

T.C.  
BİLECİK ŞEYH EDEBALİÜNİVERSİTESİ  
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ  
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**ANTALYA İLİ İÇİN GÜNEŞ ENERJİSİ DESTEKLİ DESALİNASYON SİSTEMİNİN  
TERMOEKONOMİK ANALİZİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

BEYZA NUR YAVUZER

TEZ DANIŐMANI  
DR. ÖĞR. ÜYESİ GÜLCAN ÖZEL EROL

İKİNCİ DANIŐMAN  
DOÇ. DR. MERVE ŞENTÜRK ACAR

BİLECİK, 2025

10595282

T.C.  
BİLECİK ŞEYH EDEBALİÜNİVERSİTESİ  
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ  
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**ANTALYA İLİ İÇİN GÜNEŞ ENERJİSİ DESTEKLİ DESALİNASYON SİSTEMİNİN  
TERMOEKONOMİK ANALİZİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

BEYZA NUR YAVUZER

TEZ DANIŐMANI  
DR. ÖĞR. ÜYESİ GÜLCAN ÖZEL EROL

İKİNCİ DANIŐMAN  
DOÇ. DR. MERVE ŞENTÜRK ACAR

BİLECİK, 2025

10595282

## BEYAN

“Antalya İli İçin Güneş Enerjisi Destekli Desalinasyon Sisteminin Termoekonomik Analizi” adlı yüksek lisans tezi hazırlık ve yazımı sırasında bilimsel araştırma ve etik kurallarına uyduğumu, başkalarının eserlerinden yararlandığım bölümlerde bilimsel kurallara uygun olarak atıfta bulunduğumu, kullandığım verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı, tezin herhangi bir kısmının Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunulmadığını, aksinin tespit edileceği muhtemel durumlarda doğabilecek her türlü hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi ve vermiş olduğum bilgilerin doğru olduğunu beyan ederim.

Bu çalışmanın, Bilimsel Araştırma Projeleri (BAP), TÜBİTAK veya benzeri kuruluşlarca desteklenmesi durumunda; projenin ve destekleyen kurumun adı proje numarası ile birlikte, ETİK KURUL onayı alınması durumunda ise ETİK KURUL tarih karar ve sayı bilgilerinin beyan edilmesi gerekmektedir.			
<b>DESTEK ALINMIŞTIR</b>	<input type="checkbox"/>	<b>DESTEK ALINMAMIŞTIR</b>	<input checked="" type="checkbox"/>
<b>Destek alındı ise;</b>			
<b>Destekleyen kurum;</b>			
<b>Desteğin Türü</b>		<b>Proje Numarası</b>	
1- BAP (Bilimsel Araştırma Projesi)			
2- TÜBİTAK			
Diğer;..... .....			
<b>ETİK KURUL onayı var ise;</b>			
<b>ETİK KURUL karar tarih/sayı:</b>		...../..... .....	

**Beyza Nur YAVUZER**

.../.../2025

**İmza**

## ÖN SÖZ

Bu tezimin yeterlilik çalışmasının yazılmasında, çalışmamı sahiplenerek, takip eden danışmanım Sayın Dr. Öğr. Üyesi Gülcan ÖZEL EROL'a ve Doç. Dr. Merve ŞENTÜRK ACAR'a değerli katkı ve emekleri için teşekkürlerimi ve saygılarımı sunarım.

Savunma sınavı sunumu sırasında değerli jüri üyeleri danışmanım Sayın Dr. Öğr. Üyesi Gülcan ÖZEL EROL'a çalışmamın son haline gelmesindeki değerli katkıları adına teşekkürlerimi ve saygılarımı sunarım.

Son olarak bu günlere ulaşmamdaki emekleri adına değerli aileme teşekkür ederim.

**Beyza Nur YAVUZER**

**2025**

## ÖZET

### ANTALYA İLİ İÇİN GÜNEŞ ENERJİSİ DESTEKLİ DESALİNASYON SİSTEMİNİN TERMOEKONOMİK ANALİZİ

Bu çalışmada, Antalya ili koşullarına uygun olarak tasarlanan 5 efektli bir MED-TVC (Multi Effect Distillation – Thermal Vapour Compression) desalinasyon sistemi, vakum tüplü ve parabolik oluklu güneş kolektörleriyle entegre edilerek sistem enerji, ekserji ve termoeconomik analiz yöntemleri ile detaylı bir şekilde incelenmiştir. Sistem, deniz suyunu çok aşamalı buharlaştırma ve yoğunlaştırma prensibiyle saf suya dönüştürmekte, buhar sıkıştırma ünitesi (TVC) ile düşük basınçlı buharı yeniden değerlendirerek termal verimliliği artırmaktadır. Isı kaynağı olarak doğal gaz yerine vakum tüplü güneş kolektörleri kullanılarak, sistem hem çevre dostu hem de uzun vadede ekonomik bir yapıya kavuşturulmuştur.

Sistemin termodinamik analizi, ikinci yasa (ekserji) analizi ile desteklenmiştir. Sistemde her noktanın sıcaklık, basınç, entalpi, entropi, kütleli debi verileri kullanılarak her bileşenin ekserji verimliliği ve ekserji yıkımı hesaplanmıştır. Ayrıca sistemin toplam yıllık maliyeti, yatırım ve işletme maliyetleri dikkate alınarak bir termoeconomik analiz gerçekleştirilmiştir. Güneş kolektörleriyle entegrasyonun işletme ve yatırım maliyetine etkisi değerlendirilmiştir. Antalya ili gibi yüksek güneş potansiyeline sahip bölgelerde güneş enerjisinin uzun vadede ekonomik bir çözüm olabileceği analiz sonuçlarına göre gösterilmiştir.

Ayrıca sistemde vakum tüplü güneş kolektörleri yerine parabolik oluklu güneş kolektörlerinin kullanılması durumunda sistemin performansı karşılaştırılmıştır ve her ne kadar sistem performansını artırdığı düşünülse de ekonomik yönden parabolik oluklu güneş kolektörlerin yatırım maliyetini artırdığı görülmüştür.

Sonuç olarak, vakum tüplü güneş kolektörleriyle desteklenmiş MED-TVC sistemi, Antalya ili koşullarında sürdürülebilir, ekonomik ve çevresel açıdan uygulanabilir bir yapıdır. Bu sistem, özellikle turizm bölgeleri, adalar ve kıyı yerleşimlerinde su temini için pilot tesis olarak kurulabilir. İyileştirme önerileri arasında 1. efekt ısı eşanjörü optimizasyonu, TVC ünitesi tahrik buhar basıncının ayarlanması, atık tuzlu sudan mineral geri kazanımı ve sistem performans izleme sistemi yer almaktadır.

**Anahtar Kelimeler :** MED – TVC, Güneş Enerjisi, Termoeconomik Analiz

## ABSTRACT

### THERMOECONOMIC ANALYSIS OF A SOLAR ENERGY SUPPORTED DESALINATION SYSTEM FOR ANTALYA PROVINCE

In this study, the energy, exergy, and thermo-economic performances of a 5-effect MED-TVC (Multi-Effect Distillation – Thermal Vapour Compression) desalination system, integrated with vacuum tube solar collectors and designed for the climatic conditions of Antalya, Turkey, were analyzed in detail. The system converts seawater into fresh water through a multi-stage evaporation and condensation process, while the thermal vapour compression (TVC) unit enhances thermal efficiency by recompressing low-pressure vapour for reuse in the first effect. By replacing natural gas with vacuum tube solar collectors as the primary heat source, the system has been transformed into an environmentally friendly and economically viable solution in the long term.

The thermodynamic analysis of the system was supported by second-law (exergy) analysis. Using the temperature, pressure, enthalpy, entropy, and mass flow rate data at each point of the system, the exergy efficiency and exergy destruction of each component were calculated. In the thermo-economic analysis, the system's total annual cost was determined by considering both capital investment and operating & maintenance (O&M) costs. The impact of integrating solar collectors on the overall cost was evaluated, demonstrating that solar energy represents a cost-effective solution in the long run, particularly in regions like Antalya with high solar potential. Furthermore, the thermo-economic analysis of the system was investigated using parabolic trough collectors instead of vacuum tube collectors. Although the system performance is expected to improve with parabolic trough collectors, it was observed that they increase the overall system cost, making them less economically favorable despite their higher thermal performance.

As a result, the MED-TVC system supported by vacuum tube solar collectors proves to be a sustainable, economically feasible, and environmentally applicable solution under Antalya's climatic conditions. This system can be implemented as a pilot plant for water supply in coastal settlements, tourist areas, and island communities. Key improvement recommendations include optimization of the first-effect heat exchanger, adjustment of the TVC unit's motive steam pressure, mineral recovery from brine waste, and implementation of a real-time system performance monitoring system.

**Keywords:** MED-TVC, Solar Energy, Thermo-economic Analysis

## İÇİNDEKİLER

ÖN SÖZ.....	i
ÖZET.....	ii
ABSTRACT.....	iii
TABLolar LİSTESİ.....	vi
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	vii
GRAFİKLER LİSTESİ.....	viii
KISALTMALAR VE SİMGELER LİSTESİ.....	ix
<b>1. GİRİŞ.....</b>	<b>1</b>
<b>1.1.Desalinasyon Teknolojilerinin Tarihçesi.....</b>	<b>3</b>
<b>1.2. Desalinasyon Teknolojilerinin Genel Çerçevesi.....</b>	<b>4</b>
<b>1.2.1. Membran Teknolojileri.....</b>	<b>4</b>
<b>1.2.2. Termal Desalinasyon Teknolojileri.....</b>	<b>5</b>
<b>1.3. Desalinasyon Teknolojilerinin Karşılaştırılması.....</b>	<b>12</b>
<b>1.4. Türkiye’de Termal Desalinasyon Sistemlerinin Kullanılabilirliği.....</b>	<b>14</b>
<b>1.4.1. Mevcut Teknolojik Altyapı ve Uygulamalar.....</b>	<b>14</b>
<b>1.4.2. Termal Desalinasyonun Maliyet Analizi.....</b>	<b>15</b>
<b>1.4.3. Çevresel Etkiler ve Atık Yönetimi.....</b>	<b>17</b>
<b>1.5. Mevzuat Ve Politikalar.....</b>	<b>19</b>
<b>1.5.1. Türkiye’de Desalinasyon Teknolojileri ile İlgili Yasal Düzenlemeler.....</b>	<b>19</b>
<b>1.5.2. Stratejik Planlamalar ve Yatırım Politikaları.....</b>	<b>20</b>
<b>1.6. Geleceğe Dair Öneriler.....</b>	<b>21</b>
<b>2.LİTERATÜR ARAŞTIRMASI.....</b>	<b>23</b>
<b>3.MATERYAL VE YÖNTEM.....</b>	<b>27</b>
<b>3.1.Sistem Tanımı ve Bileşenleri.....</b>	<b>27</b>
<b>3.2. Termodinamik Analiz.....</b>	<b>29</b>
<b>3.2.1. Enerji Analizi.....</b>	<b>30</b>

<b>3.2.2. Ekserji Analizi</b> .....	31
<b>3.2.3. Güneş Kolektörleri</b> .....	32
<b>3.2.4.Termoekonomik Analiz</b> .....	32
<b>4.BULGULAR</b> .....	34
<b>5.YORUMLAR</b> .....	43
<b>KAYNAKÇA</b> .....	45

## TABLULAR LİSTESİ

<b>Tablo 1.1.</b> Türkiye’de Kişi Başına Düşen Yıllık Su Miktarı .....	2
<b>Tablo 1.2.</b> Termal Desalinasyon Sistemlerinin Kullanılabilirlik Açısından Karşılaştırması ....	11
<b>Tablo 1.3.</b> Ticari Amaçlı Kurulmuş Tesislerin Kapasiteleri .....	12
<b>Tablo 1.4.</b> Yatırım Maliyetleri (CAPEX) .....	16
<b>Tablo 1.5.</b> Enerji Maliyetleri (OPEX) .....	16
<b>Tablo 1.6.</b> Yıllık Su Üretim Maliyeti Karşılaştırması .....	17
<b>Tablo 1.7.</b> Amortisman ve Geri Ödeme Süresi .....	17
<b>Tablo 3.1.</b> Sistem Giriş Parametreleri .....	29
<b>Tablo 3.2.</b> Termoekonomik Analizde Kullanılan Parametreler .....	29
<b>Tablo 4.1.</b> Vakum Tüplü Güneş Kolektörü Destekli Desalinasyon Sistemine Ait Akış Noktalarındaki Termodinamik Özellikler ve Analiz Sonuçları .....	35
<b>Tablo 4.2.</b> Parabolik Oluklu Güneş Kolektörü Destekli Desalinasyon Sistemine Ait Akış Noktalarındaki Termodinamik Özellikler ve Analiz Sonuçları .....	36
<b>Tablo 4.3.</b> Vakum Tüplü Güneş Kolektörlü Sistemin Ekserji Yıkımı Hesabı .....	37
<b>Tablo 4.4.</b> Parabolik Oluklu Güneş Kolektörlü Sistemin Ekserji Yıkımı Hesabı .....	37
<b>Tablo 4.5.</b> Sistem Bileşenleri ve Ekonomik Bilgiler .....	38
<b>Tablo 4.6.</b> Sistem Bileşenlerinin Termoekonomik Analizi .....	38
<b>Tablo 4.7.</b> MED-TVC Sisteminin Farklı Isı Kaynakları Altında Maliyet Karşılaştırması.....	39

## ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1.1. Ters Ozmoz Sistemi Bileşenleri .....	4
Şekil 1.2. Elektrodializ tesisi bileşenleri .....	5
Şekil 1.3. Çok Aşamalı Flaş Desalinasyon Sisteminin Şematik Gösterimi .....	6
Şekil 1.4. Çok Etkili Desalinasyon Sisteminin Şematik Gösterimi .....	8
Şekil 1.5. Buhar Sıkıştırırmalı Desalinasyon Sisteminin Şematik Gösterimi .....	10
Şekil 3.1. Sistem Tanımı .....	28

## GRAFİKLER LİSTESİ

<b>Grafik 4.1.</b> MED-TVC desalinasyon sisteminde Vakum Tüplü ve Parabolik Oluklu Güneş Kolektörlerinin Ekserji Yıkımına Etkisi .....	39
<b>Grafik 4.2.</b> MED-TVC desalinasyon sisteminde Vakum Tüplü ve Parabolik Oluklu Güneş Kolektörlerinin Ekserji Verimliliğine Etkisi .....	40
<b>Grafik 4.3.</b> Sistemin Bileşen Bazlı Maliyet Dengesi .....	41
<b>Grafik 4.4.</b> Vakum Tüplü ve Parabolik Oluklu Güneş Kolektörlerinin Sistem Maliyetine Etkisi .....	42

## KISALTMALAR VE SİMGELER LİSTESİ

- MED** : Multi Effect Distillation (Çok Etkili Damıtma)
- TVC** : Thermal Vapor Compression (Termal Buhar Sıkıştırma)
- RO** : Reverse Osmosis (Ters Ozmoz)
- ED** : Elektrodialysis (Elektrodiyaliz)
- MSF** : Multi Stage Flash Distillation (Çok Aşamalı Flaş Distilasyonu)
- VC** : Vapor Compression Distillation (Buhar Sıkıştırırmalı Damıtma)
- O&M** : Operation and Maintenance (İşletme ve Bakım)
- CRF** : Capital Recovery Factor (Amortisman Oranı)
- LCC** : Life Cycle Cost (Yaşam Döngüsü Maliyeti)
- Z** : Yıllık Sermaye Maliyeti
- m** : Kütleli debi (kg/s)
- T** : Sıcaklık (°C)
- ΔT** : Sıcaklık Farkı (°C)
- P** : Basınç (kPa)
- h** : Entalpi (kJ/kg)
- s** : Entropi (kJ/kg.K)
- X** : Tuzluluk Oranı (g/kg)
- Ė<sub>x</sub>** : Ekserji akısı (MW)
- η<sub>ex</sub>** : Ekserji verimliliği
- c<sub>ex</sub>** : Ekserji maliyeti (\$/kWh<sub>ex</sub>)
- μ** : Kimyasal Potansiyel (kJ/mol)
- ω** : Mol kesri (mol)
- A** : Kolektör Alanı (m<sup>2</sup>)
- I** : Güneş Işınımı (kwh/m<sup>2</sup>gün)
- n** : Efekt sayısı
- i** : Faiz oranı

## 1. GİRİŞ

Yaşamın en temel bileşenlerinden olan su, ekosistemin sürdürülebilirliği açısından hayati bir öneme sahiptir. Yeryüzünün 2/3'ü sularla kaplı olmasına rağmen, tatlı su oranı %2,5 olup, bu oranın sadece %0,10'u kullanılabilir sudur. Bununla birlikte, dünya genelinde nüfus artışı, kentleşme ve iklim değişikliği gibi etkenler, tatlı su kaynaklarına erişimi giderek daha da zorlaştırmaktadır. Özellikle bazı bölgelerde su kaynaklarının yetersizliği, ekonomik ve çevresel krizlere yol açan önemli bir sorundur. Örneğin, temiz suya erişimin kısıtlı olması, hijyen koşullarının yetersizlikleri nedeniyle bulaşıcı hastalıkların artmasına, gıda sektöründe ürün verimliliğinin düşmesine ve gıda üretiminin azalmasına, tarım ve hayvancılıkla geçinen toplumların geçim kaynaklarını kaybetmesine neden olur. Bu durum, işsizlik oranını artırır ve insanların yaşam standartlarını düşürür.

Birleşmiş Milletler Dünya Su Konseyi (UNCWW), 1950'lerde kullanılabilir suya erişim sıkıntısının daha az iken, 1990'larda 300 milyonda fazla insanın yaşadığı ülkelerde susuzluk probleminin ortaya çıktığı, 2023 yılı itibariyle ise dünya nüfusunun yaklaşık %40'ının su kıtlığı riskiyle karşı karşıya olduğunu belirterek 2050 yılında dünya nüfusunun 2/3'ünün şiddetli su sıkıntısı çekeceğini ön görmüştür (Hosta, 2023).

Türkiye, üç tarafı denizlerle çevrili bir ülke olmasına rağmen su zengini bir ülke konumunda değildir. Ülkemizin yarı kurak iklim özelliğine sahip olması, yağışların; bölgelere ve iklimlere göre değişiklik göstermesi su kaynaklarının sürdürülebilir yönetimini kritik hale getirir. "Su stresi, bir ülkenin kullanılabilir su kaynaklarının nüfusa kıyasla yetersiz olduğu bir durumu ifade eder. Kişi başına düşen su 1000-1700 m<sup>3</sup> değerleri arasında olan bölgeler su stresi altında kabul edilirken, 1000 m<sup>3</sup>/kişi altındaki değerler ise su kıtlığı yaşayan bölgeler olarak değerlendirilir. Türkiye Su Enstitüsü'nün hazırladığı rapora göre 2023 yılında 1313 m<sup>3</sup> olan kişi başına düşen temiz su miktarının, 2050 yılında nüfusumuzun 100 milyona ulaşması ile birlikte 1120 m<sup>3</sup>'e düşmesinin beklenmektedir. Tablo 1.1'de verilen Türkiye'de kişi başına yıllık mevcut su miktarı verileri dikkate alındığında, ülkemizin son 25 yıldır "su stresi yaşayan ülkeler" arasında olduğu anlaşılmaktadır. Artan nüfus, iklim değişikliği, bilinçsiz tarımsal kullanım alanları, plansız su kullanımı ve sınırlı su kaynakları nedeniyle kişi başına düşen yıllık su miktarı sürekli azalmaktadır (Hakyemez, 2019).

**Tablo 1.1.** Türkiye’de Kişi Başına Düşen Yıllık Su Miktarı

Yıl	Kişi Başına Düşen Yıllık Su Miktarı (m <sup>3</sup> /kişi)	Nüfus (Milyon)
2000	~1650 m <sup>3</sup>	~63
2020	~1350 m <sup>3</sup>	~83
2024	~1300 m <sup>3</sup> (tahmini)	~86

**Kaynak:** (Hakyemez, 2019)

Ülkemizde bölgesel olarak su kaynaklarının dağılımı dengesizdir; Güneydoğu Anadolu ve İç Anadolu bölgeleri su kıtlığı riskiyle daha fazla karşı karşıyadır. Ayrıca, Marmara ve Ege bölgelerinde ise artan nüfus ve sanayileşme tatlı su kaynakları üzerindeki baskıyı artırmaktadır (Akça, 2023; TÜİK, 2022). Son zamanlarda Türkiye’nin bazı bölgelerinde su kıtlığı sorunu daha belirgin hale gelmiştir. Örneğin, Konya Kapalı Havzası Türkiye’nin en büyük kapalı havzasıdır. Tarım açısından önemli olan bu havzaya su giriş-çıkışı olmamasına rağmen yeraltı su seviyesi alarm verici seviyelere inmiştir. Konya Ovası’nda 2000 yılında 10 metre derinlikte suya ulaşılırken, bu seviye 2020’lerde 45-60 metre derinliklere kadar inmiştir. Bilinçsiz sulama, yağışlardaki azalma (Konya’da 2000 yılı sonrası yağışların %20 oranında azaldığı görülmüştür.) ve sıcaklıkların artmasıyla buharlaşmanın artması yeraltı suyunun azalmasının nedenleri arasında görülebilir (Aksoy ve Yüceer, 2022). Türkiye’nin bir başka havzası Konya, Ankara, Aksaray ve Niğde illerini kapsayan Tuz Gölü Havzası’dır. Bu havzanın uydu görüntülerinde 2002-2022 arasında göl alanının yaklaşık %50 azaldığı görülmüştür. Bölgede 2000 sonrası 10.000’e yakın kaçak yeni yeraltı kuyusunun açılması gölü besleyen su kaynaklarının kesilmesine, bilinçsiz tarımsal sulamanın kuraklığı artırmasına neden olmuştur (Gökçe, 2019; 13-24). Akdeniz ve Ege bölgelerinde de tarımsal baskı, yüksek buharlaşma ve turizm faaliyetleri su talebini artırmaktadır. Bu durumda, desalinasyon teknolojileri bölgesel çözümler sunan bir alternatif haline gelmektedir.

Türkiye’nin su yönetimi temel olarak baraj, gölet ve yeraltı suyu kullanımına bağlıdır. Ancak nüfus artışı, şehirleşme, kuraklık ve iklim değişikliği sebebiyle geleneksel su kaynakları yetersiz kalmaktadır. Su arz-talep dengesizliği alternatif kaynak arayışına yöneltmektedir. Desalinasyon, deniz suyu veya tuzlu su kaynaklarından içme ve kullanma suyu elde etmeye yönelik bir teknolojidir. Bu teknoloji yenilenebilir su kaynağının yanı sıra sürdürülebilir su

temini sağlar. Dünya yüzeyindeki suyun yaklaşık %97,5'ini deniz suyu oluşturmaktadır. Deniz suyunun değerlendirilmesi küresel ölçekte ekonomik ve çevresel faydalar sağlayabilir. Bu nedenle, desalinasyon teknolojileri sadece su kıtlığı çeken yerlerde değil ülkelerin birçoğuna stratejik bir çözüm olarak katkı sağlayacaktır.

Türkiye gündeminde özellikle kıyı şeridinde tatlı su kaynaklarının azalması desalinasyon teknolojilerine verilen önemi artırmıştır. Başta Tarım ve Orman Bakanlığı 2023 Su Raporu ve 11. Kalkınma Planı kapsamında desalinasyon sistemleri su arz güvenliğini artıracak stratejik çalışmalar arasındadır (Tarım ve Orman Bakanlığı, 2023).

Membran temelli ve termal temelli olmak üzere iki temel desalinasyon yönteminden biri olan termal desalinasyon, yüksek enerji tüketimi nedeniyle yaygın kullanıma girmemiştir. Ancak düşük bakım ihtiyacı ve geniş ölçekli uygulamalarda uzun vadeli dayanıklılığı sayesinde birçok ülke tarafından tercih edilmektedir. Özellikle enerji maliyetlerinin yüksek olmadığı veya yenilenebilir enerji ile desteklenen bölgelerde termal desalinasyonun kullanım potansiyeli oldukça yüksektir (TÜİK, 2022; Aksoy ve Yüceer, 2022 ve Gökçe, 2018) .

### **1.1.Desalinasyon Teknolojilerinin Tarihçesi**

Desalinasyon teknolojileri tarih boyunca farklı yöntemlerle uygulanarak zaman içerisinde gelişmiştir. Deniz suyunun tuzdan arındırma, antik dönemlerde Aristoteles'in suyun buharlaştırılması ve ardından yoğunlaştırılmasıyla tuzdan arındırılabilceği fikrine dayanır. Aynı zamanda orta çağda denizciler de deniz suyunu kaynatarak yoğunlaştırma yoluyla tatlı su elde etmişlerdir. Ancak o dönemde cihazları geniş çapta kullanamamışlardır (Gökçe, 2018).

Buhar gücünün yaygın kullanımı sanayi devrimi ile desalinasyon tesislerinde ilerlemelere yol açmıştır. Bu sayede 19. Yüzyılın sonlarında, karada ilk büyük ölçekli desalinasyon tesisleri kurulmuştur.

20. yüzyılın ortalarına gelindiğinde gelişen desalinasyon teknolojileri ile farklı yöntemler ortaya çıkmış ve 1950'lerde Amerika Birleşik Devletleri'nde Tuzlu Su Dönüştürme Ofisi kurulmuştur. Çok kademeli flaş (Multi Stage Flash – MSF) ve çok etkili damıtma (Multi Effect Distillation – MED) gibi termal sistemler bu dönemde ortaya çıkmış ve ters ozmoz (Reverse Osmosis – RO) teknolojileri üzerinde çalışmalara başlanmıştır.

2000'li yıllardan itibaren membran teknolojilerindeki gelişmeler sayesinde ters ozmoz yöntemi en yaygın kullanılan teknoloji haline gelmiştir. Günümüzde, dünya genelinde 22.000'den fazla desalinasyon tesislerinde membran teknolojileri kullanılmaktadır (Tarım ve Orman Bakanlığı, 2023).

Türkiye’de ise son dönemlerde, özellikle su kıtlığının yaşandığı bölgelerde, deniz suyunun arıtılmasıyla ilgili çalışmalar yürütülmektedir. Ancak, Türkiye’de desalinasyon tesislerinin etkin bir şekilde kullanılması için enerji tüketimi ve çevresel etkiler gibi konular detaylı bir şekilde ele alınmalıdır.

Desalinasyon teknolojilerinde, tarih boyunca kullanılabilir su ihtiyacını karşılamak amacıyla çeşitli yöntemler geliştirilmiştir. Enerji verimliliği ve çevresel sürdürülebilirlik konularında yapılan çalışmalarla gelecekte daha da yaygın kullanımı hedeflenmektedir.

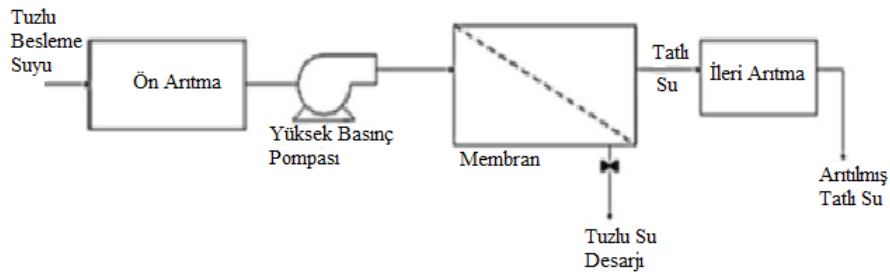
## 1.2. Desalinasyon Teknolojilerinin Genel Çerçevesi

Desalinasyon, su kıtlığına çözüm bulan, genellikle içme suyu temini konusunda kıtlık çeken bölgelerde deniz suyunu tuzdan arındırma işlemidir. Genel olarak, membran ve termal yöntemler olmak üzere iki başlıkta incelenebilir. Membran veya termal yöntemlerin kullanımı farklı koşullar ve ihtiyaçlara göre tercih edilebilir.

### 1.2.1. Membran Teknolojileri

Membran teknolojileri, deniz suyunun yarı geçirgen zarlar içerisinden geçirilerek tuzdan ayırma işlemidir.

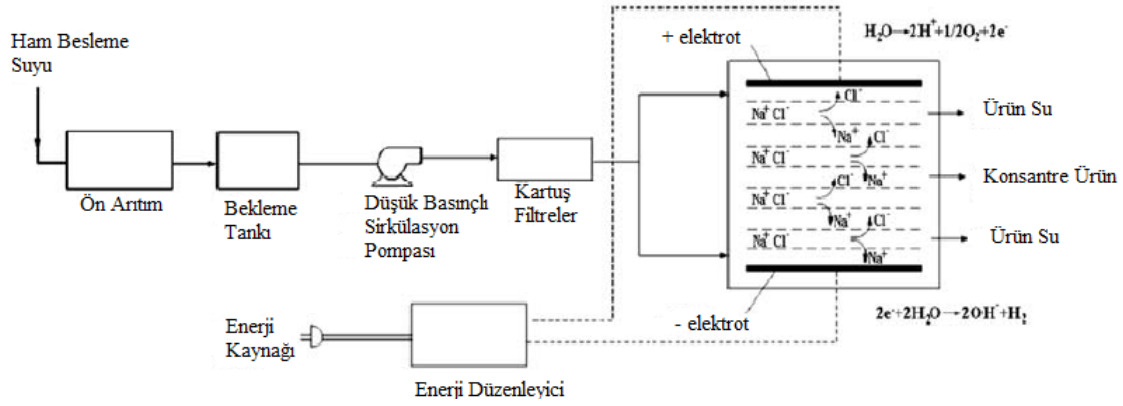
Ters Ozmoz (Reverse Osmosis – RO): Ters ozmoz yönteminde deniz suyu önce bir ön arıtmaya tabi tutulur, daha sonra yüksek basınç altında yarı geçirgen bir membran içinden geçirilerek tuzdan arındırılır. Membran sadece su moleküllerinin geçişine izin verir, tuz burada ayrışır. Bu yöntemle deniz suyundan %99’a varan oranda tuzdan arındırma gerçekleşir (Kucera, 2019).



Şekil 1.1. Ters Ozmoz Sistemi Bileşenleri

**Kaynak:** (Kucera, 2019)

Elektrodiyaliz (Electrodialysis–ED): Deniz suyunun elektriksel potansiyel farkı kullanılarak iyonların membranlar aracılığı ile tuzdan ayrılması işlemidir. Genellikle tuzluluk oranı düşük sularda tercih edilir (Kucera, 2019). Bunun sebebi ise, yüksek tuzlu sularda daha fazla membran katmanına gereksinim duyulur ve sistemi karmaşıktır. Ayrıca bu sistemlerin iyon yoğunluğu arttıkça membranların daha çabuk yıpranmasına sebebiyet verir (Strathmann, 2010; 218-226).



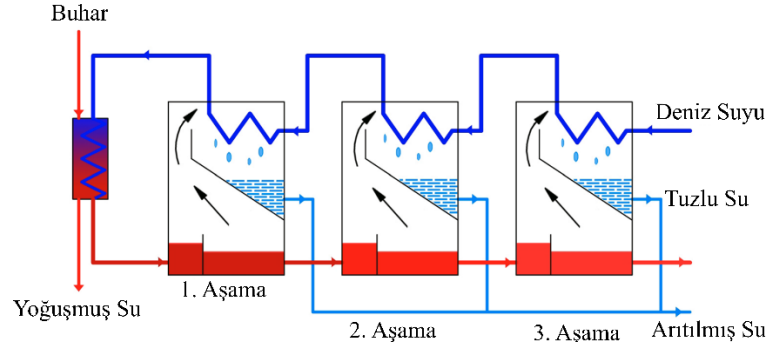
**Şekil 1.2.** Elektrodiyaliz tesisi bileşenleri

**Kaynak:** (Kucera, 2019)

### 1.2.2. Termal Desalinasyon Teknolojileri

Termal desalinasyon, deniz suyunu buharlaştırıp ardından yoğunlaştırarak saf su elde prosesidir. Yüksek tuzluluk oranına sahip deniz suları için etkili bir yöntem olan termal desalinasyon, büyük ölçekli tesislerde yaygın olarak kullanılmaktadır. Termal desalinasyon sistemlerinde kullanılan başlıca yöntemler şunlardır:

Çok Aşamalı Flaş Distilasyonu – MSF (Multi Stage Flash Distillation): Bu yöntemde, Şekil 1.3’deki gibi deniz suyu kaynama noktasına kadar bir ısı değiştirici aracılığı ile ısıtılır. Isıtılan su farklı basınçlara sahip birden fazla odaya pompalanır, her odada basınç düşürülerek suyun bir kısmının buharlaşması sağlanır (ani buharlaşma (flash evaporation)). Oluşan buhar soğuk yüzeylerde yoğunlaşarak sıvı hale getirilir. Buharlaşmayan su yüksek tuz oranına sahip bir halde sistemden atılır.



**Şekil 1.3.** Çok Aşamalı Flaş Desalinasyon Sisteminin Şematik Gösterimi

**Kaynak:** (Ahar ve Hatamipour, 2023; 1-28)

Avantajları:

- Günde binlerce metreküp temiz su elde edebilen büyük kapasiteli tesisler için uygundur.
- Yüksek tuz oranına sahip deniz sularında verimliliği yüksektir.
- Bakımı kolay olduğundan uzun yıllar boyunca çalışabilir.
- Yoğunlaşmadan sonra açığa çıkan ısı geri kazanılarak, yeniden kullanılabilir. Bu da enerji tüketimini azaltır.
- Yenilenebilir enerji kaynakları veya endüstriyel atık ısı kaynaklarıyla entegre edilebilir.

Dezavantajları:

- Kurulum maliyetleri yüksek olduğundan büyük ölçekli tesislerde önemli bir yatırım gerektirir.
- Diğer desalinasyon yöntemlerine kıyasla enerji tüketimi yüksektir.
- Ayrışmış atık suyun tuzluluk oranı yüksek olduğundan yeniden denize bırakılması çevresel dengeleri bozabilir.

MSF, büyük ölçekli tatlı su üretimi için etkili bir desalinasyon yöntemidir. Özellikle yenilenebilir enerji kaynakları ile entegre edilebilmesi; enerji verimliliği, dayanıklılık ve yüksek kapasitesi gibi avantajları sayesinde şehir ve endüstriyel su ihtiyaçlarını karşılamada önemli bir rol oynar (Kucera, 2019; Strathmann, 2010; Theodore, 2022; Çalapkulu, 2020 ve Yıldırım ve Solmuş, 2014).

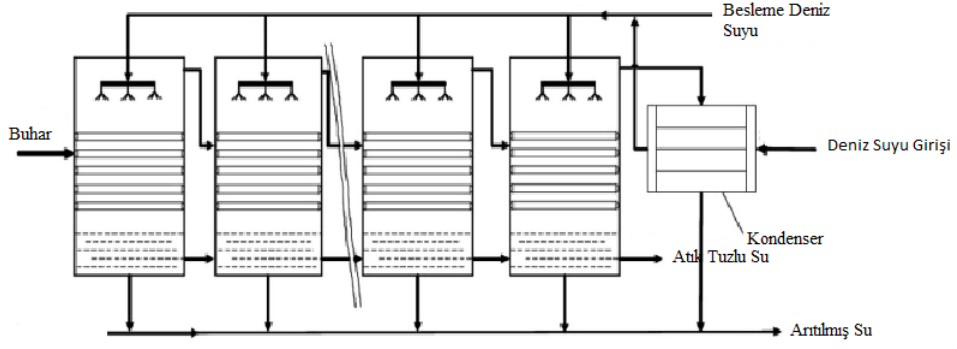
MSF tesisleri özellikle Orta Doğu gibi su kıtlığı çeken bölgelerde kullanılmaktadır. Örneğin; Dubai'nin su ihtiyacının büyük bir kısmını karşılayan tesislerden biri MSF teknolojisi ile kurulmuş Jebel Ali Desalinasyon tesisidir. 1980'lerde inşa edilen, Dubai Electricity and

Water Authority (DEWA) raporlarına göre birim su maliyeti 1.50 – 1.80 USD/ m<sup>3</sup> olan bu tesis günde 250.000 m<sup>3</sup> kullanılabilir su üretir. Uzun borularla açık denize taşınan atık tuzlu su, yoğunluğu yüksek olduğu için dip seviyede kalır. Ancak çevreci raporlar bu atık tuzlu su yönetiminin yeterli olmadığını belirtmektedir (ASR&DS; Jones, 2019; 1343-1356).

Bir başka tesis ise Suudi Arabistan'da bulunan Kızıldeniz kıyısındaki Yanbu Desalinasyon tesisidir. Dünyanın en büyük termal desalinasyon tesislerinden olan bu tesis, düşük enerji maliyetleri ile daha düşük üretim maliyetlerine sahip olması açısından dikkat çeker. Doğalgaz tabanlı üretimi sayesinde Saline Water Conversion Corporation (SWCC - Suudi Arabistan'ın devlet kontrolündeki ana desalinasyon kurumu) raporuna göre birim su maliyeti 0.90 – 1.30 USD/ m<sup>3</sup> olarak yayınlanmış, kapasitesi ise 880.000 m<sup>3</sup>/gün'dür. Uzun borularla açık denize taşınan atık tuzlu su, Kızıldeniz için tehdit oluşturmaktadır. SWCC' nin takibinde olan atık tuzlu su yönetiminin yeterli olmadığını çevreci raporlar göstermektedir (Jones, 2019; 1343-1356; APR&SDP).

Her iki tesis de, termal desalinasyonun büyük ölçekli uygulanabilirliğini gösteren tesislerdir. Ancak enerji tüketiminin yüksek oluşu ve çevresel etkileri göz önünde bulundurulursa, bu sistemin her yerde uygun olamayacağı, güneş enerjisi ile desteklenmesinin, Türkiye gibi yüksek güneş potansiyeline sahip ülkelerde tercih edilebileceği, dezavantajlarını ortadan kaldıracağı öngörülmektedir.

Çok Etkili Distilasyon – MED (Multi Effect Distillation): Bu yöntemde, Şekil 1.4'deki gibi deniz suyu kaynama noktasına kadar ısıtılır. Isı kaynağı genellikle; buhar, sıcak su veya atık ısıdır. İlk etkide ısıtılan su buharlaşır, buharlaşan su diğer etkiden ısı kaynağı olarak kullanılır. Böylece enerji verimliliği artar. Oluşan buhar soğuk yüzeylerde yoğunlaşarak saf su elde edilir. Her efekt bir önceki efektte göre daha düşük basınçta ve sıcaklıkta çalışır.



**Şekil 1.4.** Çok Etkili Desalinasyon Sisteminin Şematik Gösterimi

**Kaynak:** (Jones ve Qadir, 2019)

Avantajları:

- Her efekte açığa çıkan ısı bir sonraki efektin ısı kaynağı olarak kullanılır. Böylece enerji tüketimi önemli ölçüde azaltılır.
- Enerji geri kazanımı işletme maliyetlerini düşürür.
- Yüksek tuz oranına sahip deniz sularında verimliliği yüksektir.
- Daha düşük enerji tüketimi ve daha az çevresel etki sağlaması sebebiyle diğer desalinasyon yöntemlerine göre avantaj sağlar.

Dezavantajları:

- Kurulum maliyetleri yüksek olduğundan büyük ölçekli tesislerde önemli bir yatırım gerektirir.
- Tasarım süreci karmaşıktır.

Bu yöntem, büyük ölçekli su arıtma projelerinde enerji tasarrufu sağlamak için oldukça uygundur. Özellikle, yenilenebilir enerji kaynakları ile entegre edilebilmesi; enerji verimliliği, dayanıklılık ve yüksek su kalitesi gibi avantajları sayesinde şehir ve endüstriyel su ihtiyaçlarını karşılamada önemli bir rol oynar (Kucera, 2019; Theodore, 2022).

MED tuzluluk oranı yüksek bölgelerde tercih edilen bir desalinasyon yöntemidir. Örneğin, Kuveyt'in su ihtiyacını karşılayan en önemli tesislerden biri olan günlük 486.000 m<sup>3</sup> kapasiteye sahip Shuaiba Kuveyt Körfez sahilinde 2003 yılında devreye girmiş Shuaiba North Desalinasyon tesisidir. Bu tesis termal sistemlerin yüksek enerji tüketimine rağmen düşük doğalgaz fiyatlarından dolayı göreceli olarak uygun üretim maliyetlerine sahiptir. Kuwait

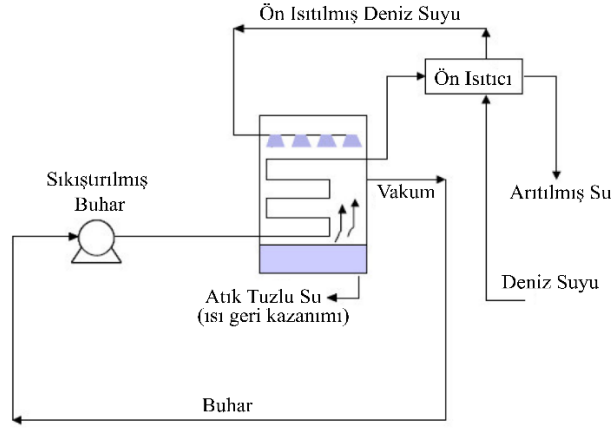
Ministry of Electricity and Water (NEW) raporlarına göre birim su maliyeti 1.10 – 1.40 USD/m<sup>3</sup> olarak yayınlanmıştır. Uzun borularla açık denize taşınan atık tuzlu su, Kuveyt körfezi için tehdit oluşturmaktadır. Ayrıca bu tesis, elektrik üretimi tesisi ile entegre olup, ısı enerjisini atık ısıdan karşılar. Bu sayede enerji verimliliğini artırarak maliyetleri düşürmektedir (AREWS, 2020-2023).

Başka bir tesis de Doha kıyılarında 2018 yılında A3 fazı ile birlikte devreye giren Katar'ın içme suyu ihtiyacını karşılayan Ras Abu Fontas A3 Desalinasyon tesisidir. En yeni ve verimli tesislerden biri olan bu tesis günlük 146.000 m<sup>3</sup> kapasiteye sahiptir. Bu tesis de Shuaiba North Desalinasyon tesisi gibi, termal sistemlerin yüksek enerji tüketimine rağmen düşük doğalgaz fiyatlarından dolayı göreceli olarak uygun üretim maliyetlerine sahiptir. Kahramaa (Katar Ulusal Su ve Elektrik Kurumu) raporlarına göre birim su maliyeti 1.20 – 1.50 USD/m<sup>3</sup> olarak yayınlanmıştır (AR, 2020- 2023).

MED teknolojisi, enerji geri kazanımı sağlayan sistemlerle entegre edilirse MSF tesislerine kıyasla enerji verimliliği açısından daha avantajlı olabilir. Örneğin, Abu Dabi kıyılarında bulunan 2022 yılında devreye giren günlük 950.000 m<sup>3</sup> kapasiteye sahip Al Taweelah Desalinasyon tesisinde, yüksek verimli enerji geri kazanım sistemlerinin kullanılması ve yenilenebilir enerji kaynaklarından güneş enerjisi ile entegrasyonu, TAQA (Abu Dhabi Future Energy Company) raporlarına göre birim su maliyeti 0.50 – 0.70 USD/m<sup>3</sup> olan, Orta Doğu'nun en düşük maliyetli büyük ölçekli desalinasyon tesislerinden kabul edilir (Jones, 2019; 1343-1356).

Türkiye'de, MED sisteminin termik santraller ve jeotermal kaynaklar ile entegrasyonu, düşük sıcaklıkta çalışması ile termal enerji kaynağı olarak kıyı şeritlerinde güneş enerjisinin kullanımı sistemi avantajlı kılar.

Buhar Sıkıştırılmalı Damıtma – VC (Vapor Compression Distillation): Bu yöntemde, Şekil 1.5'deki gibi deniz suyu buharlaştırılarak kompresör yardımı ile sıkıştırılır. Sıkıştırma işlemi ile buharın sıcaklığı ve basıncı artar. Sıkıştırılan buhar soğuk yüzeylerde yoğunlaşır. Yoğunlaşma sırasında açığa çıkan ısı sisteme giren deniz suyunu buharlaştırmak için kullanılır. Böylece enerji verimliliği artar.



**Şekil 1.5.** Buhar Sıkıştırırmalı Desalinasyon Sisteminin Şematik Gösterimi

**Kaynak:** (Eltavil ve Zhao, 2014)

Avantajları:

- Buharın kompresör yardımı ile sıkıştırılması sayesinde düşük enerji tüketimi sağlaması diğer desalinasyon yöntemlerine göre enerji verimliliği sağlar.
- Küçük ve orta ölçekli tesisler için oldukça uygundur.
- Enerji geri kazanımı sayesinde maliyetleri düşüktür.

Dezavantajları:

- Sistemin en pahalı bileşeni olan kompresörün bakımı maliyetlidir.
- Büyük ölçekli tesisler için uygun değildir.

Buhar Sıkıştırırmalı Damıtma, enerji tasarrufu ve esnek kullanım avantajları ile öne çıkan bir yöntemdir. Ancak sınırlı kapasitesi ve yüksek teknolojik gereksinimleri, özellikle büyük ölçekli projelerde kullanımını sınırlayabilir (Karahasanoğlu, 2010).

Buhar sıkıştırırmalı desalinasyon sisteminin başarılı bir şekilde kullanıldığı Ashkelon Desalinasyon tesisi günlük 320.000 m<sup>3</sup> kapasiteye sahip İsrail’de bulunur. Ancak buhar sıkıştırırmalı desalinasyon tesisleri enerji verimliliğini artırdığından genellikle hibrit sistemlerde tercih edilir (Al-Saidi ve Ellermann, 2024).

Türkiye’de VC sistemi küçük ve orta ölçekli uygulamalar için uygundur. Ancak yüksek elektrik tüketimi sistemin yaygın kullanılmasını sınırlayabilir.

**Tablo 1.2.** Termal Desalinasyon Sistemlerinin Kullanılabilirlik Açısından Karşılaştırması

<b>Kriter / Teknoloji</b>	<b>MED (Çok Etkili Distilasyon)</b>	<b>MSF (Çok Aşamalı Flaş Distilasyonu)</b>	<b>VC (Buhar Sıkıştırımlı Damıtma)</b>
<b>Spesifik Enerji Tüketimi</b>	1.5 – 2.5 kWh/m <sup>3</sup> (termal) + az elektrik	3.5 – 5.5 kWh/m <sup>3</sup> (termal) + az elektrik	7 – 12 kWh/m <sup>3</sup> (elektrik – kompresör bazlı)
<b>Çalışma Sıcaklığı</b>	60 – 70 °C	90 – 120 °C	70 – 90 °C
<b>Su Geri Kazanım Oranı</b>	%40 – %60	%25 – %40	%30 – %50
<b>Tuzlu Su Atığı (Brine)</b>	Orta	Yüksek	Düşük – Orta
<b>Sistem Karmaşıklığı</b>	Orta	Yüksek	Düşük – Orta
<b>Bakım ve İşletme Zorluğu</b>	Orta	Yüksek	Düşük
<b>Uygulama Ölçeği</b>	Orta – Büyük ölçekli	Çok büyük ölçekli (şehirler vs.)	Küçük – Orta ölçekli (gemiler, oteller)
<b>Enerji Kaynağı Uyumu</b>	Atık ısı, güneş termal, buhar	Atık ısı, fosil enerji	Elektrik (yenilenebilir ile uyumlu)
<b>Yatırım / İşletme Maliyeti</b>	Orta	Yüksek	Orta – Yüksek
<b>Modülerlik / Esneklik</b>	Orta	Düşük	Yüksek

**Kaynak:** (Ghaffour, 2013; 1-15; UNEP, 2022 ve ESMAP, 2020)

Tablo 1.2’de MSF (Çok Aşamalı Flaş Distilasyonu), MED (Çok Etkili Distilasyon) ve VC (Buhar Sıkıştırımlı Damıtma) teknolojileri karşılaştırılmıştır. Burada, su geri kazanım oranı işlenen deniz suyunun ne kadarının içilebilir suya dönüştüğünü gösterir. Çok Etkili Distilasyon – MED (Multi Effect Distillation) teknolojisinin suyun geri kazanımında en verimli olduğu görülür. MED düşük sıcaklıkta çalışması ve enerji verimliliği yönünden ön plana çıkan sistemdir. Ancak atık tuzlu su yönetimi geliştirilmelidir. Başlangıç maliyeti orta düzeydedir. MSF, büyük ölçekli tesisler için uygunluğu ve uzun ömürlü olması ile ön plana çıkmaktadır. Ancak enerji tüketiminin ve yatırım maliyetinin yüksek olması ve karmaşık bir sisteme sahip oluşu dezavantaj sağlar. VC, elektrik tabanlı, küçük ölçekli uygulamalara uygun, modüler bir yapıya sahiptir. Ancak yüksek elektrik ihtiyacı ve daha yüksek işletme maliyeti bu yönteme dezavantaj sağlar.

**Tablo 1.3.** Ticari Amaçlı Kurulmuş Tesislerin Kapasiteleri

TESİS	KONUM	Günlük Saf Su Üretimi (m <sup>3</sup> /gün)	Günlük Atık tuzlu su Miktarı (m <sup>3</sup> /gün)	Atık tuzlu su Geri Kazanımı Var Mı?	Kaynak
Jebel Ali	Dubai, BAE	250.000	100.000	Sadece deşarj	DEWA Raporları (2022), IDA
Yanbu	Suudi Arabistan	880.000	352.000	Bazı pilot projeler var	SWCC Raporları (2022), IDA
Shuaiba North	Kuveyt	486.000	194.400	Halen deşarj odaklı	MEW Raporları (2023), IDA
Ras Abu Fontas A3	Katar	146.000	58.400	Henüz yok	Kahramaa Raporları (2023)
Al Taweelah	BAE	950.000	380.000	Pilot projeler başlamış	TAQA Raporları (2023), IDA
Ashkelon	İsrail	330.000	132.000	Mevcut alt yapısı yok	IDE Technologies (2006), IDA

**Kaynak:** (Jones, 2019; ASR&DS, 2022-2023 ve AR, 2020-2023)

Tablo 1.3’de listelenen desalinasyon tesislerinde; atık tuzlu su genellikle denize uzun mesafeli pompalar ile seyreltilerek, dip akıntılara uygun yerlere deşarj yapılmaktadır. Çevre raporlarına göre yeterli yönetimi sağlanamasa da çalışmalar yürütülmektedir.

Bu tesisleri Türkiye koşullarında incelersek;

- Antalya, Mersin gibi bölgelerde güneş enerjisi destekli teknolojiler geliştirilebilir.
- Atık tuzlu su geri kazanım projeleri için Ar-Ge yatırımları yapılmalıdır.
- Atık tuzlu sudan, magnezyum, lityum gibi minerallerin çıkarılabileceği pilot projeler için üniversite-sanayi iş birliği kurulmalıdır.

### 1.3. Desalinasyon Teknolojilerinin Karşılaştırılması

Termal desalinasyon yöntemleri özellikle tuz konsantrasyonu yüksek olan deniz suları için etkili ve güvenilir bir yöntemdir. Yenilenebilir enerji kaynakları veya endüstriyel güç santralleri ile birleştirilirse enerji tüketim maliyetleri önemli ölçüde azaltılabilir. Ayrıca büyük

ölçekli tesislere uygunluğu ile de ön plana çıkmaktadır (Bayam, 1998; Mungan, 2021 ve Aydın ve Ardalı, 2021).

Diğer yandan termal desalinasyon yöntemlerine alternatif olarak ters ozmoz yöntemleri de tuzlu suyun kullanılabilir suya dönüşümünde kullanılan önemli desalinasyon yöntemlerinden biridir. Ters ozmoz yönteminde deniz suyu önce bir ön arıtma, daha sonra yüksek basınç altında yarı geçirgen bir membran içinden geçirilerek tuzdan arındırılır. Bu yöntemle deniz suyundan %99'a varan oranda tuzdan arındırma gerçekleşir. Ancak yüksek basınç nedeniyle enerji maliyetleri yüksektir. Arıtma esnasında membranların zamanla tıkanması veya yıpranması söz konusudur. Türkiye'de deniz suyunun biyolojik ve fiziksel kalitesi, özellikle yaz aylarında ters ozmoz sistemlerine zorluklar yaratır. Fitoplankton miktarı, tortu ve askıda katı madde oranı, mikrobiyolojik kirlilik ve organik kirleticiler (yağ, deterjan vb.) membranların tıkanmasına sebebiyet verdiği gibi ters ozmoz sistemlerinin ön arıtma maliyetlerini artırır. Ayrıca, membranın tıkanması basınç farkındaki artışa, membranın yıkanması su ve kimyasal tüketiminin artmasına ve membranın değiştirilmesi yıllık bakım maliyetinde %10-20 aralığında bir artışa sebebiyet verir (Bayam, 1998; Mungan, 2021 ve Aydın ve Ardalı, 2021).

Bunun yanı sıra termal desalinasyon sistemleri ile birlikte ters ozmoz yönteminin beraber kullanılması; enerji verimliliği, su kalitesi ve çevresel etkiler açısından avantaj sağlar. Örneğin, Birleşik Arap Emirlikleri'nde kurulu bulunan Fujairah 1 Desalinasyon Tesisi Multi Stage Flash Distillation (MSF) ve Reverse Osmosis (RO – Ters Ozmoz) yöntemleri ile birlikte kurulmuş hibrit bir tesistir. Bu tesis elektrik ve buhar üretimine yönelik entegre bir enerji santrali ile çalışır ve termal sistemden gelen atık ısı enerji tüketimini azaltmak için ters ozmozda kullanılır. Günlük 1.000.000 m<sup>3</sup> kapasiteye sahip olan bu tesis hibrit teknolojilerin potansiyelini göstermektedir (Al-Saidi ve Ellermann, 2024).

Termal sistemlerin yatırım maliyeti, membranlı sistemlere göre daha yüksek olmasına rağmen doğru enerji kaynağının ve uygun kurulum yerinin seçimi ile uzun vadede maliyet avantajı sağlar. Türkiye'de durumu bölgesel olarak incelemek gerekirse;

- Akdeniz Bölgesinde daha çok turizm ve tarım baskısı suya olan talebi artırır. Yüksek tuzluluk oranına sahip olması ve Akdeniz'in güneşlenme süresinin yüksek olması sebebiyle güneş enerjisi destekli termal desalinasyon sistemlerinin seçimi daha uygundur.

- Ege Bölgesinde sulama ve özellikle turizm bölgelerinde içme suyu ihtiyacı daha baskındır. Bu bölgelerde hibrit yani, termal desalinasyon sistemleri ile birlikte küçük çaplı ters ozmoz sisteminin kullanılması daha uygundur.
- Marmara Bölgesinde sanayi ve nüfus yoğunluğunun fazla olması suya olan ihtiyacı artırır. Tuz oranının Akdeniz ve Ege'ye göre daha az olması ve ihtiyaç olan bölgelere küçük ölçekli kurulabilmesi sebebiyle ters ozmoz sistemleri tercih edilebilir.
- Karadeniz Bölgesinde ise tuz oranı düşüktür. Bu sebeple ters ozmoz sisteminin kullanılması avantaj sağlar.

## **1.4. Türkiye'de Termal Desalinasyon Sistemlerinin Kullanılabilirliği**

### **1.4.1. Mevcut Teknolojik Altyapı ve Uygulamalar**

Türkiye üç tarafı denizlerle çevrili olması ve yenilenebilir enerji kaynakları imkanları olmasına rağmen desalinasyon teknolojilerinin kullanımı sınırlıdır. Küçük ölçekli, enerji maliyetlerinin daha düşük olduğu uygulamalar mevcuttur. Özellikle, Bodrum ve Çeşme gibi turistik bölgelerde küçük çaplı otellerde, Aliğa'da enerji santralleri ve petrokimya tesislerine proses suyu temini için ters ozmoz sistemleri kullanılmaktadır. Termal desalinasyon sistemleri yaygın olarak kullanılmamaktadır.

Ancak, Türkiye hem coğrafi konum itibariyle; güneş, rüzgâr ve jeotermal enerji kaynakları açısından zengin olması, hem de denizlerimizdeki tuzluluk oranının yüksek olması termal desalinasyon sistemlerinin kullanılabilirliğine avantaj sağlar. Daha detaylı incelemek gerekirse, coğrafi konum itibariyle üç tarafının denizlerle çevrili olması desalinasyon tesisleri için deniz suyunun kolayca temin edilebilmesini sağlar. Zengin yenilenebilir enerji kaynaklarının desalinasyon tesisleri ile entegrasyonu, sistem için gerekli olan ısıyı daha düşük maliyetle sağlar. Ayrıca termal desalinasyon tesislerinde kimyasal madde kullanımı çok azdır. Bu da çevresel sürdürülebilirlik açısından termal desalinasyon sistemlerinin kullanımına avantaj sağlar (Karahasanoğlu, 2010; Yıldırım ve Solmuş, 2014 ve Çalapkulu, 2020).

Karadeniz'de % 16-22, Marmara'da % 22-25, Ege'de % 38-40 ve Akdeniz'de % 39-41 tuzluluk oranlarına sahip ülkemizde termal desalinasyon sistemlerinin kullanılması, yüksek tuz konsantrasyonuna sahip deniz suları için etkili ve güvenilir bir yöntem olarak karşımıza çıkar (Mungan, 2021).

### 1.4.2. Termal Desalinasyonun Maliyet Analizi

Termal desalinasyon sistemlerinin maliyet analizinde, yatırım, işletme, bakım ve enerji tüketimi gibi parametrelere önem kazanmaktadır. Bu sistemlerin maliyet analizi, söz konusu teknolojinin uygulanabilirliğini ve sürdürülebilirliğini anlamak için önemlidir.

Deniz suyunun tuzlu yapısından ötürü desalinasyon sistemlerinde bakım maliyeti çok önemlidir. Bakım maliyetinin başında ekipman bakımı (ısı değiştiricileri, buharlaştırıcı, yoğunlaştırıcı gibi) gelir. Söz konusu ekipmanların deniz suyundan kireçlenme, tıkanma gibi problemlerine karşı düzenli temizlik ve bakım gerektirirler (Karagüzel, 2017; Aydın ve Ardalı, 2021 ve Mungan, 2021).

Termal sistemlerin en büyük gider kalemi enerjidir. Sistemlerin yenilenebilir enerji kaynakları ile entegrasyonu henüz yaygın olmadığından şu anki uygulamalarda genellikle doğalgaz veya sanayi atık ısıları tercih edilir. Ancak bu enerji kaynakları ile entegrasyonu hem çevresel sürdürülebilirlik hem de uzun vadeli maliyete önemli ölçüde etki eder. Bu kaynaklarının yakıt maliyeti olmadığından, sistemlerin uzun vadeli işletme maliyetleri azalır. Bu sebeple; karbon salınımlarının düşük olması, ithal fosil yakıtına bağımlılığın azalması ülkeler için stratejik önem sağlar.

Bir MED sistemi, MSF'ye göre daha düşük sıcaklıklarda çalıştığı için korozyon riski daha azdır ve böylece daha az aşınma ve yıpranma meydana gelir. Ayrıca, MED sistemine jeotermal veya güneş enerjisinin entegrasyonu enerji maliyetlerini önemli ölçüde azaltır (Jones, 2019). Örneğin, MED sistemlerine jeotermal kaynaklardan elde edilen düşük ve orta sıcaklık aralığı sistem gereksinimlerini karşılar. Mevsimsel dalgalanma göstermediği için sürekli enerji sağlar. Denizli Kızıldere mevkiinde 200°C üstü ve Aydın Germencik mevkiinde 180-230 °C jeotermal kaynak sıcaklığı hem elektrik hem de termal kullanım için uygundur. Manisa ve İzmir bölgelerinde bulunan jeotermal kaynak sıcaklığı 90-150 °C ise düşük ve orta derece sıcaklık termal desalinasyon sistemleri için uygun çalışma koşullarıdır.

Aynı zamanda, termal desalinasyon sistemleri için güneş enerjisi desteği, Antalya ili için yıllık ortalama güneşlenme süresi 3000 saat, Mersin için 2900 saat olması hem elektrik hem de termal kullanım için oldukça uygundur. Ege Üniversitesi eğitim ve araştırma amaçlı solar desalinasyon sistemi kurmuş ve vakum tüplü kolektörler ile beslenen küçük ölçekli MED ünitesinin çalışması incelenmektedir.

Örnek olarak; 10.000 m<sup>3</sup> kapasiteli bir termal desalinasyon sistemini enerji kaynağı olarak doğalgaz ve güneş enerjisine göre maliyet analizi karşılaştırılabilir.

**Tablo 1.4.** Yatırım Maliyetleri (CAPEX)

<b><u>BİLEŞEN</u></b>	<b><u>DOĞALGAZ DESTEKLİ SİSTEM</u></b>	<b><u>GÜNEŞ ENERJİLİ SİSTEM</u></b>
	<b><u>(TL)</u></b>	<b><u>(TL)</u></b>
<b>Ana Ekipmanlar</b>	17.600.000	17.600.000
<b>Isıtma Kaynakları</b>	500.000 (Doğalgaz kazanı)	4.000.000 (Güneş kolektörleri + depo)
<b>Elektrik/Otomasyon</b>	1.500.000	2.000.000 (aküler, inverter vb.)
<b>Kurulum ve Montaj</b>	2.000.000	2.500.000
<b>Arsa Hazırlığı</b>	1.000.000	1.000.000
<b>Toplam Brüt Yatırım Maliyeti</b>	22.600.000	27.100.000

**Kaynak:** (Jones, 2019; Ghaffour vd., 2013 ve Yıldız, 2020)

Tabloda görüldüğü gibi güneş enerjili sistemde güneş kolektörleri, depolama tankları ve elektrik sistemlerinden dolayı yatırım maliyeti yüksek olsa da uzun vadede enerji giderlerinde önemli tasarruf sağlar.

**Tablo 1.5.** Enerji Maliyetleri (OPEX)

<b>Sistem Türü</b>	<b>Enerji Tüketimi (kWh/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Fiyat (TL/ kWh)</b>	<b>Birim Maliyet (TL/ m<sup>3</sup>)</b>
<b>Doğalgaz Destekli</b>	80 kWh/ton	2.20	2.70 TL/ m <sup>3</sup>
<b>Güneş Enerjisi Destekli</b>	%60 güneş, %40 doğalgaz	-	1.30 TL/ m <sup>3</sup>

**Kaynak:** (Jones, 2019; Ghaffour vd., 2013; Yıldız, 2020 ve Karagündüz ve Şengör, 2020)

Güneş enerjili sistemde kış aylarında tam kapasite enerji sağlanamadığı koşullar göz önüne alınarak kısmi doğalgaz destekli kabul edilmiştir.

**Tablo 1.6.** Yıllık Su Üretim Maliyeti Karşılaştırması

Sistem Türü	Üretim Maliyeti (TL/ m <sup>3</sup> )	Yıllık Toplam Maliyet (10.000 m <sup>3</sup> /Gün X 365 Gün)
Doğalgaz Destekli	3.12 TL/ m <sup>3</sup>	11.388.000 TL
Güneş Enerjisi Destekli	1.72 TL/ m <sup>3</sup>	6.278.000 TL

**Kaynak:** (Jones, 2019; Ghaffour vd., 2013; Yıldız, 2020 ve Karagündüz ve Şengör, 2020)

Güneş enerjisi destekli sistem yaklaşık %45 daha düşük yıllık üretim maliyetine sahip olduğu görülmüştür.

**Tablo 1.7.** Amortisman ve Geri Ödeme Süresi

Parametre	Doğalgaz Sistemi	Güneş Enerjili Sistem
İlk Yatırım Maliyeti	10.000.000 TL	18.000.000 TL
Yıllık Operasyon Maliyeti	11.388.000 TL/yıl	6.278.000 TL/yıl

**Kaynak:** (Jones, 2019; Ghaffour vd., 2013; Yıldız, 2020 ve Karagündüz ve Şengör, 2020)

Yıllık operasyon maliyetine göre her iki sistem karşılaştırıldığında güneş enerjili sistem, doğalgaz destekli sisteme göre 5-6 yılda yatırımını geri ödemektedir. Ayrıca sistem çevre dostu olup iklim değişikliği hedeflerine uygunluk açısından daha avantajlıdır.

Sonuç olarak, doğalgaz destekli sistemin başlangıç maliyeti düşük, işletme maliyeti yüksek, sürdürülebilirliği az ve yüksek CO<sub>2</sub> emisyonu sağlarken; güneş enerjisi destekli sistemin başlangıç maliyeti orta, işletme maliyeti düşük, geri ödeme süresi kısa, sürdürülebilirliği çok yüksek ve düşük CO<sub>2</sub> emisyonu sağlaması güneş enerjisi destekli sistemleri avantajlı kılar. Özellikle büyük ölçekli tesisler için uygunluğu ön plana çıkmaktadır (Ghaffour vd., 2013; Yıldız, 2020 ve Demir ve Seçkin, 2022)

### 1.4.3. Çevresel Etkiler ve Atık Yönetimi

Desalinasyon prosesinde atık olarak ayrılan yoğun tuzlu suyun yeniden denize bırakılması, tuzluluk oranının yüksek olması sebebiyle deniz ekosistemine olumsuz etkiler yaratabilir. Ayrıca deniz suyunun sıcaklık değişimi de biyolojik çeşitlilik üzerinde stres oluşturabilir. Bu nedenle, tuzlu su atıklarının çevreye zarar vermeden bertaraf edilmesi veya yeniden kullanılması üzerine çeşitli yöntemler geliştirilmelidir.

Uluslararası Desalinasyon Birliği (IDA) ve çeşitli ülkelerin resmi raporlarına göre Dünya’da ortalama günlük atık tuzlu su üretimi, tatlı su üretiminden %50 daha fazla olup, toplam atık tuzlu suyun 141,5 milyon m<sup>3</sup>/gün olduğu görülmüştür. Kullanılan desalinasyon tesislerinde geri kazanım oranı atık tuz miktarını belirler. Geri kazanım oranı, besleme suyunun ne kadarının tatlı suya dönüştüğünü belirtir. Geri kazanım oranı ne kadar düşükse, atık tuzlu su o kadar fazladır. Örneğin, termal desalinasyon teknolojilerinde geri kazanım oranları düşük olduğu için atık tuzlu çıkışı daha fazladır (Karagündüz ve Şengör, 2020).

Desalinasyondan çıkan atık tuzlu su, deniz suyunun tuz ve mineraller açısından zenginleşmiş halidir. Bu atık suyun çevreye bırakılması ekosistemi olumsuz etkiler. Ancak kimya endüstrisinde, batarya üretiminde, tarımda tuz toleranslı bitkilerin sulama suyu veya yüksek tuzlulukta yetişebilen yosunların üretimi için, deniz ürünleri yetiştiriciliğinde ve enerji üretiminde kullanılması sürdürülebilir çözümler sunar. Örneğin, atık tuzlu sular kimyasal ürünlerin (magnezyum, lityum gibi) üretiminde kullanılabilir. İsrail’de kurulan bazı desalinasyon tesisleri atık tuzlu sudan gıda endüstrisinde veya karlı yollarda buzlanmaları çözmek amaçlı tuz üretmektedir. Avustralya’da bazı desalinasyon tesisleri ise atık tuzlu sudan inşaat, tarım ve kimya endüstrisi için magnezyum üretmektedir. Spirulina gibi tuza dayanıklı su yosunları ve halofit yem bitkilerinin yetiştiriciliğinde kullanılan tuzlu drenaj suyunun, tarım ve akuakültür sistemleri ile entegrasyonu ise balık biyokütlesini %300 oranında arttırdığı belirlenmiştir (Karagündüz ve Şengör, 2020).

Ayrıca, deniz suyunun alımı esnasında, deniz canlıları ve planktonlar su ile beraber çekilebilir. Deniz ekosisteminde, biyolojik çeşitliliğin azalmasında olumsuz rol oynar. Bu etkileri azaltmak için deniz suyu alımında filtreleme işlemleri yapılabilir. Bu filtreleme işlemleri genellikle çok katmanlı ön filtrasyon sistemleri; kum filtreleri veya biyolojik filtrelemeler olabilir. Deniz suyunun alımı esnasında deniz tabanına gömülü giriş yapılarının kullanılması, deniz suyu giriş hızının düşük tutulması gibi işlemlerle suyun alındığı bölgedeki canlı organizmaların çekilmesi minimize edilebilir (Karagündüz ve Şengör, 2020).

Türkiye’de kurulması planlanan termal desalinasyon sistemlerinin tuzlu su deşarjı konusunda deniz ekosistemine etkileri ve bu etkilerin spesifik sonuçları oldukça önemlidir. Örneğin, kapalı bir deniz olan, düşük basınç ve yüksek buharlaşma oranına sahip Akdeniz’de lokal olarak çok yüksek tuzluluk artışına neden olur. Atık tuzlu su deşarjı ciddi ekolojik bozulmalara yol açabilir. Bu sebeple; kristalizasyon teknolojileri ile atık tuzlu sudaki tuzu ve değerli mineralleri geri kazanmak mümkündür. Böylece atık miktarı azalır ve ekonomik değeri arttırır. Ülkemizin farklı bölgelerinde tuzluluk oranlarının farklı olması; doğru teknoloji seçimi,

stratejik deşarj uygulamaları ve Akdeniz, Karadeniz ve Ege için özel atık tuzlu su yönetimi politikaları ile riskler minimize edilebilir. Ancak bu sistemlerin kullanımı Türkiye’de henüz yaygın olmasa da çalışmalar yapılmaktadır. 2020 yılında “Deniz Suyu Arıtma Atık Sularından Değerli Kimyasalların Kazanımı” adlı bir TÜBİTAK Projesinde desalinasyon atıklarından NaCl, Mg(OH)<sub>2</sub> ve CaCO<sub>3</sub> geri kazanımı yapılmış ancak ticarileştirme aşamasına geçilememiştir (Demir ve Seçkin, 2022). Ege Üniversitesi Tarla Bitkileri Bölümü tarafından yapılan araştırmalarda, Salicornia bitkisinin sulama suyu olarak seyreltilmiş atık tuzlu su ile yetiştirilmesi test edilmiştir. Ancak henüz geniş ölçekli bir uygulama mevcut değildir (Yılmaz ve Enterpınar, 2021).

Ayrıca, Orta Doğu Teknik Üniversitesi Tarımsal Araştırmalar Genel Müdürlüğü tarafından yapılan çalışmalarda atık tuzlu su ile sulama yapılan topraklarda verim düşüşü ve toprak bozulmaları gözlemlenmiştir. Bu sebeple; seyreltme-rotasyon-izleme modelinin kullanılması önerilmektedir (DSİ, 2023).

## **1.5. Mevzuat Ve Politikalar**

### **1.5.1. Türkiye’de Desalinasyon Teknolojileri ile İlgili Yasal Düzenlemeler**

Türkiye’de desalinasyon teknolojileri ile ilgili doğrudan bir yasal düzenleme yoktur. Ancak, desalinasyon tesislerinin çevresel etkilerini minimize etmek, sürdürülebilir su yönetimini sağlamak ve tesislerin kurulumu ve işletilmesi konularında, genel çevre mevzuatı ve su yönetimi politikaları çerçevesinde bu teknolojilerin uygulanması ve denetlenmesi sağlanmaktadır.

Bu düzenlemeler özellikle kıyı bölgelerdeki projelerde büyük öneme sahiptir. Özellikle, Çevre Kanunu, Su Kirliliği Kontrolü Yönetmeliği ve Çevresel Etki Değerlendirmesi (ÇED) Yönetmeliği gibi düzenlemeler, desalinasyon tesislerinin kurulumu ve işletilmesi sırasında uyulması gereken esasları, çevresel etkilerini ve alınacak olan önlemleri belirler.

Desalinasyon tesislerinin planlanmasında, deniz suyunun korunması ve deniz ekosistemlerinin sürdürülebilirliği dikkatle incelenmektedir. Örneğin, Datça ve Bozburun bölgelerine kurulması planlanan desalinasyon tesislerinin kurulumuna karşı davalar açılmıştır. Bu davalarda projelerin uygulanacağı yerlerin 2863 sayılı Kültür ve Tabiat Varlıklarını Koruma Kanunu, Çevre Kanunu ve Barselona Sözleşmesi gibi ulusal ve uluslararası mevzuatla belirlenmiş duyarlı alanlar içinde veya yakınında bulunduğu, UNESCO Biyosfer Rezerv Alanı Statüsünde ve biyoçeşitlilik açısından hassas alanlar olduğu iddia edilmiştir. Söz konusu tesislere ait ÇED raporunda atık tuzlu su deşarjının seyreltilerek yapılacağı ve deniz tabanına

uzak boru hatlarıyla bırakılacağı belirtilse de çevreci gruplar ve yerel balıkçılar, raporda yer alan risk değerlendirmenin eksik olduğunu öne sürmüşlerdir. Bu sebeple, bu proje iptal edilerek yeniden ÇED çalışması yapılması istenmiştir. Bu durum, desalinasyon tesislerinin kurulmasında çevresel etkiler değerlendirilirken yasal düzenlemelerin önemini göstermiştir.

Türkiye'de su kaynaklarının verimli kullanımı ve sürdürülebilir yönetimi kapsamında, atık su deşarjı teşvik edilmekte ve bu konularda yasal düzenlemeler yapılmaktadır. Atık su deşarjının uygulanabileceği endüstriyel sektörler belirlenip, TÜBİTAK, KOSGEB gibi destekler ile geri dönüşümü teşvik edici düzenlemelerin yapılması, desalinasyon tesislerinde atık tuzlu su yönetiminin zorunlu hale getirilmesi önerilmektedir. Ayrıca su kaynaklarının verimli kullanımı ve sürdürülebilir yönetimini hedefleyen “Su Kanunu Tasarısı” henüz yasalaşmamış olmasına rağmen, Türkiye'nin gelecekte desalinasyon projelerinde su yönetimi ve sürdürülebilir kullanım açısından daha fazla önem vereceği anlaşılmaktadır (DSİ, 2023; SBB, 2024). Bu tasarı, Tarım ve Orman Bakanlığı tarafından hazırlanmış olup, kamuoyuna açılmıştır. Söz konusu tasarı, artan iklim krizleri karşısında su kıtlığına karşı stratejik planlama yapılmasını, atık tuzlu su yönetimi için uluslararası standartlara uyulmasını, geri kazanım teknolojileri için yeni girişimcilik ortamlarını ve Kamu-Özel-Akademi iş birliği içerisinde AR-GE projeleri için bir çerçeve sunar.

Sonuç olarak; desalinasyon uygulamaları için özel bir yasa veya yönetmelik hazırlanmalı, atık tuzlu su yönetimi için minimum standartlar belirlenmeli, hassas kıyı bölgelerinde atık tuzlu su deşarjı yasaklanmalı veya alternatif yöntemler zorunlu hale getirilmeli, ÇED sürecine bilimsel danışmanlık sistemi entegre edilmeli ve özellikle üniversitelerde desalinasyon ve atık tuzlu su yönetimi merkezleri kurulmalıdır.

### **1.5.2. Stratejik Planlamalar ve Yatırım Politikaları**

Türkiye, termal desalinasyon sistemlerine yönelik stratejik planlamaları ve yatırım politikaları, su kaynaklarının sürdürülebilir yönetimi ve su kıtlığı sorunlarının çözülmesi amacıyla çeşitli adımlar atmaktadır. Örneğin, Türkiye 2024-2028 yıllarını kapsayan stratejik planlarında su yönetimi konusunun önemine odaklanmıştır. Özellikle ülkemiz kişi başına düşen yıllık su miktarı (su stresi  $\leq 1.700$  m<sup>3</sup>/yıl) bakımından su stresi yaşayan ülkeler arasındadır. İklim değişikliği, nüfus artışı gibi küresel sorunlar su stresi sorununu daha da artırır. Bu da ülkenin; gıda üretiminin sınırlandırılmasına, temiz suya erişimin azalmasıyla sağlık sorunlarının ortaya çıkmasına, tarım ve endüstrideki üretim düşüşüne ve nüfus dağılımında dengesizliklere yol açabilir (SBB, 2024). Bu sebeple, su kaynaklarının artırılmasına yönelik sürdürülebilir su yönetimi, verimli sulama teknikleri ve desalinasyon teknolojileri gibi alternatif çözümler son

yıllarda gündeme gelmektedir. Ayrıca yenilenebilir enerji kaynaklarından elde edilen enerjinin, desalinasyon sistemlerinde kullanılması teşvik edilmektedir.

Bunun yanı sıra; vergi indirimi ve düşük faizli krediler gibi finansal destekler ve uluslararası kuruluşlar tarafından sağlanan, Avrupa Yatırım Bankası ve Dünya Bankası gibi kuruluşların su yönetimi konusundaki finansman ve teknolojik destekleri, Türkiye'nin desalinasyon projelerine yönelik yatırımlarını artırabilir (DSİ, 2023; SBB, 2024).

## 1.6. Geleceğe Dair Öneriler

Türkiye'de mevcut kullanılabilir su kaynaklarının sınırlı olduğu ve iklim değişikliğinin arttığı bu dönemde termal desalinasyon sistemlerinin kullanımı önem kazanmaktadır. Bu sistemlerin gelecekte daha etkin ve sürdürülebilir bir şekilde kullanılabilmesi için şunlar söylenebilir:

- Düşük enerji tüketen Multi-Effect Distillation (MED) gibi termal desalinasyon sistemlerinin kullanımı enerji verimliliği açısından önem arz etmektedir. Özellikle bu sistemlerin yenilenebilir enerji kaynakları ile entegrasyonu ve açığa çıkan ısının geri kazanımı hususunda geliştirilen sistemler enerji tüketimini önemli ölçüde azaltabilir.
- Türkiye coğrafi konum itibarıyla yenilenebilir enerji kaynakları açısından zengindir. Örneğin, termal desalinasyon sistemlerinin güneş panelleriyle desteklenmesi veya zengin jeotermal enerji kaynaklarına sahip ülkemizde yenilenebilir enerji kaynakları ile desteklenmesi söz konusu sistemlerin verimliliğini artırdığı öngörülmektedir.
- Termal desalinasyon sistemlerinin ters ozmoz gibi membran teknolojileri ile birleştirilmesi, kullanılabilir su üretiminde enerji verimliliğini artırabilir.
- Deniz suyunun tuzlu yapısından ötürü, uzun ömürlü, korozyona dayanıklı malzemeler tercih edilmelidir. Ayrıca ısı transfer malzemelerin yüksek performanslı tercihi de termal verimliliği artırabilir.
- Desalinasyon tesisleri yüksek miktarda enerji tüketir. Bu da genellikle bu tesislerde fosil yakıtların kullanımı karbon ayak izinin artmasına neden olur. Karbon ayak izinin azaltılması hususunda, düşük karbonlu teknolojiler, yani yenilenebilir enerji kaynakları tercih edilirse çevresel etkiler azaltılabilir.
- Termal desalinasyon teknolojilerinin geliştirilmesi ve verimliliğin artırılması hususunda Ar-Ge çalışmalarına yatırım yapılmalı, bu sistemlerin avantajları ve kullanım alanları ile ilgili farkındalık programları düzenlenmelidir.

- Günümüz teknolojisine uygun; sensörler aracılığıyla sistem elemanlarından veri toplayarak, bakım zamanlarını model tabanlı olarak belirlemek, ısı transfer hızı ve buhar basıncı gibi parametreleri optimize etmek, farklı enerji kaynaklarıyla çalışan hibrit sistemler arasında geçiş yapabilen kontrol mekanizmaları kurmak mümkündür. Bu doğrultuda, yapay zekâ entegrasyonu sayesinde enerji tüketimi ve bakım maliyetleri önemli ölçüde azaltılabilir.
- Türkiye'nin farklı bölgelerinde termal desalinasyon sistemlerinin uygulanabilirliğini ve etkinliğini değerlendirmek amacıyla pilot projeler yürütülebilir, ayrıca bölgesel iklim ve enerji kaynaklarına uygun sistem tasarımları önerilebilir. Böylece en verimli sistem tasarımı belirlenir, su kalitesi ve enerji kaynaklarına göre çözümler geliştirilir ve kamu – zel – niversite iş birlikleri güçlendirilir. Örneğin, Antalya Türkiye'nin en yüksek güneşlenme süresine sahip illerden biridir ve Akdeniz'in tuzluluk oranı yüksektir. Bu sebeple, bu bölgede DSİ, Antalya Büyükşehir Belediyesi, Akdeniz niversitesi ve yerel Solar enerji firmaları iş birliği ile güneş enerjisi destekli MED sistemi kurulabilir.

Bu teknolojik gelişmeler, sürdürülebilir su yönetimini destekleyen Türkiye'nin su kıtlığı sorunlarına çözüm sunabilir. Ayrıca, termal desalinasyonun yenilikçi yaklaşımlarıyla daha ekonomik hale getirilmesi, yaygın kullanımını teşvik edebilir.

## 2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Desalinasyon sistemlerinin incelenmesi; termodinamik performansının değerlendirilmesi ve iyileştirilmesi adına çok sayıda çalışmalar yapılmıştır. Bu çalışmalardan bazıları aşağıda özetlenmiştir.

Suudi Arabistan'ın Yanbu şehrinde kurulan doğalgaz yakıtlı elektrik üretim santralleriyle entegre çalışan Çok Kademeli Flaş (MSF) desalinasyon tesisinin ekserji analizi yapılarak, tesisin ekserji yıkımları ve ikinci yasa verimliliği analiz edilmiştir. Sonuçlara göre tesisin ikinci yasa verimliliği %3.22 iken yüksek kapasitede çalıştığında bu değer %2.84'e düştüğü görülmüştür. Tesiste ekipman bazında ekserji yıkımları hesaplanmış ve ekserji yıkımının meydana geldiği bileşenler tespit edilerek, en çok ekserji yıkımının kondenserde olduğu görülmüştür. (Hamed vd., 2009; 726-733).

Termal desalinasyon sistemlerinin ekserjetik olarak incelenmesini amaçlayan, ısı kaynağı olarak doğalgaz yakıtlı bir termik santralden gelen buharı kullanan bir başka çalışmada ise, tesislerinin performansını sınırlayan bileşenler belirlenmiş ve bu bileşenlerin iyileştirilmesine yönelik çözümler sunulmuştur. Ayrıca, nemlendirme-nem alma gibi sistemlerin dahil edilmesi termal desalinasyon tesislerinde enerji tüketimini azaltmak ve verimliliği artırmak gibi çözümler ortaya konmuştur (Zahid vd., 2022).

Desalinasyon teknolojilerinin ekserji analizini yapan bir çalışmada; Çok kademeli Flaş (MSF), Çok Etkili Damıtma (MED), Çok Etkili Damıtma -Termal Buhar Sıkıştırma (MED-TVC), Ters Ozmoz (RO), Güneş distilasyonu ve membran distilasyonu gibi çeşitli desalinasyon teknolojilerinin termodinamik verimliliği incelenmiş ve iyileştirme alanları belirlenerek, enerji tüketiminin azaltılması ve sistem performansının artırılması hususunda hibrit sistemlerin geliştirilmesi gibi çözümler sunulmuştur (Jamil vd., 2020).

Nemlendirme- Nem alma (HDH) desalinasyon sistemlerinin ekserji analizini yapan bir çalışmada, sistemin farklı koşullar altında performansı incelenmiştir. Hava ve suyun ısıtıldığı HDH çevrimleri analiz edilmiş, GOR ve ekserjetik verimleri belirlenmiştir. Sonuçlar sistem tasarımında ve işletiminde iyileştirmeler yapılmasına olanak sağlamıştır (Tourab vd., 2024).

Termal buhar sıkıştırma (TVC) ile desteklenmiş desalinasyon sisteminin her bir noktasındaki entalpi, debi ve sıcaklık değerleri alınarak birinci ve ikinci yasa analizlerini inceleyen bir çalışmada, sistemin performansını değerlendirmek ve enerji kayıplarını belirlemek amaçlanmıştır. Sistem için matematiksel model geliştirilmiş ve sıcaklık farkları,

brine üretim oranları ve TVC verimliliği test edilmiştir. Sistemin TVC entegrasyonun termal sistemin verimini %30-40 oranında artırdığını göstermiştir (Hamed vd., 1999).

Ters ozmoz (RO) desalinasyon sistemlerinde kullanılan ekserji verimlilik tanımları karşılaştırılarak termodinamik kayıplar Wang vd. tarafından saptanmıştır. Bu kayıplardan bazıları; basınç düşümü ve pompa verimsizlikleri, membranlardaki entropi artışı, brine atımı sırasında ısıl enerji kaybı ve kimyasal arıtıma, ön temizlik süreçleri gösterilerek, bu kayıplara dair: enerji geri kazanım cihazlarının kullanılması; basınç kayıplarının minimize edilmesini, yeni nesil grafen oksit, karbon nanotüp gibi sürtünme kayıplarını azaltan membranları tasarlanması, giriş suyu sıcaklığı ortam sıcaklığına yakın tutulması, kimyasal kullanımını azaltmak için ön arıtma sisteminin iyileştirilmesi ve hibrit sistemlerin tercih edilmesi gibi çözüm önerileri sunulmuştur. (Wang vd., 2025).

Güneş enerjisi destekli çok kademeli distilasyon sistemlerinin farklı konfigürasyonlarla enerji, ekserji ve termo-ekonomik analizini yapan bir çalışmada 100m<sup>3</sup>/gün kapasiteli bir tesis için iki farklı sistem incelenmiştir. İlk olarak ısı kaynağı olarak parabolik oluk kolektörü (PTC) ile ısıtılan yağ MED sistemine gönderilir ve desalinasyon sağlanır. Diğer bir sistemde ise güneş enerjisi ile çalışan organik rankine çevrimi (ORC) türbini ile hem elektrik üretilir hem de desalinasyon yapılır. Türbinden çıkan atık enerji MED sistemine gönderilir. İki sistemi de ayrı ayrı inceleyen bu çalışmada parabolik oluk kolektörü ile birleştirilen desalinasyon sisteminin daha düşük maliyeti ve yüksek verimlilik sunarken, diğer sistem ise elektrik üretimi ile ekstra fayda sağladığı ancak sistemin karmaşıklığı ile maliyetinde artışın görüldüğü gözlemlenmiştir (Naminezhad ve Mehregan; 2022).

Saidur vd tarafından yapılan bir çalışmada güneş enerjisi ile çalışan bir distilasyon sisteminin, enerji, ekserji ve termo-ekonomik analizini yapılarak; geleneksel fosil yakıtlarının yerine basit güneş distilasyon sisteminin kullanılmasının daha enerji tüketimine olanak sağladığı vurgulanmaktadır. Bu sistemin enerji verimi %20-46 iken, ekserji veriminin tek kademeli de %5'in altında olduğu görülür. Çok kademeli düzende (örneğin 3 kademe) ise ekserji veriminin %26'ya çıkacağı saptanmıştır. Ancak söz konusu sistemde her ne kadar güneş enerjisinin kullanımını enerji tüketimini azaltsa da kurulum ve işletme maliyetlerinin yüksek olduğu vurgulanmıştır (Saidur vd., 2012).

Mekanik buhar sıkıştırımlı bir desalinasyon sisteminin ekserji analizi ve eşdeğer elektrik tüketimi ile enerji analizi yapılmıştır. Ayrıca sermaye maliyeti, maliyet endeks faktörü gibi ekonomik parametreler; pompa, kompresör, ısı değiştirici, evaporatör, flaş odası, nemlendirici ve nem alma cihazları gibi tüm bileşenlerin maliyeti ayrı ayrı incelenmiştir. Isı

kaynağı olarak doğalgazla çalışan bir termik santralden gelen buharı kullanarak tek etkili ve çok etkili MVC sistemleri için termodinamik ve ekonomik analizler yapılmış farklı besleme düzenleri (ileri, paralel, çapraz besleme gibi) karşılaştırılmıştır. Sonuç olarak, en düşük maliyetli sistemin paralel besleme düzeninde olduğu, çok etkili sistemin su üretim maliyetinin tek etkili sisteme göre daha az olduğu görülmüştür. Ayrıca termoeconomik analiz, yalnızca toplam maliyeti değil, aynı zamanda bileşen düzeyinde iyileştirme potansiyeli sağladığı görülmüştür (Sharaf vd., 2018).

Paralel beslemeli çok etkili bir desalinasyon sistemine su enjeksiyonlu çift vidalı kompresör entegre edilerek sistemin enerji, ekserji ve ekonomik performansı geliştirmek hedeflenmiştir. Engineering Equation Solver (EES) yazılımı ile modellenerek, enerji, ekserji, denge denklemleri analiz edilmiştir. Konveksiyonel kompresörlü yapı ile çift vidalı kompresörlü yapının performansları karşılaştırılmıştır. Enerji tüketiminin çift vidalı kompresörde %15.3 daha düşük olduğu, ekserji veriminde ise %14.9-17.3 oranında artış olduğu, su üretim maliyetinin ise %14 düştüğü görülmüştür (Shamet ve Antar, 2024).

Sprey destekli düşük sıcaklıklı desalinasyon (SLTD) sistemine termal buhar sıkıştırma (TVC) entegre ederek enerji verimliliğini artırmayı hedefleyen bir çalışmada, sistem detaylı bir şekilde termodinamik olarak modellenerek, enerji, ekserji ve ekonomik açıdan analiz edilmiştir. Sistem sanayi proseslerinden ve elektrik üretim santrallerinden kalan atık ısı ile beslendiği için TVC ile entegrasyonu sisteme daha az ısı girdisi gerektirir. Bu sayede daha az enerji tüketerek, üretim verimliliğini artırdığı saptanmıştır. Ayrıca sistemin işletme ve bakım maliyetlerini azalttığı, bu sayede entegre sistemin ekonomik açıdan uygulanabilir ve sürdürülebilir olduğu görülmüştür (Chen vd., 2018).

Doğalgaz ile çalışan bir santralden gelen buharı termal ısı kaynağı olarak kullanan başka bir çalışmada, Çok Etkili Damıtma -Termal Buhar Sıkıştırma (MED-TVC) sisteminin termoeconomik analizi yapılarak, toplam maliyetin yaklaşık %30'unu TVC ünitesinin oluşturduğu, ekserji verimliliğinin ise %40-50 olduğu görülmüştür (Elsayed vd., 2018).

Isı kaynağı olarak doğalgaz, güneş enerjisi ve atık ısı kullanan; Çok kademeli Flaş (MSF), Çok Etkili Damıtma (MED), Çok Etkili Damıtma -Termal Buhar Sıkıştırma (MED-TVC), Buhar Sıkıştırmalı Damıtma (VC) ve Ters Ozmoz (RO) gibi desalinasyon sistemlerini teknolojik olarak inceleyen bir çalışmada, MED sistemlerinde %15-25, MED-TVC sistemlerinde ise %30-40 ekserji verimliliğinin sağlandığı, termal sistemlerin maliyetinin ise membranlı sistemlere göre daha yüksek olduğu vurgulanmıştır (Kalidasan vd., 2021).

Doğalgaz ve termal santral atık ısı ile çalışan bir Çok Etkili Damıtma (MED) tesisinin bileşen bazlı termo-ekonomik analizini yapan bir çalışmada, ekserji verimliliğinin ise %20-30 olduğu, optimal efekt sayısının 6 ile 8 arasında ideal olabileceği vurgulanmıştır (Sayyadi ve Saffari, 2010).

Doğalgaz ile çalışan hibrit Çok Etkili Damıtma (MED) + Ters Ozmoz (RO) sistemini inceleyen bir çalışmada, ekserji verimliliğinin %35 olduğu, hibrit yapıların uzun vadede daha verimli olduğu vurgulanmış, ayrıca MED kısmında atık tuzlu su miktarının daha yüksek olduğu görülmüştür (Mohammad ve Mehrpooya, 2017).

Doğalgaz ile çalışan bir termik santralden gelen atık ısıyı kullanan bir Çok kademeli Flaş (MSF) desalinasyon tesisini inceleyen başka bir çalışmada ise, ekserji verimliliğinin %10-15 arasında hesaplanmıştır. En fazla kaybın yoğunlaştırıcı ve atık tuzlu su deşarjında olduğu vurgulanmış, atık tuzlu suyun kimyasal çöktürme ve sulama için değerlendirmeler önerilmiştir (Al-Hamahmy vd., 2016).

Güneş enerjisi ile çalışan bir vakum membran damıtmasının enerji analizini inceleyen bir çalışmada, sistemin enerji performansının güneş ışınlamıyla doğrudan bağlantılı olduğu ve sistem güneş enerjisi ile entegre edildiğinde, ters ozmoz (RO), Çok kademeli Flaş (MSF) ve Çok Etkili Desalinasyon sistemleri ile rekabet edebileceği gösterilmiştir (Miladi vd., 2019).

### 3.MATERYAL VE YÖNTEM

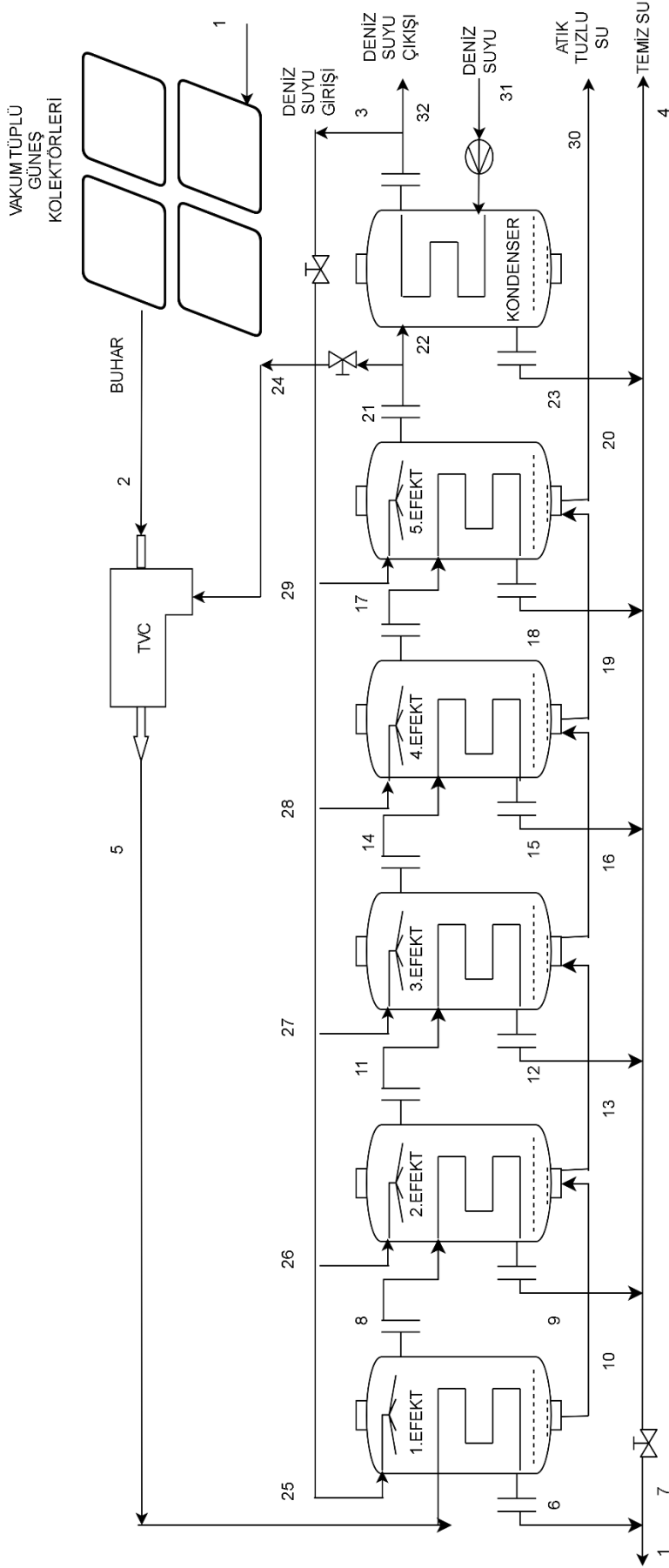
#### 3.1.Sistem Tanımı ve Bileşenleri

Bu çalışmada, Antalya ili için termal enerji kaynağını vakum tüplü güneş kolektörlerinden sağlayan 5 efektli desalinasyon sisteminin termo-ekonomik analizi incelenmiştir. Ayrıca vakum tüplü güneş kolektörleri yerine parabolik oluklu kolektörler kullanılarak performans karşılaştırılması yapılmıştır.

Şekil 3.1’de görüldüğü gibi, ilk olarak deniz suyu kondensere girerek son efektten gelen doymuş buhar ile ön ısıtmaya tabi olur. Isıtılan deniz suyunun bir kısmı beslenme deniz suyuyla eş değer bir kütlede sisteme dağıtılır, geri kalanı da denize geri döner. Sistemde termal enerji vakum tüplü güneş kolektörlerince sağlanır. Bu ısı suyun buharlaştırılması için kullanılır. Oluşan buhar TVC tarafından sıkıştırılarak basıncı ve sıcaklığı arttırılır. Sıkıştırılmış buhar ilk efektteki deniz suyunu buharlaştırır. İlk efektteki buharlaşan deniz suyu nispeten daha düşük sıcaklık ve basınçtaki diğer efektlere sırasıyla geçerek bu efektler için bir ısı kaynağı görevi yapar ve deniz suyunu buharlaştırmayı sağlar. Her bir efektte yoğunlaşan buhar tatlı su olarak toplanır. Atık tuzlu su da ayrıca ayrılır. .

Sistem;

- Kararlı bir koşulda çalışır.
- Sistem bileşenlerinde basınç düşüşleri ve ısı kayıpları önemsiz kabul edilir.
- Potansiyel ve kinetik enerjileri ihmal edilebilir düzeydedir.
- Deniz suyunun tuzluluğu sabittir.
- Damıtılmış ürün tuzsuzdur.



Şekil 3.1. Sistem Tanımı

Antalya ili koşulları dikkate alınarak sistemin enerji ve ekserji analizinde varsayılan parametreler göre Tablo 3.1’de verilmiştir.

**Tablo 3.1.** Sistem Giriş Parametreleri

Parametre	Değer
Ortam sıcaklığı, T <sub>0</sub> , (K)	298.15
Ortam basıncı, P <sub>0</sub> , (kPa)	101.3
Tahrik buhar basıncı, P (kPa)	2000
Tahrik buharı akış oranı (kg/s)	10.62
İlk efekt sıcaklığı, (°C)	60 (Vakum Tüplü) 70 (Parabolik Oluklu)
Son efekt sıcaklığı (°C)	45 (Vakum Tüplü) 50 (Parabolik Oluklu)
Tuzluluk oranı (ppm)	38000
Max tuzluluk oranı (ppm)	70000
Deniz suyu giriş sıcaklığı (°C)	30
Besleme deniz suyu sıcaklığı (°C)	40
Kolektör alanı (m <sup>2</sup> )	1600
Güneş ışınımı (kWh/ m <sup>2</sup> )	6
Kolektör verimi (vakum tüplü)	0.65
Kolektör verimi (parabolik oluklu)	0.75
Kolektör çıkış sıcaklığı (K)	490.6
Çalışma süresi	6 h/gün , 300 gün/yıl
Referans T <sub>Güneş</sub>	5777 K

Sistemin termoekonomik analizinde kullanılan parametreler ise Tablo 3.2’de verilmiştir

**Tablo 3.2.** Termoekonomik Analizde Kullanılan Parametreler

Parametre	Değer
Ortam sıcaklığı, T <sub>0</sub> , (K)	298.15
Ortam basıncı, P <sub>0</sub> , (kPa)	101.3
Faiz Oranı (TCMB, 2024)	%7-10
Elektrik fiyatı (\$/kWh) (EPDK, 2025)	0.10

### 3.2. Termodinamik Analiz

Sistemin enerji analizi, her noktadaki entalpi ve kütleli debi değerleri kullanılarak yapılmıştır. Toplam ısı girdisi ve çıktısı hesaplanmıştır (Menasri vd., 2022; 54-67; You vd., 2019; 286-298).

Efektler arasındaki sıcaklık farkı:

$$\Delta T = \frac{T_1 - T_n}{n-1} \quad (3.1)$$

Tuzluluk oranı (g/kg):

$$X = \frac{X_{max}}{X_{max} - X_{ds}} \quad (3.2)$$

Her bir efektteki kütle denkliği:

$$\dot{m}_{B,1} = \dot{m}_{ds,1} - \dot{m}_{D,1} \quad (3.3)$$

$$\dot{m}_{B,i} = \dot{m}_{ds,i} + \dot{m}_{B,i-1} + \dot{m}_{D,i} \quad i = 2,3,\dots,n \quad (3.4)$$

Tatlı su üretimi:

$$\dot{m}_{\text{üretilen su}} = \dot{m}_7 + \dot{m}_9 + \dot{m}_{12} + \dot{m}_{15} + \dot{m}_{18} + \dot{m}_{23} \quad (3.5)$$

### 3.2.1. Enerji Analizi

Genel enerji denkliği şu şekildedir:

$$\Sigma \dot{Q} + \Sigma \dot{W} + \Sigma \dot{m}_{giris} \left( h + \frac{v^2}{2} + gz \right) = \Sigma \dot{m}_{çıkış} \left( h + \frac{v^2}{2} + gz \right) \quad (3.6)$$

Ancak desalinasyon sistemlerinde; potansiyel ve kinetik enerjilerinin ihmal edilebilir düzeyde olması, dışarıdan iş akışının olmaması ve sistemin kararlı halde çalışması ile, sistemin enerji analizi her noktadaki entalpi (h) ve kütleli debi ( $\dot{m}$ ) değerleri kullanılarak hesaplanır:

$$\Sigma \dot{Q} + \Sigma \dot{m}_{giris} h = \Sigma \dot{m}_{çıkış} h \quad (3.7)$$

Deniz suyunun özgül ısısı  $c_{p,ds}$ , tuzluluk oranına bağlı olarak Sharqawy vd. tarafından önerilen denklem (3.8) kullanılarak hesaplanmıştır:

$$c_{p,ds} = c_{p,s} \cdot (1 - 0.653 \cdot X) + 0.197 \cdot X^2 \quad (3.8)$$

Böylelikle her bileşenin enerji analizi aşağıdaki gibidir:

1.Efekt:

$$\dot{m}_5(h_5 - h_6) = \dot{m}_8(h_8 - h_{25}) + \dot{m}_{10}c_{p,25,ds}(T_{10} - T_{25}) \quad (3.9)$$

2.Efekt:

$$\dot{m}_8(h_8 - h_9) + \dot{m}_{10}c_{p,10,ds}(T_{10} - T_{13}) = \dot{m}_{11}(h_{11} - h_{26}) + \dot{m}_{13}c_{p,26,ds}(T_{13} - T_{26}) \quad (3.10)$$

3.Efekt:

$$\dot{m}_{11}(h_{11} - h_{12}) + \dot{m}_{13}c_{p,13,ds}(T_{13} - T_{16}) = \dot{m}_{14}(h_{14} - h_{27}) + \dot{m}_{16}c_{p,27,ds}(T_{16} - T_{27}) \quad (3.12)$$

4.Efekt:

$$\dot{m}_{14}(h_{14} - h_{15}) + \dot{m}_{16}c_{p,16,ds}(T_{16} - T_{19}) = \dot{m}_{17}(h_{17} - h_{28}) + \dot{m}_{19}c_{p,28,ds}(T_{19} - T_{28}) \quad (3.13)$$

5.Efekt:

$$\dot{m}_{17}(h_{17} - h_{18}) + \dot{m}_{19}c_{p,19,ds}(T_{19} - T_{20}) = \dot{m}_{21}(h_{21} - h_{29}) + \dot{m}_{20}c_{p,29,ds}(T_{20} - T_{29}) \quad (3.14)$$

Kondenser:

$$\dot{m}_{22}(h_{22} - h_{23}) = \dot{m}_{31}c_{p,31,ds}(T_3 - T_{31}) \quad (3.15)$$

TVC:

$$\dot{m}_2 \cdot h_2 + \dot{m}_{24} \cdot h_{24} = \dot{m}_5 \cdot h_5 \quad (3.16)$$

### 3.2.2. Ekserji Analizi

Hız ve yükseklikteki değerlerin önemsiz olması nedeniyle potansiyel ve kinetik ekserjileri ihmal edilerek, Carnot verimliliği temel alınarak, her noktadaki enerjinin işe dönüşebilen kısmı hesaplanmıştır. Bu analiz sayesinde sistemin hangi bileşeninde ne kadar entropi artışı olduğu belirlenmiştir. Toplam ekserji aşağıdaki denklemde verildiği gibi dört kısma ayrılabilir (Naminezhad ve Mehregan, 2022; 888-903; Sharqawy vd., 2011; 187-196)

$$\dot{E}_X = \dot{E}_{ke} + \dot{E}_{pe} + \dot{E}_{ph} + \dot{E}_{ch} \quad (3.17)$$

Burada;  $\dot{E}_{ke}$ ,  $\dot{E}_{pe}$ ,  $\dot{E}_{ph}$  ve  $\dot{E}_{ch}$  sırasıyla kinetik, potansiyel, fiziksel ve kimyasal ekserjilerdir. Kinetik ve potansiyel, fiziksel ve kimyasal ekserjilere kıyasla önemsiz etkileri nedeniyle ihmal edilebilir düzeyde kabul edilir.

Fiziksel ve kimyasal ekserji sırasıyla şu şekilde ifade edilebilir:

$$\dot{E}_{ph} = \dot{m} \cdot e_{ph} = \dot{m} \cdot [(h_s - h_0) - T_0(s_s - s_0)] \quad (3.18)$$

$$\dot{E}_{ch} = \dot{m} \cdot e_{ch} = \dot{m} \sum \omega_i (\mu_i - \mu_i^0) \quad (3.19)$$

Bu denklemde,  $\omega$  mol değerini,  $\mu$  ise kimyasal potansiyel değerini gösterir.

Kimyasal ekserji, sistemin çevreye göre kimyasal potansiyel farkını ölçer ve bu farkı hesaplamak için Gibbs serbest enerji denklemleri kullanılır. Bu hesaplama, desalinasyon tesislerinde tuzlu suyun işlenebilmesi için gerekli enerjiyi belirlemek açısından önemlidir. Buna göre kimyasal ekserji denkliği:

$$\mu_i = G_i = H_i - T_0 S_i \quad (3.20)$$

$$\dot{E}_{ch} = \dot{E}_{ch,H_2O} + \dot{E}_{ch,NaCl} \quad (3.21)$$

**Ekserji Yıkımı**; sistemin her noktasındaki tersinmezlik nedeni ile işe dönüşemeyen enerji miktarını gösterir. Bu değer, entropi üretimi ile doğrudan ilişkili olup:

$$\dot{E}_{x,yıkım} = T_0 \cdot S_{gen,k} \quad (3.22)$$

Sistemimizde her bir bileşenin giriş ve çıkışındaki ekserji farkı üzerinden de hesaplanabilir:

$$\dot{E}_{x,yıkım} = \dot{E}_{x,giriş} - \dot{E}_{x,çıkış} \quad (3.23)$$

Ekserji verimliliği:

$$\eta_{ex} = \frac{\dot{E}_{x,faydalı}}{\dot{E}_{x,giriş}} \quad (3.24)$$

Buradaki  $\dot{E}_{x,faydalı}$  sistemin çıkışında elde edilen ve kullanılabilir olan enerji miktarını ifade eder.

### 3.2.3. Güneş Kolektörleri

Bu çalışmada, vakum tüplü güneş kolektörleri tercih edilmiştir. Bu kolektörler iç içe iki borudan oluşan, iç borunun emici yüzeyli, dış borunun vakumlu olduğu, vakumlu dış boru sayesinde ısı kayıplarının çok düşük olduğu yüksek verimli güneş kolektörleridir. Ayrıca, termal desalinasyon sistemlerinde sıcak su veya buhar üretimi için uygun sıcaklık aralığını sağlaması ve uzun ömürlü olması tercih sebebidir.

Güneş kolektörlerin enerji ve ekserji analizi aşağıdaki gibidir (Sheta vd., 2023; 89-105; Bellos ve Tzivanidis, 2017; 59-70):

$$\dot{Q}_{güneş} = \eta \cdot A \cdot I \text{ (kWh/gün)} \quad (3.25)$$

$$\dot{E}_{x,güneş} = \dot{Q}_{güneş} \cdot \left(1 - \frac{T_0}{T_s}\right) \quad (3.26)$$

### 3.2.4. Termoekonomik Analiz

Termoekonomik analiz, sistemin hem termodinamik verimliliğini hem de ekonomik maliyetini birlikte değerlendiren bir yöntemdir (Panagopoulos, 2019; 473-495; Eshoul, 2018; Elsayed vd., 2018; 29-42 ve Sayyaadi ve Saffari, 2010; 1122-1133). Bu analizde:

- Sistemdeki her bileşenin ekserji yıkımı hesaplanır.
- Bu ekserji kayıplarına göre maliyet analizi yapılır.
- En verimsiz ve en yüksek maliyete sahip bileşenler belirlenir.
- Optimizasyon için iyileştirme önerileri sunulur.

Sistemimiz; Güneş kolektörleri, Evaporatör efektleri (1-5), TVC ünitesi ve pompa bileşenlerinden meydana gelmektedir. Isı kaynağı ise vakum tüplü güneş kolektörlerinden sağlanmaktadır.

Amortisman oranı CRF aşağıdaki ifade ile hesaplanabilir:

$$CRF = \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \quad (3.27)$$

Burada,  $i$  faiz oranını,  $n$  ise ekonomik ömrü ifade etmektedir.

Yıllık sermaye maliyeti ise amortisman oranı ile sistemin toplam ilk yatırım maliyeti olan  $C_{sermaye}$  kullanılarak:

$$Z = CRF \cdot C_{sermaye} \quad (3.28)$$

Toplam yıllık maliyet, yıllık sermaye maliyeti ve bakım onarım maliyetlerinin toplamıdır:

$$C_{yıl} = Z + C_{O\&M} \quad (3.29)$$

Buradaki  $C_{O\&M}$  işletme ve bakım giderlerini ifade etmektedir.

Yıllık ekserjiye dayalı maliyet analizi toplam maliyetin ekserjiye oranıdır:

$$\dot{C}_{ex} = \frac{C_{yıl}}{\dot{E}_{x,yıl}} \quad (3.30)$$

Birim su maliyeti hesabı:

$$TWP = \frac{\text{Toplam yıllık maliyet}}{\text{Günlük saf su üretimi} \times 300} \quad (3.31)$$

#### 4. BULGULAR

Sistemin termodinamik analizi, her işlem noktasında enerji ve ekserji denkliklerinin kurulmasıyla gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda, MED-TVC sistemi içindeki tüm akışkan noktaları için hal değişkenleri; sıcaklık (K), basınç (kPa), termodinamik özellikler; entalpi (kJ/kg), entropi (kJ/kgK), kütleli debiler (kg/s), tuzluluk oranları (g/kg) ve ekserji (MW) değerleri hesaplanmıştır. Tablo 4.1.'de vakum tüplü güneş kolektörleriyle desteklenen sistem ve Tablo 4.2.'de parabolik oluklu güneş kolektörü ile desteklenen sistem konfigürasyonlarına ait bu değerler sunulmuştur.

**Tablo 4.1.** Vakum Tüplü Güneş Kolektörü Destekli Desalinasyon Sistemine Ait Akış Noktalarındaki Termodinamik Özellikler ve Analiz Sonuçları

Nokta	Akışkan	T(K)	P(kPa)	h(kJ/kg)	s(kJ/kgK)	ṁ (kg/s)	X (g/kg)	Ekserji (MW)
1	su	333.4	20.12	251.965	0.834	10.62	0	0.08420545
2	su	490.6	2000	2814	6.371	10.62	0	9.76092059
3	deniz suyu	313.15	101.3	193.019	0.59	195.02	38	667.826985
4	temiz su					86.081	0	
5	su	333.4	20.12	2706.563	7.905	19.802	0	7.01601103
6	su	333.4	20.12	251.965	0.834	19.802	0	0.15700907
7	su	333.4	20.12	251.965	0.834	9.182	0	0.07280362
8	su	333.2	19.93	2608.8	7.908	18.447	0	4.71599123
9	su	333.2	19.93	251.106	0.831	18.447	0	0.14691929
10	atık tuzlu su	333.2	19.93	337.371	0.86	20.517	72.1586977	-1.5432262
11	su	329.45	16.72	2602.3	7.969	17.421	0	4.02361862
12	su	329.4	16.72	235.431	0.784	17.421	0	0.10979498
13	atık tuzlu su	329.4	16.72	306.177	0.81	42.06	35.1992392	-0.0977243
14	su	325.7	13.96	2595.7	8.032	16.785	0	3.4506645
15	su	325.7	13.96	219.748	0.736	16.785	0	0.08276096
16	atık tuzlu su	325.7	13.96	277.667	0.76	64.239	23.046436	-1.2395525
17	su	321.95	11.6	2589.1	8.097	16.541	0	2.97077187
18	su	321.9	11.6	204.072	0.688	16.541	0	0.05898272
19	atık tuzlu su	321.9	11.6	250.167	0.71	86.662	17.0833814	0.22285567
20	atık tuzlu su	318.2	9.59	225.01	0.66	108.939	13.5899907	-4.5664996
21	su	318.2	9.59	2582.3	8.165	16.687	0	2.54520637
22	su	318.2	9.59	2582.3	8.165	7.705	0	1.17521514
23	su	318.2	9.59	188.134	0.638	7.705	0	0.01953487
24	su	318.2	9.59	2582.3	8.165	9.182	0	1.40049649
25	deniz suyu	313.15	101.31	193.019	0.59	38.96	38	133.414723
26	deniz suyu	313.15	101.31	193.019	0.59	38.96	38	133.414723
27	deniz suyu	313.15	101.31	193.019	0.59	38.96	38	133.414723
28	deniz suyu	313.15	101.31	193.019	0.59	38.96	38	133.414723
29	deniz suyu	313.15	101.31	193.019	0.59	38.96	38	133.414723
30	atık tuzlu su	318.2	9.59	225.01	0.66	108.939	161.077745	-34.367852
31	deniz suyu	303.15	101.31	136.515	0.45	440.814	38	1503.01685
32	deniz suyu	313.15	101.31	193.019	0.59	245.794	38	841.6976

**Tablo 4.2.** Parabolik Oluklu Güneş Kolektörü Destekli Desalinasyon Sistemine Ait Akış Noktalarındaki Termodinamik Özellikler ve Analiz Sonuçları

Nokta	Akışkan	T(K)	P(kPa)	h(kJ/kg)	s(kJ/kgK)	ṁ (kg/s)	X (g/kg)	Ekserji (MW)
1	su	343.15	31.19	2626.8	8.257	10.62	0	1.8012
2	su	523.15	2000	2850	6.42	10.62	0	9.988089291
3	deniz suyu	313.15	101.3	193.019	0.59	279.286	38	956.3876906
4	temiz su					170.347	0	
5	su	343.15	31.19	2626.8	8.257	19.802	0	3.358349893
6	su	343.15	31.19	293	0.95	37.94	0	0.545522187
7	su	343.15	31.19	293	0.95	9.182	0	0.132023846
8	su	338.15	25.03	2618.3	8.307	38.47	0	5.62389083
9	su	338.15	25.03	251.106	0.89	38.47	0	- 0.370329532
10	atık tuzlu su	338.15	25.03	337.371	0.89	20.517	72.15869767	-1.72674047
11	su	333.15	19.94	2609.7	8.356	39.78	0	4.892130477
12	su	333.15	19.94	251	0.83	39.78	0	0.324467559
13	atık tuzlu su	333.15	19.94	337.371	0.83	42.06	35.19923918	0.963491553
14	su	328.15	15.76	2601	8.405	41.38	0	4.124357014
15	su	328.15	15.76	235	0.78	41.38	0	0.292310389
16	atık tuzlu su	328.15	15.76	277.667	0.78	64.239	23.04643597	- 1.622609689
17	su	323.15	12.35	2591.9	8.453	33.83	0	2.579845353
18	su	323.15	12.35	219	0.73	33.83	0	0.202017537
19	atık tuzlu su	323.15	12.35	250.167	0.73	86.662	17.08338141	-0.29390984
20	atık tuzlu su	323.15	12.35	225.01	0.66	108.939	13.58999073	- 4.566499555
21	su	318.15	12.35	2591.9	8.165	16.687	0	2.705401568
22	su	318.15	12.35	2591.9	8.165	7.705	0	1.249183142
23	su	318.15	12.35	188.134	0.638	7.705	0	0.019534872
24	su	318.15	12.35	2582.3	8.165	9.182	0	1.400496487
25	deniz suyu	313.15	101.31	193.019	0.59	38.96	38	133.4147233
26	deniz suyu	313.15	101.31	193.019	0.59	38.96	38	133.4147233
27	deniz suyu	313.15	101.31	193.019	0.59	38.96	38	133.4147233
28	deniz suyu	313.15	101.31	193.019	0.59	38.96	38	133.4147233
29	deniz suyu	313.15	101.31	193.019	0.59	38.96	38	133.4147233
30	atık tuzlu su	318.15	12.35	225.01	0.66	108.939	161.077745	-34.3678524
31	deniz suyu	303.15	101.31	136.515	0.45	440.814	38	1503.016849
32	deniz suyu	313.15	101.31	193.019	0.59	161.528	38	553.1368951

**Tablo 4.3.** Vakum Tüplü Güneş Kolektörlü Sistemin Ekserji Yıkımı Hesabı

Efekt	Ekserji Giriş (MW)	Ekserji Çıkış (MW)	Ekserji Yıkımı (MW)	Ekserji Verimliliği (%)
1.Efekt	7.016	0.157	6.859	2.24
2.Efekt	4.715	0.146	4.569	3.10
3.Efekt	4.023	0.109	3.914	2.71
4.Efekt	3.450	0.082	3.368	2.37
5.Efekt	2.970	0.058	2.912	1.95

Sisteme bir de termal ısı kaynağı parabolik oluklu güneş kolektörlerinden sağlanması durumunda;

**Tablo 4.4.** Parabolik Oluklu Güneş Kolektörlü Sistemin Ekserji Yıkımı Hesabı

Efekt	Ekserji Giriş (MW)	Ekserji Çıkış (MW)	Ekserji Yıkımı (MW)	Ekserji Verimliliği (%)
1.Efekt	6.431	0.309	6.122	4.80
2.Efekt	5.620	0.247	5.373	4.39
3.Efekt	4.885	0.200	4.685	4.09
4.Efekt	4.117	0.156	3.961	3.79
5.Efekt	2.578	0.0088	2.569	0.34

Her iki durumda da 1.efekt, sistemin en yüksek ekserji yıkımına sahip ünitesidir. Çünkü burada TVC ünitesinden gelen yüksek sıcaklıkta buhar, düşük sıcaklıkta deniz suyunu ısıtmak için kullanılır. Bu büyük sıcaklık farkı, sistemin en yüksek entropi artışına neden olur.

Tablo 4.5. sistemin yatırım maliyetleri literatürdeki bilimsel çalışmalar ve teknik raporlara göre yaklaşık olarak belirlenmiştir (Sheta, 2023; Bellos ve Tzivanidis, 2018; Elsayed, 2018; Al-Mutaz ve Wazeer, 2015 ve ASHRAE, 2020). Ayrıca desalinasyon tesislerinde işletme ve bakım giderleri (O&M), sistemin ömrü boyunca ortaya çıkan sabit ve değişken maliyetlerin toplamıdır. Genellikle orta ve büyük ölçekli sistemlerde yatırım maliyetinin % 1-3'ü kabul edilir (Ghaffour, 2013; Elsayed, 2018 ve Sayyadi ve Saffari, 2010).

**Tablo 4.5.** Sistem Bileşenleri ve Ekonomik Bilgiler

Bileşen	Yatırım (\$)	Ömür (yıl)	O&M (\$/yıl) (İşletme ve Bakım Giderleri)	CRF
Vakum Tüplü Güneş Kolektörü	640.000 (Sheta, 2023; Bellos ve Tzivanidis, 2018)	20	400	0.1019
Parabolik Oluklu Güneş Kolektörü	1100000 (Bellos ve Tzivanidis, 2018; Elsayed, 2018)	20	1200	0.1019
MED Sistemi	80.000 (Elsayed, 2018; Al-Mutaz ve Wazeer, 2015)	25	800	0.0930
TVC	20.000 (Elsayed, 2018; Al-Mutaz ve Wazeer, 2015)	15	300	0.1175
Pompa ve Ekipman	15.000 (Elsayed, 2018; ASHRAE, 2020)	15	250	0.1175

Tablo 4.6. vakum tüplü ve parabolik oluklu güneş kolektörleriyle desteklenen MED-TVC desalinasyon sisteminin ana bileşenlerinin ekserjiye dayalı maliyet analizini içermektedir. Bu analiz, sistemin hangi bileşenlerinin ekonomik açıdan daha etkin olduğunu belirlemek için kritik öneme sahiptir.

**Tablo 4.6.** Sistem Bileşenlerinin Termoekonomik Analizi

Bileşen	Ekserji Akışı (kW)	Yıllık Ekserji (kWh/yıl)	Yıllık Maliyet $C_{yıl}$ (\$/yıl)	Birim Ekserji Maliyeti $\dot{C}_{ex}$ (\$/kWh)
MED Ünitesi	4.95	8910	8240	0.925
TVC	2.74	4932	2650	0.5373
Pompa ve Yardımcı Ekipmanlar	1.00	1800	2013	1.12
Vakum Tüplü Güneş Kolektörü	986.3	1775340	65616	0.0370
Parabolik Oluklu Güneş Kolektörü	1138.1	2048580	112098	0.0553

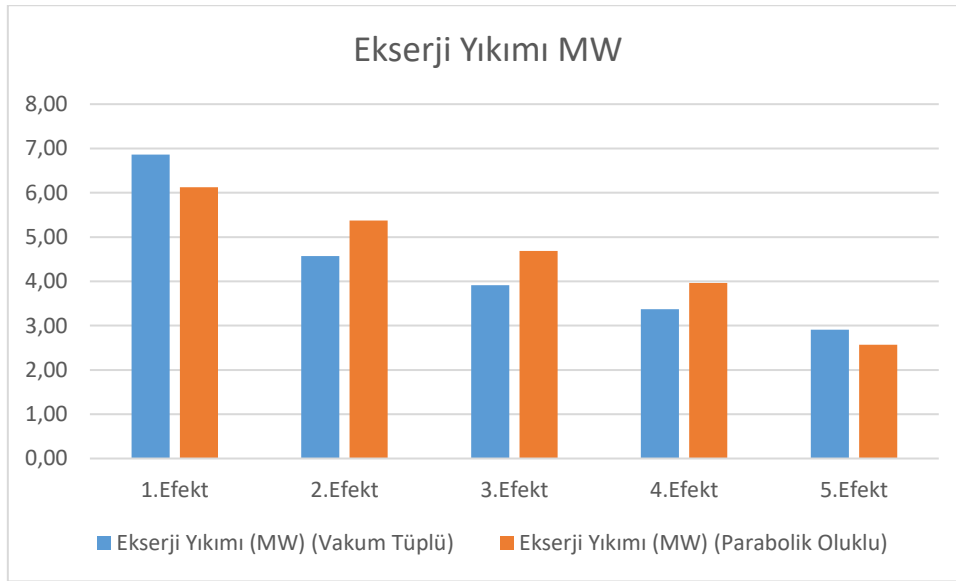
Tablo 4.7’de Antalya ili koşullarında tasarlanan 5-Efektli MED-TVC desalinasyon sistemi için iki farklı güneş kolektörünün (vakum tüplü ve parabolik oluklu) termal, ekserji ve ekonomik performansları karşılaştırılmıştır. Her iki sistem de günlük 7.430 m<sup>3</sup> ve yıllık 2.229.000 m<sup>3</sup> saf su üretimi kapasitesine sahiptir. Bu üretim miktarı, sistemin tasarım kapasitesi dikkate alınarak sabit tutulmuştur. Bu sayede, farklı ısı kaynaklarının etkisi yalnızca maliyet ve enerji tüketim açısından değerlendirilmiştir. Yapılan termoekonomik analiz, vakum tüplü güneş

kolektörleriyle desteklenmiş MED-TVC sisteminin Antalya ili koşullarında sürdürülebilir, çevreye duyarlı ve uzun vadede ekonomik olarak uygulanabilir olduğunu göstermektedir.

**Tablo 4.7.** MED-TVC Sisteminin Farklı Isı Kaynakları Altında Maliyet Karşılaştırması

Bileşen	Vakum Tüplü Güneş Kolektörü	Parabolik Oluklu Güneş Kolektörü
Isıl Güç (kW)	1040	1200
Ekserji Akışı (kW)	986.3	1138.1
Yıllık Ekserji (kWh/yıl)	1775340	2048580
Toplam Yıllık Maliyet (\$/yıl)	78518	125000
Birim Ekserji Maliyeti (\$/kWh)	0.0370	0.0553
Birim Su Maliyeti (\$/m <sup>3</sup> )	0.0353	0.0560

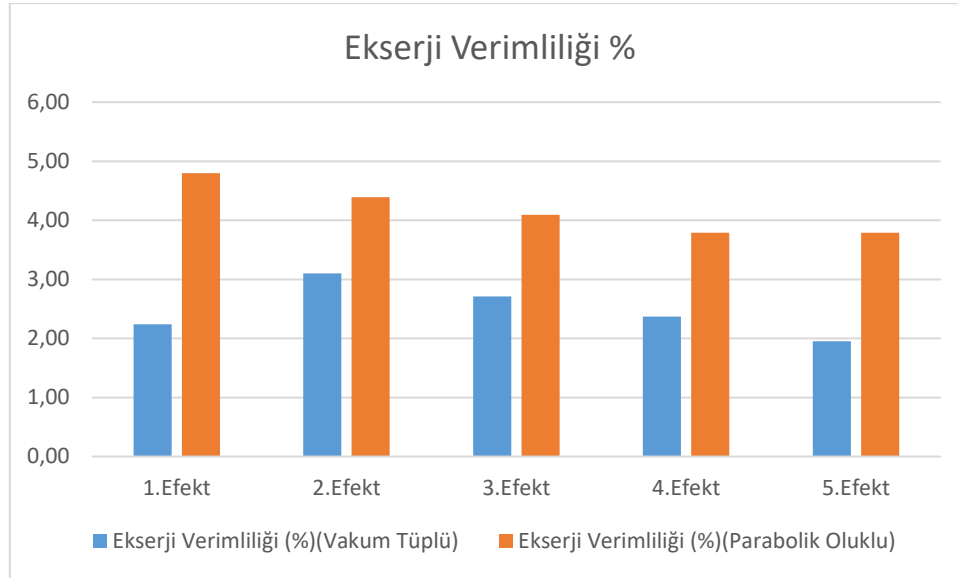
Yapılan hesaplamalara göre sistemimiz;



**Grafik 4.1.** MED-TVC Desalinasyon Sisteminde Vakum Tüplü ve Parabolik Oluklu Güneş Kolektörlerinin Ekserji Yıkımına Etkisi

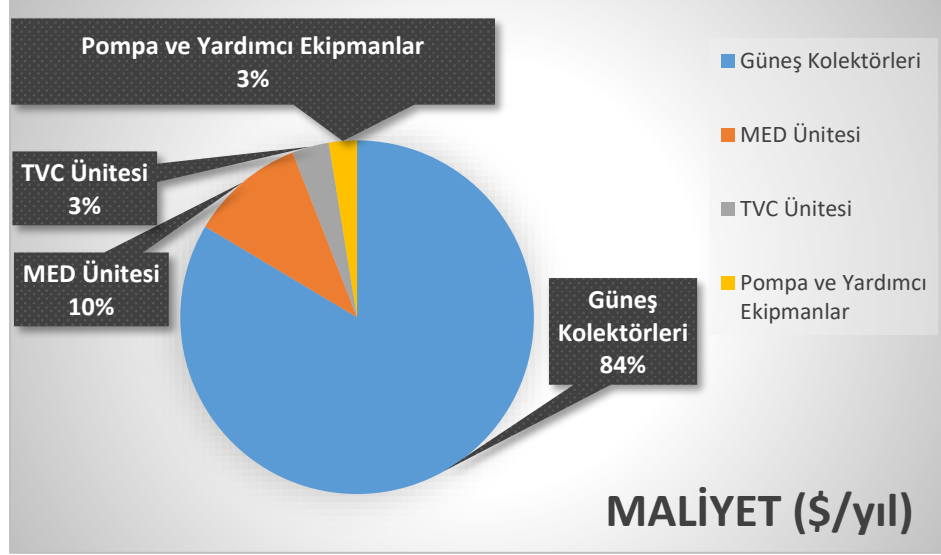
Grafik 4.1’de MED-TVC desalinasyon sisteminin vakum tüplü ve parabolik oluklu güneş kolektörlerinin ekserji yıkımı görülmektedir. Vakum tüplü güneş kolektörlerinin ekserji yıkım değerleri 2.912- 6.859 MW arasında, parabolik oluklu güneş kolektörlerin ise 2.569- 6.122 MW arasında değiştiği görülmüştür. Her iki sistemin de maksimum ekserji yıkımı 1.efekte gerçekleşmiştir. Bunun en büyük sebebi ise, bu efekte giren buhar sıcaklığı ile çıkıştaki

atık tuzlu suyun ve temiz suyun sıcaklıkları arasındaki büyük farktan kaynaklanmaktadır. Bu sıcaklık farkı entropi üretimini artırır. Ayrıca, vakum tüplü kolektörlü sistemin sıcaklık farkı  $\Delta T$  değeri parabolik oluklu sisteme göre daha düşük olması sebebi ile 2, 3, 4 ve 5. efektlerde ekserji yıkımı değerinin vakum tüplü sistemde hızla düştüğü görülmüştür.



**Grafik 4.2.** MED-TVC Desalinasyon Sisteminde Vakum Tüplü ve Parabolik Oluklu Güneş Kolektörlerinin Ekserji Verimliliğine Etkisi

Grafik 4.2’de MED-TVC desalinasyon sisteminde vakum tüplü ve parabolik oluklu güneş kolektörlerinin ekserji verimliliğine etkisi görülmektedir. Parabolik oluklu sistem, grafikte sabit bir eğilim gösterirken; vakum tüplü sistemde 2.efektin daha yüksek verimliliğe sahip olduğu görülmüştür. Bunun temel sebebi vakum tüplü sistemin 1.efektinde meydana gelen ekserji yıkımının yüksek olması verimi düşürmüştür. 1.efekteki yüksek sıcaklık, 2.efekte geçen buharın sıcaklığını artırır. Bu nedenle, 2.efekteki sıcaklık farkı daha düşük olur, ekserji yıkımı azalır ve verimlilik artar. Efekt sayısı arttıkça buharın sıcaklığı azalır, sıcaklık farkının artmasıyla ekserji yıkımı da artar ve verimlilik tekrar düşer.

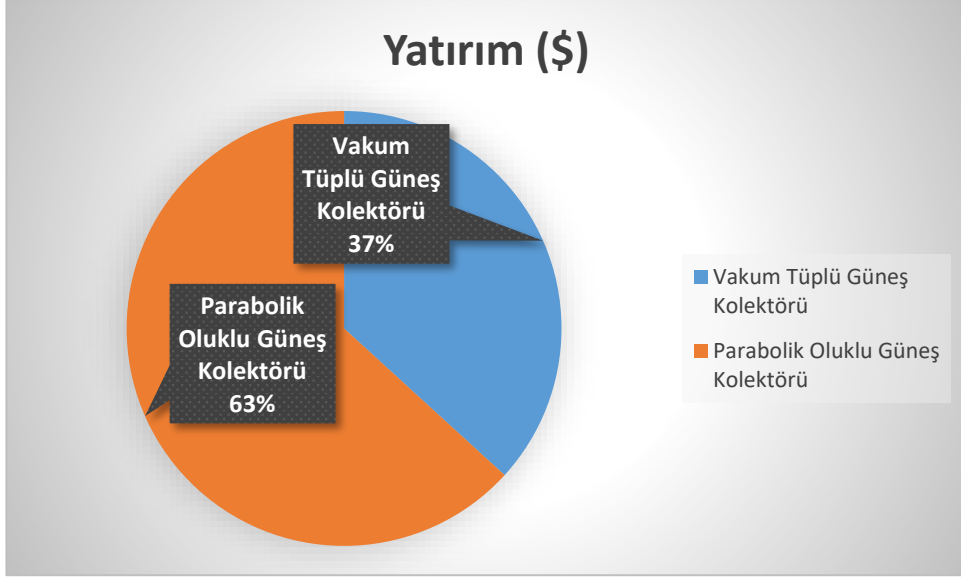


**Grafik 4.3.** Sistemin Bileşen Bazlı Maliyet Dengesi

Grafik 4.3. Sistemin bileşen bazlı maliyet analizini göstermektedir. Güneş kolektörlerinin sistemdeki en yüksek yıllık işletme maliyetini oluşturduğu görülmektedir. Ancak, Antalya ilinin yüksek güneş potansiyeli nedeniyle, uzun vadede enerji harcamalarını azaltarak, toplam maliyeti optimize eder.

İkinci olarak MED sisteminin yüksek işletme maliyetini oluşturduğu görülmektedir. Bunun sebebi, evaporatör efektlerinin yoğunlaşma – buharlaşma süreçlerindeki tersinmezliklerin büyük maliyet payı meydana getirdiği düşünülmektedir. TVC ünitesinin ise, gelen tahrik buhar basıncının yüksek olması ekserji yıkımı üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu düşünülür. Bu basıncın düşük tutulması, ekserji yıkımını azaltabilir, ancak yatırım maliyetini arttırır.

Pompa ve yardımcı diğer ekipmanların maliyeti ise, elektrik tüketimine, bu da pompa tercih edilirken pompa verimliliğinin dikkate alınmasına bağlıdır.



**Grafik 4.4.** Vakum Tüplü ve Parabolik Oluklu Güneş Kolektörlerinin Sistem Maliyetine Etkisi

Grafik 4.4.'de MED-TVC sistemine termal ısı kaynağı olarak vakum tüplü ve parabolik oluklu güneş kolektörlerinin tercih edilmesi durumunda sistem maliyetine etkisi gösterilmiştir. Parabolik oluklu güneş kolektörlerinin yüksek çıkış sıcaklığı nedeni ile MED-TVC sisteminin performansını artırdığı görülse de, bu kolektörlerin; ayna sistemi, takip mekanizmaları ve ısı taşıyıcı akışkan gibi ek bileşenlere sahip oldukları için daha yüksek yatırım gerektirir. Vakum tüplü kolektörler ise daha basit bir yapıya sahiptir ve yatırım maliyeti düşüktür.

## 5. YORUMLAR

Bu çalışmada, Antalya ili koşullarına uygun olarak tasarlanan 5-Efektli MED-TVC (Multi Effect Distillation – Thermal Vapour Compression) desalinasyon sisteminin, vakum tüplü güneş kolektörleriyle entegre edilmesi sonucunda elde edilen enerji, ekserji ve termoekonomik performansları detaylı bir şekilde incelenmiştir. Sistemdeki her bileşenin termodinamik verimliliği, ekserji yıkımı, maliyet payı ve iyileştirme potansiyeli değerlendirilmiştir. Ayrıca, vakum tüplü kolektörler yerine parabolik oluklu kolektörlerin kullanılması durumunda sistem performansı ve maliyeti karşılaştırılmıştır.

- Güneş kolektörleri ile entegrasyonu artırmak, doğalgaz bağımlılığını azaltarak ekonomik ve çevresel performansı artırabilir.
- Parabolik oluklu güneş kolektörleri yüksek sıcaklık değerine çıkabilmesine rağmen, sistem karmaşıklığı ve yatırım maliyetinin yüksekliği dikkat çekmektedir. Daha basit yapıda ve daha az maliyete sahip vakum tüplü kolektörler tercih edilebilir.
- 1. efekt ısı eşanjörü yüzey alanını artırarak yoğunlaşma-buharlaşma sürecindeki tersinmezlikler azaltılabilir.
- Negatif ekserji değerleri, tersinmezliklerin yüksekliğini gösterir. Atık tuzlu su deşarjında ortaya çıkan bu değer, özellikle Akdeniz gibi hassas ekosistemlerde tuzlu su atımının seyreltme, izleme ve geri kazanım yöntemleriyle dikkate alınmalıdır.
- TVC ünitesi tahrik buhar basıncını optimize etmek, ekserji yıkımı azaltarak sistem verimliliğini artırabilir.
- Pompa verimliliğini artırmak, toplam elektrik maliyetini azaltmak için önemlidir.
- Gece veya bulutlu günlerde sistemin devamlılığının sağlanabilmesi adına termal enerji depolama sistemleri entegre edilebilir.
- Güneş + Doğalgaz + Depolama yapısı kurulabilir. Bu da, sistemde esneklik sağlar ve devamlılığı, güvenliği artırır.
- Pompa ve borulama sistemlerinde sürtünme kayıpları ve basınç düşümleri tersinmezlikleri artırır. Bu sebeple, düşük sürtünmeli malzemeler tercih edilmelidir. Ayrıca, ISO 5199 standardına uygun pompa seçimi yapılabilir.
- Sistem performansının takibi için otomasyon sistemleri kurulabilir.
- Arızaların önceden tespiti ve bakım uygulamaları için yapay zeka desteği kurulabilir. İşletme maliyetini önemli ölçüde düşürür.

Sistem, Antalya ili kıyı kesimlerinin su ihtiyacını karşılamak için yeterli kapasitedir. Türkiye'nin su kıtlığı yaşayan bölgelerinde sürdürülebilir çözümler sunar.

## KAYNAKÇA

- Ahar, Z., & Hatamipour, M.** (2023). Exergy analysis of thermal desalination processes: a. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 26, 1-28.
- Aksoy, H. Y.** (2022). Konya Ovasında Tarımsal Sulamanın Su Bütçesine Etkileri. *Su Bilimi Teknoloji Dergisi*, 9(3), 13-24.
- Al-Hamahmy, M., Fath, H., & Khanafer, K.** (2016). Techno-economical Simulaton and Study of a Novel MSF Dsalination Process. *Desalination*, 1-12.
- Al-Mutaz., İbrahim, S., & Wazeer, I.** (2015). Comparative performance evaluation of conventional multi-effect evaporation desalination processes. . *Apllied Thermal Engineering*, 73, 1192-1201.
- Al-Saidi, M., & Ellermann, A.** (2024). The perils of building big: Desalination sustainability and. 32, 100159.
- Aydın, F., & Ardalı, Y.** (2021). Seawater Desalination Technologies. *Sigma*, 30, 156-178.
- Bakanlığı, T. T.** (2023-2033). *Değişen İklim Uyum Çerçevesinde Su Verimliliği ve Strateji Belgesi ve Eylem Planı*.
- Bayam, U.** (1998). Güneş Enerjisi Yardımı İle Tatlı Su Üretim Sistemlerinin İrdelenmesi. *Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Y.Lisans Tezi*.
- Bellos , E., & Tzivanidis, C.** (2018). Assessment of the Thermal Enhancement Methods in Parabolic Through Collectors. *International Journal of Energy and Environmental Engineering* , 59-70.
- Chen, Q., Kum Ja, M., Li, Y., & Chua, K.** (2018). Energy, Exergy and Economic Analysis of a Hybrid Spray-Assisted Low-Temperature Desalination/Thermal Vapor Compression System. *Energy*, 5442 (18) 32151-0.
- Çalapkulu, S.** (2020). Desalinasyon Tesisleri Deniz Suyu Arıtma Teknolojileri. <https://www.mmo.org.tr>, 36-48.
- Demir, M., & Seçkin, C.** (2022). Brine Uygulamalarının *Salicornia europaea L.*'da Verim ve Kalite Özelliklerine Etkisi. *Tarım Bilimleri*, 28(4) 567-575.
- DSİ.** (2023). *Türkiye'nin Su Yönetimi Stratejisi Raporu*. Aralık 2024: [www.dsi.gov.tr](http://www.dsi.gov.tr).

- Elsayed, M., Mesalhy, O., Mohammed, R., & Chow, L.** (2018). Exergy and Thermo-Economic Analysis for MED-TVC Desalination Systems. *Desalination*, 29-42.
- Eltavil, M., & Zhao, Z.** (2014). Renewable Energy Powered Desalination Systems: Technologies and Economics-State of the Art. *Twelfth International Water Technology Conference*, (s. IWTC12 ). Alexandria, Egypt 1099.
- Eshoul, N., Almuatiri, A., Lamidi, R., Alhajeri, R., & Alenezi, A.** (2018). Energetic, Exergetic. and Economic Analysis of MED-TVC Water Desalination Plant with and without Preheating. *Water*.
- ESMAP.** (2020). *Water Desalination Using Renewable Energy: Technology Brief*. World Bank.
- Fortram.** (2023). *Desalinasyon Teknolojileri ve Küresel Uygulamalar*. www.fortram.com.
- Ghaffour, N., Missimer, T., & Amy, G.** (2013). Technical Review and Evaluation of the Economics of Water Desalination: Current and Future Challenges for Better Water Supply Sustainability. *Desalination*, 309. 197-207.
- Goicho, B.** (2007). Ashkelon desalination plant — A successful challenge. *Desalination*, 203, 75-81.
- Gökçe, D.** (2018). Tuz Gölü Havzasında Yeraltı Suyu Seviyesi ve Tarım İlişkisi. *Selçuk Üniversitesi Fen ve Mühendislik Dergisi*, 26(4) 13-24.
- Hakyemez, C.** (2019). *Su=Yeni Elmas*. Türkiye: Türkiye Sınai Kalkınma Bankası A.Ş.
- Hamed, O., El-Agouz, S., El-Shafei, Z., Said, A., Wageeh, N., & El-Sayed, T.** (2009). Thermodynamic analysis of various types of MSF desalination processes. *Desalination*, 249(2), 726-733.
- Hamed, O., Zamamiri, A., Aly, S., & Lior, N.** (1999). Thermal Performance and Exergy Analysis of a Thermal Vapor Compression Desalination System.
- Hosta, S.** (2023). *Her Üç Çocuktan Biri Su Kıtlığı Çekiyor*. Chief of Communication UNICEF in Turkey. Türkiye.
- Jamil, M., Shahzad, M., & Zubair, S.** (2020). A Comprehensive Framework for Thermo-economic Analysis of Desalination Systems. *Energy Conversion and Management*, 222 (113188).

- Jones, E.** (2019). The State of Desalination and Brine Production: A Global Outlook. *Science of the Total Environment*, 657, 1343-1356.
- Jones, E., & Qadir, M.** (2019). The State of Desalination and Brine Production: A Global Outlook. *Science of the Total Environment*, 657, 1343-1356.
- Jones, E., Qadir, M., Smakhtin, V., & Shen, Y.** (2019). The State of Desalination and Brine Production: A Global Outlook. *Desalination*, 457, 59-68.
- Kalidasan, B., Divyabharathi, R., Pandey, A., Subramaniyan, C., & Mohankumar, S.** (2021). Technological Advancement of Solar Thermal System Desalination Process – A Review. *IOP Conf. Mater. Sci. Eng.*, (s. 1059 012061).
- Karagündüz, A., & Şengör, A.** (2020-2023). Deniz Suyu Arıtma Atık Sularından Değerli Kimyasalların Kazanımı. *119M301 (Proje No)*.
- Karagüzel, R.** (2017). Jeotermal Kaynakların Türkiye’de Kullanım Alanları ve Potansiyeli. *TMMOB Jeoloji Mühendisleri Odası* .
- Karahasanoğlu, M.** (2010). Mersin Şartlarında Deniz Suyundan Temiz Su Eldesi. *İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Y.Lisans Tezi*.
- Kucera, J.** (2019). *Desalination*. Wiley, USA. 978.
- Lattemann, S., & Höpner, T.** (2008). Environmental Impact and Impact Assessment of Seawater Desalination. *Desalination*, 220(1-3), 1-15.
- Menasri, R., Triki, Z., Bouaziz, M., & Hamrouni, B.** (2022). Energy and Exergy Analyses of a Novel Multi-Effect Distillation Sytem with Thermal Vapor Compression for Seawater Desalination. *Desalination and Water Tretment*, 54-67.
- Krahasanoğlu M.E.** (2010). Mersin Şartlarında Deniz Suyundan Temiz Su Eldesi. *İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Y.Lisans Tezi*.
- Miladi, R., Frikha, N., Kheiri, A., & Gabsi, S.** (2019). Energetic performance analysis of seawater desalination with a solar membrane distillation. *Energy Conversion and Management*, 143-154.
- Mohammad, A., & Mehrpooya, M.** (2017). Energy and Exergy Analyses of a Combined Desalination and CCHP System Driven by Geothermal Energy. *Applied Thermal Engineering*, 685-694.

- Mungan, M.** (2021). Güneş Enerjisi Destekli Vakum Destilasyon Yöntemi ile Deniz Suyundan Tatlı Su Eldesinin Enerji Analizi. *Dicle Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Y.Lisans Tezi.*
- Naminezhad, A., & Mehregan, M.** (2022). Energy and Exergy Analyses of a Hybrid System Integrating Solar-Driven Organic Rankine Cycle, Multi-Effect Distillation, and Reverse Osmosis Desalination Systems. *Renewable Energy*, 888-903.
- Panagopoulos, A.** (2020). Process Simulation and Techno-Economic Assessment of a Zero Liquid Discharge/Multi-Effect Desalination/Thermal Vapor Compression /ZLD/MED/TVC) System. *International Journal of Energy Research*, 473-495.
- Plan, S.** (2024-2028). *Strateji ve Bütçe Başkanlığı*. Aralık 2024: [www.sbb.gov.tr](http://www.sbb.gov.tr).
- Project, A. P.** (2020-2023). [www.swcc.gov.sa](http://www.swcc.gov.sa).
- Report, A.** (2020-2023). [www.km.gov.qa](http://www.km.gov.qa).
- Saidur, R., Borumandjazi, G., Mekhlif, S., & Jameel, M.** (2012). Exergy Analysis of Solar Energy Applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 350-356.
- Sayyadi, H., & Saffari, A.** (2010). Thermo-economic Optimization of Multi Effect Desalination Systems. *Applied Energy*, 87, 1122-1133.
- Shamet, O., & Antar, M.** (2024). Energy and Exergoeconomic Analyses of Parallel Cross Feed Multi Effect Desalination System Driven by Twin-Screw Compressor with Water Injection. *Case Studies in Thermal Engineering*. 60 (104753).
- Sharaf, M., Saeed, L., Uqaiyan, A., & Al-Mutaz, I.** (2018). Thermo-economic analysis of a Mechanical Vapour Compression (MVC) desalination system with single and multiple effect configurations. *Desalination*, 447, 63-75.
- Sharqawy, M., Lienhard, J., & Zubair, S.** (2011). On Exergy Calculations of Seawater with Applications in Desalination Systems. *International Journal of Thermal Sciences*, 187-196.
- Shatat, M., & Riffat, S.** (2013). Water Desalination Technologies Utilizing Conventional and Renewable Energy Sources. *International Journal of Low-Carbon Technologies*, 9(1), 1-19.

- Sheta, M., Elwardany, A., Ookawara, S., & Hassan, H.** (2023). Energy Analysis of a Small-Scale Multi-Effect Distillation System Powered By Photovoltaic and Thermal Collectors. *Journal of Energy Systems*, 89-105.
- Statistics, A. R.** (2022). [www.mew.go.kw](http://www.mew.go.kw).
- Statistics, A. S.** (2022). [www.dewa.gov.ae](http://www.dewa.gov.ae).
- Strathmann, H.** (2010). Electrodialysis, A Mature Technology For Seawater Desalination. *Desalination*, 264(1-3), 218-226.
- Theodore, L.** (2022). *Introduction to Desalination*. Wiley, USA. 507.
- Turab, A., Marigorta, A., Elharidi, A., & Suarez-Lopez, M.** (2024). A Novel Configuration of Hybrid Reverse Osmosis, Humidification – Dehumidification, and Solar Photovoltaic Systems: Modeling and Exergy Analysis. *The Use of Hybrid Renewable Energy Systems for Water Desalination*, 12(1), 19.
- TÜİK.** (Aralık 2024). *Su Verileri Su ve Atık Su İstatistikleri* . [www.data.tuik.gov.tr](http://www.data.tuik.gov.tr).
- Türkiye Su Enstitüsü Başkanı Prof. Dr. Akça, L.** (12 Ekim 2023). Suyun İzinden Küresel Gelişmeleri Anlama. [www.suen.gov.tr](http://www.suen.gov.tr). İstanbul.
- UNEP.** (2021). *Brine Management for Desalination Facilities*.
- UNEP.** (2022). *Brine Management for Desalination Plants*. [www.unep.org](http://www.unep.org).
- Wang, Y., Morosuk, T., & Cao, W.** (2025). Exergetic Efficiency of Reverse Osmosis Desalination Systems: Definitions and Discussions. *Jerta*, 1(3), 031302(11).
- Yıldırım, C., & Solmuş, İ.** (2014). Güneş Enerjisi Destekli Entegre Su Isıtma-Damıtma Sisteminin Teorik Analizi. *Tesisat Mühendisliği*, (143) 55-64.
- Yıldız, C.** (2020). Jeotermal Enerji Destekli Desalinasyon Sistemlerinin Teknik ve Ekonomik Değerlendirilmesi. *Dokuz Eylül Üniversitesi*.
- Yılmaz, A., & Enterpınar, H.** (2021). Desalinasyon Atıklarının Tarımda Kullanım Potansiyeli ve Riskleri. *Ankara Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi*, 71(2), 123-132.
- You, H., Han, J., & Liu, Y.** (2019). Performance assessment of a CCHP and Multi-Effect Desalination System Based on GT/ORC with Inlet Air Precooling . *Energy*, 286-298.

**Zahid, S., Qureshi, S., Khan, W., & Zahih, U.** (2022). Exergetic Analysis of the Humidification – Dehumidification Desalination Cycle Involving Variation in Top Temperature.