T.C.

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MARMARA DENİZİ'NDE DESALİNASYON SİSTEMLERİNİN KULLANIMININ TEKNİK, EKONOMİK VE UYGULANABİLİRLİK AÇISINDAN KARŞILAŞTIRILMASI

Can Berker KURUM

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı

Çevre Mühendisliği Programı

Danışman

Doç. Dr. Fatih İLHAN

Şubat, 2026

T.C.

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MARMARA DENİZİ'NDE DESALİNASYON SİSTEMLERİNİN KULLANIMININ TEKNİK, EKONOMİK VE UYGULANABİLİRLİK AÇISINDAN KARŞILAŞTIRILMASI

Can Berker KURUM tarafından hazırlanan tez çalışması 03.02.2026 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı, Çevre Mühendisliği Programı **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Doç. Dr. Fatih İLHAN
Yıldız Teknik Üniversitesi
Danışman

Jüri Üyeleri

Doç. Dr. Fatih İLHAN, Danışman
Yıldız Teknik Üniversitesi _____

Doç. Dr. Ömer APAYDIN, Asıl Üye
Yıldız Teknik Üniversitesi _____

Doç. Dr. Nagihan KORKMAZ, Asıl Üye
İstanbul Üniversitesi _____

Danışmanım Prof. Dr. Fatih İLHAN sorumluluğunda tarafımca hazırlanan Marmara Denizi'nde Desalinasyon Sistemlerinin Teknik, Ekonomik ve Uygulanabilirlik Açısından Karşılaştırılması başlıklı çalışmada veri toplama ve veri kullanımında gerekli yasal izinleri aldığımı, diğer kaynaklardan aldığım bilgileri ana metin ve referanslarda eksiksiz gösterdiğimi, araştırma verilerine ve sonuçlarına ilişkin çarpıtma ve/veya sahtecilik yapmadığımı, çalışmam süresince bilimsel araştırma ve etik ilkelerine uygun davrandığımı beyan ederim. Beyanımın aksinin ispatı halinde her türlü yasal sonucu kabul ederim.

Can Berker KURUM

İmza

Çok Değerli Aileme

TEŞEKKÜR

Öncelikle değerli ve saygıdeğer tez danışmanım Doç. Dr. Fatih İLHAN' a tezimi yazarken bana verdiği tüm motivasyon ve yardımları için sonsuz teşekkür ederim.

Ayrıca bu yüksek lisans tezimin temellerinin oluşmasında emeği geçen tüm değerli Yıldız Teknik Üniversitesi Çevre Mühendisliği Bölümü değerli ve saygıdeğer öğretim üyeleri Hocalarıma ve Oruç Kaan TÜRK Hocama deney aşamasında göstermiş olduğu her türlü destek için sonsuz teşekkürlerimi borç bilirim.

Son olarak, tüm akademik hayatımda desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen ve hep yanımda olan sevgili aileme minnet ve hürmetlerimi sunar, müteşekkir olduğumu belirtmek isterim.

Can Berker KURUM

İÇİNDEKİLER

SİMGE LİSTESİ **x**
KISALTMA LİSTESİ **xii**
ŞEKİL LİSTESİ **xv**
TABLO LİSTESİ **xvii**
HARİTA LİSTESİ **xix**
ÖZET **xx**
ABSTRACT **xxii**
1 GİRİŞ **1**
1.1 Araştırmanın Gerekçesi ve Önemi 1
1.1.1 Fazla Nüfus Yoğunluğu 1
1.1.2 Sanayi ve Endüstriyel Yük 2
1.1.3 İklim Krizi ve Kuraklık Etkileri 2
1.1.4 Su stresi ve Su Kıtlığı 3
1.1.5 Marmara Denizi'nin Su Kalitesi ve Kirlilik Yükü 8
1.1.6 Marmara Denizi'nde Kullanılabilecek Metotlar 8
1.1.7 Çevresel ve Enerji Yönetimi 8
1.1.8 Sonuç ve Öneriler 9
1.2 Tezin Kapsamı 9
1.2.1 Nüfus ve Günlük Su Tüketimi 10
1.2.2 Tarım Su Tüketimi 10
1.2.3 Sanayi Su Tüketimi 11
1.2.4 Toplam Su İhtiyacı Hesaplaması 11
1.2.5 Marmara Bölgesi Barajları 11
1.2.6 Akarsular 12

1.2.7 Göller 13
1.2.8 Yeraltı Suları 14
1.2.9 Marmara Denizi 15
1.2.10 Su Temini ve Kullanımı 15
1.2.11 Marmara Denizi'ndeki Su Temini Sorunları ve Mevcut Çözüm Yöntemleri 19
1.3 Türkiye'deki Yönetmeliğe Göre İçme Suyu Standartları 20
2 LİTERATÜR İNCELEMESİ 22
2.1 Desalinasyon Sistemleri ve Çalışma Prensipleri 22
2.2 Ters Osmoz 22
2.2.1. Ters Osmoz 22
2.2.2 Enerji Geri Kazanımlı Ters Osmoz 27
2.3 Elektrodiyaliz 37
2.3.1 Klasik Elektrodiyaliz 37
2.3.2 Bipolar Membranlı Elektrodiyaliz 39
2.3.3 Ters Elektrodiyaliz (RED) 42
2.4 Elektrodiyalizde Enerji Kazanımı 43
2.5 Vakum Membran Filtrasyonu 43
2.6 Kapasitif Deiyonizasyon 44
2.7 Distilasyon 45
2.7.1 Enerji Kullanımı 46
2.7.2 Çevresel Etkiler 46
2.8 Membran Distilasyonu 46
2.8.1 Avantajları 46
2.8.2 Dezavantajları 47
2.8.3 Genel Değerlendirme 47
2.8.4 Vakum Membranlı Distilasyon 48
2.9 Çok Aşamalı Distilasyon 49
2.9.1 Çalışma Prensibi 49

2.10 Buhar Sıkıştırmalı Distilasyon 50
2.10.1 Çalışma Prensibi 50
2.11 Solar Distilasyon 52
2.12 Distilasyon Türlerinin Karşılaştırılması 52
2.13 Teknik Açıdan Değerlendirme 53
2.14 Ekonomik Açıdan Değerlendirme 57
2.15 Uygulanabilirlik Açısından Karşılaştırılması 60
2.16 Remineralizasyon Prosesi 63
2.16.1 Prosesin Amacı 63
2.16.2 Hedeflenen Su Kalitesi 64
2.16.3 Prosesin Çeşitleri 64
2.17 Marmara Denizi Aylık ve Yıllık Sıcaklık Bilgileri 65
2.18 Marmara Denizi'nde Kullanılması Muhtemel Metotlar 66
2.18.1 Marmara Denizi'nin Tuzluluk Faktörü 66
2.19 Ters Osmoz Yönteminin Marmara Denizi İçin Avantajları 66
2.20 Elektrodiyaliz Yönteminin Potansiyel Rolü 67
2.21 Deniz Suyu Sıcaklığının Ters Osmoz ve Elektrodiyalize Etkisi 68
2.22 Çevresel ve İşletme Boyutları 68
2.22.1 Brine ve Yönetimi 68
2.22.2 Müsilaj ve Yönetimi 70
2.22.3 Sonuç 72
3 METODOLOJİ 74
3.1 Araştırma Modeli ve Veri Toplama Yöntemleri 74
3.1.1 Numuneler 78
3.1.2 Ön Arıtma 78
3.1.3 Deneye Hazırlık Süreci 79
3.2 Ters Osmoz 80
3.2.1 Ters Osmoz Cihazı 80
3.2.2 Basınçlandırıcı Tüp 83
3.3 Elektrodiyaliz 84
3.3.1 Elektrodiyaliz Cihazı 84

4 DENEYSEL BULGULAR **87**
4.1 Ters Osmoz 87
4.1.1 Hazırlık Süreci 87
4.1.2 Deneyi Başlatmak 87
4.1.3 Deney Sonucu 87
4.2 Elektrodiyaliz 91
4.2.1 Hazırlık Süreci 91
4.2.2 Deneyi Başlatmak 92
4.2.3 Deney Sonucu 93
5 SONUÇ **103**
5.1 Deney Sonuçları Çıkarımları ve Karşılaştırılması 103
5.1.1 Ters Osmoz 103
5.1.2 Elektrodiyaliz 105
5.2 Ters Osmoz ve Elektrodiyalizin Karşılaştırılması 106
5.3 Uygulanabilirlik Açısından Karşılaştırma 107
5.4 Teknik Açıdan 110
5.5 Ekonomik Tablo 111
5.6 Sonuç ve Öneriler 113
5.6.1 Sonuç 113
5.6.2 Öneriler 114
KAYNAKÇA **116**
A İLGİLİ YÖNETMELİK EK TABLOLARI **132**
TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR **137**

SİMGE LİSTESİ

A	Amper
X^-	Anyon
HX	Asit formu
Bar	Basınç Birimi
Psi	Basınç birimi
MOH	Baz Formu
C_f	Besleme Konsantrasyonu
HCO_3^-	Bikarbonat İyonu
kWh/m^3	Birim Su Başına Enerji Tüketimi
MX	BMED Tuz Formu Gösterimi
ΔP_v	Buhar Basıncı Farkı
L/h	Debi Birimi (litre/saat)
R	Evrensel Gaz Sabiti
°F	Fahrenheit Sıcaklık Birimi
$L/m^2 \cdot gün$	Güneş Enerjili Damıtma Verim Birimi
q	Günlük Kişi Başı Su Tüketimi
v	Hacim
mL	Hacim Birimi (mililitre)
H^+	Hidrojen İyonu
HCl	Hidroklorik Asit
OH^-	Hidroksit İyonu
µS/cm	İletkenlik Birimi (mikrosiemens/cm)
mS/cm	İletkenlik Birimi (milisiemens/cm)
$Ca(OH)_2$	Kalsiyum Hidroksit (kireç)
Ca^{2+}	Kalsiyum İyonu
$CaCO_3$	Kalsiyum Karbonat (kalsit/kireçtaşı)

CO_2	Karbondioksit
M^+	Katyon (genel gösterim)
Cl^-	Klorür İyonu
C	Konsantrasyon
g/L	Konsantrasyon Birimi (gram/litre)
kg/m^3	Konsantrasyon Birimi (kilogram/metreküp)
mg/L	Konsantrasyon Birimi (miligram/litre)
Mg^{2+}	Magnezyum İyonu
psig	Manometrik Basınç Birimi (psi gauge)
m^3	Metreküp
π (Π)	Osmotik Basınç
Δπ	Osmotik Basınç Farkı
C_p	Permeat Konsantrasyonu
PE	Polietilen
PP	Polipropilen
PTFE	Politetrafloroetilen
PSU	Pratik Tuzluluk Birimi
°C	Santigrat Sıcaklık Birimi
T	Sıcaklık
ΔT	Sıcaklık Farkı
Na^+	Sodyum İyonu
NaCl	Sodyum Klorür
B	Solüt Geçirgenlik Katsayısı
H_2O	Su
J_w	Su Akısı
a	Su Geçirgenlik Katsayısı
Q	Su Ihtiyacı Veya Debi
N	Toplam Nüfus
ΔP	Transmembran Basınç Farkı
J_s	Tuz Akısı
i	Van ’t Hoff Faktörü
V	Volt

KISALTMA LİSTESİ

AEM	Anyon Değişim Membranı
BM	Bipolar Membran
BMED	Bipolar Membranlı Elektrodiyaliz
BMED1-3	BMED Hücresi Konfigürasyon Kodu
BMED	Bipolar Membran
BWRO	Acı Su Ters Osmoz
CAPEX	Sermaye Giderleri
CAPMIX	Kapasitif Karıştırma
CCPP	Kalsiyum Karbonat Çökelme Potansiyeli
CDI	Kapasitif Deiyonizasyon
CEM	Katyon Değişim Membranı
CIP	Yerinde Temizlik
CP	Konsantrasyon Kutuplaşması
CTD	İletkenlik-Sıcaklık-Derinlik Cihazı
DAF	Çözünmüş Hava Flotasyonu
DC	Doğru Akım
DCMD	Doğrudan Temaslı Membran Distilasyonu
DI	Deionize
DMF	Çift Medya Filtrasyonu
DSİ	Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü
EBCT	Boş Yatak Temas Süresi
ED	Elektrodiyaliz
ED64-4	Elektrodiyaliz Ünitesi Cihaz modeli
EDBM	Bipolar Membranlı Elektrodiyaliz
EDR	Elektrodiyaliz Tersine Çevirme
EDX	Enerji Dağılımlı X-Işını Spektroskopisi

ERD	Enerji Geri Kazanım Cihazı
ERRO	Enerji Geri Kazanımlı Ters Osmoz
FNPT	Boru Dişi Standartı
FTIR	Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektroskopisi
GAC	Granüler Aktif Karbon
HDH	Nemlendirme–Yoğuşturma
HP4750	Sterlitech Marka Ters Osmoz Cihaz Modeli
İSKİ	İstanbul Su ve Kanalizasyon İdaresi
KED	Klasik Elektrodiyaliz
LCC	Yaşam Döngüsü Maliyeti
LPPX	Düşük Basınç Basınç Değiştirici
LSI	Langelier Doygunluk İndeksi
MD	Membran Distilasyonu
MED	Çok Etkili Damıtma
MF	Mikrofiltrasyon
MSF	Çok Kademeli Flash Distilasyon
MVC	Mekanik Buhar Sıkıştırmalı Damıtma
NF	Nanofiltrasyon
OPEX	İşletme Giderleri
PAC	Poli Alüminyum Klorid
P_pump	Pompa Gücü
ppm	Milyonda Konsantrasyon
ppt	Binde Konsantrasyon
PRO	Basınç Geciktirmeli Osmoz
PSU	Pratik Tuzluluk Birimi
PX	Basınç Değiştirici
RCP4.5	Temsili Konsantrasyon Yolu 4.5 Senaryosu
RCP8.5	Temsili Konsantrasyon Yolu 8.5 Senaryosu
RED	Ters Elektrodiyaliz
RO	Ters Osmoz
SDI	Silt Yoğunluk İndeksi
SEC	Spesifik Enerji Tüketimi

SEM	Taramalı Elektron Mikroskobu
SS	Paslanmaz Çelik
SWRO	Deniz Suyu Ters Osmoz
TDS	Toplam Çözünmüş Katı Madde
TFC	İnce Film Kompozit Membran
TMP	Transmembran Basınç
TOC	Toplam Organik Karbon
TÜİK	Türkiye İstatistik Kurumu
UF	Ultrafiltrasyon
USD	ABD Doları
VCD	Buhar Sıkıştırmalı Distilasyon
VMD	Vakum Membran Distilasyonu
VMEMD	Vakum Membran Distilasyonu
ZLD	Sıfır Sıvı Deşarj

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 1.1 Marmara Avşa İçme Suyu Arıtma Tesisi **17**
Şekil 1.2 Ters osmoz membranları **17**
Şekil 1.3 Otomatik kum filtrasyon ünitesi **18**
Şekil 1.4 Ekinlik Adası İçme Suyu Arıtma Tesisi dış görünüm **18**
Şekil 1.5 Ekinlik Adası İçme Suyu Arıtma Tesisi iç görünüm **19**
Şekil 2.1 Ters osmoz çalışma prensibi **23**
Şekil 2.2 Ters osmoz ve filtrasyon çaplarının muhtelif maddeleri tutumu **24**
Şekil 2.3 Ters osmoz çalışma basıncında px enerji tüketimi **33**
Şekil 2.4 Bipolar membranlı elektrodiyaliz şematiği **42**
Şekil 2.5 Ters elektrodiyaliz şematiği **43**
Şekil 2.6 Vakum membran filtrasyonu **44**
Şekil 2.7 Kapasitif deiyonizasyon sistemi **45**
Şekil 2.8 Marmara denizi yıllık ortalama sıcaklık değerleri grafiği **65**
Şekil 2.9 Son yıllara göre aylık ortalama sıcaklık değerleri grafiği **66**
Şekil 2.10 Ön arıtmalı ters osmoz iş akım şeması **72**
Şekil 3.1 CTD donatılı rozet sistem niskin şişeleri gösterimi **75**
Şekil 3.2 CTD donatılı rozet sistem niskin şişeleri diğer gösterim **76**
Şekil 3.3 Niskin şişelerinden numune dolumu **77**
Şekil 3.4 Şişelenmiş bir numune **78**
Şekil 3.5 Ön arıtma iyon değiştirici reçine **79**
Şekil 3.6 Sterlitech HP4750 ters osmoz cihazı dış görünüm **81**
Şekil 3.7 Sterlitech HP4750 ters osmoz cihazı iç görünüm-1 ..... **82**
Şekil 3.8 Sterlitech HP4750 ters osmoz cihazı iç görünüm-2 ..... **82**
Şekil 3.9 Sterlitech HP4750 ters osmoz cihazı **83**
Şekil 3.10 Basınçlandırıcı tüp **84**
Şekil 3.11 Bipolar membranlı elektrodiyaliz cihazı figürü **86**
Şekil 3.12 Elektrodiyaliz cihazı **86**
Şekil 4.1 Ters osmoz akı-zaman **90**

Şekil 4.2 Zamana göre çıkış suyu ara kademe iletkenlik değeri **.....97**
Şekil 4.3 Zamana göre dip kademe çıkış suyu iletkenlik değeri **.....100**
Şekil 4.4 Elektrodiyaliz üç kademe için iletkenlik – zaman**.....101**

TABLO LİSTESİ

Tablo 1.1 Marmara Denizi'nde kullanılabilecek desalinasyon metotları **8**
Tablo 1.2 Marmara Bölgesi barajları **11**
Tablo 1.3 Marmara Bölgesi akarsuları **13**
Tablo 1.4 Marmara Bölgesi gölleri **14**
Tablo 1.5 Marmara Bölgesi'ndeki diğer su kaynaklarının karşılaştırılması **15**
Tablo 2.1 Geri kazanım teknolojileri karşılaştırması **36**
Tablo 2.2 BMED reaksiyon şeması **40**
Tablo 2.3 Klasik ED vs BMED farkı özeti **42**
Tablo 2.4 Membran distilasyonu dezavantajları **47**
Tablo 2.5 Çok aşamalı distilasyon çalışma özellikleri **50**
Tablo 2.6 Distilasyon türlerinin avantaj ve dezavantajları **52**
Tablo 2.7 Teknik açıdan değerlendirme **54**
Tablo 2.8 Ekonomik açıdan değerlendirme **58**
Tablo 2.9 Uygulanabilirlik açısından değerlendirme **61**
Tablo 2.10 Ters osmoz ve elektrodiyalizi öne çıkaran özellikler **62**
Tablo 2.11 Sıcaklığın giderim verimi ve sec için etkisi **68**
Tablo 3.1 Ters osmoz cihazı teknik özellikler **81**
Tablo 3.2 Elektrodiyaliz cihazı teknik özellikler **85**
Tablo 4.1 Ters osmoz akı-zaman **87**
Tablo 4.2 Ters osmoz giderim verimleri **90**
Tablo 4.3 Elektrodiyaliz deneyi yüzey kademe süre - iletkenlik **93**
Tablo 4.4 Elektrodiyaliz deneyi yüzey kademe elektrik tüketimi **95**
Tablo 4.5 Elektrodiyaliz deneyi ara kademe süre-iletkenlik **96**
Tablo 4.6 Elektrodiyaliz deneyi ara kademe elektrik tüketimi **98**
Tablo 4.7 Elektrodiyaliz deneyi dip kademe süre-iletkenlik **98**
Tablo 4.8 Elektrodiyaliz deneyi ara kademe elektrik tüketimi **100**
Tablo 4.9 Üç kademe için giderim verimleri **101**
Tablo 5.1 Uygulanabilirlik açısından karşılaştırma **108**
Tablo 5.2 Teknik açıdan karşılaştırma **110**

Tablo 5.3 Ekonomik açıdan karşılaştırma 111

HARİTA LİSTESİ

Harita 1.1 Günümüz su tükenmesi riski **4**
Harita 1.2 Günümüz su stresi riski **4**
Harita 1.3 2030 yılı su tükenmesi riski **5**
Harita 1.4 2030 yılı su stresi riski **5**
Harita 1.5 2050 yılı su tükenmesi riski **6**
Harita 1.6 2050 yılı su stresi riski **6**
Harita 1.7 2080 yılı su tükenmesi riski **7**
Harita 1.8 2080 yılı su stresi riski **7**
Harita 3.1 Numune alım bölgesi gösterimi **75**

ÖZET

Marmara Denizi'nde Desalinasyon Sistemlerinin Kullanımının Teknik, Ekonomik ve Uygulanabilirlik Açısından Karşılaştırılması

Can Berker KURUM

Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Danışman: Doç. Dr. Fatih İLHAN

Marmara Bölgesi'nde içme-kullanım suyu arzı günümüzde yetersizdir ve bu yetersizliğin gelecekte artacağı öngörülmektedir. Bu çalışma, Marmara Denizi'nde kullanılabilecek desalinasyon sistemlerini teknik, ekonomik ve uygulanabilirlik ölçütleriyle karşılaştırmıştır. Hedef, su stresiyle başa çıkmak ve kaynakları mevsimsel olarak hibrit ve stratejik kullanmaktır. İnceleme, farklı denizlerde raporlanan uygulamaların avantaj ve dezavantajlarına dayandırılmıştır. Kriterler teknik özellikler, arıtma verimliliği ve enerji gereksinimidir. Entegre enerji iyileştirme/geri kazanım teknolojileri ve işletme maliyetleri ayrıca değerlendirilmiştir. Bu teknolojilerin sistem verimliliğini artırdığı gösterilmiştir. Enerji sarfiyatı azalmış ve çıkış suyu kalitesi iyileşmiştir. Müsilaj ve brine yönetimi de kapsamda ele alınmıştır. Literatür karşılaştırmaları sonucunda ters osmoz ve elektrodiyaliz en uygun prosesler olarak seçilmiştir. Marmara Denizi açıklarından alınan yüzey–ara–dip numunelerinde ters osmoz için 11,11722–10,86333–10,18222 L/m²·sa akı ve %99,75–99,73–99,76 giderim elde edilmiştir. Elektrodiyalizde tuzluluğa bağlı elektrik değerleri 15–17 Volt (V) ve 1,1–1,4

Amper (A) aralığında değişmiş; 0,68 μ/cm'ye ulaşım sırasında %97,91–98,23–98,51 giderim ve %17,64–15,59–14,47 performans ölçülmüştür. İletkenlik düştükçe giderim süresi uzamış ve performans azalmıştır. Seri ünite yapısı, nihai verimin son kademelerde belirginleşmesine yol açmıştır; ters osmozda ise paralel ve bağımsız ünitelerle işletim mümkündür. Ters osmozun dalga–rüzgâr–güneş entegrasyonuna elverişli olduğu belirlenmiştir. Isı eşanjörü destekli enerji azaltımı, enerji tüketimini düşürürken besleme suyu sıcaklığını artırarak giderimi yükseltebilmektedir. Bulgular, arıtma performansı, enerji geri kazanımı, ürün eldesi için geçen süre ve yenilenebilir enerji entegrasyonu birlikte yorumlanmıştır. Enerji iyileştirme/geri kazanım üniteleri desalinasyon prosesine entegre edilebilir ve özgül tüketimi azaltabilir. Sonuç olarak, deniz suyu sıcaklığının 20 °C üzerinde seyrettiği ve rezervlerin yetersizleşmeye başladığı dönemlerde ters osmozun baraj ve diğer kaynaklarla hibrit işletilmesi daha rasyonel ve fizibil bulunmuştur.

Anahtar Kelimeler: Marmara Denizi, ters osmoz, elektrodiyaliz

ABSTRACT

Comparison of the Use of Desalination Systems in Marmara Sea in Terms of Technical, Economic and Applicability

Can Berker KURUM

Department of Environmental Engineering

Master of Science Thesis

Supervisor: Doç. Dr. Fatih İLHAN

The supply of drinking and utility water in the Marmara Region is currently insufficient, and this inadequacy is projected to worsen in the future. This study compares desalination systems that can be used in the Marmara Sea based on technical, economic, and feasibility criteria. The aim is to cope with water stress and to use resources seasonally in a hybrid and strategic manner. The review is based on the advantages and disadvantages of applications reported in different seas. The criteria are technical specifications, treatment efficiency, and energy requirements. Integrated energy recovery/rehabilitation technologies and operating costs were also evaluated. It was shown that these technologies increase system efficiency. Energy consumption decreased, and effluent quality improved. Mucilage and brine management were also addressed. As a result of literature comparisons, reverse osmosis and electrodialysis were selected as the most suitable processes. Surface, subsurface, and bottom samples taken from the open waters of the Marmara Sea showed fluxes of 11.11722–10.86333–10.18222 L/m²·h and removal rates of 99.75–99.73–99.76% for reverse osmosis. Electrical values in

electrodialysis varied between 15–17 Volt (V) and 1.1–1.4 Amps (A) depending on salinity; removal rates of 97.91–98.23–98.51% and performance rates of 17.64–15.59–14.47% were measured when reaching 0.68 μ/cm. As conductivity decreased, the removal time increased and performance decreased. The series unit structure led to the final efficiency becoming more pronounced in the later stages; in reverse osmosis, operation with parallel and independent units is possible. It was determined that reverse osmosis is suitable for wave-wind-solar integration. Energy reduction assisted by heat exchangers can increase desalination by raising feedwater temperature while decreasing energy consumption. The findings were interpreted by considering treatment performance, energy recovery, time to product production, and renewable energy integration together. Energy improvement/recovery units can be integrated into the desalination process and reduce specific consumption. Consequently, hybrid operation of reverse osmosis with dams and other sources was found to be more rational and feasible during periods when seawater temperatures exceed 20°C and reserves begin to deplete.

Keywords: Marmara Sea, reverse osmosis, electrodialysis

1
GİRİŞ

1.1 Araştırmanın Gerekçesi ve Önemi

Marmara Bölgesi, Türkiye'nin en yoğun nüfuslu ve en yüksek sanayi kapasitesine sahip bölgesidir. Artan nüfus, hızla gelişen endüstriyel faaliyetler ve iklim krizine bağlı kuraklık, bölgedeki mevcut su temin altyapısını zorlamaktadır. Son yıllarda baraj doluluk oranlarındaki düşüş ve akarsu debilerinde gözlenen azalma, içme ve endüstriyel su ihtiyacının sürdürülebilir şekilde karşılanmasını tehlikeye atmaktadır. Bu rapor, Marmara Denizi'nden deniz suyu desalinasyonu yoluyla tatlı su üretiminin bölgesel su arz güvenliği açısından gerekliliğini sayısal verilerle ortaya koymaktadır.

Su kaynaklarının sürdürülebilir yönetimi, özellikle nüfus ve endüstri yoğunluğu yüksek bölgelerde kritik bir önem taşımaktadır. Türkiye'de su kaynakları kişi başına yıllık 1.519 m^3 seviyesinde olup, bu değer uluslararası sınıflamaya göre su stresi yaşayan ülkeler kategorisine karşılık gelmekte ve hatta 2030 ve 2040 yıllarında 1.200 m^3 ve 1.116 m^3 e kadar düşmesi öngörülmektedir [1]. Marmara Bölgesi, Türkiye'nin ekonomik, sanayi ve lojistik merkezi olarak, ülke su talebinin büyük bir kısmını tek başına oluşturmakta; aynı zamanda kentsel ve endüstriyel atıksuların önemli bir kaynağıdır.

Son yıllarda iklim krizinin etkisiyle yaşanan yağış anomalileri, baraj doluluk oranlarının kritik seviyelere düşmesi ve kuraklık vakalarının artışı, Marmara Bölgesi için alternatif su kaynaklarının araştırılmasını zorunlu hale getirmiştir [2]. Bu bağlamda, deniz suyunun desalinasyonu, bölgenin içme suyu ve sanayi suyu ihtiyacını karşılamada stratejik bir çözüm olarak öne çıkmaktadır.

1.1.1 Fazla Nüfus Yoğunluğu

- TÜİK'in 2024 verilerine göre İstanbul'un nüfusu 15,7 milyon, Marmara Bölgesi toplam nüfusu ise ~26 milyon olarak kaydedilmiştir [3]

- Bu, Türkiye nüfusunun yaklaşık %31'ine karşılık gelmektedir.
- İstanbul'un günlük kişi başı su tüketimi ortalama 190–200 litre düzeyindedir [4]
- Buna göre yalnızca İstanbul'un günlük su ihtiyacı yaklaşık 3 milyon m³/gün, yıllık ise 1,1 milyar m³ civarındadır [5]

Marmara Bölgesi'nin yıllık su potansiyeli Devlet Su İşleri (DSİ) tarafından 5,85 milyar m³ olarak belirlenmiştir. Bu bölgenin yüzölçümü 2.308.464 hektar olup, Türkiye'nin toplam alanının %3'ünü oluşturur. Marmara Havzası'nın sınırları içerisinde İstanbul, Kocaeli, Balıkesir, Bursa, Çanakkale ve Kırklareli illeri bulunmaktadır [6].

Bu yüksek nüfus, mevcut baraj ve yeraltı suyu kaynaklarının kapasitesini zorlamakta ve su arz-talep dengesinde açık yaratmaktadır.

1.1.2 Sanayi ve Endüstriyel Yük

Marmara Bölgesi, Türkiye sanayi üretiminin merkezi konumundadır:

- İstanbul, Kocaeli, Bursa ve Tekirdağ illeri, ülke imalat sanayisinin %45'ini oluşturmaktadır [7]
- Endüstriyel tesislerin toplam su tüketimi Marmara'da 500.000–700.000 m³/gün seviyelerindedir [8]
- Bu tesislerden kaynaklanan atıksu ve kirleticiler, Marmara Denizi'ne deşarj edilmekte ve deniz suyunun kalitesini doğrudan etkilemektedir [9].

1.1.3 İklim Krizi ve Kuraklık Etkileri

Su tükenmesi ve su stresi ile ilgili RCP4.5 ve RCP8.5 iklim senaryoları altında günümüz, 2030, 2050 ve 2080 yıllarına ait haritalar (Harita 1.1, Harita 1.2, Harita 1.3, Harita 1.4, Harita 1.5, Harita 1.6, Harita1.7, Harita 1.8) verilmiştir [10].

1.1.3.1 Yağış Azalışı ve Akım Rejimleri

Ayazma Havzası ve çevresinde yapılan modellemeler, RCP4.5 ve RCP8.5 iklim senaryoları altında 2050 yılına kadar akarsu akışlarının belirgin biçimde azalacağını göstermektedir [11], [12].

2023 tarihli çalışmada, Marmara Bölgesi akımlarında %18–32 oranında düşüş öngörülmektedir [13].

1.1.3.2 Baraj Doluluk Oranları Yetersizliği

Marmara'daki mevcut barajların toplam içme suyu depolama kapasitesi yaklaşık 1,8 milyar m^3 olup, bu kapasite İstanbul'un tek başına yıllık ihtiyacını karşılamada yetersiz kalmaktadır.

İSKİ'nin 2023 raporuna göre, kurak dönemlerde İstanbul'un su ihtiyacının %25'e varan kısmı başka havzalardan su transferi ile sağlanmaktadır [14].

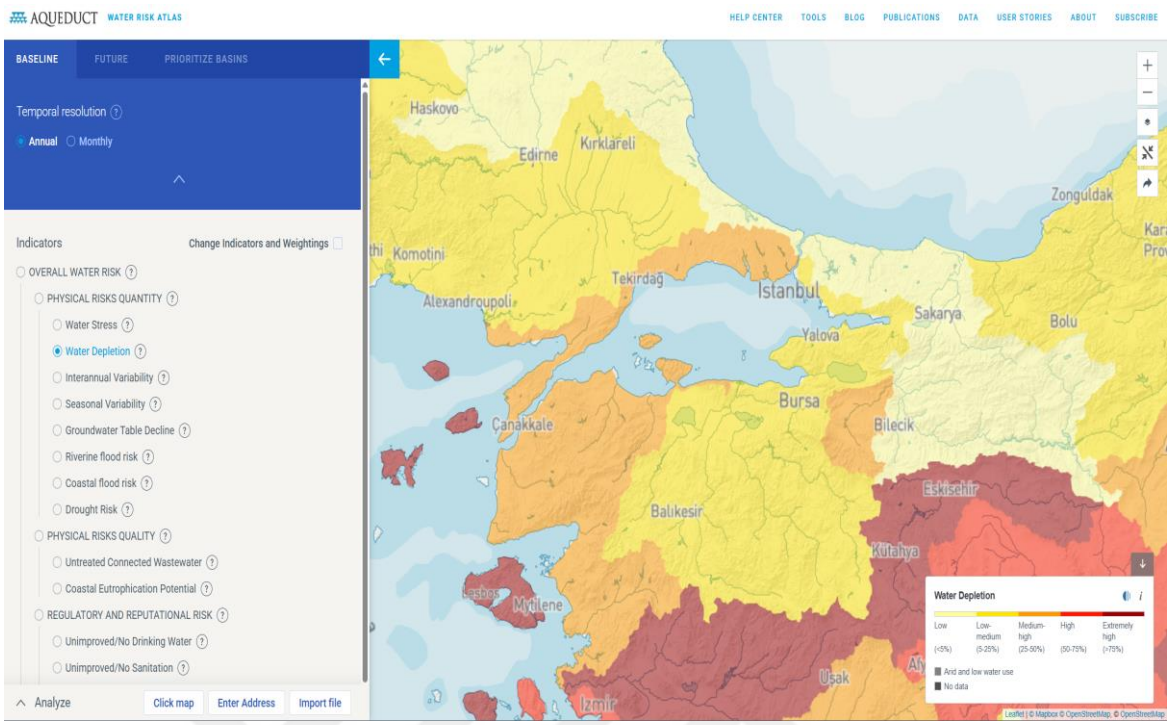
1.1.4 Su stresi ve Su Kıtlığı

Dünya Kaynakları Enstitüsü'nün (World Resources Institute) Aqueduct internet sitesinde yayımlanan risk atlasında su stresi ve su tükenmesi risk haritaları incelenmiştir [15].

1.1.4.1 Günümüz

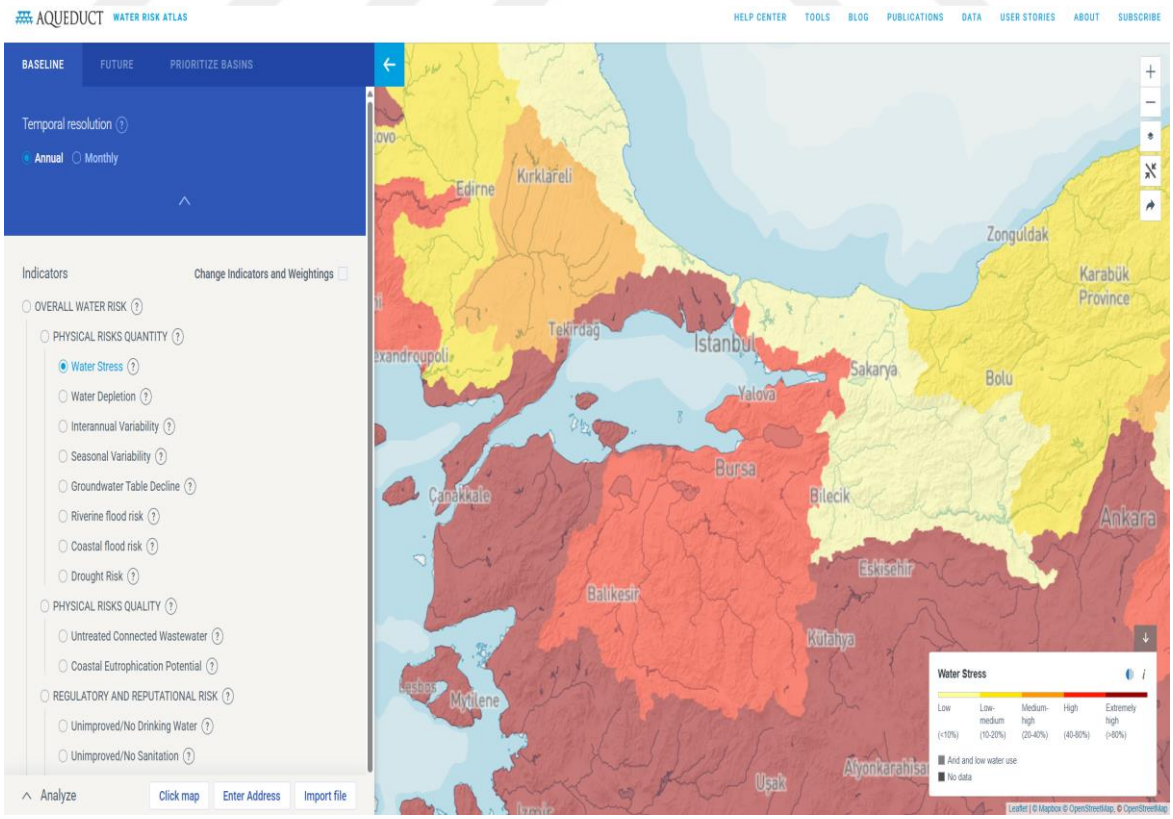
Günümüzde Marmara Bölgesinin ortalamasına baktığımızda su tükenmesi "orta" riske yakın ve su stresi ise "çok yüksek" riske yakın konumda gözükmektedir [10].

Su Tükenmesi



Harita 1.1 Günümüz su tükenmesi riski

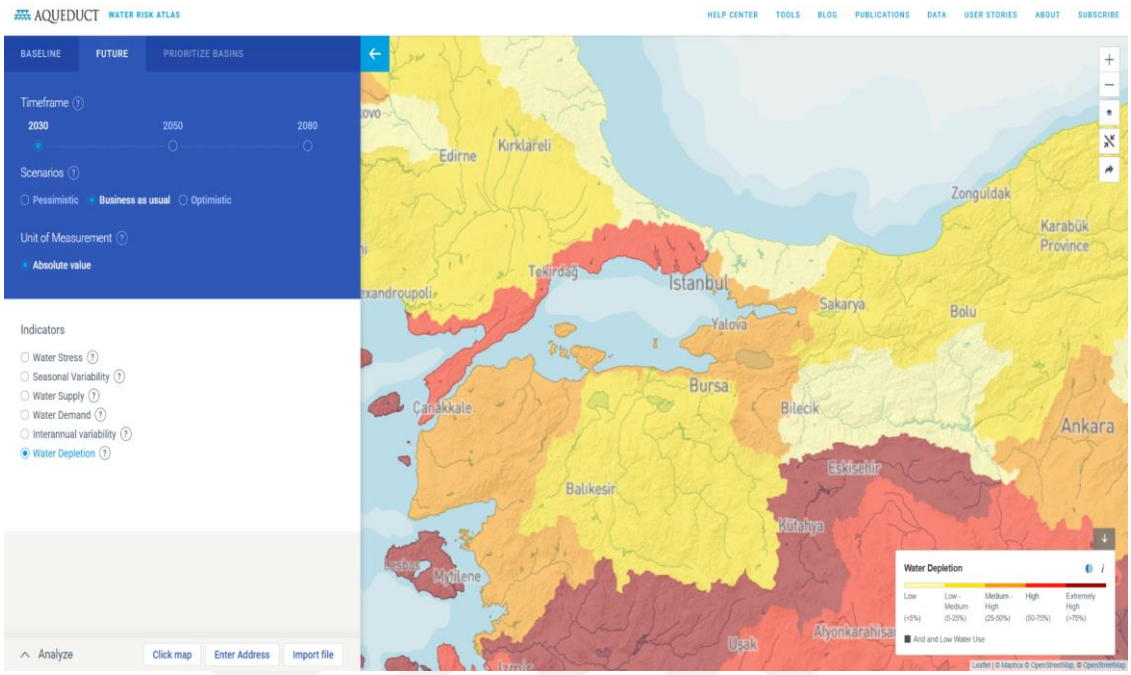
Su Stresi



Harita 1.2 Günümüz su stresi riski

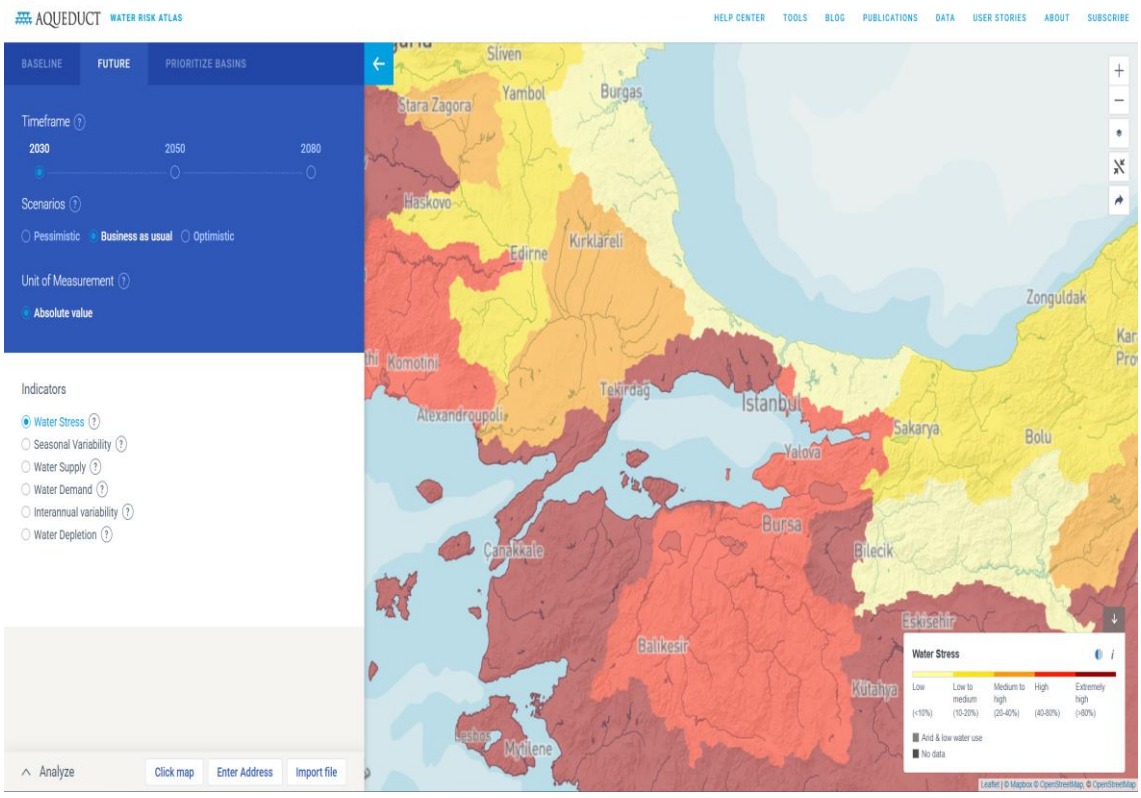
1.1.4.2 2030 Yılı

Su Tükenmesi



Harita 1.3 2030 yılı su tükenmesi riski

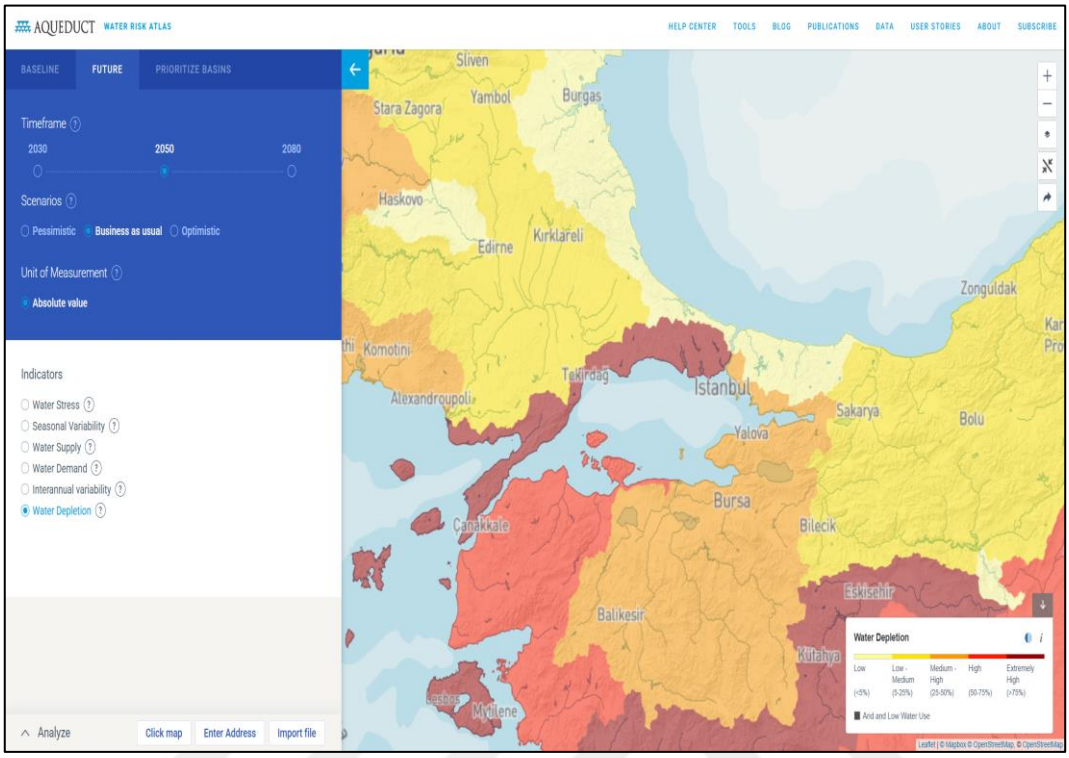
Su Stresi



Harita 1.4 2030 yılı su stresi riski

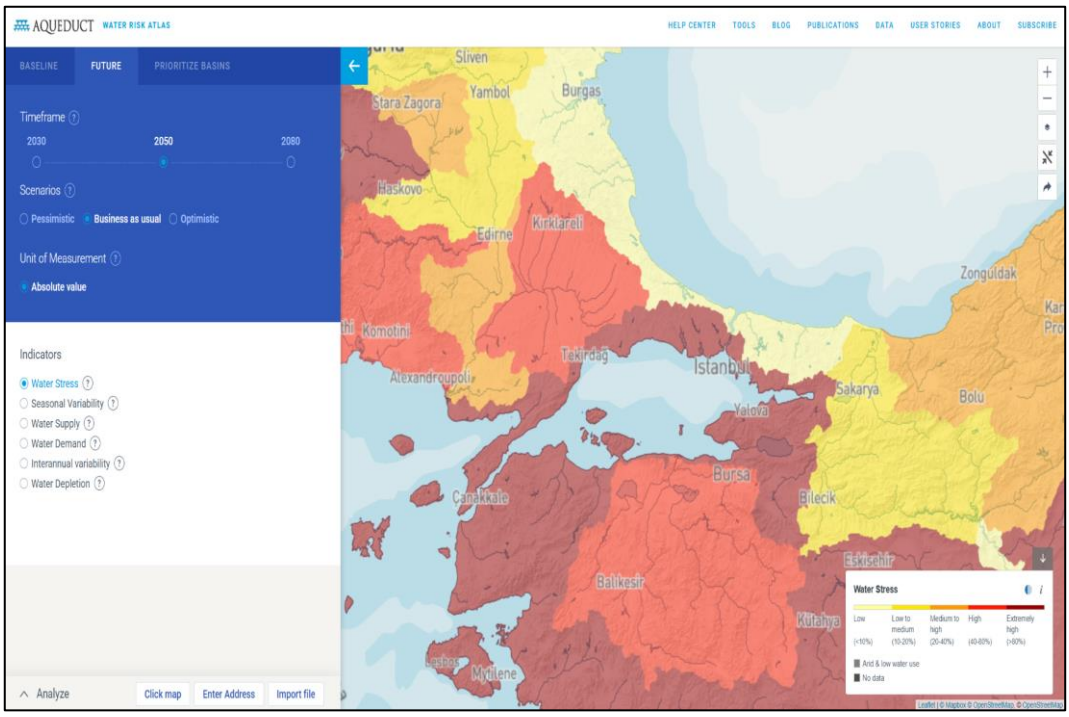
1.1.4.3 2050 Yılı

Su Tükenmesi



Harita 1.5 2050 yılı su tükenmesi riski

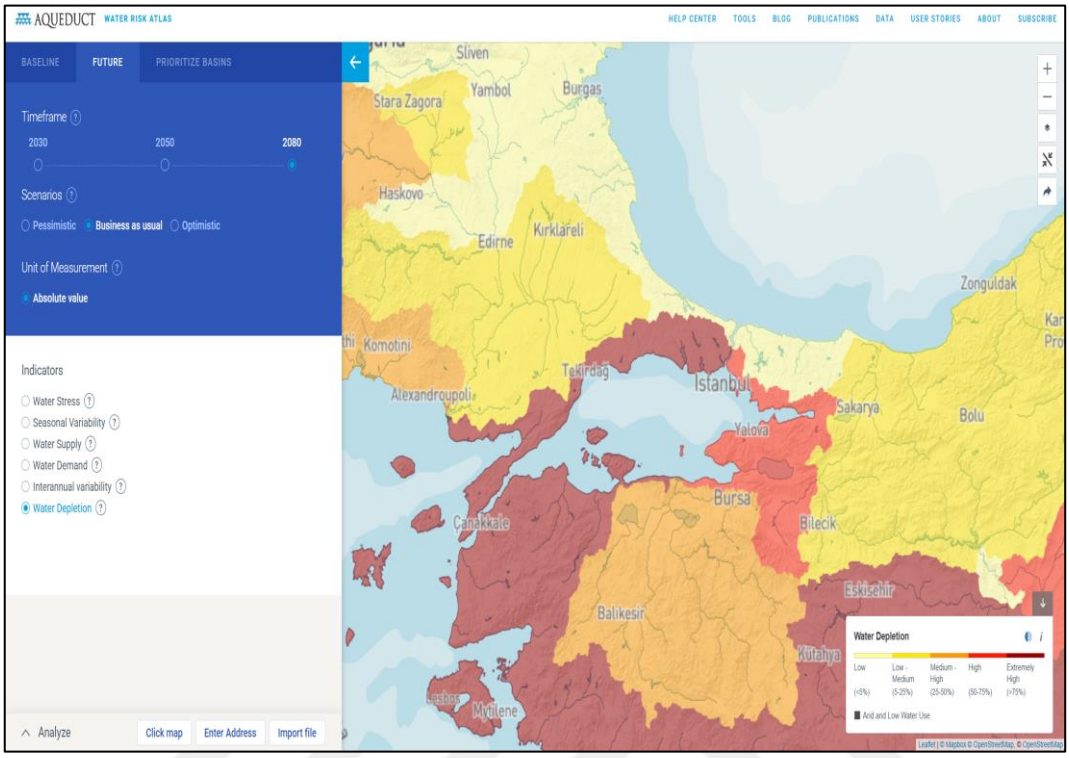
Su Stresi



Harita 1.6 2050 yılı su stresi riski

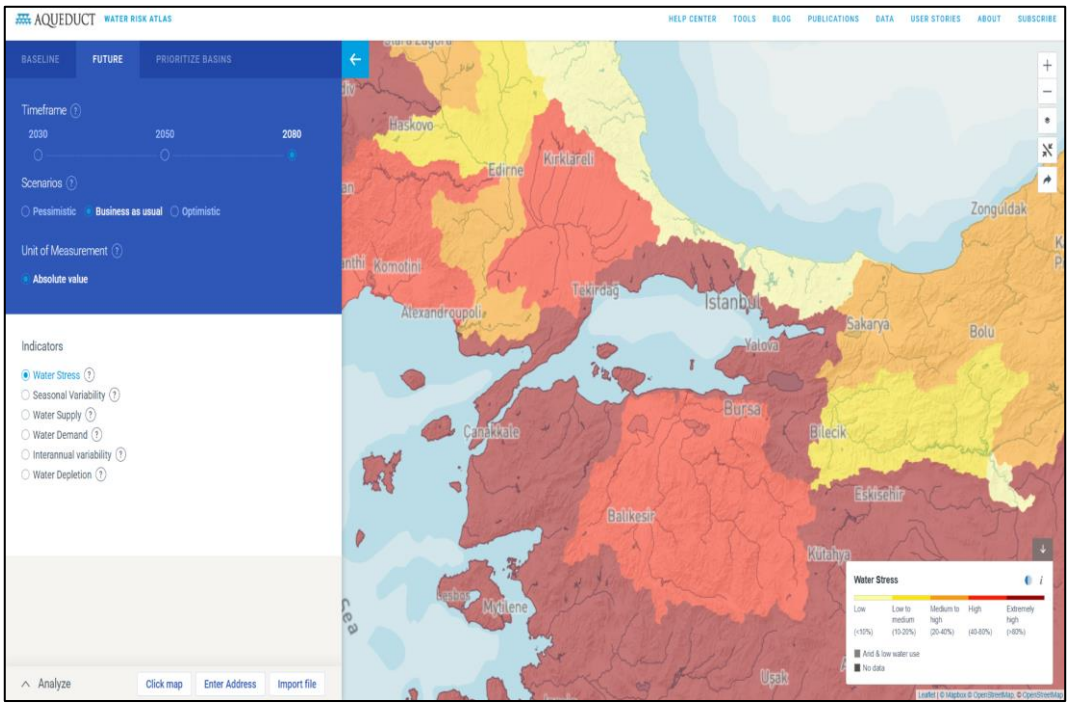
1.1.4.4 2080 Yılı

Su Tükenmesi



Harita 1.7 2080 yılı su tükenmesi riski

Su Stresi



Harita 1.8 2080 yılı su stresi riski

1.1.5 Marmara Denizi'nin Su Kalitesi ve Kirlilik Yükü

Marmara Denizi, Karadeniz ve Akdeniz arasında bir geçiş denizi olup iki katmanlı akıntı sistemi ile çalışmaktadır [16]

- Marmara'ya gelen kirleticilerin %60'ı Karadeniz kaynaklı, %40'ı kara kaynaklıdır [9]
- Endüstriyel deşarjlar, evsel atıksular, tarımsal drenaj ve mikroplastik yükleri Marmara Denizi'nin su kalitesini olumsuz etkilemektedir.

Bu durum, desalinasyon tesislerinde ileri ön arıtma süreçlerini (koagülasyon, ultrafiltrasyon, aktif karbon vb.) zorunlu hale getirmektedir [17].

1.1.6 Marmara Denizi'nde Kullanılabilecek Metotlar

Tablo 1.1 Marmara Denizi'nde kullanılabilecek desalinasyon metotları

Teknoloji	Avantajları	Zorluklar	Enerji Tüketimi	Kaynak
Ters Osmoz (RO)	Yüksek verim (%40–50), ticari olarak yaygın	Ön arıtma maliyeti, brine bertarafı	2,5–4,5 kWh/m³	[18], [19]
Elektrodiyaliz (ED)	Daha düşük tuzluluk suyu için uygun, modüler yapı	Yüksek enerji ihtiyacı, ölçek sınırlaması	8–12 kWh/m³	[20], [21]
Çok Kademeli Flash Dist.	Büyük ölçekli projelerde yüksek kapasite	Yüksek yatırım maliyeti	10–15 kWh/m³	[22]

Yapılan bir çalışmada Marmara Denizi için en uygun teknoloji, ekonomik açıdan Ters Osmoz Sistemleri olduğu öne çıkmıştır [23]. ED teknolojisi ise küçük kıyı belediyelerinde düşük kapasiteli içme suyu üretimi için kullanılabilir. Çok kademeli flash distilasyonnun ise hem yatırım maliyeti hem de işletme sırasındaki enerji tüketimi yüksek çıkmaktadır (Tablo 1.1)

1.1.7 Çevresel ve Enerji Yönetimi

- Brine (tuzlu konsantre) yönetimi, Marmara Denizi'nin kapalı havza özellikleri nedeniyle kritik öneme sahiptir [24]
- Çözüm olarak, brine akımlarının akıntı modellemeleri ile seyreltilmesi veya tuz geri kazanımı önerilmektedir [25]

- Yenilenebilir enerji entegrasyonu ile Ters Osmoz tesislerinin karbon ayak izi %30–40 azaltılabilir. Özellikle rüzgar ve güneş enerjisi potansiyeli, Marmara kıyıları için uygundur [26].

1.1.8 Sonuç ve Öneriler

- Marmara Bölgesi, Türkiye nüfusunun üçte birini barındırmakta ve ülke ekonomisinin motoru olan sanayi yükünü taşımaktadır
- İklim krizi, kuraklık ve baraj kapasitesindeki yetersizlik, mevcut su arz sisteminin kırılganlığını artırmaktadır.
- Geleneksel içme suyu arıtma tesisleri, Marmara bölgesi'nin artan su talebini karşılamak için yetersiz kalmaktadır. Bu bağlamda, Marmara Denizi'nin su temini ihtiyacını karşılamak için alternatif çözümler arayışında büyük önem taşımaktadır.
- Desalinasyon sistemleri, kelime anlmından da görüldüğü gibi tuzlu suyu tatlı suya dönüştürmek için kullanılmaktadır. Ancak, desalinasyon sistemlerinin teknik özellikleri, kurulum maliyetleri, işletme giderleri ve çevresel etkileri gibi faktörlerin detaylı bir şekilde değerlendirilmesi gerekmektedir.
- Marmara Denizi'nden deniz suyu desalinasyonu, özellikle kritik içme suyu ihtiyacı ve endüstriyel su kullanımı için stratejik bir çözüm sunmaktadır. Uygulamada ters osmoz (RO) sistemleri ekonomik olarak en uygun teknoloji olup, çevresel etkilerin azaltılması için brine yönetimi ve ileri ön arıtma süreçleri kritik önemdedir.

1.2 Tezin Kapsamı

Bu tez çalışması, Marmara Denizi'nde desalinasyon sistemlerinin teknik, ekonomik ve uygulanabilirlik açılarından karşılaştırılmasını içermektedir. Çalışma, Marmara Denizi'nin su temini sorunlarına çözüm arayışıyla ilgilidir ve desalinasyon sistemlerinin bu bağlamdaki rolünü değerlendirmeyi amaçlamaktadır.

İçilebilir Su Kıtlığı ve Çözüm Arayışları: Dünyadaki içilebilir su kaynaklarının sınırlı olması ve su kıtlığının birçok insanı etkilemesi üzerine genel bir değerlendirme.

- Desalinasyonun Önemi ve Gelişimi: İçme suyu sağlanmasında desalinasyonun önemi ve son yıllardaki gelişimi hakkında bilgi verilmesi.
- Farklı Deiyonizasyon Prosesleri: Distilasyon, Ters Osmoz, Elektrodiyaliz, Kapasitif Deiyonizasyon, Membran Distilasyonu, Vakum Filtrasyonu gibi farklı deiyonizasyon proseslerinin tanıtılması ve çalışma prensiplerinin açıklanması.
- Proseslerin Karşılaştırılması: Distilasyon, Ters Osmoz ve Elektrodiyaliz proseslerinin avantaj ve dezavantajlarının belirtilmesi ve diğer deiyonizasyon proseslerine göre üstünlükleri veya dezavantajları.
- Marmara bölgesi'nde Uygulanabilirlik ve Ekonomik Değerlendirme: Her bir deiyonizasyon prosesinin Marmara Denizi'ndeki özelliklere ve ekonomik faktörlere göre nasıl uygulanabileceğinin değerlendirilmesi.
- Marmara Denizi'ndeki su temini sorunlarının analizi ve mevcut çözüm yöntemlerinin incelenmesi.
- Desalinasyon sistemlerinin işleyiş prensiplerinin ve farklı tiplerinin detaylı bir şekilde tanıtılması.
- Farklı desalinasyon sistemlerinin teknik özelliklerinin karşılaştırılması ve verimliliklerinin değerlendirilmesi.
- Desalinasyon sistemlerinin kurulum maliyetleri, işletme giderleri ve geri dönüş sürelerinin ekonomik açıdan analizi.
- Marmara bölgesi'ne özgü iklim ve coğrafi koşulların dikkate alınmasıyla desalinasyon sistemlerinin uygulanabilirliğinin değerlendirilmesi.

1.2.1 Nüfus ve Günlük Su Tüketimi

Marmara Bölgesi'nde yaşayan toplam nüfus 2023 yılında yaklaşık 26,5 milyon kişidir [5]. Her bir kişinin günlük su tüketimini ortalama 200 litre olarak kabul edersek:

26,5 milyon kişi × 200 litre/gün = 5.300 milyon litre/gün (5,3 milyar litre/gün)

Yıllık su ihtiyacı = 5,3 milyar litre/gün × 365 gün = 1.929,5 milyar litre = 1.929,5 milyon m^3 = 1.929,5 km^3

1.2.2 Tarım Su Tüketimi

Tarım, Marmara Bölgesi'nde önemli bir su tüketicisi olmayı sürdürmektedir. Türkiye'deki tarım suyu ihtiyacı yıllık yaklaşık 50 milyar m^3'dür. Marmara

Bölgesi'nin bu ihtiyacı karşılayan payı, yaklaşık olarak %15-20 arasında olabilir [27].

Tarım suyu tahmini = 50 milyar m^3 × %15 = 7,5 milyar m^3 (7,5 km^3)

1.2.3 Sanayi Su Tüketimi

Sanayi, suyun önemli bir kullanım alanıdır ve Marmara Bölgesi Türkiye'nin en sanayileşmiş bölgesi olduğundan, su kullanım oranı yüksektir. Türkiye'nin sanayi sektöründeki yıllık su tüketimi yaklaşık 10 milyar m^3'dür. Marmara Bölgesi'nin sanayiye olan katkısı %25-30 civarındadır [28].

Sanayi suyu tahmini = 10 milyar m^3 × %25 = 2,5 milyar m^3 (2,5 km^3)

1.2.4 Toplam Su İhtiyacı Hesaplaması

- **İçme ve Kullanma Suyu**: 1,93 km^3
- **Tarım Suyu**: 7,5 km^3
- **Sanayi Suyu**: 2,5 km^3

Toplam Yıllık Su İhtiyacı = 1,93 km^3 + 7,5 km^3 + 2,5 km^3 **= 11,93 km^3**

1.2.5 Marmara Bölgesi Barajları

Marmara Bölgesi'ndeki barajlar, bölgenin su ihtiyacını karşılamada önemli bir rol oynamaktadır. Bu barajlar, içme suyu temini, sulama ve enerji üretimi için kullanılmaktadır. Marmara Bölgesi'ndeki önemli barajları kapasiteleri ile ilgili sayısal bilgiler ve açıklamaları (Tablo 1.2) sunulmuştur [29], [30], [31].

Tablo 1.2 Marmara Bölgesi barajları

Baraj Adı	İl	Su Depolama Kapasitesi (m^3)	Kullanım Alanları	Açıklama
Büyükçekmece Barajı	İstanbul	220 milyon	İçme suyu, sulama, ekosistem sağlığı	İstanbul'un batısında yer alır; Büyükçekmece Gölü ve çevresinden su sağlar. Şehrin içme suyu ihtiyacında önemli paya sahiptir.
Alibeyköy Barajı	İstanbul	51 milyon	İçme suyu	İstanbul'un içme suyu ihtiyacına katkı sağlar.
Küçükçekmece Barajı	İstanbul	50 milyon	İçme suyu	İçme suyu temini amacıyla kullanılır.

Tablo 1.2 Marmara Bölgesi barajları (devamı)

Istranca Barajı	Kırklareli	84 milyon	İçme suyu, sulama	Bölgesel içme suyu ve tarımsal sulama amacıyla kullanılmaktadır.
Köprüçay Barajı	Bursa	250 milyon	Tarım sulaması, içme suyu, enerji üretimi	Çok amaçlı bir barajdır; enerji üretimi de sağlar.
Yeniköy Barajı	Sakarya	60 milyon	İçme suyu, sulama	Sakarya ve çevresine su sağlar.
Papuçdere Barajı	İstanbul	37 milyon	İçme suyu	İstanbul'un içme suyu kaynaklarından biridir.
Düzce Barajı	Düzce	150 milyon	İçme suyu, sulama	Bölgesel su temini ve tarım için önemlidir.
Sakarya Barajı	Sakarya	350 milyon	İçme suyu, sulama, enerji üretimi	Yüksek kapasiteli, çok amaçlı bir barajdır.
Çatalca Barajı	İstanbul	40 milyon	İçme suyu	İstanbul'un batısında yer alan içme suyu barajıdır.
Muradiye Barajı	Bursa	55 milyon	İçme suyu, sulama	Bursa'nın su ihtiyacını destekler.
Gökçeada Barajı	Çanakkale	9 milyon	İçme suyu	Gökçeada'nın içme suyu kaynağıdır.
Cumhuriyet Barajı	İstanbul	15 milyon	İçme suyu	İstanbul'un içme suyu temini için kullanılır.
Meriç Barajı	Edirne	45 milyon	Sulama, içme suyu	Meriç havzasında sulama ve içme suyu amacıyla kullanılmaktadır.

Ancak, Marmara Bölgesi'ndeki baraj kapasiteleri, bölgedeki su talebinin sürekli artan nüfus ve sanayileşme gibi faktörlerden dolayı artmasıyla zaman zaman yetersiz kalabilmektedir. Bu nedenle, su kaynaklarının verimli kullanımı ve yeni baraj projeleri büyük önem taşımaktadır. Ayrıca, barajlarda suyun depolanması ve yönetimi, kuraklık ve su kıtlığı gibi durumlarda kritik rol oynamaktadır.

1.2.6 Akarsular

Marmara Bölgesi'ndeki akarsular, bölgenin su dengesini sağlamada kritik rol oynar. Bölgedeki en önemli akarsuların Tablo 1.3'te verilmiştir [32], [33], [34], [35].

Tablo 1.3 Marmara Bölgesi akarsuları

Akarsu Adı	İl(ler)	Uzunluk (km)	Havza Alanı (km^2)	Kullanım Alanları / Özellikler	Açıklama
Sakarya Nehri	Sakarya, Kocaeli	824	17.000	İçme suyu, sulama	Marmara Bölgesi'nin en büyük akarsularından biridir; Sakarya ve Kocaeli illerine su sağlar.
Büyükçekmece Gölü Deresi	İstanbul	Belirtilmemiş	Belirtilmemiş	İçme suyu, çevresel denge	İstanbul'un batısındaki Büyükçekmece Gölü'ne akar; su temini ve ekolojik denge açısından önemlidir.
Riva Deresi	İstanbul	Belirtilmemiş	Belirtilmemiş	Sulama	İstanbul'un kuzeydoğusundaki köylerde sulama amacıyla kullanılmaktadır.
Gemlik Çayı	Bursa	Yaklaşık 60	Belirtilmemiş	Tarım sulaması, yerleşim su temini	Bursa'da yer alır ve Gemlik Körfezi'ne dökülür; tarım alanları ile yerleşimlere su sağlar.

1.2.7 Göller

Marmara Bölgesi'nde bulunan göller, su temini ve ekosistemler için büyük öneme sahiptir. Bu göllerin bazıları, bölgedeki içme suyu ihtiyacını karşılayan büyük kaynaklardır [32], [33], [34], [35]. Bu göller Tablo 1.4'te verilmiştir.

Tablo 1.4 Marmara Bölgesi gölleri

Göl Adı	İl	Yüzey Alanı (km^2)	Hacim (m^3)	Kullanım Alanları / Özellikler	Açıklama
Büyükçekmece Gölü	İstanbul	11.8	45 milyon	İçme suyu	İstanbul'un batısında yer alır; kentin içme suyu temininde önemli paya sahiptir.
Sapanca Gölü	Sakarya (kısmen Kocaeli)	45	142 milyon	İçme suyu	Sakarya il sınırlarında yer alır; İstanbul'un içme suyu ihtiyacını karşılayan başlıca kaynaklardan biridir.
Marmara Gölü	Balıkesir (Marmara Adası)	2.3	Belirtilmemiş	İçme suyu	Marmara Adası'nda bulunur ve adanın içme suyu ihtiyacını karşılar.
Tuzla Gölü	İstanbul	Belirtilmemiş	Belirtilmemiş	Sulama, ekosistem sağlığı	İstanbul'un Tuzla ilçesinde yer alır; yerel sulama ve ekolojik denge açısından önemlidir.

1.2.8 Yeraltı Suları

Yeraltı suları, özellikle büyük şehirlerde içme suyu temini için önemli bir kaynaktır. Marmara Bölgesi'nde yeraltı suyu kullanımı, hızla artan nüfus nedeniyle önemli bir su temini kaynağı olmuştur.

İstanbul'da yeraltı suyu kullanımı, özellikle şehirdeki büyüme ile birlikte artmıştır. 2020 yılı itibarıyla İstanbul'da yeraltı suyu temini, yıllık 500 milyon m^3 civarındadır.

Bursa il sınırlarında, yeraltı suyu kullanımı yıllık yaklaşık 150 milyon m³'dür. Bu su, özellikle tarımsal sulama ve yerel içme suyu temini için kullanılır.

1.2.9 Marmara Denizi

Marmara Denizi, tuzlu suyu ve çevresel değeriyle önemli bir kaynaktır. Özellikle balıkçılık ve deniz ulaşımı açısından stratejik bir öneme sahiptir.

Yüzey Alanı: 11.350 km²

Derinlik: Ortalama derinlik 500 metre, en derin nokta 1.350 metredir.

Marmara Denizi, bölgedeki deniz taşımacılığı, balıkçılık ve turizm gibi sektörler için büyük öneme sahiptir. Bölgedeki diğer su kaynakları Tablo 1.5'te verilmiştir.

Tablo 1.5 Marmara Bölgesi'ndeki diğer su kaynaklarının karşılaştırılması

Su Kaynağı	**Hacim (km³)**	**Notlar / Açıklama**
Marmara Denizi	525	Tuzlu su, deniz hacmi
Marmara Bölgesi Barajları	2,5–3	Tatlı su depolama kapasitesi
Marmara Bölgesi Göletleri	0,1–0,2	Küçük ölçekli tatlı su depolamaları
Marmara Bölgesi Yeraltı Suları	10–12	Tatlı su, teknik raporlara dayalı tahmini
Marmara Bölgesi Nehirleri (yıllık akım)	25–30	Sürekli akış miktarı, hacim değil

1.2.10 Su Temini ve Kullanımı

Marmara Bölgesi, hem içme suyu temini hem de sulama amaçlı su kullanımı açısından büyük bir çeşitliliğe sahiptir. İstanbul, bölgedeki en büyük su tüketicisi olup, bu şehre sağlanan su kaynakları şu şekildedir:

İstanbul'a Su Temini: 2023 yılı itibarıyla, İstanbul'un su ihtiyacı yıllık yaklaşık 3.5 milyar m³'tür. Bu su, bölgedeki göller, akarsular ve yeraltı suları kaynaklarından sağlanmaktadır.

Bu çalışma, farklı desalinasyon teknolojilerini teknik, ekonomik ve uygulanabilirlik açılarından karşılaştırarak, Marmara bölgesi'nin su temini ihtiyacını karşılamak için en etkili çözümün belirlenmesine katkıda bulunmayı amaçlamaktadır.

Bu bağlamda, desalinasyon sistemlerinin Marmara Denizi'nin su teminindeki rolünü ve potansiyelini anlamak, hem akademik dünyada hem de su kaynakları yönetimi alanında önemli bir katkı sağlayacaktır. Ayrıca, bu araştırmanın sonuçları, benzer kıyı bölgelerinde su temini sorunlarını çözmek için benzer stratejilerin geliştirilmesine de katkı sağlayabilir.

- Türkiyede Balıkesir Su ve Kanalizasyon İdaresine bağlı, 2 adet desalinasyon tesisi mevcuttur. Bu tesisler Avşa ve Ekinler Adalarında bulunmakta olup, bahse konu adaların içme suyu ihtiyaçlarını karşılamaktadırlar.
- Avşa Adası Desalinasyon Tesisi:

30.000 kişilik nüfusun içme suyu ihtiyacını karşılamak üzere Marmara Deninizi'nden su alarak günlük 6.000 m^3 su arıtma kapasitesine sahip olan tesis, ters osmoz prosesi ile çalışmakta olup faal durumdadır [36]. Avşa Adası İçme Suyu Arıtma Tesisi Şekil 1.1'de. Ayrıca ona ait ters osmoz membranları Şekil 1.2'de ve otomatik kum filtrasyon ünitesi Şekil 1.3'de gösterilmiştir.

- Ekinlik Adası Desalinasyon Tesisi:

600 kişilik nüfusun içme suyu ihtiyacını karşılamak üzere Marmara Deninizi'nden su alarak günlük 600 m^3/gün su arıtma kapasitesine sahip olan tesis, ters osmoz prosesi ile çalışmakta olup faal durumdadır [37]. Ekinlik Adası İçme Suyu Arıtma Tesisi dış görünümü Şekil 1.4'de ve iç görünümü Şekil 1.5'de gösterilmiştir [38].



Şekil 1.1 Marmara Avşa İçme Suyu Arıtma Tesisi



Şekil 1.2 Ters osmoz membranları



Şekil 1.3 Otomatik kum filtrasyon ünitesi



Şekil 1.4 Ekinlik Adası İçme Suyu Arıtma Tesisi dış görünüm



Şekil 1.5 Ekinlik Adası İçme Suyu Arıtma Tesisi iç görünüm

1.2.11 Marmara Denizi'ndeki Su Temini Sorunları ve Mevcut Çözüm Yöntemleri

i. Artan Nüfus ve Sanayileşme: Marmara Bölgesi, Türkiye'nin en yoğun nüfusuna ve en gelişmiş sanayi altyapısına sahip bölgelerinden biridir. Hızla artan nüfus ve sanayileşme, su talebinin sürekli olarak artmasına neden olmaktadır.

ii. Su Kirliliği ve Kalite Sorunları: Marmara Denizi, çevresindeki yoğun sanayi faaliyetleri ve kentleşme nedeniyle ciddi kirlilik sorunlarıyla karşı karşıyadır. Bu durum, içme suyu kaynaklarının kalitesini olumsuz etkilemekte ve su temini sorunlarını daha da karmaşık hale getirmektedir.

iii. Su Kaynaklarının Yetersizliği: Marmara Bölgesi'nde yer alan akarsuların ve yeraltı su kaynaklarının yetersiz olması, su temini sorunlarını daha da derinleştirmektedir. Özellikle yaz aylarında su kaynaklarının kuruması, su temini sorununu daha da kötüleştirmektedir.

iv. İklim Değişikliği ve Kuraklık: İklim değişikliği, Marmara Bölgesi'nde kuraklık riskini artırmıştır. Kuraklık dönemlerinde, Marmara Denizi'nin su seviyesi düşer ve içme suyu kaynakları daha da azalır.

Marmara Denizi'ndeki su temini sorunlarına çözüm bulmak için çeşitli yöntemler ve projeler uygulanmaktadır. Bunlar arasında şunlar bulunmaktadır:

i. Su Tasarrufu ve Verimlilik Projeleri: Marmara Bölgesi'nde su tasarrufu ve verimliliği önemli bir konudur. Bu çerçevede, suyun daha verimli kullanılmasını teşvik eden projeler ve kampanyalar yürütülmektedir.

ii. Akarsu ve Gölet İnşaatı: Marmara Bölgesi'nde su kaynaklarının artırılması amacıyla akarsu ıslahı ve gölet inşaatı gibi su tutma ve yönlendirme projeleri gerçekleştirilmektedir.

iii. Baraj ve Su Arıtma Tesisleri: Marmara Bölgesi'nde, içme suyu sağlamak için barajlar ve su arıtma tesisleri inşa edilmektedir. Ancak, bu tesislerin kapasitesi ve etkinliği, artan su talebini karşılamakta yetersiz kalmaktadır.

iv. Desalinasyon Sistemleri: Son yıllarda, Marmara Denizi'ndeki su temini sorunlarını çözmek için desalinasyon sistemlerine olan ilgi artmıştır. Tuzlu deniz suyunun tatlı suya dönüştürülmesini sağlayan bu sistemler, bölgenin içme suyu ihtiyacını karşılamak için alternatif bir kaynak oluşturabilir [39].

Marmara Denizi'ndeki su temini sorunlarına çözüm bulmak için bu gibi yöntemlerin yanı sıra daha birçok proje ve çalışma yürütülmektedir. Ancak, bu sorunların tam olarak çözülmesi için daha kapsamlı ve sürdürülebilir stratejilerin geliştirilmesi gerekmektedir.

1.3 Türkiye'deki Yönetmeliğe Göre İçme Suyu Standartları

Türkiye'de içme suyu kalitesini belirleyen yönetmelik "İNSANİ TÜKETİM AMAÇLI SULAR HAKKINDA YÖNETMELİK" olup bu yönetmeliğe göre

mikrobiyolojik, kimyasal, gösterge ve radyoaktivite parametrelerini yönetmeliğin ilgili ekinden alıntılanıp EK-A İlgili Yönetmelik Ek Tablolari gösterilmiştir [40].

2
LİTERATÜR İNCELEMESİ

2.1 Desalinasyon Sistemleri ve Çalışma Prensipleri

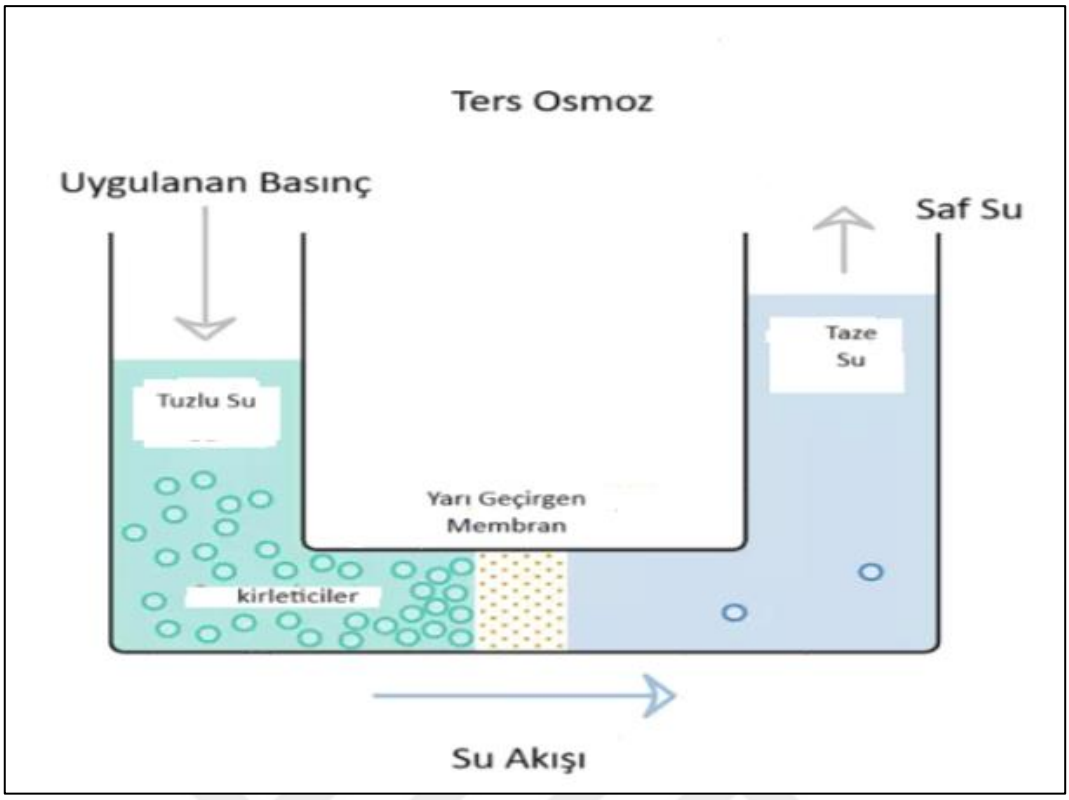
Acı su veya tuzlu suyun mevcut olduğu dünyanın bazı bölgelerinde tatlı su kıtlığının üstesinden gelmek için günümüzde tuzdan arındırma yaygın olarak benimsenmektedir. Geçtiğimiz yüzyılda farklı türde teknolojiler önerildi. Bu tezde, ters osmoz (RO), çok aşamalı flaş tuzdan arındırma (MSF), kapasitif deiyonizasyon (CDI), vakum filtrasyonu ve Çok Etkili Damıtma (MED) gibi mevcut ticari teknolojileri ve araştırmanın yeni sınırlarını gösteren ana akım çözümlerin durumu rapor edilmektedir [41]. Rüzgar, güneş ve biyokütle enerjisi gibi yenilenebilir kaynaklardan yararlanmak sürdürülebilir enerji ihtiyacını karşılaması adına çevreci bir çözüm olabilmektedir [42]. Bu durumlarda deniz suyu arıtma tesisleri geleneksel olanlarla aynıdır, tek farkı yenilenebilir enerji kaynağı kullanmalarıdır. Bu nedenle öncelikle çalışma prensipleri, arıtma için gerekli olan ana enerji girdisi ve yenilenebilir enerji kaynaklarıyla birleşme potansiyeli dikkate alınarak sınıflandırmalar yapılmıştır.

2.2 Ters Osmoz

2.2.1. Ters Osmoz

Osmoz, yarı geçirgen bir zarla ayrılmış, farklı konsantrasyonlardaki iki sıvının temas ettiği ve kendilerini eşitleme eğilimi gösterdiği fiziksel bir olaydır. Daha düşük konsantrasyona sahip sıvı, membranı geçerek en yüksek konsantrasyona sahip olana doğru ilerler.

Bu süreç ters osmozda tersine çevrilir. Oldukça konsantre bir çözelti olan deniz suyunu alıyoruz ve basınç ekleyerek membrandan geçmeye zorluyoruz. Diğer tarafta tuzsuz su elde ediyoruz, birinci tarafta ise kalan su hala zarın geçmesini engellediği tuzu tutuyor (Şekil 2.1).



Şekil 2.1 Ters osmoz çalışma prensibi

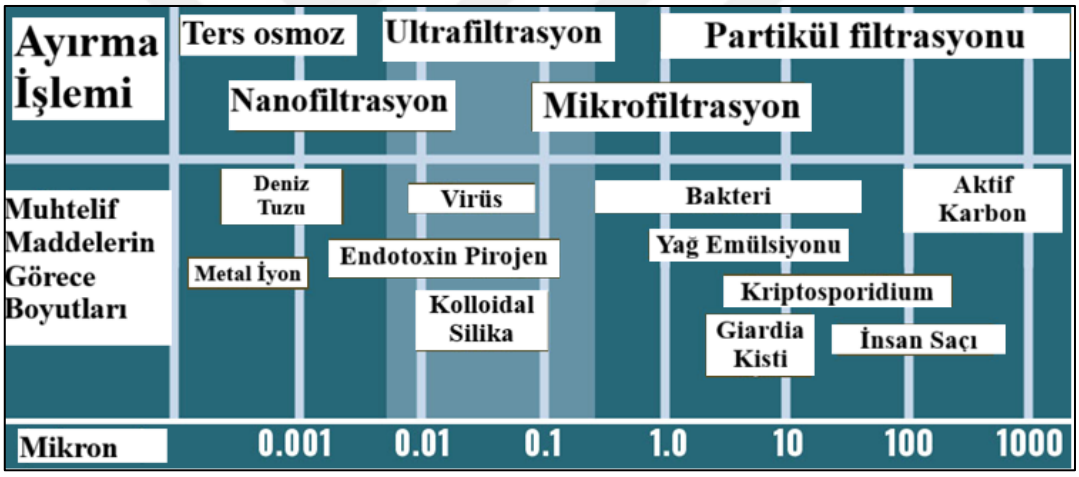
Tuzlu besleme suyu okyanus veya yer altı kaynaklarından alınır. Tuzdan arındırma işlemiyle iki çıkış akışına ayrılır: düşük tuzlu ürün suyu ve çok tuzlu konsantre akışları. Tuzdan arındırma kullanımı, birçok kıyı topluluğunun karşılaştığı, neredeyse tükenmez bir tuzlu su kaynağına erişime sahip olmasına rağmen onu kullanmanın hiçbir yolu olmaması paradoksunun üstesinden gelir. Kalsiyum karbonat gibi suda çözünen bazı maddeler kimyasal işlemle giderilebilse de, sodyum klorür gibi diğer yaygın bileşenler, toplu olarak tuzdan arındırma olarak bilinen, teknik açıdan daha karmaşık yöntemler gerektirir. Geçmişte, çeşitli çözünmüş tuzların sudan uzaklaştırılmasının zorluğu ve masrafı, tuzlu suları kullanışsız bir içme suyu kaynağı haline getiriyordu. Ancak 1950'lerden itibaren tuzdan arındırma, belirli koşullar altında sıradan kullanım için ekonomik açıdan pratik görünmeye başlamıştır [43].

Tuzdan arındırma işleminin ürün suyu genellikle evsel, endüstriyel ve tarımsal kullanıma uygun, 500 mg/1'den az çözünmüş katı içeren sudur [41].

Tuzdan arındırmanın bir yan ürünü tuzlu sudur. Tuzlu su, genellikle derin tuzlu akiferlere veya daha yüksek tuz içeriğine sahip yüzey sularına boşaltılarak bertaraf

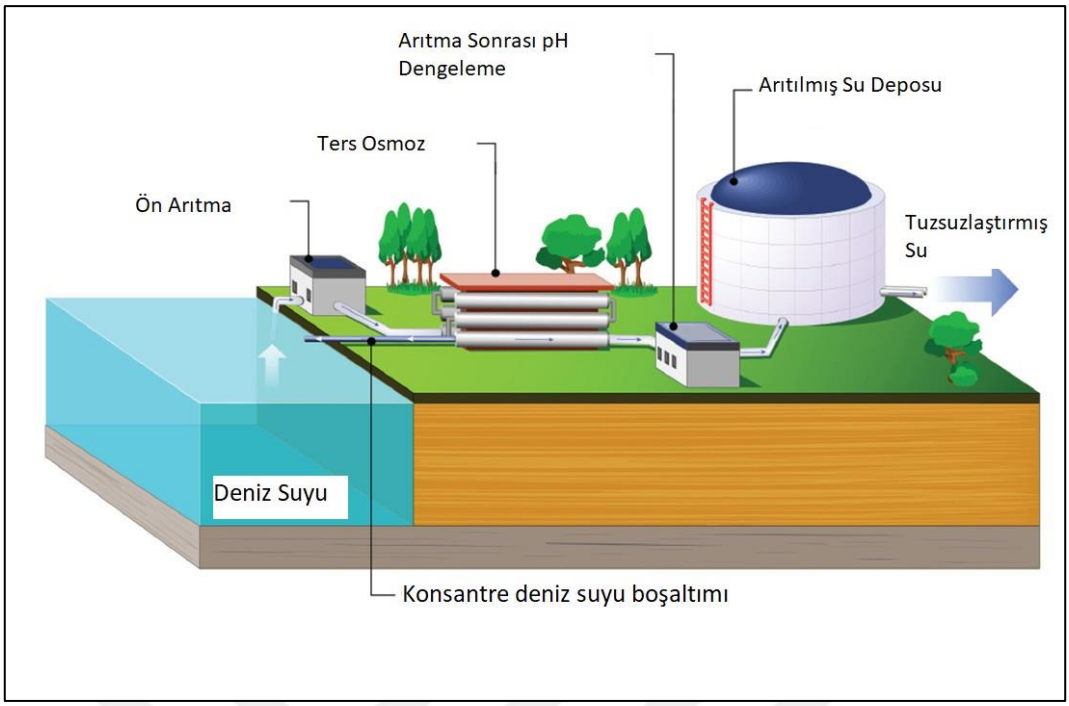
edilmesi gereken konsantre bir tuz çözeltisidir (35.000 mg/1'den fazla çözünmüş katı madde içerir [44]).

Tuzdan arındırma için kullanılanen yaygın proses: ters osmoz prosesidir. RO prosesinde, basınçlı tuzlu su çözeltisindeki su, su geçirgen bir membrandan akarak çözünmüş tuzlardan ayrılır. Basınçlı besleme suyu ile atmosfer basıncına yakın basınçtaki ürün suyu arasında oluşturulan basınç farkıyla, süzüntünün (membrandan akan sıvı) membrandan akması teşvik edilir. Geri kalan besleme suyu tuzlu su olarak reaktörün basınçlı tarafından devam eder. Isıtma veya faz değişimi gerçekleşmez. Ters osmozda kullanılan membranların ve bazı filtrasyon tiplerindeki por çapı Şekil 2.2'de gösterilmiştir. Ana enerji gereksinimi, besleme suyunun ilk basınçlandırılması içindir. Acı suyun tuzdan arındırılması için çalışma basınçları 250 ile 400 psi arasında, deniz suyunun tuzdan arındırılması için ise 800 ile 1000 psi arasında değişir [45].



Şekil 2.2 Ters osmoz ve filtrasyon çaplarının muhtelif maddeleri tutumu

Uygulamada, besleme suyu basınçlandırmak için membrana karşı kapalı bir konteynere pompalanır. Ürün suyu membrandan geçtikçe, kalan besleme suyu ve tuzlu su çözeltisi giderek daha konsantre hale gelir. Kalan çözünmüş tuzların konsantrasyonunu azaltmak için bu konsantre besleme suyu-tuzlu su çözeltisinin bir kısmı kaptan çekilir. Bu deşarj olmasaydı, besleme suyundaki çözünmüş tuzların konsantrasyonu artmaya devam edecek ve doğal olarak artan ozmotik basıncın üstesinden gelmek için sürekli artan enerji girdisi gerekecekti [45]. Ters osmoz prosesine ait diagram Şekil 2.2'de gösterilmiştir.



Şekil 2.2 Ters osmoz tesisi diagramı

2.2.1.1 Su akısı (su geçirgenliği — van 't Hoff/Spiegler–Kedem–Katchalsky / linear)

Pratik mühendislik formulü (lineer geçirgenlik modeli):

Su akısının hesaplanmasını gösteren denklem (2.1) verilmiştir [46].

$$Jw = A \cdot (\Delta P - \Delta \pi) \tag{2.1}$$

- Jw = su akısı ($m^3/m^2 \cdot s$)
- A = su geçirgenlik katsayısı ($m^3/(m^2 \cdot s \cdot Pa)$) veya $L/m^2 \cdot hr \cdot bar$
- ΔP = uygulanan efektif transmembran basınç farkı
- Δπ = osmotik basınç farkı (feed − permeate)

Osmotik basınç yaklaşık (Van 't Hoff, düşük konsantrasyonlarda):

Yaklaşık osmotik basıncı hesaplatan denklem, eşitlikte (2.2) verilmiştir [46].

$$\Pi \approx i\, C\, R\, T \tag{2.2}$$

- i = Van ’t Hoff faktörü (~1,2,3...)
- C = Molar derişim (mol/L)
- R = Evrensel gaz sabiti (0,0821 L * atm/(mol * K))
- T = Mutlak Sıcaklık (Kelvin°)

Gerçek karışımlarda aktivite katsayıları ve çoklu iyon etkileri hesaba katılmalıdır.

2.2.1.2 Tuz Taşınımı

Basit kabul:

Tuz taşınımını hesaplatan denklem, eşitlikte (2.3) verilmiştir [46].

$$Js = B \cdot (C_f - C_p) \tag{2.3}$$

- J_s = tuz akısı (kg/m²·s veya g/m². s)
- B = solüt geçirgenlik katsayısı (m/s veya L/m²·hr)
- C_f, C_p = feed ve permeat konsantrasyonları (mg/L)

Membrandan çıkan permeat konsantrasyonu ve tuz reddi ise aşağıdaki eşitlikle hesaplanabilir [47]

$$Red\ (\%) = 1 - (C_f / C_p) \tag{2.4}$$

2.2.1.3 Konsantrasyon Kutuplaşması

CP membranda efektif yerel konsantrasyonun artmasıdır; akışı azaltır ve gerçek Δπ’yi yükseltir. Hesaplamalarda sınır tabaka ve taşıma katsayılarıyla modellenir. CP kontrolü için akış hızları, spacer ve yüzey pürüzlülüğü optimize edilir.

2.2.1.4 Basınç & enerji

Pompa güç ihtiyacı (ideal, hidrolik):

Pompanın güç ihtiyacını hesaplatan denklem eşitlikte (2.5) verilmiştir [47].

$$P_{pump} = \frac{Q_{besleme}}{\eta_{pompa}} * \Delta P_{pompa} \quad (2.5)$$

Elektriksel güç (kW) hesaplanırken enerji geri kazanım cihazı (ERD) verimi spesifik enerji tüketimi (SEC) pratik formülle (2.6) verilmiştir [47].

$$SEC = \frac{Q_{besleme}}{Q_{Ürün}} * \Delta P_{pompa} * \frac{1}{\eta_{sistem}} \quad (2.6)$$

(uygulamada daha yaygın: SEC = kWh / m^3 olarak hesaplanır; ERD ile ciddi düşüş sağlar.

2.2.2 Enerji Geri Kazanımlı Ters Osmoz

Ters osmoz, suyun yüksek basınç altında yarı geçirgen bir membrandan geçirilerek saflaştırılması prensibine dayanır. Ancak bu işlem, yüksek enerji tüketimi gerektirir çünkü yüksek basınç pompaları kullanılır [48]. ERRO teknolojisi ise, atık suyun (konsantre su) basınç enerjisini geri kazanarak sistemin enerji ihtiyacını azaltır [48].

Ters osmoz sürecinde, besleme suyunun bir kısmı saf suya dönüşürken geri kalanı konsantre (tuzlu) su olarak atılır [49].

ERRO sistemlerinde, bu atık suyun içindeki yüksek basınçlı enerji, enerji geri kazanım cihazları (örneğin, basınç değiştiriciler veya turbo şarj cihazları) sayesinde yeniden kullanılır [50].

Geri kazanılan enerji, besleme suyunu basınçlandırmada kullanılarak pompa yükü azaltılır ve enerji tasarrufu sağlanır [50].

2.2.2.1 Enerji Geri Kazanım Teknolojileri

- **Basınç Değiştiriciler:** En yaygın kullanılan teknoloji PX'tir. Konsantre suyun basıncını doğrudan yeni besleme suyuna aktararak verimlilik sağlar.
- **Turboşarj Cihazları:** Atık sudaki kinetik enerjiyi kullanarak giriş suyunu kısmen basınçlandırır.
- **Pelton Türbinleri:** Yüksek basınçlı brine türbin çarkını döndürerek enerji ürettiği sistemdir.
- **Isı Eşanjörleri:** Ters osmoz sistemlerinde ısı eşanjörleri, membran öncesinde yer alarak ön arıtılmış besleme suyunun sıcaklığını kontrol etmek

amacıyla kullanılır. Isı kaynağı olarak genellikle RO konsantresi veya proses atık suları tercih edilir ve amaç membran performansını artırırken termal hasarı önlemektir.

2.2.2.2 Avantajları

Geleneksel RO sistemlerine göre daha düşük enerji tüketimi sağlar. En büyük avantajı budur. Enerji geri kazanım sistemleri (örneğin basınç değiştirici – PX, Pelton türbini, turboşarj) sayesinde yüksek basınçta çıkan atık suyun enerjisi tekrar sisteme aktarılır

- ✓ Ters osmoz sistemlerinde PX'in tasarım verimliliğinin teorikte %98 seviyelerinde olabileceği fakat türbin/motor gibi ekipmanların kendi verimlerinin tipik olarak ~75% seviyesinde rapor edildiği [51], pressure exchanger (PX) entegre edildiğinde, literatürde özgül enerji tüketiminin klasik durumda ~7,2 kWh/m³'ten yaklaşık 3,6 kWh/m³'e düşmesi ile % 40–%50 civarında enerji tasarrufu sağlandığı; böylece enerji geri kazanımının sistem performansını ve işletme maliyetini önemli derecede iyileştirdiği gösterilmiştir [52].
- ✓ Düşük İşletme Maliyeti (uzun vadede)
    - Enerji maliyetleri RO tesislerinde en büyük gider kalemidir.
    - Enerji kazanımı sayesinde daha az elektrik tüketilir, bu da uzun vadede önemli maliyet avantajı sağlar [52].
- ✓ Kompakt Sistem Tasarımı
    - Modern enerji geri kazanım cihazları kompakt ve entegre edilebilir yapıdadır.
    - Tesis alanından tasarruf sağlar; özellikle kıyı bölgelerinde sınırlı alanlar için avantajlıdır.
- ✓ Çevresel Sürdürülebilirlik
    - Daha az enerji tüketimi, daha düşük karbon salımı demektir.
    - Yenilenebilir enerjiyle çalıştırıldığında karbon ayak izi oldukça azalır.
- ✓ Yüksek Sistem Verimliliği

- Gelişmiş membranlar ve enerji geri kazanım ekipmanları sayesinde yüksek su geri kazanımı (%45–55) sağlanabilir [50].
- Daha az deniz suyu kullanılarak daha fazla içme suyu üretilebilir.

✓ Gelişmiş Otomasyon ve Kontrol

- Enerji kazanımlı sistemler genellikle ileri kontrol sistemleri ile donatılmıştır.
- Otomatik izleme, arıza tahmini ve optimizasyon mümkündür. Bu da arıza sürelerini ve bakım ihtiyacını azaltabilir.

✓ İstikrarlı Üretim Kapasitesi

- İyi tasarlanmış bir ERRO sistemi, tuzluluk ve sıcaklık değişimlerine karşı daha toleranslı olabilir.
- Su üretim kapasitesi daha kararlı olur.

✓ Modülerlik ve Ölçeklenebilirlik

- Küçük veya büyük ölçekli projelere kolayca uyarlanabilir.
- Modüler yapılar sayesinde tesis genişletilebilir veya taşınabilir [50].

2.2.2.3 Dezavantajları

✓ **Yüksek İlk Yatırım Maliyeti**

- Enerji geri kazanım cihazları (örneğin, basınç değiştiriciler, Pelton türbinleri) pahalı ekipmanlardır [53].
- Gelişmiş membran sistemleri, pompa teknolojileri ve kontrol sistemleri yatırım maliyetlerini artırır [54].

✓ **Yüksek İşletme ve Bakım Gereksinimi**

- Membranlar zamanla kirlenir ve sık temizlik ya da değiştirme gerektirir [55].
- Enerji geri kazanım sistemleri de bakım ister; yanlış kullanım verim kaybına veya arızaya yol açabilir.
- Sürekli izleme ve uzman personel gerektirir [54].

✓ **Tuzluluk ve Sıcaklık Değişkenliği**

- Deniz suyunun sıcaklığı ve tuzluluğu arttıkça enerji tüketimi de artar.
- Sistem bu değişimlere karşı hassastır; özellikle yaz/kış dönemlerinde verim dalgalanabilir.

✓ **Atık (Tuzlu) Su Problemi**

- Yüksek konsantrasyonlu atık tuzlu su (brine) denize geri deşarj edilir.
- Bu çevresel açıdan hassas bir konudur; deniz ekosistemine zarar verebilir.

✓ **Enerji Geri Kazanım Sistemlerinde Verim Sınırlamaları**

- Geri kazanım sistemleri %90'ın üzerinde enerji geri kazanımı sunsa da, bu oran teorik sınırdır [56].
- Gerçek sistemlerde pompa ve sürtünme kayıpları gibi nedenlerle enerji kazanımı ideal seviyede olmayabilir.

✓ **Karbon Ayak İzi (Dolaylı)**

- İşletme sırasında kullanılan enerji kaynağı fosil yakıtlara dayanıyorsa, süreç düşük karbon verimliliği gösterebilir.
- Yenilenebilir enerji kaynakları kullanılmadığında çevreye dolaylı zarar oluşabilir.

✓ **Karmaşık Tasarım ve İşletme**

- Sistem mühendisliği karmaşıktır; iyi tasarlanmamış bir sistem hem verimsiz hem de arızaya açık olur.
- Özellikle küçük ölçekli tesisler için bu karmaşıklık önemli bir dezavantajdır [50].

✓ **Kullanım Alanları**

- Deniz suyu arıtımı [57].
- İçme suyu üretimi [58].

- Endüstriyel su arıtma tesisleri [59].
- Tarım ve sulama sistemleri [60].

Özellikle enerji maliyetlerinin yüksek olduğu yerlerde ve büyük ölçekli su arıtma projelerinde oldukça avantajlı bir çözümdür.

2.2.2.4 Pressure Exchanger

Pressure Exchanger yani basınç değiştirici, ters osmoz tesislerinde enerji geri kazanımı için geliştirilmiş izobarik (sabit basınçlı) bir cihazdır [61]. Bu cihazın temel işlevi, RO prosesinden çıkan yüksek basınçlı konsantre (brine) akışının sahip olduğu hidrolik basınç enerjisini, doğrudan besleme suyu akışına aktarmaktır [62]. Böylece yüksek basınç pompasının yükü azaltılır ve sistemin toplam enerji tüketimi ciddi biçimde düşürülür. PX'in bu enerji aktarımı, mekanik ara çevirim kullanılmadan hidrolik olarak gerçekleşir; cihazın içinde gelişigüzel mekanik dönüşüm yerine yüksek basınçlı brine ile düşük basınçlı besleme suyu arasındaki basınç farkı, rotor veya benzeri bir izobarik eleman aracılığıyla doğrudan paylaştırılır [63]. Bu yaklaşım, klasik türbin-bazlı enerji geri kazanımından farklı olarak daha yüksek verim sağlar ve endüstride yaygın olarak kullanılmaktadır [64].

Avantajları

 Basınç aktarımı: Konsantre akıştan gelen yüksek basınç, izobarik transferle feed suya aktarılır ve bu besleme suyu yüksek basınca önceden getirilmiş olur.

 Enerji verimliliği: Geleneksel türbin veya mekanik geri kazanım sistemlerine kıyasla PX, hidrolik basınç kaynağından çıkış basıncına daha düşük kayıpla enerji transferi sağlar.

 Sistem optimizasyonu: PX'in yüksek verimliliği sayesinde, sistemde hem işlemsel enerji talebi düşer hem de yüksek basınç pompalarının boyutları küçülebilir veya kapasite gereksinimi azalır.

 Dayanıklılık ve bakım: Cihazın içindeki hareketli eleman sayısı azdır, rotor vb. parçalar dayanıklı malzemelerden seçilir; bu da uzun ömür ve düşük bakım ihtiyacı sağlar.

Dezavantajları

- Hassas üretim / yüksek başlangıç maliyeti.
- Yabancı katı madde hassasiyeti yani iyi ön filtrasyon zorunlu.
- Aşırı deşarj/ayar farklılıklarında verim düşüşü.

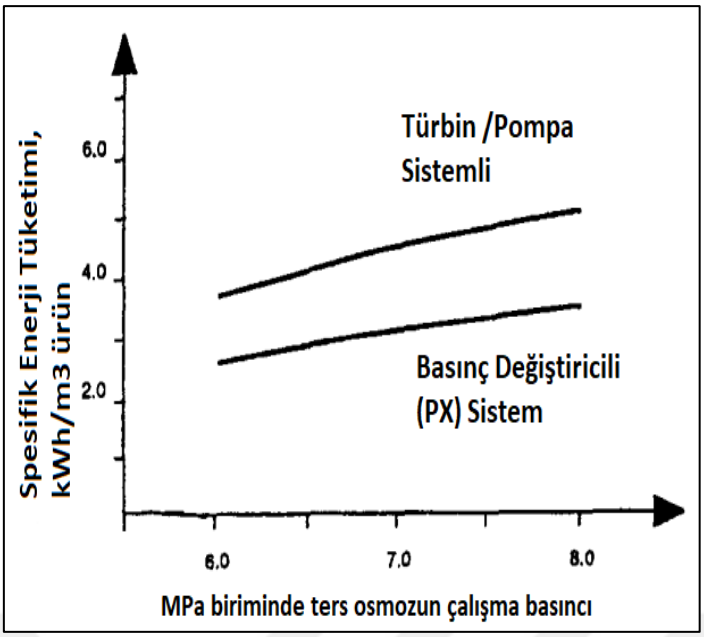
Basınç değiştiriciler tuzlu konsantre atık suyun tuzunu arıtılmış suya değil, besleme suyuna da doğrudan katmaz. Ancak, enerjisini besleme suyuna aktarır. Bunu şu şekilde açıkça anlatabiliriz:

- Enerji Transferi, Su Transferi Değil: PX sistemlerinde, konsantre suyun yüksek basınçlı enerjisi doğrudan yeni gelen besleme suyuna aktarılır. Fakat bu işlem, suyun fiziksel olarak karışmasını gerektirmez [62].
- Akış Yolları Ayrıdır: Basınç değiştiriciler, genellikle iki ayrı akış yoluna sahiptir. Konsantre su, basınç değiştirici içinde enerjisini besleme suyuna aktardıktan sonra sistemden atılır. Ancak, bu süreçte suyun kendisi değil, yalnızca basıncı transfer edilir [63].
- Besleme Suyunun Tuzu Artmaz: PX cihazları, doğrudan suyu birbirine karıştırmaz. Sadece basıncı, zar kayıplarını minimize edecek şekilde besleme suyuna iletir. Bu sayede besleme suyunun tuzluluk oranı değişmez, yani deniz suyunun tuz oranı artmaz [65].

Özet olarak:

- PX, konsantre suyun kendisini değil, enerjisini besleme suyuna aktardığı için tuz oranı değişmez [63].
- Eğer konsantre su doğrudan besleme suyuna karışsaydı, sistemin verimi düşer, membranların iş yükü artar ve enerji tasarrufu yerine daha yüksek işletme maliyetleri oluşurdu. Ancak doğru tasarlanmış bir sisteminde bu yaşanmaz [65].

PX çalışma mekanizması gereği RO sisteminin çalışma basıncı ne kadar yüksekse, PX tarafından enerji geri kazanımının o kadar verimli olmasıdır. Bu durum Şekil 2.3'te gözükmektedir [51].



Şekil 2.3 Ters osmoz çalışma basıncında px enerji tüketimi

2.2.2.5 Turbo ve Hidrolik Turbo Şarj Cihazları

Turbo şarj cihazları, basitçe bir hidrolik türbin ve pompa kombinasyonudur. Ana prensibi, atık suyun basıncını kullanarak besleme suyunun bir kısmını önceden basınçlandırmaktır [66].

- **Çalışma Prensibi**

1. Konsantre Su Girişi: Ters osmozdan çıkan yüksek basınçlı konsantre (atık) su, turbo şarj cihazının türbin çarkını döndürür [66].
2. Mekanik Enerji Üretimi**:** Dönen türbin, bir mil vasıtasıyla düşük basınçlı besleme suyuna bağlı olan bir pompayı çalıştırır [67]**.**
3. Besleme Suyu Basınçlandırılır**:** Pompa, besleme suyunun bir kısmını önceden basınçlandırarak ana yüksek basınç pompasının iş yükünü azaltır [68].
4. Atık Su Çıkışı**:** Enerjisini kaybeden konsantre su, artık düşük basınçlı hale gelerek sistemden dışarı atılır [69].

Avantajları:

✓ Enerji Tüketimini %20-30 azaltır (PX kadar verimli olmasa da geleneksel sistemlere göre büyük kazanç sağlar) [67].

✓ Hareketli Parçalar Azdır, Bakımı Kolaydır.

✓ Daha Eski Sistemlerle Kolayca Entegre Edilebilir.

Dezavantajları:

- PX'e kıyasla daha düşük verimlidir (genellikle %70-80 verimlilik sağlar, PX %95+ verime ulaşabilir) [67].
- Mekanik aşınma olabilir, zamanla verimi düşebilir.

2.2.2.6 Pelton Türbinleri

Pelton türbinleri, hidrolik enerji dönüşümünde kullanılan bir su türbinidir**.** Özellikle yüksek basınçlı ve düşük debili akışkanlardan enerji geri kazanımında etkilidir [70]**.**

Çalışma Prensibi

1. Konsantre Su Nozullardan Yüksek Basınçla Fırlatılır: Atık su, türbinin nozullarına yönlendirilir ve yüksek hızda çıkış yapar [71].
2. Kanatlara Çarpma ile Hareket Üretilir: Fırlatılan su, türbinin özel kepçe şeklindeki kanatlarına çarpar ve türbini döndürür [70].
3. Mekanik Enerji Üretimi: Türbinin dönüşü, bir pompayı veya jeneratörü çalıştırarak enerji geri kazanımı sağlar [26].
4. Atık Su Çıkışı: Basıncını kaybeden su, artık düşük basınçlı hale gelir ve sistemden atılır.

Avantajları

✓ Oldukça Dayanıklı ve Basit Bir Sistemdir.

✓ Elektrik Üretimi için Kullanılabilir (Örneğin, deniz suyu ters osmoz (SWRO) tesislerinde [70]).

✓ %70-80 Verimlilik Sağlayabilir [65].

Dezavantajları

- PX kadar verimli değildir [70].
- Büyük ölçekli sistemlerde kullanımı sınırlıdır.
- Mekanik bakım gerektirebilir.

2.2.2.7 Isı Eşanjörleri

Isı eşanjörleri, desalinasyon tesislerinde doğrudan mekanik enerji geri kazanımı sağlamayan; ancak proses sırasında açığa çıkan atık ısının geri kazanılarak sistem verimliliğinin artırılmasına olanak tanıyan yardımcı ekipmanlardır. Özellikle ters osmoz ve elektrodiyaliz sistemlerinde, giriş besleme suyunun sıcaklığının birkaç derece artırılması yoluyla akı ve enerji verimliliği üzerinde dolaylı fakat ölçülebilir bir etki oluştururlar [72], [73].

Çalışma Prensibi

Yüksek basınç pompaları, elektrik motorları, güç elektroniği ekipmanları ve elektrodiyaliz hücrelerinde oluşan atık ısı, ısı eşanjörüne yönlendirilir [70].

Atık ısı taşıyan akışkan ile soğuk giriş deniz suyu, ısı eşanjörü yüzeyleri aracılığıyla temas etmeden ısı alışverişi yapar. Bu süreçte enerji yalnızca ısı transferi yoluyla aktarılır [71].

Isı eşanjöründen çıkan besleme suyu, giriş koşullarına kıyasla birkaç derece daha sıcak hale gelir. Bu durum, ters osmozda su viskozitesinin azalmasına; elektrodiyalizde ise iyon mobilitesinin artmasına katkı sağlar [68].

Isısını kısmen kaybeden atık akışkan, sistemden uzaklaştırılır veya yeniden soğutma devresine gönderilir [74].

Avantajları

✓ Proses ekipmanlarında zaten açığa çıkan atık ısının değerlendirilmesini sağlar.

✓ Ters osmoz sistemlerinde akı artışı ve spesifik enerji tüketiminde azalma sağlayabilir.

✓ Elektrodiyaliz proseslerinde iyon taşınımını iyileştirerek enerji verimliliğini artırır.

✓ Mekanik olarak basit ve işletme güvenilirliği yüksek ekipmanlardır [69].

Dezavantajları

- Doğrudan elektrik veya mekanik enerji üretimi sağlamaz.
- RO ve ED proseslerinde oluşan sıcaklık farkları sınırlı olduğundan, tek başına büyük enerji kazanımı yaratmaz.
- Ek yatırım maliyeti ve yer ihtiyacı gerektirir.
- Yanlış tasarım durumunda biyolojik kirlenme ve korozyon riski oluşabilir [75].

Genel Karşılaştırma

Geri kazanım teknolojilerinin karşılaştırılması Tablo 2.1'de verilmiştir.

Tablo 2.1 Geri kazanım teknolojileri karşılaştırması

Teknoloji	Verimlilik	Bakım İhtiyacı	Öne Çıkan Avantajı	Genellikle Kullanıldığı Yerler
Basınç Değiştiriciler (PX)	%95+	Düşük	En yüksek enerji tasarrufu	Büyük ölçekli SWRO tesisleri
Turbo Şarj Cihazları	%70-80	Orta	Eski sistemlere kolay entegrasyon	Orta-büyük ölçekli sistemler
Pelton Türbinleri	%70-80	Orta-Yüksek	Elektrik üretimi ve enerji dönüşümü	Daha küçük veya özel sistemler

Sonuç:

- En yüksek verimlilik ve enerji tasarrufu için → PX (Basınç değiştirici) en iyi seçenektir.
- Daha basit ve düşük maliyetli bir sistem gerekiyorsa, turbo şarj cihazları iyi bir alternatiftir.
- Elektrik üretimi de hedefleniyorsa veya eski türbin sistemleriyle entegrasyon gerekiyorsa pelton türbini tercih edilebilir.

Tesisin büyüklüğüne, işletme bütçesine ve enerji geri kazanım ihtiyacına göre uygun teknoloji seçilir.

2.3 Elektrodiyaliz

Elektrodiyaliz (ED), uygulanan bir elektrik potansiyel farkının etkisi altında tuz iyonlarını bir çözeltiden iyon değişim membranları aracılığıyla başka bir çözeltiye taşımak için kullanılır [7]. Bu, elektrodiyaliz hücresi adı verilen bir yapılandırmada yapılır. Hücre, iki elektrot arasına yerleştirilmiş bir anyon değişim membranı ve bir katyon değişim membranı tarafından oluşturulan bir besleme (seyreltik) bölmesi ve bir konsantre (tuzlu su) bölmesinden oluşur [76]. Neredeyse tüm pratik elektrodiyaliz işlemlerinde, birden fazla elektrodiyaliz hücresi, birden fazla elektrodiyaliz hücresini oluşturan alternatif anyon ve katyon değişim membranlarıyla elektrodiyaliz yığını adı verilen bir yapılandırmada düzenlenir [76]. Elektrodiyaliz işlemleri, çözünmüş türlerin besleme akışından uzaklaştırılması, diğer işlemlerin ise kalan maddelerden suyu uzaklaştırması açısından damıtma tekniklerinden ve diğer membran tabanlı işlemlerden farklıdır [43]. Besleme akışındaki çözünmüş türlerin miktarı sıvınınkinden çok daha az olduğundan, elektrodiyaliz birçok uygulamada çok daha yüksek besleme geri kazanımı gibi pratik bir avantaj sunar [77].

2.3.1 Klasik Elektrodiyaliz

KED, iyonların elektrik alanı yardımıyla iyon değişim membranlarından geçirilerek çözeltiden ayrıldığı bir zar ayırma yöntemidir. Daha çok tuzlu suların tatlılaştırılması veya endüstriyel proseslerde iyon giderimi için kullanılır [78].

- Anot: $2H_2O \rightarrow O_2 + 4H^+ + 4e^-$ →anotta pH düşer [76]
- Katot: $4H_2O + 4e^- \rightarrow 2H_2 + 4OH^-$ → katotta pH yükselir [76]

 Eğer Cl^- yüksekse anotta klorür oksidasyonu (Cl_2/HOCl) riski vardır. Yani,gaz, korozyon ve toksisite sorunları [78]

 Sonuç: elektrot bölmelerinde pH farkları oluşur; bu lokal çökelme/çözünme (ör. $CaCO_3$, Mg $(OH)_2$), membran yüzey kimyası değişimleri ve kirlenmeye yol açabilir [79].

 Tasarım önlemi: elektrot bölmelerini ayrı akışla beslemek, redox çiftleri kullanmak veya elektrot çözeltilerini kontrollü tutmak.

2.3.1.1 Membran Fenomenleri

- **Donnan Potansiyeli:** Membran sabit yükleri membran içi iyonik dengeleri belirler → seçicilik ve co-ion sızıntısı oluşur [79].
- **Co-ion Sızdırması:** ideal olmayan membranlarda eş yüklü iyon sızıntısı verimi azaltır [79].
- **Electro-Osmotik Su Sürüklenmesi:** İyonlarla birlikte su sürüklenmesi; özellikle yüksek akım yoğunluğunda ürün hacimce etkilenebilir [80].
- Bu mekanizmalar iyon seçiciliğini, ürün iletkenliğini ve su balansını etkiler [80].

2.3.1.2 Çalışma prensibi:

- Çözelti haznesinde iyonlar (örneğin NaCl) bulunur [81].
- Sistem iki ucunda bir anot (+) ve bir katot (–) içerir. Elektrik alan uygulandığında anyonlar (Cl^-) anoda, katyonlar (Na^+) katoda doğru hareket eder [82].
- Katyon değişim membranı (CEM) sadece katyonları geçirir, anyonları tutar [83]
- Anyon değişim membranı (AEM) sadece anyonları geçirir, katyonları tutar [84]
- Membranlar sırayla dizildiği için iyonlar bazı hücrelerde uzaklaştırılır, bazı hücrelerde ise yoğunlaşır.[84].

Sonuç:

- Konsantrasyon hücrelerinde iyonlar birikir ve tuzlu çözelti oluşur.
- Dilüsyon hücrelerinde iyonlar uzaklaştırılır ve daha az tuzlu, yani tatlı su elde edilir [81].

Özellikleri:

- Basınç gerektirmez (ters osmozdan farklıdır).
- Orta tuzlulukta sular için uygundur [83].
- Enerji tüketimi sudaki iyon derişimine bağlıdır.

- Membran dayanıklılığı sistem ömrünü belirler.

2.3.2 Bipolar Membranlı Elektrodiyaliz

Bipolar membranlı elektrodiyaliz, klasik elektrodiyalizdeki iyon gideriminin ötesine geçip tuzlardan doğrudan asit ve baz üretmek için kullanılan elektro-membran prosesidir.

$MX\ (tuz) + H_2O \rightarrow HX\ (asit) + MOH\ (baz)$

burada M^+ = katyon, X^- = anyon [82]

Bu sayede:

- $NaCl \rightarrow HCl + NaOH$
- $Na_2SO_4 \rightarrow H_2SO_4 + NaOH$
  gibi reaksiyonlar elde edilir [82].

Bir BMED modülü, klasik ED yığınına benzer fakat her hücre ünitesi üç tip membran içerir:

1. CEM (Cation Exchange Membrane) — sadece katyonları geçirir.
2. AEM (Anion Exchange Membrane) — sadece anyonları geçirir.
3. BMED (Bipolar Membrane) — özel yapı; ortasında suyu H^+ ve OH^- iyonlarına ayıran katalitik ara tabaka bulunur.

2.3.2.1 Çalışma Prensibi

a. Elektrik alan uygulanır:

- Anot (+) → elektron kaybı,
- Katot (–) → elektron kazanımı.
- Elektrik alan, iyonları yönlendirir:
  - Katyonlar (M^+) katoda doğru,
  - Anyonlar (X^-) anoda doğru hareket eder.

b. Bipolar membranda suyun disosiasyonu:

BMED, iki katmanlıdır:

- Katyon değişim tabakası (C-tabakası)

- Anyon değişim tabakası (A-tabakası)

Bu iki tabaka arasında yüksek elektrik alan bölgesi vardır → burada **su molekülleri iyonlaşır**:

$H_2O \rightarrow H^+ + OH^-$

H^+ iyonları asit odasına geçer (AEM yönüne doğru),
OH^- iyonları baz odasına geçer (CEM yönüne doğru).

c. Tuz odasından iyon göçü:

- Katyon (M^+) tuz odasından CEM yoluyla baz odasına geçer → **MOH** oluşur.
- Anyon (X^-) tuz odasından AEM yoluyla asit odasına geçer → **HX** oluşur.

Sonuçta:

- **Asit odasında** HX (ör. HCl) birikir,
- **Baz odasında** MOH (ör. NaOH) birikir,
- **Tuz odasında** iyonlar azalır (desalinasyon etkisi).

2.3.2.2 Reaksiyon Şeması

BMED e ait özet reaksiyon şeması Tablo 2.2'de verilmiştir. Ayrıca Net reaksiyon denklemi (2.7) de belirtilmiştir [85].

Tablo 2.2 BMED reaksiyon şeması

Hücre	Reaksiyon	Açıklama
BMED	$H_2O \rightarrow H^+ + OH^-$	Bipolar membranda disosiasyon
Asit bölmesi	Na^+ giremez, Cl^- AEM'den geçer, H^+ BMED'den gelir	HX oluşur
Baz bölmesi	Na^+ CEM'den geçer, OH^- BMED'den gelir	NaOH oluşur

Net reaksiyon:

Oluşan net reaksiyon eşitlik (2.7) ile verilmiştir [86].

$$NaCl+H_2O \rightarrow \overset{\text{Elektrik akımı}}{\underset{\text{BMED}}{\longrightarrow}} NaOH+HCL \qquad (2.7)$$

Son 50 yılda, iyon değişim membranları laboratuvar araçlarından önemli teknik ve ticari etkilere sahip endüstriyel ürünlere dönüştü. Bipolar membranlar (BMED'ler),

karşılık gelen tuzdan asit ve alkali üretme kabiliyetleri sonucunda bunlar arasında özel bir yere sahiptir [87].

Klasik elektrodiyaliz (ED) sisteminde iyon değişim membranları (anyon–katyon) kullanılarak iyonlar elektrik alanıyla ayrıştırılır ve suyun tuzluluğu azaltılır [88] Ancak bipolar membran (BM), klasik ED'den farklı olarak suyu hidrojen (H^+) ve hidroksil (OH^-) iyonlarına ayırabilen özel bir yapıya sahiptir [88].

Bu özellikler, büyük bir endüstriyel etkiye sahip bazı benzersiz elektromembran proseslerinin tasarlanmasını mümkün kılar. Bu prosesler arasında asit ve baz sentezleri, asidik ve bazik gaz sorbentlerinin ve iyon değişim reçinelerinin elektrokimyasal rejenerasyonu, protein ayrımı ve doğal suların ve meyve sularının pH düzeltmesi yer alır [89]. Etkili BMED uygulamasının olasılığını tanımlayan temel özellikler, membran boyunca toplam potansiyel düşüşü ve su ayrışma akımı verimliliğidir [89]. Klasik ve bipolar membranlı elektrodiyalizi karşılaştırılması Tablo 2.3'te verilmiştir.

2.3.2.3 Atık Geri Kazanımı

- Endüstriyel atık sular (ör. elektrokaplama, tekstil, kimya endüstrisi) genellikle tuz veya nötr çözeltiler içerir [90]
- BMED ile bunlar yeniden kullanılabilir asit ve baz formlarına dönüştürülür [90].
- Atık azaltımı + kimyasal geri kazanımı [90].

2.3.2.4 Tuzdan asit/baz üretimi

- Na_2SO_4, NaCl, KCl gibi "atık tuzlar" değerli kimyasallara dönüşür [90].
- Böylece kimyasal madde tüketimi ve karbon ayak izi azalır [90].

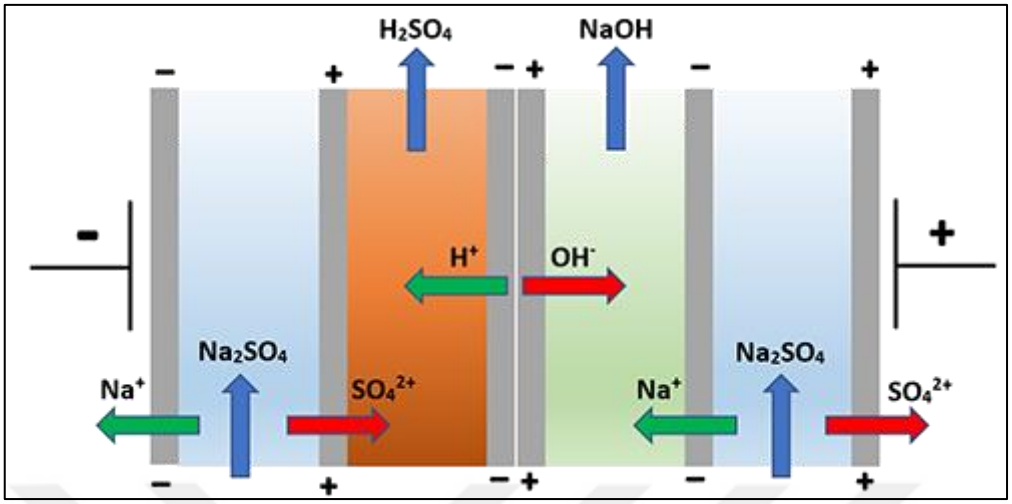
2.3.2.5 Karbon azaltım potansiyeli

Klasik kimyasal nötralizasyonlar yerine BMED kullanılırsa CO_2 yayımı (örn. kireç/kostik üretiminden gelen) azalır [91].

2.3.2.6 Sıfır Sıvı Deşarj (ZLD) Sistemlerinde Entegrasyon

- BMED, RO brine gibi yüksek TDS'li akımlarda kullanılabilir [92].

- RO sonrası tuzlu akımı asit/baz + su olarak ayırarak tam kapalı döngü oluşturur [92].



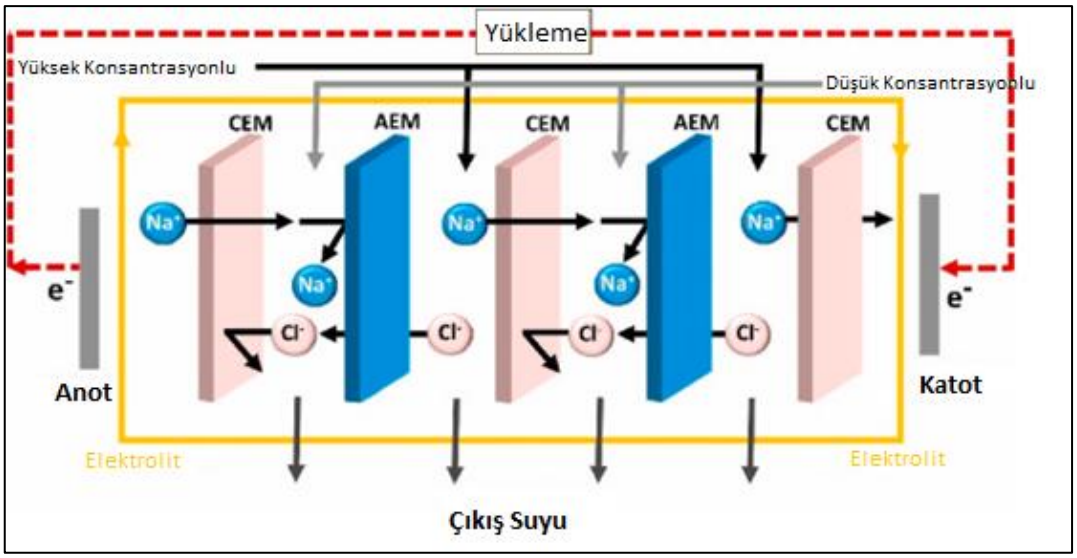
Şekil 2.4 Bipolar membranlı elektrodiyaliz şematiği

Tablo 2.3 Klasik ED vs BMED farkı özeti

Özellik	Klasik ED	Bipolar ED
Amaç	Tuz giderimi (desalinasyon)	Asit ve baz üretimi
Membran tipleri	AEM + CEM	AEM + CEM + BMED
Ürün	Düşük iletkenlikli su	HX + MOH
Reaksiyon	İyon göçü	Su disosiasyonu + iyon göçü
Enerji tüketimi	Düşük (~0.5–2 kWh/m³)	Yüksek (~1–4 kWh/kg asit/baz)
Kimyasal katkı	Gerekmez	Gerekmez (su kaynağı yeterli)
Uygulama	İçme suyu, endüstriyel su	Kimyasal geri kazanım, ZLD

2.3.3 Ters Elektrodiyaliz (RED)

Ters elektrodiyaliz (RED), tuzluluk gradyanlarından elektrik üretmek için iki elektrot arasında değişen anyon ve katyon değişim membranlarına (AEM ve CEM) dayanan bir teknolojidir (Şekil 2.4) [86]. Bir iyon değişim membranı boyunca iki çözelti arasındaki tuzluluk farkı, anyonları ve katyon iyonlarını (sırasıyla AEM ve CEM boyunca) yüksek konsantrasyon bölgelerinden düşük konsantrasyon bölgelerine taşıyan bir elektrik potansiyeli gradyanıyla sonuçlanır [93]. Elektrotlar daha sonra iyon akışını ya su ayırma ya da geri dönüşümlü bir redoks reaksiyonu yoluyla elektrik akımına dönüştürür [94]. Ters elektrodiyalizdin şematiği Şekil 2.5'te gösterilmiştir.



Şekil 2.5 Ters elektrodiyaliz şematiği

2.4 Elektrodiyalizde Enerji Kazanımı

Enerji geri kazanımı odağında, klasik elektrodiyaliz (KED) ile oluşturulan yüksek tuzluluklu konsantre akımın reverse elektrodiyaliz (RED) ünitesinde düşük tuzluluklu bir akım ile eşleştirilmesi en verimli yaklaşımdır [95]. BMED ise enerji geri kazanımından ziyade, kalan tuzlu akımın asit ve baza dönüştürülerek kimyasal geri kazanımının hedeflendiği son basamak olarak konumlandırılmalıdır [90].

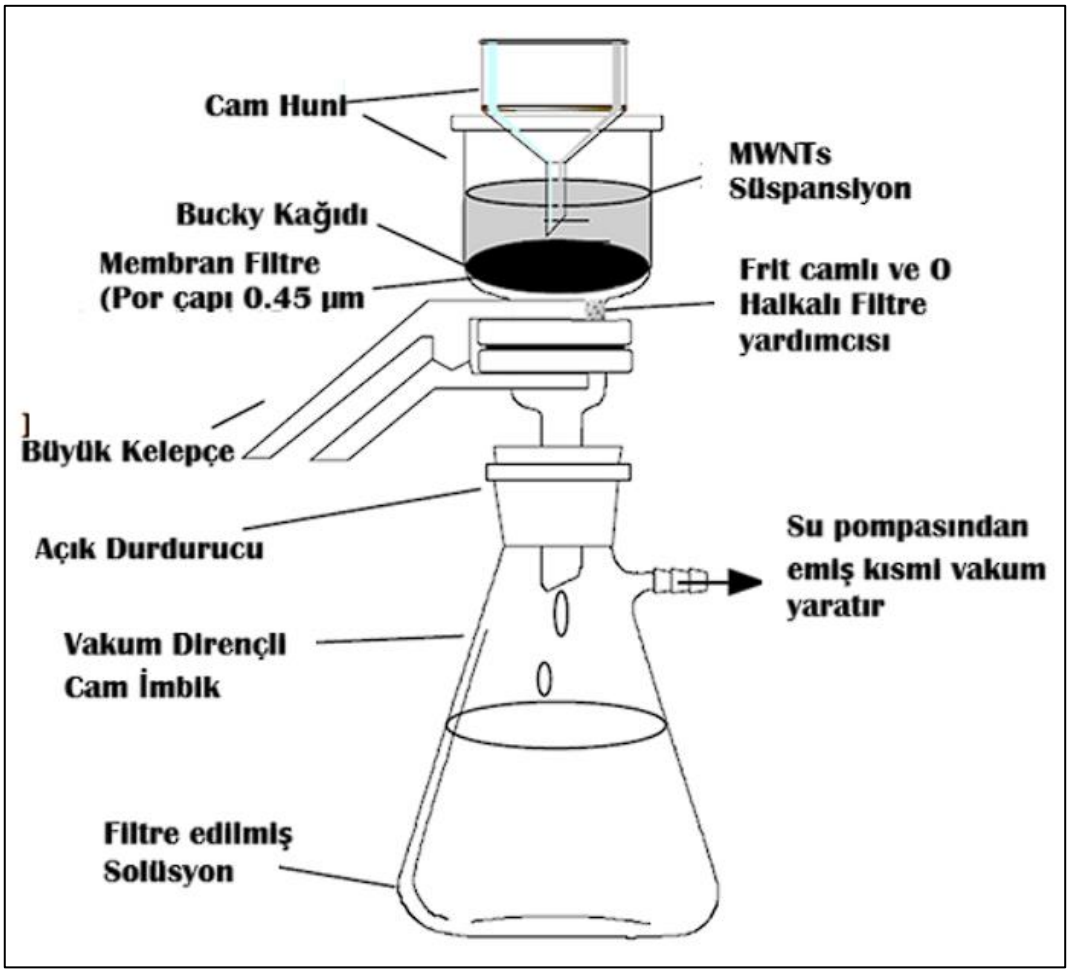
- KED önce işi yapar: hedeflenen desalinasyonu/iyon ayrımını yapar ve konsantre (brine) üretir.
- RED sonra bu brine'ı, bir düşük tuzluluk akımı ile eşleştirip elektrik üretir (enerji geri kazanım adımı burada). Brine'ın RED'de "yüksek tuzlu akım" olarak kullanımı literatürde çok yaygındır.
- BMED en sona: artık "atık yönetimi/kimyasal geri kazanım" için kalan tuzlu akımı asit + baza çevirir (bu aşama enerji geri kazanımı değil, kimyasal ürün kazanımıdır) [96].

  Teorikte en mantıklı işletme sıralaması KED → RED → BMED.

2.5 Vakum Membran Filtrasyonu

VMF, termal çok etkili damıtma ve membran filtreleme adımının avantajlarını birleştiren gelişmiş bir teknolojidir: ilk önce su, buharlaştırma yoluyla

kirleticilerinden ayrılır ve üretilen buhar, mikro gözenekli, hidrofobik, buhar geçirgen bir membran tarafından filtrelenir [97]. Vakum membran filtrasyonunun temsili Şekil 2.6'da gösterilmiştir.

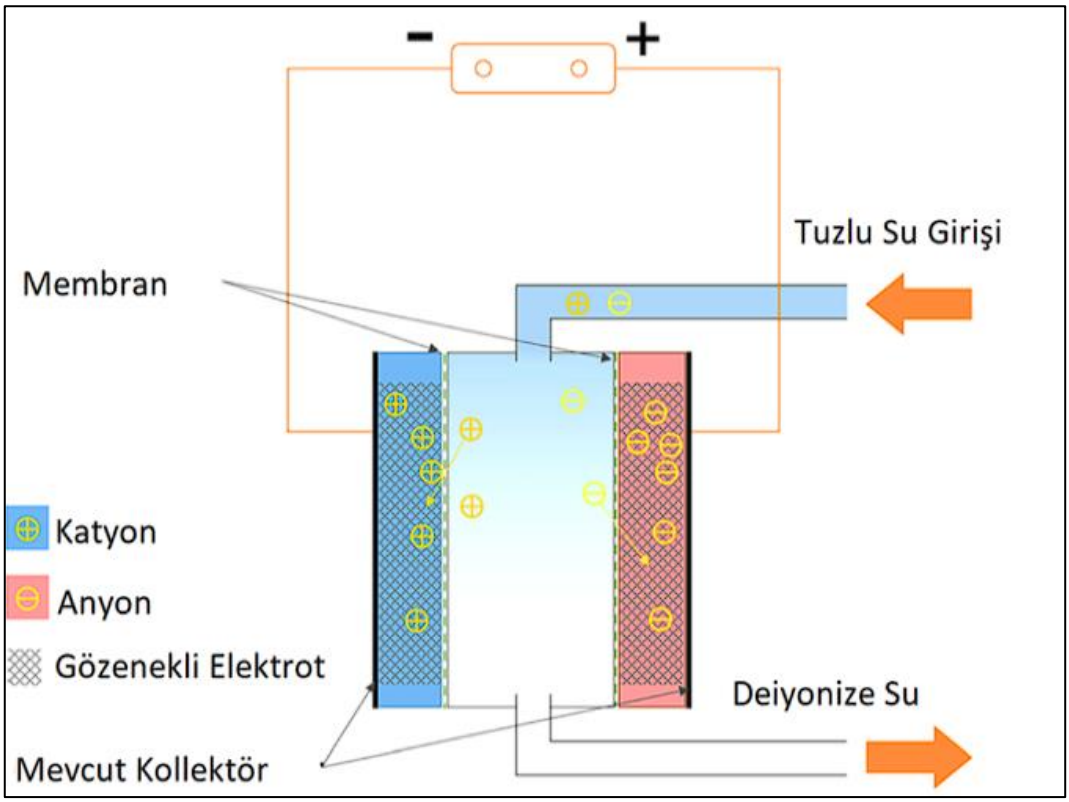


Şekil 2.6 Vakum membran filtrasyonu

2.6 Kapasitif Deiyonizasyon

Kapasitif deiyonizasyon iyonik ve polarize edilebilir türlerin sudan uzaklaştırılması için ortaya çıkan ve gelecek vaat eden yeni bir teknoloji olup [98], iyonları zıt yüklü bir elektrot üzerine yerleştirerek ayıran elektrokimyasal bir yöntemdir [99]. Elektrot malzemeleri bu operasyonda önemli bir rol oynar; Uygun bir elektrotun iyi iletkenliğe, yüksek stabiliteye ve spesifik yüzey alanına sahip olması gerekir [53]. Geleneksel KDİ sistemlerinde yüksek elektrokimyasal yüzey alanına sahip gözenekli karbon elektrotlar kullanılır; bu elektrotlar, besleme suyu akışındaki iyonları, şarj sırasında oluşturulan elektrikli çift katman aracılığıyla sürekli olarak adsorbe eder [100]. Oluşturulan potansiyel, elektrodu solvatlanmış iyonlarla

doyurarak yeniden oluşturmak için boşaltılabilir veya tersine çevrilebilir [100]. Hücre şarjı sırasında elektrotlarda toplanan enerji, başka bir elektrokimyasal sistemi şarj etmek için kullanılabilen süper kapasitörlere benzer doğal özelliklere sahip olması nedeniyle rejenerasyon boyunca geri kazanılabilir [53]. Kapasitif deiyonizasyon sistemi temsili Şekil 2.7'de gösterilmiştir.



Şekil 2.7 Kapasitif deiyonizasyon sistemi

2.7 Distilasyon

Distilasyon yöntemiyle desalinasyon (tuzdan arındırma), deniz suyu veya tuzlu yeraltı suyu gibi yüksek tuzluluk içeren suların içilebilir veya endüstriyel kullanım için uygun hale getirilmesi amacıyla uygulanan termal bazlı bir arıtma yöntemidir. Bu yöntemde temel prensip, suyun buharlaştırılıp ardından yoğunlaştırılarak tuz ve diğer safsızlıklardan ayrılmasıdır [101].

Distilasyon, suyun faz değişimi (sıvı → buhar → sıvı) prensibine dayanır. Tuz ve diğer inorganik maddeler, suyun buharına geçemez; buhar yoğunlaştırıldığında elde edilen su oldukça saf olur. Yani su buharlaştırıldığında tuz geride kalır ve buhar tekrar sıvı hale getirilerek tatlı su elde edilir [101]. Literatüre bakıldığında çoğu zaman distilasyon metotlarının birlikte kullanıldığı görülmektedir.

2.7.1 Enerji Kullanımı

- Distilasyon süreçleri enerji yoğundur. Genellikle termal enerji (yakıt veya atık ısı) ve bazen elektrik enerjisi gerektirir [102]
- MSF ve MED sistemlerinde buhar genellikle enerji santrallerinden ya da endüstriyel proseslerden geri kazanılır [101].
- Enerji geri kazanım sistemleri, toplam işletme maliyetlerini azaltmak için çok önemlidir.

2.7.2 Çevresel Etkiler

2.7.2.1 Olumlu Yönleri

- Kaliteli ve güvenilir tatlı su sağlar.
- Kimyasal kullanımı RO (ters osmoz) kadar yoğun değildir.
- Mikrobiyolojik olarak güvenli su üretir (yüksek sıcaklıklar patojenleri öldürür) [102].

2.7.2.2 Olumsuz Yönleri

- Yüksek enerji tüketimi (özellikle fosil yakıta dayalı sistemlerde).
- Tuzlu atık (brine) denize veya toprağa deşarj edilirse ekosistemlere zarar verebilir.
- Atık ısının çevreye yayılması deniz suyu sıcaklığını artırabilir.

2.8 Membran Distilasyonu

Membran distilasyonu, hidrofobik mikroporlu bir membran kullanarak sıvı ve buhar fazını ayıran, termal olarak yönlendirilen bir ayırma işlemidir. Sıcak tarafta bulunan sıvıdan buharlaşan su buharı membran gözeneklerinden geçer ve soğuk tarafta yoğunlaşarak saf su oluşturur. Bu süreçte, buhar basıncı farkı sıcaklık farkıyla sağlanır [103].

2.8.1 Avantajları

- Atmosfer basıncında çalışır ve yüksek tuz/redüklenebilir çözelti konsantrasyonlarıyla bile %99,9'a varan iyon reddi sağlar [104].

- Düşük sıcaklıklarda (≲90 °C) çalışabildiği için atık ısı veya güneş enerjisi kullanılabilir [104].
- RO gibi basınçlı sistemlere göre kirlenme'e karşı daha toleranslıdır.

2.8.2 Dezavantajları

Membran distilasyonların dezavantajları Tablo 2.4'de verilmiştir.

Tablo 2.4 Membran distilasyonu dezavantajları

Yüksek Termal Enerji Tüketimi	Deniz suyu desalinasyonunda MD genellikle ısıtma için önemli enerji gerektirir. Bu, özellikle büyük kapasitelerde maliyet artışına neden olur.[105]
Isı Kaybı	DCMD gibi konfigürasyonlarda ısı kaybı yüksektir; enerji geri kazanımı sistemleri zor ve pahalı olabilir [106]
Membran Wetting (Islanma) Riski	Deniz suyundaki organik maddeler ve yüzey aktif maddeler membranın ıslanmasına neden olabilir. Wetting performans düşüşü getirir ve membran ömrünü kısaltır [107]
Kirlenme ve Tuz Birikimi	Deniz suyundaki kalsiyum, magnezyum gibi sertlik iyonları membran yüzeyinde birikerek kirlenme oluşturabilir. Bu da akış ve verimi azaltır [107]
Sınırlı Ticari Ölçek	RO gibi teknolojilerle karşılaştırıldığında MD teknolojisi daha az olgun, büyük çapta uygulamaları daha sınırlı [108]
Sistem Kompleksliği ve Yatırım Maliyeti	Özellikle vakumlu veya hava boşluklu sistemlerde modül tasarımı karmaşıktır, Yatırım maliyetleri yüksek olabilir [108]

2.8.3 Genel Değerlendirme

- Deniz suyu desalinasyonunda, MD'nin termal enerji ihtiyacı dikkatle planlanmalıdır.
- Atık ısı kullanımı ya da güneş enerjisi entegrasyonu ideal; ancak bu enerji kaynaklarının sürekliliği ve verimliliği proje başarısını etkiler [109]
- MD'nin düşük elektrik tüketimi çevre dostudur ancak termal enerji kayıpları çevresel etkiyi artırabilir.
- Tuzlu konsantre (brine) yönetimi önemli; MD brine konsantrasyonunu artırabilir, uygun bertaraf yöntemleri gerekir.
- Deniz suyu için membran distilasyonu çevre mühendisi açısından potansiyel bir alternatif ancak enerji optimizasyonu kritiktir.
- Hibrit sistemler (MD + RO gibi) enerji verimliliğini artırabilir [110].
- Membran yüzey modifikasyonları ve kirlenme önleyici ön işlemler (ön arıtma, anti-scalant kullanımı) önemlidir [111].

2.8.4 Vakum Membranlı Distilasyon

Vakum membran distilasyonu (Vacuum Membrane Distillation – VMD), membran distilasyonu ailesine ait bir desalinasyon (tuzdan arındırma) yöntemidir. Su arıtımında termal süreç ile membran teknolojisinin birleşimi olarak görülebilir.

2.8.4.1 Çalışma Prensibi

1. **Hidrofobik membran kullanımı:**
   VMD'de kullanılan membranlar hidrofobik (su itici) özellik gösterir. Bu nedenle sıvı su membran gözeneklerinden geçemez; sadece su buharı geçebilir [112]
2. **Besleme suyu ısıtılır:**
   Tuzlu su (örneğin deniz suyu veya tuzlu yeraltı suyu) belirli bir sıcaklığa kadar ısıtılır. Sıcaklık arttıkça suyun buhar basıncı da yükselir [112]
3. **Vakum uygulanır:**
   Membranın diğer tarafında bir vakum pompası yardımıyla düşük basınç oluşturulur. Böylece membranın bir tarafında yüksek buhar basıncı, diğer tarafında ise düşük basınç vardır. Bu fark, suyun buhar fazına geçip membranın gözeneklerinden geçmesini sağlar [112]
4. **Yoğunlaştırma:**
   Membranın diğer tarafına geçen su buharı, bir kondenser (yoğunlaştırıcı) yüzeyde yoğuşturularak saf su olarak toplanır. Tuz ve diğer çözünmüş maddeler membranın giriş tarafında kalır [112].

Sıcaklık + vakum etkisiyle buhar geçirgenliği sağlanır, sadece saf su buharı membranı geçer, tuz ve kirleticiler geride kalır.

2.8.4.2 Avantajlar

- **Yüksek tuz reddi:** %95'in üzerinde tuz ve kirletici uzaklaştırma kapasitesine sahiptir [113]
- **Düşük sıcaklıkta çalışabilme:** 40–80 °C arasında çalışabildiğinden, güneş enerjisi, jeotermal enerji veya atık ısı gibi düşük dereceli enerji kaynaklarıyla entegre edilebilir [77]

- **Basınç gerektirmez:** Ters osmoz gibi yüksek basınca ihtiyaç duymaz, membranlar basınca bağlı olarak yıpranmaz [114]
- **Mikro kirleticilere karşı etkilidir:** Ağır metaller, mikroplastikler, mikroorganizmalar ve organik kirleticiler de tutulur [113]

2.8.4.3 Dezavantajlar

- **Enerji tüketimi:** Isıtma ve vakum pompası için enerji gerekir. Eğer bu enerji yenilenebilir kaynaklardan sağlanmazsa karbon ayak izi artar [113]
- **Tuzlu konsantre atık (brine):** Besleme suyunda kalan yoğun tuzlu atık, denize veya toprağa deşarj edilirse ekosistem için tehdit oluşturur (ozmotik baskı, ağır metal birikimi) [113]
- **Membran sorunları:** Uzun süreli kullanımda membran gözeneklerinin ıslanması (wetting) ve kirlenmesi (kirlenme, scaling) performansı düşürür [114].

2.8.4.4 Sürdürülebilirlik Potansiyeli

- **Yenilenebilir enerji entegrasyonu:** Özellikle güneş enerjisi ile ısıtma yapıldığında çevresel etkiler minimuma iner [97]
- **Atık ısı kullanımı:** Sanayi tesislerinden çıkan düşük dereceli ısı kaynaklarıyla entegre edilirse enerji maliyeti ve karbon salımı düşer [113]
- **Çevre dostu desalinasyon alternatifi:** Yüksek kaliteli içme suyu elde etme imkânı vardır; kıyı bölgelerinde su stresi yaşayan yerleşimlere çözüm olabilir [112].

2.9 Çok Aşamalı Distilasyon

Çoklu aşamalı distilasyon (Multistage Distillation veya genellikle kullanılan adıyla Multistage Flash Distillation – MSD), özellikle deniz suyundan tatlı su elde etmek için kullanılan termal desalinasyon yöntemlerinden biridir [115].

2.9.1 Çalışma Prensibi

Çok aşamalı distilasyon yani Multistage Flash Distillation, deniz suyu gibi tuzlu suların, çok sayıda basınç kademesinde ani buharlaştırılması (flash evaporation) prensibine dayanan bir desalinasyon yöntemidir

- Deniz suyu bir ısı değiştiriciden geçirilerek 90–110 °C civarında ısıtılır [116].
- Ardından bu ısıtılmış su, basıncın kademeli olarak düşürüldüğü "çoklu odalara (stages)" gönderilir
- Her basamakta basınç, suyun kaynama noktasından daha düşüktür → bu sayede suyun bir kısmı ani olarak buharlaşır [117].
- Oluşan buhar yoğunlaştırılır ve tatlı su olarak toplanır.
- Yoğunlaştırıcı olarak, sisteme giren soğuk deniz suyu kullanılır → böylece ısı geri kazanımı sağlanır [117]

Çok aşamalı distilasyonun çalışma özellikleri Tablo 2.5'te verilmiştir [117].

Tablo 2.5 Çok aşamalı distilasyon çalışma özellikleri

Özellik	Değer / Açıklama
Çalışma sıcaklığı	90–110 °C (giriş)
Aşamalar (stage)	15–30 (tipik)
Tuz reddi	%95 – %99,9
Geri kazanım oranı	%10–20 (deniz suyunda)
Enerji türü	Termal (buhar, atık ısı vb.)
Spesifik enerji tüketimi	~80–120 kWh/m³ (termal), ~2–3 kWh/m³ (elektrik)

2.10 Buhar Sıkıştırmalı Distilasyon

Buhar, mekanik bir kompresör yardımıyla sıkıştırılarak tekrar ısıtılır ve yoğuşturulur. Bu ısı, daha fazla suyun buharlaştırılmasında kullanılır. Küçük ölçekli sistemlerde (örneğin gemilerde veya adalarda) tercih edilir. Elektrik enerjisi ile çalışır; termal enerjiye kıyasla daha verimli olabilir [118].

Buhar sıkıştırmalı distilasyon (Vapor Compression Distillation), özellikle desalinasyon alanında kullanılan bir başka termal yöntemdir. Vakum membran distilasyonuna benzer şekilde düşük sıcaklık avantajı vardır ama mekanizması farklıdır.

2.10.1 Çalışma Prensibi

a. **Isıtma ve buhar oluşumu:**
   Tuzlu su (örneğin deniz suyu) belirli bir sıcaklığa kadar ısıtılır ve bir kısmı buharlaşır [119].

b. **Buhar sıkıştırma:**
   Oluşan su buharı, bir mekanik kompresör veya termal sıkıştırıcı (ejector) yardımıyla sıkıştırılır. Sıkıştırma işlemi buharın basıncını ve sıcaklığını yükseltir [119].
c. **Yoğunlaştırma ve ısı geri kazanımı:**
   Sıkıştırılmış sıcak buhar, **ısı değiştirici** olarak kullanılan boru yüzeylerinde yoğuşturulur. Yoğuşurken açığa çıkan gizli ısı (latent heat), besleme suyunu yeniden ısıtmak için kullanılır [119].
d. **Saf su üretimi:**
   Yoğunlaşan buhar saf su olarak toplanır. Tuzlu kısım ise besleme tarafında konsantre olarak kalır [119].

Özet:
Buhar sıkıştırmalı distilasyonda, buharın enerjisi geri kazanılır ve kendi kendini besleyen bir çevrim oluşturulur.

2.10.1.1 Avantajlar

- **Enerji verimliliği:** Gizli ısının geri kazanımı sayesinde klasik çok kademeli distilasyona (MSF) göre daha az enerji tüketir.
- **Düşük sıcaklıkta çalışabilme:** 60–90 °C aralığında verimli çalışır. Bu, düşük sıcaklıklı atık ısı kaynaklarıyla entegrasyon imkânı sağlar [119].
- **Yüksek ürün kalitesi:** Tuz ve kirleticilerden tamamen arındırılmış, çok düşük iletkenlikte saf su üretir.
- **Basit sistem tasarımı:** Diğer termal yöntemlere göre daha kompakt ve bakım kolaylığı sağlayan bir sistemdir.

2.10.1.2 Dezavantajlar

- **Konsantre atık (brine):** Yüksek tuzluluklu atık yine ortaya çıkar, çevreye deşarj edilmesi ekosistem riski taşır [120]
- **Mekanik aşınma ve gürültü:** Kompresör sürekli çalıştığından bakım ihtiyacı yüksektir, ayrıca enerji tüketimini artırır.
- **Yüksek ilk yatırım maliyeti:** Özellikle kompresör teknolojisi ve korozyona dayanıklı malzemeler sistemi pahalı kılar [120]

- **Kapasite sınırlaması:** Genellikle orta ölçekli tesislerde (örneğin otel, gemi, küçük adalar) tercih edilir, çok büyük ölçekli şehir şebekeleri için uygun değildir [120]

2.10.1.3 Sürdürülebilirlik Potansiyeli

- **Yenilenebilir enerjiyle entegre olabilir:** Rüzgâr veya güneş enerjisiyle çalışan elektrik kompresörleri, karbon ayak izini azaltır [121]
- **Atık ısı geri kazanımı:** Endüstriyel tesislerin atık ısı kaynaklarıyla birleştirilirse enerji verimliliği artar [121]
- **Daha düşük karbon emisyonu:** MSF gibi klasik distilasyon yöntemlerine kıyasla daha az enerji tükettiğinden çevresel etkisi görece düşüktür [121]

2.11 Solar Distilasyon

Güneş enerjisiyle su buharlaştırılır, buhar yoğuşturularak tatlı su elde edilir.

Genellikle basit güneş damıtıcıları kullanılır.

Düşük maliyetli ama verimi düşük bir yöntemdir [122].

Bireysel kullanım veya kırsal bölgelerde küçük ölçekli uygulamalarda uygundur [123].

2.12 Distilasyon Türlerinin Karşılaştırılması

Tablo 2.6'da distilasyon türlerinin karşılaştırılması verilmiştir.

Tablo 2.6 Distilasyon türlerinin avantaj ve dezavantajları

Yöntem	Avantajları	Dezavantajları	Kullanım Alanı
Çok Kademeli Ani Buharlaştırma (MSF) [117]	- Yüksek tuzluluk toleransı- Büyük ölçekli sürekli üretime uygun- Uzun ömürlü sistemler- Düşük mekanik arıza riski	- Yüksek termal enerji ihtiyacı- Büyük alan ve altyapı gereksinimi- Düşük enerji verimliliği	Büyük ölçekli deniz suyu arıtma tesisleri (örneğin Orta Doğu ülkeleri)

Tablo 2.6 Distilasyon türlerinin avantaj ve dezavantajları (devamı)

Çok Etkili Damıtma (MED) [115]	- Termal enerji geri kazanımı sağlar- MSF'ye göre daha düşük enerji tüketimi- Kompakt ve daha verimli tasarım	- Tasarımı ve kontrolü karmaşık- Kirlenme (kireçlenme) problemi- Yüksek ilk yatırım maliyeti	Orta–büyük ölçekli sanayi ve belediye su arıtımı
Buhar Sıkıştırmalı Damıtma (VC veya MVC) [116]	- Tamamen elektrikle çalışabilir- Kompakt ve taşınabilir sistem- Düşük tuzlu atık (brine) üretimi- Düşük sıcaklıkta çalışabilir	- Yüksek elektrik tüketimi (~7–12 kWh/m³)- Kompresör bakım ihtiyacı- Küçük–orta ölçekle sınırlı	Adalar, gemiler, uzak bölgeler, mobil su arıtma sistemleri
Güneş Enerjili Damıtma (Solar Distilasyon) [122]	- Yenilenebilir ve çevreci enerji kullanımı- Basit ve düşük maliyetli sistem- Karbonsuz su üretimi	- Düşük verim (~3–5 L/m²/gün)- Güneş ışınımına bağımlılık- Büyük ölçekli üretime uygun değil	Kırsal alanlar, bireysel kullanım, afet bölgeleri
Membran Damıtma (MD) [124]	- Düşük sıcaklıkta çalışır (45–80 °C)- Yüksek saflıkta su üretimi- Modüler ve hibrit sistemlere uygun	- Membran kirlenmesi riski- Yüksek yatırım ve işletme maliyeti- Ticari olarak henüz yaygın değil	Pilot projeler, endüstriyel atık su geri kazanımı

2.13 Teknik Açıdan Değerlendirme

Bu başlıkta tüm içme suyu eldesinde kullanılan desalinasyon sistemlerinin dünya üzerinde hangi denizlerde etkili ve verimli çalıştığıyla alakalı literatürdeki bilimsel araştırmalara dayalı teknik açıdan özet, Tablo 2.7'de verilmiştir.

Tablo 2.7 Teknik açıdan değerlendirme

Kaynak Deniz / Bölge	Tuzluluk Oranı PSU	Desalinasyon Teknolojileri (yaygın)	Proses (kısa)	Ekipman İhtiyacı (Pompa, Elektrik vb.)	Olumlu veya Olumsuz Yanlar ve Verimi	Kaynak
Marmara Denizi	23	Acı RO, UF + aktif karbon ön arıtma	RO: Basınçla düşük tuzluluk suyunun membranla ayrılması UF: Organik madde ve bulanıklık giderimi	Orta basınç pompası, UF modülleri, aktif karbon filtreleri, koagülasyon tankı	Tuzluluk düşük, enerji tüketimi görece düşük; ön arıtma zorunlu, membran kirlenme riski yüksek.	[125], [126]
Akdeniz	38	SWRO, sınırlı MED/MSF	SWRO: Basınçla membran filtrasyonu MED: Çok kademeli buharlaştırma	SWRO: Yüksek basınç pompaları, enerji geri kazanım, UF ön arıtma MED: Buhar kazanları, pompalar, düşük basınçlı vakum sistemi	Yüksek Tuzluluk, MSF (Multi-Stage Flash) ve MED (Multi-Effect Distillation), yüksek tuzluluklu deniz suyunda en güvenilir teknolojilerdir.	[127]
Basra Körfezi (Persian Gulf) Çok yüksek tuzluluk (>45 g/L), sıcaklık >30°C	40	MSF, MED, hibrit SWRO + termal	MSF/MED: Çok kademeli buharlaştırma, yoğun ısı kullanımı SWRO: Yüksek basınç membran filtrasyonu	Termal: Buhar kazanları, kondansörler, pompalar, yoğun enerji (ısı + elektrik) SWRO: Yüksek basınç pompaları, enerji geri kazanım cihazları (ERD), ön arıtma ünitesi	Yüksek Tuzluluk, MSF (Multi-Stage Flash) ve MED (Multi-Effect Distillation), yüksek tuzluluklu deniz suyunda en güvenilir teknolojilerdir.	[128], [129]

Tablo 2.7 Teknik açıdan değerlendirme (devamı)

Kızıldeniz (Red Sea)	40	SWRO (çoğunlukla), bazı Acı bölgelerde ED/EDR	SWRO: Ters osmoz, deniz suyunun membranda basınçla ayrıştırılması ED: İyon seçici membranlarla elektrik alanında iyonların uzaklaştırılması	SWRO: Yüksek basınç pompaları, ön arıtma (UF, koagülasyon), klor giderimi, enerji geri kazanım ünitesi ED: Düşük basınç pompaları, DC güç kaynağı	Yüksek Tuzluluk, MSF (Multi-Stage Flash) ve MED (Multi-Effect Distillation), yüksek tuzluluklu deniz suyunda en güvenilir teknolojilerdir.	[130], [129]
Akdeniz (Doğu ve Batı)	38	SWRO (çoğunlukta), sınırlı MED/MSF	SWRO: Membranla yüksek basınçlı ayırma MED: Çok kademeli düşük basınçta buharlaştırma	SWRO: Yüksek basınç pompası, enerji geri kazanım ünitesi, ileri ön arıtma (UF, koagülasyon) MED: Buhar kazanı, pompalar, düşük basınçlı vakum sistemi	Orta tuzluluk (35–38 g/L) SWRO için ideal. Enerji tüketimi düşük (2.8–3.8 kWh/m³).	[130], [129]
Baltık ve Kuzey Denizleri (düşük tuzluluk)	7-8	Acı RO, NF, ED	Acı RO: Düşük basınçta membran filtrasyonu NF: Yarı geçirgen membranla iyon seçici filtrasyon ED: Elektrik alanıyla iyon transferi	Acı RO: Orta basınç pompası, UF ön arıtma, enerji geri kazanım cihazı ED: DC güç kaynağı, düşük basınç pompaları	Tuzluluk düşük olduğu için enerji tüketimi çok düşük (1–1.8 kWh/m³).	[131], [129]
Karadeniz (yüzey düşük tuzluluk, organik yük yüksek)	17	Acı RO, UF + aktif karbon ön arıtma	RO: Basınçla düşük tuzluluk suyunun membranla ayrılması UF: Organik madde ve bulanıklık giderimi	Orta basınç pompası, UF modülleri, aktif karbon filtreleri, koagülasyon tankı	Ön arıtma zorunlu, aksi halde membran kirlenme riski çok yüksek.	[129], [132], [133]

Tablo 2.7 Teknik açıdan değerlendirme (devamı)

Hazar Denizi (Caspian Sea) (kapalı havza, değişken tuzluluk)	12-13	Acı (Brackish) RO, ED, hibrit sistemler	Acı RO: Düşük basınçlı membran filtrasyonu ED: Düşük TDS sular için iyon transferi	Düşük basınç pompaları, UF ön arıtma, DC güç kaynağı (ED)	Kapalı havza olduğu için brine yönetimi kritik; düşük enerji avantajı sağlar.	[134], [135], [129]
Atlantik Okyanusu Kıyıları (İspanya, ABD, Güney Afrika)	35	SWRO, bazı MED tesisleri	SWRO: Basınçla membran filtrasyonu	Yüksek basınç pompaları, enerji geri kazanım cihazları, ön arıtma (UF, multimedia)	Açık deniz sayesinde brine dispersiyonu kolay, büyük ölçek ekonomik.	[136], [137], [129]
Pasifik Kıyıları (Avustralya, Kaliforniya)	35	SWRO, pilot MD (Membrane Distillation)	SWRO: Basınçla membran filtrasyonu MD: Düşük basınçta buhar difüzyonu	SWRO: Yüksek basınç pompası, ERD, ön arıtma MD: Düşük basınç pompası, düşük sıcaklık ısı kaynağı	Adalar ve kurak bölgelerde ideal; yenilenebilir enerjiyle entegre edilebilir.	[138], [139], [129]
Hint Okyanusu / Arabistan Denizi	35	SWRO, bazı termal tesisler	SWRO: Yüksek basınç membran filtrasyonu MED/MSF: Çok kademeli buharlaştırma	SWRO: Yüksek basınç pompaları, ERD, UF ön arıtma Termal: Buhar kazanları, pompalar	Tropikal denizlerde biyolojik yük yüksek, güçlü ön arıtma gerekli.	[140], [141], [129]
Küçük Ada Devletleri (Pasifik, Hint Okyanusu)	35	SWRO küçük ölçek, MD, HDH (Humidification-Dehumidification)	SWRO: Küçük ölçekli membran filtrasyonu MD: Düşük sıcaklık buhar transferi HDH: Nemlendirme + yoğuşturma	SWRO: Orta basınç pompası, UF MD/HDH: Düşük basınç pompaları, düşük sıcaklık ısı kaynağı	Küçük ölçekli ve enerji bağımsız sistemler için ideal.	[142], [143], [129]

2.14 Ekonomik Açıdan Değerlendirme

SWRO (Seawater Reverse Osmosis) sistemleri, enerji geri kazanımı sayesinde 1 USD/m³ altında üretim maliyetine inebilen tek büyük ölçekli teknolojidir.

Termal (MSF, MED) sistemler genelde yüksek enerji fiyatlı ülkelerde ekonomik değildir, yalnızca enerji sübvansiyonu olan bölgelerde (örneğin Körfez ülkeleri) sürdürülebilir.

Acı RO sistemleri, özellikle Marmara, Hazar, Karadeniz gibi orta tuzluluklu bölgelerde hem CAPEX (sermaye harcaması) hem OPEX (işletme giderleri) açısından en ekonomik çözümdür.

Yenilenebilir enerji destekli hibrit sistemler (RO + MD, RO + Solar) özellikle ada ülkelerinde enerji bağımsızlığı sağlayarak uzun vadede maliyeti dengeleyebilir.

Ekonomik açıdan özet, Tablo 2.8'de verilmiştir.

Tablo 2.8 Ekonomik açıdan değerlendirme

Kaynak Deniz / Bölge	Tuzluluk (PSU)	Tahmini Maliyet (USD/m³)	CAPEX / OPEX Düzeyi	Enerji Kaynağı ve Maliyeti	Ekonomik Uygunluk / Riskler	Kaynak
Marmara Denizi	23	0.6 – 0.9	Orta CAPEX, düşük OPEX	Elektrik 2.0–2.8 kWh/m³	Orta tuzluluk nedeniyle enerji gideri düşük; ancak organik yük nedeniyle ön arıtma maliyetleri artabilir. Yerel kullanım için ekonomik.	[101], [102], [144]
Akdeniz	38	0.9 – 1.3	Orta-Yüksek CAPEX, orta OPEX	Elektrik 3–4 kWh/m³	Geniş ölçekli SWRO tesisleri enerji verimliliğiyle birim maliyeti düşürür. Büyük tesislerde ölçek ekonomisi avantajı vardır.	[103], [127], [144]
Basra Körfezi (Persian Gulf)	40+	1.5 – 2.2	Yüksek CAPEX, yüksek OPEX	Elektrik + ısı 6–10 kWh/m³ eşdeğer	Yüksek sıcaklık ve tuzluluk, ekipman ömrünü azaltır. Termal sistemlerin enerji maliyeti çok yüksektir; genelde petrol sübvansiyonlarıyla finanse edilir.	[104], [105], [145]
Kızıldeniz (Red Sea)	40	1.2 – 1.8	Yüksek CAPEX, orta-yüksek OPEX	Elektrik 3.8–5.0 kWh/m³	SWRO tesisleri baskın; enerji maliyetine bağlı karlılık değişken. Brine yönetimi maliyeti yüksektir.	[130], [146]

Tablo 2.8 Ekonomik açıdan değerlendirme (devamı)

Baltık & Kuzey Denizi	7–8	0.4 – 0.7	Düşük CAPEX, düşük OPEX	Elektrik 1.0–1.8 kWh/m³	Düşük tuzluluk maliyeti düşürür; ancak düşük su talebi nedeniyle ölçek ekonomisi sınırlı.	[105]
Karadeniz	17	0.7 – 1.0	Orta CAPEX, orta OPEX	Elektrik 2.0–3.0 kWh/m³	Tuzluluk düşük, ama organik madde yüksek → ön arıtma maliyeti artar. Enerji maliyeti görece düşük.	[105], [108], [109], [144]
Hazar Denizi (Caspian)	12–13	0.6 – 0.8	Orta CAPEX, düşük OPEX	Elektrik 1.8–2.5 kWh/m³	Brine yönetimi ek maliyet yaratabilir; düşük enerji gideri avantaj sağlar.	[134], [135]
Atlantik (Atlas) Okyanusu	35	0.8 – 1.1	Orta CAPEX, düşük OPEX	Elektrik 3.0–4.0 kWh/m³	Açık deniz deşarjı sayesinde işletme maliyeti düşük; büyük ölçekli tesisler ekonomik.	[112], [113], [147]
Pasifik (Büyük) Okyanus (Avustralya, Kaliforniya)	35	1.0 – 1.5	Orta-Yüksek CAPEX, orta OPEX	Elektrik 3–4.5 kWh/m³	Kuraklık dönemlerinde su değeri artar → yatırım geri dönüş süresi kısalır. Yenilenebilir enerji entegrasyonu ekonomik avantaj sağlar.	[114], [115], [148]
Hint Okyanusu / Arabistan Denizi	35	1.1 – 1.6	Orta-Yüksek CAPEX, orta OPEX	Elektrik 3.5–5.0 kWh/m³	Tropikal sıcaklık ve biyolojik yük bakım maliyetini artırır. Enerji fiyatları dalgalı.	[149], [141]

Tablo 2.8 Ekonomik açıdan değerlendirme (devamı)

Küçük Ada Devletleri	35	1.3 – 2.0	Düşük CAPEX, yüksek OPEX (küçük ölçek)	Elektrik 3–6 kWh/m³	Küçük ölçekli sistemlerde birim maliyet yüksek; ancak yenilenebilir kaynaklarla enerji maliyeti azaltılabilir.	[142], [143]

2.15 Uygulanabilirlik Açısından Karşılaştırılması

- En yüksek uygulanabilirlik: Akdeniz (özellikle İspanya, İsrail, Türkiye kıyıları) ve Pasifik kıyıları (Avustralya, Kaliforniya) → teknik, ekonomik ve lojistik olarak en dengeli bölgeler [103].
- Orta düzey uygulanabilirlik: Marmara, Karadeniz ve Hazar Denizi → su kalitesi ve çevresel sınırlamalar uygulanabilirliği azaltıyor [134], [135].
- Özel durum: Basra Körfezi ve Kızıldeniz → teknik olarak uygulanabilir, ancak çevresel etkiler ve enerji yükü nedeniyle sürdürülebilirliği tartışmalıdır [104], [105],

Uygulanabilirlik açısından özet değerlendirme, Tablo 2.9'da verilmiştir.

Tablo 2.9 Uygulanabilirlik açısından değerlendirme

Kaynak Deniz / Bölge	Tuzluluk (PSU)	Uygulama Ölçeği	Altyapı ve Lojistik Uygunluğu	Su Talebi / Kaynak Sürekliliği	Çevresel & Politik Faktörler	Genel Uygulanabilirlik (1–5)	Kaynak
Marmara Denizi	23	Orta	Kıyı altyapısı mevcut, enerji temini kolay	Sanayi ve kent suyu talebi yüksek, sürdürülebilir	Brine deşarjı kapalı deniz olduğu için dikkat ister	4	[101], [102]
Akdeniz	38	Büyük	Liman ve enerji altyapısı güçlü	Turizm ve kent talebi yüksek	Brine deşarjı çevresel izin gerektirir	4	[103]
Basra Körfezi (Persian Gulf)	40+	Çok Büyük	Yüksek enerji erişimi, geniş tesis altyapısı	Sürekli su kıtlığı → yüksek gereksinim	Brine ve ısı deşarjı büyük çevre sorunu	3	[104], [105]
Kızıldeniz (Red Sea)	40	Büyük	Enerji erişimi yüksek, ancak jeolojik yapı karmaşık	Talep yüksek (özellikle Suudi Arabistan, Mısır)	Kapalı havza → brine etkisi yüksek	4	[106], [105]
Akdeniz (Doğu & Batı)	38	Büyük	Kıyı altyapısı gelişmiş, dağıtım kolay	Tarım ve kent kullanımı dengeli	Brine regülasyonu iyi yönetiliyor	5	[106], [105]
Baltık & Kuzey Denizi	7–8	Orta	Soğuk iklim → enerji yönetimi zayıf	Su kıtlığı düşük	Ekonomik olarak gereksiz, çevre etkisi az	5	[107], [105]
Karadeniz	17	Orta	Altyapı gelişmekte, kentsel entegrasyon mümkün	Mevsimsel debi değişimi fazla	Organik yük yüksek → ön arıtma zor	3	[105], [108], [109]

Tablo 2.9 Uygulanabilirlik açısından değerlendirme (devamı)

Hazar Denizi (Caspian)	12–13	Orta	Kıyı altyapısı sınırlı	Kapalı havza, su talebi artıyor	Brine yönetimi kritik, çevre kısıtlı	3	[135], [134]
Atlantik Okyanusu	35	Büyük	Altyapı mükemmel (İspanya, ABD, G. Afrika)	Talep sürekli ve yüksek	Açık deniz deşarjı kolay → çevresel risk az	5	[112], [113], [105]
Pasifik (Avustralya, Kaliforniya)	35	Büyük	Enerji altyapısı güçlü, dağıtım sistemi mevcut	Kuraklık kaynaklı yüksek su talebi	Yenilenebilir enerjiyle desteklenebilir	5	[114], [115], [105]
Hint Okyanusu / Arabistan Denizi	35	Büyük	Altyapı gelişmekte, enerji fiyatı dalgalı	Talep artıyor (Hindistan, Pakistan kıyıları)	Biyolojik yük ve izin süreçleri zorlayıcı	4	[116], [117], [105]
Küçük Ada Devletleri	35	Küçük	Altyapı sınırlı, enerji bağımlı	Sürekli su kıtlığı	Yenilenebilir enerji entegrasyonu şart	3	[118], [119], [105]

Tablo 2.10 Ters osmoz ve elektrodiyalizi öne çıkaran özellikler

Başlık	RO	ED / EDR
Enerji verimliliği	Yüksek, özellikle enerji geri kazanım sistemleriyle	Düşük-orta tuzlulukta en verimli yöntem
Atık su miktarı	%40–50 brine	%15–25 brine (daha az atık)
Kimyasal gereksinim	Antiscalant, pH düzenleyici	Minimal (çoğu sistemde gerekmez)
Gürültü/ısı yayılımı	Orta	Çok düşük
CO_2 emisyonu	Elektrik kaynağına bağlı	Daha düşük (daha az enerji)
Entegre sürdürülebilirlik	PV–RO (yenilenebilir destekli) yaygın	PV–ED sistemleri özellikle uzak bölgelerde uygun

Ters osmoz, yüksek tuzluluklu sularda ve büyük ölçekli içme suyu tesislerinde teknik olarak üstün ve ekonomik olarak daha avantajlıdır. Elektrodiyaliz ise düşük–orta tuzlulukta, enerji tüketiminin tuz konsantrasyonuna bağlı olarak düşük olduğu, ayrıca iyon seçiciliği veya kimyasal geri kazanımın gerektiği durumlarda çevresel ve ekonomik olarak daha sürdürülebilir bir çözümdür. İlgili özet, Tablo 2.10'da verilmiştir.

2.16 Remineralizasyon Prosesi

2.16.1 Prosesin Amacı

Desalinasyon yapılan ülke'nin içme suyu standartlarını sağlaması gereklidir. Bu uygulama Türkiye'de "İnsani Tüketim Amaçlı Sular Hakkında Yönetmelik" değerlerinin sağlanması, insani tüketime sağlık açısından uygun hale gelmesi ve çıkış suyunu korozif etkiden kurtartmak maksadıyla yapılmaktadır.

SWRO/RO permeatı genellikle çok düşük alkalinite ve sertlikte, tamponlama kapasitesi zayıf ve çoğu durumda korozif/agresif karakterdedir. Pratik hedef; suyu kalsit–karbonik dengeye yaklaştırmak, alkaliniteyi (HCO_3^-) ve Ca^{2+}/Mg^{2+} içeriğini içme suyu standardına ve dağıtım şebekesi malzemelerine uyumlu seviyeye taşımaktır [150]. Literatürde içme suyu için örnek bir alt eşik olarak ~60 mg/L bikarbonat ifadesi geçer [151].

Remineralizasyonun mühendislik hedefleri genelde şunlardır:

- pH ve alkalinite kontrolü (tampon kapasiteyi artırma) [151].
- Kalsiyum sertliği artırma (Ca^{2+}) [152].
- Korozyon/çökelme dengesini stabil tutma Langelier Doygunluk İndeksi ve Kalsiyum Karbonat Yağış Potansiyeli (LSI/CCPP gibi göstergelerle). Tipik olarak 0,2-0,4 LSI ve 4-10 CCPP aralıklarındaki içme suyunda uygun kabul edilebilir [152].
- Giderek daha sık gündeme gelen şekilde magnezyumun (Mg^{2+}) geri kazandırılması (sağlık/zirai gerekçeler) [153].

2.16.2 Hedeflenen Su Kalitesi

Türkiye'de kullanılan içme ve kullanım amacıyla şuanki güncel adıyla T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı tarafından belirlenen Resmi Gazetede 17.02.2005 tarih ve 25730 sayılı "İNSANİ TÜKETİM AMAÇLI SULAR HAKKINDA YÖNETMELİK" olmuştur. Bu yönetmelik ve eklerinde geçen parametreler ve sınır değerlerini sağlayacak şekilde en son remineralize işlemi gerçekleştirilmelidir.

2.16.3 Prosesin Çeşitleri

2.16.3.1 CO_2 + kalsit (kireçtaşı) kontaktörü / kalsit çözündürme

Temel reaksiyon:

- $CaCO_3 + CO_2 + H_2O \rightarrow Ca^{2+} + 2\ HCO_3^-$

Uygulama olarak permeata kontrollü CO_2 verilir, sonra su kalsit yataktan (çoğunlukla yukarı akışlı) geçirilir [154]. Kimyasal olarak "nazik" bir sertleştirme sağlar; işletmesi genelde lime sistemlerine göre daha öngörülebilirdir [155]. Tasarım/işletmede kritik parametreler: CO_2 dozajı, yatak tane boyutu, EBCT (temas süresi), hidrolik hız, by-pass oranı ve hedef alkalinite/sertliktir [156].

2.16.3.2 Kireç ($Ca(OH)_2$) + CO_2 ile saturatör

Kireç sütüyle çalışır; Ca ve alkaliniteyi hızlı yükseltir. Ancak pratikte bulanıklık yönetimi**,** çamur/partikül taşınımı ve dozaj kontrolü daha "nazlı" olabilir. Ayrıca bazı raporlarda kireç kullanılan sistemlerde CO_2 tüketiminin kalsit kullanımına göre daha yüksek olabildiği ve depolama/dozaj zorlukları vurgulanır [157].

2.16.3.3 Kimyasal dozaj

$CaCl_2$, $MgCl_2$/$MgSO_4$, $NaHCO_3$/Na_2CO_3, NaOH gibi kimyasallar eklenebilir [158]. İşletme olarak "kolay" görünür; fakat iletkenliği/TDS'i artırır kimyasal tedarik fiyatlarına çok hassastır ve özellikle büyük debilerde OPEX'i hızlı büyütebilir [159]

2.16.3.4 Blending (ham su/arıtılmış su ile karıştırma)

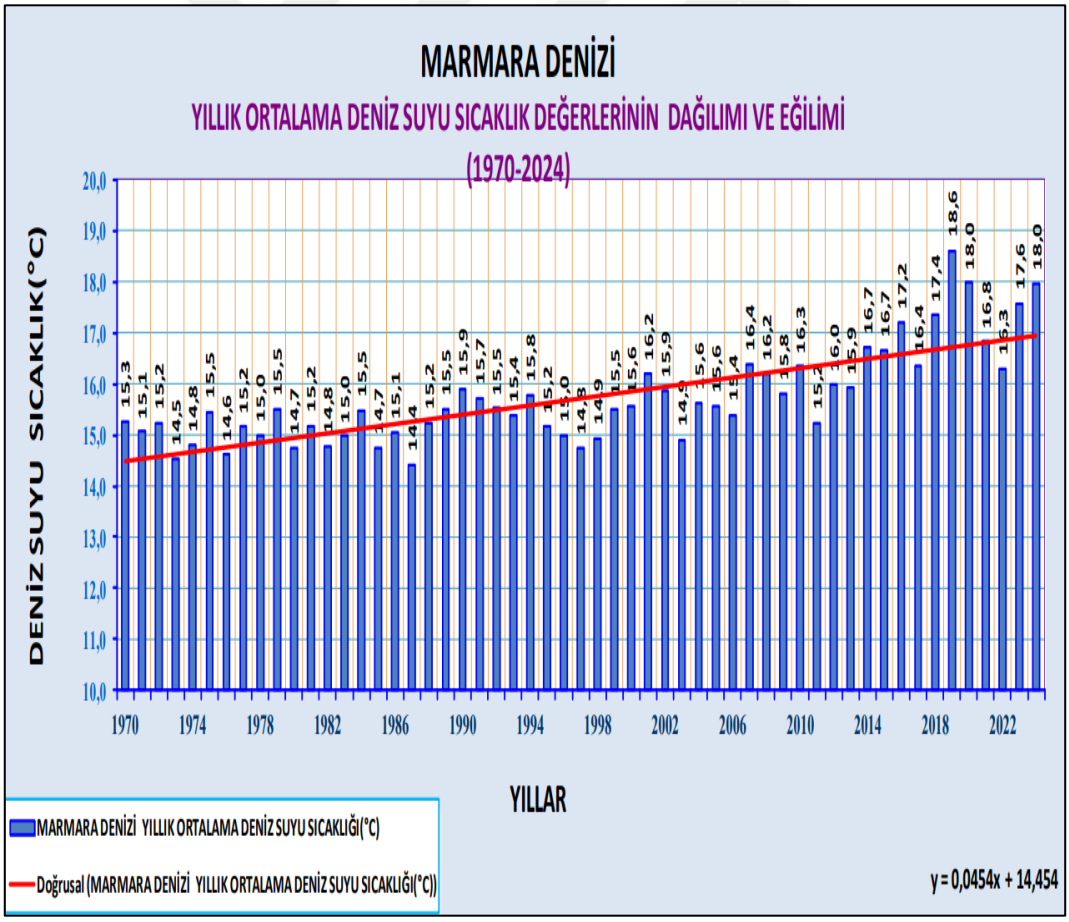
Uygun bir kaynak su varsa en ekonomik ve işletmesi rahat çözümlerden biri olur. Dezavantajı, kaynak su kalitesi ve mevsimselliğe bağımlı olmasıdır [158].

2.16.3.5 Mg^{2+} için ilave adım (Mg tuzu dozajı, dolomit çözündürme, iyon değişimi, NF vb.)

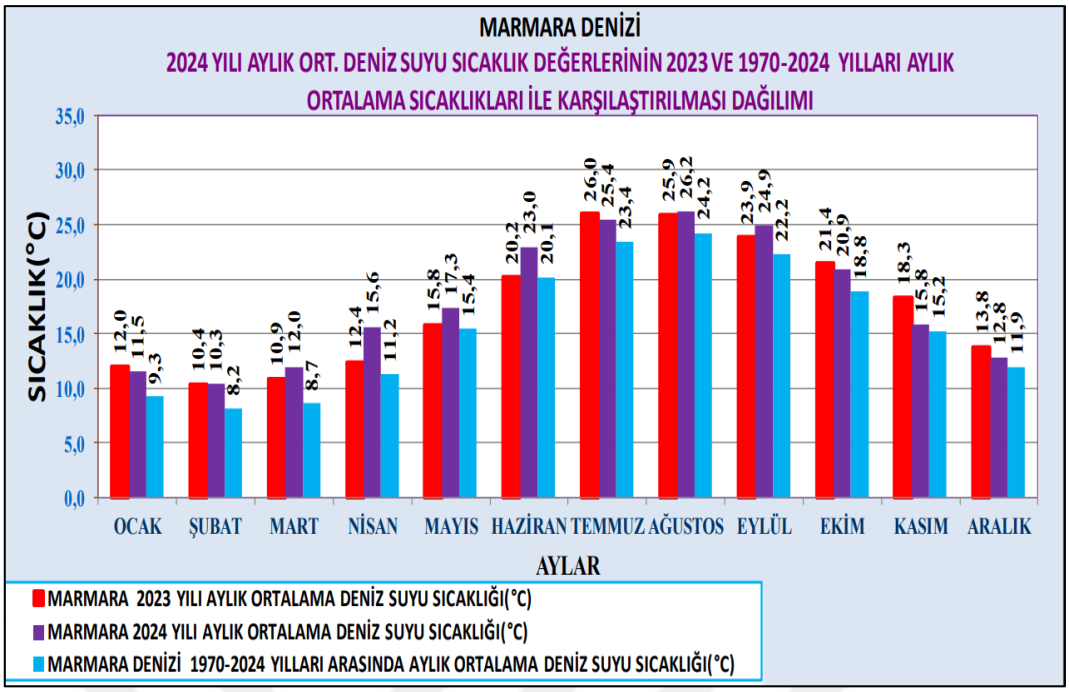
Kalsit kontaktörü Ca ve alkaliniteyi getirir ama Mg genellikle düşük kalır; bu yüzden Mg için ek yöntem gerekir. Doğrudan Mg tuzu dozajı en basit yaklaşımdır; alternatif olarak deniz suyu/NF gibi akımlardan Mg kazanımıyla daha "temiz" mineral ekleme prosesleri literatürde yer alır [132].

2.17 Marmara Denizi Aylık ve Yıllık Sıcaklık Bilgileri

Deniz suyu sıcaklığı desalinasyon proseslerine, enerji sarfiyatı, zaman ve giderim performansı açısından etki edeceğinden Marmara Denizi'nin aylık ve yıllık sıcaklık grafikleri T.C Çevre Şehircilik Ve İklim Değişikliği Bakanliği Meteoroloji Genel Müdürlüğü tarafından yayımlanan "Marmara Deniz Suyu Sıcaklığı Analizi 2024" [160], [161] belgesinden alıntılanan grafikler, Şekil 2.8 ve 2.9'da gösterilmiştir.



Şekil 2.8 Marmara denizi yıllık ortalama sıcaklık değerleri grafiği



Şekil 2.9 Son yıllara göre aylık ortalama sıcaklık değerleri grafiği

2.18 Marmara Denizi'nde Kullanılması Muhtemel Metotlar

2.18.1 Marmara Denizi'nin Tuzluluk Faktörü

Marmara Denizi, açık denizlere kıyasla *daha düşük tuzluluk* seviyesine sahiptir; ölçümler yaklaşık 23 ‰ tuzluluk değerine işaret etmektedir ki bu tipik deniz suyu olan 35 ‰'in altındadır. Bu karakter, desalinasyon teknolojilerinin enerji ve işletme gereksinimleri üzerinde doğrudan etkilidir. Daha düşük tuzluluk, membran bazlı proseslerde basınç ve enerji ihtiyacını azaltır, bu da teknik ve ekonomik bir avantaj sağlar.

2.19 Ters Osmoz Yönteminin Marmara Denizi İçin Avantajları

Ters osmoz**,** membran üzerinden suyun yoğunluk farkına karşı basınç uygulanarak geçirilmesine dayanır ve tuz ile birlikte pek çok çözünmüş maddeyi etkili şekilde giderir. Bu yaklaşımın Marmara Denizi koşullarında uygun bulunmasının teknik gerekçeleri aşağıdaki gibidir:

- **Enerji Verimliliği ve Operasyonel Yaygınlık:** Modern RO tesisleri, açık deniz tuzluluğundaki sular için geliştirilmiş yüksek performanslı

membranlar kullanmakta olup enerji tüketimi nispeten optimize edilebilmiştir. Bu teknoloji bugün dünya çapında deniz suyu desalinasyonu için en yaygın kullanılan yöntemdir çünkü yüksek tuz giderme oranı ve ölçeklendirilebilir tasarımı mevcuttur.

- **Tuz Giderme Etkinliği:** RO membranları, toplam çözünmüş tuz ve diğer inorganik ve organik kirleticileri etkili şekilde tutarak içme suyu standartlarına uygun ürün su sağlar. Bu, Marmara Denizi gibi ortalama tuzluluk seviyesine sahip sularda içme suyu üretimi açısından kritik bir parametredir.
- **Altyapı ve Endüstri Olgunluğu:** RO tesislerinin tasarım, işletme ve bakım süreçleri konusunda geniş bir mühendislik bilgi birikimi bulunmaktadır. Bu olgun teknoloji, Türkiye'nin mevcut su temini altyapılarıyla entegre edilerek bölgede hızlı uygulamaya alınabilir.

Bu nedenlerle Marmara Denizi özelinde RO, teknik olarak uygulanabilir, enerji ve işletme maliyetleri açısından da görece etkin bir seçenek olarak değerlendirilir.

2.20 Elektrodiyaliz Yönteminin Potansiyel Rolü

Elektrodiyaliz (ED) membran işlemi, su moleküllerini değil iyonları elektrik alanı aracılığıyla ayırır. Doğrudan iyon taşınımı ile çalışan bir yöntemdir ve aşağıdaki yönlerden değerlendirilir:

- **Orta Tuzlulukta Enerji Performansı:** ED'nin enerji gereksinimi, besleme suyunun tuzluluğuna doğrudan bağlıdır. Daha düşük tuzluluk seviyelerinde, örneğin Marmara Denizi gibi orta tuzlulukta ED'nin işletme enerjisi avantajlı olabilir çünkü ayrıştırılacak iyon miktarı daha azdır, bu da sistemin enerji verimliliğini artırabilir [161].
- **Konfigürasyon Esnekliği:** ED, iyon seçici membranlar ile çalıştığından giderilecek veya ayrıştırılacak iyon türüne göre proses ayarlanabilir. Su bileşimi ve hedeflenen ürün su kalitesi bağlamında bu ayarlanabilirlik operasyonel esneklik sağlar.
- **Ön Arıtım veya Hibrit Sistemler:** ED, RO öncesi tuzluluğun düşürülmesi gibi hibrit tasarımlarda kullanılabilir; bu tür bütünleşmiş sistemler, toplam enerji tüketimini azaltarak ekonomiye katkı sağlayabilir.

Ancak deniz suyu gibi nispeten yüksek tuz içeriğinde ED, tek başına büyük ölçekli uygulamalarda genellikle RO kadar enerji verimli bulunmayabilir. Bu nedenle ED daha çok belirli uygulamalarda veya hibrit sistem bileşeni olarak öne çıkar [162]. Sıcaklığın giderim verimi ve sec için etkisi Tablo 2.11'de verilmiştir.

2.21 Deniz Suyu Sıcaklığının Ters Osmoz ve Elektrodiyalize Etkisi

Tablo 2.11 Sıcaklığın giderim verimi ve sec için etkisi

Parametre	Artış (İyileşme)	Pik / Optimum Aralık	Düşüş / Negatif Etki	Referans
RO Giderim Verimi	**5–30 °C**	**~30–35 °C** Viskozite azalır → su akısı artar → aynı basınçta daha fazla permeat / daha iyi geri kazanım	**≥35–40 °C** *Negatif:* Membran sıkışması/yaşlanma riski + fouling eğilimi artabilir → kazançlar doyuma gider veya geri tepebilir	[163], [164], [165]
RO Enerji Sarfiyatı	**5–30 °C**	**~30-35 °C** Daha düşük viskozite → daha düşük hidrolik kayıp ve gerekli basınç → SEC minimuma yaklaşır	**≥ 35–40 °C** Membran/stabilite limitleri + performans sapmaları (fouling/ölçeklenme) → pratikte ek enerji ihtiyacı doğabilir	[166], [167]
ED Giderim Verimi	**5–35 °C**	**~35–40 °C** İyon mobilitesi ve iletkenlik artar → daha etkin iyon taşınımı → giderim artar	**≥40 °C** Geri difüzyon ve yan taşınımlar artabilir → akım verimi düşer, net giderim avantajı azalır	[168], [169]
ED Enerji Sarfiyatı	**5–30 °C**	**~30–35 °C** İletkenlik artışı → aynı tuz giderimi için daha düşük elektriksel kayıp → SEC düşme eğiliminde	**≥35–40 °C** Akım verimi düşüşü + geri difüzyon/yan reaksiyonlar → birim giderim başına enerji artabilir	[170], [171]

2.22 Çevresel ve İşletme Boyutları

2.22.1 Brine ve Yönetimi

Tüm kullanılan metotlarda basitçe tuz sudan ayrıldığı için atık ürün olarak konsantre tuz içeren brine adı verilen çok yüksek tuz yoğunluğuna sahip ana atık ortaya çıkmaktadır [102]. Ayrıca işletmede kullanılan anti-skalant yani kireç ve kirlilik önleyici kimyasallar da brine ile birlikte dışarı çıkar Carlsbad teorisine göre

brine, üretildiği deniz suyundan %20-50 daha tuzludur [172]. Deniz suyu ters ozmoz tesislerinde oluşan konsantre akımın yönetimi, sistemin çevresel sürdürülebilirliğini belirleyen en kritik unsurlardan biridir. En yaygın uygulama, brine'ın çok delikli difüzörler aracılığıyla denize deşarj edilmesi olmakla birlikte, son yıllarda enerji geri kazanımı (RED), kimyasal geri kazanım (BMED) ve sıfır sıvı deşarj (ZLD) gibi ileri yaklaşımlar da giderek önem kazanmaktadır [173].

2.22.1.1 Dip Akıntı Deşarjı Seçeneği

En yaygın pratik, denize doğrudan brine deşarjıdır. Bu, maliyet açısından pratiktir ama çevresel etkileri sınırlamak için güçlü dip akıntı, derinlik ve çok delikli difüzör tasarımı gerektirir [174].

Avantajları arasında düşük maliyet ve sürekli ve basit işletme öne çıkarken, dezavantajları arasında deniz ekosistemi riski kıyı alanlarda izin süreci zorlukları gelir [175].

2.22.1.2 Derin Kuyu Enjeksiyonu Seçeneği

Denize uzak bölgelerde arazinin jeolojik yapısına bağlı olarak geçirimsiz membranların altına basılarak yeraltı akiferlerinden izole edilir. Yüksek sondaj maliyeti görülmektedir [176].

2.22.1.3 Buharlaşma Havuzları Seçeneği

Sıcak ve kuru iklimlerde, geniş alanlarda yüzeysel buharlaşma havuzları oluşturmak yoluyla brine'ın doğal buharlaşma ile su içeriğinin uzaklaştırılması sağlanabilir; bu yöntem gün ışığından enerji alarak tuz kristalleştirse de büyük alan ihtiyacı ve zemin sızıntılarının engellenmesi gibi mühendislik zorlukları içerir [177]. Fakat nihayetinde sudan arındırılmış deniz tuzu eldesi olduğu için dögüsel ham madde üretimi ile ekonomik açıdan sürdürülebilirlik sağlar.

2.22.1.4 ZLD (Zero Liquid Discharge) Sıfır Sıvı Deşarjı Seçeneği

ZLD, brine'ı termal veya membran-termal entegre proseslerle su ve katı tuz fazlarına ayırarak sıvı atığı ortadan kaldırmayı amaçlayan ileri bir yönetim stratejisidir; literatürde, bu yaklaşımın hem çevresel etkileri minimize ettiği hem de yüksek su geri kazanımı sağladığı, ancak enerji ve işletme maliyetlerinin yüksekliği nedeniyle ekonomik açıdan optimizasyon gerektirdiği vurgulanmaktadır

2.22.1.5 RED ve BMED Kullanımı Seçeneği

Bu aşamada kullanılabilen RED → BMED sırasıyla kullanılarak sistemde desalinasyon sonrası RED ile brine giriş suyu olarak kullanılarak enerji geri kazanımı ve RED sonrası ortaya çıkan su ve tuz tekrar karışmış su BMED sistemine sokularak tuzdan asit + baz eldesi sağlanarak döngüsel ekonomiye katkı sağlayacak yan ürün eldesi gerçekleştirilerek, ticari faaliyeti sonrası ekonomik olarak kazanç sağlanabilir [178]. Ancak bu sistemi kurmanın maliyeti de kayda değerdir.

2.22.1.6 Kaynak Geri Kazanımı Seçeneği

Son yıllarda brine'ın sadece bertaraf edilmek yerine değerli kaynaklar olarak değerlendirilmesi üzerine büyük bir araştırma ilgisi oluşmuştur; örneğin tuz ve mineral içeriklerinin geri kazanımı, brine'dan metal ekstraksiyonu ve inşaat malzemelerinde kullanımı gibi yaklaşımlar, çevresel etkileri azaltırken ekonomik fayda da sağlayabilecek sürdürülebilir stratejiler olarak literatürde öne çıkmaktadır [179]. Aynı zamanda bu durum TDS gradyantından enerji üretimi yani mavi enerji olarak geçmektedir.

2.22.2 Müsilaj ve Yönetimi

Müsilaj yani yoğun EPS (extracellular polymeric substances) denizlerde sıcaklık ve organik madde artışından kaynaklanan bir mikrobiyolojik faaliyet sonucu oluşan kalın ve yapışkan üründür [180].

Müsilajlı bir denizden alınan deniz suyu özellikle ters osmoz gibi membran filtrasyon yöntemlerini kullanan desalinasyon metotları için büyük bir membran yüzeyi tıkanması ve kirlenme riski teşkil etmektedir [181]. Ayrıca müsilaj kimyasal temizleyicilere karşı çok dirençli olduğu için eğer böyle bir risk var ise uygun ön arıtma üniteleri tasarlannıp sistemin başına entegre edilmesi önem arz etmektedir.

2.22.2.1 Deniz Suyu Alımı

Eğer mümkün ise deniz suyunun müsilaj ve diğer kirleticilerin olmadığı alanlardan alınması önceliklidir [182]. Her halükarda deniz suyu alma yapılarının kıyıya değil kıyıdan oldukça açığa yapılması önerilmektedir [183]. Ayrıca sudan daha yoğun ve ağır olan bu maddeyi mümkün olduğunca yüzeye kaldıracak bir girdap yaratmadan ve emiş sırasında müsilajı hareketlendirmeden suyu alabilmek için düşük hızda alım yapmak oldukça önemlidir [184]

2.22.2.2 Izgara ve Döner Tambur Elek Kullanımı

Kaba ve ince ızgaranın yanı sıra, müsilajı tutabilecek çaplarda tambur elek kullanımı son derece elzemdir.

2.22.2.3 Fiziksel ve Kimyasal Çöktürme

Müsilajın deniz suyundan yoğun ve özellikle kümelenmiş fazları denizde dibe çökme eğiliminde iken, deniz suyuyla aynı yoğunlukta olanlar ara seviyelerde askıda kalma ve deniz suyundan daha az yoğun olanlar ise yüzme eğilimindedir.

Bu yönüyle müsilaj yönetimi oldukça zorlu bir süreçtir. İlk olarak yapılması gereken dengeleme tankında su dinlendirilditen sonra çöktürme tankında zamanla yer çekimi ile çöktürülmesi beklenebilir. Daha sonra $FeCL_3$ veya PAC(Poli Alüminyum Klorid) gibi bir koagülant kullanılarak müsilajın topaklanmasını sağlar [181]. Dip sıyırıcıları ile bu çökeltim toplanılarak uygun yöntemlerle bertaraf ettirilir.

2.22.2.4 DAF (Dissolved Air Flotation)

Normalden daha ince ve çökelemeyen müsilaj fazı koagülantlı çöktürme sonrasında çözündürülmüş hava verilerek yüzdürme işlemi uygulanması yüzeyde ve askıda kalabilen müsilajları su yüzeyinden köpük olarak sıyırmak için kullanılır [181]. Bu sayede filtrasyon yükü iyice azalır.

2.22.2.5 DMF (Dual Media Filtration)

Çift katmanlı farklı medyalar (örneğin anthracite + silika) ile kademeli fiziksel süzme yapılır [185].

2.22.2.6 UF / MF Kullanımı

Kolloidal ve organik yük daha da derinlemesine tutulur. Membran öncesi yüksek kaliteli su sağlar [186].

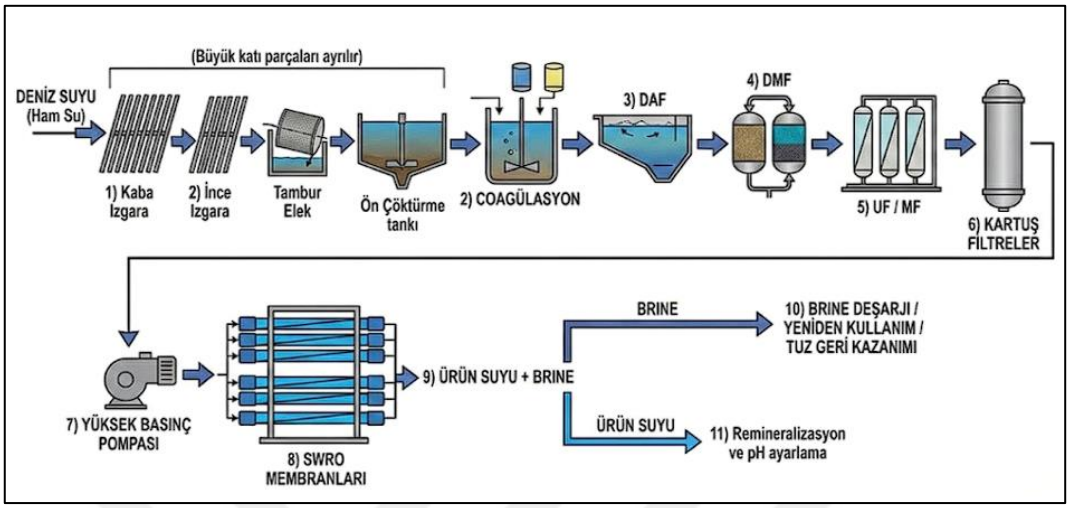
2.22.2.7 Kartuş Filtreler

Son safhada 1–5 μm aralığında filtreleme ile ince tortular ve partiküller giderilir.

RO'nun SDI < 3 kirlenme endeksi hedefi sağlanmış olur.

2.22.2.8 Ters Osmoz ile Desalinasyon Proses Sıralaması

Ön arıtmalı desalinasyon proseslerinde misal olarak ters osmozda uygulanabilecek iş akım şeması Şekil 2.10'da gösterilmiştir.



Şekil 2.10 Ön arıtmalı ters osmoz iş akım şeması

2.22.3 Sonuç

Literatüre göre Türkiye'nin Marmara Denizi'nden desalinasyon yoluyla su üretmesi planlandığında:

- Marmara Denizi'nin orta tuzluluk seviyesi RO için enerji ve işletme açısından teknik avantaj sağlar.
- RO, yüksek tuz giderme, yaygın mühendislik uygulaması ve ölçeklendirilebilirlik açısından birincil seçenek olarak öne çıkar.
- Elektrodiyaliz, orta tuzlulukta enerji tüketimi ve proses ayarlanabilirliği ile tamamlayıcı veya hibrit sistemlerde değerlendirilebilir [187].
- Aynı düzeyde enerji kullanıldığında ve aynı hacimde temiz su hedeflendiğinde, ters osmoz prosesinin hidrolik basınçla sürekli su akışı gerçekleştirmesi ve yüksek basınçlı pompa–membran sistemleri sayesinde tipik olarak elektrodiyalize göre daha hızlı arıtılmış su üretimi sağladığı kabul edilir; elektrodiyaliz ise iyon taşınımı mekanizması nedeniyle özellikle yüksek tuzluluklu deniz suyu arıtımında üretim hızı açısından genellikle RO'nun gerisinde kalır [188].

- Türkiye’nin su kaynakları yönetimi bağlamında, bu yöntemler Marmara Bölgesi’nin su arz güvenliğini artırmaya yönelik teknik potansiyel sunar.
- Müsilaj ve Brine yönetimi dikkatlice ele alınarak uygun yer seçimi ve tesis tasarımında uygun ekipman ve ünite kullanımı ile fizibilite çalışmaları yapılmalıdır.
- Marmara Denizi’nin sıcaklık ortalaması Dünya genelindeki denizlerin sıcaklık ortalamasına göre daha ılıman sayılabileceği için ve bu durumda ters osmoz veya elektrodiyaliz gibi desalinasyon yöntemleri için giderim verimi ve enerji tüketimi gibi konularda avantaj sağlayacağı için özellikle enerji kazanımlı sistemlerle birlikte kullanılması oldukça mantıklı bir seçenek olarak karşımıza çıkmaktadır.

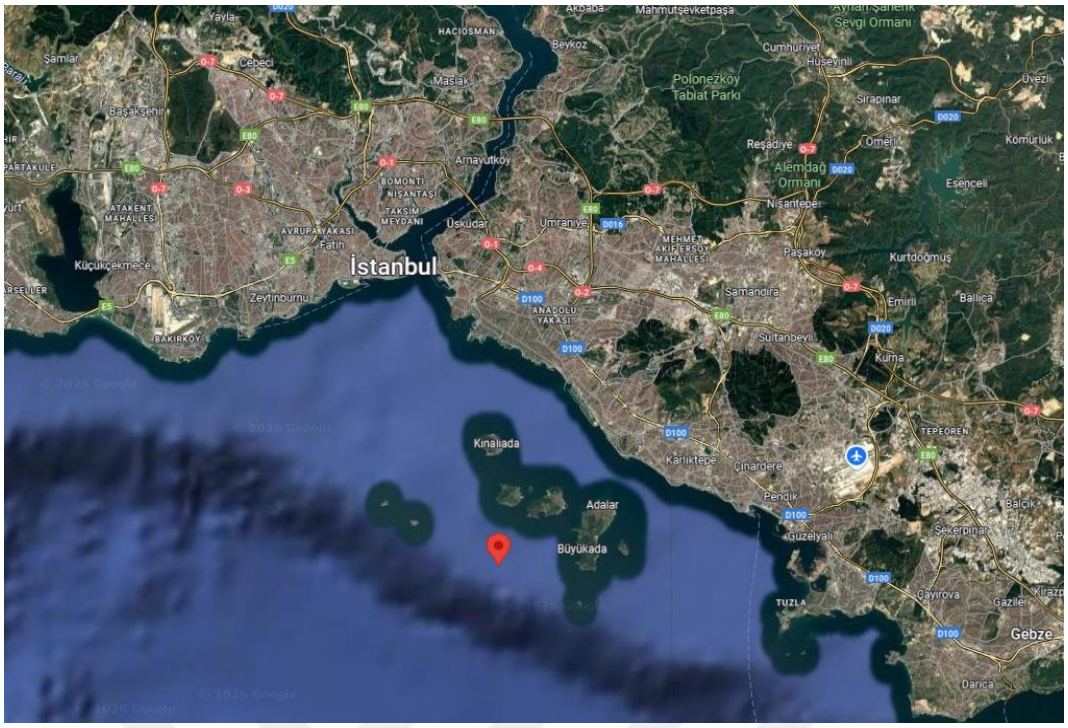
3
METODOLOJİ

3.1 Araştırma Modeli ve Veri Toplama Yöntemleri

CTD: “Conductivity (iletkenlik) – Temperature (sıcaklık) – Depth (derinlik)” sensörlerini içeren bir cihazdır. Deniz suyunun tuzluluk, sıcaklık ve basınç gibi fiziksel özelliklerini ölçer.

Rozet sistemi: CTD cihazının etrafına dairesel biçimde yerleştirilmiş Niskin şişelerinden oluşan bir yapıdır. Bu şişeler, suyun farklı derinliklerinden numune almak için uzaktan kapatılır.

Bu çalışmada numuneler R/V ALEMDAR II araştırma gemisinde bulunan CTD sensörlü Rozet sistemli Niskin şişeleriyle (Şekil 3.1 ve Şekil 3.2) ile Marmara Denizi’nin 40.84083 (°N) enlem ve 29.05433 (°E) boylamlarından alınan 3 ayrı derinlik seviyesindeki deniz suları uygun şişelere doldurulup (Şekil 3.3) elektrodiyaliz ve ters osmoz desalinasyon yöntemleri üzerinde deney yapılmak amacıyla uygun koşullarda saklanmıştır. Marmara Denizi 26. İstasyondan alınan numunelerin Harita 3.1’de gösterilmiştir.



Harita 3.1 Numune alım bölgesi gösterimi



Şekil 3.1 CTD donatılı rozet sistem niskin şişeleri gösterimi



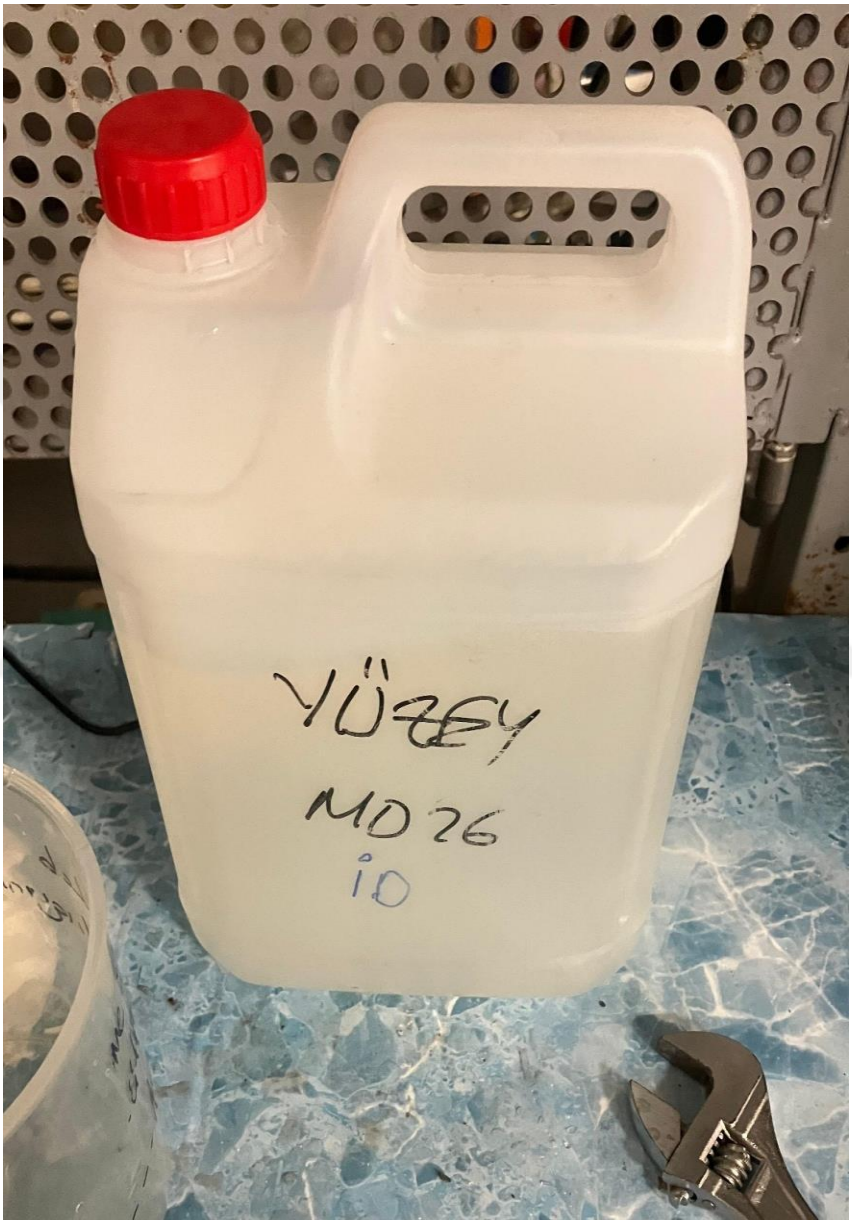
Şekil 3.2 CTD donatılı rozet sistem niskin şişeleri diğer gösterim



Şekil 3.3 Niskin şişelerinden numune dolumu

3.1.1 Numuneler

Belirtilen koordinatlardan CTD donatılı rozet system niskin şişeleri ile Marmara Denizi'nin 3 farklı derinlik seviyesinden çekilen numuneler mevcuttur ve bozunmaya karşı 5 derecelik buzdolabında saklanmıştır. Ardından oda sıcaklığında bu numuneler 20 °C dereceye gelene kadar bekletilmiştir (Şekil 3.4).



Şekil 3.4 Şişelenmiş bir numune

3.1.2 Ön Arıtma

Ön arıtma öncesi numuneler 5 °C derecelik dolaptan çıkarılıp oda sıcaklığında yani 25 santigrat derecede bir süre bekletilip 20 °C derece olduktan sonra iyon değiştirici reçineden geçirilmiştir (Şekil 3.5).



Şekil 3.5 Ön arıtma iyon değiştirici reçine

3.1.3 Deneye Hazırlık Süreci

Çeşme suyu ve üniversitenin saflaştırılmış suyu'nun toplam katı madde (TDS)'si ölçülmüştür. Çeşme suyunun TDS'si 250 mg/L = 0,39 mS/cm çıkmıştır. Saflaştırılmış suyun ise TDS'si 50 mg/L = 0,08 mS/cm'dir. Bu değerler kıyas

yapılabilmesi adına ölçülmüştür. Numuneler ters osmoz ve elektrodiyaliz cihazlarından geçirilmeden önce deniz suyunda bulunabilecek Ca^{+2} ve mg^{+2} +2 yüklü iyonlar cihazlara zarar verebilme yani tıkanma meydana getirebilecekleri için her bir numune ayrı ayrı önce iyon değiştirici reçinelerden geçirilmiştir. Bu reçine +2 yüklü iyonları tutup yerine sodium zeolitten çıkan Na^{+1} iyonu vermektedir. Bu sayede cihazların tıkanma riski minimize edilmiştir.

Ters osmoz ve Elektrodiyaliz deneylerinde ayrı ayrı iyon değiştirici reçineden geçirilen bu 3 derinlik seviyesindeki aynı deniz suyu numuneleri kullanılmıştır.

3.1.3.1 Yüzey Kademe Deniz Suyu

İyon değiştirici reçine sonrası 20 santigrat derecede yüzeydeki deniz suyu'nun iletkenliği 32,1 miliS/cm yani 32.100 µS/cm = 20.544 mg/L-ppm TDS. Ve o da 15 santigrat derecede 25,3 PSU (PPT)'a tekabuül eder. Ölçülen pH ise 7,91'dir.

3.1.3.2 Ara Kademe Deniz Suyu

İyon değiştirici reçine sonrası 20 santigrat derecede yüzeydeki deniz suyu'nun iletkenliği 39 miliS/cm yani 39.000 µS/cm = 24.960 mg/L-ppm TDS. Ve o da 15 santigrat derecede 31,5 PSU (PPT)'a tekabuül eder. Ölçülen pH ise 7,35'dir.

3.1.3.3 Dip Kademe Deniz Suyu

İyon değiştirici reçine sonrası 20 santigrat derecede yüzeydeki deniz suyu'nun iletkenliği 46,3 miliS/cm yani 46.300 µS/cm = 29632 mg/L-ppm TDS. Ve o da 15 santigrat derecede 38,1 PSU (PPT)'a tekabuül eder. Ölçülen pH ise 7,13'dir.

3.2 Ters Osmoz

3.2.1 Ters Osmoz Cihazı

Ters Osmoz için 316 paslanmaz çelikten üretilmiş Sterlitech "HP4750 High Pressure Stirred Cell" yani yüksek basınçlı karıştırmalı hücre kullanılmıştır (Şekil 3.6).

Kullanılan ters osmoz cihazının görüntüleri Şekil 3.6, Şekil 3.7 ve Şekil 3.8, ve Şekil 3.9'da gösterilmiştir.

Bu ekipmana ait teknik detaylar Tablo 3.1'de verilmiştir [189].

Tablo 3.1 Ters osmoz cihazı teknik özellikler

Membran Boyutu	1.93 in dia. Nominal (49 mm)
Aktif Membran Alanı	2.26 in^2 (14.6 cm^2)
İşleme Hacmi	Up to 300 mL
Tutma Hacmi	1 mL
Maksimum Basınç	1000 psi (69 bar) w/high-pressure clamps
Maksimum Sıcaklık	250 °F (121 °C) at 800 psig (55 bar)
pH Aralığı	Membrana Bağlı
Bağlantılar	Sızıntı Çıkışı: ⅛ in dia (3,175 mm çap. 316L SS tubing; Basınç girişi: ¼ in (6,35 mm) FNPT
Hücre Gövdesi	316L Stainless Steel
O-Halkası	Buna-N, diğer seçenekler de mevcut
Conta	Buna-N, diğer seçenekler de mevcut
Karıştırma Çubuğu	PTFE
Hücre Çapı	2.0 in (5,1 cm)
Hücre Uzunluğu	7.8 in (19,9 cm)
Hücre Genişliği	5.7 in (14,6 cm) yüksek basınç kelepçeleri dahil



Şekil 3.6 Sterlitech HP4750 ters osmoz cihazı dış görünüm



Şekil 3.7 Sterlitech HP4750 ters osmoz cihazı iç görünüm-1



Şekil 3.8 Sterlitech HP4750 ters osmoz cihazı iç görünüm-2



Şekil 3.9 Sterlitech HP4750 ters osmoz cihazı

3.2.2 Basınçlandırıcı Tüp

Ters osmoz cihazının içine konulan yaklaşık 330 ml'lik numunenin yüksek basınç ile membrane yüzeyinden zorla itirrilmesini sağlamak için azot ihtiva eden 3 kol vanalı, özel üretim basınç tüpü kullanılmıştır. 60 bar basınç üretimine olanak tanıyan bu tüp, kullanılan membranın özelliklerine göre optimal verim için 40 barda çalıştırılmıştır. Kullanılan basınçlandırıcı tüp Şekil 3.11'de gösterilmiştir.



Şekil 3.10 Basınçlandırıcı tüp

3.3 Elektrodiyaliz

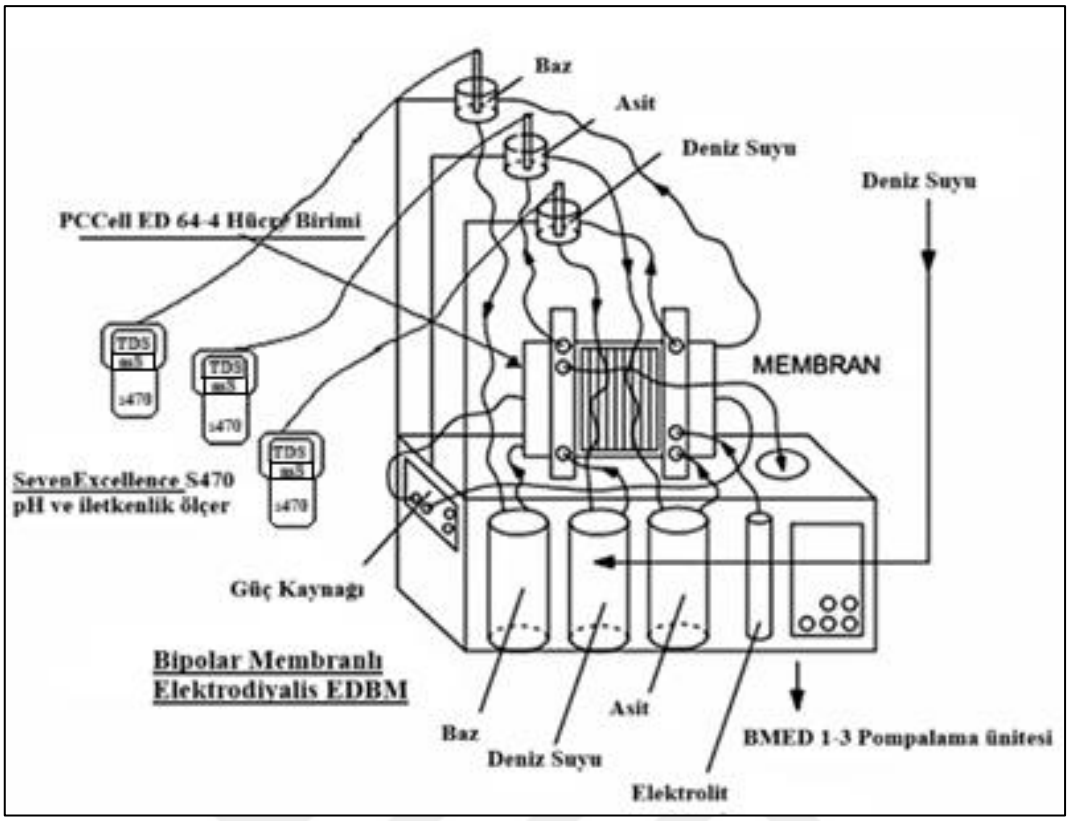
3.3.1 Elektrodiyaliz Cihazı

Bu çalışmada PCCellED64-4 birimi ve BMED1-3 set üstü ED pompa birimi, Alman menşeili PCCell GmbH tarafından beslenmiştir, Hücrenin ve ED pompa birimlerinin özellikleri ve işletme parametreleri Tablo 3.2'de gösterilmiştir.

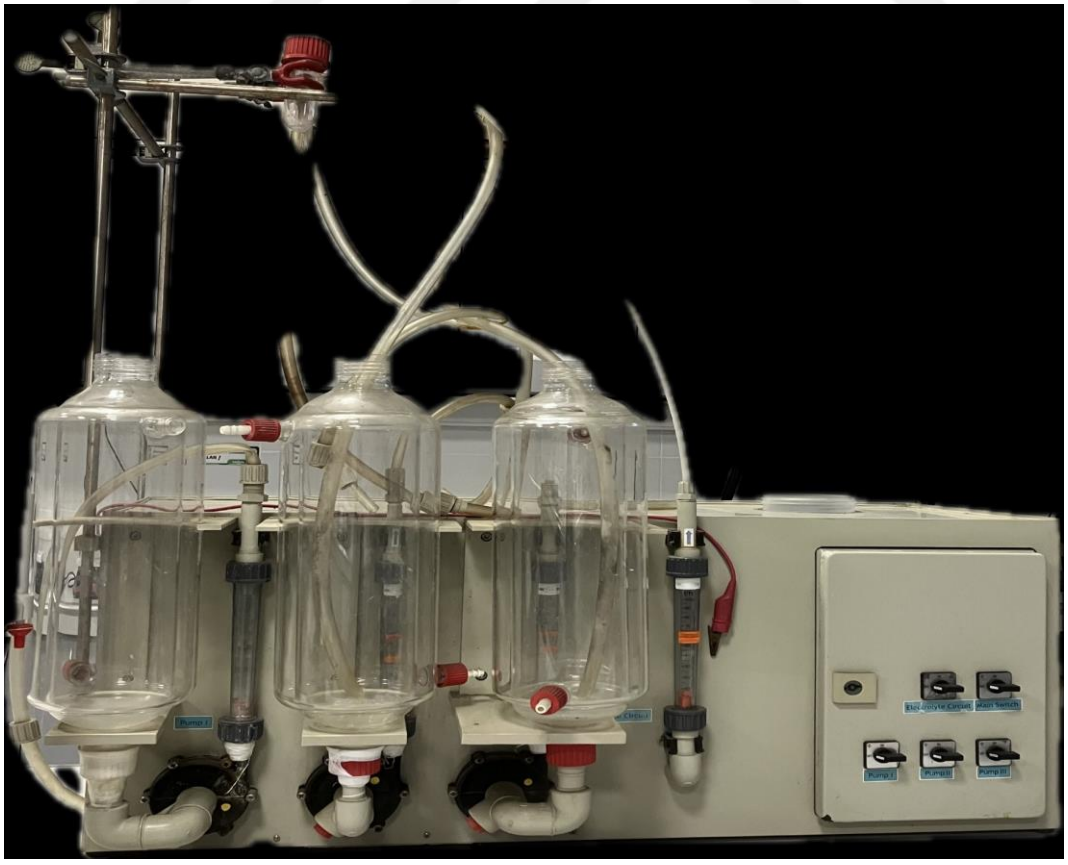
Tablo 3.2 Elektrodiyaliz cihazı teknik özellikler

Özellik / Birim	**ED birimi 64-4**	**BMED 1-3 pompa**
Membran Boyutu	110 x 110 mm	-
Efektif Membran Alanı	Membran başına 64 cm^2	-
Hücre Kalınlığı	0.5 mm	-
Nominal Akış Hızı	4 – 8 L/h	1500 L/h ‘e kadar
Max Voltaj ve Amper	30V, 5A	24V, 5A
Ara Temas Materyali	PE	PP, PE
Max Pompalama Yüksekliği	-	4.2 m
Max Sistem Basıncı	-	1.4 bar
Boyutlar	165 x 150 x 190 mm^3	825 x 380 x 410 cm^3
Ağırlık	3 kg	28 kg

Bipolar membranlı elektrodiyaliz cihazına ait figür, Şekil 3.11’de ve deneyde kullanılan elektrodiyaliz cihazı Şekil 3.12’de gösterilmiştir.



Şekil 3.11 Bipolar membranlı elektrodiyaliz cihazı figürü



Şekil 3.12 Elektrodiyaliz cihazı

4
DENEYSEL BULGULAR

4.1 Ters Osmoz

4.1.1 Hazırlık Süreci

İlk olarak, kullanılan ultrafiltrasyon membran ters osmoz cihazının çapına tam olarak denk gelecek şekilde ince bir makas yardımıyla kesilmiştir. Daha sonra iyon değiştirici reçineden geçirilmiş ön arıtılmış deniz yüzey suyu ters osmoz cihazına boşaltılmıştır. Daha sonra basınçlandırıcı tüpün ters osmoz cihazı ile olan bağlantı hortumu takılmadan önce içinde önceden kalmış ihtimali bulunan azot gazı tahliye edilmiş olup daha sonra hortum bağlantıları yapılmıştır. Ters osmoz cihazı yüksek basınç nedeniyle tehlike arz edebileceği için klapeler sıkıca monte edilip contaların tam oturduğundan emin olunulmuştur. Daha sonra ters osmoz cihazından çıkan suyu toplamak için gereken şişe bilgisayar bağlantısı olan tartıya konulup darası alınmıştır. Buradaki amaç zamanla şişede toplanan suyun miktarını kütle – zaman grafiği çıkarılarak akı değerinin bulunmasıdır.

4.1.2 Deneyi Başlatmak

Hazırlık süreci tamamlandıktan sonra basınçlandırıcı tüpün basınç vanası açılmıştır. Cihazın 1 ml'lik tutma hacmine sahip olduğu bilindiği için ilk gelen ilk 1 ml tutma hacmi dolduktan sonra ilk damla düşmüştür. Düşen damlaların ortalama ağırlığı hassas terazi ile ölçüldüğünde ortalama 0,02 gram'dır. Aynı zamanda membranın aktif yüzey alanı 14,6 cm^2 = 14,6 * 10^{-4} m^2 'dir.

4.1.3 Deney Sonucu

4.1.3.1 Akı- Zaman

Ters osmoz deneyine ait akı zaman bilgileri Tablo 4.1 ve Şekil 4.1'de verilmiştir.

Tablo 4.1 Ters osmoz akı-zaman

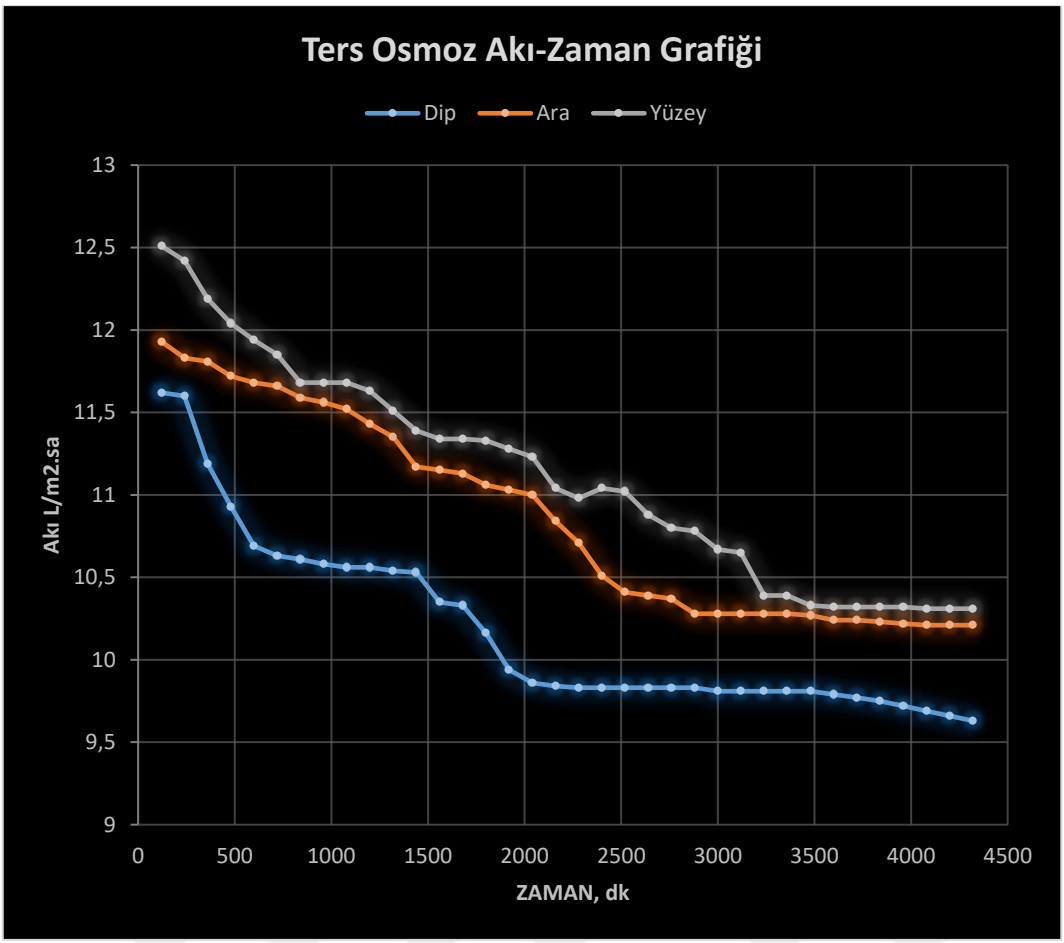
	AKI ($L/m^2.sa$)		
Zaman (dk)	Dip	Ara	Yüzey

Tablo 4.1 Ters osmoz akı-zaman (devamı)

120	11,62	11,93	12,51
240	11,6	11,83	12,42
360	11,19	11,81	12,19
480	10,93	11,72	12,04
600	10,69	11,68	11,94
720	10,63	11,66	11,85
840	10,61	11,59	11,68
960	10,58	11,56	11,68
1080	10,56	11,52	11,68
1200	10,56	11,43	11,63
1320	10,54	11,35	11,51
1440	10,53	11,17	11,39
1560	10,35	11,15	11,34
1680	10,33	11,13	11,34
1800	10,16	11,06	11,33
1920	9,94	11,03	11,28
2040	9,86	11	11,23
2160	9,84	10,84	11,04
2280	9,83	10,71	10,98
2400	9,83	10,51	11,04
2520	9,83	10,41	11,02

Tablo 4.1 Ters osmoz akı-zaman (devamı)

2640	9,83	10,39	10,88
2760	9,83	10,37	10,8
2880	9,83	10,28	10,78
3000	9,81	10,28	10,67
3120	9,81	10,28	10,65
3240	9,81	10,28	10,39
3360	9,81	10,28	10,39
3480	9,81	10,27	10,33
3600	9,79	10,24	10,32
3720	9,77	10,24	10,32
3840	9,75	10,23	10,32
3960	9,72	10,22	10,32
4080	9,69	10,21	10,31
4200	9,66	10,21	10,31
4320	9,63	10,21	10,31
	Ortalama Değerler		
	10,18222	**10,86333**	**11,11722**



Şekil 4.1 Ters osmoz akı-zaman

4.1.3.2 Giderim Verimi

Her üç kademe için deniz suyu için de iyon değiştirici ön arıtımından sonra ve ters osmoz çıkış suyunun ölçülen TDS değerleri Tablo 4.2 de' tablodaki gibidir.

Tablo 4.2 Ters osmoz giderim verimleri

	Yüzey (mS/cm)	**Ara (mS/cm)**	**Dip (mS/cm)**
Deniz Suyu	30,4	36,3	43,1
İyon Değiştirici Reçine Sonrası	32,05	38,56	45,74
Ters Osmoz Çıkışı	0,08	0,102	0,111
Giderim Verimi (%)	99,75	99,73	99,76

4.2 Elektrodiyaliz

4.2.1 Hazırlık Süreci

4.2.1.1 Sistem Kurulumu ve Mekanik Kontroller

- ED hücresi, 110 × 110 mm membran boyutuna uygun olacak şekilde; conta/ara temas parçaları ile birlikte sızdırmazlık sağlayacak biçimde monte edilir. Hücre içerisinde 0,5 mm hücre kalınlığı (spacer/kanal kalınlığı) dikkate alınarak membranlar kırışıklık yapmayacak şekilde düzgün yerleştirilir.
- Ara temas materyalleri PE (ED64-4) ve pompa tarafında PP/PE (BMED1-3) olduğundan; temizlik ve ıslatma işlemlerinde PE/PP ile uyumlu, agresif kimyasal içermeyen çözeltiler tercih edilir (genellikle DI su ile ön yıkama/ıslatma).
- Bağlantı hortumları, bağlantı rekorları ve vana/by-pass hattı ile akış yönleri netleştirilir; özellikle pompanın yüksek debi potansiyeli nedeniyle (1500 L/h'e kadar) ED hücresine giden hatta ince ayar vanası/by-pass konumlandırılarak düşük debide kararlı işletim sağlanır.

4.2.1.2 Hidrolik Işletme Sınırlarının Tanımlanması

- ED hücresinin nominal debi aralığı 4–8 L/h olduğundan, deney boyunca hücreye verilecek diluat/konsantre devre debileri bu aralıkta hedeflenir.
- Pompa biriminin maksimum pompalama yüksekliği 4,2 m ve maksimum sistem basıncı 1,4 bar olduğundan:
- Hat kayıpları ve vana konfigürasyonu bu basınç sınırını aşmayacak şekilde düzenlenir,
- Çalışma sırasında manometre/hat basıncı izlenerek 1,4 bar altında kalınır (özellikle vana kısma yapıldığında basınç yükselme riski vardır).

4.2.1.3 Elektriksel Kurulum ve Güvenlik

- ED güç kaynağı/hücre için üst limit 30 V, 5 A olarak tanımlanır. Deney planında, akımın 5 A'i aşmasını önleyecek biçimde akım limiti uygulanır.

- Pompa birimi için güç gereksinimi 24 V, 5 A sınırında değerlendirilir; besleme kabloları, sigorta/koruma elemanları ve topraklama kontrol edilir.
- Hücre gövdesi ve pompa birimi yerleşimi, cihaz boyutlarına göre sabitlenir:

  ED64-4: 165 × 150 × 190 mm³, 3 kg

  BMED1-3: 825 × 380 × 410 cm³, 28 kg
- Pompa birimi kütleli olduğundan titreşim ve devrilmeye karşı sabitlenir

4.2.2 Deneyi Başlatmak

Elektrodiyaliz prosesi ters osmozdan farklı olarak çıkış suyunun iletkenlik değeri elektriksel güç ayarlamasına müsait olması sebebiyle daha hassas kontrol edilebilir. Bu sebeple İnsani Tüketim Amaçlı Sular Hakkında Yönetmelik'te geçen [40] 20°C sıcaklıkta 0,25 µS/cm sınırını sağlayabilmesi ve bunun da yaklaşık içerik olarak 200 mg/L sodyum ve 250 mg/L klorür ihtiva edebilmesi için proses en son 0,68 µS/cm iletkenliğe ulaşınca sonlandırılmıştır.

4.2.2.1 Devrelerin Doldurulması ve Hava Alma

- Diluate ve konsantre devreleri (kurduğunuz deney tasarımına göre tek/çift devre) ilgili çözeltilerle doldurulur.
- Pompa çalıştırılmadan önce hatlarda hava birikmesini azaltmak için vana konumları ayarlanır; kısa süreli düşük debide çalıştırma ile sistem hava almadan kararlı akışa getirilir.

4.2.2.2 Debinin Ayarlanması

- BMED1-3 pompa kapasitesi yüksek olduğundan, hücreye giden hat üzerinde vana/by-pass kullanılarak ED hücresinde 4–8 L/h aralığı sağlanır.
- Debi kararlı hale geldiğinde, hat basıncı tekrar kontrol edilerek 1,4 bar üstüne çıkılmadığı doğrulanır.

4.2.2.3 Elektriksel Işletimin Devreye Alınması

- Güç kaynağı akım limiti 5 A olacak şekilde sınırlandırılır; gerilim 0–30 V aralığında kontrollü biçimde artırılarak işletmeye alınır.
- İlk dakikalarda akımın hızlı yükselmesi veya sıcaklık artışı gözlenirse; gerilim düşürülür ve debi/çözelti iletkenliği tekrar kontrol edilir.

- Deney boyunca düzenli aralıklarla şu parametreler kayıt edilir:

  Gerilim (V), akım (A)

  Debi (L/h) – hedef aralıkta kalma durumu

  Diluate ve konsantre iletkenlik değişimi

4.2.3 Deney Sonucu

- Güç kaynağı gerilimi kontrollü biçimde sıfıra indirilir, ardından pompa durdurulur.
- Devreler boşaltılır; ED hücresi ve hatlar DI su ile durulanır. PE/PP esaslı ara temas parçalarının yüzeyinde tuz birikimi kalmaması için yeterli durulama hacmi uygulanır.

Süre parametresi dakika cinsinden iken, İletkenlik paramatresi mS/cm cinsindendir.

4.2.3.1 Yüzey Kademesi

Yüzey kademesi elektrodiyaliz deneyi sonucunda süre – iletkenlik değerleri Tablo 4.3'te verilmiştir.

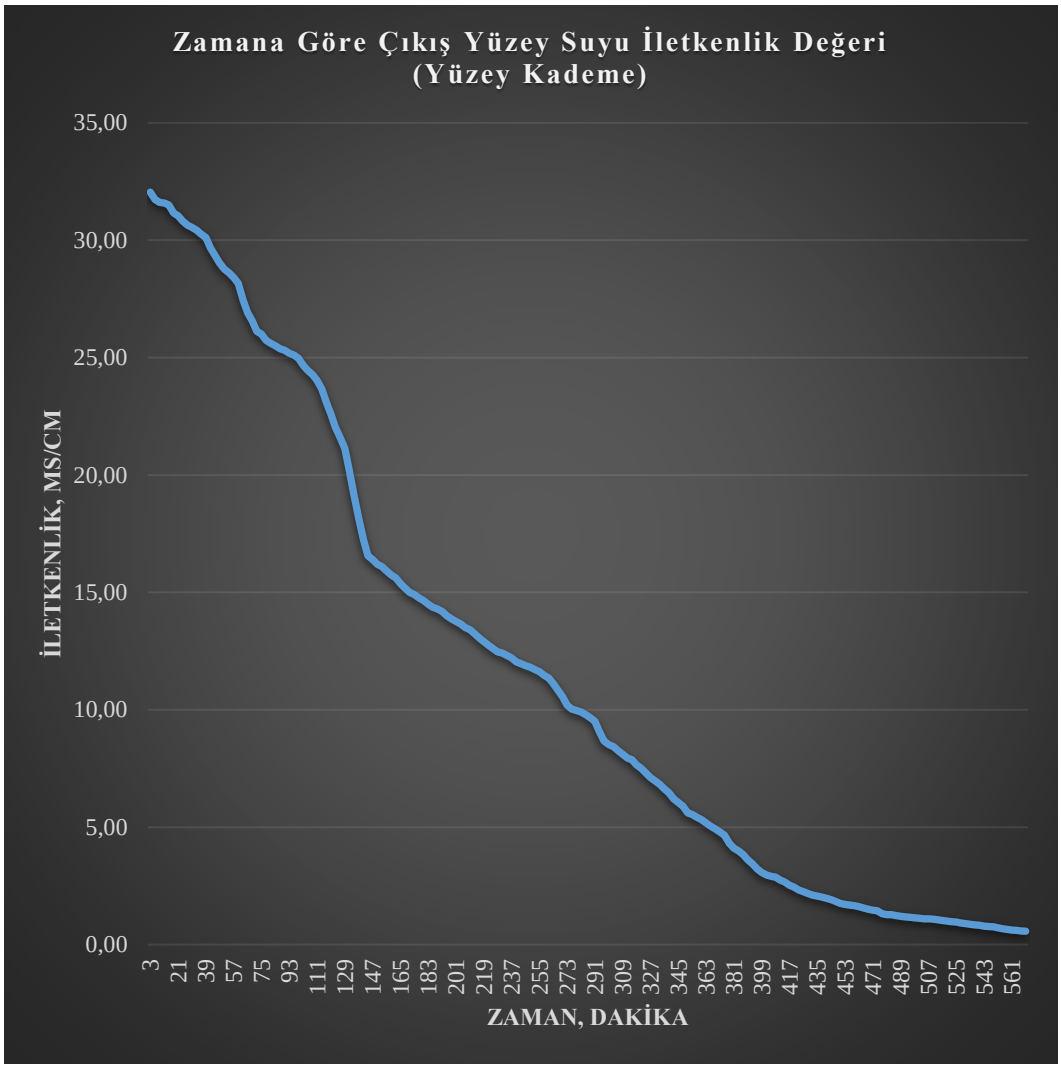
Tablo 4.3 Elektrodiyaliz deneyi yüzey kademe süre - iletkenlik

Süre	İletkenlik		Süre	İletkenlik		Süre	İletkenlik		Süre	İletkenlik
3	32,05		147	16,4		291	9,51		432	2,11
6	31,74		150	16,21		294	9,05		435	2,06
9	31,61		153	16,1		297	8,67		438	2,02
12	31,59		156	15,92		300	8,52		441	1,97
15	31,51		159	15,74		303	8,44		444	1,91
18	31,16		162	15,62		306	8,26		447	1,84
21	31,04		165	15,37		309	8,11		450	1,75
24	30,82		168	15,18		312	7,94		453	1,71
27	30,65		171	15,01		315	7,87		456	1,68
30	30,55		174	14,91		318	7,65		459	1,65
33	30,43		177	14,77		321	7,51		462	1,61
36	30,27		180	14,65		324	7,32		465	1,56
39	30,11		183	14,5		327	7,11		468	1,51
42	29,68		186	14,37		330	6,98		471	1,47
45	29,34		189	14,3		333	6,82		474	1,44
48	29,02		192	14,19		336	6,63		477	1,31
51	28,76		195	14,01		339	6,45		480	1,28
54	28,62		198	13,88		342	6,21		483	1,28

Tablo 4.3 Elektrodiyaliz deneyi yüzey kademe süre-iletkenlik (devamı)

57	28,41		201	13,76		345	6,05		486	1,24
60	28,17		204	13,65		348	5,9		489	1,21
63	27,45		207	13,51		351	5,61		492	1,18
66	26,92		210	13,41		354	5,54		495	1,16
69	26,55		213	13,24		357	5,42		498	1,14
72	26,12		216	13,06		360	5,33		501	1,13
75	26,01		219	12,91		363	5,18		504	1,1
78	25,74		222	12,76		366	5,04		507	1,1
81	25,62		225	12,61		369	4,93		510	1,08
84	25,51		228	12,47		372	4,79		513	1,06
87	25,38		231	12,41		375	4,65		516	1,03
90	25,32		234	12,32		378	4,31		519	1
93	25,19		237	12,21		381	4,11		522	0,98
96	25,11		240	12,05		384	3,99		525	0,96
99	24,98		243	11,97		387	3,84		528	0,92
102	24,67		246	11,88		390	3,61		531	0,89
105	24,45		249	11,82		393	3,44		534	0,86
108	24,28		252	11,72		396	3,23		537	0,84
111	24,03		255	11,62		399	3,07		540	0,82
114	23,67		258	11,47		402	2,96		543	0,79
117	23,11		261	11,35		405	2,91		546	0,77
120	22,58		264	11,12		408	2,87		549	0,75
123	22,02		267	10,85		411	2,75		552	0,71
126	21,61		270	10,56		414	2,66		555	0,67
129	21,13		273	10,21		417	2,53			
132	20,19		276	10,03		420	2,45			
135	19,11		279	9,98		423	2,32			
138	18,18		282	9,91		426	2,26			
141	17,25		285	9,8		429	2,17			
144	16,56		288	9,66						

Yüzey kademesi elektrodiyaliz sonucu, süre – iletkenlik grafiği olarak Şekil 4.1'de verilmiştir.



Şekil 4.1 Zamana göre yüzey kademe çıkış suyu iletkenlik değeri

Yüzey kademesi için elektrodiyaliz deneyi ortalama elektrik tüketim değerleri Tablo 4.4'te verilmiştir.

Tablo 4.4 Elektrodiyaliz deneyi yüzey kademe elektrik tüketimi

Ortalama Volt	15,32
Ortalama Amper	1,14

4.2.3.2 Ara Kademe

Ara kademesi elektrodiyaliz deneyi sonucunda süre – iletkenlik değerleri Tablo 4.5'te verilmiştir.

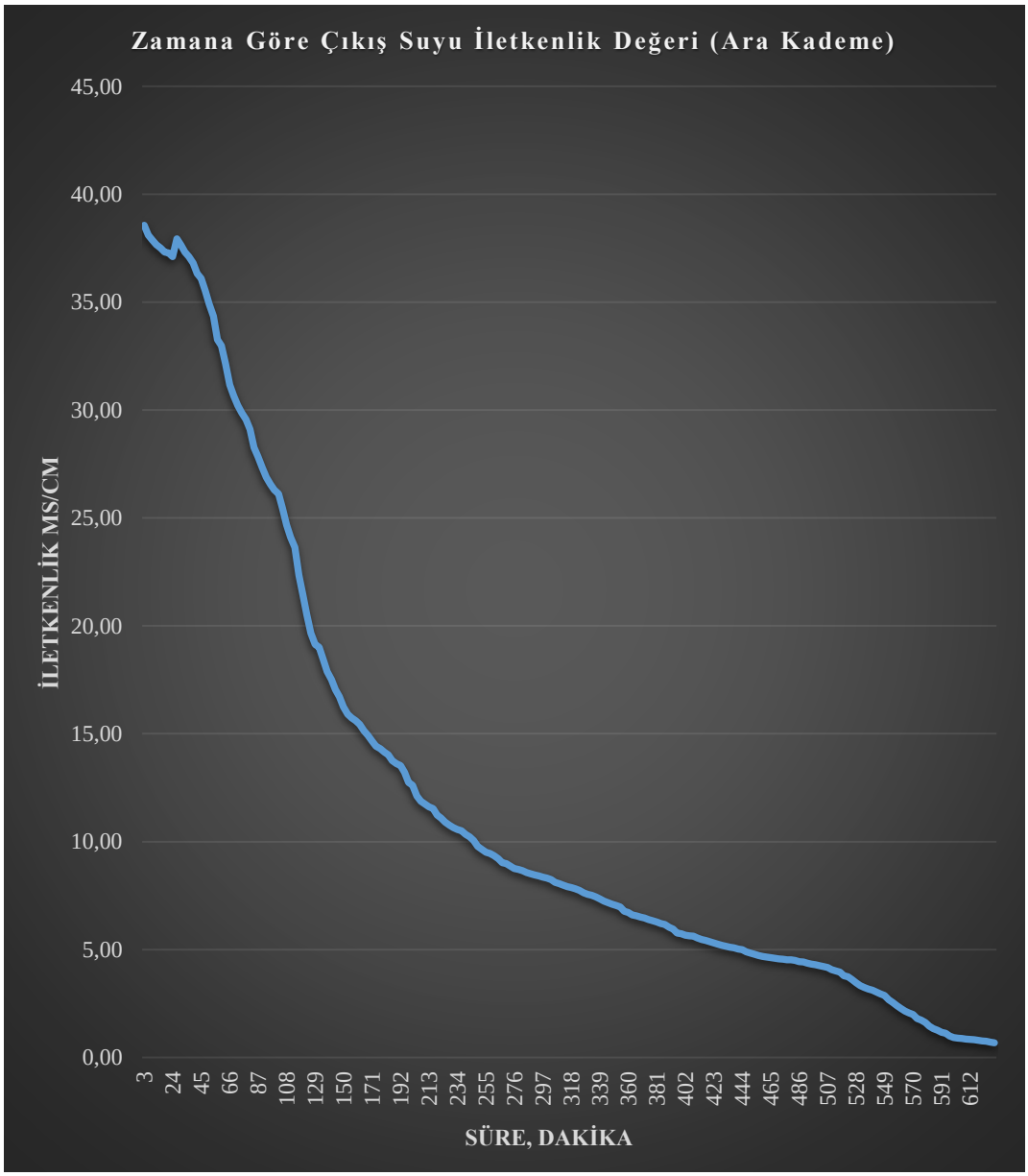
Tablo 4.5 Elektrodiyaliz deneyi ara kademe süre-iletkenlik

Süre	İletkenlik		Süre	İletkenlik		Süre	İletkenlik		Süre	İletkenlik
3	38,56		162	15,43		321	7,81		477	4,53
6	38,11		165	15,13		324	7,74		480	4,52
9	37,88		168	14,92		327	7,63		483	4,5
12	37,66		171	14,67		330	7,56		486	4,44
15	37,51		174	14,43		333	7,51		489	4,42
18	37,32		177	14,31		336	7,44		492	4,37
21	37,28		180	14,15		339	7,34		495	4,33
24	37,11		183	14,02		342	7,25		498	4,3
27	37,93		186	13,76		345	7,18		501	4,25
30	37,65		189	13,61		348	7,11		504	4,21
33	37,32		192	13,52		351	7,05		507	4,17
36	37,11		195	13,21		354	6,98		510	4,07
39	36,81		198	12,74		357	6,77		513	4,02
42	36,32		201	12,62		360	6,72		516	3,95
45	36,1		204	12,12		363	6,61		519	3,79
48	35,54		207	11,87		366	6,56		522	3,74
51	34,91		210	11,75		369	6,51		525	3,62
54	34,34		213	11,62		372	6,47		528	3,46
57	33,26		216	11,53		375	6,39		531	3,33
60	32,98		219	11,24		378	6,33		534	3,25
63	32,16		222	11,09		381	6,28		537	3,17
66	31,17		225	10,9		384	6,21		540	3,11
69	30,65		228	10,76		387	6,16		543	3,03
72	30,21		231	10,65		390	6,04		546	2,94
75	29,87		234	10,57		393	5,95		549	2,87
78	29,56		237	10,51		396	5,77		552	2,68
81	29,11		240	10,34		399	5,73		555	2,55
84	28,27		243	10,22		402	5,67		558	2,41
87	27,84		246	10,05		405	5,64		561	2,28
90	27,33		249	9,78		408	5,62		564	2,15
93	26,89		252	9,64		411	5,54		567	2,06
96	26,57		255	9,51		414	5,47		570	1,99
99	26,3		258	9,45		417	5,43		573	1,81
102	26,11		261	9,36		420	5,37		576	1,74
105	25,43		264	9,21		423	5,31		579	1,62
108	24,67		267	9,03		426	5,25		582	1,45
111	24,11		270	8,98		429	5,19		585	1,34
114	23,63		273	8,87		432	5,15		588	1,26
117	22,36		276	8,76		435	5,11		591	1,17
120	21,44		279	8,71		438	5,08		594	1,12
123	20,51		282	8,65		441	5,03		597	0,99
126	19,67		285	8,57		444	4,99		600	0,93
129	19,13		288	8,51		447	4,89		603	0,9
132	19,01		291	8,46		450	4,84		606	0,88
135	18,45		294	8,42		453	4,78		609	0,85
138	17,89		297	8,36		456	4,73		612	0,84
141	17,52		300	8,31		459	4,68		615	0,82
144	17,04		303	8,24		462	4,65		618	0,8

Tablo 4.5 Elektrodiyaliz deneyi ara kademe süre-iletkenlik (devamı)

147	16,71		306	8,11		465	4,63		621	0,77
150	16,24		309	8,06		468	4,6		624	0,75
153	15,91		312	7,98		471	4,57		627	0,71
156	15,74		315	7,92		474	4,56		630	0,68
159	15,61		318	7,87						

Ara kademesi elektrodiyaliz sonucu, süre – iletkenlik grafiği olarak Şekil 4.2'de verilmiştir.



Şekil 4.2 Zamana göre çıkış suyu ara kademe iletkenlik değeri

Ara kademesi için elektrodiyaliz deneyi ortalama elektrik tüketim değerleri Tablo 4.6'da verilmiştir.

Tablo 4.6 Elektrodiyaliz deneyi ara kademe elektrik tüketimi

Ortalama Volt	16,21 Volt
Ortalama Amper	1,32 Amper

4.2.3.3 Dip Kademe

Ara kademesi elektrodiyaliz deneyi sonucunda süre – iletkenlik değerleri Tablo 4.7'de verilmiştir.

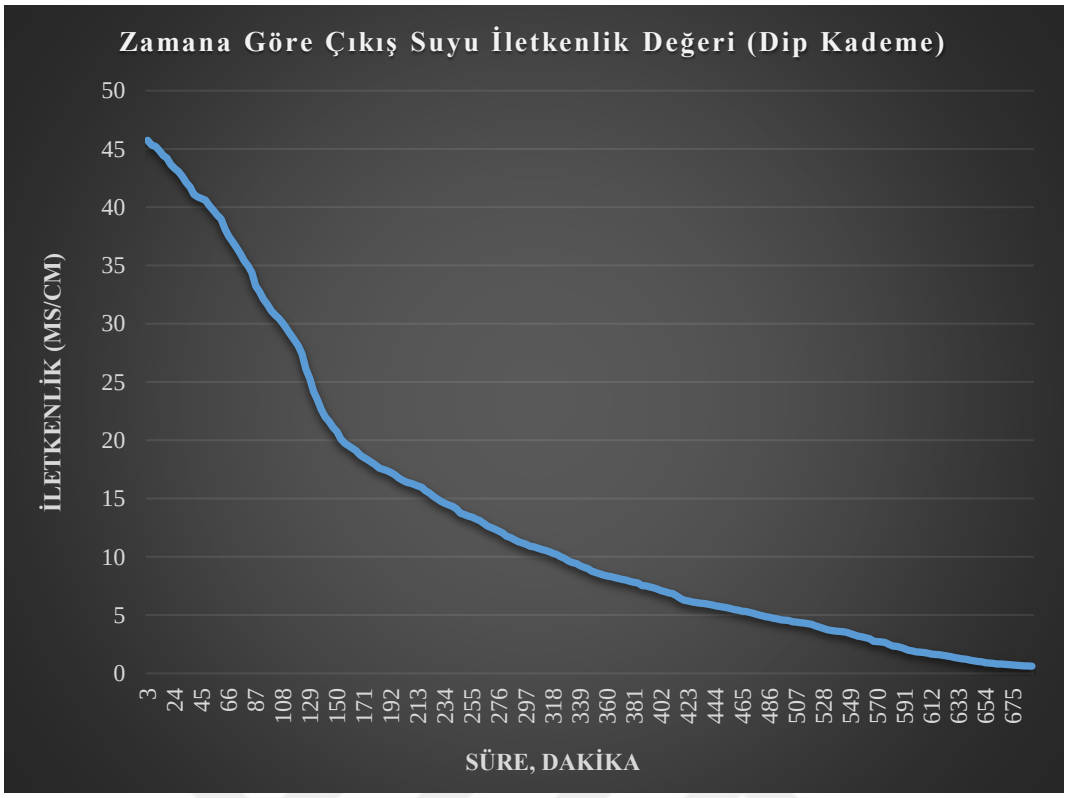
Tablo 4.7 Elektrodiyaliz deneyi dip kademe süre-iletkenlik

Süre	İletkenlik		Süre	İletkenlik		Süre	İletkenlik		Süre	İletkenlik
3	45,74		177	18,12		351	8,65		522	4,09
6	45,32		180	17,88		354	8,56		525	3,98
9	45,21		183	17,62		357	8,44		528	3,87
12	44,87		186	17,51		360	8,37		531	3,76
15	44,45		189	17,41		363	8,31		534	3,68
18	44,22		192	17,24		366	8,22		537	3,64
21	43,66		195	17,03		369	8,13		540	3,61
24	43,32		198	16,76		372	8,07		543	3,57
27	43,04		201	16,58		375	8		546	3,54
30	42,65		204	16,41		378	7,9		549	3,41
33	42,11		207	16,34		381	7,82		552	3,32
36	41,73		210	16,21		384	7,75		555	3,21
39	41,11		213	16,08		387	7,54		558	3,14
42	40,87		216	15,98		390	7,51		561	3,06
45	40,74		219	15,67		393	7,43		564	2,98
48	40,61		222	15,48		396	7,35		567	2,75
51	40,11		225	15,21		399	7,23		570	2,73
54	39,74		228	14,99		402	7,11		573	2,7
57	39,32		231	14,76		405	7,02		576	2,65
60	38,98		234	14,61		408	6,91		579	2,49
63	38,14		237	14,46		411	6,84		582	2,35
66	37,51		240	14,32		414	6,65		585	2,31
69	37,04		243	14,11		417	6,43		588	2,24
72	36,54		246	13,75		420	6,26		591	2,12
75	36,01		249	13,64		423	6,21		594	1,99
78	35,43		252	13,51		426	6,13		597	1,93
81	34,97		255	13,41		429	6,09		600	1,86
84	34,41		258	13,26		432	6,04		603	1,83
87	33,24		261	13,11		435	6		606	1,8
90	32,76		264	12,88		438	5,94		609	1,74
93	32,11		267	12,64		441	5,88		612	1,67
96	31,67		270	12,51		444	5,82		615	1,63
99	31,11		273	12,37		447	5,76		618	1,6
102	30,74		276	12,21		450	5,71		621	1,56
105	30,45		279	12,03		453	5,64		624	1,5
108	30,03		282	11,78		456	5,55		627	1,43

Tablo 4.7 Elektrodiyaliz deneyi dip kademe süre-iletkenlik (devamı)

111	29,56		285	11,65		459	5,47		630	1,35
114	29,06		288	11,47		462	5,41		633	1,31
117	28,61		291	11,31		465	5,34		636	1,25
120	28,12		294	11,2		468	5,3		639	1,21
123	27,41		297	11,09		471	5,23		642	1,14
126	26,11		300	10,92		474	5,15		645	1,09
129	25,31		303	10,86		477	5,05		648	1,04
132	24,17		306	10,74		480	4,95		651	0,99
135	23,46		309	10,65		483	4,88		654	0,93
138	22,65		312	10,56		486	4,83		657	0,9
141	22,02		315	10,44		489	4,74		660	0,85
144	21,63		318	10,32		492	4,68		663	0,82
147	21,11		321	10,21		495	4,61		666	0,8
150	20,75		324	10,02		498	4,57		669	0,77
153	20,11		327	9,87		501	4,54		672	0,75
156	19,77		330	9,64		504	4,43		675	0,73
159	19,54		333	9,51		507	4,4		678	0,7
162	19,32		336	9,42		510	4,36		681	0,68
165	19,11		339	9,25		513	4,32			
168	18,75		342	9,11		516	4,28			
171	18,52		345	8,99		519	4,21			
174	18,34		348	8,78						

Ara kademesi elektrodiyaliz sonucu, süre – iletkenlik grafiği olarak Şekil 4.3'te verilmiştir.



Şekil 4.3 Zamana göre dip kademe çıkış suyu iletkenlik değeri

Yüzey kademesi için elektrodiyaliz deneyi ortalama elektrik tüketim değerleri Tablo 4.8'da verilmiştir.

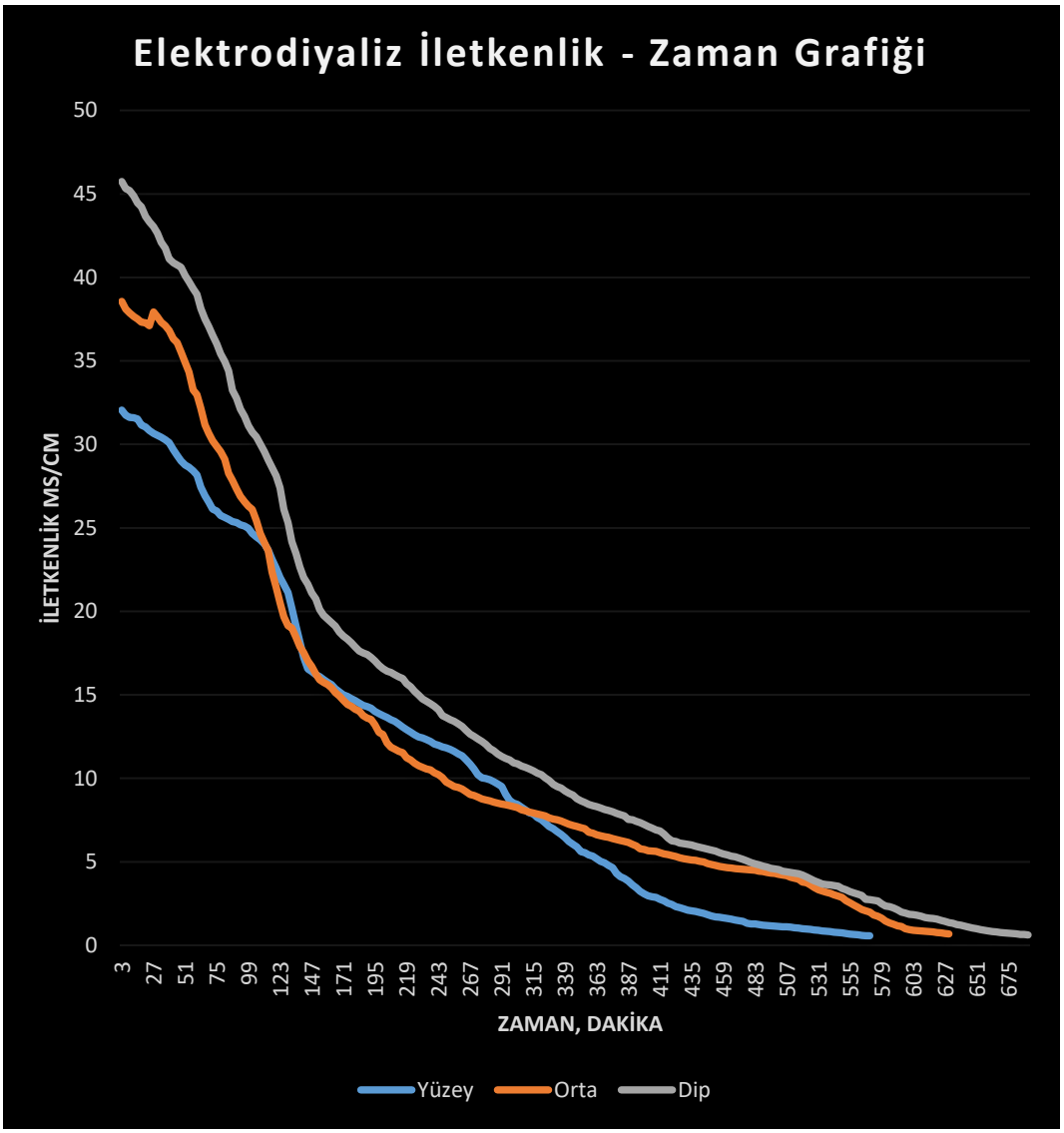
Tablo 4.8 Elektrodiyaliz deneyi ara kademe elektrik tüketimi

Ortalama Volt	17,45 Volt
Ortalama Amper	1,44 Amper

Dip kademesi için elektrodiyaliz deneyi ortalama elektrik tüketim değerleri Tablo 4.6'da verilmiştir

4.2.3.4 Yüzey – Ara – Dip Seviye Karşılaştırması

Üç seviyenin de tek bir grafikte karşılaştırılması Şekil 4.4'te gösterilmiştir.



Şekil 4.4 Elektrodiyaliz üç kademe için iletkenlik – zaman

4.2.3.5 Giderim Verimi

Tablo 4.9 Üç kademe için giderim verimleri

	Yüzey (mS/cm)	**Ara (mS/cm)**	**Dip (mS/cm)**
Deniz Suyu	30,4	36,3	43,1
İyon Değiştirici Reçine Sonrası	32,05	38,56	45,74

Tablo 4.9 Üç kademe için giderim verimleri (devamı)

Elektrodiyaliz Çıkışı	0,67	0,68	0,68
Giderim Verimi, %	97,91	98,23	98,51
Geçen Süre, dk	555	630	681
Giderim Performansı, % (Giderim Verimi / Geçen Süre * 100)	17,64	15,59	14,47

5
SONUÇ

5.1 Deney Sonuçları Çıkarımları ve Karşılaştırılması

5.1.1 Ters Osmoz

5.1.1.1 Grafik Yorumu

- Yüzey, ara ve dip kademelerinden alınan besleme sularına ait ters osmoz akı–zaman eğrileri birlikte incelendiğinde, besleme suyunun başlangıç tuzluluğunun membran performansı üzerinde belirleyici bir etkisi olduğu açıkça görülmektedir. Deney başlangıcında yüzey numunesi en yüksek akı değerine sahipken, ara kademe ara bir akı seviyesi göstermiş; dip numune ise en düşük başlangıç akısı ile sürece girmiştir. Bu sıralama, besleme sularının tuzluluk seviyeleri ile ters osmozun temel itici mekanizması olan osmotik basınç arasındaki ilişkiyle doğrudan uyumludur.
- Zaman ilerledikçe her üç numunede de akı değerlerinin kademeli olarak azaldığı gözlenmektedir. Bu düşüş, ters osmoz prosesinde yaygın olarak karşılaşılan konsantrasyon kutuplaşması, membran yüzeyinde biriken çözünmüş maddeler ve işletme süresine bağlı olarak artan hidrolik direnç ile açıklanabilir. Ancak akı azalımının şiddeti ve eğrilerin şekli katmanlar arasında belirgin farklılıklar göstermektedir.
- Yüksek tuzluluğa sahip dip numunede akı değerleri deneyin başından itibaren diğer iki numuneye kıyasla daha düşük seyretmiş ve zamanla daha sınırlı bir toparlanma veya dengeleme eğilimi göstermiştir. Bu durum, yüksek iyon konsantrasyonuna bağlı artan osmotik basıncın net itici basıncı düşürmesi ve membran yüzeyinde daha yoğun konsantrasyon kutuplaşmasına neden olmasıyla

ilişkilendirilebilir. Buna ek olarak, dip sularında bulunması muhtemel yüksek sertlik iyonları veya kolloidal maddeler, inorganik scaling veya kirlenme oluşumunu hızlandırarak akı kaybını pekiştirmiş olabilir.

- Ara kademe numunesi, yüzey ve dip arasında bir davranış sergilemiş; başlangıçta yüzeye yakın akı değerleri sunmasına rağmen zamanla akı düşüşü belirginleşmiştir. Bu durum, ara kademedeki tuzluluğun ve çözünmüş madde içeriğinin, süreç ilerledikçe konsantrasyon kutuplaşmasını artırarak membran performansını sınırladığını düşündürmektedir.
- Yüzey numunesinde ise daha düşük başlangıç tuzluluğuna bağlı olarak osmotik basınç etkisi sınırlı kalmış ve daha yüksek başlangıç akıları elde edilmiştir. Zamanla gözlenen akı azalımı, diğer numunelere kıyasla daha kontrollü gerçekleşmiş olup, bu durum yüzey sularının ters osmoz için daha elverişli bir besleme karakteri sunduğunu göstermektedir.
- Deneyin ilerleyen safhalarında üç eğrinin de belirli bir akı aralığında plato yapmaya başlaması, sistemin yarı kararlı bir işletme rejimine ulaştığını ve membran üzerinde oluşan dirençlerin artık baskın hale geldiğini göstermektedir. Bu noktadan sonra akıdaki değişimler sınırlı kalmakta, sistem performansı büyük ölçüde membran yüzeyi koşulları tarafından belirlenmektedir.

5.1.1.2 Genel Çıkarımlar

Düşük tuzluluğa sahip yüzey sularında daha yüksek ve daha kararlı akılar elde edilirken, yüksek tuzluluklu dip sularında osmotik basınç, konsantrasyon kutuplaşması ve muhtemel kirlenme etkileri nedeniyle performans daha erken ve daha belirgin şekilde sınırlanmaktadır.

Uygulama açısından değerlendirildiğinde, yüksek tuzluluk içeren dip sularının doğrudan ters osmoz sistemlerine beslenmesi durumunda daha düşük geri kazanım oranları, daha yüksek enerji tüketimi ve daha sık kimyasal temizlik ihtiyacı kaçınılmaz hale gelmektedir. Bu nedenle, bu tür beslemeler için uygun ön arıtma

adımlarının (sertlik giderimi, ön filtrasyon veya kimyasal şartlandırma) uygulanması, sistemin uzun vadeli verimliliği açısından kritik öneme sahiptir.

5.1.2 Elektrodiyaliz

5.1.2.1 Grafik Yorumu

- Elektrodiyaliz deneyinde yüzey, ara ve dip kademelerinden alınan numunelere ait iletkenlik–zaman eğrileri birlikte değerlendirildiğinde, sistemin başlangıçtaki tuzluluk dağılımını ve iyon giderim davranışını açık biçimde yansıttığı görülmektedir. Dip numunenin deney başlangıcında en yüksek iletkenlik değerine sahip olması, bu kademedeki çözünmüş iyon konsantrasyonunun diğer katmanlara kıyasla daha yüksek olduğunu göstermektedir. Ara kademe ara bir değer sergilerken, yüzey numunesi en düşük başlangıç iletkenliği ile deney sürecine girmiştir. Bu durum, doğal su kolonlarında sıklıkla gözlenen dikey tuzluluk stratifikasyonu ile uyumludur.
- Tüm numunelerde zaman ilerledikçe iletkenliğin sürekli ve düzenli biçimde azalması, uygulanan elektrik alan altında iyonların anyon ve katyon değiştirici membranlar aracılığıyla etkin şekilde taşındığını ve sistemin çalıştığını göstermektedir. Bununla birlikte, dip numuneye ait eğrinin deney boyunca diğer iki eğrinin üzerinde seyretmesi dikkat çekicidir. Bu durum, dip örneğin daha yüksek başlangıç iyon yüküne sahip olması nedeniyle, mutlak iyon giderimi gerçekleşse dahi sistem içinde daha uzun süre yüksek iletkenlik seviyelerini koruduğunu düşündürmektedir.
- Grafikte gözlenen eğim farklılıkları, elektrodiyaliz prosesinin besleme suyunun başlangıç tuzluluğuna duyarlı olduğunu ortaya koymaktadır. Düşük tuzluluğa sahip yüzey numunesinde iletkenlik daha erken safhalarda düşük değerlere inerken, yüksek tuzluluklu dip numunesinde iyon taşınımı daha uzun bir zamana yayılmaktadır. Literatürde bu durum, yüksek iyonik kuvvet altında membran yüzeyinde konsantrasyon kutuplaşmasının daha belirgin hale gelmesi ve etkin akım verimliliğinin zamanla azalması şeklinde açıklanmaktadır.
- Deneyin ileri safhalarında üç eğrinin de düşük iletkenlik değerlerine yakınsaması, dilüe akışkanın büyük ölçüde iyon bakımından fakirleştiğini ve sistemin limit koşullara yaklaştığını göstermektedir. Bu noktada iyon

taşınım hızının azalması, sistem direncinin artması ve su ayrışması gibi ikincil etkilerin ortaya çıkması beklenir. Özellikle yüksek tuzluluklu beslemelerde bu tür sınırlayıcı mekanizmalar daha erken ve daha belirgin şekilde gözlenmektedir.

- Dip numunede iletkenliğin diğerlerine göre daha kalıcı olması, yalnızca başlangıç konsantrasyonuyla değil; aynı zamanda olası inorganik çökelme (Ca^{2+}, Mg^{2+} temelli scaling) veya kolloidal maddelerin membran yüzeyinde oluşturduğu ek direnç ile de ilişkili olabilir. Bu tür etkiler, elektrodiyaliz prosesinde enerji tüketimini artıran ve uzun vadede membran performansını düşüren başlıca faktörler arasında yer almaktadır.

5.1.2.2 Genel Çıkarımlar

Düşük ve ara tuzluluklu yüzey ve ara kademe numunelerinde iyon giderimi daha hızlı ve dengeli gerçekleşirken, yüksek tuzluluklu dip numunesinde proses daha uzun süreye yayılmakta ve sınırlayıcı etkiler daha belirgin hale gelmektedir. Bu bulgular, literatürde bildirilen "başlangıç iyon konsantrasyonunun elektrodiyaliz verimi, akım etkinliği ve işletme süresi üzerindeki belirleyici rolü" ile örtüşmektedir.

Uygulama açısından değerlendirildiğinde, yüksek tuzluluk içeren dip sularının doğrudan elektrodiyaliz ünitesine verilmesi yerine ön arıtma (ön çökeltme, filtrasyon veya sertlik giderimi) ile desteklenmesi, membran ömrü ve enerji verimliliği açısından kritik görünmektedir. Ayrıca akım yoğunluğunun limit akımın altında tutulması ve uygun işletme stratejilerinin uygulanması, sistem performansının sürdürülebilirliği açısından önemlidir.

5.2 Ters Osmoz ve Elektrodiyalizin Karşılaştırılması

Çalışmamızda yüzey–ara–dip stratifikasyonuna sahip su numunelerinin elektrodiyaliz (ED) ve ters osmoz (RO) performansları karşılaştırıldı. Elde edilen bulgular, deney sonuçları, literatür taraması ve bu iki farklı prosesin çalışma mekanizmasından da anlaşılacağı üzere iki prosesin besleme tuzluluğuna karşı verdikleri yanıtların mekanistik temelinin farklı olduğunu göstermektedir: ED'de iyon taşınımı elektrik alanına bağlı olarak hızlanırken yüksek başlangıç tuzluluğu ilk aşamada hızlı iyon giderimine zemin hazırlayabilir; ancak bu durum

konsantrasyon kutuplaşması, membran direncinde artış ve düşen Faradaik verimlilik gibi olumsuz etkilere yol açar. Bu nedenle ED, teknik olarak yüksek TDS değerlerinde iyon uzaklaştırmayı sürdürebilse de enerji ve işletme maliyetleri hızla yükselmekte; literatür ED'nin Acı (orta tuzluluk) uygulamalarında rekabetçi olduğunu, ancak deniz suyu aralığında ekonomik açıdan tercih edilmediğini belirtmektedir.

Elektrodiyaliz sistemlerinde membranlar tipik olarak ardışık (seri) bağlantılı hücrelerden oluşan yığınlar hâlinde düzenlenir; bu durumda besleme akımı yığın boyunca ilerledikçe çözünmüş iyon konsantrasyonu kademeli olarak azalır ve son hücrelerde hâlâ anlamlı iyon giderimi gözlenebilir. Örneğin 90. hücrede kısmi arıtma sağlanmışken, 100. hücrede nispeten daha yüksek oranda iyon uzaklaştırımı gerçekleşebilir. Buna karşılık ters osmoz tesislerinde membran modülleri genellikle paralel bağlanır; paralel düzenleme, her membrana düşen hacimsel akıyı böler ve membran başına düşük flux sağlasa da permeat genellikle yüksek saflıkta (yüksek tuz tutma) olur.

RO tarafında ise osmotik basınç doğrudan itici kuvvetin azalmasına neden olduğundan yüksek tuzluluk, başlangıç akısını ve verimliliği yazılımsal değil fundamental olarak sınırlar. Bununla birlikte büyük ölçekli RO tesislerinde kullanılan enerji geri kazanım cihazları ve proses optimizasyonu sayesinde deniz suyu aralığında dahi uygulanabilir, öngörülebilir ve saha verisi bakımından olgun bir teknolojidir. Bu durum, ED'nin "teknik olarak yapılabilir" olmasının, onu otomatik olarak "endüstriyel olarak rasyonel" kılmadığını açıkça destekler.

5.3 Uygulanabilirlik Açısından Karşılaştırma

Uygulanabilirlik açısından elektrodiyaliz ve ters osmoz metotlarının karşılaştırılması Tablo 5.1'de verilmiştir.

Tablo 5.1 Uygulanabilirlik açısından karşılaştırma

Kriter	Ters Osmoz (RO)	Elektrodiyaliz (ED)	Not / Öneri
Tuz Giderme Performansı	Çok yüksek**.** Deniz suyunun (yüksek TDS) tek adımda içme suyu standartlarına indirgenmesinde güvenilir.	Sınırlı/ekonomik değil yüksek TDS'te; ED iyonları ayırır ama deniz suyundaki yüksek iyon yükünü ekonomik olarak işlemek zordur.	RO: Modül seçimi ve yüksek basınç donanımı gerekir. ED: Acı su (1–10 g/L) için tercih edilmelidir; deniz suyu için sadece özel/araştırma uygulamaları düşünün.
Enerji Tüketimi (SEÇ) – yüksek tuzluluk uygulaması	Deniz suyu RO için tipik ≈ **3 kWh/m³**	ED için deniz suyu veri tabanı klasik literatürde **spesifik yüksek TDS için veri vermiyor**; Acı su için ED'nin avantajı çok sınırlı	RO: ERD (enerji geri kazanım) zorunlu ekonomik değerlendirmede. ED: Acı aralıkta enerji açısından rekabetçi olabilir; yüksek TDS'te enerji analizleri gereklidir.
Enerji Tüketim Eğilimi	RO, yüksek tuzlulukta enerji verimliliğini korur	ED'nin enerji verimliliği, düşük tuzlulukta daha iyidir; tuzluluk arttıkça avantaj kaybı olur	Tasarımda geri kazanım hedefini optimumla— yüksek geri kazanım tepe enerji maliyetini artırır; pilot ölçümler şart.
Enerji Verimlilik Konumu	RO yüksek tuzlulukta *enerji avantajı* sağlar	ED düşük tuzlulukta avantajlıdır (<~3 g/L), ancak deniz suyu gibi yüksek tuzlulukta RO daha etkin olur	Proje ölçeğine göre enerji geri kazanım yatırımı (RO) veya akım/polarite kontrol stratejileri (ED) değerlendirilmelidir.
Ürün su kalitesi	Mikroorganizma, organik madde, ağır metal ve iyon gideriminde **yüksek güvenilirlik**; içme suyu standartlarına ulaşma olasılığı yüksektir.	ED iyon kontrollü ayrıştırma sağlar; nötr organik/ mikroorganizma giderimi sınırlı; genellikle ek süreç gerekebilir.	Ürün kalitesi hedefi yüksekse RO tercih edin; spesifik iyon hedefi (ör. nitrat) varsa ED avantajlı olabilir.

Tablo 5.1 Uygulanabilirlik açısından karşılaştırma (devamı)

İdeal Besleme Tuzluluğu	Deniz suyu (~35 g/L) ve ara Acı	ED düşük–orta tuzluluk (<~10 g/L)	ED: Acı hedefli projelerde ekonomik avantaj aranmalı. RO: deniz suyu uygulamalarında ERD ve modül tasarımı kritik.
Membran Ömrü	Membranlar RO'da **3-5 yıl**	ED membran ömrü koşullara bağlı	Düzenli CIP planı ve ön-arıtma ile ömrü uzatın; yedek/parça tedarik planı yapın.
Su Geri Kazanım	Deniz suyu RO: ~**40-60%**	ED Acı su için ~**60-80%**	Yüksek geri kazanım enerji ve scaling riskini artırır; geri kazanım hedefini operasyon-maliyete göre dengeleyin.
Uygulama Ölçeği	Küresel desalinasyon kapasitesinin **~70% – RO ile** üretildiği bildirilmektedir	ED global kapasitede çok daha düşük paya sahiptir	Pilot → ölçeklendirme adımları planlanmalı; saha verisiyle LCC (life-cycle cost) hesaplayın.

 Performans dağılımı: Yüzey (düşük tuzluluk) suları her iki proses için de en elverişli besleme grubunu oluşturur; RO'da yüksek ve stabil akı/ürün kalitesi, ED'de ise düşük enerji ile etkin iyon giderimi beklentisi vardır.

 Proses-korelasyonu: ED, iyon-seçicilik ve kademeli iyon taşınımı gerektiren uygulamalarda (Acı) öne çıkar; RO ise tek adımda yüksek tuz giderimi beklentisi ve büyük ölçekli üretime uygunluğu nedeniyle tercih edilir.

 Ön-işlem gereksinimi: Yüksek tuzluluklu dip sularında her iki proses için de ön-arıtma (kolloid/sertlik kontrolü) zorunludur; uygulanabilirlik değerlendirmesinde ön-arıtma kapasitesi belirleyici parametredir.

 İşletme stratejisi: Proje amacına göre (ürün su kalitesi vs. enerji/işletme kolaylığı) proses seçimi yapılmalı; yüksek hacimli üretim ve saha ölçeği hedefleniyorsa RO (ERD destekli) daha rasyoneldir.

5.4 Teknik Açıdan

Teknik açıdan elektrodiyaliz ve ters osmoz metotlarının karşılaştırılması Tablo 5.2'de verilmiştir.

Tablo 5.2 Teknik açıdan karşılaştırma

Kriter	Ters Osmos (RO)	Elektrodiyaliz (ED)	Not / Öneri
Hedef ürün kalitesi	Yüksek tuz giderimi (%95–99+) — geniş uygulama	İyon-seçici uzaklaştırma; belirli iyonlarda üstünlük	RO genel amaçlı, ED seçici kullanım için uygundur
Kirlenme / scaling hassasiyeti	Organik, biyofilm, Ca/Mg scaling; antiscalant ile kontrol	Kolloid/organik kirlenme + konsantrasyon kutuplaşması kaynaklı etkiler	Ön-arıtma şart
Ön-arıtma gereksinimi	UF/MF + yumuşatma/koagülasyon sıklıkla zorunlu	MF/UF önerilir; kolloidler özellikle ED performansını bozar	Ön-arıtma seviyesi verim/longevity belirler
İşletme parametreleri / kontrol	TMP, geri kazanım, akış hızları; hidrolik kontrol	Akım (A), voltaj, polarite yönetimi; elektriksel kontrol bilgisi gerekir	Otomasyon her iki teknoloji için önemlidir
Enerji yönetimi	Basınç enerjisi; ERD ile optimizasyon mümkün	Elektrik enerjisi doğrudan; Faradaik verimlilik kritik	Enerji geri kazanım yalnızca RO'da yaygın
Membran/eleman analiz gereksinimi	Permeat iletkenliği, salt rejection, SEM/FTIR	Faradaik verim, iyon akışı, membran/elektrot yüzey analizi	Periyotik karakterizasyon şart
Bakım & CIP	Periyodik CIP; antiscalant dozaj kontrolü	Daha sık izleme; akım verim düştüğünde CIP gerekebilir	İzleme frekansı su kalitesine bağlı
Modülerlik & ölçeklenebilirlik	Çok iyi; büyük ölçeklerde verimli	Modüler; küçük–orta Acı projelerde avantaj	Deniz suyu için RO ölçeği olgun
Uygulama örnekleri	İçecek suyu, büyük deniz suyu tesisleri, endüstriyel proses suyu	Acı demineralizasyon, iyon ayrımı (ör. nitrat), proses su yönetimi	Uygulama hedefi seçimde belirleyici
Güvenlik / proses sınırlamaları	Osmotik limit (yüksek TDS) — TMP ve malzeme sınırlamalar	Konsantrasyon kutuplaşması → limit akım; iyonik geri beslenme riski	Tasarımda emniyet faktörü ekleyin
Kirlenme / Scaling Riski	Kirlenme / Scaling Riski	Kirlenme / Scaling Riski	Kirlenme / Scaling Riski

 Enerji ve maliyetler: Acı aralığında ED ile RO arasında enerji açısından yakın dengeler görülebilir; ancak TDS arttıkça RO'da ERD kullanımı hariç enerji maliyeti daha öngörülebilirdir. ED'nin enerji verimliliği Faradaik verimlilikle sıkı ilişkilidir ve yüksek TDS'te SEC hızla yükselir.

 CAPEX / OPEX dengesi: RO büyük ölçeklerde birim maliyeti düşüren; ED ise küçük–orta Acı projelerde yatırım geri dönüşünü hızlandırabilecek bir alternatiftir. OPEX'te enerji payı ve CIP sıklığı belirleyicidir.

 Brine yönetimi ve düzenlemeler: Yoğun konsantre yönetimi her iki teknoloji için ek maliyet unsuru olup, bölgesel regülasyonlar ekonomik kararları değiştirebilir.

 Karar ölçütü: Nihai ekonomik tercih; yerel enerji fiyatı, hedef geri kazanım, ölçek ve ön-arıtma maliyetlerinin toplam yaşam döngüsü maliyeti (LCC) üzerinden karşılaştırılmasıyla netleştirilmelidir.

5.5 Ekonomik Tablo

Ekonomik açıdan elektrodiyaliz ve ters osmoz metotlarının karşılaştırılması Tablo 5.3'de verilmiştir.

Tablo 5.3 Ekonomik açıdan karşılaştırma

Kriter	Ters Osmos (RO)	Elektrodiyaliz (ED)	Not
Uygun TDS aralığı (pratik)	<1 g/L (tatlılaştırma) — 1–35+ g/L (Acı → deniz suyu; ölçeğe bağlı)	En uygun: 1–10 g/L (Acı). >10–15 g/L→ ekonomik dezavantaj	TDS: g/L = kg/m³
Tipik SEC (kWh·m⁻³)	Acı: **0.5–3**; Deniz suyu: **3–6+** (ERD varlığı belirleyici)	Acı: **0.2–3** (çok değişken; yüksek TDS'te hızla artar)	Veriler prosese/geri kazanıma göre değişir

Tablo 5.3 Ekonomik açıdan karşılaştırma (devamı)

CAPEX (nispi)	Orta → Yüksek; basınç ekipmanı ve ERD maliyeti etkili	Orta → Yüksek; hücre yığılımları ve güç ekipmanları maliyet oluşturur	Büyük ölçek RO'da birim maliyet düşer
OPEX (nispi)	Enerji (pompa) + kimyasal (antiscalant, CIP) — enerji baskın	Elektrik (I·V) + CIP + membran/elektrot bakım; Faradaik verim düşerse OPEX artar	Enerji fiyatı kritik
Brine / konsantre yönetimi maliyeti	Yüksek hacim ve yükseklik (çözeltinin tuzluluğu) — taşıma/atık yönetimi önemli	Konsantre hacmi/kompozisyon benzer; iyon-seçime bağlı yeniden kullanım opsiyonları	Yönetim maliyeti yer seçimine bağlı
Membran/eleman değiştirme maliyeti	3–7 yıl ort. (Membran tipine göre)	3–8 yıl (membran + iyon-elemanlar); elektrot bakım ek maliyet	Kimyasal temizlik sıklığı belirleyici
Finansal geri dönüş (kısa dönem)	Büyük tesis + ERD ile olumlu; küçük tesislerde enerji maliyeti baskın	Acı ve belirli iyon hedeflerinde hızlı amortisman mümkün	Proje bazlı LCC yapılmalı
Risk / belirsizlikler (ekonomik)	Enerji fiyat dalgalanması, brine regülasyonları	Membran/elektrot tedarik, Faradaik verim düşüşüyle artan işletme masrafları	Yerel faktörler belirleyici

- **Operasyonel sınırlamalar:** RO'nun kısıtı osmotik basınç ve buna bağlı TMP gereksinimleridir; ED'nin kısıtı ise konsantrasyon kutuplaşması ve düşen Faradaik verimdir. Her iki sınır da proses kontrolü ve ön-arıtma ile yönetilmelidir.

- **Kirlenme ve bakım:** RO'da antiscalant ve düzenli CIP ile biyofilm/scale kontrolü ana gerekliliktir; ED'de kolloid ve organik yük öncelikli olup, akım/polarite stratejileri ve daha sık izleme gerekebilir.
- **Modülerlik ve ölçeklenebilirlik:** RO daha kolay büyük ölçeğe ölçeklenir; ED modüler yapısıyla Acı, iyon-seçici veya entegrasyonlu proseslerde teknik avantaj sağlar.
- **Ölçüm-kontrol gereksinimi:** ED için Faradaik verim, akım/gerilim zaman serileri ve iyon zaman-serileri; RO için flux, tuz tutma (%) ve permeat iletkenliği düzenli izlenmelidir. Membran yüzeyi analizleri (SEM/EDX) her iki teknolojide kirlenme tipi tayini açısından önerilir.

5.6 Sonuç ve Öneriler

5.6.1 Sonuç

Teknik ve ekonomik açıdan incelendiğinde ters osmoz ve elektrodiyaliz prosesleri öne çıkmıştır, uygulanabilirlik kısmında ise bu iki proses incelenmiştir.

Çevre Mühendisliği perspektifinden süreç seçimi, yalnızca anlık performans (ör. grafiksel akı/iletkenlik düşüşü) değil; aynı zamanda spesifik enerji tüketimi, Faradaik verimlilik, membran ömrü ve ölçek ekonomisi gibi kriterlerin birlikte değerlendirilmesine dayanmalıdır.

Bununla birlikte tasarısı öngörülen birçok desalinasyon sistemi için yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımı ve enerji geri kazanım / iyileştirme teknolojileri ekonomik ve sürdürülebilirlik açısından kritik bir role sahiptir.

Bulgular, Acı su aralığında ED'nin mantıklı bir alternatif olabileceğini; yüksek tuzluluk/deniz suyu aralığında ise RO'nun saha uygulamalarında hem daha kısa sürede gerçekleşen hem de giderim verimi performansının zamanla ED'e kıyasla daha az azalan bir proses olduğu için daha iyi bir seçenek olduğunu ayrıca literatürdeki akademik çalışmaların ışığında ters osmoz prosesi için maksimum verimlilik ve minimum enerji sarfiyatı için optimum sıcaklık aralığı ~ 30-35 °C olup bu aralık elektrodiyaliz için ~ 28-33 °C olarak göstermektedir.

Elektrodiyaliz çalışma prensibi olarak birbirine seri bağlı ünitelerin en son hücresinde nihai giderim seviyesine başlangıçtaki hücrelere göre uzun sürelerde

ulaştırdığı bilinmektedir. Ancak ters osmoz prosesi bundan farklı olarak paralel bağlı ünitelerin bağımsız olarak her bir süzüntü damlasının nihai giderim veriminde ürettiği çıkış sularından ibarettir.

Ancak unutulmamalıdır ki, endüstriyel deşarjlar, evsel atıksular, tarımsal drenaj ve mikro plastik yükleri ve özellikle müsilaj Marmara Denizi'nin su kalitesini olumsuz etkilemektedir. Bu durum, desalinasyon tesislerinde ileri ön arıtma süreçlerini (koagülasyon, ultrafiltrasyon, aktif karbon vb.) zorunlu hale getirmektedir.

Brine yönetimi için ise literatürde birçok bertaraf, yeniden kullanım ve tuz yeniden kazanımı çalışması yapılmıştır.

5.6.2 Öneriler

Özellikle ters osmoz için kullanılabilecek basınçlandırma sonrası ortaya çıkan kinetik enerjinin aktarılması prensibine dayalı basınç değiştiriciler ve desalinasyon prosesi sırasında ortaya çıkan atık ısıyı tekrar giriş suyuna entegre edebilen ısı eşanjörleri sayesinde, hem enerji sarfiyatını düşürmek hem de giriş suyu sıcaklığının arttırılmasını sağlayıp prosesin daha verimli çalışmasını sağlayıp çıkış suyu ürün kalitesini de arttırabilen sisteme geçişin daha verimli olabileceği düşünülmektedir.

Ülkemizde deniz sıcaklıkları ve baraj doluluk oranları da göz önünde bulundurulduğunda deniz sıcaklıklarının yüksek ve yağış miktarının az olduğu yaz aylarında sisteme ısı eşanjörü entegresi ile giriş suyu ısıtılarak besleme suyu sıcaklığının nispeten ters osmoz prosesi için optimal seviyelere getirilerek enerji sarfiyatı minimize ve giderim verimi maksimize edilmeye çalışılması önerilir. Bu durum Ters osmozda optimal sıcaklık aralığının ED'e göre yaklaşık 3 °C kadar daha düşük olması nedeniyle daha uygulanabilirdir.

Marmara Bölgesi coğrafi konumu neticesinde dalga, güneş, jeotermal, rüzgar gibi sahip olduğu birçok yenilenebilir enerji kaynaklarının fayda/maaliyet analizi yapıldıktan sonra uygun ise sisteme entegre edilmesi ile son derece efektif olabileceği öngörülmektedir.

Bu durumlar bütüncül bir yaklaşımla; arıtma performansı, enerji geri kazanımı, ürün eldesi için geçen süre ve yenilenebilir enerji entegrasyonu açısından önerilen sistemlerle birlikte su kaynağı rezervelerinin yetersizleşmeye başladığı ve deniz suyu sıcaklığının 20 santigrat derecelerin üzerinde seyrettiği dönemlerde ters

osmozun baraj ve diğer kaynak sularıyla hibrit olarak kullanılması daha rasyonel ve fizibil bir seçenek olduğunu göstermektedir.

Müsilaj tehlikesi nedeniyle yer seçimine ve uygun ekipman, ünite kullanımına dikkat edilerek fizibilite çalışması yapılmalıdır. Ayrıca Müsilaj koşullarında RO'yu korumak için koagülasyon–DAF, UF/MF–kartuş filtre sıralı, optimize dozaj ve sık izleme (SDI/MFI/ATP) ile desteklenen çok kademeli bir ön arıtma hattı uygulanmalıdır.

Brine yönetimi için ise çeşitli akademik araştırmaların ışığında, igelişen teknoloji sayesinde hem tuz geri kazanımı ile döngüsel ekonomiden yararlanabilmek hem de brine ın derişim potansiyeli enerjisinden faydalanılarak enerji geri kazanımı ile sürdürülebilirlik ilkesini sağlayabilmek ilerleyen yıllarda mümkün gibi gözükmektedir.

Sonuç olarak her geçen gün ilerleme gösteren inovasyonel çalışmalar ve hızla gelişen teknoloji sayesinde gelecek zamanda farklı metotlar günümüzde kullanılan bu yöntemlerin yerini alabilecektir.

KAYNAKÇA

[1] "Turkiyede SU Kaynaklarinin Guncel Durumu". Erişim: 22 Eylül 2025. [Çevrimiçi]. Erişim adresi: https://www.wwf.org.tr/kesfet/tatli_su/turkiyede_su_kaynaklarinin_guncel_durumu/

[2] C. B. Kurum ve F. İlhan, "Deniz Suyu Desalinasyonu İçin Uygulanabilecek Yöntemlerin Karşılaştırılması", içinde *Denizlerimizin Dünü, Bugünü, Yarını*, Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi: Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi, Tem. 2024, s. 27. [Çevrimiçi]. Erişim adresi: https://udbk2024.erdogan.edu.tr/Files/ckFiles/udbk2024-erdogan-edu-tr/6.ULUSAL%20DEN%C4%B0Z%20B%C4%B0L%C4%B0MLER%C4%B0%20KONFREANSI-2024.pdf

[3] "Marmara Bölgesi", *Vikipedi*. 08 Ağustos 2025. Erişim: 22 Eylül 2025. [Çevrimiçi]. Erişim adresi: https://tr.wikipedia.org/w/index.php?title=Marmara_B%C3%B6lgesi&oldid=35785403#cite_note-1

[4] E. Şiltu ve L. Akca, "İKLİM DEĞİŞİKLİĞİ, TÜRKİYE YERALTI VE YÜZEYSEL SU KAYNAKLARI", içinde *İKLİM DEĞİŞİKLİĞİ ÇERÇEVESİNDE SU KAYNAKLARININ MEVCUT DURUMU VE GELECEĞİ*, TÜRKİYE BİLİMLER AKADEMİSİ, 2023. doi: 10.53478/TUBA.978-625-8352-56-6.ch01.

[5] DSİ, "Marmara Havzası". TARIM ve ORMAN BAKANLIĞI, 2023.

[6] "Marmara Havzası Tanıtım.pdf". Erişim: 23 Eylül 2025. [Çevrimiçi]. Erişim adresi: https://www.tarimorman.gov.tr/SYGM/Belgeler/havza%20tan%C4%B1t%C4%B1m%2023.03.2023/t%C3%BCrk%C3%A7e/Marmara%20Havzas%C4%B1%20Tan%C4%B1t%C4%B1m.pdf

[7] "TÜİK - Veri Portalı". Erişim: 23 Eylül 2025. [Çevrimiçi]. Erişim adresi: https://data.tuik.gov.tr/Kategori/GetKategori?p=Nufus-ve-Demografi-109

[8] "2024-06-05-09-33-52-928955.pdf". Erişim: 23 Eylül 2025. [Çevrimiçi]. Erişim adresi: https://api2.cmo.org.tr/uploads/contents/2024-06-05-09-33-52-928955.pdf

[9] D. Orhon, S. Sözen, V. S. O. Kirca, S. Duba, R. Mermutlu, ve B. M. Sumer, "Pollutant dynamics between The Black Sea and The Marmara Sea: Basis for wastewater management strategy", *Marine Pollution Bulletin*, c. 168, s. 112388, Tem. 2021, doi: 10.1016/j.marpolbul.2021.112388.

[10] "Aqueduct Water Risk Atlas". Erişim: 18 Ocak 2026. [Çevrimiçi]. Erişim adresi: https://www.wri.org/applications/aqueduct/water-risk-atlas/#/?advanced=false&basemap=hydro&geoStore=0103742d088cc8b722ac444ed9163f79&indicator=bwd_cat&lat=40.39509175781457&lng=28.773193359375&mapMode=view&month=1&opacity=0.5&ponderation=DEF&predefined=false&projection=absolute&scenario=business_as_usual&scope=baseline&threshold=40&timeScale=annual&year=baseline&zoom=8

[11] A. M. Thomson *vd.*, "RCP4.5: a pathway for stabilization of radiative forcing by 2100", *Climatic Change*, c. 109, sy. 1-2, ss. 77-94, Kas. 2011, doi: 10.1007/s10584-011-0151-4.

[12] R. K. Pachauri, L. Mayer, ve Intergovernmental Panel on Climate Change, Ed., *Climate change 2014: synthesis report*. Geneva, Switzerland: Intergovernmental Panel on Climate Change, 2015.

[13] K. H. Seddiqe, R. Sediqi, O. Yildiz, G. Akturk, J. Kostecki, ve M. Gortych, "Effects of Climate Change on Streamflow in the Ayazma River Basin in the Marmara Region of Turkey", *Water*, c. 15, sy. 4, s. 763, Şub. 2023, doi: 10.3390/w15040763.

[14] "iski_MP_Taslak_Kapsam_Belirleme_Raporu.pdf". Erişim: 22 Eylül 2025. [Çevrimiçi]. Erişim adresi: https://www.iski.gov.tr/web/assets/SayfalarDocs/%C4%B0stanbul%20%C4%B0%C3%A7mesuyu%20Ve%20Kanalizasyon%20Master%20Plan%C4%B1%20Taslak%20Kapsam%20Belirleme%20Raporu/iski_MP_Taslak_Kapsam_Belirleme_Raporu.pdf

[15] "Aqueduct Data | World Resources Institute". Erişim: 18 Ocak 2026. [Çevrimiçi]. Erişim adresi: https://www.wri.org/aqueduct/data

[16] J. Chiggiato *vd.*, "Dynamics of the circulation in the Sea of Marmara: numerical modeling experiments and observations from the Turkish straits system experiment", *Ocean Dynamics*, c. 62, sy. 1, ss. 139-159, Oca. 2012, doi: 10.1007/s10236-011-0485-5.

[17] Q. Li, L. Xie, S. Xu, ve W. Zhang, "Comparison of Coagulation-Integrated Sand Filtration and Ultrafiltration for Seawater Reverse Osmosis Pretreatment", *Membranes*, c. 14, sy. 6, s. 125, May. 2024, doi: 10.3390/membranes14060125.

[18] C. Fritzmann, J. Löwenberg, T. Wintgens, ve T. Melin, "State-of-the-art of reverse osmosis desalination", *Desalination*, c. 216, sy. 1-3, ss. 1-76, Eki. 2007, doi: 10.1016/j.desal.2006.12.009.

[19] M. Elimelech ve W. A. Phillip, "The Future of Seawater Desalination: Energy, Technology, and the Environment", *Science*, c. 333, sy. 6043, ss. 712-717, Ağu. 2011, doi: 10.1126/science.1200488.

[20] H. Strathmann, "Electrodialysis, a mature technology with a multitude of new applications", *Desalination*, c. 264, sy. 3, ss. 268-288, Ara. 2010, doi: 10.1016/j.desal.2010.04.069.

[21] Y. Tanaka, "Chapter 1 Electrodialysis", içinde *Membrane Science and Technology*, c. 12, Elsevier, 2007, ss. 321-381. doi: 10.1016/S0927-5193(07)12015-5.

[22] A. A. Tareemi ve S. W. Sharshir, "A state-of-art overview of multi-stage flash desalination and water treatment: Principles, challenges, and heat recovery in hybrid systems", *Solar Energy*, c. 266, s. 112157, Ara. 2023, doi: 10.1016/j.solener.2023.112157.

[23] C. Aydiner *vd.*, "Marmara Seawater Desalination by Membrane Distillation: Direct Consumption Assessment of Produced Drinking Water", içinde *Desalination*, T. Yonar, Ed., InTech, 2017. doi: 10.5772/intechopen.68653.

[24] R. Navarro, J. L. Sánchez Lizaso, ve I. Sola, “Assessment of Energy Consumption of Brine Discharge from SWRO Plants”, *Water*, c. 15, sy. 4, s. 786, Şub. 2023, doi: 10.3390/w15040786.

[25] A. S. Bello, N. Zouari, D. A. Da’ana, J. N. Hahladakis, ve M. A. Al-Ghouti, “An overview of brine management: Emerging desalination technologies, life cycle assessment, and metal recovery methodologies”, *Journal of Environmental Management*, c. 288, s. 112358, Haz. 2021, doi: 10.1016/j.jenvman.2021.112358.

[26] O. Abida, H. Ait Lahoussine Ouali, N. Belkaid, M. Essalhi, E. Obeid, ve N. Ali, “Performance enhancement and integrating renewable energy into reverse osmosis seawater desalination system in the Moroccan coastal region”, *Cleaner Engineering and Technology*, c. 27, s. 101017, Tem. 2025, doi: 10.1016/j.clet.2025.101017.

[27] C. Arabi ve B. N. Candoğan, “Marmara Bölgesinde Referans Bitki Su Tüketiminin Alansal ve Zamansal Değişimi”, *Uluslararası Tarım ve Yaban Hayatı Bilimleri Dergisi*, c. 8, sy. 2, ss. 268-281, Ağu. 2022, doi: 10.24180/ijaws.1080376.

[28] Ö. Ersoy ve M. Özbay, “Marmara Bölgesinde Bulunan Organize Sanayi Bölgelerinin Atık Su Arıtma Tesislerinde Oluşan Arıtma Çamurlarının Enerji Kaynağı Olarak Kullanımının Değerlendirilmesi”, *Bilim Armonisi*, Nis. 2023, doi: 10.37215/bilar.1246638.

[29] G. Tezcanli Guyer ve E. G. Ilhan, “Assessment of pollution profile in Buyukcekmece Watershed, Turkey”, *Environ Monit Assess*, c. 173, sy. 1-4, ss. 211-220, Şub. 2011, doi: 10.1007/s10661-010-1382-y.

[30] N. Yilmaz, I. Dogan, G. Demir, I. E. Yalcin, S. Khan, ve I. I. Ozyigit, “Assessment of pollution in Alibeykoy Dam Lake (Istanbul, Türkiye) and its influent streams: Phytoplankton composition and heavy metal accumulation”, *Water Environ Res*, c. 97, sy. 2, s. e70030, Şub. 2025, doi: 10.1002/wer.70030.

[31] B. Gonencgil, T. A. Ertek, I. Akova, ve E. Elbasi, *1st Istanbul International Geography Congress Proceedings Book*. Istanbul, Turkiye: Istanbul University Press, 2019.

[32] S. Yaykiran, G. Cuceloglu, ve A. Ekdal, “Estimation of Water Budget Components of the Sakarya River Basin by Using the WEAP-PGM Model”, *Water*, c. 11, sy. 2, s. 271, Şub. 2019, doi: 10.3390/w11020271.

[33] G. Tezcanli Guyer ve E. G. Ilhan, “Assessment of pollution profile in Buyukcekmece Watershed, Turkey”, *Environ Monit Assess*, c. 173, sy. 1-4, ss. 211-220, Şub. 2011, doi: 10.1007/s10661-010-1382-y.

[34] L. Magalhães *vd.*, “Seasonal and spatial alterations in macrofaunal communities and in Nephtys cirrosa (Polychaeta) oxidative stress under a salinity gradient: A comparative field monitoring approach”, *Ecological Indicators*, c. 96, ss. 192-201, Oca. 2019, doi: 10.1016/j.ecolind.2018.08.045.

[35] N. Sharma, “Salinity from SMAP radiometer can monitor El Nino”, *Journal of Marine Systems*, c. 187, ss. 141-145, Kas. 2018, doi: 10.1016/j.jmarsys.2018.07.008.

[36] J. Kucera, *Reverse osmosis: design, processes, and applications for engineers*. Salem, Mass. : Hoboken, N.J: Scrivener Pub. ; Wiley, 2010.

[37] H. Kaya, "Geomorphological features of Marmara Sea Islands", *International Journal of Environment and Geoinformatics*, c. 6, sy. 1, ss. 57-66, Nis. 2019, doi: 10.30897/ijegeo.533694.

[38] Balıkesir Su ve Kanalizasyon İdaresi, "Marmara Bölgesi İçme Suyu Arıtma Tesisleri", [Çevrimiçi]. Erişim adresi: https://www.balsu.gov.tr/index.php?icmesuyu_tesisleri=0&sid=60

[39] C. Aydiner *vd.*, "Marmara Seawater Desalination by Membrane Distillation: Direct Consumption Assessment of Produced Drinking Water", içinde *Desalination*, T. Yonar, Ed., InTech, 2017. doi: 10.5772/intechopen.68653.

[40] "Mevzuat Bilgi Sistemi". Erişim: 22 Ocak 2026. [Çevrimiçi]. Erişim adresi: https://www.mevzuat.gov.tr/mevzuat?MevzuatNo=7510&MevzuatTur=7&MevzuatTertip=5

[41] K. Harby *vd.*, "Reverse osmosis hybridization with other desalination techniques: An overview and opportunities", *Desalination*, c. 581, s. 117600, Tem. 2024, doi: 10.1016/j.desal.2024.117600.

[42] D. Curto, V. Franzitta, ve A. Guercio, "A Review of the Water Desalination Technologies", *Applied Sciences*, c. 11, sy. 2, s. 670, Oca. 2021, doi: 10.3390/app11020670.

[43] A. Alrashidi, E. Aleisa, ve K. Alshayji, "Life cycle assessment of hybrid electrodialysis and reverse osmosis seawater desalination systems", *Desalination*, c. 578, s. 117448, Haz. 2024, doi: 10.1016/j.desal.2024.117448.

[44] W. Long, J. W. Koo, Z. Yuan, ve Q. She, "Flow-through electrochemically assisted reverse-osmosis: A new process towards low-chemical desalination", *Water Research*, c. 249, s. 120982, Şub. 2024, doi: 10.1016/j.watres.2023.120982.

[45] J. Kim ve S. Hong, "Pilot study of emerging low-energy seawater reverse osmosis desalination technologies for high-salinity, high-temperature, and high-turbidity seawater", *Desalination*, c. 565, s. 116871, Kas. 2023, doi: 10.1016/j.desal.2023.116871.

[46] S. Bandini ve C. Boi, "Transport phenomena in reverse osmosis/nanofiltration membranes", içinde *Current Trends and Future Developments on (Bio-) Membranes*, Elsevier, 2022, ss. 49-90. doi: 10.1016/B978-0-12-822257-7.00003-0.

[47] W. L. Ang ve A. W. Mohammad, "Mathematical modeling of membrane operations for water treatment", içinde *Advances in Membrane Technologies for Water Treatment*, Elsevier, 2015, ss. 379-407. doi: 10.1016/B978-1-78242-121-4.00012-5.

[48] K. Jeong, Y. G. Lee, S. J. Ki, ve J. H. Kim, "Modeling seawater reverse osmosis system under degradation conditions of membrane performance: assessment of isobaric energy recovery devices and feed pressure control benefits", *Desalination and Water Treatment*, c. 57, sy. 43, ss. 20210-20218, Eyl. 2016, doi: 10.1080/19443994.2015.1112980.

[49] K. Touati ve C. N. Mulligan, “Enhancing energy efficiency and water recovery in two-stage seawater reverse osmosis through advanced brine treatment technologies”, *Desalination*, c. 615, s. 119293, Kas. 2025, doi: 10.1016/j.desal.2025.119293.

[50] T. M. Mansour, T. M. Ismail, K. Ramzy, ve M. Abd El-Salam, “Energy recovery system in small reverse osmosis desalination plant: Experimental and theoretical investigations”, *Alexandria Engineering Journal*, c. 59, sy. 5, ss. 3741-3753, Eki. 2020, doi: 10.1016/j.aej.2020.06.030.

[51] P. Geisler, F. U. Hahnenstein, W. Krumm, ve T. Peters, “Pressure exchange system for energy recovery in reverse osmosis plants”, *Desalination*, c. 122, sy. 2-3, ss. 151-156, Tem. 1999, doi: 10.1016/S0011-9164(99)00036-3.

[52] K. Park ve P. A. Davies, “A compact hybrid batch/semi-batch reverse osmosis (HBSRO) system for high-recovery, low-energy desalination”, *Desalination*, c. 504, s. 114976, May. 2021, doi: 10.1016/j.desal.2021.114976.

[53] J. Choi, H. Lee, ve S. Hong, “Capacitive deionization (CDI) integrated with monovalent cation selective membrane for producing divalent cation-rich solution”, *Desalination*, c. 400, ss. 38-46, Ara. 2016, doi: 10.1016/j.desal.2016.09.016.

[54] G. Mustafa, O. Alraqibah, E. Alwaznani, M. Mustakeem, ve N. Asrar, “Challenges in capital and operation cost reduction of reverse osmosis desalination process”, *Desalination and Water Treatment*, c. 322, s. 101236, Nis. 2025, doi: 10.1016/j.dwt.2025.101236.

[55] S. Jeon *vd.*, “Improvement in the desalination performance of membrane capacitive deionization with a bipolar electrode via an energy recovery process”, *Chemical Engineering Journal*, c. 439, s. 135603, Tem. 2022, doi: 10.1016/j.cej.2022.135603.

[56] K. Jeong, Y. G. Lee, S. J. Ki, ve J. H. Kim, “Modeling seawater reverse osmosis system under degradation conditions of membrane performance: assessment of isobaric energy recovery devices and feed pressure control benefits”, *Desalination and Water Treatment*, c. 57, sy. 43, ss. 20210-20218, Eyl. 2016, doi: 10.1080/19443994.2015.1112980.

[57] N. Voutchkov, *Pretreatment for reverse osmosis desalination*. Amsterdam: Elsevier, 2017.

[58] M. Jebur, Y.-H. Chiao, H. Matsuyama, ve S. R. Wickramasinghe, “Electrocoagulation as a pretreatment for reverse osmosis for potable water from brackish groundwater”, *Water Resources and Industry*, c. 31, s. 100243, Haz. 2024, doi: 10.1016/j.wri.2024.100243.

[59] J. Shim, S. Lee, S. Park, J. Moon, C. Lee, ve K. H. Cho, “Optimizing membrane cleaning strategy of industrial reverse osmosis process using long sequence time-series forecasting”, *Desalination*, c. 614, s. 119193, Kas. 2025, doi: 10.1016/j.desal.2025.119193.

[60] M. R. Elmenshawy, S. M. Shalaby, A. I. Elshinnawy, ve T. A. Gado, “Groundwater desalination for agricultural purposes using reverse osmosis and nanofiltration technologies: Case study wadi El-natrun, Egypt”, *Process*

Safety and Environmental Protection, c. 180, ss. 669-685, Ara. 2023, doi: 10.1016/j.psep.2023.10.033.

[61] G. Migliorini ve E. Luzzo, "Seawater reverse osmosis plant using the pressure exchanger for energy recovery: a calculation model", *Desalination*, c. 165, ss. 289-298, Ağu. 2004, doi: 10.1016/j.desal.2004.06.034.

[62] J. Byun, Y. Kim, K. Park, ve Y.-G. Park, "Implementation of low-pressure pressure exchanger (LPPX) on two-stage reverse osmosis (RO) system: Energetic and environmental impacts in a large-scale water reuse facility", *Journal of Water Process Engineering*, c. 74, s. 107849, May. 2025, doi: 10.1016/j.jwpe.2025.107849.

[63] P. Geisler, W. Krumm, ve T. Peters, "Optimization of the energy demand of reverse osmosis with a pressure-exchange system", *Desalination*, c. 125, sy. 1-3, ss. 167-172, Kas. 1999, doi: 10.1016/S0011-9164(99)00135-6.

[64] P. Geisler, F. U. Hahnenstein, W. Krumm, ve T. Peters, "Pressure exchange system for energy recovery in reverse osmosis plants", *Desalination*, c. 122, sy. 2-3, ss. 151-156, Tem. 1999, doi: 10.1016/S0011-9164(99)00036-3.

[65] G. Migliorini ve E. Luzzo, "Seawater reverse osmosis plant using the pressure exchanger for energy recovery: a calculation model", *Desalination*, c. 165, ss. 289-298, Ağu. 2004, doi: 10.1016/j.desal.2004.06.034.

[66] E. Oklejas, "The hydraulic TurboCharger^{TM} for interstage feed pressure boosting. Impact on membrane performance, permeate quality, and feed pump energy consumption", *Desalination*, c. 88, sy. 1-3, ss. 289-300, Eki. 1992, doi: 10.1016/0011-9164(92)80121-O.

[67] Y. Ji, X. Li, ve H. Li, "Hydraulic turbocharger for energy recycling in the reverse osmosis seawater desalination system", *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.*, c. 467, sy. 1, s. 012047, Mar. 2020, doi: 10.1088/1755-1315/467/1/012047.

[68] A. Cooley, "Turbocharged cost savings in RO systems", *World Pumps*, c. 2016, sy. 6, ss. 36-41, Haz. 2016, doi: 10.1016/S0262-1762(16)30200-0.

[69] J. Lozier, E. Oklejas, ve M. Silbernagel, "The hydraulic turbocharger^{TM}: a new type of device for the reduction of feed pump energy consumption in reverse osmosis systems", *Desalination*, c. 75, ss. 71-83, Oca. 1989, doi: 10.1016/0011-9164(89)85006-4.

[70] D. J. Woodcock ve I. Morgan White, "The application of pelton type impulse turbines for energy recovery on sea water reverse osmosis systems", *Desalination*, c. 39, ss. 447-458, Ara. 1981, doi: 10.1016/S0011-9164(00)86148-2.

[71] G. Qiu, S. Wang, D. Song, S. Liu, ve H. Wang, "Review of performance improvement of energy recovery turbines in the reverse osmosis desalination", *Desalination and Water Treatment*, c. 119, ss. 70-73, Tem. 2018, doi: 10.5004/dwt.2018.22045.

[72] M. A. Yedmel, A. Nasser Eddine, H.-M. Hoang, R. Hunlede, L. Fournaison, ve A. Delahaye, "Experimental study of the performance of a heat exchanger for a new desalination-cooling technique using ice slurry: A proof of concept",

Applied Thermal Engineering, c. 250, s. 123479, Ağu. 2024, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2024.123479.

[73] W. Yu, D. M. France, I.-H. Liu, ve D. Singh, "A buffering heat exchanger/thermal energy storage system for desalination applications", *Renewable Energy*, c. 256, s. 123923, Oca. 2026, doi: 10.1016/j.renene.2025.123923.

[74] A. Alzahmi, M. Alswat, W. A. El-Askary, ve K. Ramzy, "Harvesting waste-heat energy of shell and tube heat exchanger used for desalination purposes using thermoelectric power generation modules: Numerical studies", *International Communications in Heat and Mass Transfer*, c. 156, s. 107569, Ağu. 2024, doi: 10.1016/j.icheatmasstransfer.2024.107569.

[75] D. P. Ghosh, M. Hassan, S. J. Dennis, D. Sharma, M. A. Elhashimi-Khalifa, ve B. Abbasi, "Anti-fouling rotating polymer-based heat exchanger for zero liquid discharge humidification-dehumidification desalination", *Water Research*, c. 258, s. 121749, Tem. 2024, doi: 10.1016/j.watres.2024.121749.

[76] G. Pourcelly, "ELECTRODIALYSIS: ION EXCHANGE", içinde *Encyclopedia of Separation Science*, Elsevier, 2000, ss. 2665-2675. doi: 10.1016/B0-12-226770-2/07161-1.

[77] R. A. Tufa, E. Curcio, E. Fontananova, ve G. Di Profio, "3.8 Membrane-Based Processes for Sustainable Power Generation Using Water: Pressure-Retarded Osmosis (PRO), Reverse Electrodialysis (RED), and Capacitive Mixing (CAPMIX)", içinde *Comprehensive Membrane Science and Engineering*, Elsevier, 2017, ss. 206-248. doi: 10.1016/B978-0-12-409547-2.12278-4.

[78] M. Yang *vd.*, "Cationic-PEI cross-linked anion exchange membranes for electrodialysis desalination", *Separation and Purification Technology*, c. 364, s. 132460, Ağu. 2025, doi: 10.1016/j.seppur.2025.132460.

[79] D. J. Miller, "Transport and fouling in desalination membranes", içinde *Encyclopedia of Solid-Liquid Interfaces*, Elsevier, 2024, ss. 670-684. doi: 10.1016/B978-0-323-85669-0.00151-3.

[80] N. Trebesch, H. S. Hasdemir, T. Chen, P.-C. Wen, ve E. Tajkhorshid, "Molecular dynamics simulations of biological membranes and membrane-associated phenomena across scales", *Current Opinion in Structural Biology*, c. 93, s. 103071, Ağu. 2025, doi: 10.1016/j.sbi.2025.103071.

[81] A. N. Shocron, L. Monat, B. Januszewski, J. E. Dykstra, M. Elimelech, ve O. Nir, "Ion selectivity in brackish groundwater desalination by electrodialysis: Experiments and theory", *Journal of Membrane Science*, c. 719, s. 123668, Mar. 2025, doi: 10.1016/j.memsci.2024.123668.

[82] J. López *vd.*, "Integration of nanofiltration, ion exchange, and electrodialysis with bipolar membranes for the valorisation of brines: From seawater desalination plants to on-site chemicals production facilities", *Journal of Environmental Management*, c. 381, s. 125119, May. 2025, doi: 10.1016/j.jenvman.2025.125119.

[83] M. Yang *vd.*, "Cationic-PEI cross-linked anion exchange membranes for electrodialysis desalination", *Separation and Purification Technology*, c. 364, s. 132460, Ağu. 2025, doi: 10.1016/j.seppur.2025.132460.

[84] H. Ruan *vd.*, "Quaternized fluorinated polyaryl ether anion exchange membranes with excellent dimensional stability for improved electrodialysis desalination", *Desalination*, c. 615, s. 119278, Kas. 2025, doi: 10.1016/j.desal.2025.119278.

[85] R. Shen *vd.*, "Construction of integrated model of bipolar membrane electrodialysis membrane process and gas absorption-ion reaction process", *Separation and Purification Technology*, c. 330, s. 125331, Şub. 2024, doi: 10.1016/j.seppur.2023.125331.

[86] "Bipolar Membrane Electrodialysis (EDBM)". Erişim: 29 Ağustos 2025. [Çevrimiçi]. Erişim adresi: https://www.lenntech.com.tr/processes/bipolar-membrane-electrodialysis-edbm-.htm

[87] M. Magdy, M. M. H. Khalil, ve M. E. A. Ali, "Electrodialysis processes with bipolar membranes for simultaneous RO brine treatment and acid-base production", *Desalination and Water Treatment*, c. 323, s. 101309, Tem. 2025, doi: 10.1016/j.dwt.2025.101309.

[88] F. Ilhan, H. A. Kabuk, U. Kurt, Y. Avsar, ve M. T. Gonullu, "Recovery of mixed acid and base from wastewater with bipolar membrane electrodialysis—a case study", *Desalination and Water Treatment*, c. 57, sy. 11, ss. 5165-5173, Mar. 2016, doi: 10.1080/19443994.2014.1002012.

[89] L. Yang, J. Yao, ve J. Wang, "Desalination of concentrated wastewater from reverse osmosis by bipolar membrane electrodialysis", *Desalination and Water Treatment*, c. 98, ss. 108-114, Ara. 2017, doi: 10.5004/dwt.2017.21704.

[90] Y. Luo, Y. Liu, J. Shen, ve B. Van Der Bruggen, "Application of Bipolar Membrane Electrodialysis in Environmental Protection and Resource Recovery: A Review", *Membranes*, c. 12, sy. 9, s. 829, Ağu. 2022, doi: 10.3390/membranes12090829.

[91] R. Wang ve W. He, "Synergy mapping-informed learning rate estimation for bipolar membrane electrodialysis in carbon dioxide removal", *Applied Energy*, c. 402, s. 127058, Oca. 2026, doi: 10.1016/j.apenergy.2025.127058.

[92] H.-R. Yang *vd.*, "Towards zero liquid discharge: Resource recovery and circular economy pathways via bipolar membrane electrodialysis", *Chemical Engineering Journal*, c. 528, s. 172138, Oca. 2026, doi: 10.1016/j.cej.2025.172138.

[93] M. Setodeh, S. Osfouri, M. Abbasi, ve R. Azin, "Experimental analysis of hybrid electrodialysis (ED)-reverse electrodialysis (RED) process for the desalination of brackish waters and generation of renewable energy in a pilot scale", *Desalination and Water Treatment*, c. 231, ss. 101-112, Ağu. 2021, doi: 10.5004/dwt.2021.27481.

[94] Nethravathi, A. M. Isloor, ve S. M. Kumar, "Ion exchange membranes in reverse electrodialysis process", içinde *Current Trends and Future Developments on (Bio-) Membranes*, Elsevier, 2024, ss. 157-189. doi: 10.1016/B978-0-323-88509-6.00007-1.

[95] A. H. Avci *vd.*, "Energy Harvesting from Brines by Reverse Electrodialysis Using Nafion Membranes", *Membranes*, c. 10, sy. 8, s. 168, Tem. 2020, doi: 10.3390/membranes10080168.

[96] Q. Wang *vd.*, "Hybrid RED/ED system: Simultaneous osmotic energy recovery and desalination of high-salinity wastewater", *Desalination*, c. 405, ss. 59-67, Mar. 2017, doi: 10.1016/j.desal.2016.12.005.

[97] G. Braun ve C. Kleffner, "Industrial Water Desalination by Vacuum Multi-Effect Membrane Distillation", *Chemie Ingenieur Technik*, c. 91, sy. 10, ss. 1400-1408, Eki. 2019, doi: 10.1002/cite.201900080.

[98] A. H. Behroozi ve A. Hemmati, "MXene-based membranes for water desalination", içinde *Mxenes and their Composites*, Elsevier, 2022, ss. 617-648. doi: 10.1016/B978-0-12-823361-0.00002-2.

[99] S. S. Gupta, M. R. Islam, ve T. Pradeep, "Capacitive Deionization (CDI): An Alternative Cost-Efficient Desalination Technique", içinde *Advances in Water Purification Techniques*, Elsevier, 2019, ss. 165-202. doi: 10.1016/B978-0-12-814790-0.00007-7.

[100] H. Rabiee, K. R. Khalilpour, J. M. Betts, ve N. Tapper, "Energy-Water Nexus: Renewable-Integrated Hybridized Desalination Systems", içinde *Polygeneration with Polystorage for Chemical and Energy Hubs*, Elsevier, 2019, ss. 409-458. doi: 10.1016/B978-0-12-813306-4.00013-6.

[101] "Seawater Use and Desalination Technology", içinde *Treatise on Water Science*, Elsevier, 2011, ss. 73-109. doi: 10.1016/b978-0-444-53199-5.00077-4.

[102] K.-D. Park, B. Kim, C. Lee, S. Lee, ve J.-S. Choi, "Effect of brine concentration on membrane distillation process for seawater desalination", *Desalination and Water Treatment*, c. 77, ss. 47-51, May. 2017, doi: 10.5004/dwt.2017.20665.

[103] S. Parani ve O. Oluwafemi, "Membrane Distillation: Recent Configurations, Membrane Surface Engineering, and Applications", *Membranes*, c. 11, sy. 12, s. 934, Kas. 2021, doi: 10.3390/membranes11120934.

[104] P. Wang ve T.-S. Chung, "Recent advances in membrane distillation processes: Membrane development, configuration design and application exploring", *Journal of Membrane Science*, c. 474, ss. 39-56, Oca. 2015, doi: 10.1016/j.memsci.2014.09.016.

[105] D. Wirth ve C. Cabassud, "Water desalination using membrane distillation: comparison between inside/out and outside/in permeation", *Desalination*, c. 147, sy. 1-3, ss. 139-145, Eyl. 2002, doi: 10.1016/S0011-9164(02)00601-X.

[106] A. M. Alklaibi, "The potential of membrane distillation as a stand-alone desalination process", *Desalination*, c. 223, sy. 1-3, ss. 375-385, Mar. 2008, doi: 10.1016/j.desal.2007.01.201.

[107] A. Alenezi ve Y. Alabaiadly, "Emerging technologies in water desalination: A review and future outlook", *Energy Nexus*, c. 17, s. 100373, Mar. 2025, doi: 10.1016/j.nexus.2025.100373.

[108] Y. Soumbati, I. Bouatou, A. Abushaban, Y. Belmabkhout, ve M. C. Necibi, "Review of membrane distillation for desalination applications: Advanced modeling, specific energy consumption, and water production cost", *Journal of Water Process Engineering*, c. 71, s. 107296, Mar. 2025, doi: 10.1016/j.jwpe.2025.107296.

[109] X. Guo *vd.*, "Research on desalination performance of novel free-interface evaporation synergism membrane distillation module: Suitable for solar drive scenarios", *Separation and Purification Technology*, c. 361, s. 131350, Tem. 2025, doi: 10.1016/j.seppur.2024.131350.

[110] Z. Zhang, O. R. Lokare, A. V. Gusa, ve R. D. Vidic, "Pretreatment of brackish water reverse osmosis (BWRO) concentrate to enhance water recovery in inland desalination plants by direct contact membrane distillation (DCMD)", *Desalination*, c. 508, s. 115050, Tem. 2021, doi: 10.1016/j.desal.2021.115050.

[111] X. Xiao *vd.*, "Enhancing anti-scaling and anti-fouling performance in membrane distillation through liquid-infused membrane with slippery surface and gating properties", *Applied Surface Science*, c. 707, s. 163617, Eki. 2025, doi: 10.1016/j.apsusc.2025.163617.

[112] F. Macedonio ve E. Drioli, "4.6 Membrane Systems for Seawater and Brackish Water Desalination", içinde *Comprehensive Membrane Science and Engineering*, Elsevier, 2017, ss. 118-130. doi: 10.1016/B978-0-12-409547-2.12237-1.

[113] A. Bahmanabadi ve M. B. Shafii, "Novel Natural Vacuum Membrane Distillation for water desalination: A combinational approach", *Desalination*, c. 576, s. 117319, May. 2024, doi: 10.1016/j.desal.2024.117319.

[114] H. C. Duong ve L. D. Nghiem, "4.8 New Membrane Distillation Integrated Systems", içinde *Comprehensive Membrane Science and Engineering*, Elsevier, 2017, ss. 150-163. doi: 10.1016/B978-0-12-409547-2.12263-2.

[115] M. M. Khademi ve F. Pourfayaz, "Freshwater production through multi effect desalination integrated with parabolic trough collectors", *Energy Conversion and Management: X*, c. 26, s. 100907, Nis. 2025, doi: 10.1016/j.ecmx.2025.100907.

[116] E. Shamlou, R. Vidic, ve V. Khanna, "Optimization-based technoeconomic comparison of multi-stage membrane distillation configurations for hypersaline produced water desalination", *Desalination*, c. 543, s. 116098, Ara. 2022, doi: 10.1016/j.desal.2022.116098.

[117] H. T. El-Dessouky ve H. M. Ettouney, "Multi-Stage Flash Desalination", içinde *Fundamentals of Salt Water Desalination*, Elsevier, 2002, ss. 271-407. doi: 10.1016/B978-044450810-2/50008-7.

[118] V. G. Gude, "Desalination and sustainability – An appraisal and current perspective", *Water Research*, c. 89, ss. 87-106, Şub. 2016, doi: 10.1016/j.watres.2015.11.012.

[119] M. Rosen ve A. Farsi, "Desalination technologies and their working principles", içinde *Sustainable Energy Technologies for Seawater Desalination*, Elsevier, 2022, ss. 45-106. doi: 10.1016/B978-0-323-99872-7.00009-7.

[120] R. K. Guduru, R. Singh, ve R. K. Vij, "Desalination of seawater and related technologies: a step towards achieving sustainable development goals", içinde *Water, The Environment, and the Sustainable Development Goals*, Elsevier, 2024, ss. 305-325. doi: 10.1016/B978-0-443-15354-9.00011-6.

[121] V. G. Gude, “Energy Storage for Desalination”, içinde *Renewable Energy Powered Desalination Handbook*, Elsevier, 2018, ss. 377-414. doi: 10.1016/B978-0-12-815244-7.00010-6.

[122] A. S. Jawed *vd.*, “Recent developments in solar-powered membrane distillation for sustainable desalination”, *Heliyon*, c. 10, sy. 11, s. e31656, Haz. 2024, doi: 10.1016/j.heliyon.2024.e31656.

[123] S. Kalogirou, “Seawater desalination using renewable energy sources”, *Progress in Energy and Combustion Science*, c. 31, sy. 3, ss. 242-281, 2005, doi: 10.1016/j.pecs.2005.03.001.

[124] Y. Soumbati, I. Bouatou, A. Abushaban, Y. Belmabkhout, ve M. C. Necibi, “Review of membrane distillation for desalination applications: Advanced modeling, specific energy consumption, and water production cost”, *Journal of Water Process Engineering*, c. 71, s. 107296, Mar. 2025, doi: 10.1016/j.jwpe.2025.107296.

[125] İ. Koyuncu, M. E. Paşaoğlu, T. Türken, ve A. Yüksekdağ, “SU, ATIKSU ARITIMI VE YENİDEN KULLANIMI”, içinde *İKLİM DEĞİŞİKLİĞİ ÇERÇEVESİNDE SU KAYNAKLARININ MEVCUT DURUMU VE GELECEĞİ*, TÜRKİYE BİLİMLER AKADEMİSİ, 2023. doi: 10.53478/TUBA.978-625-8352-56-6.ch10.

[126] Y. Başaran, “TÜRKİYE’DE DENİZ SUYUNDAN İÇME SUYU ÜRETİMİNİN MALİYET DEĞERLENDİRMESİ”.

[127] B. Suliman, H. Hussein, ve S. Daoudi, “Desalination and Its Impact on the Mediterranean Ecosystem”.

[128] D. Curto, V. Franzitta, ve A. Guercio, “A Review of the Water Desalination Technologies”, *Applied Sciences*, c. 11, sy. 2, s. 670, Oca. 2021, doi: 10.3390/app11020670.

[129] K. M. Abdullaev, M. M. Agamaliev, ve D. A. Akhmedova, “Technology for Combined Desalination of Sea Water”, *J. Water Chem. Technol.*, c. 41, sy. 2, ss. 119-124, Mar. 2019, doi: 10.3103/S1063455X19020097.

[130] E. A. Abdel-Aal, M. E. Farid, F. S. M. Hassan, ve A. E. Mohamed, “Desalination of Red Sea water using both electrodialysis and reverse osmosis as complementary methods”, *Egyptian Journal of Petroleum*, c. 24, sy. 1, ss. 71-75, Mar. 2015, doi: 10.1016/j.ejpe.2015.02.007.

[131] K. Sztekler *vd.*, “Hybrid desalination system for Baltic Sea water: A preliminary study”, *Desalination*, c. 574, s. 117269, Nis. 2024, doi: 10.1016/j.desal.2023.117269.

[132] M. Adigüzel, J. Erkmen, ve M. T. Yilmaz, “Application and optimization of bipolar membrane process for drinking water production from Black Sea”, *Journal of Cleaner Production*, c. 408, s. 136814, Tem. 2023, doi: 10.1016/j.jclepro.2023.136814.

[133] I. Dobrevsky, V. Mavrov, ve B. Bonev, “Effect of recovery on desalination of the black sea water by reverse osmosis”, *Desalination*, c. 41, sy. 2, ss. 209-214, May. 1982, doi: 10.1016/S0011-9164(00)88724-X.

[134] A. G. Pervov, A. P. Andrianov, R. V. Efremov, A. V. Desyatov, ve A. E. Baranov, “A new solution for the Caspian Sea desalination: low-pressure

membranes", *Desalination*, c. 157, sy. 1-3, ss. 377-384, Ağu. 2003, doi: 10.1016/S0011-9164(03)00420-X.

[135] L. R. Kalankesh ve M. A. Zazouli, "Removal of salt from the Caspian Sea using a single- and double-layer membrane microbial desalination cell in continuous-mode operation", *Desalination and Water Treatment*, c. 147, ss. 83-89, Nis. 2019, doi: 10.5004/dwt.2019.23534.

[136] M. A. García-Rubio ve J. Guardiola, "Desalination in Spain: A Growing Alternative for Water Supply", *International Journal of Water Resources Development*, c. 28, sy. 1, ss. 171-186, Mar. 2012, doi: 10.1080/07900627.2012.642245.

[137] J. Feo-García, A. Ruiz-García, E. Ruiz-Saavedra, ve N. Melian-Martel, "Energy consumption assessment of 4,000 m3/d SWRO desalination plants", *Desalination and Water Treatment*, c. 57, sy. 48-49, ss. 23019-23023, Eki. 2016, doi: 10.1080/19443994.2015.1106095.

[138] V. Perez-Moreno, C. B. Bonilla-Suarez, ve M. E. Rodriguez-Muñoz, "Seawater desalination in Mexican Pacific coast by a new technology: use and perspectives", *Desalination and Water Treatment*, c. 51, sy. 1-3, ss. 175-183, Oca. 2013, doi: 10.1080/19443994.2012.714734.

[139] Y. Huang, C. Leslie-Keefe, ve G. Leslie, "Desalination in the Pacific", içinde *The Water, Energy, and Food Security Nexus in Asia and the Pacific*, A. Dansie, H. K. Alleway, ve B. Böer, Ed., içinde Water Security in a New World. , Cham: Springer International Publishing, 2024, ss. 165-185. doi: 10.1007/978-3-031-25463-5_8.

[140] D. Curto, V. Franzitta, ve A. Guercio, "A Review of the Water Desalination Technologies", *Applied Sciences*, c. 11, sy. 2, s. 670, Oca. 2021, doi: 10.3390/app11020670.

[141] S. Manju ve N. Sagar, "Renewable energy integrated desalination: A sustainable solution to overcome future fresh-water scarcity in India", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, c. 73, ss. 594-609, Haz. 2017, doi: 10.1016/j.rser.2017.01.164.

[142] C. T. K. Finnerty, M. M. Karimah, K. M. Conway, C. K. Turkatte, A. Eskafi, ve B. Mi, "Demand for off-grid desalination technology in small-island communities — Can interfacial solar vapor generation be the answer?", *Desalination*, c. 553, s. 116454, May. 2023, doi: 10.1016/j.desal.2023.116454.

[143] S. Guduru, P. Bajaj, ve O. N. Gonsalves, "India's low temperature thermal desalination technology: Water diplomacy with Small Island Developing States in the Indo-Pacific Region", *Maritime Affairs: Journal of the National Maritime Foundation of India*, c. 16, sy. 2, ss. 30-45, Tem. 2020, doi: 10.1080/09733159.2020.1855816.

[144] D. Akgul, M. Çakmakcı, N. Kayaalp, ve I. Koyuncu, "Cost analysis of seawater desalination with reverse osmosis in Turkey", *Desalination*, c. 220, sy. 1-3, ss. 123-131, Mar. 2008, doi: 10.1016/j.desal.2007.01.027.

[145] S. M. H. Fayaz, R. Mafigholami, F. Razavian, ve K. Ghasemipanah, "Technical and economical comparison study between operation costs of

beach well intake and open intake for seawater reverse osmosis desalination in the Persian Gulf", *Desalination and Water Treatment*, c. 178, ss. 74-82, Şub. 2020, doi: 10.5004/dwt.2020.24953.

[146] A. Hafez ve S. El-Manharawy, "Economics of seawater RO desalination in the Red Sea region, Egypt. Part 1. A case study", *Desalination*, c. 153, sy. 1-3, ss. 335-347, Şub. 2003, doi: 10.1016/S0011-9164(02)01122-0.

[147] D. Clemente, V. Ramos, B. Ferreira, T. Ferradosa, P. Rosa-Santos, ve F. Taveira-Pinto, "A comprehensive evaluation of wave energy conversion to power desalination plants: The Portuguese case-study", *Desalination*, c. 618, s. 119484, Oca. 2026, doi: 10.1016/j.desal.2025.119484.

[148] R. J. Ohlund, B. H. Dahdah, G. R. Guillen, ve A. E. Childress, "Augmenting ocean water desalination with potable reuse: Concept feasibility in terms of cost and environmental impacts", *Desalination*, c. 569, s. 116941, Oca. 2024, doi: 10.1016/j.desal.2023.116941.

[149] A. Purnama, H. H. Al-Barwani, ve R. Smith, "Calculating the environmental cost of seawater desalination in the Arabian marginal seas", *Desalination*, c. 185, sy. 1-3, ss. 79-86, Kas. 2005, doi: 10.1016/j.desal.2005.03.072.

[150] I. Aoueryagel, N. Bensitel, C. Benaissa, I. Raissouni, D. Bouchta, ve F. Chaouket, "Enhancing remineralization in seawater desalination: Optimizing reagent injection for improved water quality at AL HOCEIMA plant", *Desalination and Water Treatment*, c. 320, s. 100632, Eki. 2024, doi: 10.1016/j.dwt.2024.100632.

[151] D. Vries, M. Korevaar, S. Ghanbari, G. Van Houwelingen, ve W. Van Der Meer, "Data fusion to monitor remineralisation of desalinated groundwater in calcite contactors", *Journal of Water Process Engineering*, c. 41, s. 102011, Haz. 2021, doi: 10.1016/j.jwpe.2021.102011.

[152] C. Tang *vd.*, "Procedure for Calculating the Calcium Carbonate Precipitation Potential (CCPP) in Drinking Water Supply: Importance of Temperature, Ionic Species and Open/Closed System", *Water*, c. 13, sy. 1, s. 42, Ara. 2020, doi: 10.3390/w13010042.

[153] L. Birnhack, S. Oren, O. Lehmann, ve O. Lahav, "Development of an additional step to current CO2-based CaCO3(s) dissolution post-treatment processes for cost-effective Mg2+ supply to desalinated water", *Chemical Engineering Journal*, c. 160, sy. 1, ss. 48-56, May. 2010, doi: 10.1016/j.cej.2010.03.002.

[154] D. Hasson ve O. Bendrihem, "Modeling remineralization of desalinated water by limestone dissolution", *Desalination*, c. 190, sy. 1-3, ss. 189-200, Nis. 2006, doi: 10.1016/j.desal.2005.09.003.

[155] L. Birnhack, N. Voutchkov, ve O. Lahav, "Fundamental chemistry and engineering aspects of post-treatment processes for desalinated water—A review", *Desalination*, c. 273, sy. 1, ss. 6-22, Haz. 2011, doi: 10.1016/j.desal.2010.11.011.

[156] D. Vries, M. Korevaar, S. Ghanbari, G. Van Houwelingen, ve W. Van Der Meer, "Data fusion to monitor remineralisation of desalinated groundwater in

calcite contactors", *Journal of Water Process Engineering*, c. 41, s. 102011, Haz. 2021, doi: 10.1016/j.jwpe.2021.102011.

[157] A. Withers, "Options for recarbonation, remineralisation and disinfection for desalination plants", *Desalination*, c. 179, sy. 1-3, ss. 11-24, Tem. 2005, doi: 10.1016/j.desal.2004.11.051.

[158] O. Lahav ve L. Birnhack, "Quality criteria for desalinated water following post-treatment", *Desalination*, c. 207, sy. 1-3, ss. 286-303, Mar. 2007, doi: 10.1016/j.desal.2006.05.022.

[159] L. Birnhack, O. Nir, ve O. Lahav, "Establishment of the Underlying Rationale and Description of a Cheap Nanofiltration-Based Method for Supplementing Desalinated Water with Magnesium Ions", *Water*, c. 6, sy. 5, ss. 1172-1186, May. 2014, doi: 10.3390/w6051172.

[160] "Meteoroloji Genel Müdürlüğü". Erişim: 18 Ocak 2026. [Çevrimiçi]. Erişim adresi: https://www.mgm.gov.tr/veridegerlendirme/il-ve-ilceler-istatistik.aspx?k=K

[161] H. T. Do Thi, T. Pasztor, D. Fozer, F. Manenti, ve A. J. Toth, "Comparison of Desalination Technologies Using Renewable Energy Sources with Life Cycle, PESTLE, and Multi-Criteria Decision Analyses", *Water*, c. 13, sy. 21, s. 3023, Eki. 2021, doi: 10.3390/w13213023.

[162] S. K. Patel, P. M. Biesheuvel, ve M. Elimelech, "Energy Consumption of Brackish Water Desalination: Identifying the Sweet Spots for Electrodialysis and Reverse Osmosis", *ACS EST Eng.*, c. 1, sy. 5, ss. 851-864, May. 2021, doi: 10.1021/acsestengg.0c00192.

[163] J. Camacho-Espino, E. Dimitriou, G. Papadakis, ve G. N. Marichal Plasencia, "Experimental investigation of the performance of a seawater Reverse Osmosis spiral wound membrane under variable feed water temperature", *Desalination and Water Treatment*, c. 322, s. 101157, Nis. 2025, doi: 10.1016/j.dwt.2025.101157.

[164] E. Guler, D. Ozakdag, M. Arda, M. Yuksel, ve N. Kabay, "Effect of temperature on seawater desalination-water quality analyses for desalinated seawater for its use as drinking and irrigation water", *Environ Geochem Health*, c. 32, sy. 4, ss. 335-339, Ağu. 2010, doi: 10.1007/s10653-010-9294-x.

[165] T. Altmann *vd.*, "Seawater Reverse Osmosis Performance Decline Caused by Short-Term Elevated Feed Water Temperature", *Membranes*, c. 12, sy. 8, s. 792, Ağu. 2022, doi: 10.3390/membranes12080792.

[166] L. F. Greenlee, D. F. Lawler, B. D. Freeman, B. Marrot, ve P. Moulin, "Reverse osmosis desalination: Water sources, technology, and today's challenges", *Water Research*, c. 43, sy. 9, ss. 2317-2348, May. 2009, doi: 10.1016/j.watres.2009.03.010.

[167] "Experimental Investigation of Energy Consumption and Performance of Reverse Osmosis Desalination using Design of Experiments Method", *IJE*, c. 31, sy. 1, Oca. 2018, doi: 10.5829/ije.2018.31.01a.12.

[168] Z. Yang *vd.*, "Temperature effects on ion migration and energy consumption during brackish water electrodialysis desalination", *Desalination*, c. 586, s. 117792, Eki. 2024, doi: 10.1016/j.desal.2024.117792.

[169] G. E. Dévora-Isiordia *vd.*, "Effect of Temperature on Diluate Water in Batch Electrodialysis Reversal", *Separations*, c. 8, sy. 12, s. 229, Ara. 2021, doi: 10.3390/separations8120229.

[170] A. Rajput, P. P. Sharma, S. K. Raj, J. Kumari, M. S. Rathore, ve V. Kulshrestha, "Effect of environmental temperature and applied potential on water desalination performance using electrodialysis", *Materials Today Chemistry*, c. 20, s. 100484, Haz. 2021, doi: 10.1016/j.mtchem.2021.100484.

[171] G. E. Dévora-Isiordia, A. Ayala-Espinoza, ve L. A. Lares-Rangel, "Temperature Effect on Permeate Water in Batch Electrodialysis Reversal", 12 Mayıs 2021, *EARTH SCIENCES*. doi: 10.20944/preprints202105.0256.v1.

[172] P. Gupta, M. D. Arciniegas-Pérez, ve H. A. Barrios-Piña, "Impact of brine discharge from desalination plants on marine ecosystems: A review", *Current Opinion in Environmental Science & Health*, c. 49, s. 100693, Şub. 2026, doi: 10.1016/j.coesh.2025.100693.

[173] S. Ravichandran, R. P. Currier, A. T. Findikoglu, ve P. Sharan, "Sustainable utilization of hypersaline brine for energy reduction and distillate quality enhancement in supercritical water desalination", *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, c. 84, s. 104715, Ara. 2025, doi: 10.1016/j.seta.2025.104715.

[174] A. Panagopoulos, K.-J. Haralambous, ve M. Loizidou, "Desalination brine disposal methods and treatment technologies - A review", *Science of The Total Environment*, c. 693, s. 133545, Kas. 2019, doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.07.351.

[175] P. Banerjee, E. K. Zaneldin, A. H. Al-Marzouqi, ve W. K. Ahmed, "A Review of Reject Brine Disposal, Management, and Construction Applications", *Buildings*, c. 15, sy. 13, s. 2317, Tem. 2025, doi: 10.3390/buildings15132317.

[176] M. Al-Saidi, I. Saadaoui, ve R. Ben-Hamadou, "Governing desalination, managing the brine: A review and systematization of regulatory and socio-technical issues", *Water Resources and Industry*, c. 30, s. 100225, Ara. 2023, doi: 10.1016/j.wri.2023.100225.

[177] C. Lee, H. Ho, W. Chen, ve A. Iizuka, "Total Resource Circulation of Desalination Brine: A Review", *Advanced Sustainable Systems*, c. 8, sy. 7, s. 2300460, Tem. 2024, doi: 10.1002/adsu.202300460.

[178] O. Díaz, E. Segredo-Morales, A. Figueira, ve E. González, "Research trends on desalination: zero-liquid discharge of brine (ZLD)", *Desalination and Water Treatment*, c. 273, ss. 1-12, Eki. 2022, doi: 10.5004/dwt.2022.28845.

[179] P. Banerjee, E. K. Zaneldin, A. H. Al-Marzouqi, ve W. K. Ahmed, "A Review of Reject Brine Disposal, Management, and Construction Applications", *Buildings*, c. 15, sy. 13, s. 2317, Tem. 2025, doi: 10.3390/buildings15132317.

[180] A. Karahan, S. Deliceırmak, M. Esti, E. Tezcan-Kalkan, E. Öztürk, ve H. Örek, "Microbial and environmental interactions of the 2021 mucilage event in the Sea of Marmara", *Regional Studies in Marine Science*, c. 93, s. 104619, Oca. 2026, doi: 10.1016/j.rsma.2025.104619.

[181] A. Abushaban *vd.*, "Assessing Pretreatment Effectiveness for Particulate, Organic and Biological Fouling in a Full-Scale SWRO Desalination Plant", *Membranes*, c. 11, sy. 3, s. 167, Şub. 2021, doi: 10.3390/membranes11030167.

[182] Y. Jin, J. Du, D. Gu, W. Yan, Y. Sun, ve Y. Wang, "Numerical Simulation for Optimization of the Water Intake-Outlet Arrangements for Seawater Desalination Plants Based on MIKE21: A Case Study of Laoshan Bay, Qingdao", *Water*, c. 15, sy. 13, s. 2402, Haz. 2023, doi: 10.3390/w15132402.

[183] R. Marzouk, T. M. Alkhaldi, S. U, S. A, A. G, ve S. S, "GIS, remote sensing, and machine learning for identifying optimal locations for seawater intake and brine disposal in coastal desalination systems", *Desalination and Water Treatment*, c. 323, s. 101355, Tem. 2025, doi: 10.1016/j.dwt.2025.101355.

[184] M. R. Firozjaei, Z. Hajebi, S. T. O. Naeeni, H. Akbari, ve G. Iglesias, "Hydrodynamic Performance of Seawater Intake Structures Through Numerical Modelling and Particle Image Velocimetry", *Water*, c. 17, sy. 17, s. 2607, Eyl. 2025, doi: 10.3390/w17172607.

[185] A. Criscuoli, "The Potential of Membrane Contactors in the Pre-Treatment and Post-Treatment Lines of a Reverse Osmosis Desalination Plant", *Separations*, c. 10, sy. 2, s. 129, Şub. 2023, doi: 10.3390/separations10020129.

[186] K. Poirier *vd.*, "A comprehensive review of pre- and post-treatment approaches to achieve sustainable desalination for different water streams", *Desalination*, c. 566, s. 116944, Kas. 2023, doi: 10.1016/j.desal.2023.116944.

[187] H. T. D. Thi *vd.*, "Comparison of Desalination Technologies Using Renewable Energy Sources with Life Cycle, PESTLE, and Multi-Criteria Decision Analyses", *Water*, c. 13, sy. 21, Eki. 2021, doi: 10.3390/w13213023.

[188] N. Salsabila, A. Anwar, H. T. Shubbar, M. I. Khan, T. Al-Ansari, ve Y. Bicer, "Comparative sustainability assessment of hybrid desalination systems for freshwater production", *Energy Nexus*, c. 18, s. 100440, Haz. 2025, doi: 10.1016/j.nexus.2025.100440.

[189] "Sterlitech HP4750 High Pressure Stirred Cell". Erişim: 17 Kasım 2025. [Çevrimiçi]. Erişim adresi: https://www.sterlitech.com/hp4750-stirred-cell-up-to-1000-psig-hp4750.html

A

İLGİLİ YÖNETMELİK EK TABLOLARI

Mikrobiyolojik parametreler

Parametre	**Parametrik değer**	**Notlar**
E. coli	0/250 ml	
Enterokok	0/250 ml	
Koliform bakteri	0/250 ml	
P. aeruginosa	0/250 ml	
Anaerob sporlu sülfit redükte eden bakteriler	0/50ml	
Patojen Stafilokoklar	0/100ml	
Kaynaktan alınan numunede maksimum: 22 °C'de koloni sayımı 37 °C'de koloni sayımı	20/ml 5/ml	
İmlâhanede ambalajlandıktan sonra alınan numunede; 22 °C'de koloni sayımı 37 °C'de koloni sayımı Piyasada satılan ambalajlı sulardan alınan numunede maksimum: 22 °C'de koloni sayımı 37 °C'de koloni sayımı	100/ml 20/ml İmlâhane için belirlenen sınır değerin on katıdır.	Not 1
Parazitler	0/5 L	

Kimyasal parametreler

Parametre	Parametrik değer	Birim	Notlar
Akrilamid	0.1	µg/L	Not 1 ve 2
Antimon	5.0	µg/L	
Arsenik	10	µg/L	
Benzen	1.0	µg/L	
Benzo (a) piren	0,010	µg/L	
Bor	1	mg/L	
Bromat	10	µg/L	
Kadmiyum	5,0	µg/L	
Krom	50	µg/L	
Bakır	2	mg/L	Not 3
Siyanür	50	µg/L	
1,2-dikloretan	3,0	µg/L	
Epikloridin	0,10	µg/L	Not 1 ve 2
Florür	1,5	mg/L	
Kurşun	10 (içme-kullanma suları için 31 Aralık 2012 tarihine kadar 25 µg/L olarak uygulanır)	µg/L	Not 3 ve 4
Cıva	1,0	µg/L	Not 2
Nikel	20	µg/L	Not 3
Nitrat	50	mg/L	Not 5
Nitrit	0,50	mg/L	Not 5
Pestisitler	0,10	µg/L	Not 2, 6 ve 7
Toplam pestisitler	0,50	µg/L	Not 2, 6 ve 8
Polisiklik aromatik hidrokarbonlar	0,10	µg/L	Belli bileşiklerin konsantrasyonları toplamı; Not 9
Selenyum	10	µg/L	Not 2
Tetrakloreten ve trikloreten	10	µg/L	Belli parametrelerin konsantrasyonları toplamı
Trihalometanlar-toplam	100 (içme-kullanma suları için 31 Aralık 2012 tarihine kadar 150 µg/L olarak uygulanır)	µg/L	Belli bileşiklerin konsantrasyonları toplamı; Not 10
Vinil Klorür	0,50	µg/L	Not 1 ve 2

"Not 1: Bu parametrik değer; suyla temas eden polimerden kaynaklanan sudaki monomer kalıntılarının konsantrasyonunu ifade eder.

Not 2: İzinli kaynak ve içme suyu tesislerinde bu parametrelerin yılda bir kez izlenmesi yeterlidir.

Not 3: Bu değer yeterli örnekleme metoduyla musluktan alınan içme-kullanma sularından alınacak su numunelerine ve yine tüketici tarafından içilen, haftalık ortalama değeri temsil eden içme-kullanma amaçlı sulardan alınacak su numunelerine uygulanır. Örnekleme ve izleme metotları, 10 uncu maddenin dördüncü fıkrasına uyumlu olarak uygulanır. Kurum, bu parametrelere ilişkin, insan sağlığı üzerinde olumsuz etkiye neden olabilecek izleme ve analiz sonuçları değerlerinin en üst düzeye ulaştığı dönemleri dikkate alır.

Not 4: Kurşun parametresi için belirtilen değerlere uyum sağlamak amacı ile verilen süre boyunca insani tüketim amaçlı suların kurşun miktarını mümkün olduğu kadar azaltmak için bütün tedbirlerin alınması sağlanır. Bu değere uyumun sağlanmasına yönelik önlemlerin alınması sırasında Kurum, içilebilir nitelikteki sularda kurşun miktarının en yüksek olduğu yerlere öncelik vermelidirler.

Not 5: Kurum, kullanılmış su arıtma işleminde [nitrat]/50 + [nitrit]/3≤1 formülünü esas alınır ve nitrat (NO_3) ve nitrit (NO_2) miktarları için mg/L birimi kullanılır. Nitritler için de 0,10 mg/L değerine uyulur.

Not 6: Pestisitler;

Organik insektisitler (böcek öldürücüler),
Organik herbisitler (bitki öldürücüler),
Organik fungusitler (mantar öldürücüler),
Organik nematositler (solucan, kurt öldürücüler),
Organik akarisitler,
Organik algisitler (yosun öldürücüler),
Organik rodentisitler (kemirici öldürücüler),
Organik slimisitler (balçık, salgı öldürücüler) ile,
bunlarla bağlantılı ürünleri (diğerlerinin yanı sıra, büyüme kontrol edicileri) ve bunların ilgili metabolitlerini, parçalanma yada reaksiyon ürünlerini ifade eder.

Söz konusu pestisitlerden suda bulunması muhtemel pestisitler izlenir.

Not 7: Parametrik değer her bir pestisit için uygulanır. Aldrin, dieldrin, heptaklor ve heptaklor epoksit için parametrik değer 0,030 µg/L'dir.

Not 8: "Toplam pestisitler" izleme süreci içinde tespit edilen ve sayılan her bir pestisitin toplamını ifade eder.

Not 9: Belirtilen bileşikler şunlardır:

Benzo (b) floranten,
Benzo (k) floranten,
Benzo (ghi) perilen,
İndeno (1,2,3- cd) piren

Not 10: Belirtilen bileşikler şunlardır: kloroform, bromoform, dibromoklorometan, bromodiklorometan.

9 uncu maddenin (c) bendinde belirtildiği üzere, mümkün olan hallerde, dezenfeksiyondan ödün vermemek kaydıyla trihalometanlar için Ek-1 (b)'de belirtilen parametre değerinden daha düşük bir değer elde etmek hedeflenir."

Gösterge parametreleri

Parametre	Parametrik Değer	Birim	Notlar
Alüminyum	200	µg/L	
Amonyum	0,50	mg/L	
Klorür	250	mg/L	Not 1
C. perfringens (sporlular dahil)	0	sayı/100 ml	Not 2
Renk	Tüketicilerce kabul edilebilir ve herhangi bir anormal değişim yok		
İletkenlik	2500	20 °C'de $\mu S/cm^{-1}$	Not 1
pH	≤ 9,5-6,5≤	pH birimleri	Not 1 ve 3
Demir	200	µg/L	
Mangan	50	µg/L	
Koku	Tüketicilerce kabul edilebilir ve herhangi bir anormal değişim yok		
Oksitlenebilirlik	5,0	mg/L O2	Not 4
Sülfat	250	mg/L	Not 1
Sodyum	200	mg/L	
Tat	Tüketicilerce kabul edilebilir ve herhangi bir anormal değişim yok		
22 °C'de koloni sayımı	Anormal değişim yok		Not 11
Koliform bakteri	0	Sayı/100 ml	Not 5
Toplam Organik Karbon (TOC)	Anormal değişim yok		Not 6
Bulanıklık	Tüketicilerce kabul edilebilir ve herhangi bir anormal değişim yok		Not 7

Radyoaktivite parametreleri

Parametre	Parametrik değer	Birim	Notlar
Trityum	100	Bq/L	Not 8 ve 10
Toplam gösterge dozu	0,10	mSv/yıl	Not 9 ve 10

"Not 1: Su aşındırıcı olmamalıdır.

Not 2: Suyun yüzeyden alınmaması ya da yüzey suyundan etkilenmemesi halinde bu parametrenin ölçülmesi gerekmez. Suyun parametrik değere uymaması halinde, Kurumun tedarik edilen suda patojen mikroorganizmalar (örneğin cryptosporidium) bulunmasından kaynaklanan insan sağlığına yönelik potansiyel bir tehlike olmadığını belirlemek için araştırması gerekir.

Not 3: Şişelere ya da kaplara konulan sular için minimum pH değeri 4.5 olarak belirlenebilir.

Not 4: TOC parametresinin analiz edilmesi halinde bu parametrenin ölçülmesi gerekli değildir.

Not 5: Şişelere ya da kaplara konulan su için birim sayı/250 ml'dir.

Not 6: Günde 10.000 m^3'ten az su verilmesinde bu parametrenin ölçülmesine gerek yoktur.

Not 7: Yüzeysel suyun arıtılması durumunda Kurum, arıtılmış sudaki bulanıklığın 1.0 NTU (Nephelometrik bulanıklık ünitesi) değerini aşmamasına dikkat eder.

Not 8: İzleme aralıkları daha sonra Ek-2'de belirlenir.

Not 9: Trityum, potasyum –40, radon ve radonun bozunmasından oluşan ürünler hariç; izleme frekansları, izleme metotları ve izleme noktaları için en doğru yerler daha sonra Ek-2'de belirtilecektir.

Not 10: 1- İzleme frekansları hakkında Not 8'de öngörülen teklifler ve Ek-2'de yer alacak olan ve Not 9'da belirtilen izleme frekansları, izleme metotları ve izleme noktaları için en uygun yerler, Birliğin bu konudaki düzenlemeleri dikkate alınarak belirlenecektir.

2- Kurum, diğer izlemelere dayalı olarak, hesaplanan toplam gösterge dozu veya trityum düzeylerinin parametrik değerin çok altında olduğunu belirlemesi halinde, içme-kullanma suyunu trityum veya toplam gösterge dozunu hesaplanmasına esas teşkil eden radyoaktivite açısından izlemeyebilir. Böyle bir durumda bu kararının gerekçelerini, diğer izlemelerden elde edilen sonuçlarla birlikte, Komisyona bildirir."

TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR

Konferans Bildirileri

1. C. B. Kurum ve F. İlhan, “Deniz Suyu Desalinasyonu İçin Uygulanabilecek Yöntemlerin Karşılaştırılması”, içinde *Denizlerimizin Dünü, Bugünü, Yarını*, Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi: Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi, Tem. 2024, s. 27. [Çevrimiçi]. Erişim adresi: https://udbk2024.erdogan.edu.tr/Files/ckFiles/udbk2024-erdogan-edu-tr/6.ULUSAL%20DEN%C4%B0Z%20B%C4%B0L%C4%B0MLER%C4%B0%20KONFREANSI-2024.pdf