalan akış hızları sırasıyla 300,600,150 ve 450 L/sa (distile suda 300, 450,600 ve 150 L/sa) olarak tespit edilmiştir.

180 dk işletim sonunda su geçiş hacmi, çekme çözeltisi seyrelme oranı ve su akısı değerleri, 300 L/sa 'ta sırasıyla 222 mL, %5.6 ve 5.3 L/m².sa (distile su için 342 mL, %8.6 ve 8.1 L/m².sa) olarak belirlenmişken, en düşük performanslı 450 L/sa için bu değerler sırasıyla 208 mL, %5.2 ve 4.9 L/m².sa olarak tespit edilmiştir. 300 L/sa 'ta 2.1 g/m².sa (distile su için 1.4 g/m².sa) olan çözünmüş madde akısının, artan sırayla diğer üç akış hızı değerlerinde ise 1.3, 1.6 ve 2.1 g/m².sa artışında

gerçekleştirdiği görülmüştür. Bu sonuçlardan hareketle, sonraki adımda yer alan sıcaklık etkisinin araştırıldığı deneyler, distile su ile seyrelme deneylerinde olduğu gibi, hem deneysel çalışma şartları arasında benzeşim sağlamak hem de çok fazla farklılık bulunmamakla birlikte 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, sıcaklık, osmolalite, yoğunluk, iletkenlik, TDS (toplam çözünmüş katılar), bulanıklık ve viskozite) zamanla değişimleri ise, 150, 300, 450 ve 600 L/saat akış hızı değerleri için sırasıyla Şekil 4.5 kapsamında sunulmuştur.

II. evsel arıtma çıkış 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 sabit (25 ± 0.5 °C) sıcaklık değerinde (izotermal şartlarda) işletilmiştir.
- Deniz suyu pH'sı 8.0-8.1 civarında sabit kalmış, II. evsel arıtma çıkış suyu pH'sı ise değişen akış hızlarına rağmen her bir akış hızı için pH 8.0-8.3 aralığında belli değerlerde yaklaşık sabit değişimler göstermiştir.
- Her iki çözeltideki deney başı ve sonu pH değerlerinin, değişen akış hızı şartlarına nazaran birbirlerine yakın değerlerde seyreltmıştır.
- Deniz suyunun osmolalitesi, yoğunluğu, iletkenliği ve toplam çözünmüş katıları, II. evsel arıtma çıkış suyuna doğru çözünmüş madde taşınımı ve II. evsel arıtma çıkış suyundan geçen su ile seyrelme sebebiyle, su ve tuz akılarına bağlı olarak deney süresince farklı akış hızlarında azalmalar göstermiştir. Buna karşın, II. evsel arıtma çıkış suyuna deniz suyundan difüzyonal kütle taşınımı, II. evsel arıtma çıkış suyunda bu parametre değerlerinin bir miktar artmasına neden olmuştur. II. evsel arıtma çıkış suyundaki deney sonu en düşük ve en yüksek çözünmüş madde değerleri görülmüş 150 ve 600 L/sa akış hızları için iletkenlik ve TDS değerleri sırasıyla 3390 $\mu\text{S/cm}$ ve 1745 mg/L ile 3670 $\mu\text{S/cm}$ ve 1896 mg/L (başlangıçta 2750 $\mu\text{S/cm}$ ve 1401 mg/L) olarak tespit edilmiştir. En yüksek su geçişli 300 L/sa'ta bu değerler sırasıyla 3610 $\mu\text{S/cm}$ ve 1862 mg/L (distile suda 365 $\mu\text{S/cm}$ ve 171 mg/L) olarak gerçekleşmiştir.
- Deniz suyunda başlangıçta 801-807 mmol/kg aralığında olan deniz suyu osmolalitesi 740-755 mmol/kg değer aralığına azalmışken, II. evsel arıtma çıkış

suyunda 47 mmol/kg olan başlangıç osmolalitesi deney süresi sonunda 58-63 mmol/kg (distile suda 6-11 mmol/kg idi) değerine az bir miktar artış göstermiştir.

- Deniz suyu viskozite değerlerinde 300 L/sa'ta çok az yüksek seyrelme etkisi ile çok düşük azalma görülmüş (1.14 mPa.s'den 1.13 mPa.s'ye), diğer akış hızlarında deney başı sonu değişimler arasında önemli farklılıklar gözlenmemiştir. II. evsel arıtma çıkış suyu viskozite değerlerinin ise konsantre olma etkisi altında tüm akış hızlarında 0.1-0.2 mPa.s mertebesinde artışlar gösterdiği belirlenmiştir.

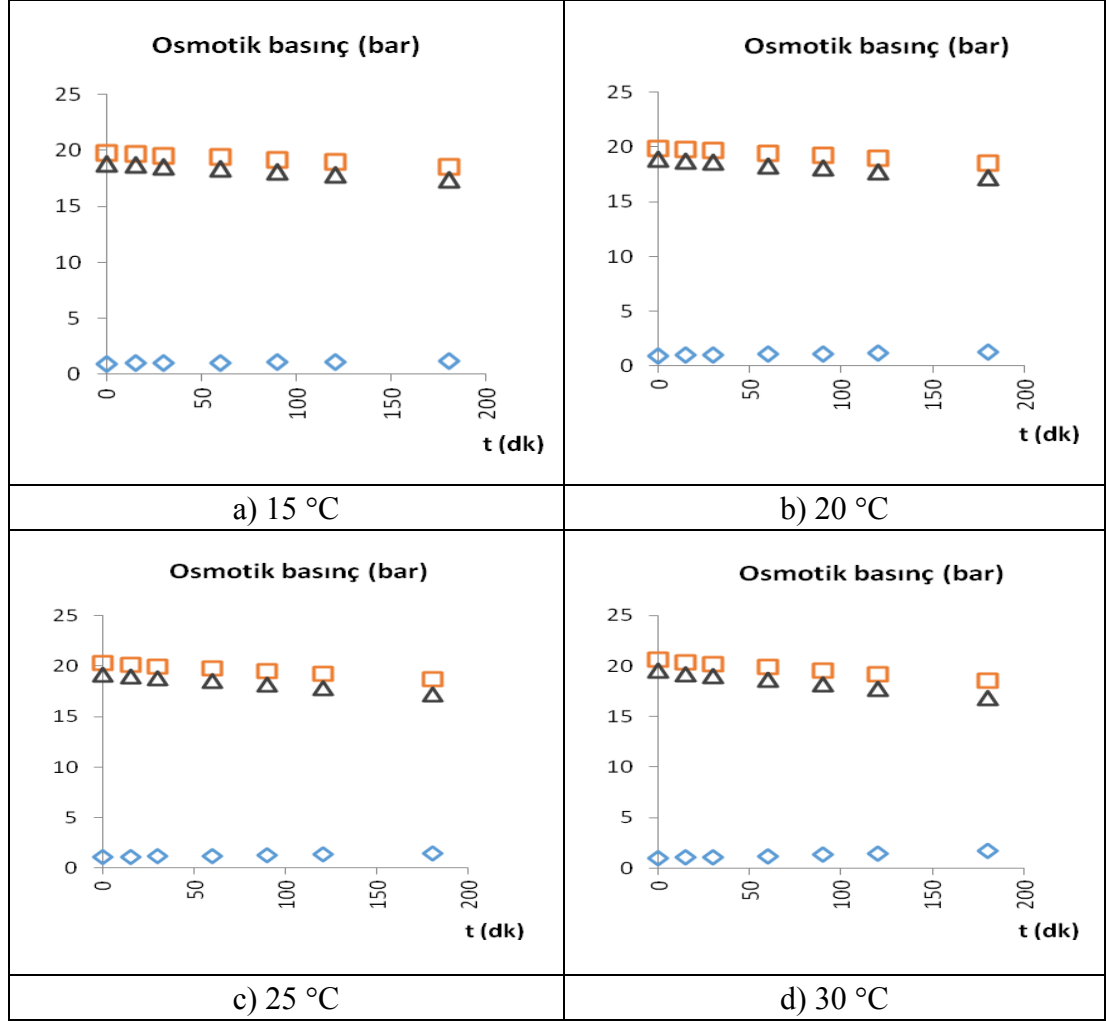
- Deniz suyunun bulanıklık değerinin 0.52-0.61 NTU başlangıç değerlerinden 0.79-0.89 deney sonu değerlerine tüm akış hızı deneylerinde seyrelmeye rağmen muhtemelen fitoplankton miktarındaki artışa dayalı olarak çok az arttığı gözlenmiştir. II. evsel arıtma çıkış suyu tarafında ise, 1.5-1.7 NTU başlangıç bulanıklık değerlerinin, deney sonunda 1.70-1.84 aralığına çok düşük bir miktarda yükseldiği tespit edilmiştir.

Tablo 4.5: II. evsel arıtma çıkış 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			
		II. evsel arıtma Çıkış Suyu		Deniz Suyu		II. evsel arıtma Çıkış Suyu		Deniz Suyu		II. evsel arıtma Çıkış Suyu		Deniz Suyu		II. evsel arıtma Çıkış 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	-	8.18	8.10	8.04	8.14	8.28	8.32	7.98	8.30	8.13	8.11	8.09	8.13	7.92	8.06	8.04	8.02
Osmolalite	mosm/kg	48	58	805	755	47	78	807	692	47	58	801	745	47	63	801	740
Yoğunluk	g/cm ³	0.9977	0.9978	1.0174	1.0156	0.9979	0.9982	1.0172	1.014	0.9977	0.9978	1.0169	1.0153	0.9977	0.9980	1.0169	1.0153
İletkenlik	mS/cm	2.75	3.39	44.5	42.0	2.73	4.61	44.7	38.9	2.73	3.46	44.4	41.4	2.75	3.67	44.6	41.4
TÇK	g/L	1.401	1.745	27.9	26.0	1.391	2.41	27.9	23.9	1.396	1.785	27.7	25.8	1.405	1.896	27.8	25.7
Bulanıklık	NTU	4.75	5.00	0.76	1.50	3.20	1.78	0.50	1.25	5.07	6.22	0.82	1.35	4.23	4.52	0.53	1.24
Viskozite	mPa.s	1.15	1.14	1.27	1.28	1.07	1.14	1.21	1.18	1.15	1.14	1.31	1.25	1.11	1.20	1.27	1.28

4.1.2.3. Sıcaklık

İO prosesinde II. evsel arıtma çıkış 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 4.11’de gösterilmiştir.

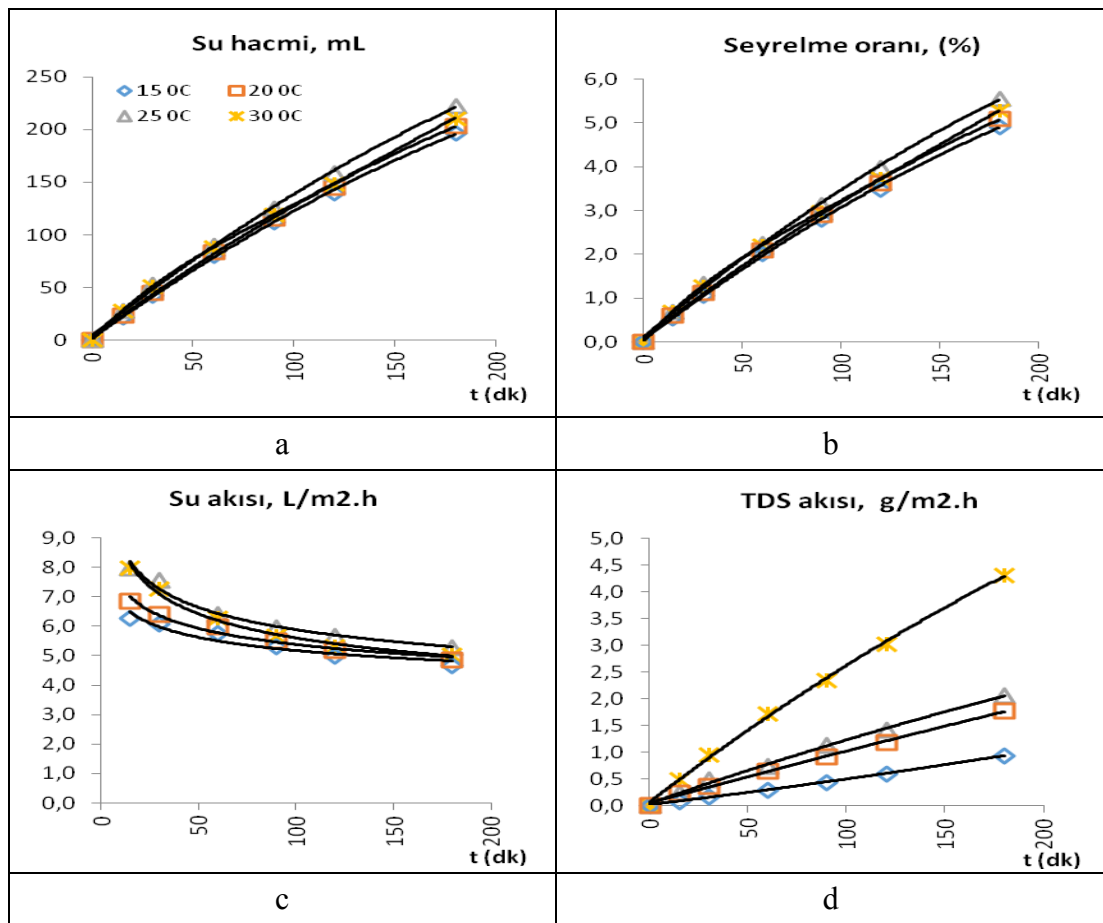


Şekil 4.11: İO prosesiyle II. evsel arıtma çıkış suyu kullanılarak deniz suyunun seyreltilmesinde sıcaklığa bağlı olarak İO prosesinde sürücü kuvvet etkisinin zamanla değişimi (membran yerleşimi: ters mod, akış hızı: 300 L/sa, deney süresi: 3 saat) (Semboller ◇, □ ve Δ sırasıyla II.evsel arıtma çıkış suyu, deniz suyu ve prostedeki net osmotik basınçtır).

Sıcaklığa bağlı II. evsel arıtma çıkış suyu ile deniz suyunun seyreltilmesi deneylerinde İO prosesi sürücü kuvveti olan net osmotik basınç farkının, deney süresi boyunca yaklaşık 18.8-19.6 bar’lık başlangıç değerlerinden, 17 bar’lar civarına

azaldığı görülmüştür. Çekme çözeltisinden besleme çözeltisine doğru gerçekleşen çözünmüş madde taşınımına bağlı olarak, 3 saat zarfında 1.2-1.7 bar (başlangıç değeri 1.0-1.2 bar aralığında olup, distile su için 3 saat zarfında bulunmuş değer 0.2-0.9 bar aralığında idi) değerlerine ulaştığı tespit edilmiştir. Buna göre, değişen sıcaklık işletme şartlarına rağmen prosesin başlangıç aşamasındaki sürücü kuvvete yakın bir kuvvet etkisi altında sürdürülebildiği söylenebilir.

Proses performansını ifade eden, çekme çözeltisine geçen su hacmi, çekme çözeltisinde hacimsel seyrelme oranı, su akısı ve tuz akısı parametrelerinin zamanla değişimleri Şekil 4.12’de gösterilmiştir.



Şekil 4.12: İO prosesinde II. evsel arıtma çıkış 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 II. evsel arıtma çıkış suyu ile deniz suyunun seyreltilmesi üzerine sıcaklık etkisinin, akış hızında olduğu gibi çok da belirleyici bir unsur olmadığı görülmüştür. Distile suya kıyasla II. evsel arıtma çıkış suyu ile çok daha

düşük performansla işletilebilen İO prosesinde; su geçiş hacmi, seyrelme oranı ve su akısı değerlerinin, çok küçük farklarda olmak üzere azalan sırayla 25, 30, 20 ve 15 °C sıcaklıklarda (distile suda 25, 15, 20 ve 30 °C) meydana geldiği tespit edilmiştir.

180 dk proses işletim süresi sonunda su geçiş hacmi, çekme seyrelme oranı ve su akısı değerleri, 25 °C sıcaklıkta sırasıyla 222 mL, % 5.6 ve 5.3 L/m².sa (distile su için 342 mL, % 8.6 ve 8.1 L/m².sa) olarak belirlenmişken, en düşük performanslı 15 °C sıcaklık için bu değerler sırasıyla 197 mL, % 4.9 ve 4.7 L/m².sa (distile su için 79 mL, % 1.7 ve 1.6 L/m².sa) olarak tespit edilmiştir. Bu sonuçlar, farklı sıcaklıkların etkisi altında İO prosesinde deniz suyunu seyreltme performansının, II. evsel arıtma çıkış suyu kullanılması durumunda distile suya nazaran daha düşük seviyede gerçekleştirildiğini açıkça göstermektedir.

25 °C sıcaklıkta 2.1 g/m².sa (distile su için 1.4 g/m².sa) olan çözünmüş madde akısı, 15 °C sıcaklıkta 0.9 g/m².sa (distile su için 1.9 g/m².sa), 20 ve 30 °C sıcaklıklarda ise sırasıyla 1.8 ve 4.3 g/m².sa (distile su için sırasıyla 0.1 ve 0.6 g/m².sa) olarak sıcaklıkta artmış olarak değişim göstermiştir.

Deney süresince izlenen besleme ve çekme çözeltileri su kalite parametrelerinin (pH, sıcaklık, osmolalite, yoğunluk, iletkenlik, TDS (toplam çözünmüş katılar), bulanıklık ve viskozite) zamanla değişimleri ise, 15, 20, 25, 30 °C sıcaklık değerleri için sırasıyla Tablo 4.6 kapsamında sunulmuştur.

II. evsel arıtma çıkış 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 ± 0.5 °C ile istenen sıcaklık değeri (25°C) altında deneysel çalışmalar yürütülmüştür.
- Deniz suyunda pH değeri, 8.0-8.3 aralığında çalışılan sıcaklıklarda yaklaşık sabit bir değer boyunca değişim göstermiştir. II. evsel arıtma çıkış suyu pH'sı ise 25 ve 30 °C sıcaklıklarda sırasıyla 8.3 ve 7.5 civarlarında sabit kalmış, 15 ve 20 °C sıcaklıklarda ise sırasıyla 7.2 ve 7.4 başlangıç değerlerinden 7.6 deney sonu değerine bir miktar artmıştır. Proseste deniz suyu tarafına geçen su miktarının düşük olmasına bağlı düşük proses etkinliği, rölatif olarak düşük sıcaklıklarda hidronyum iyonu (H₃O⁺) içerikli bir taşınım görülebilmekte iken, rölatif olarak yüksek sıcaklıklarda proseste su taşınımının hidronyum iyonu (H₃O⁺) değil de su

molekülleri (H₂O) ağırlıklı gerçekleştiğini ve çözelti pH'larının pek değişmediği sonucunu ortaya koymaktadır.

- Deniz suyunun osmolalitesi, yoğunluğu, iletkenliği ve toplam çözünmüş katıları, II. evsel arıtma çıkış suyuna doğru çözünmüş madde taşınımı ve II. evsel arıtma çıkış suyundan geçen su ile deniz suyunun seyrelmesi sebebiyle, su ve tuz akılarına bağlı olarak deney süresince düşük seviyelerde azalmıştır. Buna karşın, II. evsel arıtma çıkış suyuna deniz suyundan difüzyonal kütle taşınımı, II. evsel arıtma çıkış suyunda bu parametre değerlerinin artmasına neden olmuştur. II. evsel arıtma çıkış suyunda deney sonu en yüksek ve en düşük çözünmüş madde değerleri görülmüş 30 ve 15 °C sıcaklıklar için iletkenlik ve TDS değerleri sırasıyla 4340 µS/cm ve 2270 mg/L ile 3040 µS/cm ve 1550 mg/L (başlangıç değerleri olarak sırasıyla 2620 µS/cm ve 1336 mg/L ile 2520 µS/cm ve 1283 mg/L) olarak ölçülmüştür. 25 °C sıcaklık için bu değerler 3610 µS/cm ve 1862 mg/L (II. evsel arıtma çıkış suyunda başlangıç değerleri sırasıyla 2730 µS/cm ve 1391 mg/L olup, distile suda 25 °C için 365 µS/cm ve 171 mg/L idi) olarak tespit edilmiştir.

- Deniz suyunda başlangıçta 803-813 mmol/kg aralığında olan deniz suyu osmolalitesi 745-764 mmol/kg aralığına azalmışken, II. evsel arıtma çıkış suyunda 41-47 mmol/kg olan başlangıç osmolalitesi deney süresi sonunda 51-69 mmol/kg (distile suda 6-37 mmol/kg idi) değerine artmıştır.

- Seyrelme etkisi altında, deney süresince 15 °C hariç deniz suyunun viskozite değerlerinde zamanla çok düşük azalmalar meydana gelmiş olmakla birlikte 15 °C'de deniz suyu viskozitesine eşdeğer seviyeye önemli bir azalma gözlenmiştir. Deney sonunda başlangıç değerine göre pek değişme görülmemiş 20 °C sıcaklık değeri hariç II. evsel arıtma çıkış suyunun viskozite değerlerinde konsantre olma etkisi altında çok düşük miktarlarda artışlar gözlenmiş olup bu sıcaklıklarda da, genel olarak, sıcaklıkla deney başı ve sonu değerleri arasında önemli farklılıklar gözlenmemiştir.

- Tüm sıcaklık deneylerinde, deniz suyunun bulanıklık değerinin seyrelme etkisine rağmen muhtemelen deniz suyunun içerdiği fitoplankton tür ve/veya sayısındaki artışlar sebebiyle 0.48-0.61 NTU başlangıç değerlerinden 0.52-0.82 değerlerine bir miktar arttığı, II. evsel arıtma çıkış suyunun bulanıklık değerinin

de 1.5-1.7 NTU başlangıç değerlerinden 1.6-1.9 deney sonu değerlerine konsantre olma etkisi altında bir miktar arttığı tespit edilmiştir.

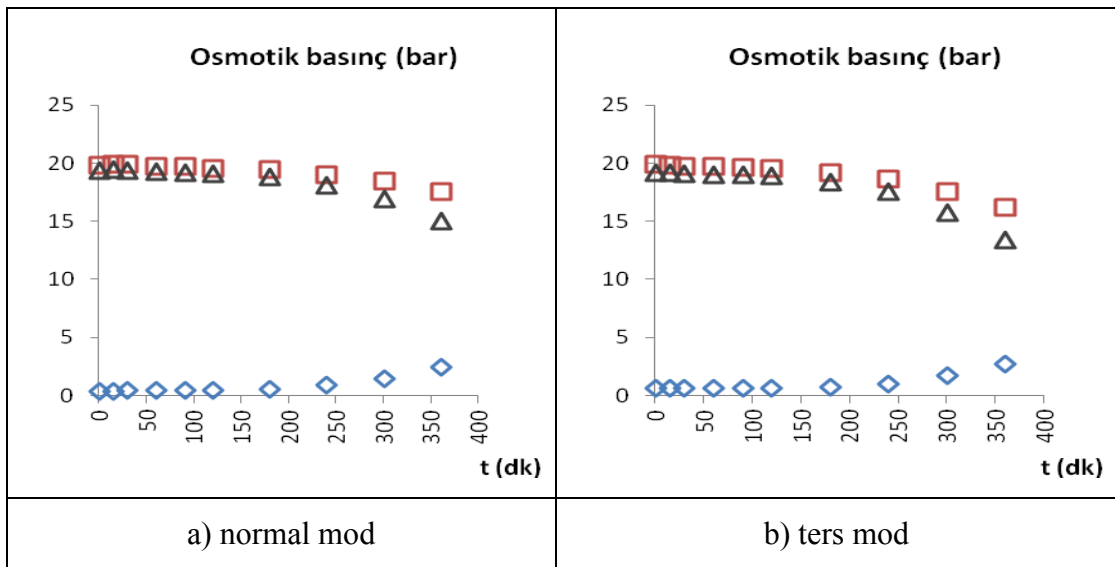
Tablo 4.6: II. evsel arıtma çıkış suyu kullanılarak deniz suyunun seyreltilmesinde 15, 20, 25 ve 30 °C 'de işletilen İO prosesinin performansı (membran yerleşimi: ters mod, akış hızı: 300 L/sa, hacim: 4L, deney süresi: 3 saat).

Parametre	Birim	15 °C				20 °C				25 °C				30 °C			
		II. evsel arıtma Çıkış Suyu		Deniz Suyu		II. evsel arıtma Çıkış Suyu		Deniz Suyu		II. evsel arıtma Çıkış Suyu		Deniz Suyu		II. evsel arıtma Çıkış 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	-	7.41	7.56	8.28	8.21	7.23	7.50	8.28	8.23	8.28	8.32	7.98	8.30	7.50	7.48	8.18	8.15
Osmolalite	mosm/kg	42	51	813	764	41	55	803	751	47	78	807	692	43	69	808	729
Yoğunluk	g/cm ³	0.9992	0.9993	1.0192	1.0177	0.9985	0.9988	1.0181	1.0166	0.9979	0.9982	1.0172	1.014	0.9964	0.9966	1.0157	1.0140
İletkenlik	mS/cm	2.52	3.04	42.9	40.5	2.55	3.36	44.0	41.5	2.73	4.61	44.7	38.9	2.62	4.34	45.0	41.5
TÇK	g/L	1.283	1.55	26.6	25.0	1.296	1.73	27.4	25.5	1.391	2.41	27.9	23.9	1.336	2.27	27.8	25.6
Bulanıklık	NTU	2.67	2.99	0.51	0.59	1.24	1.54	0.52	0.33	3.20	1.78	0.50	1.25	1.47	1.45	0.21	0.34
Viskozite	mPa.s	2.78	1.40	1.68	1.41	1.26	1.25	1.37	1.35	1.07	1.14	1.21	1.18	1.01	1.05	1.12	1.14

4.1.3. III. Evsel Arıtma Çıkış Suyu Kullanılarak Deniz Suyunun Seyreltilmesi

4.1.3.1. Membran İşletme Modu

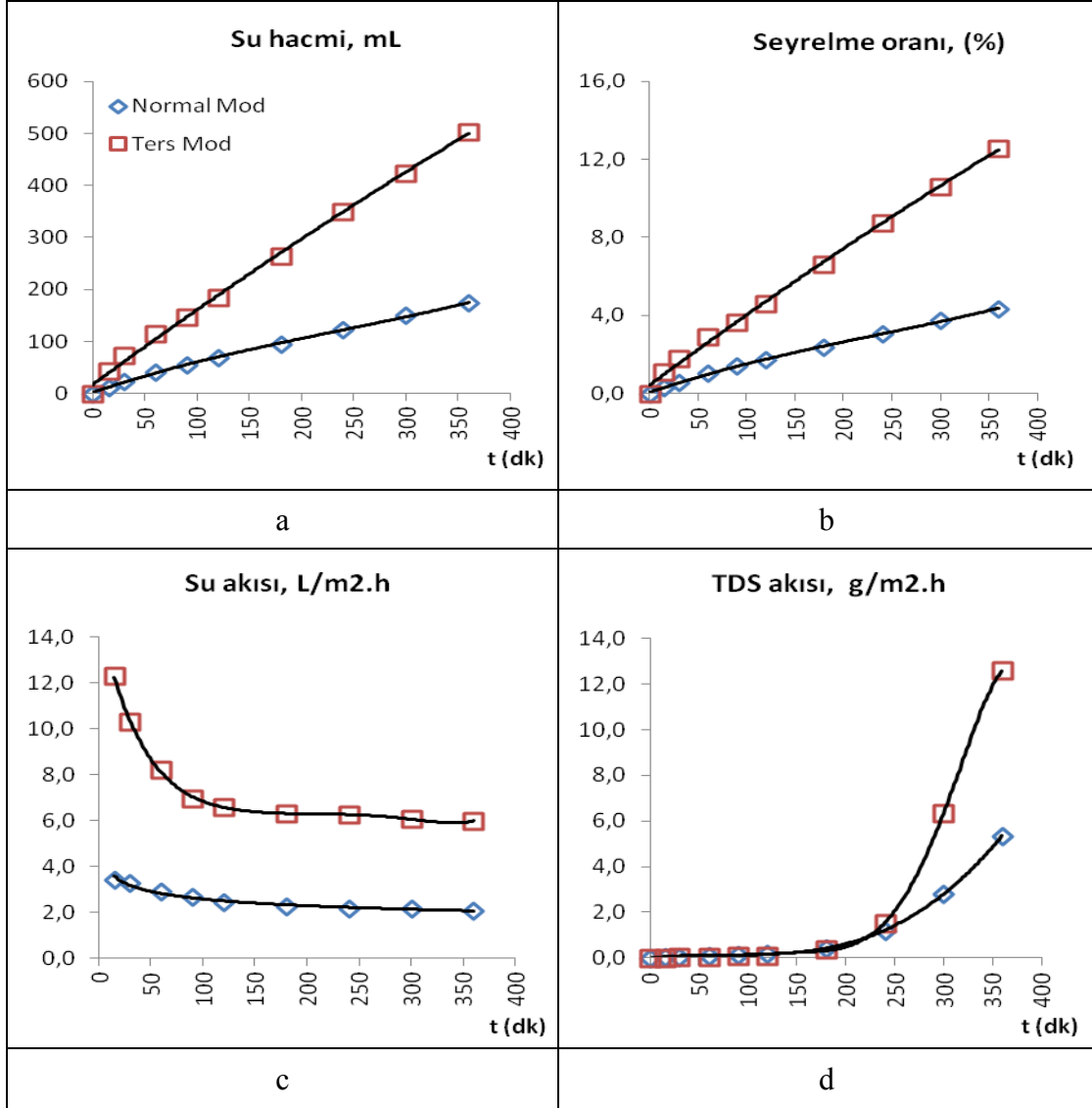
İÖ prosesinde III. evsel arıtma çıkış suyu kullanılarak deniz suyunun seyreltilmesi üzerine membran işletme modunun etkisi kapsamında elde edilmiş, işletme moduna bağlı besleme, çekme ve net (çekme-besleme) osmotik basınçların zamanla değişimleri Şekil 4.13’da gösterilmiştir.



Şekil 4.13: İÖ prosesiyle III. evsel arıtma çıkış suyu kullanılarak deniz suyunun seyreltilmesinde membran işletme moduna bağlı olarak İÖ prosesinde sürücü kuvvet etkisinin zamanla değişimi (akış hızı: 300 L/sa, sıcaklık: 25 °C, deney süresi: 6 saat) (Semboller ◇, □ ve Δ sırasıyla, III. evsel arıtma çıkış suyu, deniz suyu ve prosesteki net osmotik basınçtır).

İşletme moduna bağlı III. evsel arıtma çıkış suyu ile deniz suyunun seyreltilmesi deneylerinde net osmotik basınç farkının, deney süresi boyunca yaklaşık 19 bar başlangıç değerinden, normal ve ters mod işletimler neticesinde sırasıyla 15.1 ve 13.4 bar’lık değerlere azaldığı tespit edilmiştir. Bu durum, ters modda normal moda kıyasla, III. evsel arıtma çıkış suyundan deniz suyuna çok az daha fazla hacimde su taşınımına bağlı hacimsel seyrelme etkisi ve ters yönde III. evsel arıtma çıkış suyuna doğru çözünmüş katı taşınımına bağlı ortaya çıkmıştır.

Proses performansını ifade eden, çekme çözeltisine geçen su hacmi, çekme çözeltisinde hacimsel seyrelme oranı, su akısı ve tuz akısı parametrelerinin zamanla değişimleri Şekil 4.14 'de gösterilmiştir.



Şekil 4.14: İO prosesinde III. evsel arıtma çıkış 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).

Çekme çözeltisi olan deniz suyundan besleme çözeltisi olan III. evsel arıtma çıkış suyuna doğru, su taşınımına ters yönde gerçekleşen çözülmüş madde taşınımına bağlı olarak, zamanla beslemedeki osmotik basınç değerinde artış meydana gelmiştir. Her iki modda da 0.4-0.6 aralığındaki başlangıç besleme çözeltisi osmotik basıncının deney sonunda yaklaşık 2.5-2.8 bar seviyelerine çıkmasına

rağmen, prosesin sürekli işletim şartları için ihtiyaç duyacağı net basınç farkının 6 saatten daha uzun işletim şartları için de sürdürülebileceği görülmüştür. Zamana bağlı osmotik basınç değişimlerine göre prosesin azami 12-14 saatlik sürekli işletimde sürdürülebileceği tahmin edilmektedir. Sürekli denemelerde arttırılması planlanan besleme ve çekme çözeltileri hacimlerinde (10-40 L), çekmede daha uzun sürelerde aynı seyrelme etkisinin gerçekleştirilebileceği dikkate alınarak, prosesin günlük ardışık periyotlarda sürekli işletilebileceği ön görülmektedir.

II. evsel arıtma çıkış suyu ile deniz suyunun seyreltilmesi sırasında farklı membran yerleşim modlarında proses performansının birbirlerine yakın seyrettiği belirlenmiş olmasına rağmen, III. evsel arıtma çıkış suyu ile deniz suyunun seyreltilmesi sırasında elde edilen su geçişi, deniz suyu seyrelme oranı, su ve tuz akıları performansları ters modda biraz daha etkin olarak işletim sağlanabileceğini göstermiştir. 360 dk sonunda normal ve ters modlar için sırasıyla yaklaşık 174 ve 503 mL'lik su geçişleri ile (distile suda 169 ve 483 mL ve II. evsel arıtma çıkış suyunda 383 ve 421 mL gerçekleşmişti) başlangıç 4 L çekme çözeltisinin deney sonunda sırasıyla % 4.3 ve 12.6 seviyelerinde seyreltilmesi işlemleri gerçekleştirilmiştir. Her iki modda da distile su ile aynı etkinlikte su geçiş hacmi elde edilmiş olmasına rağmen, II. evsel arıtma çıkış suyuna nazaran ters modda daha iyi su geçiş performansı gözlenmiştir. Sırasıyla 2.1 ve 5.4 L/m².sa deney sonu su akısı tespit edilen normal ve ters mod işletimlerinde (distile suda 2.0 ve 5.8 L/m².sa, II. evsel arıtma çıkış suyunda 4.6 ve 5.0 L/m².sa), çekmeden beslemeye geçen çözünmüş madde akılarının sırasıyla 5.4 ve 12.6 g/m².sa (distile suda bu değerler 3.7 ve 10.8 g/m².sa, II. evsel arıtma çıkış suyunda ise 3.6 ve 4.3 g/m².sa idi) gibi yüksek değerlere çıktığı tespit edilmiştir. Su akısı bakımından distile suya göre biraz daha düşük ancak II. evsel arıtma çıkış suyundan biraz daha yüksek performans dikkat çekicidir. Atıksu kaynağında artan inorganik ve organik kirletici yükünün, İO performansında su akısını azaltıcı, buna karşılık tuz akısını arttırıcı etkisinin olduğu anlaşılmaktadır. Ters işletim modunun biraz daha iyi performans sağlamış ve deniz suyu seyrelmesi için temel gösterge olan proses su akıları itibarıyla 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 3 saat (180 dk) süresince yürütülmüştür.

Tablo 4.7: III. evsel arıtma çıkış 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			
		III. evsel arıtma çıkış suyu		Deniz Suyu		III. evsel arıtma çıkış suyu		Deniz Suyu	
		Deney Başı	Deney Sonu	Deney Başı	Deney Sonu	Deney Başı	Deney Sonu	Deney Başı	Deney Sonu
pH	-	7.79	8.60	7.86	8.06	7.94	8.19	8.01	8.04
Osmolalite	mosm/kg	18	102	789	700	26	112	790	646
Yoğunluk	g/cm ³	0.9977	0.9996	1.0174	1.0148	0.9974	0.9997	1.0169	35.2
İletkenlik	mS/cm	0.993	5.87	43.1	37.7	1.442	6.68	43.3	21.3
TÇK	g/L	0.489	3.10	26.9	23.1	0.718	3.57	26.8	1.0135
Bulanıklık	NTU	0.45	0.50	0.47	1.48	1.37	1.95	0.64	0.90
Viskozite	mPa.s	0.98	0.94	0.97	0.98	0.90	0.91	0.99	0.97

III. evsel arıtma çıkış suyu ile deniz suyunun normal ve ters modda işletimindeki deneyler süresince, izlenmiş su kalite parametreleri değişimlerinden aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır:

- Proses, konsantrasyon farkı sürücü kuvvet etkisi altında tutulmak suretiyle, besleme ve çekme çözeltilerinde sabit (25±0.5 °C) izotermal şartlarda işletilmiştir. Ters modda deniz suyu pH'sı 8.0 civarında sabit kalırken besleme akımı pH'sı hidronyum iyonu (H₃O⁺) içerikli yapıda besleme suyunun deniz suyuna taşınımın etkisi altında 8'den 8.3 civarına artmıştır. Normal modda ise besleme ve çekme akımları pH'larında sırasıyla 7.8 ve 7.9 değerlerinden, 8.6 ve 8.1 değerlerine artış gözlenmiştir. Normal modda çözeltilerde artış yönlü pH değişimlerinden, sadece beslemeden deniz suyuna su geçişinin değil aynı zamanda deniz suyundan besleme suyuna doğru olan çözünmüş madde taşınımının sorumlu olduğu anlaşılmaktadır. Her iki çözeltide elektro-nötrallite dengesi içerisinde, beslemeden deniz suyuna hidronyum taşınımına karşı deniz suyundan beslemeye kütle taşınımının pozitif tek yüklü iyonlar itibariyle olmaktadır.
- Deniz suyunun osmolalitesi, yoğunluğu, iletkenliği ve toplam çözünmüş katıları, III. evsel arıtma çıkış suyuna doğru çözünmüş madde taşınımı ve geçen su ile

seyrelme sebebiyle, su ve tuz akılarına bağılı olarak deney süresince azalmıştır. Difüzyonal kütle taşınımı etkisi ters modda daha yüksek kaldığı için (daha yüksek deney sonu TDS akısı ve beslemede deney sonu için ölçülmüş daha yüksek iletkenlik ve TDS dolayısıyla) su geçişinin ve kütle taşınımının ortaklaşa etkisi altında olmak üzere ters modda belirgin olarak gerçekleşmiştir.

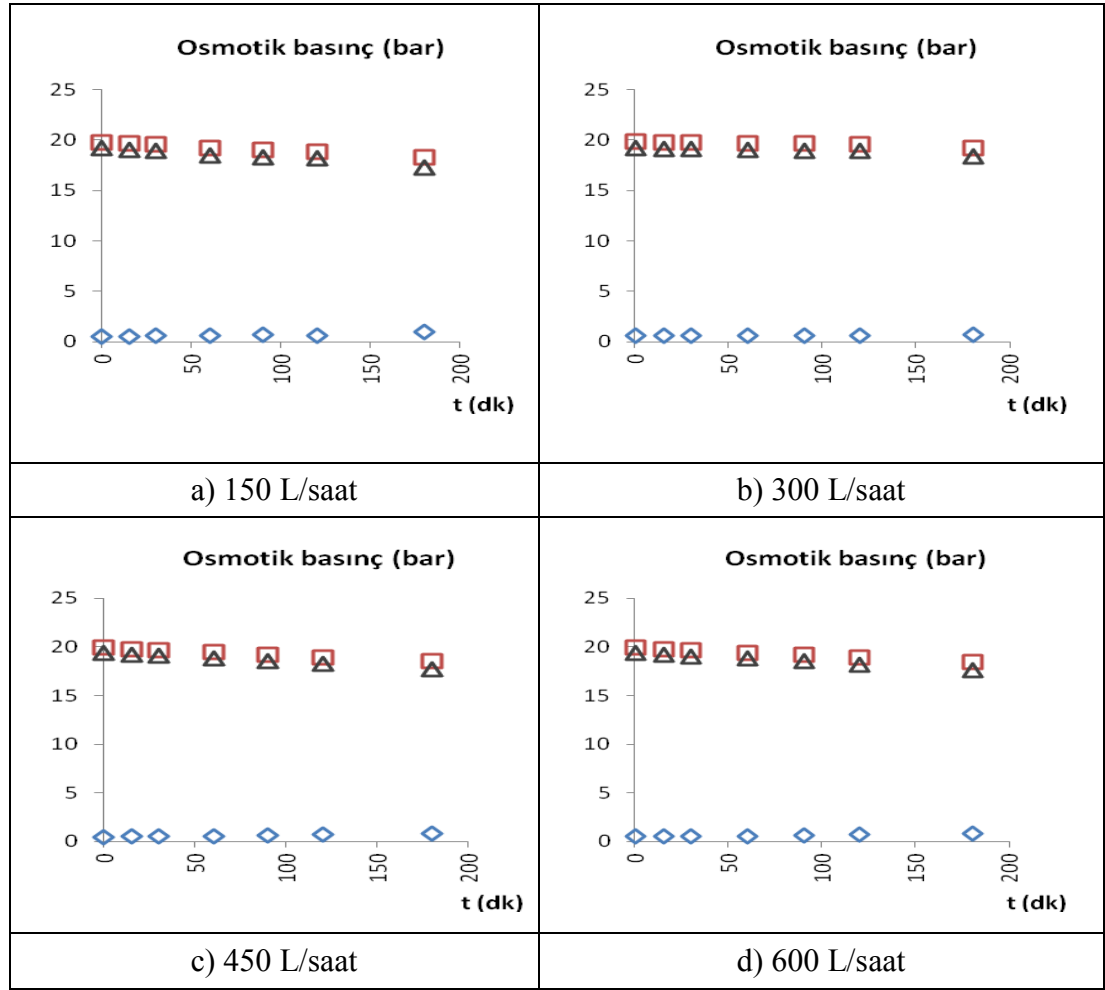
- Normal ve ters modda III. evsel arıtma çıkış suyundaki deney sonu iletkenlik ve TDS değerleri sırasıyla 5.9 mS/cm ve 3.1 g/L ile 6.7 mS/cm ve 3.6 g/L (distile su için 5.1 mS/cm ve 2.1 g/L ile 3.7 mS/cm ve 1.9 g/L; II. evsel arıtma çıkış suyu için ise 4.4 mS/cm ve 2.3 g/L ile 4.6 mS/cm ve 2.4 g/L idi) değerlerine ulaşmıştır. Deniz suyunda başlangıçta 790 mmol/kg civarında olan deniz suyu osmolalitesi seyrelme ve kütle taşınımı etkileri altında 646-700 seviyelerine azalmışken, III. evsel arıtma çıkış suyu tarafında deney süresi sonunda normal ve ters modlar için osmolalite değerleri, başlangıç değerlerisırasıyla 18 ve 26 mmol/kg olmak üzere 102 ve 112 mmol /kg (II. evsel arıtma çıkış suyu için 76 ve 79 mmol/kg (başlangıç değeri 46 ve 47 mmol/kg idi) olarak belirlenmiştir.

- Deniz suyu viskozite değerlerinde her iki modda çok az miktarlarda (0.01-0.02 mPa.s) azalma şeklinde değişim gözlenmiş olmakla birlikte; III. evsel arıtma çıkış suyunun viskozitesi ise her iki işletim modunda da konsantre olma etkisi altında zamanla bir miktar artma (0.03-0.05 mPa.s) göstermiştir. Bununla birlikte, deniz suyunun bulanıklık değerinin, normal-ters mod ikilisi için 0.47-0.64 NTU başlangıç değerlerinden 0.64-0.90 değerlerine zamanla bir miktar arttığı görülmüştür. III. evsel arıtma çıkış suyu tarafında ise, 1.11 NTU başlangıç bulanıklık değeri, deney sonunda 1.28-1.58 değerlerine yükselmiştir. Deniz suyundaki bulanıklık artışının seyrelme etkisine karşın mikrobiyal üreme etkisi altında gerçekleştiği, III. evsel arıtma çıkış suyunda bulanıklık artışının ise konsantre olma etkisinin yanı sıra mikrobiyal üreme etkisi altında da gerçekleşmiş olabileceği tahmin edilmektedir.

4.1.3.2. Akış Hızı

İO prosesinde III. evsel arıtma çıkış suyu kullanılarak deniz suyunun seyreltilmesi üzerine akış hızının etkisi kapsamında elde edilmiş, akış hızlarına bağılı

besleme, çekme ve net (çekme-besleme) osmotik basınçların zamanla değişimleri Şekil 4.15’de gösterilmiştir.

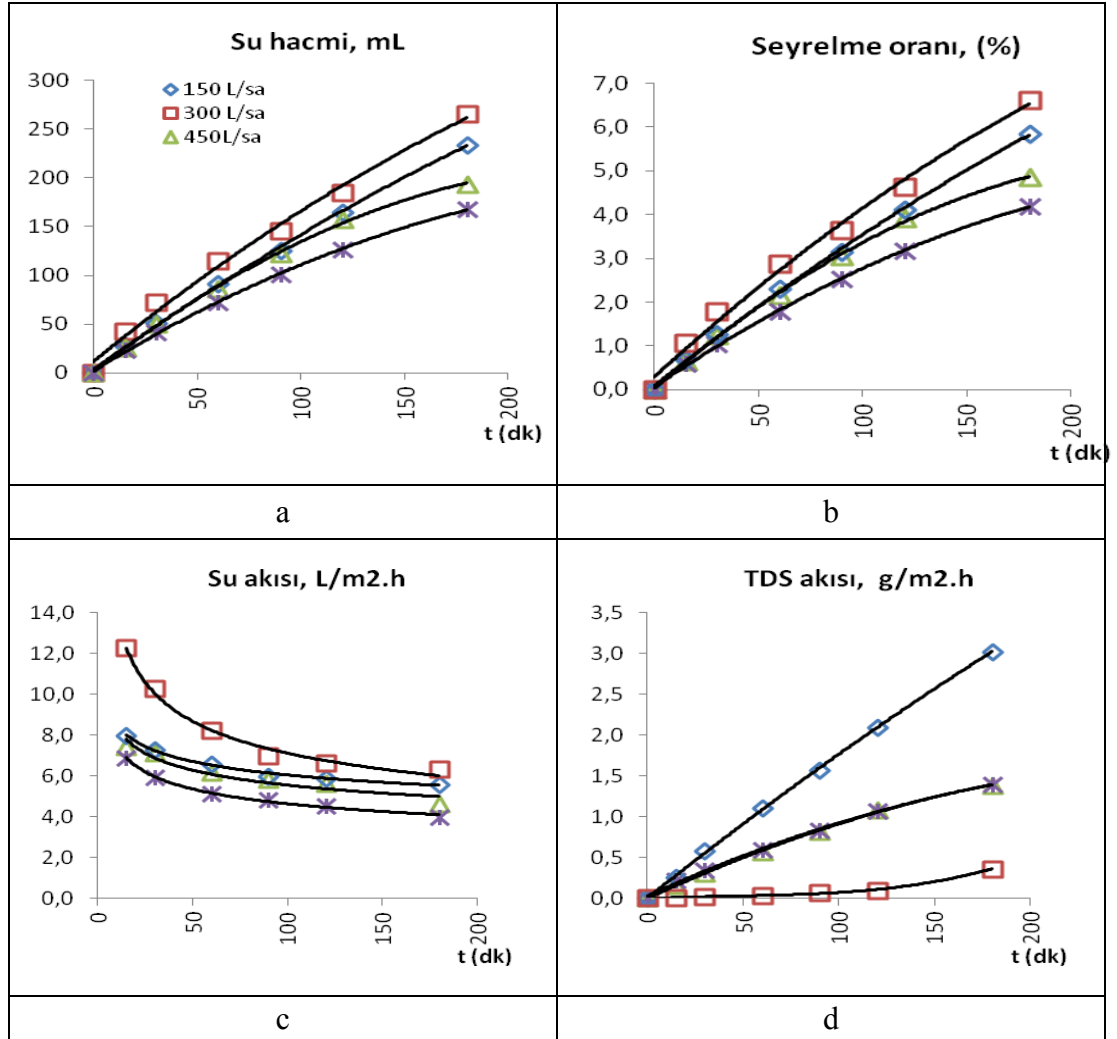


Şekil 4.15: İO prosesiyle II. evsel arıtma çıkış suyu kullanılarak deniz suyunun seyreltilmesinde akış hızına bağlı olarak İO prosesinde sürücü kuvvet etkisinin zamanla değişimi (membran yerleşimi: ters mod, sıcaklık: 25 °C, deney süresi: 3 saat) (Semboller $\diamond$, $\square$ ve Δ sırasıyla III. evsel arıtma çıkış suyu, deniz suyu ve prosesteki net osmotik basınçtır).

Akış hızına bağlı III. evsel arıtma çıkış suyu ile deniz suyunun seyreltilmesi deneylerinde İO prosesi sürücü kuvveti olan net osmotik basınç farkının, deney süresi boyunca yaklaşık 19.2-19.5bar’lık başlangıç değerinden, 18.8-18.4 bar civarına azaldığı görülmüştür. Çekme çözeltisi olan deniz suyundan besleme çözeltisi olan III. evsel arıtma çıkış suyuna doğru, su taşınımına ters yönde gerçekleşen çözülmüş madde taşınımına bağlı olarak zamanla beslemedeki osmotik basınç değerinde, 3 saat zarfında 0,52-0,64 bar’lardan 0.79-1.01 bar civarına

yükseldiği tespit edilmiştir (distile suda 0,20-0,30 bar, II.evsel arıtma çıkış suyunda 1.4-1.6 bar) .

Proses performansını ifade eden, çekme çözeltisine geçen su hacmi, çekme çözeltisinde hacimsel seyrelme oranı, su akısı ve tuz akısı parametrelerinin zamanla değişimleri Şekil 4.16’de gösterilmiştir.



Şekil 4.16: İO prosesinde III. evsel arıtma çıkış 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, III. evsel arıtma çıkış suyu ile deniz suyunun seyreltilmesi üzerine akış hızı parametresinin dikkate değer seviyede etkisinin olduğu görülmüştür. Değişen akış hızı değerlerine rağmen, su geçişi, deniz suyu seyrelme oranı ile su ve tuz akıları parametrelerinde belirgin farklılıklar gözlenmiştir. Su geçiş hacmi, seyrelme oranı ve su akısı değerleri, azalan akış hızları sırayla 300, 150, 450

ve 600 L/sa (distile suda 300, 450, 600 ve 150 L/sa; II. evsel arıtma çıkış suyunda 300, 600, 150 ve 450 L/sa idi) olarak tespit edilmiştir. 180 dk işletim sonunda su geçiş hacmi, çekme çözeltisi seyrelme oranı ve su akısı değerleri, 300 L/sa'ta sırasıyla 265 mL, % 6.6 ve 6.3 L/m².sa (distile su için 342 mL, % 8.6 ve 8.1 L/m².sa; II. evsel arıtma suyu için 222 mL, % 5.6 ve 5.3 L/m².sa) olarak belirlenmişken, en düşük performanslı 600 L/sa için bu değerler sırasıyla 167 mL, % 4.2 ve 4.0 L/m².sa olarak tespit edilmiştir. 300 L/sa'ta 0.36 g/m².sa (distile su için 1.4 g/m².sa; II. evsel arıtma suyu için 2.1 g/m².sa) olan çözünmüş madde akısının, 150 L/sa'ta 3.0 g/m².sa, yüksek akış hızları olan 450 ve 600 L/sa'ta ise 1.4 g/m².sa seviyesinde gerçekleştiği görülmüştür.

Bu sonuçlardan hareketle, sonraki adımda yer alan sıcaklık etkisinin araştırıldığı deneyler, distile su ve II. evsel arıtma çıkış suyu ile seyrelme deneylerinde olduğu gibi, hem deneysel çalışma şartları arasında benzeşim sağlamak hem de çok fazla farklılık bulunmamakla birlikte en yüksek su geçişi ve deniz suyu seyrelme performansını veren 300 L/sa akış hızı şartı altında yürütülmüştür.

Tablo 4.8: III. evsel arıtma çıkış 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			
		III. evsel arıtma çıkış suyu		Deniz Suyu		III. evsel arıtma çıkış suyu		Deniz Suyu		III. evsel arıtma çıkış suyu		Deniz Suyu		III. evsel arıtma çıkış 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	8.152	7.89	7.91	7.94	8.19	8.01	8.04	8.03	8.26	7.85	8.02	7.95	8.20	7.89	7.96
Osmolalite	mosm/kg	23	41	786	728	26	112	790	646	21	33	793	738	22	34	794	735
Yoğunluk	g/cm ³	0.9972	0.9977	1.0169	1.0156	0.9974	0.9997	1.0169	35.2	0.9974	0.9977	1.0170	1.0158	0.9973	0.9975	1.0170	1.0156
İletkenlik	mS/cm	1.209	2.34	42.6	38.9	1.442	6.68	43.3	21.3	1.186	1.825	43.4	40.6	1.172	1.915	43.2	40.6
TÇK	g/L	0.603	1.184	26.6	25.0	0.718	3.57	26.8	1.0135	0.587	0.917	27.0	25.4	0.585	0.959	26.9	25.1
Bulanıklık	NTU	1.87	0.67	0.52	1.22	1.37	1.95	0.64	0.90	1.36	0.36	0.40	1.39	2.17	0.98	0.42	0.31
Viskozite	mPa.s	0.93	0.97	1.02	0.99	0.90	0.91	0.99	0.97	0.91	0.90	0.97	1.01	0.91	0.91	1.00	0.98

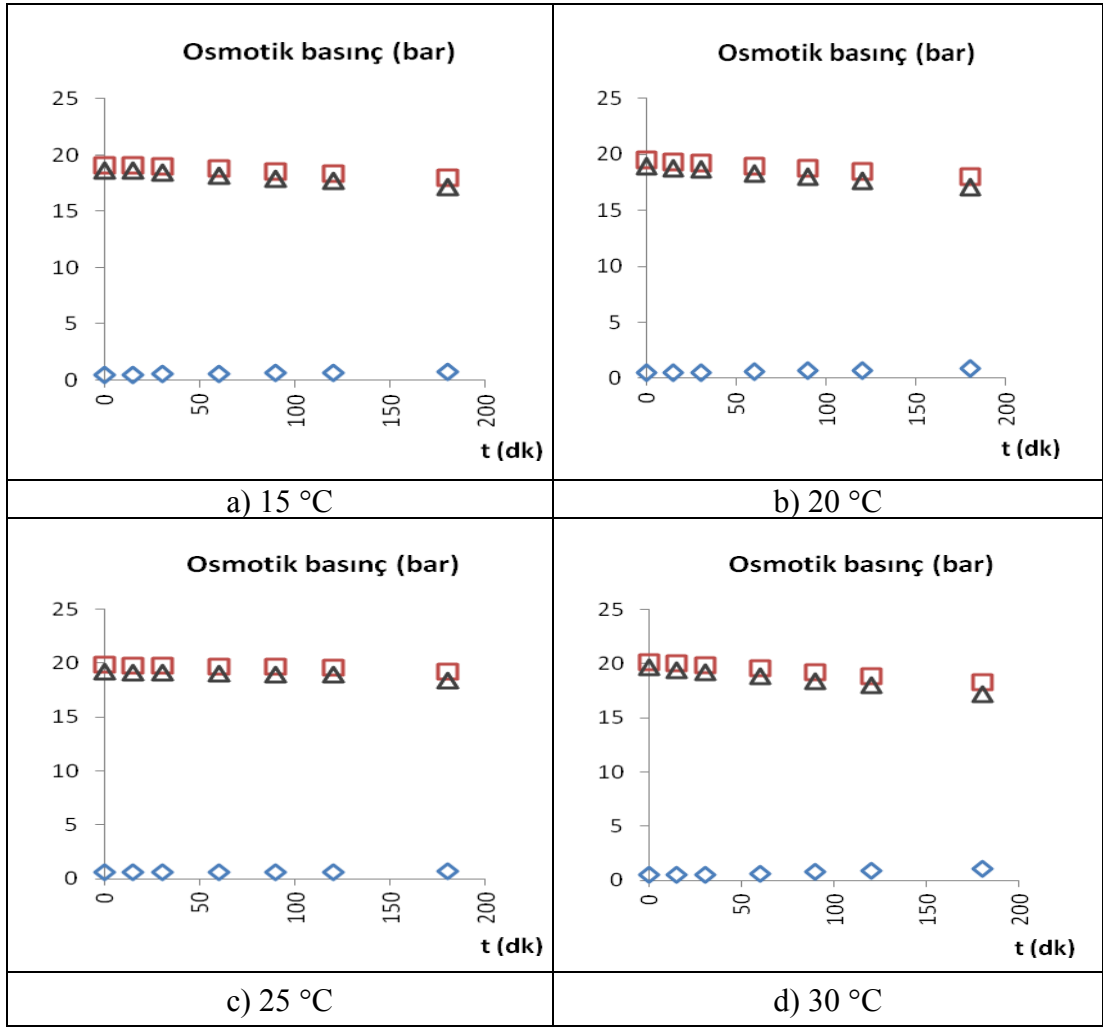
III. evsel arıtma çıkış suyu ile deniz suyunun seyreltilmesinde farklı akış hızlarında (150, 300, 450 ve 600 L/sa) işletilen deneyler süresince, su kalite parametreleri değişimlerinden aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır:

- Proses, besleme ve çekmede eşdeğer istenen sabit (25 ± 0.5 °C) sıcaklık değerinde (izotermal şartlarda) işletilmiştir.
- Deniz suyu pH'sı değişen akış hızlarına rağmen 7.9-8.0 civarında sabit kalmışken, III. evsel arıtma çıkış suyu pH'sı ise yaklaşık 8.0-8.3 aralığında artışlar göstermiştir., besleme akımından deniz suyuna hidronyum iyonu içerikli taşınımaya dayalı besleme akımındaki pH artışına rağmen, her iki çözeltideki deney başı ve sonu pH değerlerinin değişen akış hızı şartlarına nazaran birbirlerinden çok farklı değerlere değişmediği görülmüştür.
- Deniz suyunun osmolalitesi, yoğunluğu, iletkenliği ve toplam çözünmüş katıları, III. evsel arıtma çıkış suyuna doğru çözünmüş madde taşınımı ve III. evsel arıtma çıkış suyundan geçen su ile seyrelme sebebiyle, su ve tuz akılarına bağlı olarak deney süresince farklı akış hızlarında azalmalar göstermiştir. Buna karşın, III. evsel arıtma çıkış suyuna deniz suyundan difüzyonal kütle taşınımı, III. evsel arıtma çıkış suyunda bu parametre değerlerinin bir miktar artmasına neden olmuştur. III. evsel arıtma çıkış suyundaki deney sonu en düşük ve en yüksek çözünmüş madde değerleri görülmüş 300 ve 150 L/sa akış hızları için iletkenlik ve TDS değerleri sırasıyla 1788 $\mu\text{S/cm}$ ve 896 mg/L ile 2340 $\mu\text{S/cm}$ ve 1184 mg/L (başlangıçta 1442-1209 $\mu\text{S/cm}$ ve 718-603 mg/L) olarak tespit edilmiştir (300 L/sa için distile suda 365 $\mu\text{S/cm}$ ve 171 mg/L ve II. evsel arıtma çıkış suyunda 3610 $\mu\text{S/cm}$ ve 1862 mg/L (başlangıçta 2750 $\mu\text{S/cm}$ ve 1401 mg/L)). Deniz suyunda başlangıçta 786-903 mmol/kg aralığında olan deniz suyu osmolalitesi 728-764 mmol/kg değer aralığına azalmışken, III. evsel arıtma çıkış suyunda 21-26 mmol/kg aralığında olan başlangıç osmolalitesi deney süresi sonunda 32-41 mmol/kg (distile suda 6-11 mmol/kg idi ve II. evsel arıtma çıkış suyunda 47 mmol/kg olan başlangıç osmolalitesi deney süresi sonunda 58-63 mmol/kg'a artmıştı) değerine az bir miktar artış göstermiştir.
- Deniz suyu viskozite değerlerinde değişen akış hızlarına rağmen rölatif olarak çok az seyrelme etkisi ile çok düşük seviyelerde azalmalar (azami 0.005 mPa.s) görülmüştür. III. evsel arıtma çıkış suyu viskozite değerlerinin ise konsantre olma etkisine rağmen sabit yönlü değişimler gösterdiği belirlenmiştir. Deniz suyunun

bulanıklık değerinin 0.40-0.64 NTU başlangıç değerlerinden 0.50-0.75 NTU deney sonu değerlerine tüm akış hızı deneylerinde seyrelmeye rağmen mikrobiyal aktivite bazlı (muhtemelen fitoplankton miktarındaki artışa dayalı olarak) çok az arttığı gözlenmiştir. III. evsel arıtma çıkış suyu tarafında ise, 1.1-1.2 NTU başlangıç bulanıklık değerlerinin, 300 L/sa hariç diğer hızlarda deney sonunda 0.74-0.86 aralığına azaldığı, 300 L/sa'ta ise 1.3 NTU civarına arttığı tespit edilmiştir. Her ne kadar değişim mertebeleri çok yüksek olmasa da akış hızlarına bağlı bu değişimlerden, besleme akımındaki mikrobiyal, askıda ve kolloidal bileşenlerle membran etkileşmelerinin ve membranda tutunma mekanizmalarının farklı olduğu sonucuna ulaşılmaktadır.

4.1.3.3. Sıcaklık

İO prosesinde III. evsel arıtma çıkış 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 4.17'de gösterilmiştir.

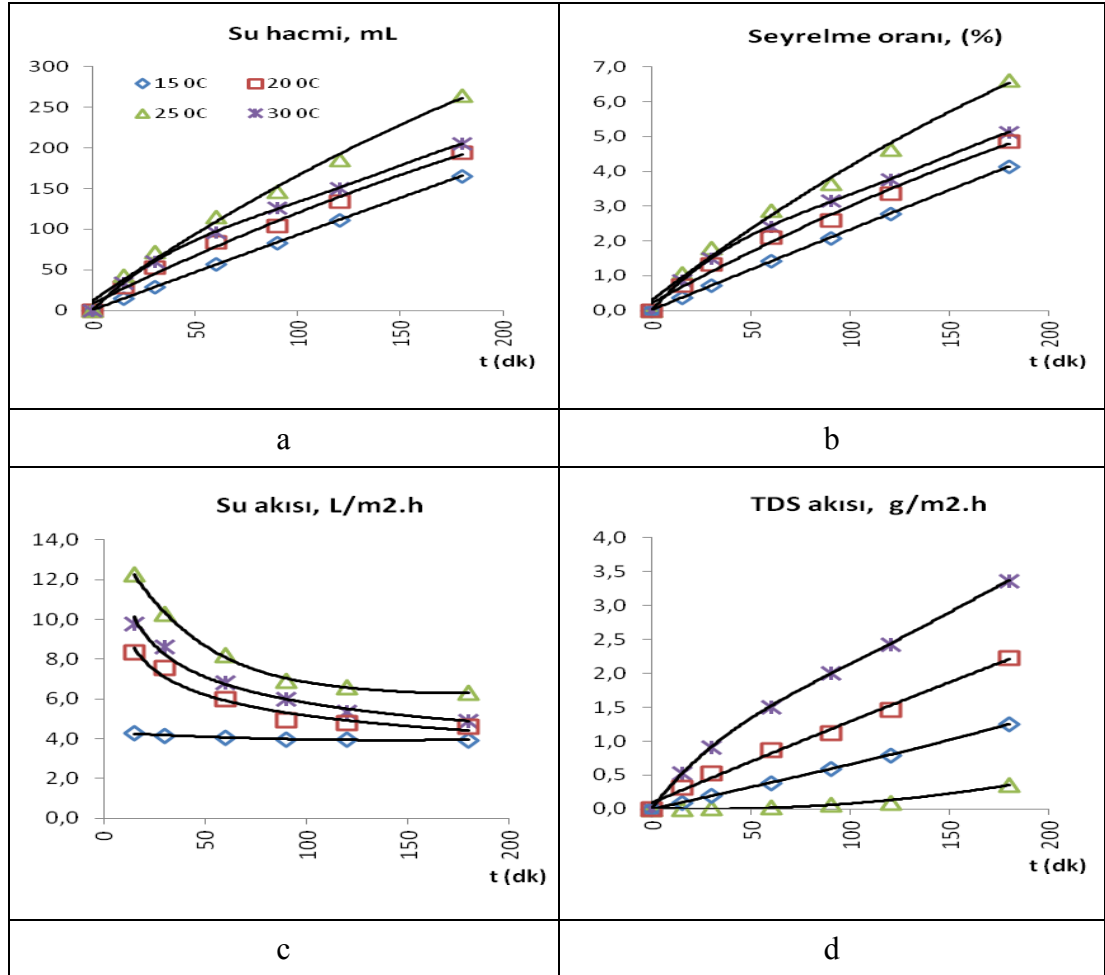


Şekil 4.17: İO prosesiyle III. evsel arıtma çıkış suyu kullanılarak deniz suyunun seyreltilmesinde sıcaklığa bağlı olarak İO prosesinde sürücü kuvvet etkisinin zamanla değişimi (membran yerleşimi: ters mod, akış hızı: 300 L/sa, deney süresi: 3 saat) (Semboller $\diamond$, $\square$ ve Δ sırasıyla III. evsel arıtma çıkış suyu, deniz suyu ve prosesteki net osmotik basınçtır).

Sıcaklığa bağlı III. evsel arıtma çıkış suyu ile deniz suyunun seyreltilmesi deneylerinde İO prosesi sürücü kuvveti olan net osmotik basınç farkının, deney süresi boyunca yaklaşık 18.6-19.7 bar'lık başlangıç değerlerinden, 17.0-18.4 bar'lar civarına azaldığı görülmüştür. Çekme çözeltisinden besleme çözeltisine doğru gerçekleşen çözünmüş madde taşınımına bağlı olarak, 3 saat zarfında 0.5-0.6 bar başlangıç değerlerinden 0.8-1.1 bar deney sonu değerlerine (II. evsel arıtma çıkış suyunda başlangıç değeri 1.0-1.2 bar aralığında olup deney sonunda 1.2-1.7 bar idi, distile su için 3 saat sonunda bulunmuş değer ise 0.2-0.9 bar aralığında idi) arttığı tespit edilmiştir. Buna göre, değişen sıcaklık işletme şartlarına rağmen prosesin

başlangıç aşamasındaki sürücü kuvvete yakın bir kuvvet etkisi altında işletilebildiği görülmüştür.

Proses performansını ifade eden, çekme çözeltisine geçen su hacmi, çekme çözeltisinde hacimsel seyrelme oranı, su akısı ve tuz akısı parametrelerinin zamanla değişimleri Şekil 4.18 'de gösterilmiştir.



Şekil 4.18: İO prosesinde III. evsel arıtma çıkış 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 III. evsel arıtma çıkış suyu ile deniz suyunun seyreltilmesi üzerine sıcaklık etkisinin, akış hızında olduğu gibi performans belirleyici bir unsur olduğu görülmüştür. Distile suya kıyasla III. evsel arıtma çıkış suyu ile çok daha düşük performansla işletilebilen İO prosesinde; su geçiş hacmi, seyrelme oranı ve su akısı değerlerinin azalan sırayla, II. evsel arıtma çıkış suyu ile aynı seyirde olmak üzere, 25, 30, 20 ve 15 °C sıcaklıklarda (distile suda 25, 15, 20 ve 30 °C) meydana

geldiği tespit edilmiştir. 180 dk işletim süresi sonunda su geçiş hacmi, çekme seyrelme oranı ve su akısı değerleri, 25 °C sıcaklıkta sırasıyla 265 mL, % 6.6 ve 6.3 L/m².sa (distile su için 342 mL, % 8.6 ve 8.1 L/m².sa; II. evsel arıtma çıkış suyu için ise 222 mL, % 5.6 ve 5.3 L/m².sa) olarak belirlenmişken, en düşük performanslı 15 °C sıcaklık için bu değerler sırasıyla 166 mL, % 4.1 ve 4.0 L/m².sa (distile su için 79 mL, % 1.7 ve 1.6 L/m².sa; II. evsel arıtma çıkış suyu için ise 197 mL, % 4.9 ve 4.7 L/m².sa) olarak tespit edilmiştir.

Bu sonuçlar, farklı sıcaklıkların etkisi altında İO prosesinde deniz suyunu seyreltme performansının, III. evsel arıtma çıkış suyu kullanılması durumunda, II. evsel arıtma çıkış suyundan biraz daha yüksek distile suya nazaran ise daha düşük seviyedeki performansla gerçekleştirildiğini açıkça göstermektedir. 25 °C sıcaklıkta 0.36 g/m².sa (distile su için 1.4 g/m².sa; II. evsel arıtma çıkış suyu için ise 2.1 g/m².sa) olan çözünmüş madde akısı, 15 °C sıcaklıkta 1.3 g/m².sa (distile su ve II. çıkış suyu için 1.9 ve 0.9 g/m².sa), 20 ve 30 °C sıcaklıklarda ise sırasıyla 2.2 ve 3.4 g/m².sa (distile su ve II. çıkış suyu için sırasıyla 0.1 ve 0.6 g/m².sa ile 1.8 ve 4.3 g/m².sa) olarak 300L/sa hariç sıcaklıkla artmış olarak değişim göstermiştir. Bu sonuçlardan hareketle, sonraki adımda yer alan ön arıtma etkisinin araştırıldığı deneyler, 300 L/sa akış hızı ve 25 °C sıcaklık şartları altında yürütülmüştür.

III. evsel arıtma çıkış 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 ± 0.5 °C ile istenen sıcaklık değeri altında deneysel çalışmalar yürütülmüştür.
- Deniz suyunda pH değeri 25 ve 30 °C sıcaklıklarda 7.9-8.0 civarlarında sabit kalmışken, diğer sıcaklıklarda 7.9'dan 8.0 ve 8.1 civarına az bir artışlı değişim sergilemiştir. III. evsel arıtma çıkış suyu pH'sı 7.9 -8.0 başlangıç değerlerinden 8.2-8.3 deney sonu değerlerine bir miktar artmıştır. Proseste deniz suyu tarafına geçen su miktarının düşük olmasına bağlı düşük proses etkinliğine rağmen, hidronyum iyonu (H₃O⁺) içerikli bir su taşınımı gerçekleşmekte olup, rölatif olarak düşük sıcaklıklarda besleme çözünmüş madde taşınımı pozitif iyonlar ağırlıklı cereyan etmektedir ve deneyler süresince çözelti pH'ları arasında dikkate değer farklılıklar meydana gelmemektedir.

- Deniz suyunun osmolalitesi, yoğunluğu, iletkenliği ve toplam çözünmüş katıları, III. evsel arıtma çıkış suyuna doğru çözünmüş madde taşınımı ve III. evsel arıtma çıkış suyundan geçen su ile deniz suyunun seyrelmesi sebebiyle, su ve tuz akılarına bağlı olarak deney süresince düşük seviyelerde azalmıştır. III. evsel arıtma çıkış suyuna deniz suyundan difüzyonal kütle taşınımı, III. evsel arıtma çıkış suyunda bu parametre değerlerinin artmasına neden olmuştur. III. evsel arıtma çıkış suyunda deney sonu en yüksek ve en düşük çözünmüş madde değerleri, 30 ve 25 °C sıcaklıklarda görülmüş olup, bu sıcaklıklar için besleme suyunun deney sonunda ölçülmüş iletkenlik ve TDS değerleri sırasıyla 2580 $\mu\text{S/cm}$ ve 1296 mg/L ile 1788 $\mu\text{S/cm}$ ve 896 mg/L (başlangıç değerleri olarak sırasıyla 1166 $\mu\text{S/cm}$ ve 575 mg/L ile 1442 $\mu\text{S/cm}$ ve 718 mg/L) olarak ölçülmüştür. 25 °C sıcaklık için bu değerler, II. evsel arıtma çıkış suyunda 3610 $\mu\text{S/cm}$ ve 1862 mg/L (başlangıç değerleri 2730 $\mu\text{S/cm}$ ve 1391 mg/L) ve distile suda 25 °C için 365 $\mu\text{S/cm}$ ve 171 mg/L olarak daha önce tespit edilmişti. Görülmektedir ki, besleme akımında artan kirlilik içeriği, beraberinde, deniz suyundan besleme akımına daha fazla çözünmüş madde taşınımını getirmektedir. Deniz suyunda başlangıçta 790 mmol/kg civarında olan deniz suyu osmolalitesi 719-764 mmol/kg aralığına azalmışken, III. evsel arıtma çıkış suyunda 21-26 mmol/kg olan başlangıç osmolalitesi deney süresi sonunda 32-44 mmol/kg (II. evsel arıtma çıkış suyunda 41-47 mmol/kg olan başlangıç osmolalitesi deney süresi sonunda 51-69 mmol/kg'a artmıştı, distile suda ise 6-37 mmol/kg idi) değerlerine artmıştır.

- Seyrelme etkisi altında, deney süresince deniz suyunun viskozite değerlerinde zamanla çok düşük azalmalar (0.02-0.08 mPa.s aralığında) meydana gelmiş olmakla birlikte, III. evsel arıtma çıkış suyunun viskozite değerlerinde deney süresince önemli farklılıklar gözlenmemiştir. Tüm sıcaklık deneylerinde, deniz suyunun bulanıklık değerinin seyrelme etkisine rağmen muhtemelen deniz suyunun içerdiği fitoplankton tür ve/veya sayısındaki artışlar sebebiyle 0.55-0.64 NTU başlangıç değerlerinden, 20 °C hariç 0.62-0.75 değerlerine arttığı, 20 °C sıcaklıkta ise seyreltme etkisi altında ve membran-askıda madde etkileşmeleri ve membranda tutunumlara bağlı olarak 0.61 NTU'dan 0.42 NTU'ya azaldığı görülmüştür. III. evsel arıtma çıkış suyunun bulanıklık değerinin de 1.1-1.2 NTU başlangıç değerlerinden, 25 °C hariç 0.8-1.0 deney sonu değerlerine membranlarla askıda maddelerin etkileşmeleri etkisi altında bir miktar azaldığı, 25 °C sıcaklıkta

ise 1.1 NTU'dan 1.3 NTU'ya konsantre olma etkisi altında bir miktar arttığı tespit edilmiştir.

Tablo 4.9: III. evsel arıtma çıkış suyu kullanılarak deniz suyunun seyreltilmesinde 15, 20, 25 ve 30 °C’de işletilen İÖ 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			
		III. evsel arıtma çıkış suyu		Deniz Suyu		III. evsel arıtma çıkış suyu		Deniz Suyu		III. evsel arıtma çıkış suyu		Deniz Suyu		III. evsel arıtma çıkış 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	-	8.18	8.10	7.92	8.10	8.01	8.23	7.87	7.94	7.94	8.19	8.01	8.04	8.08	8.25	7.91	7.98
Osmolalite	mosm/kg	22	34	786	738	21	38	789	730	26	112	790	646	21	44	790	719
Yoğunluk	g/cm ³	0.9987	0.9991	1.0180	1.0173	0.9980	0.9983	1.0173	1.0159	0.9974	0.9997	1.0169	35.2	0.9960	0.9961	1.0154	1.0136
İletkenlik	mS/cm	1.156	1.809	41.0	38.6	1.125	2.093	42.7	38.5	1.442	6.68	43.3	21.3	1.166	2.58	43.4	39.7
TÇK	g/L	0.574	0.916	25.3	23.7	0.555	1.066	26.6	23.6	0.718	3.57	26.8	1.0135	0.575	1.296	27.1	24.8
Bulanıklık	NTU	1.45	1.07	0.76	0.50	1.17	0.65	0.82	0.35	1.37	1.95	0.64	0.90	1.96	0.80	1.10	0.37
Viskozite	mPa.s	1.28	1.29	1.40	1.42	1.13	1.14	1.33	1.25	0.90	0.91	0.99	0.97	0.88	0.95	1.03	1.01

4.1.4. İleri Osmoz Prosesi Besleme Çözeltileri Karakterizasyon Sonuçları

Deniz suyunun ileri osmoz prosesinde, %20 II.Evsel Arıtma Çıkış Suyu ve III.Evsel Arıtma Çıkış Suyu ile ayrı ayrı seyreltilmesi sonucunda elde edilen, deney sonu konsantre edilmiş II.Evsel Arıtma Çıkış Suyu ve III.Evsel Arıtma Çıkış Suyu sularının karakterizasyon sonuçları Tablo 4.10’da gösterilmiştir. II.evsel Arıtma Çıkış suyunda pH, yoğunluk, renk, klorür, toplam sertlik ve sülfat değerlerinin, III.evsel Arıtma Çıkış suyunda ise pH, yoğunluk, nitrat, klorür, toplam sertlik ve sülfat değerlerinin arttığı görülmüştür. Alkalinite değerlerinin düştüğü görülmüş ve bunun sebebi olarak membran üzerinde tutunma sonucu sebebiyle olduğu düşünülmektedir.

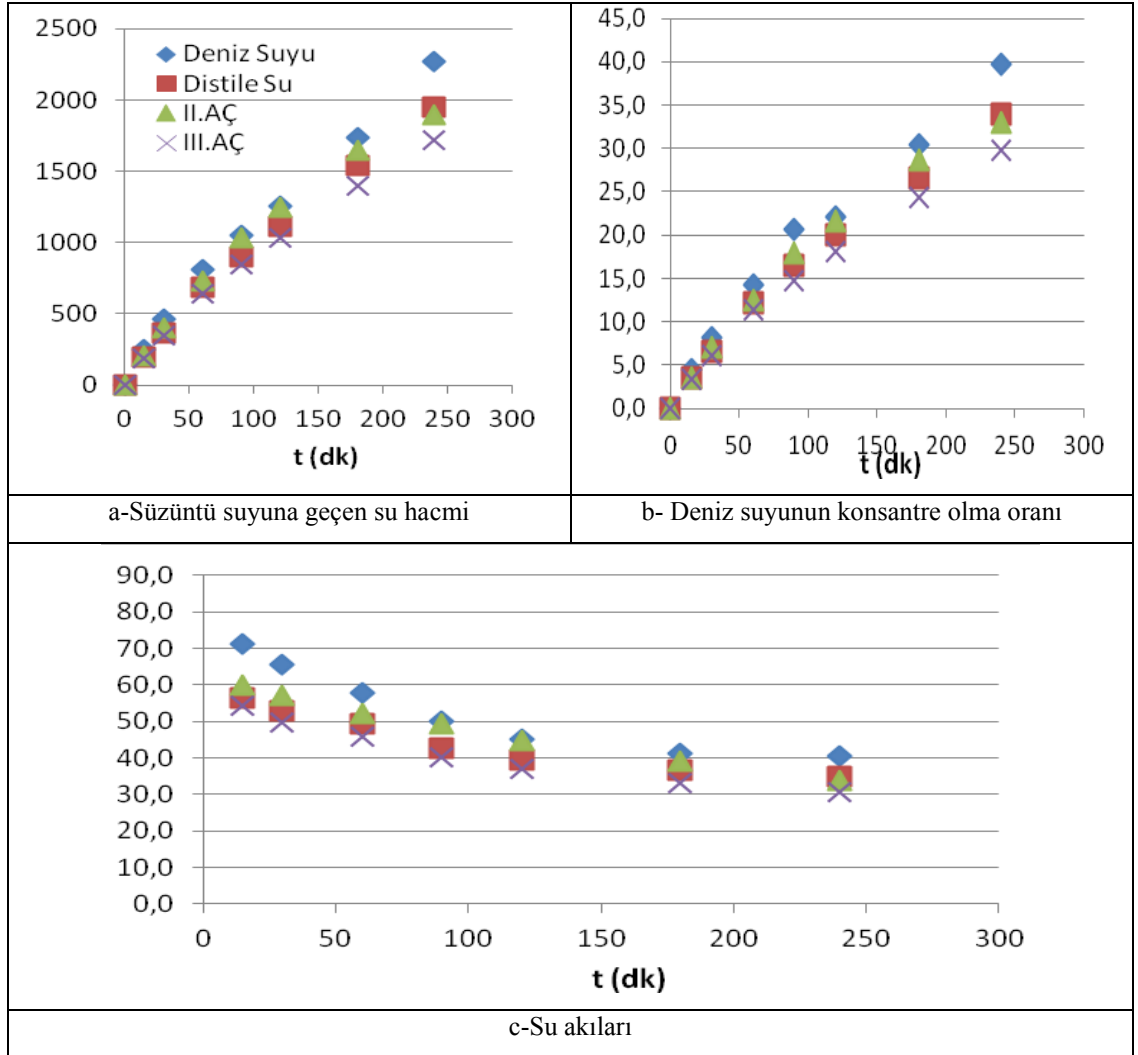
Tablo 4.10: Besleme çözeltilerinin deney sonu karakterizasyon sonuçları.

Parametre	II.Evsel Arıtma Çıkış Suyu	III.Evsel Arıtma Çıkış Suyu
Sıcaklık (°C)	25,5	25,4
pH	8,69	8,27
İletkenlik (mS/cm)	2,76	4,63
TÇK (g/L)	1,407	2,41
Yoğunluk (g/cm ³)	0,9985	0,9991
Osmolalite (mosm/kg)	45	76
Bulanıklık (NTU)	1,20	1,08
Alkalinite (mg/L)	132,5	190
Toplam Sertlik (mg/L)	279,5	586,3
Renk (abs)		
436	0,017	0,017
525	0,010	0,007
620	0,004	0,004
Sülfat (mg/L)	52,4	284,7
Klorür (mg/L)	900	1236
Nitrat (mg/L)	7,85	4,5

4.2. Membran Distilasyon Prosesinde Deniz Suyundan Temiz Su Eldesi

4.2.1. Farklı Besleme Çözeltileri ile Seyreltilmiş ve Ham Deniz Sularından Temiz Su Eldesi

Distile su ile doğrudan % 20 oranında seyreltilen deniz suyu [26], ileri osmoz sisteminde II. Evsel Arıtma Çıkış Suyu ve III. Evsel Arıtma Çıkış Suyu ile % 20 oranında seyreltilen deniz suyu ve ham deniz suyu ayrı ayrı olmak üzere temiz su eldesi amacıyla MD prosesine tabi tutulmuştur. MD prosesinde süzöntü suyuna geçen su hacmi, deniz suyunun konsantre olma oranı ve su akıları Şekil 4.19'da gösterilmiştir.



Şekil 4.19: Farklı besleme çözeltileriyle seyreltilmiş ve ham deniz sularının MD prosesinde elde edilen sonuçlar.

Süzüntü suyuna geçen su hacminin ve buna bağlı deniz suyu konsantre olma oranının, ham deniz suyunda ve seyreltilmiş deniz suyunda sırasıyla yaklaşık 1900 mL ve %33 olduğu tespit edilmiştir.

Su akılarına bakıldığında ise, ham ve seyreltilmiş deniz suyu için değerlerin hemen hemen aynı olduğu görülmüştür. Su akıları yaklaşık $35 \text{ L/m}^2\cdot\text{h}$ olduğu görülmektedir.

Besleme akımlarıyla seyreltilmiş ve ham deniz suyunun MD prosesi sonucunda elde edilmiş karakterizasyon sonuçları Tablo 4.11’de gösterilmiştir.

Süzüntü suyunun pH değerleri 7,45-8,11 arasında değişmekte , iletkenlik değerlerinin ($18\text{-}33\mu\text{S/cm}$) arasında değiştiği, bulanıklığın düşük olduğu (0-0,50 NTU), rengin 0,000-0,003 abs arasında değiştiği nitrat ve fosfatın bulunmadığı belirlenmiştir.

Tablo 4.11: Farklı besleme çözeltileriyle seyreltilmiş ve ham deniz suyunun MD prosesi sonunda elde edilen deney sonu karakterizasyon sonuçları

Parametre	Ham Deniz Suyu			Seyreltilmiş Deniz Suyu								
				Distile Su			II.Evsel Arıtma Çıkış Suyu			III.Evsel Arıtma Çıkış 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)	59,5	29,5	-	59,5	29,5	-	59,5	29,5	-	59,5	29,5	-
pH	8,44	7,60	-	8,46	7,86	-	8,44	8,11	-	8,52	7,45	-
İletkenlik (mS/cm)	64,3	0,033	99,95	49,8	0,020	99,95	56,4	0,028	99,95	50,1	0,018	99,96
TÇK (g/L)	42,3	0,018	99,96	31,8	0,009	99,97	36,6	0,008	99,98	31,4	0,009	99,97
Yoğunluk (g/cm ³)	1,0224	0,9961	-	1,0216	0,9967	-	1,0239	0,9967	-	1,0225	0,9975	-
Osmolalite (mosm/kg)	1300	0	100,00	987	49	95,03	1113	0	100,00	1000	15	98,50
Bulanıklık (NTU)	1,20	0,37	-	1,15	0,12	89,56	2,40	0,40	83,33	2,38	0,50	78,99
TOK (mg/L)	5,80	0	100,00	4,20	0	100,00	8,30	0	100,00	6,20	0	100,00
ÇOK (mg/L)	4,60	0	100,00	3,20	0	100,00	6,15	0	100,00	4,85	0	100,00
UVA ₂₅₄ (cm ⁻¹)	0,120	0,008	93,33	0,102	0,005	95,10	0,190	0,014	92,63	0,170	0,012	92,94
SUVA (L/mg.m)	2,61	-	-	3,19	-	-	3,09	-	-	3,50	-	-
HCO ₃ (mg/L)	160,5	8	95,01	138,5	4	97,11	117,5	11	90,64	120	14	88,33
CO ₃ (mg/L)	164	0	100,00	160,8	0	100,00	161	0	100,00	157	0	100,00
Alkalinite (mg/L)	324,5	8	97,53	299,3	4	98,66	278,5	11	96,05	277	14	94,95
Toplam Sertlik (mg/L)	8450,1	4,92	99,94	9250	58,5	99,37	7367,7	6,56	99,91	7260,5	3,50	99,95
Renk (abs)	436 525 620	0,005 0,003 0,002	0,003 0,001 0,001	40,00 66,67 50,00	0,003 0,001 0,001	0,001 0 0	66,67 100,00 100,00	0,020 0,010 0,009	0,003 0,001 0,001	85,00 90,00 88,89	0,020 0,015 0,008	0,003 0,001 0,001
Sülfat (mg/L)	3300	7,35	99,78	4286	5,75	99,86	3210	5,50	99,83	3100	7,50	
Klorür (mg/L)	24162,5	0	100,00	35887	70,35	99,80	21623,3	0,0	100,00	20510,4	0	100,00
Nitrat (mg/L)	0,02	0,0	100,00	0,70	0	100,00	0,25	0,0	100,00	0,35	0	100,00
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)	0,35	0,02	94,28	0,71	0,08	88,73	0,26	0,03	88,46	0,36	0,02	94,44

5.SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışma, İO/DTMD bütünleşik membran sistemi kullanılarak, farklı İO besleme suları (distile su, II.evsel arıtma çıkış suyu,III.evsel arıtma çıkış suyu) ile arıtılmış kentsel sulardan su geri kazanımı temeli üzerine inşa edilmiş olup; İO prosesinin referans proses performansı distile su besleme akımı kullanılarak tespit edilmiş, önerilen entegre arıtma sisteminin ne düzeyde bir başarı ile uygulanabileceği ortaya konmuştur.

İO deneylerinde, membran yerleşim modu (normal ve ters mod), sıcaklık ve akış hızı çalışmalarının 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. Bu çalışmalar kapsamamında İO prosesinin ön arıtma amacıyla uygulanabilirliği sonucuna varılmıştır.

MD prosesi sonunda elde edilen temiz suyun fosfor içermediği, çok düşük renk içerdiğine (0,003 abs),TOC değerinin 1 mg/L' den düşük olduğu, bulanıklık değerlerinin düşük olduğu(0,50 NTU), pH değerinin 7,45-8,11 arasında olduğu, aynı zamanda da kokusuz, bulanıklık içermeyen temiz su kalitesinde olduğu belirlenmiştir. İO prosesinde farklı besleme akımı kullanılmasıyla seyreltilmiş deniz suyundan, MD prosesi kullanılarak elde edilen temiz suyun (18-33µS/cm) eldesinin sağlandığı görülmüştür.

Bu tez çalışmasının sonuçları ışığında, ham deniz suyunda da seyrelmiş deniz suyunda da hemen hemen aynı akı görülmüştür.Önce İO prosesi ardından MD prosesi ile iki kademeli membran perdelemesi yapılmak suretiyle önemli düşüş görülmüş temiz su eldesi sağlanmıştır.

Her ne kadar da iyi kalitede temiz su elde edilmişse de, temiz suya atıksulardan geçmesi muhtemel spesifik organikler incelenerek belirlenmesinin üretilen suyun içme suyu amaçla belirleyici unsur olacağı dikkate alınmalıdır.

Bu bağlamda endokrin bozucular, kişisel bakım ürünleri, antibiyotik gibi spesifik organiklerin İO/MD ile deniz suyundan içme suyu üretiminde arıtılmış atıksulardan su geri kazanımı odaklı uygulamasının insan sağlığı açısından etraflıca araştırılması önerilir.

KAYNAKLAR

- [1] Cath T. Y., Childress A. E., Elimelech M., (2006), "Forward osmosis: Principles, applications, and recent developments", *Journal of Membrane Science*, 281, 70-87.
- [2] Mccutcheon J. R., McGinnis R. L., Menachem E., (2005), "A novel ammonia-carbon dioxide forward (direct) osmosis desalination process", *Desalination*, 174, 1-11.
- [3] Kravath R. E., Davis J. A., (1975), "Desalination of sea water by direct osmosis", *Desalination*, 16, 5-151.
- [4] 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.
- [5] Holloway R. W., Childress A. E., Dennett K. E., Cath T. Y., (2007), "Forward osmosis for concentration of anaerobic digester centrate", *Water Research*, 41, 4005- 4014.
- [6] Mi B., Elimelech M., (2008), "Chemical and physical aspects of organic fouling of forward osmosis membranes", *Journal of Membrane Science*, 320, 292-302.
- [7] 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, 209-219.
- [8] 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, 6-12.
- [9] 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, 160-166.
- [10] 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.
- [11] 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, 269-274.

- [12] Wang K. Y., Teoh M., Nugroho A., Chung T. S., (2011), “Integrated forward osmosis–membrane distillation (FO-MD) hybrid system for the concentration of protein solutions”, *Chemical Engineering Science*, 66 (11), 2421-2430.
- [13] Drioli E., Macedonio F., Curcio E., (2007), “Integrated membrane systems for seawater desalination: energetic and exergetic analysis, economic evaluation, experimental study”, *Desalination*, 203, 260-276
- [14] Lawson K.W., Lloyd D.R., (1997), “Membrane Distillation “, *Journal of Membrane Science*, 124, 1-25.
- [15] Lei Z., Chen B., Ding Z., (2005), “Special Distillation Processes”, 1st Edition, Elsevier.
- [16] Alkhudhiri A., Darwish N., Hilal N.,(2012), “Membrane distillation: A comprehensive review “, *Desalination*, 287, 2-18.
- [17] Ang W.S., Lee S., Elimelech M, (2006), “Chemical and physical aspects of cleaning of organic-fouled reverse osmosis membranes”, *Journal of Membrane Science*, 272, 198-210.
- [18] Pangarkar B. L., Sane M., Guddad M., (2011), “Reverse osmosis and membrane distillation for desalination of groundwater: A Review”, *ISRN Materials Science*, 2011, 9.
- [19] Mccutcheon J. R., McGinnis R. L., Elimelech M., (2006), “Desalination by ammonia–carbon dioxide forward osmosis process: influence of draw and feed solution concentrations on process performance”, *Journal of Membrane Science*, 278, 114-123.
- [20] Bourawi E., Ding Z., Ma R., Khayet M., (2006), “A framework for better understanding membrane distillation separation process”, *Journal of Membrane Science*, 285, 4-29.
- [21] Kurihara M. , Hanakawa M., (2013),”Mega-ton Water System: Japanese national research and development project on seawater desalination and wastewater reclamation”, *Desalination*, 308, 131-137.
- [22] Gryta M., Tomaswewska M., Karakulski K.,(2006), “Wastewater Treatment by Membrane Distillation “, *Desalination*, 198, 67-73.
- [23] Zhang S., Wang P., Fu X., Chung T., (2014), “Sustainable water recovery from oily wastewater via forward osmosis-membrane distillation (FO-MD)”, *Water Research*, 52, 112-121.

- [24] Lawson K. W., Lloyd D. R., (1996), “Membrane distillation. II. Direct contact membrane distillation”, *Journal of Membrane Science*, 120(1), 123-124.
- [25] Wang P., Chung T., (2015),” Recent advances in membrane distillation processes: Membrane development, configuration design and application exploring”, *Journal of Membrane Science*, 474, 39–56.
- [26] Çakmak Ş., (2014),”İleri Osmoz/Membran Distilasyon Sistemiyle Deniz Suyunun Seyreltilmesi ve Temiz Su Eldesi, Yüksek Lisans Tezi, Gebze Teknik Üniversitesi.

ÖZGEÇMİŞ

Tuğba Nur YILMAZ 1987 yılında İstanbul’da doğdu.2006 yılında başladığı Kocaeli Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Çevre Mühendisliği Bölümü’nü 2011 yılında bitirdi. 2012 yılında Gebze Teknik Üniversitesi’ne başladı. 2012-2014 yılları arasında Tübitak destekli projede proje asistanı olarak çalıştı.