

BURSA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ❖ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**AKDENİZ KIYISINDA KURULACAK BİR NÜKLEER DESALİNASYON
KOJENERASYON TESİSİNİN TERMODİNAMİK ANALİZİ**



YÜKSEK LİSANS TEZİ

Erdem AKYÜREK

Enerji Sistemleri Mühendisliği Anabilim Dalı

EYLÜL 2021

BURSA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ❖ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**AKDENİZ KIYISINDA KURULACAK BİR NÜKLEER DESALİNASYON
KOJENERASYON TESİSİNİN TERMODİNAMİK ANALİZİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Erdem AKYÜREK
(181313631001)**

Enerji Sistemleri Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Dr. Öğr. Üyesi Tayfun TANBAY

EYLÜL 2021



20.04.2016 tarihli Resmi Gazete’de yayımlanan Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliğinin 9/2 ve 22/2 maddeleri gereğince; Bu Lisansüstü teze, Bursa Teknik Üniversitesi’nin aboneli olduğu intihal yazılım programı kullanılarak Lisansüstü Eğitim Enstitüsü’nün belirlemiş olduğu ölçütlere göre uygun rapor alınmıştır.

İNTİHAL BEYANI

Bu tezde görsel, işitsel ve yazılı biçimde sunulan tüm bilgi ve sonuçların akademik ve etik kurallara uyularak tarafımdan elde edildiğini, tez içinde yer alan ancak bu çalışmaya özgü olmayan tüm sonuç ve bilgileri tezde kaynak göstererek belgelediğimi, aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim.

Öğrencinin Adı Soyadı: Erdem AKYÜREK

İmzası :

X X X X

ÖNSÖZ

Hayatın devamlılığı için vazgeçilmez olan temiz su, günümüzde erişilebilirlik bakımından büyük önem teşkil etmektedir. Temiz suya yönelik ihtiyacın artması ile birlikte nükleer enerji destekli deniz suyu desalinasyonu uygulamaları ülkeler için cazip haline gelmiştir.

Nükleer desalinasyon kojenerasyon tesisleri ile ilgili çeşitli analizler yapılmış olmasına rağmen ülkemiz dahilinde kapsamlı bir enerji ve ekserji analiz çalışması yapılmamıştır. Bu tez çalışması, Akdeniz kıyısı koşulları altında çalışabilecek bir nükleer desalinasyon kojenerasyon tesisinin termodinamik açıdan değerlendirmesini ele almak amacıyla gerçekleştirilmiştir. Tez çalışmamın gerçekleştirilmesinde desteğini esirgemeyen ve kıymetli zamanını ayıran tez danışmanım Dr. Öğr. Üyesi Tayfun TANBAY'a sonsuz teşekkür ediyorum.

Ağustos 2021

Erdem Akyürek
(Makine Mühendisi)

İÇİNDEKİLER

| | <u>Sayfa</u> |
|---|--------------|
| ÖNSÖZ | vii |
| İÇİNDEKİLER | viii |
| KISALTMALAR | viii |
| SEMBOLLER | x |
| ÇİZELGE LİSTESİ | xivv |
| ŞEKİL LİSTESİ | xv |
| ÖZET | xvii |
| SUMMARY | xvii |
| 1. GİRİŞ | 1 |
| 2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI | 3 |
| 3. DESALİNASYON PROSESLERİ | 9 |
| 3.1 Damıtma Desalinasyon Prosesleri..... | 10 |
| 3.1.1 Çok kademeli şok damıtma (ÇKŞD) | 10 |
| 3.1.2 Çok etkili damıtma (ÇED) | 12 |
| 3.1.3 Buhar sıkıştırmalı damıtma (BSD) | 14 |
| 3.2 Membran Desalinasyon Prosesleri | 15 |
| 3.2.1 Ters osmoz (TO) | 15 |
| 3.2.2 Elektrodializ (ED) | 18 |
| 4. NÜKLEER KOJENERASYON TESİSİNİN TERMODİNAMİK ANALİZİ 20 | |
| 4.1 Termodinamik Analiz İçin Temel Bilgiler | 20 |
| 4.2 Nükleer Desalinasyon Kojenerasyon Tesisinin Enerji ve Ekserji Analizi | 23 |
| 5. BULGULAR VE TARTIŞMA | 41 |
| 6. SONUÇLAR | 52 |
| KAYNAKLAR | 53 |
| ÖZGEÇMİŞ | 58 |

KISALTMALAR

| | |
|--------------------|---|
| ABT | : Alçak Basınç Türbini |
| AI | : Ara Isıtıcı |
| ASB | : Alçak Sıcaklıklı Buharlaştırma |
| BSD | : Buhar Sıkıştırılmalı Damıtma |
| BSR | : Basınçlı Su Reaktörü |
| BSI1 - BSI7 | : 1. – 7. besi suyu ısıtıcısı |
| BÜ | : Buhar Üretici |
| ÇED | : Çok Etkili Damıtma |
| ÇKŞD | : Çok Kademeli Şok Damıtma |
| DE-TOP | : Desalinasyon Termodinamik Optimizasyon Programı (Desalination Thermodynamic Optimization Program) |
| DEEP | : Desalinasyon Ekonomik Değerlendirme Programı (Desalination Economic Evaluation Program) |
| DS | : Damıtılmış Su |
| DST | : Deniz Suyu Tahliyesi |
| ED | : Elektrodializ |
| GT-MHR | : Gaz Türbini Modüler Helyum Reaktörü |
| İO | : İleri Osmoz |
| J | : Jeneratör |
| KV | : Kısılma Vanası |
| MBS | : Mekanik Buhar Sıkıştırma |
| NA | : Nem Ayırıcısı |
| NAAIK | : Nem Ayırıcısı ve Ara Isıtıcı Karışımı |
| PDES | : Desalinasyon tesisindeki pompaların toplamı |
| PNT | : Nükleer tesisin ikinci çevrimindeki pompaların toplamı |
| P1 - P9 | : 1. – 9. Pompa |
| TBS | : Termal Buhar Sıkıştırma |
| TO | : Ters Osmoz |
| TS | : Tuzlu Su |
| TSI | : Tuzlu Su Isıtıcısı |

UAEA : Uluslararası Atom Enerjisi Ajansı
Y : Yoğuşturucu
YBT : Yüksek Basınç Türbini



SEMBOLLER

| | |
|-------------------|--|
| c_{ps} | : Deniz suyunun tuz bileşeninin özgül ısısı, (kj/kgK) |
| $ECOP_{kojen}$ | : Kojenerasyon tesisinin ekolojik performans katsayısı |
| $f_{yık,eks}$ | : Ekserji yıkım faktörü |
| h_g | : Sisteme giren akışkanın entalpisi, (kj/kg) |
| $h_ç$ | : Sistemden çıkan akışkanın entalpisi, (kj/kg) |
| $h_{ds,i}$ | : Deniz suyunun i noktasındaki entalpisi, (kj/kg) |
| $h_{su,i}$ | : Deniz suyunun i noktasındaki su bileşeninin T_i sıcaklığındaki entalpisi, (kj/kg) |
| $h_{tuz,i}$ | : Deniz suyunun i noktasındaki tuz bileşeninin T_i sıcaklığındaki entalpisi, (kj/kg) |
| h | : Sistemdeki akışkanın ilk haldeki entalpisi, (kj/kg) |
| h_0 | : Akışkanın çevre şartlarındaki entalpisi, (kj/kg) |
| $i_{bç}$ | : Desalinasyon için buhar çekme noktaları |
| $M_{ds,i}$ | : Deniz suyunun i noktasındaki molar kütlesi, $(kg/kmol)$ |
| M_{su} | : Deniz suyunun su bileşeninin molar kütlesi, $(kg/kmol)$ |
| M_{tuz} | : Deniz suyunun tuz bileşeninin molar kütlesi, $(kg/kmol)$ |
| \dot{m}_g | : Sisteme giren kütleli debi, (kg/s) |
| $\dot{m}_ç$ | : Sistemden çıkan kütleli debi, (kg/s) |
| \dot{m} | : Kütleli debi, (kg/s) |
| $\dot{m}_{ds,i}$ | : Deniz suyunun i noktasındaki kütleli debisi, (kg/s) |
| $\dot{m}_{su,i}$ | : Deniz suyunun i noktasındaki su bileşeninin kütleli debisi, (kg/s) |
| $\dot{m}_{tuz,i}$ | : Deniz suyunun i noktasındaki tuz bileşeninin kütleli debisi, (kg/s) |
| $\dot{m}_{ÇKŞD}$ | : Besi deniz suyunun kütleli debisi, (kg/s) |
| $mf_{su,i}$ | : Deniz suyunun i noktasındaki su bileşeninin kütleli debi oranı |
| $mf_{tuz,i}$ | : Deniz suyunun i noktasındaki tuz bileşeninin kütleli debi oranı |
| mf_{AI} | : Ara ısıtıcı kütleli debi oranı |
| mf_{KV} | : Kısılma vanası kütleli debi oranı |
| $N_{ds,i}$ | : Deniz suyunun i noktasındaki toplam mol sayısı |
| $N_{su,i}$ | : Deniz suyunun i noktasındaki su bileşeninin mol sayısı |

| | |
|-------------------------------|---|
| \dot{Q}_{buhar} | : Nükleer tesisten birim zamanda aktarılan proses ısı miktarı, (kW) |
| \dot{Q}_g | : Birim zamanda sisteme giren ısı enerjisi, (kW) |
| $\dot{Q}_ç$ | : Birim zamanda sistemden çıkan ısı enerjisi, (kW) |
| \dot{Q} | : Birim zamanda ısı geçişi, (kW) |
| $\dot{Q}_{BÜ}$ | : Nükleer santralinin birinci çevriminden buhar üretene birim zamanda aktarılan termal enerji, (kW) |
| R_u | : Evrensel gaz sabiti, ($kJ/kmolK$) |
| $r_{atık,eks}$ | : Atık ekserji oranı |
| $s_{ds,i}$ | : Deniz suyunun i noktasındaki entropisi, (kJ/kgK) |
| $s_{su,i}$ | : Deniz suyunun i noktasındaki su bileşeninin T_i sıcaklığındaki entropisi, (kJ/kgK) |
| $s_{tuz,i}$ | : Deniz suyunun i noktasındaki tuz bileşeninin T_i sıcaklığındaki entropisi, (kJ/kgK) |
| s | : Sistemdeki akışkanın ilk haldeki entropisi, (kJ/kgK) |
| s_0 | : Akışkanın çevre şartlarındaki entropisi, (kJ/kgK) |
| $\dot{S}_{üretim}$ | : Birim zamanda gerçekleşen toplam entropi üretimi, (kJ/kgK) |
| T | : Sistem sıcaklığı, (K) |
| T_i | : Deniz suyunun i noktasındaki sıcaklığı, (K) |
| $T_{BÜ}$ | : Buhar üretene sıcak tarafının ortalama sıcaklığı, (K) |
| T_0 | : Ölü hal sıcaklığı, (K) |
| Tuz_i | : Deniz suyunun i noktasındaki tuzluluk miktarı, (ppm) |
| \dot{W}_g | : Birim zamanda sisteme giren iş, (kW) |
| $\dot{W}_ç$ | : Birim zamanda sistemden çıkan iş, (kW) |
| \dot{W} | : Sistemde birim zamanda elde edilen iş miktarı, (kW) |
| $\dot{W}_{net,NKT}$ | : Nükleer kojenerasyon tesisinin yaptığı net güç üretimi, (kW) |
| \dot{W}_{net} | : Sistemden birim zamanda elde edilen net iş, (kW) |
| \dot{W}_{YBT} | : Yüksek basınç türbininde birim zamanda üretilen iş miktarı, (kW) |
| \dot{W}_{ABT} | : Alçak basınç türbininde birim zamanda üretilen iş miktarı, (kW) |
| $\dot{W}_{P1} - \dot{W}_{P9}$ | : 1. – 9. pompa gücü, (kW) |
| \dot{W}_{DSP} | : Deniz suyu pompası gücü, (kW) |
| \dot{W}_{DP} | : Devirdaim pompası gücü, (kW) |
| \dot{W}_{DASP} | : Damıtılmış su pompası gücü, (kW) |
| \dot{W}_{TSP} | : Tuzlu su pompası gücü, (kW) |
| $\dot{X}_{küttele,g}$ | : Kütleli debiyle birim zamanda sisteme giren ekserji transferi, (kW) |

- $\dot{X}_{k\ddot{u}t\ddot{u}l\ddot{e},\check{c}}$: Kütlesel debiyle birim zamanda sistemden çıkan ekserji transferi, (kW)
- $\dot{X}_{\text{Isı}}$: Isı geçişi ile birim zamanda ekserji transferi, (kW)
- $\dot{X}_{\text{İş}}$: İş etkileşimi ile birim zamanda ekserji transferi, (kW)
- $\dot{X}_{k\ddot{u}t\ddot{u}l\ddot{e}}$: Kütlesel debiyle birim zamanda ekserji transferi, (kW)
- \dot{X}_g : Sisteme birim zamanda giren ekserji, (kW)
- $\dot{X}_\check{c}$: Sistemden birim zamanda çıkan ekserji, (kW)
- $\dot{X}_{\text{Yık}}$: Sistemin birim zamandaki toplam ekserji yıkımı, (kW)
- $\dot{X}_{\text{Yık,BÜ}}$: Buhar üreticinin birim zamandaki ekserji yıkımı, (kW)
- $\dot{X}_{\text{Yık,YBT}}$: Yüksek basınç türbininin birim zamandaki ekserji yıkımı, (kW)
- $\dot{X}_{\text{Yık,NA}}$: Nem ayırıcısının birim zamandaki ekserji yıkımı, (kW)
- $\dot{X}_{\text{Yık,AI}}$: Ara ısıtıcısının birim zamandaki ekserji yıkımı, (kW)
- $\dot{X}_{\text{Yık,ABT}}$: Alçak basınç türbininin birim zamandaki ekserji yıkımı, (kW)
- $\dot{X}_{\text{Yık,YOĞ}}$: Yoğuşturucunun birim zamandaki ekserji yıkımı, (kW)
- $\dot{X}_{\text{Yık,P1}} - \dot{X}_{\text{Yık,P9}}$: 1. – 9. pompada birim zamanda ekserji yıkımı, (kW)
- $\dot{X}_{\text{Yık,BS11}} - \dot{X}_{\text{Yık,BS17}}$: 1. – 7. besi suyu ısıtıcısında birim zamanda ekserji yıkımı, (kW)
- $\dot{X}_{\text{Yık,JEN}}$: Jeneratörün birim zamandaki ekserji yıkımı, (kW)
- $\dot{X}_{\text{Yık,ÇKŞD}}$: ÇKŞD ünitesinin birim zamandaki ekserji yıkımı, (kW)
- $\dot{X}_{\text{Yık,KV}}$: Kısılma vanasının birim zamandaki ekserji yıkımı, (kW)
- $\dot{X}_{\text{Yık,DST}}$: Tahliye edilen deniz suyunun birim zamandaki ekserji yıkımı, (kW)
- $\dot{X}_{\text{Yık,TS}}$: Tuzlu suyun tesis çıkışındaki birim zamanda ekserji yıkımı, (kW)
- $\dot{X}_{\text{Yık,DS}}$: Damıtılmış suyun tesis çıkışındaki birim zamanda ekserji yıkımı, (kW)
- $\dot{X}_{\text{Yık,TSI}}$: Tuzlu su ısıtıcısının birim zamandaki ekserji yıkımı, (kW)
- $\dot{X}_{\text{Yık,DSP}}$: Deniz suyu pompasının birim zamandaki ekserji yıkımı, (kW)
- $\dot{X}_{\text{Yık,DP}}$: Devirdaim pompasının birim zamandaki ekserji yıkımı, (kW)
- $\dot{X}_{\text{Yık,DASP}}$: Damıtılmış su pompasının birim zamandaki ekserji yıkımı, (kW)
- $\dot{X}_{\text{Yık,TSP}}$: Tuzlu su pompasının birim zamandaki ekserji yıkımı, (kW)
- $\dot{X}_{\text{Isı,BÜ}}$: Nükleer kojenerasyon tesisine birim zamanda giren ısının ekserjisi, (kW)
- $\dot{X}_{\text{Yık,NKT}}$: Nükleer kojenerasyon tesisindeki birim zamanda toplam ekserji yıkımı, (kW)

| | |
|--------------------|---|
| $\dot{X}_{yık,DT}$ | : Desalinasyon tesisindeki birim zamanda toplam ekserji yıkımı, (kW) |
| $\dot{X}_{yık,NS}$ | : Nükleer santralin ikinci çevrimindeki birim zamanda toplam ekserji yıkımı, (kW) |
| \dot{X}_{proses} | : Nükleer santralin ikinci çevriminden desalinasyon tesisine birim zamanda giren toplam ekserji, (kW) |
| $x_{su,i}$ | : Deniz suyunun i noktasındaki su bileşeninin mol oranı |
| $x_{tuz,i}$ | : Deniz suyunun i noktasındaki tuz bileşeninin mol oranı |
| ψ | : Akan akışkanın ekserjisi, (kJ/kg) |
| ψ_i | : Akan akışkanın i noktasındaki ekserjisi, (kJ/kg) |
| ϵ_y | : Isıl yararlanma oranı |
| η_{termal} | : Termal verim |
| $\eta_{t,NKT}$ | : Nükleer desalinasyon kojenerasyon tesisinin termal verimi |
| $\eta_{ekserji}$ | : Ekserji verimi |
| $\eta_{eks,NKT}$ | : Nükleer desalinasyon kojenerasyon tesisinin ekserji verimi |
| η_J | : Jeneratörün verimi |

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

| | |
|--|-----------|
| Çizelge 5.1 : Nükleer santralin ikinci çevrim dizayn parametreleri | 40 |
| Çizelge 5.2 : ÇKŞD tesisinin dizayn parametreleri | 40 |
| Çizelge 5.3 : Ekolojik performans katsayısının ($ECOP_{kojen}$) taze buhar sıcaklığının üç değeri için besi deniz suyu kütleli debisine göre değişimi..... | 45 |
| Çizelge 5.4 : Ekolojik performans katsayısının ($ECOP_{kojen}$) termal enerji girişinin üç değeri için ara ısıtıcı kütleli debi oranına göre değişimi | 45 |
| Çizelge 5.5 : Ekserji yıkım faktörünün ($f_{yık,eks}$) taze buhar sıcaklığının üç değeri için besi deniz suyu kütleli debisine göre değişimi | 46 |
| Çizelge 5.6 : Ekserji yıkım faktörünün ($f_{yık,eks}$) ölü hal sıcaklığının üç değeri için taze buhar sıcaklığına göre değişimi | 46 |
| Çizelge 5.7 : Ekserji yıkım faktörünün ($f_{yık,eks}$) termal enerji girişinin üç değeri için ara ısıtıcı kütleli debi oranına göre değişimi..... | 46 |
| Çizelge 5.8 : Atık ekserji oranının ($r_{atık,eks}$) ölü hal sıcaklığının üç değeri için taze buhar sıcaklığına göre değişimi | 47 |
| Çizelge 5.9 : Atık ekserji oranının ($r_{atık,eks}$) termal enerji girişinin üç değeri için ara ısıtıcı kütleli debi oranına göre değişimi..... | 47 |
| Çizelge 5.10 : Amaç fonksiyonlarının tuzlu su ısıtıcısına giren besi deniz suyunun sıcaklığına göre değişimi | 49 |
| Çizelge 5.11 : Amaç fonksiyonlarının damıtılmış su kütleli debisine göre değişimi... .. | 50 |

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

| | |
|---|----|
| Şekil 3.1 : Desalinasyon prosesleri | 9 |
| Şekil 3.2 : ÇKŞD prosesinin şeması | 11 |
| Şekil 3.3 : ÇKŞD prosesinin tek kademesi | 12 |
| Şekil 3.4 : ÇED prosesinin şeması | 13 |
| Şekil 3.5 : MBS prosesinin şeması | 14 |
| Şekil 3.6 : TBS prosesinin şeması | 15 |
| Şekil 3.7 : Osmoz ve ters osmoz prensibi | 16 |
| Şekil 3.8 : TO prosesinin bölümleri | 17 |
| Şekil 3.9 : ED desalinasyon prosesinin şeması | 19 |
| Şekil 4.1 : Nükleer desalinasyon kojenerasyon tesisinin şematik gösterimi | 24 |
| Şekil 5.1 : Termal verimin (a) T_4 'ün üç değeri için besi deniz suyu kütleli debisine, (b) $\dot{Q}_{BÜ}$ 'nün üç değeri için ara ısıtıcı kütleli debi oranına ve (c) $\dot{m}_{ÇKŞD}$ 'nin üç değeri için ölü hal sıcaklığına göre değişimi | 42 |
| Şekil 5.2 : Isıl yararlanma oranının (a) T_4 'ün üç değeri için besi deniz suyu kütleli debisine ve (b) $\dot{Q}_{BÜ}$ 'nün üç değeri için ara ısıtıcı kütleli debi oranına göre değişimi | 43 |
| Şekil 5.3 : Ekserji veriminin (a) T_4 'ün üç değeri için besi deniz suyu kütleli debisine, (b) T_0 'ın üç değeri için taze buhar sıcaklığına ve (c) $\dot{Q}_{BÜ}$ 'nün üç değeri için ara ısıtıcı kütleli debi oranına göre değişimi | 44 |
| Şekil 5.4 : Desalinasyon prosesi için buhar çekme noktaları değişiminin tesisin (a) termal verimine, ısıl yararlanma oranına, (b) ekserji verimine, (c) ekolojik performans katsayısına, (d) ekserji yıkım faktörüne ve atık ekserji oranına etkisi | 48 |
| Şekil 5.5 : Ekserji yıkım faktörünün deniz suyu tuzluluğuna göre değişimi | 48 |
| Şekil 5.6 : Kısılma vanası kütleli debi oranının (a) ekserji verimine ve (b) ekserji yıkım faktörüne etkisi | 49 |
| Şekil 5.7 : Termal enerji girişinin tesisin net elektrik güç üretimine etkisi | 50 |
| Şekil 5.8 : Nükleer santralin ikinci çevrim bileşenlerinin ekserji yıkım yüzdeleri dağılımları | 51 |
| Şekil 5.9 : ÇKŞD tesisi bileşenlerinin ekserji yıkım yüzdeleri dağılımları | 51 |

AKDENİZ KIYISINDA KURULACAK BİR NÜKLEER DESALİNASYON KOJENERASYON TESİSİNİN TERMODİNAMİK ANALİZİ

ÖZET

Dünyadaki nüfus artışı, tarımsal ve endüstriyel faaliyetlerin yoğunlaşması temiz suya olan talebi artırırken su kirliliği ve su kaynaklarının kısıtlı olması veya eşitsiz dağılımı, kişi başına düşen su arzını azaltmaktadır. Dünyadaki suyun %97,5'inin doğrudan kullanılabilir olmaması ve su kıtlığı riskinin gitgide artması ile temiz ve güvenilir suya erişim, önemli hale geldiğinden su kıtlığı çeken bölgelerde temiz su ihtiyacını karşılayabilmek için desalinasyon tesisleri, yararlanabilecek etkili yöntemlerden biri olmuştur. Bir enerji kaynağıyla faaliyet gösterebilen desalinasyon sistemleri, bu enerji ihtiyacını fosil yakıtlar veya yenilenebilir enerji kaynakları gibi çeşitli yollardan sağlayabildiği gibi son yıllarda nükleer enerjinin kullanımıyla da elde edebilmektedir. Uluslararası Atom Enerjisi Ajansı tarafından yapılan çalışmalar neticesinde teknik olarak uygulanabilir olduğu görülen nükleer desalinasyon kojenerasyon tesislerinde bir nükleer reaktörden elde edilen fisyon enerjisi, termal enerjiye dönüştürülmektedir. Bu ısı enerjisinin bir kısmı veya tamamı, bir nükleer güç santraline entegre desalinasyon sisteminde deniz suyunun tuzdan arındırılması için kullanılabilir.

Bu çalışmada Akdeniz kıyısında kurulacak bir nükleer desalinasyon kojenerasyon tesisinin termodinamik analizi gerçekleştirilmiştir. İncelenmiş olan nükleer desalinasyon kojenerasyon tesisinde enerji kaynağı, bir Basınçlı Su Reaktörü (BSR) iken desalinasyon prosesi ise Çok Kademeli Şok Damıtma (ÇKŞD) işlemidir. Nükleer desalinasyon kojenerasyon tesisinin tüm bileşenlerine kütle, enerji korunumu ve ekserji denge denklemleri uygulanıp tesisin termodinamik modellenmesi, MATHEMATICA 11 yazılımından faydalanılarak oluşturulmuştur. Amaç fonksiyonları olarak tesisin termal verimi, ekserji verimi, ısıl yararlanma oranı, ekolojik performans katsayısı, ekserji yıkım faktörü ve atık ekserji oranı değerlendirilmiştir. Nükleer reaktörün termal enerjisi, ara ısıtıcı kütleli debi oranı, taze buhar sıcaklığı, desalinasyon için buhar çekme noktaları, ölü hal sıcaklığı, deniz suyu tuzluluğu, kısılma vanası kütleli debi oranı, damıtılmış su kütleli debisi, besi deniz suyu kütleli debisi ve sıcaklığı gibi tasarım parametrelerinin bu amaç fonksiyonları üzerine etkileri incelenmiştir. Analiz sonucunda taze buhar sıcaklığının 18 K artışı ile tesisin termal verimi, ekserji verimi, ısıl yararlanma oranı ve ekolojik performans katsayısı sırasıyla yaklaşık %1,6, %3,2, %1,6 ve 0,23 oranında artarken ekserji yıkım faktörü ve atık ekserji oranı, sırasıyla yaklaşık %3,1 ve %3,2 oranında azalmaktadır. Ara ısıtıcı kütleli debi oranının 0,02 artışı ile termal verim, ekserji verim, ısıl yararlanma oranı ve ekolojik performans katsayısı, sırasıyla yaklaşık %2, %2, %3,9 ve 0,28 oranında artarken ekserji yıkım faktörü ve atık ekserji oranı, yaklaşık %3,9 oranında azalmaktadır. Ölü hal sıcaklığının 10 K'lik yükselmesi, ekserji verimini yaklaşık %1,4 oranında arttırırken besi deniz suyu kütleli debisi artışı, verimliliği olumsuz etkilemektedir.

Anahtar kelimeler: Nükleer, Desalinasyon, Ekserji, Termodinamik analiz

THERMODYNAMIC ANALYSIS OF A NUCLEAR DESALINATION COGENERATION PLANT TO BE BUILT ON THE MEDITERRANEAN COAST

SUMMARY

While population growth, intensification of agricultural and industrial activities in the World increase the demand for fresh water, pollution and limited or unequal distribution of water resources reduce the per capita water supply. Since 97.5% of water on Earth is not directly usable and the water scarcity risk is gradually increasing, access to clean and safe water has become important, and desalination plants have been one of the effective methods that can be used to meet the need for fresh water in regions suffering from water scarcity. Desalination systems, which can operate with an energy source, can provide this energy requirement in various ways such as fossil fuels or renewable energy sources, as well as by the use of nuclear energy in recent years. The fission energy obtained from a nuclear reactor is converted into thermal energy in nuclear desalination cogeneration plants, which was found to be technically feasible as a result of studies carried out by the International Atomic Energy Agency. Some or all of this thermal energy is used for seawater desalination in a desalination system integrated to a nuclear power plant.

In this study, thermodynamic analysis of a nuclear desalination cogeneration plant to be built on the Mediterranean coast is carried out. In the nuclear desalination cogeneration plant studied, the energy source is a Pressurized Water Reactor, while desalination process is Multi Stage Flash Distillation. The mass and energy conservation and exergy balance equations are applied to all components of the nuclear desalination cogeneration plant, and the thermodynamic modeling of the plant is built using the MATHEMATICA 11 software. The thermal efficiency, exergy efficiency, thermal utilization factor, ecological performance coefficient, exergy destruction factor and waste exergy ratio of the facility are considered as the objective functions. The impacts of design parameters such as thermal energy of nuclear reactor, reheater mass flow rate fraction, live steam temperature, steam extraction nodes for desalination, dead state temperature, salinity of seawater, throttling valve mass flow rate fraction, product water mass flow rate, feed seawater mass flow rate and temperature on these objective functions are investigated. As a result of the analysis, with an increase of 18 K in the live steam temperature, thermal efficiency, exergy efficiency, thermal utilization factor and ecological performance coefficient of the plant increase by approximately 1.6%, 3.2%, 1.6% and 0.23, respectively, while exergy destruction factor and waste exergy ratio decrease by approximately 3.1% and 3.2%, respectively. With an increase of 0.02 in the reheater mass flow rate fraction, thermal efficiency, exergy efficiency, thermal utilization factor and ecological performance coefficient increase by about 2%, 2%, 3.9% and 0.28, respectively, while exergy destruction factor and waste exergy ratio decrease by about 3.9%. A 10 K increase in the dead state temperature increases the exergy efficiency by about

1.4%, while the increase in the feed seawater mass flow rate negatively affects the efficiency.

Keywords: Nuclear, Desalination, Exergy, Thermodynamic analysis



1. GİRİŞ

Endüstriyel, tarımsal ve evsel kullanım için temiz su ihtiyacı Dünya çapında sürekli artarken buna karşılık su kirliliği ve nüfus artışı gibi etkilerle kişi başına düşen yıllık su arzı azalmaktadır. Mevcut su kaynaklarının tükenmesi veya kirlenmesi sonucunda ortaya çıkan bu kıtlık, yaşam kalitesinde genel bir düşüşe neden olmaktadır. Yaşam kalitesi değerlendirmelerinde bir kriter olan su stresi endekslerine göre, birçok ülkenin gelecekte su kıtlığı ile karşı karşıya kalacağı tahmin edilmektedir [1]. Su varlığı bakımından zengin kabul edilen ülkelerde yılda kişi başına düşen kullanılabilir su miktarı 8000 – 10000 m³'ten daha fazla iken; bu rakam, ülkemizde 1586 m³ civarındadır [2]. Dünya çapında kişi başına düşen yıllık ortalama su miktarının 7600 m³ [3] olduğu düşünüldüğünde; Türkiye'nin ortalama değerini çok uzağında olduğu görülmektedir. Dolayısıyla ülkemiz kişi başına düşen yıllık su miktarına göre su azlığı yaşayan bir ülke konumundadır [4]. Dünya yüzeyinde 1400 milyon km³ su bulunmaktadır. Ancak bu suyun %97,5'i deniz ve okyanuslarda bulunmaktayken %2,5'i temiz sudur. Temiz suların ise sadece %0,4'ü kolayca ulaşılabilir ve kullanılabilir [5]. Bu durum, dünyadaki birçok ülkeyi temiz su ihtiyacını sağlamaya yönelik arayışlara itmektedir. Bu nedenle; desalinasyon tesisleri, gelecekte temiz su taleplerinin karşılanması için önemli bir seçenektir [1].

Birçok ülkede faydalanılan desalinasyon tesislerinde temiz su üretimi için gereken enerji ihtiyacı çoğunlukla kömür, petrol ve doğalgaz gibi fosil yakıtlardan elde edilmektedir. Bununla birlikte fosil yakıtların yakın bir gelecekte tükenme ve sera gazı yayma dezavantajları vardır. Güneş, rüzgâr gibi yenilenebilir enerji kaynakları sera gazı salımı bakımından avantajlı olsalar bile geniş alanlara ve yüksek yatırım maliyetlerine ihtiyaç duyarlar. Bu nedenlerden dolayı son yıllarda desalinasyon tesislerinde ihtiyaç duyulan proses ısısı veya elektrik enerjisi için nükleer enerjinin kullanımı bir alternatif olarak ön plana çıkmıştır [1].

1960'lı yılların başlarında Uluslararası Atom Enerjisi Ajansı (UAEA), deniz suyunun tuzdan arındırılması için nükleer enerjinin kullanımıyla ilgili çeşitli teknik ve ekonomik fizibilite çalışmaları yapmıştır. Bu çalışmaların neticesinde nükleer

desalinasyonun teknik olarak uygulanabilir olduğu görülmüştür [6]. Nükleer desalinasyon işleminde bir nükleer reaktörden elde edilen fisyon enerjisi termal enerjiye dönüştürülür ve bu enerjinin bir kısmı veya tamamı proses ısısı olarak deniz suyunun tuzdan arındırılması için kullanılır.

Desalinasyon işlemleri, kullanılan enerji türüne göre sınıflandırılabilir. Isıl enerji kullanılan işlemlere çok kademeli şok damıtma (ÇKŞD), çok etkili damıtma (ÇED) ve termal buhar sıkıştırma (TBS) gibi işlemler örnek gösterilebilir. Ters osmoz (TO) ve mekanik buhar sıkıştırma (MBS) gibi işlemlerde ise mekanik enerjiden faydalanılmaktadır. Bu işlemler, suyu çözeltilerden ayıran işlemlerdir. Tuzu çözeltilerden ayıran elektrodializ (ED) ve iyon değişimi gibi prosesler ve iki veya daha fazla desalinasyon işleminin birleştirilmesiyle oluşan hibrit desalinasyon işlemleri de mevcuttur [1].

Desalinasyon tesisleri, tek bir amaç veya elektrik enerjisi + proses ısısı şeklinde ortak üretim tesisi olarak tasarlanabilirler. Tek amaçlı bir nükleer desalinasyon tesisinin reaktörleri yalnızca temiz su üretimi için enerji sağlar. Bir kojenerasyon tesisinde ise aynı anda hem elektrik hem de temiz su üretilir. Nükleer reaktörler, ÇKŞD ve ÇED işlemlerine ısıl enerji, TO ve MBS gibi mekanik enerjiye dayalı işlemlerde ise elektrik enerjisi sağlarlar. Ayrıca desalinasyon tesislerinde pompalar ve diğer çeşitli hizmetler için de elektrik enerjisi gerekmektedir [1].

Bu tez kapsamında yapılacak çalışmanın temel amacı, Akdeniz kıyısında kurulacak bir nükleer desalinasyon kojenerasyon tesisinin termodinamik analizini yapmaktır. İncelenmiş olan nükleer desalinasyon kojenerasyon tesisinde enerji kaynağı bir basınçlı su reaktörü (BSR) iken desalinasyon prosesi ise ÇKŞD işlemidir. Önceki çalışmalarda, çeşitli ülkelerdeki nükleer desalinasyon kojenerasyon tesisleri üzerine farklı yöntemlerle analizler yapılmış fakat ülkemizde kurulabilecek bir nükleer desalinasyon kojenerasyon tesisi ile ilişkili kapsamlı bir enerji-ekserji analizi çalışması yapılmamıştır. Çalışma sonucunda bu tür bir desalinasyon kojenerasyon tesisinin termal verimi, ekserji verimi, ısıl yararlanma oranı, ekolojik performans katsayısı, ekserji yıkım faktörü ve atık ekserji oranı gibi amaç fonksiyonlarının, tasarım parametreleri olan nükleer reaktörün termal enerjisi, ara ısıtıcı kütleli debi oranı, taze buhar sıcaklığı, desalinasyon için buhar çekme noktaları, ölü hal sıcaklığı, deniz suyu tuzluluğu, kısılma vanası kütleli debi oranı, damıtılmış su kütleli debisi, besi deniz suyu kütleli debisi ve sıcaklığı ile ne şekilde değiştiği incelenmiştir.

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Dünyanın temiz su üretiminde pay sahibi olan nükleer desalinasyon kojenerasyon tesisleri hakkında birçok analiz ve araştırma yapılmıştır. Enerji kaynaklarının daha verimli kullanılması amacıyla yapılan önceki çalışmalarda, farklı tesis konfigürasyonlarının çeşitli yöntemler ve yazılımlarla karşılaştırmalı analizleri uygulanmış olup nükleer kojenerasyon sistemlerinin termodinamik, ekonomik analiz ile birlikte optimizasyon çalışmaları üzerine odaklanılmış ve nükleer desalinasyon teknolojilerinin gelişmelerinden bahseden araştırmalar öne çıkmıştır. Bu bölümde, literatürde yer alan bu analiz ve araştırmalarla ilgili bilgiler sunulmaktadır.

Bir çalışmada, nükleer desalinasyon tesislerinin termodinamik analizi için UAEA tarafından geliştirilen Desalination Thermodynamic Optimization Program (DE-TOP) yazılımı kullanılarak kojenerasyon sistemlerinin farklı bağlantı alternatifleriyle birlikte analizi yapılmıştır [7]. Farklı enerji santralleri sayısal olarak modellenmiş ve sonuçları literatürdeki gerçek verilerle karşılaştırılmıştır. Kıyaslamanın sonuçları, referans verileriyle simülasyon sonuçlarının uyum içinde olduklarını göstermiştir. Bir başka çalışmada, ÇKŞD prosesi ile 3000 MWth'lik bir BSR'nin termal enerji kaynağı olarak kullanıldığı desalinasyon tesisinin evrimsel algoritmalar yoluyla çok amaçlı termoeconomik optimizasyonu gerçekleştirilmiştir [8]. Tesisin termodinamik simülasyonu, Thermoflex programında yapılmış ve analizde ayrıca Matlab yazılımından da faydalanılmıştır. Optimize edilmiş son tasarımın termoeconomik analizi, tesisteki tersinmezliklerin büyüklüğünü, yerini ve nedenlerini göstermiştir. ÇED-TBS desalinasyon prosesinin 1000 MW'lık bir nükleer reaktör ile birlikte kullanıldığı bir nükleer desalinasyon tesisinin termoeconomik optimizasyonu genetik algoritmalar ile [9]'da gerçekleştirilmiştir. Söz konusu çalışmada enerji ve ekserji analizlerine dayanarak termodinamik modelleme yapılırken, çalışma ile ilgili tüm maliyetler hesaplanarak ekonomik analiz yapılmıştır. İlgili bir çalışmada yine ÇED-TBS nükleer desalinasyon tesisinin termodinamik, termoeconomik ve çok amaçlı optimizasyonları yapılmış ve çok amaçlı optimizasyonun nükleer kojenerasyon tesisinin hem termodinamik hem de ekonomik özelliklerini geliştiren yenileştirilmiş

bir optimizasyon yaklaşımı olduğu belirtilmiştir [10]. ÇKŞD ve ÇED desalinasyon uygulamalarına entegre bir nükleer kojenerasyon tesisinin DE-TOP programı kullanılarak termodinamik analizi gerçekleştirilen başka bir çalışmada tesisin termal veriminin, ısı yararlanma oranının, güç kayıp oranının ve kazanç çıktı oranının tasarım parametreleri ile değişimi incelenmiştir. Isıl yararlanma oranına göre ÇKŞD prosesinin ÇED prosesinden daha avantajlı olduğu bulunmuştur [11].

Nükleer desalinasyon için CANDU tipi ve sodyum soğutuculu hızlı bir reaktörün karşılaştırıldığı bir başka çalışmada, desalinasyon için TO işlemi tercih edilmiştir [12]. Her iki sistemin elektrik güç üretiminin ve desalinasyon işleminin performansını değerlendirmek için ekserji analizi yapılmış ve tasarım parametrelerinin güç üretimi, desalinasyon ve tüm sistemin ekserji verimleri üzerine olan etkileri de incelenmiştir. Genel tesisin ekserji verimliliğine dayanarak sodyum soğutuculu reaktörün daha avantajlı olduğu bulunmuştur. ÇED'in desalinasyon prosesi olarak tercih edildiği bir nükleer desalinasyon kojenerasyon tesisinin termodinamik değerlendirmesinin DE-TOP kullanılarak gerçekleştirildiği bir diğer çalışmada, farklı bağlantı konfigürasyonları incelenmiş ve güç kayıp oranı, net verimlilik, termal kullanım ve toplam güç gereksinimi gibi parametreler analiz edilmiştir [13]. Bu parametrelerin buhar çıkışının sıcaklığına, konumuna ve çürük buhar dönüş noktaları ile birleştirme tipine bağlı olduğu bulunmuştur. Bir başka çalışmada, gaz türbini - modüler helyum reaktörü (GT-MHR) ile TO desalinasyon işlemi entegre edilerek termodinamik analizi yapılmış ve çeşitli parametrelerin TO işleminin verimine olan etkisi incelenmiştir [14]. Reaktörden gelen atık ısı kullanıldığında, ekserji verimliliğinin arttığı görülmüştür. Temiz su sıkıntısı yaşayan Gana'da kurulacak bir nükleer desalinasyon tesisine ilgili yapılan bir çalışmada, verimliliği ve buhar gereksinimlerini belirlemek için TBS desalinasyon işlemine entegre edilen bir kojenerasyon nükleer santralin çevrim analizi yapılmıştır [15]. TBS desalinasyon prosesinin termal performansı, nükleer santralin verimliliği ile arttığı, artan buhar tüketim oranı ile azaldığı sonuç olarak gözlemlenmiştir. Başka bir çalışmada, ÇED-TBS hibrit desalinasyon tesislerle entegre nükleer enerji santralinin modellenmesi yapılmıştır [16]. Dinamik modele dayalı olarak bu tasarımın uygulanabilirliği ve performansı uygun bulunmuştur. Bir başka çalışmada, SMART reaktöre sahip bir nükleer santralin ikincil devresinden çekilen buharın çekim konumunun çevrimin ekserji ve termoekonomik performansı üzerindeki etkisi incelenmiştir [17]. ÇED-TBS ve ÇKŞD desalinasyon prosesleri

kullanılan uygulamada, farklı kazanç çıktı oranlarına ve çeşitli ekonomik analiz senaryolarına göre nükleer kojenerasyon sistemleri karşılaştırılmıştır. Tek amaçlı ve çift amaçlı nükleer desalinasyon tesislerinin kullanımıyla ilgili bir çalışmada, su ve elektrik üretimine dayalı termodinamik değerlendirmelere yer verilmiştir [18]. Bu değerlendirmeler, farklı durumlarda tesisin su ve elektrik üretimi verimliliğinin karşılaştırmalı analiziyle ilgilidir. Kojenerasyon nükleer santralının çevrim analizine vurgu yapan bir başka çalışmada ise TBS desalinasyon işleminin teorik modeli geliştirilmiş ve bir nükleer santrale entegre edilmiştir [19]. FORTRAN dili kullanılarak geliştirilen modelde TBS desalinasyon prosesinin performansı ve nükleer kojenerasyon sisteminin çevrim verimliliği, desalinasyon işlemini besleyen buharın basıncı ile arttığı görülmüştür.

Bir ileri ağır su reaktörünün enerji kaynağı olarak kullanıldığı bir çalışmada, alçak sıcaklıklı buharlaştırma (ASB) ve ÇED-TBS desalinasyon yöntemlerinin bağlantı alternatifleriyle teknik fizibilite çalışmaları yapılmış ve nükleer desalinasyon tesisinin bağlantı analizleri, metodolojileri, reaktör gücü kaybı ve çeşitli güvenlik hususları ele alınmıştır [20]. Bir desalinasyon tesisinin güç üreten bir elektrik santraline entegre edildiği bir başka çalışmada ise optimizasyon çalışması yapılmış ve tesisin ekonomik koşullarının ile tesis konfigürasyonlarının damıtılmış suyun üretilen elektrik gücüne oranı ve damıtılmış suyun proses buhar girdisine oranı gibi özelliklere etkileri incelenmiştir [21]. EURODESAL projesi kapsamında, kojenerasyon tesisi nükleer reaktör ikinci çevrimi-desalinasyon tesisi bağlantı yöntemleri optimum bir seviyede geliştirilmiş ve entegre sistem tasarımının nükleer reaktör güvenliğini olumsuz yönde etkilemediği doğrulanmıştır. Ayrıca, Avrupa koşullarında fosil enerji bazlı sistemler ile karşılaştırılarak entegre sistemin ekonomik değerlendirmesi yapılmıştır ve desalinasyon seçeneklerinin ekonomik olarak uygulanabilirliği görülmüştür [22]. EURODESAL projesi çerçevesinde bir başka çalışmada ise iki çeşit nükleer reaktörle entegre edilmiş bir ÇED desalinasyon sisteminin analizi yapılmıştır. Referans reaktör olarak bir basınçlı su reaktör ve gaz soğutmalı reaktör seçilen analizde yapılan hesaplamalar sonucunda, tesis entegrasyonunun optimizasyon kriterlerine göre teknik olarak uygulanabilirliği gösterilmiştir [23]. Farklı tipte desalinasyon işlemlerinin bir nükleer enerji santraline entegre edildiği başka bir çalışmada ise termal sistemlerin iyileştirmeleri üzerinde durulmuştur. Nükleer santral sisteminde yapılan termodinamik analize dayanan bu iyileştirme çalışması, desalinasyon tesisinin verimliliğini

yükseltme amacıyla çeşitli termal konfigürasyonlarla yapılmıştır [24]. Bir başka çalışmada ise bir reaktöre entegre ileri osmoz (İO) desalinasyon sistemi, ÇKŞD ve ÇED desalinasyon sistemleriyle enerji verimliliği, kazanç çıktı oranı, atık ısı kullanım oranı ve su üretim kapasitesi bakımından karşılaştırılmıştır [25]. Karşılaştırma sonucunda, İO sisteminin diğer desalinasyon sistemlerinden daha avantajlı olduğu görülmüştür. Yüksek ısı verime sahip olan yüksek sıcaklıklı gaz soğutmalı reaktörün termal enerjisiyle entegre hibrit ÇED-TO desalinasyon sistemini ele alan başka bir çalışmada, sistemin tasarımı incelenmiş ve entegre sistemin güvenlik tasarım ihtiyacını karşılamak için güvenlik analizi yapılmıştır [26]. Başka bir çalışmada, bir nükleer desalinasyon tesisinin performansını optimize edecek buhar çekme noktasının belirlenmesi üzerinde durulmuştur [27]. Buhar türbininden önceki ve sonraki buhar çekme noktaları analiz edilmiş ve desalinasyon tesisinden üretilebilecek temiz su miktarları hesaplanmıştır. Güney Afrika'daki su kıtlığına çare aramak için yapılan bir çalışmada, kojenerasyon amaçlı yüksek sıcaklık reaktörü kullanılarak ÇED ve TO işlemlerinin termodinamik ve ekonomik değerlendirmesi yapılmıştır [28]. Çeşitli çevrim konfigürasyonları analiz edilerek ÇED işlemiyle kıyaslandığında TO işleminin iki kat daha fazla su ürettiği bulunmuştur. Başka bir çalışmada, bir BSR'den sağlanan ısı ile ÇED-TBS desalinasyon tesisinin kütle, momentum ve enerjinin korunum yasalarına dayanarak dinamik modellenmesi geliştirilmiştir [29]. Modelleme doğrulaması için sistem tasarımının hem denge durumunda hem de açık döngü dinamik durumundaki simülasyon sonuçları verilmiş olup farklı güç seviyeleri için sonuçlar da analiz edilmiştir. Yüksek sıcaklıklı gaz soğutmalı reaktör kullanılan başka bir çalışmada, MBS desalinasyon işleminin performansı için analiz yapılmıştır [30]. Bu analizde sistem performansı, buharlaşma, yoğuşma, su kimyası, korozyon ve malzeme seçimi gibi özellikleri etkileyecek parametreler araştırılmıştır.

Tunus'ta deniz suyunun tuzdan arındırılmasında nükleer enerjinin uygulanması için bir stratejinin geliştirilmesine yönelik araştırmaya dayanan bir çalışmada, bir nükleer desalinasyon sisteminin maliyet analizi yapılmıştır [31]. Bu çalışma kapsamında farklı desalinasyon işlemleri, hem farklı nükleer reaktörlere hem de farklı fosil yakıtlı tesislere entegre edilerek ekonomik olarak karşılaştırılmış ve nükleer desalinasyon sistemlerinin daha ekonomik bir çözüm olduğu gösterilmiştir. Bir başka çalışmada, desalinasyon tesisine bağlı kojenerasyon modunda çalışan farklı nükleer reaktörlerin güç ve temiz su maliyetlerinin analizi sunulmuştur [32]. ÇED veya TO desalinasyon

işlemlerine ayrı şekilde entegre edilen reaktörlerin atık ısısı kullanılarak sistem maliyetleri seçilen bölgeye özgü koşullara göre karşılaştırılmıştır. Tüm reaktör kaynakları için TO işleminin maliyeti, ÇED işlemine göre daha düşük olduğu bulunmuştur. Bir başka çalışmada, kojeneratif desalinasyon sistemlerinde, DE-TOP ve DEEP-4 programları kullanılarak, farklı nükleer reaktörlerin güç ve temiz su maliyetlerinin detaylı analizleri karşılaştırmalı olarak yapılmıştır [33]. Karşılaştırmalı analizlerde, su üretim maliyeti açısından nükleer enerji bazlı sistemlerin konvansiyonel bazlı sistemlerden ve hibrit desalinasyon tesislerinin tek entegrasyon yapılmış tiplerinden daha avantajlı olduğu bulunmuştur. Fosil yakıtlı sistemler ve nükleer enerji kullanılarak desalinasyon sistemlerinin maliyet değerlendirmesine odaklanan başka bir çalışmada ise çevresel maliyetler de dahil olmak üzere nükleer enerji sistemlerine entegre desalinasyon tesislerinde çok daha düşük güç ve temiz su maliyetleri bulunmuştur [34]. Bir başka çalışmada, bir nükleer desalinasyon kojenerasyon sistemindeki iki ürünün (elektrik + temiz su) maliyetlerini belirlemek için ekserji yöntemi kullanılmış ve ÇED işlemine entegre edilmiş BSR, gaz türbini ve kombine çevrim olarak oluşturulan üç tesisin ayrı ayrı ekonomik değerlendirmesi yapılarak karşılaştırılmıştır [35]. Bir nükleer santralin çeşitli desalinasyon teknolojileri açısından teknik analizi ve ekonomik değerlendirmesi yapılan bir çalışmada ise DEEP ve DE-TOP simülasyon modelleri kullanılıp sermaye maliyeti (inşaat, yerleşim, hizmetten çıkarma, yakıt, işletme, bakım maliyetleri), temiz su maliyeti dahil farklı parametreler ve tuzdan arındırma parametreleri hesaplanmıştır [36]. Hesaplamalar, her bir entegre edilmiş teknoloji için temiz su maliyetinin farklı çıktığını göstermiştir ve araştırmada, nükleer reaktörle entegre ÇED işleminin en ideal çözüm olduğu bulunmuştur. Kuveyt'te kurulacak bir nükleer desalinasyon tesisinin petrol veya doğalgazın enerji kaynağı olarak kullanıldığı bir desalinasyon tesisiyle ekonomik karşılaştırması [37]'de sunulmuştur. Nükleer desalinasyon tesisinin ürettiği güç maliyetinin fosil yakıt destekli tesislerden en az % 35 az olduğu bulunmuştur. Ayrıca, ÇED işlemine entegre kojenerasyon sisteminin ÇKŞD ve TBS işlemlerine entegre tesislere göre su üretim maliyeti bakımından daha ekonomik olduğu gösterilmiştir. Nükleer ve fosil enerji kaynaklı ÇED ve TO desalinasyon işlemlerinin ekonomik karşılaştırması DEEP ile gerçekleştirilmiş ve [38]'de sunulmuştur. Nükleer kojenerasyon sistemlerini kullanma potansiyelini değerlendirme hedefi olan bu çalışmada konfigürasyon, üç senaryoda analiz edilmiş olup su maliyeti bakımından nükleer desalinasyon seçenekleri daha olumlu bulunmuştur.

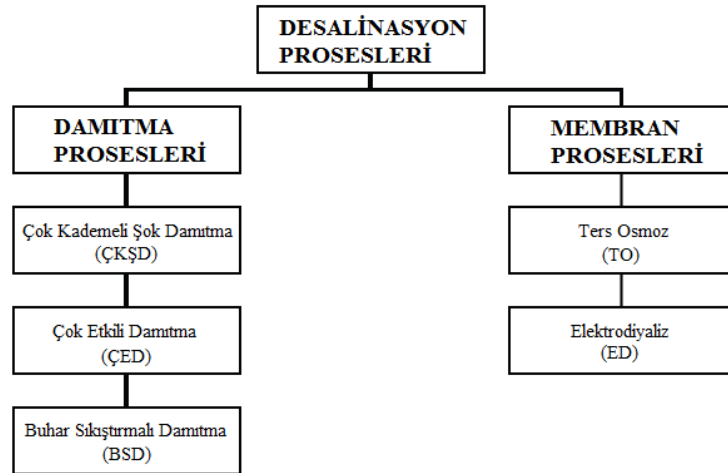
Bir UAEA raporunda [39], nükleer reaktörler ve desalinasyon sistemlerinin entegrasyonun optimizasyonu üzerine araştırmalar yapılmış, nükleer desalinasyon sistemlerinin verimli bağlantı konfigürasyonları belirlenmiş ve performansları değerlendirilmiştir. Büyük lekli nükleer desalinasyon tesislerinin detaylı özellikleri için daha fazla değerlendirme gerektirebilecek teknik özellikleri de içeren raporda, yapılan araştırmaların sonuçları ülke bazında vurgulanmıştır. Bir başka raporda [40], çeşitli ülkeler tarafından UAEA'ya sunulan nükleer desalinasyon faaliyetlerinin mevcut durumu ve nükleer desalinasyon tesislerinin n tasarım çalışmaları hakkında bilgi verilmektedir. UAEA'nın nükleer desalinasyon ile ilgili gelişmeleri ve faaliyetlerini açıklayan bir başka raporu, elektriksel olmayan uygulamalar için düşünülen yeni reaktör tipleri ve bu uygulamaların nükleer reaktörlere entegre edilmesi konularını incelemektedir [41]. Ayrıca, çeşitli ülkeler tarafından yürütülen tekno-ekonomik çalışmaların özetinin sunulduğu raporda içme suyu maliyet azaltma stratejileri tartışılmış ve çevresel faydaları ele alınmıştır. UAEA'nın bir başka raporunda [42], nükleer desalinasyon faaliyetleri kapsamında çevresel sorunların genel bir değerlendirmesi yapılmıştır. Nükleer desalinasyon tesislerinin geliştirilmesinde gerekli olan çevresel hususlara ilişkin görüş sunan raporda tesislerin hava, deniz, kıyı ve sosyo-ekonomik evre üzerindeki olası etkileri tanımlanmış ve karşı karşıya kaldığı bazı zorluklar sunulmuştur. Yüksek sıcaklıklı reaktörlerin desalinasyon gibi farklı proses ısısı uygulamaları için değerlendirilme potansiyelini araştıran bir UAEA çalışmasında teknik, tekno-ekonomik çalışmalar ve önemli güvenlik hususları irdelenmiştir [43]. UAEA'nın başka bir çalışmasında ise nükleer enerjinin elektriksiz uygulamalar için pazarlama potansiyeli değerlendirmesi yapılmıştır [44].

3. DESALINASYON PROSESLERİ

Endüstriyel kullanımına 20. yüzyılın ortalarında başlanan desalinasyon işlemleri, günümüzde dünya genelinde çoğunlukla deniz kenarında ve su kıtlığı yaşanan yerlerde temiz su üretimi için kullanılmaktadır [45]. 2019 yılı itibariyle dünya çapında 174 ülkede toplam 17000 desalinasyon tesisi bulunmakta olup günlük toplam desalinasyon kapasitesi 107 milyon m³'tür [46].

Desalinasyon, enerji girişinin sağlanmasıyla suyun veya tuzun tuzlu su bileşeninden ayrılmasını sağlayan bir işlemdir [1]. Deniz suyu desalinasyonunda besleme olarak kullanılan deniz suyu akışı, çözünmeyen maddeler içermeyen bir damıtılmış su akışı ve bir konsantre tuzlu su akışı olarak ikiye ayrılarak sistemde saf su elde edilmektedir [40].

Desalinasyon prosesleri uygulamaya konulduğundan beri birçok tuzdan arındırma ilkesinden faydalanılmıştır [45]. Dünyada en çok kullanılan prosesler arasında farklı ayrılma ilkelerine dayanan damıtma ve membran desalinasyon işlemleri tercih edilmektedir. Bu prosesler başarıyla geliştirilme imkanı bulmuştur ancak sadece birkaçı ticari işletme hedeflerine ulaştırılmıştır. Büyük ölçekli üretim için güvenilir olan ticari desalinasyon prosesleri arasında Şekil 3.1'de görüldüğü üzere damıtma işlemleri olarak çoğunlukla ÇKŞD, ÇED ve buhar sıkıştırma (BSD) kullanılırken; membran işlemleri olarak genellikle TO ve ED kullanılmaktadır [38].



Şekil 3.1 : Desalinasyon prosesleri [45].

3.1 Damıtma Desalinasyon Prosesleri

Damıtma desalinasyon işlemlerinde, deniz suyunun belirli sıcaklık ve basınçta buharlaşmasını sağlamak için bir tesisten elde edilen doymuş buhar kullanılmaktadır. Bu proseslerde, termal enerjinin kullanılmasına ek olarak pompalar ve yardımcı bileşenler için elektrik enerjisi de gerekebilir [40].

İstenen miktarda saf su üretmek; buharlaşmayı sağlayan buharın miktarı ve kalitesine, deniz suyu sıcaklığına, damıtma tesisinin tipine, tasarımına ve performansına bağlı olmaktadır. Ayrıca yüksek performanslı malzemeler kullanılması, korozyon direncinde iyileştirmeler yapılması, termodinamik verimliliğin artırılması da proses süreçlerini daha ekonomik hale getirmektedir [40].

Başlıca damıtma desalinasyon proseslerine örnek olarak ÇKŞD, ÇED ve BSD işlemleri verilebilir.

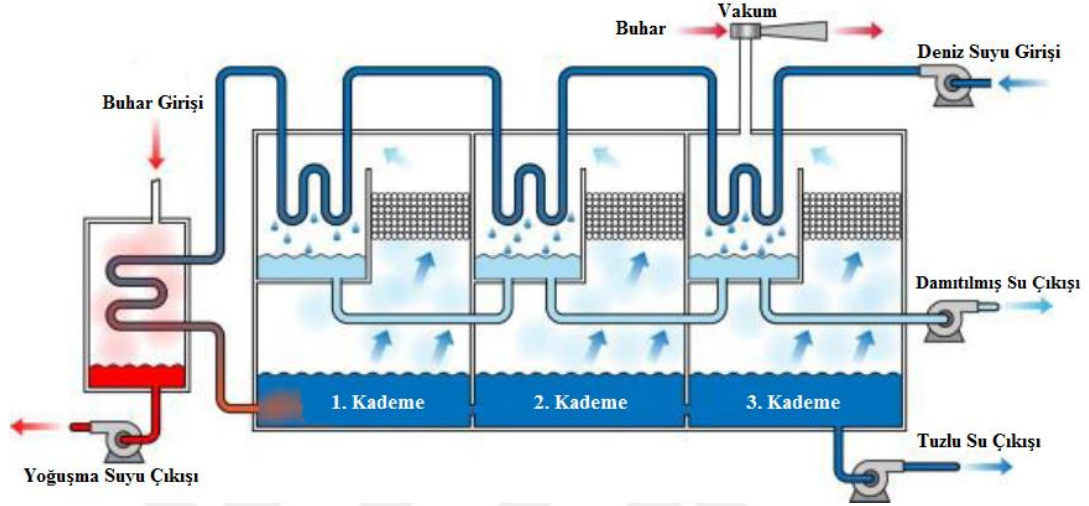
3.1.1 Çok kademeli şok damıtma (ÇKŞD)

1950'li yıllarda geliştirilen ÇKŞD prosesi, suyun buharlaşması ve yoğunlaştırılması esasına dayalı bir desalinasyon işlemidir [46]. İşletme kolaylığı, işlemin performans kanıtlılığı, tesisin standart dizaynı ve ekipmanların mevcudiyeti nedenleriyle önde gelen desalinasyon işlemlerinden biri haline gelmiştir [1].

Su geri dönüşümü sağlayarak sudan daha fazla buhar elde etmek için bir ÇKŞD ünitesinin birden fazla evaporatörü ardışık olarak düşük basınçlarda işletilebilmektedir [47]. Bu proses; birden fazla buharlaştırıcı, tuzlu su ısıtıcısı, pompalama üniteleri, havalandırma sistemi ve bir soğutma suyu kontrol döngüsünden oluşmaktadır [48].

Şekil 3.2'de görüldüğü gibi deniz suyu, her biri ısı eşanjörü ve yoğunlaşma toplayıcı içeren 'kademe' adı verilen sıralı bir evaporatöre pompalanmaktadır [45]. Bu kademeler, art arda azaltılmış basınçlarda korunmaktadır [1]. İlk önce kademelerin üst tarafındaki tüplerden geçen deniz suyu, yine kademelerin içerisinde üretilen saf su buharı ile ısı alışverişi yapmaktadır. Deniz suyu, tüm kademelerin tüplerinden ayrıldıktan sonra bir elektrik santralinden gelen yüksek sıcaklıklı su buharı bulunan bir ısıtıcıya girer. Deniz suyu, ısıtıcıda maksimum sıcaklığa ulaşır ön ısıtması tamamlanır. Ön ısıtması tamamlanan deniz suyu, kademelere tekrar yönlendirilerek besi deniz suyunun bir kısmı, farklı basınç ve sıcaklıkta saf su olarak buharlaşır. Elde edilen saf su buharı, besi deniz suyunun geçtiği tüplere gelerek ısınımsını deniz suyuna

verir ve buharın yoğuşması sağlanır. Her kademede tekrarlanan bu işlemlerin sonucunda yoğuşan suyun tamamı, damıtılmış su olarak toplanır. Son kademede kalan ve buharlaşmayan tuzlu su, tekrar denize yönlendirilir [45]. Sıralı kademelerde buharın yoğuşması esnasında salınan yoğuşmayan gazlar, havalandırma sistemi yoluyla atmosfere atılır [38].

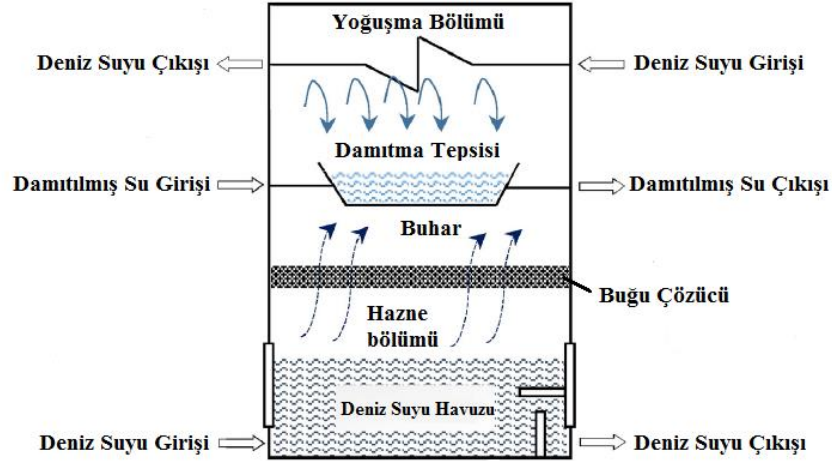


Şekil 3.2 : ÇKŞD prosesinin şeması [49].

Bir kademeye giren toplam deniz suyunun buharlaşan kütle miktarı, o kademenin basıncına bağlıdır [49]. Bir ÇKŞD prosesinde bütün kademeler, her bir kademe daha düşük basınçlarda çalışacak şekilde tasarlanır. Gelen deniz suyu, ilk kademeye ulaşana kadar kademelerde kaynamayacak şekilde daha yüksek bir basınç altında ısıtılır. Deniz suyu, ilk kademeye giriş yaptığı anda o kademenin sahip olduğu basınç daha düşük olduğu için basınç farkından dolayı ani buharlaşma yaşanır. Ani buharlaşma olayı, her kademede gerçekleşir çünkü her kademenin basıncı gelen besleme suyunun basıncından daha düşüktür [50].

Şekil 3.3'te görüldüğü gibi ÇKŞD proseslerinde, her bir kademenin, buharın üretildiği yer olan hazne bölümü ve buharın yoğuşturulduğu yer olan yoğuşma bölümü olmak üzere iki ayrı bölümü vardır. Hazne bölümünde; deniz suyu havuzundan ani buharlaşan saf su miktarı, kademe sıcaklığı ile orantılıdır. Bu nedenle, kademe sıcaklığı arttıkça deniz suyundan buharlaşan buhar miktarı artar. Bu bölümde, bir miktar buhar üretildiği için diğer kademelere aktarılan deniz suyu konsantrasyonu daha çok artar. Oluşan buhar, tuzlu su damlacıklarını ayırabilen ve sadece saf su buharının geçmesine izin veren buğu çözücünden geçer ve yoğuşma bölümüne ulaşır. Yoğuşma bölümü ise buharın daha düşük sıcaklıktaki tüplerin içinden geçen deniz

suyuna ısı transferiyle gizli ısını birakarak yoğuşturulduğu yerdir. Bu bölümde, damıtılmış saf suyu toplamak için damıtma tepsisi ve yoğuşmayan gazları çıkarmak için vakum borusu bulunmaktadır. [50, 51]. Kademe sayısı arttığında prosesteki toplam ısı transferi yüzey alanı çoğaldığından daha fazla su buharlaşması gerçekleşir. Bu da desalinasyon ünitelerinde verimi arttırmaktadır [49].



Şekil 3.3 : ÇKŞD prosesinin tek kademesi [51].

90 – 120 °C deniz suyu sıcaklıklarıyla çalıştırılan ÇKŞD üniteleri, genellikle günlük 4000 – 30000 m³ debi kapasitesine sahiptir. Bir ÇKŞD tesisi, tipik olarak 4 – 40 kademe ile tasarlanabilmektedir [47].

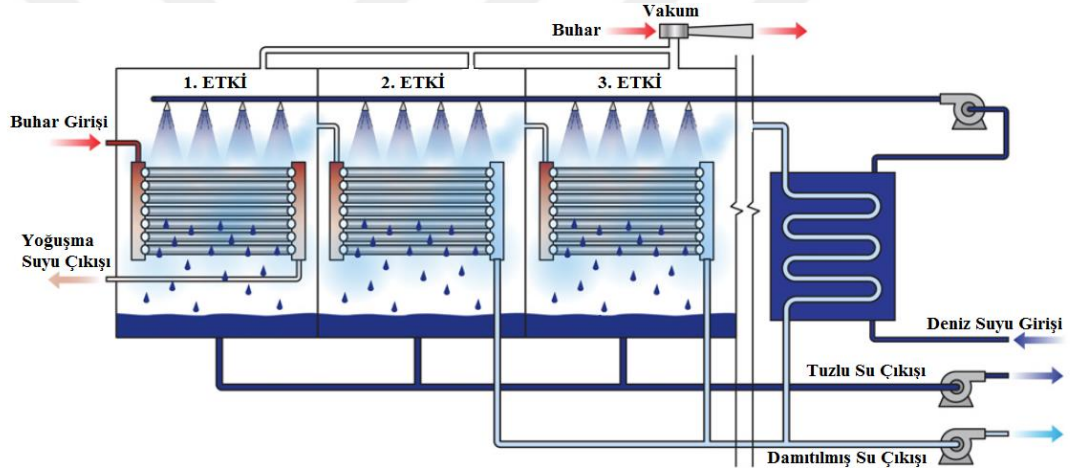
3.1.2 Çok etkili damıtma (ÇED)

Deniz suyundan içme suyu elde etmek için kullanılan en eski büyük ölçekli proses olan ÇED prosesi, 1960'larda desalinasyon endüstrisinin az kapasiteli tesislerinde kullanılmış olup endüstriyel amaçlı kullanımı gitgide artmaktadır. Bu proses, ÇKŞD işlemine benzer şekilde birbirine takip etmekte olan işlemlerle bir seri kanal içinde çalışmakta ve daha düşük basınçlarda işletilmektedir [47].

ÇED prosesi, 'etki' adı verilen bir dizi buharlaştırıcıdan meydana gelir. Bu etkiler, düşük ortam basıncında buharın yoğuşması ve suyun buharlaşması prensiplerine göre çalışmaktadır [49]. Etkiler boyunca ilerledikçe basınç düştüğünden; deniz suyu, daha düşük sıcaklıklarda kaynayıp sonucunda içme suyu elde edilir [50].

Şekil 3.4'de görüldüğü gibi ÇED desalinasyon sistemine ilk etkiden giren deniz suyu, buharlaştırıcı tüplerin yüzeyine püskürtülerek dağıtılır. İlk etkideki deniz suyunun bir kısmı, tüplerin içindeki enerji santrallerinden gelen termal kaynak ile ısıtılarak buharlaşır. Bu termal kaynak, ısını besleme suyuna verdiği için yoğuşarak santrale

geri döner. Diğer etkilere yönlendirilen deniz suyu ise önceki etkilerdeki üretilen buharla ısıtılır. Bu buhar, etkiler içerisinde hem ısıtma işleminin bir parçası hem de damıtılmış saf suyunu oluşturmaktadır. Son etkide üretilen buhar, buharlaştırıcılara giden deniz suyu beslemesine ısınımsı vererek yoğuşup diğer etkilerde oluşan damıtılmış suyla birleşir. Her etkide buharlaşmayan tuzlu su ise son etkide denize geri yönlendirilir [49]. Etkilerdeki deniz suyunun buharlaşması esnasında oluşan yoğuşmayan gazları sistemden atmak için bir vakum sistemi kullanılır [38]. Buharlaştırıcı tüp yüzeylerinin kapanmasını önlemek için bu gazlar uzaklaştırılmalıdır çünkü bu yüzeylerin örtülmesi ısı transfer kaybına neden olmaktadır. Yoğuşmayan gazları çıkarmak için buhar püskürtmeli hava ejektörleri kullanmak en çok tercih edilen yöntemdir. Bu gazların üniteden uzaklaştırılmasını sağlamak için etkide üretilen buharın bir kısmı kullanılır [50].



Şekil 3.4 : ÇED prosesinin şeması [52].

Bu proses ile çalışan tesislerdeki etki sayıları, genellikle 2 – 24 arasında değişmektedir. ÇED işleminin verimi; etki sayısına, ısı transfer alanına ve deniz suyu sıcaklığına bağlı olarak değişmektedir [1]. ÇED prosesleri, 70 °C gibi düşük sıcaklıklarda veya 110 °C gibi yüksek sıcaklıklarda çalışabilirler. Düşük sıcaklıklarda çalıştırılması, buharlaştırıcılarda korozyon etkisini azaltmaktadır [50].

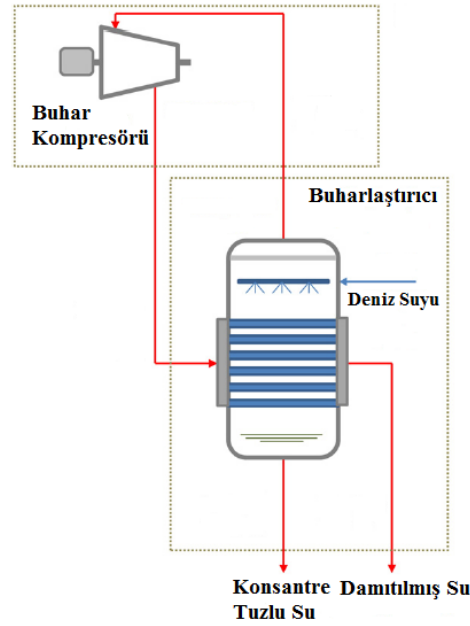
Buhar ve tuzlu su akış yönüne göre ÇED proseslerinin ilk yüksek basınçlı buharlaştırıcıdan son düşük basınçlı buharlaştırıcıya doğru paralel hareket eden ileri beslemeli ve buhar ve tuzlu su akışının etkiler içerisinde ters yönde hareket ettiği geri beslemeli olmak üzere iki düzenlemesi mevcuttur [40]. Buharlaştırıcı tipine göre bu prosesler, yatay tüplü ve dikey tüplü olarak iki farklı konfigürasyonda da tasarlanabilmektedir [50].

3.1.3 Buhar sıkıştırırmalı damıtma (BSD)

Küçük veya orta ölçekli desalinasyon tesislerinde kullanılan ve diğer damıtma işlemleri gibi kombine bir şekilde çalışabilen BSD prosesi, ünitenin içinde buharlaşma işlemini sürekli hale getirme esasına dayanmaktadır [49, 50]. Bu prosesin en önemli avantajı, belli bir basınç ve sıcaklıkta üretilen buhar miktarının buharlaşmayı sağlayarak yeniden kullanılmasıdır [47].

BSD prosesinde deniz suyunun buharlaşması için gereken termal enerji, diğer damıtma yöntemlerindeki gibi bir kazan içinde üretilen buhar ile doğrudan ısı alışverişi olarak değil aynı proses sürecinde oluşan buharın sıkıştırılmasıyla oluşmaktadır. Bu buhar miktarını sıkıştırmak için iki yöntem kullanılır. Birincisi, elektrik ile çalışan mekanik bir kompresör; diğeri ise termal buhar kompresörüdür [42].

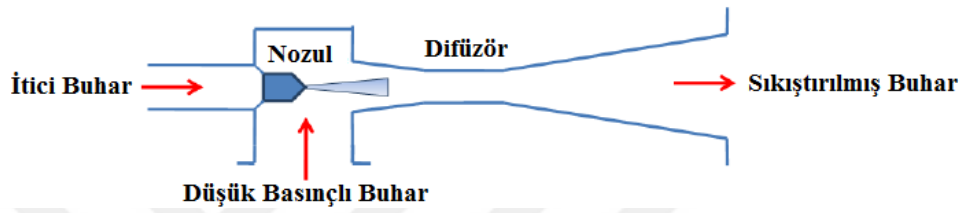
Mekanik kompresör kullanılan MBS prosesinde kompresörün basınç farkı, ısı transfer yüzeyi boyunca korunmaktadır. Şekil 3.5'te görüldüğü üzere sisteme giren deniz suyu, kaynadığı yüzeyin düşük basınç tarafına pompalanır. Buharlaştırmacıda ısıtılan deniz suyundan oluşan buhar, kompresöre yönlendirilir. Kompresöre gelen buhar, sıkıştırılarak yüksek basınç ve sıcaklıkta ısı transfer yüzeyinin yüksek basınç tarafına aktarılır. Yüksek sıcaklıklı buhar, gizli ısısını sistem içerisindeki deniz suyuna bırakarak yoğuşur ve damıtılmış su halinde sistemden çıkar [1].



Şekil 3.5 : MBS prosesinin şeması [53].

MBS prosesinde kompresör ve pompa ekipmanları için elektrik enerjisi tüketilmektedir. Ek bir ısıl enerjiye veya diğer damıtma işlemlerindeki ısı aktarımı için soğutma suyu kullanılan bir yoğuşturucuya ihtiyaç duyulmamaktadır [42].

Şekil 3.6’da görüldüğü gibi termal buhar kompresörü kullanılan TBS prosesinde düşük basınçlı buharı sıkıştırmak için yüksek basınçlı itici buhar kullanılır. İki buhar kütlesi, bir nozuldan girerek düşük basınçlı buharın basıncından daha düşük bir basınca genişler ve işlemin karışım odasında karışır. Karıştırılmış buhar, kinetik enerjinin basınç enerjisine dönüştürülmesiyle bir difüzör boyunca daha yüksek bir basınçta yeniden sıkıştırılır [42].



Şekil 3.6 : TBS prosesinin şeması [42].

BSD prosesi, 46 °C gibi düşük sıcaklıklarda ve 101 °C gibi yüksek sıcaklıklarda çalışabilmektedir [50]. Bu işlemlerde, buharlaştırıcıdaki ısı transfer yüzeyinin verimi, kompresörün verimi ve deşarj edilen tuzlu su geri kazanımının etkinliği sistemin verimini etkilemektedir [1].

3.2 Membran Desalinasyon Prosesleri

Membran prosesleri, deniz suyunun arıtımında bir membran sisteminin kullanıldığı işlemlerdir [47]. Membran, bölme tutamacında istenmeyen parçacıkları ve çözünenleri engelleyen ve sadece suyun geçmesine izin veren bir engel görevi görmektedir [54].

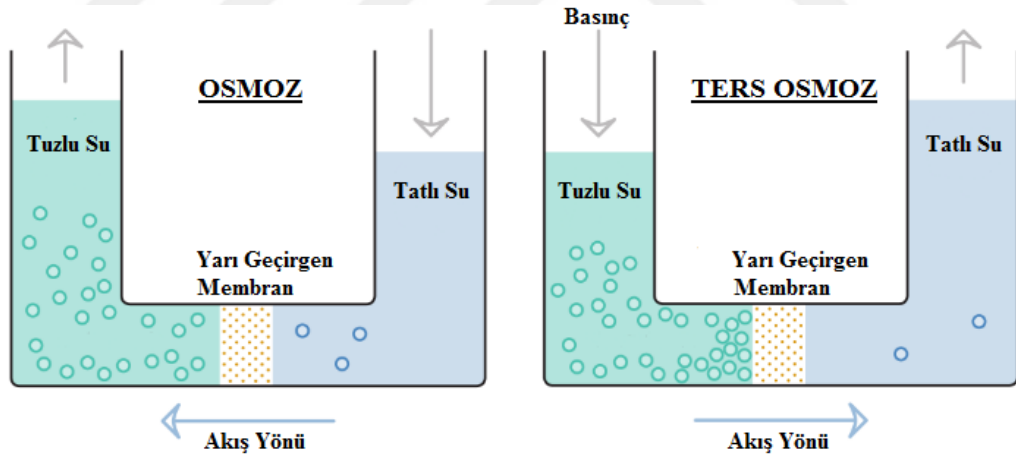
Deniz suyu desalinasyonlarında en çok kullanılan iki membran prosesi TO ve ED işlemleridir [47]. Desalinasyon teknolojilerinde özellikle basınç değişimi ve sistem tasarımı konusunda optimizasyon çalışmaları yapılarak enerji geri kazanımı yüksek TO tesisleri geliştirilmiştir ve günümüzde gittikçe daha kapsamlı bir uygulama haline gelmiştir [55].

3.2.1 Ters osmoz (TO)

Deniz suyunun tuzdan arındırılmasında uygulanan ve gelişen bir teknoloji olan TO prosesi, damıtma yerine tuz ve su bileşenini ayırma prensibine dayanan bir membran

desalinasyon işlemidir [47, 48]. 1960'larda geliştirilen TO işlemi için ilk test tesisi 1965'te kurulmuştur. 1970 yılında deniz suyu için ticari olarak uygulanmasından bu yana daha büyük kapasiteli TO tesisleri, başarıyla tasarlanmış ve işletilmiştir [38]. Bir ısı kaynağına veya faz değişikliğine ihtiyaç duyulmadan uygulanabilen bu proses, dünya çapında % 60'ın üzerinde desalinasyon kapasitesine sahip en çok kullanılan işlemdir [45].

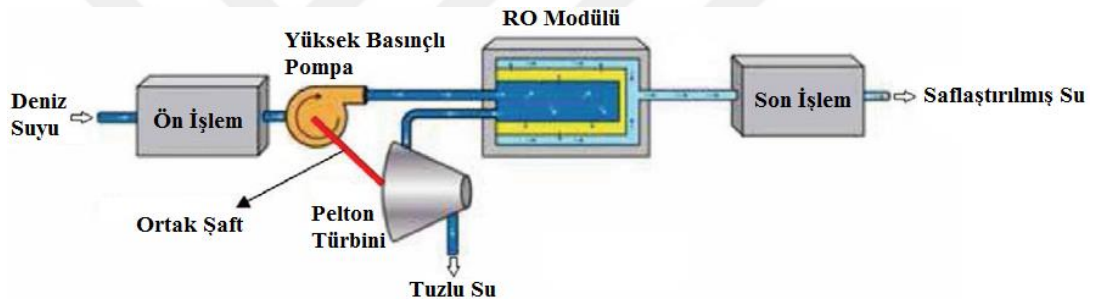
Şekil 3.7'de görüldüğü üzere osmoz, su moleküllerinin tatlı su gibi saf veya seyreltik çözeltilerden tuzlu su gibi daha konsantre bir çözeltilere her iki tarafın konsantrasyonları eşit oluncaya kadar yarı geçirgen bir membrandan geçmesi işlemidir. Osmoz nedeniyle oluşan bu akışın itici gücü, osmotik basınç olarak bilinir. Osmotik basınç, iki çözeltinin tuz konsantrasyonları farkına bağlıdır. Yüksek konsantrasyonlu bölge üzerinde osmotik basınçtan daha yüksek bir basınç uygulanırsa su molekülleri hareketlerinin yönü değişir. Bu yön değişimiyle su akışı, düşük konsantrasyonlu bölgeye doğru olur ve bu olguya da ters osmoz adı verilir. Desalinasyon işlemlerinde, bu olgu kullanılarak deniz suyundan damıtılmış saf su sağlanır ve tuzlu suyun membrandan geçmesi önlenir [45, 50].



Şekil 3.7 : Osmoz ve ters osmoz prensibi [56].

Şekil 3.8'de görüldüğü gibi tipik bir TO desalinasyon tesisi; ön arıtma, yüksek basınçlı pompa, TO modülü ve son arıtma olmak üzere dört ana bölümden oluşur. TO prosesinde sisteme giren deniz suyu; ilk önce içindeki katı maddeler, biyolojik kirli organizmalar gibi zararlı bileşenleri ayırmak için ön arıtma işlemine tabi tutulmaktadır. İyi bir ön arıtma işlemi yapılmaması membran performansının düşmesine ve membranın kirlenmesine neden olur. Genellikle ön işlem bölümünde hassas filtrasyon ile çökelme ve mikroorganizmaların büyümesini engellemek için asit

veya diğer kimyasalların eklenmesi gibi işlemler yapılmaktadır. Sadece elektrik enerjisi kullanılan TO prosesinde ön arıtımı yapılan deniz suyu, en büyük güç tüketicisi olan yüksek basınçlı pompa ile TO modülündeki bir membrana akmaya zorlanır. Suyun bir kısmı membrandan geçerken, kalan besi deniz suyunun tuz konsantrasyonu artarak sistemden dışarı yönlendirilir. Membranda elde edilen saflaştırılmış suyun dengelenmesi ve dağıtımı için son arıtma işlemi uygulanır [1, 47, 49]. Son işlem bölümünde, TO modüllerinde oluşan saflaştırılmış suyun sterilizasyonu, stabilizasyonu ve mineral zenginleştirilmesi yapılır. TO prosesinde enerji verimliliği, modüllerden çıkan atık tuzlu suyun enerjisinin geri kazanımına bağlıdır. Bu yüzden, büyük tesislerde tuzlu suyun enerjisi kullanılarak bir Pelton türbini ile elektrik üretilir. Pelton türbininde üretilen elektrik enerjisi ortak şaft bağlantısıyla yüksek basınç pompası için kullanılarak sistemin genel güç tüketimi azaltılır [42].



Şekil 3.8 : TO prosesinin bölümleri [42].

TO tesisi tasarımında saflaştırılmış su akışı, tuzlu su geri kazanım oranı, besi deniz suyu tuzluluğu, membran ömrü, enerji tüketimi ve besleme suyu sıcaklığı önemli parametrelerdir [48]. Saflaştırılmış su akışı, membranın birim alanından geçen saf su miktarıdır. Membrandan geçen saf su ile birlikte bir miktar tuz geçişi de olmaktadır ve bu da saflaştırılmış suyun kalitesini belirler. Pompanın yaptığı basınç, saflaştırılmış su akışında önemli rol oynar çünkü basınç arttıkça saf su geçirgenliği oranı artar, tuz geçişi ise sabit kalarak saflaştırılmış su kalitesi artar [50]. Su geçirgenliğine sahip ve tuz bileşenine karşı geçirilmez bir bariyer oluşturan TO membranları, sistem içerisinde deniz suyu akımının basıncına dayanacak kadar sağlam ve su akışına minimum direnç sağlayacak şekilde ince olmalıdır. [42]. Deniz suyu sıcaklığı artışı, saflaştırılmış su akışının yüksek olmasına neden olur ve işlemde verimi artırır. TO işlemine giren besi deniz suyunun ön ısıtılması için bir elektrik santralinden veya termal desalinasyon tesisinden elde edilen atık ısı kullanılması, membranın üst sıcaklık sınırı aşılmadığı sürece tesis sürecinde ekonomik olmaktadır. Ayrıca, TO işlemlerinde deniz suyu

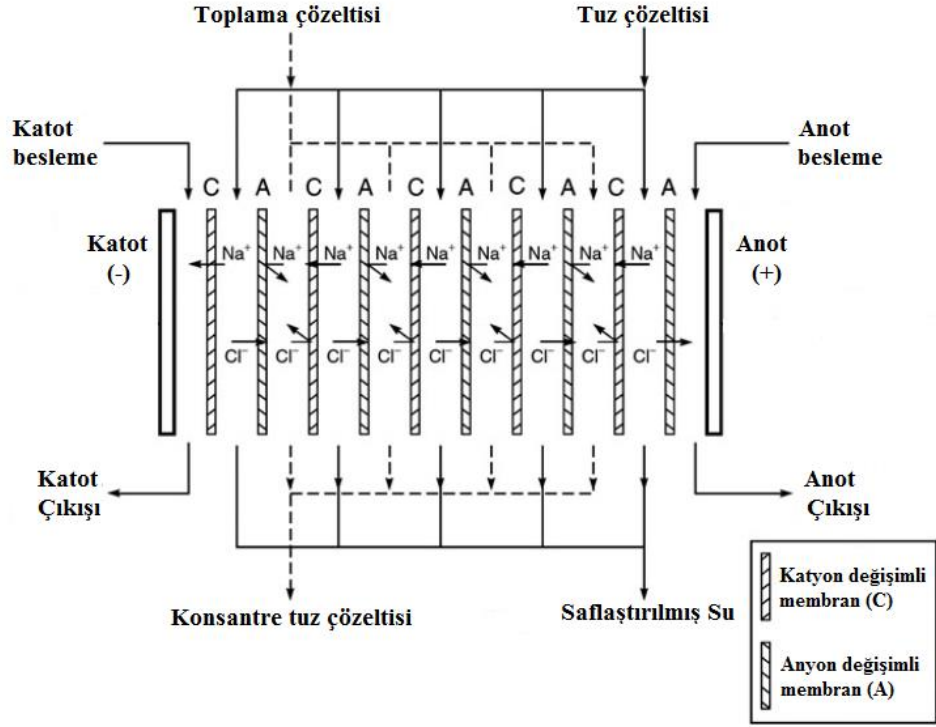
tuzluluk oranı da enerji tüketimini değiştirmektedir. Deniz suyu koşullarına, istenen geri kazanım oranına ve saflaştırılmış su kalitesine uygun bir şekilde TO modülleri, seri veya paralel gruplar halinde düzenlenip bağlantısı yapılabilmektedir [1].

3.2.2 Elektrodiyaliz (ED)

Deniz suyu desalinasyonu için yararlanılan ED prosesi, iyonların seçici hareketlerine dayanan bir membran işlemidir [1]. İyon değişimi prensibine göre çalışan bu proses, 1960'ların başında ticari olarak kullanılmaya başlanmıştır [49].

Şekil 3.9'da görüldüğü gibi bir ED prosesinde, anyon değişimli ve katyon değişimli iki tip membran çeşidi kullanılır. Bu membranlar, ayrı ayrı sıralı şekilde düzenlenmiştir. Her bir anyon ve katyon değişimli membranlar, birçok hücre çifti oluşturur. Tüm hücre çiftlerinin iki tarafına elektrik potansiyeli sağlamak ve işleme giren çözelti iyonlarını çekmek için biri anot ve diğeri katot olmak üzere iki elektrot yerleştirilir. İki elektrot arasında elektrik akımı oluştuğunda hücrelerin arasına pompalanan ve membran boyunca akan tuzlu su çözeltisindeki artı ve eksi iyonlar, elektrik akımından dolayı kendisine zıt olan elektrota doğru yönelirler. Tuz çözeltisindeki sodyum (Na^+) gibi pozitif yüklü iyonlar, katot beslemesi yapılan katot elektroduna doğru giderken klorür (Cl^-) gibi negatif yüklü iyonlar ise anot beslemesi yapılan anot elektroduna doğru gitme eğilimi gösterirler. Pozitif yüklü iyonlar, katyon değişimli membranlardan geçebiliyorken; pozitif yüklü iyonların diğer hücrelere geçişi anyon değişimli membranlar tarafından engellenir. Benzer şekilde negatif yüklü iyonlar, anyon değişimli membranlardan geçebiliyorken; katyon değişimli membranlar tarafından engellenir. Güç kaynağı yardımıyla tek yönlü oluşan bu ayırma işleminde, toplama çözeltisinin bulunduğu hücreler, iyonlarla zenginleşerek daha konsantre hale gelir. Diğer hücrelerde ise iyonlardan arındırılmış saf su oluşur ve saflaştırılmış su, farklı kanaldan yönlendirilerek tuzlu su çözeltisinden ayrışır [1, 48, 49].

ED prosesinde, iyonları membranlardan aktarmak ve sisteme besleme suyunu pompalamak için elektrik enerjisi kullanılır. Elektrik tüketimi, pompalama ekipmanının verimliliğine, işlemde kullanılan çözelti oranına ve saflaştırılmış su ihtiyacına bağlıdır. Ayrıca besleme suyu sıcaklığının artması, çözelti direncini azaltır ve güç tüketimini düşürür [50].



Şekil 3.9 : ED desalinasyon prosesinin şeması [48].

Ters akış elektrodializ prosesi, ED işlemi ile aynı çalışma prensibine dayanmaktadır. Tek yönlü akım ile çalışan ED'ye göre bu prosesteki temel fark, elektrik akımının ve hücre fonksiyonlarının periyodik olarak tersine çevrilmesidir. Çalışma işleyişinin tersine dönmesi, membranın kirlenmesini ve tıkanmasını en aza indirir. Saflaştırılmış su ve konsantre tuz çözeltisi akışlarının eşzamanlı değişimi ile kireçlenme ve sistemdeki birikimin daha iyi kontrol edilmesi sağlanır [50].

4. NÜKLEER KOJENERASYON TESİSİNİN TERMODİNAMİK ANALİZİ

4.1 Termodinamik Analiz İçin Temel Bilgiler

Termodinamiğin birinci yasasına göre sürekli akışlı açık sistemlerde sisteme giren toplam kütle ve enerji, sistemi terk eden toplam kütle ve enerjiye eşittir. Birim zaman başına sürekli akışlı bir kontrol hacmindeki giren ve çıkan kütle denkliği, kütle korunumu ilkesini ifade ediyor iken enerji denkliği ise enerji korunumu ilkesini ifade etmektedir. Kütle korunumu ilkesi, birden çok girişi ve çıkışı olan sürekli akışlı bir kontrol hacmi için

$$\sum \dot{m}_g = \sum \dot{m}_ç \quad (4.1)$$

şeklinde yazılmaktadır. Denklem 4.1'de \dot{m}_g sisteme giren kütleli debiyi, $\dot{m}_ç$ sistemden çıkan kütleli debiyi ifade etmektedir [57].

Sürekli akışlı açık sistem için enerjinin korunumu ilkesi, potansiyel ve kinetik enerji değişimleri ihmal edildiğinde

$$\dot{Q}_g + \dot{W}_g + \sum \dot{m}_g h_g = \dot{Q}_ç + \dot{W}_ç + \sum \dot{m}_ç h_ç \quad (4.2)$$

olarak yazılmaktadır. Denklem 4.2'de \dot{Q}_g ve \dot{W}_g sırasıyla sisteme birim zamanda giren ısı ve iş miktarını, $\dot{Q}_ç$ ve $\dot{W}_ç$ sırasıyla sistemden birim zamanda çıkan ısı ve iş miktarını, h_g ve $h_ç$ sırasıyla sisteme giren ve sistemden çıkan akışkanın entalpisini ifade etmektedir [57].

Termodinamik sistemlerdeki tersinmezlikler; sürtünme, karıştırma, kimyasal reaksiyonlar, sonlu bir sıcaklık farkı yoluyla oluşan ısı transferi, ani sınırsız genişleme ve düzensiz sıkıştırma gibi faktörler nedeniyle ortaya çıkmaktadır. Birim zamandaki tersinmezlik ya da ekserji yıkımı,

$$\dot{X}_{yık} = T_0 \dot{S}_{üretim} \quad (4.3)$$

olarak ifade edilebilir. Denklem 4.3'te $\dot{S}_{\text{üretim}}$ sistemde birim zamanda üretilen toplam entropi ve T_0 ölü hal sıcaklığıdır [57].

Bir sisteme ait ekserji, genellikle fiziksel, kinetik, potansiyel ve kimyasal ekserjilerin toplamından oluşmaktadır. Buhar çevrimlerinin ekserji analizlerinde, kinetik ve potansiyel ekserji değişimleri ihmal edilebilir. Sistemin hal değişimi (prosesi) sırasında kimyasal reaksiyon yoksa kimyasal ekserji değişiminin analizine de ihtiyaç duyulmaz ve sistemin ekserjisi sadece fiziksel ekserjiye eşit kabul edilebilir. Sürekli akışlı açık sistemlerde akışkan akımının ekserjisi,

$$\psi = \begin{cases} h - h_0 - T_0(s - s_0), & \text{Sürekli akışlı açık sistem analizi için} \\ (h_{ds,i} - h_{ds,0}) - T_0(s_{ds,i} - s_{ds,0}), & \text{Deniz suyu analizi için} \end{cases} \quad (4.4)$$

olarak yazılmaktadır. Denklem 4.4'te ψ akışkan akımının ekserjisini, h ve s sırasıyla sistemdeki akışkanın ilk haldeki entalpi ve entropisini, h_0 ve s_0 sırasıyla akışkanın ölü hal entalpi ve entropisini, $h_{ds,i}$ ve $s_{ds,i}$ sırasıyla deniz suyunun i noktasındaki entalpi ve entropisini, eğer deniz suyu sıcaklığı ve basıncı, referans sıcaklık T_0 ve basınç P_0 olarak varsayılmış ise $h_{ds,0}$ ve $s_{ds,0}$ sırasıyla tesise giren deniz suyunun ölü hal entalpi ve entropisini ifade etmektedir [57, 58].

Sürekli akışlı açık sistemlerde ekserji geçişi, üç şekilde meydana gelir. Birim zamanda kütleli debiyle oluşan ekserji geçişi,

$$\dot{X}_{\text{kütle}} = \dot{m}\psi \quad (4.5)$$

şeklinde ifade edilir. İş yoluyla yapılan birim zamanda ekserji transferi, birim zamanda yapılan işin kendisine eşittir:

$$\dot{X}_{\text{iş}} = \dot{W} \quad (4.6)$$

Denklem 4.6'da $\dot{X}_{\text{iş}}$ birim zamanda iş yoluyla yapılan ekserji transferini ve \dot{W} birim zamanda elde edilen kullanılabilir işi ifade etmektedir. Isı yoluyla yapılan birim zamanda ekserji geçişi,

$$\dot{X}_{\text{ısı}} = \left(1 - \frac{T_0}{T}\right) \dot{Q} \quad (4.7)$$

olarak ifade edilir. Denklem 4.7'de T_0 referans (çevre) sıcaklığını, T sistem sıcaklığını ve \dot{Q} birim zamanda ısı geçişini ifade etmektedir [57].

Termal sistemlerin sahip olduğu ekserji miktarını ve kaybolan iş potansiyelini hesaplamak için yapılan ekserji analizleri, sistemdeki tersinmezliklerin nerede oluştuklarını ve miktarlarını göstermeye yaramaktadır. Sistemdeki kayıp büyüklükleri, ekserji denge denkleminde faydalanılarak bulunmaktadır [58]. Termodinamiğin ikinci yasasına göre sürekli akışlı kontrol hacmi için ekserji denge denklemi şu şekilde yazılmaktadır:

$$\sum \dot{X}_{ısı} - \sum \dot{X}_{iş} + \sum \dot{X}_{küttele,g} - \sum \dot{X}_{küttele,ç} - \dot{X}_{yık} = 0 \quad (4.8)$$

Denklem 4.8’de $\dot{X}_{küttele,g}$ ve $\dot{X}_{küttele,ç}$ sırasıyla sisteme birim zamanda giren ve sistemden çıkan kütsel debiyle oluşan birim zamanda ekserji transferini ifade etmektedir [57].

Termodinamik çevrimle çalışan bir ısı makinesinin termal verimi,

$$\eta_{termal} = \frac{\dot{W}_{net}}{\dot{Q}_g} = 1 - \frac{\dot{Q}_ç}{\dot{Q}_g} \quad (4.9)$$

olarak ifade edilir. Denklem 4.9’da \dot{W}_{net} sistemden birim zamanda elde edilen net işi ifade etmektedir [57].

Termal verim, sistemdeki tersinmezlikleri ve sistemden alınabilecek en yüksek iş potansiyelini ölçü olarak göz önüne almadığından etkinlik ile ilgili ideal sonuçlar verememektedir. Sistemin tersinmezliklerini de hesaplamaya katan ve ikinci yasa parametrelerini içeren ekserji verimi ya da ikinci yasa verimi, sistemin prosesinin tersinir hal değişimine ne oranda yaklaşabildiğini belirtmektedir [58]. Genel bir ifade ile ekserji verimi,

$$\eta_{ekserji} = \frac{\dot{X}_ç}{\dot{X}_g} = 1 - \frac{\dot{X}_{yık}}{\dot{X}_g} \quad (4.10)$$

olarak yazılmaktadır. Denklem 4.10’da \dot{X}_g sisteme birim zamanda giren ekserjiyi, $\dot{X}_ç$ sistemden birim zamanda çıkan ekserjiyi ve $\dot{X}_{yık}$ sistemde hal değişimi sırasında birim zamandaki ekserji yıkımını ifade etmektedir [57].

4.2 Nükleer Desalinasyon Kojenerasyon Tesisinin Enerji ve Ekserji Analizi

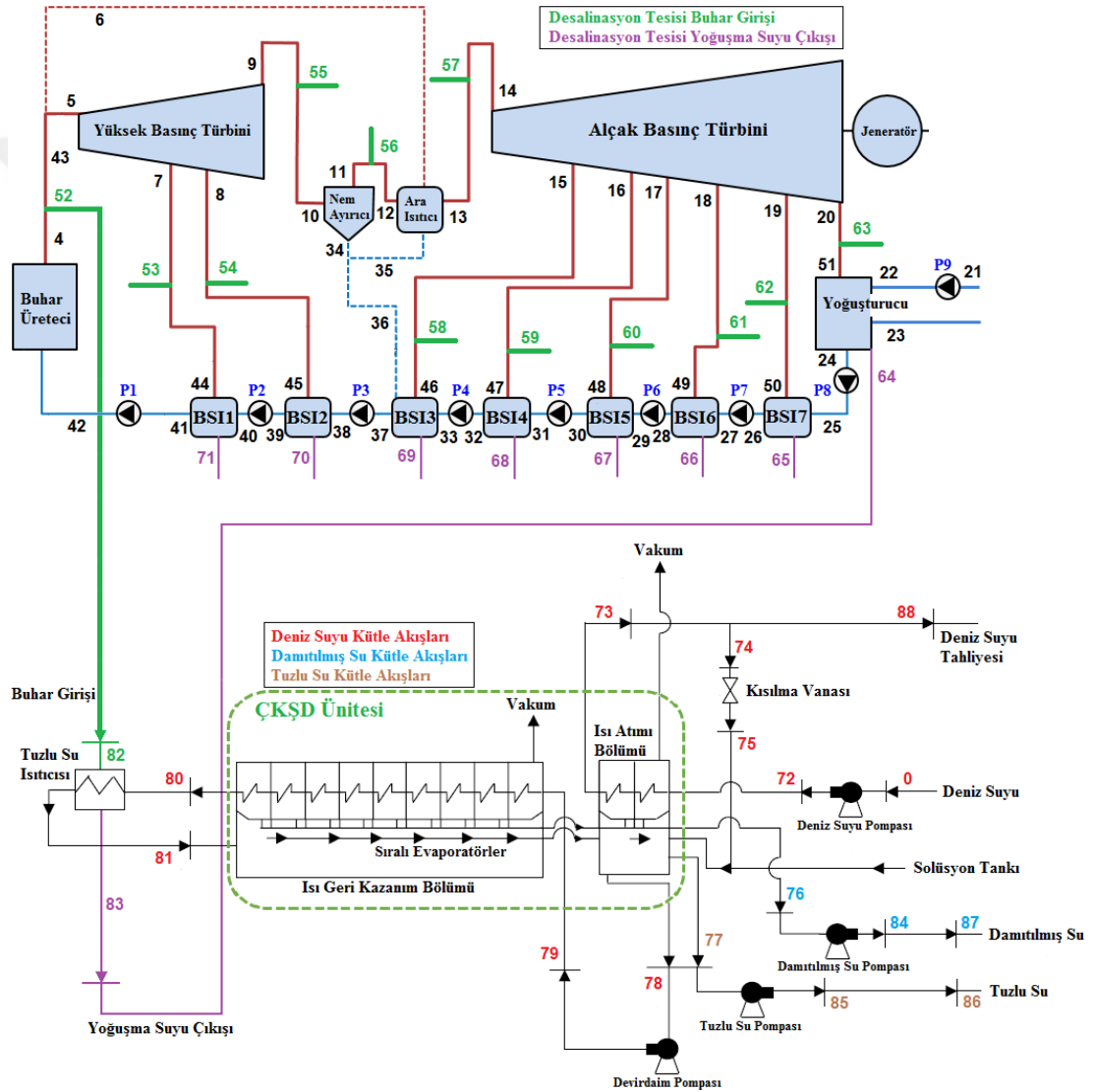
BSR ile çalışan bir nükleer güç santralının ikinci çevrimi ile bir ÇKŞD desalinasyon tesisinin entegrasyonu ile oluşan Akdeniz kıyısında kurulabilecek bir nükleer desalinasyon kojenerasyon tesisinin termodinamik analizi, MATHEMATICA 11 yazılımı ortamında bir yazılım programı geliştirilerek gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda, nükleer desalinasyon kojenerasyon tesisinin bütün bileşenlerine kütle ve enerji korunumu yasaları uygulanıp tüm sistemin termodinamik özellikleri belirlenmiş ve tesisin her bir bileşeninin ekserji yıkım miktarları, ekserji denge denklemlerinden yararlanılarak hesaplanmıştır. Analiz sonucunda, entegre tesisin termal verimi ($\eta_{t,NKT}$), ekserji verimi ($\eta_{eks,NKT}$), ısı yararlanma oranı (ϵ_y), ekolojik performans katsayısı ($ECOP_{kojen}$), ekserji yıkım faktörü ($f_{yık,eks}$) ve atık ekserji oranı ($r_{atık,eks}$) gibi amaç fonksiyonları ile birlikte tesisin elektrik güç üretimi ve tesis bileşenlerinin ekserji yıkım yüzdelik dağılımları değerlendirilmiştir. Termal enerji girişi, taze buhar sıcaklığı, ara ısıtıcı kütleli debi oranı, desalinasyon için buhar çekme noktaları, ölü hal sıcaklığı, tesise giren deniz suyunun tuzluluğu, kısılma vanası kütleli debi oranı, damıtılmış su kütleli debisi, besi deniz suyunun kütleli debisi ve sıcaklığı gibi parametrelerin bu amaç fonksiyonları üzerindeki etkileri incelenmiştir.

Tez çalışmasının metodu, bir nükleer santralin ikinci çevriminin ve ÇKŞD prosesinin termodinamik modellenmesi olarak iki ana bölüme ayrılmıştır. Nükleer santralin ikinci çevrimi ile entegre ÇKŞD prosesinin şematik gösterimi Şekil 4.1'de sunulmuştur.

Nükleer enerji santralinde nükleer reaktörün fisyon enerjisinin birinci devreye sağladığı ısı enerjisi, bir buhar üreticisine aktararak buhar üretilmektedir. Üretilen buhar öncelikle yüksek basınç türbininde genişletilir. Nem ayırıcısında buhar ve sıvı fazların ayrılmasını takiben buhar, ara ısıtıcı vasıtasıyla ısıtıldıktan sonra düşük basınçlı türbinde yeniden genişletilir. Yoğuşurucu basıncına genişletilen buhar, yoğuşurulduktan sonra besi suyu ısıtıcıları üzerinden buhar üreticisine aktarılır. Tüm çevrimdeki buhar miktarının bir kısmı 52, 53, ..., 63 noktalarının birinden deniz suyunu ısıtmak amacıyla proses ısısı olarak desalinasyon tesisine yönlendirilir.

Isıtıcıda enerjisini desalinasyon tesisine aktaran buhar, yeniden nükleer enerji santraline geri döner.

Tez kapsamında desalinasyon proses modeli olarak [59]'daki ÇKŞD tesisi kullanılmıştır. ÇKŞD tesisinde birden fazla sıralı evaporatör, bir tuzlu su ısıtıcısı, vakum sistemi ve pompalama ekipmanları bulunmaktadır. 0 noktasında belirli tuzluluk oranına sahip deniz suyu, ÇKŞD ünitesinin ısı atımı bölümünde bulunan son iki evaporatöre yönlendirilerek evaporatörlerde üretilen saf su buharını yoğunlaştırmaktadır. Isı atımı bölümünden çıkan deniz suyunun bir bölümü, denize geri



Şekil 4.1 : Nükleer desalinasyon kojenerasyon tesisinin şematik gösterimi [59, 60].

taahhite edilirken bir bölümünün ise 74 noktasında kısılma vanası ile basıncı düşürülür ve ÇKŞD ünitesinin ısı atımı bölümüne besleme suyu olarak yönlendirilir. Ünitenin ısı atımı bölümünden ısı geri kazanım bölümüne 79 noktasından pompalanan besi deniz

suyunun sıcaklığı, sıralı evaporatörlerdeki saf su buharının ısısını alarak artmaktadır. Besi deniz suyu, ısı geri kazanım bölümündeki evaporatörlerden ayrıldıktan sonra 80 noktasından tuzlu su ısıtıcısına girer ve ikinci çevrimden çekilen buharın sağladığı proses ısısıyla maksimum işletim sıcaklığına ulaşır. Nükleer enerji tesisinden gelen 82 noktasındaki kızgın buhar, besi deniz suyuna ısısını vererek yoğunlaşır ve 64, 65, ..., 71 noktalarının birinden nükleer kojenerasyon tesisinin ikinci çevrimine geri döner. Isıtma işlemi tamamlanan besi deniz suyu, 81 noktasından evaporatörlere tekrar yönlendirilerek farklı basınç ve sıcaklıklarda sıralı evaporatörlerde arka arkaya şoklanır ve deniz suyunun bir kısmı, saf su olarak buharlaşır. ÇKŞD ünitesinin tüm evaporatörlerinden elde edilen saf su buharının tamamı, tüm evaporatörlerin üst tarafından geçen besi deniz suyuna ısısını vererek yoğunlaşır ve 76 noktasında üniteden çıkıp damıtılmış su olarak tesisten ayrılır. ÇKŞD ünitesinin son evaporatöründe buharlaşmayan tuzlu su ise 77 noktasından tekrar denize yönlendirilir [58].

Buhar üretici için sırasıyla kütle, enerji korunumu ve ekserji denge denklemleri:

$$\dot{m}_{42} = \dot{m}_4 \quad (4.11a)$$

$$\dot{m}_{42}h_{42} + \dot{Q}_{BÜ} = \dot{m}_4h_4 \quad (4.11b)$$

$$\dot{m}_{42}\psi_{42} + \dot{Q}_{BÜ} \left(1 - \frac{T_0}{T_{BÜ}}\right) = \dot{m}_4\psi_4 + \dot{X}_{yık,BÜ} \quad (4.11c)$$

Denklemler 4.11b'de $\dot{Q}_{BÜ}$ nükleer santralin birinci çevriminden buhar üreticisine aktarılan termal enerjiyi, Denklem 4.11c'de $T_{BÜ}$ buhar üreticinin sıcak tarafının ortalama sıcaklığını temsil etmektedir. Buhar üretici ve yüksek basınç türbini arası noktalardaki buharın farklı borulara ayrılması prosesi için sırasıyla kütle, enerji korunumu ve ekserji denge denklemleri:

$$\dot{m}_4 = \dot{m}_{43} + \dot{m}_{52} \quad (4.12a)$$

$$\dot{m}_{43} = \dot{m}_5 + \dot{m}_6 \quad (4.12b)$$

$$\dot{m}_4h_4 = \dot{m}_{43}h_{43} + \dot{m}_{52}h_{52} \quad (4.12c)$$

$$\dot{m}_{43}h_{43} = \dot{m}_5h_5 + \dot{m}_6h_6 \quad (4.12d)$$

$$\dot{m}_4\psi_4 = \dot{m}_{43}\psi_{43} + \dot{m}_{52}\psi_{52} + \dot{X}_{yık,4\rightarrow 43,52} \quad (4.12e)$$

$$\dot{m}_{43}\psi_{43} = \dot{m}_5\psi_5 + \dot{m}_6\psi_6 + \dot{X}_{yık,43\rightarrow 5,6} \quad (4.12f)$$

Yüksek basınç türbini için sırasıyla kütle, enerji korunumu ve ekserji denge denklemleri:

$$\dot{m}_5 = \dot{m}_7 + \dot{m}_8 + \dot{m}_9 \quad (4.13a)$$

$$\dot{m}_5h_5 = \dot{m}_7h_7 + \dot{m}_8h_8 + \dot{m}_9h_9 + \dot{W}_{YBT} \quad (4.13b)$$

$$\dot{m}_5\psi_5 = \dot{m}_7\psi_7 + \dot{m}_8\psi_8 + \dot{m}_9\psi_9 + \dot{W}_{YBT} + \dot{X}_{yık,YBT} \quad (4.13c)$$

Denklem 4.13b'de \dot{W}_{YBT} yüksek basınç türbininde birim zamanda üretilen iş miktarını ifade etmektedir. Yüksek basınç türbini çıkış noktalarından sonraki borularda buharın ayrılması prosesi için kütle korunumu denklemleri:

$$\dot{m}_7 = \dot{m}_{53} + \dot{m}_{44} \quad (4.14a)$$

$$\dot{m}_8 = \dot{m}_{54} + \dot{m}_{45} \quad (4.14b)$$

$$\dot{m}_9 = \dot{m}_{55} + \dot{m}_{10} \quad (4.14c)$$

Yüksek basınç türbini çıkış noktalarından sonraki borularda buharın ayrılması prosesi için enerji korunumu denklemleri:

$$\dot{m}_7h_7 = \dot{m}_{53}h_{53} + \dot{m}_{44}h_{44} \quad (4.15a)$$

$$\dot{m}_8h_8 = \dot{m}_{54}h_{54} + \dot{m}_{45}h_{45} \quad (4.15b)$$

$$\dot{m}_9h_9 = \dot{m}_{55}h_{55} + \dot{m}_{10}h_{10} \quad (4.15c)$$

Yüksek basınç türbini çıkış noktalarından sonraki borularda buharın ayrılması prosesi için ekserji denge denklemleri:

$$\dot{m}_7\psi_7 = \dot{m}_{53}\psi_{53} + \dot{m}_{44}\psi_{44} + \dot{X}_{yık,7\rightarrow 44,53} \quad (4.16a)$$

$$\dot{m}_8\psi_8 = \dot{m}_{54}\psi_{54} + \dot{m}_{45}\psi_{45} + \dot{X}_{yık,8\rightarrow 45,54} \quad (4.16b)$$

$$\dot{m}_9\psi_9 = \dot{m}_{55}\psi_{55} + \dot{m}_{10}\psi_{10} + \dot{X}_{yık,9\rightarrow 10,55} \quad (4.16c)$$

Nem ayırıcısı için sırasıyla kütle, enerji korunumu ve ekserji denge denklemleri:

$$\dot{m}_{10} = \dot{m}_{11} + \dot{m}_{34} \quad (4.17a)$$

$$\dot{m}_{10}h_{10} = \dot{m}_{11}h_{11} + \dot{m}_{34}h_{34} \quad (4.17b)$$

$$\dot{m}_{10}\psi_{10} = \dot{m}_{11}\psi_{11} + \dot{m}_{34}\psi_{34} + \dot{X}_{yık,NA} \quad (4.17c)$$

Nem ayırıcısı çıkış noktasından sonraki borularda buharın ayrılması prosesi için sırasıyla kütle, enerji korunumu ve ekserji denge denklemleri:

$$\dot{m}_{11} = \dot{m}_{56} + \dot{m}_{12} \quad (4.18a)$$

$$\dot{m}_{11}h_{11} = \dot{m}_{56}h_{56} + \dot{m}_{12}h_{12} \quad (4.18b)$$

$$\dot{m}_{11}\psi_{11} = \dot{m}_{56}\psi_{56} + \dot{m}_{12}\psi_{12} + \dot{X}_{yık,11\rightarrow 12,56} \quad (4.18c)$$

Ara ısıtıcı için sırasıyla kütle, enerji korunumu ve ekserji denge denklemleri:

$$\dot{m}_6 + \dot{m}_{12} = \dot{m}_{13} + \dot{m}_{35} \quad (4.19a)$$

$$\dot{m}_6h_6 + \dot{m}_{12}h_{12} = \dot{m}_{13}h_{13} + \dot{m}_{35}h_{35} \quad (4.19b)$$

$$\dot{m}_6\psi_6 + \dot{m}_{12}\psi_{12} = \dot{m}_{13}\psi_{13} + \dot{m}_{35}\psi_{35} + \dot{X}_{yık,AI} \quad (4.19c)$$

Ara ısıtıcı çıkış noktasından sonraki borularda buharın ayrılması prosesi için sırasıyla kütle, enerji korunumu ve ekserji denge denklemleri:

$$\dot{m}_{13} = \dot{m}_{57} + \dot{m}_{14} \quad (4.20a)$$

$$\dot{m}_{13}h_{13} = \dot{m}_{57}h_{57} + \dot{m}_{14}h_{14} \quad (4.20b)$$

$$\dot{m}_{13}\psi_{13} = \dot{m}_{57}\psi_{57} + \dot{m}_{14}\psi_{14} + \dot{X}_{yık,13\rightarrow14,57} \quad (4.20c)$$

Nem ayırıcısı ve ara ısıtıcısının çıkış noktalarından sonraki borularda akışların birleşmesi prosesi için sırasıyla kütle, enerji korunumu ve ekserji denge denklemleri:

$$\dot{m}_{34} + \dot{m}_{35} = \dot{m}_{36} \quad (4.21a)$$

$$\dot{m}_{34}h_{34} + \dot{m}_{35}h_{35} = \dot{m}_{36}h_{36} \quad (4.21b)$$

$$\dot{m}_{34}\psi_{34} + \dot{m}_{35}\psi_{35} = \dot{m}_{36}\psi_{36} + \dot{X}_{yık,34,35\rightarrow36} \quad (4.21c)$$

Alçak basınç türbini için sırasıyla kütle , enerji korunumu ve ekserji denge denklemleri:

$$\dot{m}_{14} = \sum_{i=15}^{20} \dot{m}_i \quad (4.22a)$$

$$\dot{m}_{14}h_{14} = \sum_{i=15}^{20} \dot{m}_i h_i + \dot{W}_{ABT} \quad (4.22b)$$

$$\dot{m}_{14}\psi_{14} = \sum_{i=15}^{20} \dot{m}_i\psi_i + \dot{W}_{ABT} + \dot{X}_{yık,ABT} \quad (4.22c)$$

Denklemler 4.22b'de \dot{W}_{ABT} alçak basınç türbininde birim zamanda üretilen iş miktarını ifade etmektedir. Alçak basınç türbini çıkış noktalarından sonraki borularda buharın ayrılması prosesi için kütle korunumu denklemleri:

$$\dot{m}_{15} = \dot{m}_{58} + \dot{m}_{46} \quad (4.23a)$$

$$\dot{m}_{16} = \dot{m}_{59} + \dot{m}_{47} \quad (4.23b)$$

$$\dot{m}_{17} = \dot{m}_{60} + \dot{m}_{48} \quad (4.23c)$$

$$\dot{m}_{18} = \dot{m}_{61} + \dot{m}_{49} \quad (4.23d)$$

$$\dot{m}_{19} = \dot{m}_{62} + \dot{m}_{50} \quad (4.23e)$$

$$\dot{m}_{20} = \dot{m}_{63} + \dot{m}_{51} \quad (4.23f)$$

Alçak basınç türbini çıkış noktalarından sonraki borularda buharın ayrılması prosesi için enerji korunumu denklemleri:

$$\dot{m}_{15}h_{15} = \dot{m}_{46}h_{46} + \dot{m}_{58}h_{58} \quad (4.24a)$$

$$\dot{m}_{16}h_{16} = \dot{m}_{47}h_{47} + \dot{m}_{59}h_{59} \quad (4.24b)$$

$$\dot{m}_{17}h_{17} = \dot{m}_{48}h_{48} + \dot{m}_{60}h_{60} \quad (4.24c)$$

$$\dot{m}_{18}h_{18} = \dot{m}_{49}h_{49} + \dot{m}_{61}h_{61} \quad (4.24d)$$

$$\dot{m}_{19}h_{19} = \dot{m}_{50}h_{50} + \dot{m}_{62}h_{62} \quad (4.24e)$$

$$\dot{m}_{20}h_{20} = \dot{m}_{51}h_{51} + \dot{m}_{63}h_{63} \quad (4.24f)$$

Alçak basınç türbini çıkış noktalarından sonraki borularda buharın ayrılması prosesi için ekserji denge denklemleri:

$$\dot{m}_{15}\psi_{15} = \dot{m}_{46}\psi_{46} + \dot{m}_{58}\psi_{58} + \dot{X}_{yık,15 \rightarrow 46,58} \quad (4.25a)$$

$$\dot{m}_{16}\psi_{16} = \dot{m}_{47}\psi_{47} + \dot{m}_{59}\psi_{59} + \dot{X}_{yık,16 \rightarrow 47,59} \quad (4.25b)$$

$$\dot{m}_{17}\psi_{17} = \dot{m}_{48}\psi_{48} + \dot{m}_{60}\psi_{60} + \dot{X}_{yık,17 \rightarrow 48,60} \quad (4.25c)$$

$$\dot{m}_{18}\psi_{18} = \dot{m}_{49}\psi_{49} + \dot{m}_{61}\psi_{61} + \dot{X}_{yık,18 \rightarrow 49,61} \quad (4.25d)$$

$$\dot{m}_{19}\psi_{19} = \dot{m}_{50}\psi_{50} + \dot{m}_{62}\psi_{62} + \dot{X}_{yık,19 \rightarrow 50,62} \quad (4.25e)$$

$$\dot{m}_{20}\psi_{20} = \dot{m}_{51}\psi_{51} + \dot{m}_{63}\psi_{63} + \dot{X}_{yık,20 \rightarrow 51,63} \quad (4.25f)$$

Yoğuşturucu için sırasıyla kütle, enerji korunumu ve ekserji denge denklemleri:

$$\dot{m}_{22} = \dot{m}_{23} \quad (4.26a)$$

$$\dot{m}_{51} + \dot{m}_{64} = \dot{m}_{24} \quad (4.26b)$$

$$\dot{m}_{51}h_{51} + \dot{m}_{22}h_{22} + \dot{m}_{64}h_{64} = \dot{m}_{24}h_{24} + \dot{m}_{23}h_{23} \quad (4.26c)$$

$$\dot{m}_{51}\psi_{51} + \dot{m}_{22}\psi_{22} + \dot{m}_{64}\psi_{64} = \dot{m}_{24}\psi_{24} + \dot{m}_{23}\psi_{23} + \dot{X}_{yık,YOĞ} \quad (4.26d)$$

Pompa 9 (P9) için sırasıyla kütle, enerji korunumu ve ekserji denge denklemleri:

$$\dot{m}_{21} = \dot{m}_{22} \quad (4.27a)$$

$$\dot{m}_{21}h_{21} + \dot{W}_{P9} = \dot{m}_{22}h_{22} \quad (4.27b)$$

$$\dot{m}_{21}\psi_{21} + \dot{W}_{P9} = \dot{m}_{22}\psi_{22} + \dot{X}_{yık,P9} \quad (4.27c)$$

Denklem 4.27b'de \dot{W}_{P9} 9 nolu pompada birim zamanda tüketilen iş miktarını ifade etmektedir. Pompa 8 (P8) için sırasıyla kütle, enerji korunumu ve ekserji denge denklemleri:

$$\dot{m}_{24} = \dot{m}_{25} \quad (4.28a)$$

$$\dot{m}_{24}h_{24} + \dot{W}_{P8} = \dot{m}_{25}h_{25} \quad (4.28b)$$

$$\dot{m}_{24}\psi_{24} + \dot{W}_{P8} = \dot{m}_{25}\psi_{25} + \dot{X}_{yık,P8} \quad (4.28c)$$

Besi suyu ısıtıcısı 7 (BSI7) için sırasıyla kütle, enerji korunumu ve ekserji denge denklemleri:

$$\dot{m}_{25} + \dot{m}_{50} + \dot{m}_{65} = \dot{m}_{26} \quad (4.29a)$$

$$\dot{m}_{25}h_{25} + \dot{m}_{50}h_{50} + \dot{m}_{65}h_{65} = \dot{m}_{26}h_{26} \quad (4.29b)$$

$$\dot{m}_{25}\psi_{25} + \dot{m}_{50}\psi_{50} + \dot{m}_{65}\psi_{65} = \dot{m}_{26}\psi_{26} + \dot{X}_{yık,BSI7} \quad (4.29c)$$

Pompa 7 (P7) için sırasıyla kütle, enerji korunumu ve ekserji denge denklemleri:

$$\dot{m}_{26} = \dot{m}_{27} \quad (4.30a)$$

$$\dot{m}_{26}h_{26} + \dot{W}_{P7} = \dot{m}_{27}h_{27} \quad (4.30b)$$

$$\dot{m}_{26}\psi_{26} + \dot{W}_{P7} = \dot{m}_{27}\psi_{27} + \dot{X}_{yik,P7} \quad (4.30c)$$

BSI6 için sırasıyla kütle, enerji korunumu ve ekserji denge denklemleri:

$$\dot{m}_{27} + \dot{m}_{49} + \dot{m}_{66} = \dot{m}_{28} \quad (4.31a)$$

$$\dot{m}_{27}h_{27} + \dot{m}_{49}h_{49} + \dot{m}_{66}h_{66} = \dot{m}_{28}h_{28} \quad (4.31b)$$

$$\dot{m}_{27}\psi_{27} + \dot{m}_{49}\psi_{49} + \dot{m}_{66}\psi_{66} = \dot{m}_{28}\psi_{28} + \dot{X}_{yik,BSI6} \quad (4.31c)$$

Pompa 6 (P6) için sırasıyla kütle, enerji korunumu ve ekserji denge denklemleri:

$$\dot{m}_{28} = \dot{m}_{29} \quad (4.32a)$$

$$\dot{m}_{28}h_{28} + \dot{W}_{P6} = \dot{m}_{29}h_{29} \quad (4.32b)$$

$$\dot{m}_{28}\psi_{28} + \dot{W}_{P6} = \dot{m}_{29}\psi_{29} + \dot{X}_{yik,P6} \quad (4.32c)$$

BSI5 için sırasıyla kütle, enerji ve ekserji denge denklemleri:

$$\dot{m}_{29} + \dot{m}_{48} + \dot{m}_{67} = \dot{m}_{30} \quad (4.33a)$$

$$\dot{m}_{29}h_{29} + \dot{m}_{48}h_{48} + \dot{m}_{67}h_{67} = \dot{m}_{30}h_{30} \quad (4.33b)$$

$$\dot{m}_{29}\psi_{29} + \dot{m}_{48}\psi_{48} + \dot{m}_{67}\psi_{67} = \dot{m}_{30}\psi_{30} + \dot{X}_{yik,BSI5} \quad (4.33c)$$

Pompa 5 (P5) için sırasıyla kütle, enerji korunumu ve ekserji denge denklemleri:

$$\dot{m}_{30} = \dot{m}_{31} \quad (4.34a)$$

$$\dot{m}_{30}h_{30} + \dot{W}_{P5} = \dot{m}_{31}h_{31} \quad (4.34b)$$

$$\dot{m}_{30}\psi_{30} + \dot{W}_{P5} = \dot{m}_{31}\psi_{31} + \dot{X}_{yik,P5} \quad (4.34c)$$

BSI4 için sırasıyla kütle, enerji korunumu ve ekserji denge denklemleri:

$$\dot{m}_{31} + \dot{m}_{47} + \dot{m}_{68} = \dot{m}_{32} \quad (4.35a)$$

$$\dot{m}_{31}h_{31} + \dot{m}_{47}h_{47} + \dot{m}_{68}h_{68} = \dot{m}_{32}h_{32} \quad (4.35b)$$

$$\dot{m}_{31}\psi_{31} + \dot{m}_{47}\psi_{47} + \dot{m}_{68}\psi_{68} = \dot{m}_{32}\psi_{32} + \dot{X}_{yik,BSI4} \quad (4.35c)$$

Pompa 4 (P4) için sırasıyla kütle, enerji korunumu ve ekserji denge denklemleri:

$$\dot{m}_{32} = \dot{m}_{33} \quad (4.36a)$$

$$\dot{m}_{32}h_{32} + \dot{W}_{P4} = \dot{m}_{33}h_{33} \quad (4.36b)$$

$$\dot{m}_{32}\psi_{32} + \dot{W}_{P4} = \dot{m}_{33}\psi_{33} + \dot{X}_{yik,P4} \quad (4.36c)$$

BSI3 için sırasıyla kütle, enerji korunumu ve ekserji denge denklemleri:

$$\dot{m}_{33} + \dot{m}_{36} + \dot{m}_{46} + \dot{m}_{69} = \dot{m}_{37} \quad (4.37a)$$

$$\dot{m}_{33}h_{33} + \dot{m}_{36}h_{36} + \dot{m}_{46}h_{46} + \dot{m}_{69}h_{69} = \dot{m}_{37}h_{37} \quad (4.37b)$$

$$\dot{m}_{33}\psi_{33} + \dot{m}_{36}\psi_{36} + \dot{m}_{46}\psi_{46} + \dot{m}_{69}\psi_{69} = \dot{m}_{37}\psi_{37} + \dot{X}_{yik,BSI3} \quad (4.37c)$$

Pompa 3 (P3) için sırasıyla kütle, enerji korunumu ve ekserji denge denklemleri:

$$\dot{m}_{37} = \dot{m}_{38} \quad (4.38a)$$

$$\dot{m}_{37}h_{37} + \dot{W}_{P3} = \dot{m}_{38}h_{38} \quad (4.38b)$$

$$\dot{m}_{37}\psi_{37} + \dot{W}_{P3} = \dot{m}_{38}\psi_{38} + \dot{X}_{yik,P3} \quad (4.38c)$$

BSI2 için sırasıyla kütle, enerji korunumu ve ekserji denge denklemleri:

$$\dot{m}_{38} + \dot{m}_{45} + \dot{m}_{70} = \dot{m}_{39} \quad (4.39a)$$

$$\dot{m}_{38}h_{38} + \dot{m}_{45}h_{45} + \dot{m}_{70}h_{70} = \dot{m}_{39}h_{39} \quad (4.39b)$$

$$\dot{m}_{38}\psi_{38} + \dot{m}_{45}\psi_{45} + \dot{m}_{70}\psi_{70} = \dot{m}_{39}\psi_{39} + \dot{X}_{yik,BSI2} \quad (4.39c)$$

Pompa 2 (P2) için sırasıyla kütle, enerji korunumu ve ekserji denge denklemleri:

$$\dot{m}_{39} = \dot{m}_{40} \quad (4.40a)$$

$$\dot{m}_{39}h_{39} + \dot{W}_{P2} = \dot{m}_{40}h_{40} \quad (4.40b)$$

$$\dot{m}_{39}\psi_{39} + \dot{W}_{P2} = \dot{m}_{40}\psi_{40} + \dot{X}_{yık,P2} \quad (4.40c)$$

BSI1 için sırasıyla kütle, enerji korunumu ve ekserji denge denklemleri:

$$\dot{m}_{40} + \dot{m}_{44} + \dot{m}_{71} = \dot{m}_{41} \quad (4.41a)$$

$$\dot{m}_{40}h_{40} + \dot{m}_{44}h_{44} + \dot{m}_{71}h_{71} = \dot{m}_{41}h_{41} \quad (4.41b)$$

$$\dot{m}_{40}\psi_{40} + \dot{m}_{44}\psi_{44} + \dot{m}_{71}\psi_{71} = \dot{m}_{41}\psi_{41} + \dot{X}_{yık,BSI1} \quad (4.41c)$$

Pompa 1 (P1) için sırasıyla kütle, enerji korunumu ve ekserji denge denklemleri:

$$\dot{m}_{41} = \dot{m}_{42} \quad (4.42a)$$

$$\dot{m}_{41}h_{41} + \dot{W}_{P1} = \dot{m}_{42}h_{42} \quad (4.42b)$$

$$\dot{m}_{41}\psi_{41} + \dot{W}_{P1} = \dot{m}_{42}\psi_{42} + \dot{X}_{yık,P1} \quad (4.42c)$$

Elektrik jeneratörü için ekserji yıkımı:

$$\dot{X}_{yık,JEN} = (1 - \eta_J)(\dot{W}_{YBT} + \dot{W}_{ABT}) \quad (4.43)$$

Denklem 4.43'te η_J jeneratör verimini ifade etmektedir. Desalinasyon tesisine giriş yapan buhar için sırasıyla kütle ve enerji korunumu denklemleri:

$$\dot{m}_{82} = \sum_{i=52}^{63} \dot{m}_i \quad (4.44a)$$

$$\dot{m}_{82}h_{82} = \sum_{i=52}^{63} \dot{m}_i h_i \quad (4.44b)$$

Desalinasyon tesisinden çıkış yapan yoğunlaşma suyu için sırasıyla kütle ve enerji korunumu denklemi:

$$\dot{m}_{83} = \sum_{j=64}^{71} \dot{m}_j \quad (4.45a)$$

$$\dot{m}_{83} h_{83} = \sum_{i=64}^{71} \dot{m}_i h_i \quad (4.45b)$$

ÇKŞD tesisinin termodinamik analizinde vakumla tahliye edilen buhar, hesaplamalarda dikkate alınmamıştır. Tesisin tüm bileşenlerinin devamlı bir şekilde çalıştığı varsayılmıştır. Tuzlu su ısıtıcısındaki buharın debisi, enerji dengesine göre ayarlanmıştır [59]. Kinetik ve potansiyel enerji değişimleri ihmal edilmiştir. Tesise giren deniz suyu, su ve tuz bileşenlerinden oluştuğu varsayılmıştır. Bu nedenle; deniz suyunun kütlesi, su ve tuz bileşenlerinin kütesinin toplamına eşit olarak hesaplanmıştır. Deniz suyunun kütlesi,

$$\dot{m}_{ds,i} = \dot{m}_{su,i} + \dot{m}_{tuz,i} \quad (4.46)$$

şeklinde ifade edilebilir. Denklem 4.46'da $\dot{m}_{ds,i}$ deniz suyunun i noktasındaki kütleli debisini, $\dot{m}_{su,i}$ deniz suyunun i noktasındaki su bileşeninin kütleli debisini ve $\dot{m}_{tuz,i}$ deniz suyunun i noktasındaki tuz bileşeninin kütleli debisini ifade etmektedir. Deniz suyunun tuzluluk oranı, milyonda bir parça olarak ifade edilen ppm cinsinden bulunmaktadır. Deniz suyunun tuzluluk oranı,

$$mf_{tuz,i} = \frac{Tuz_i}{10^6} \quad (4.47)$$

olarak ifade edilir. Denklem 4.47'de $mf_{tuz,i}$ deniz suyunun i noktasındaki tuz bileşeninin kütle oranını ve Tuz_i deniz suyunun i noktasındaki ppm cinsinden tuzluluk miktarını ifade etmektedir.

Deniz suyu gibi bir çözeltideki bileşenin kütesinin o bileşenin molar kütesine oranı, bileşenin mol sayısını vermektedir. Bileşenin mol sayısının çözeltideki toplam mol sayısına bölünmesiyle ise bileşenin mol oranı bulunmaktadır. Kütle oranlarına göre deniz suyunun tuz ve su bileşenlerinin sırasıyla mol oranları,

$$x_{tuz,i} = \frac{M_{su}}{M_{tuz} \left(\frac{1}{mf_{tuz,i}} - 1 \right) + M_{su}} \quad (4.48a)$$

$$x_{su,i} = \frac{M_{tuz}}{M_{su} \left(\frac{1}{mf_{su,i}} - 1 \right) + M_{tuz}} = 1 - x_{tuz,i} \quad (4.48b)$$

şeklinde hesaplanmaktadır. Denklem 4.48a'da $x_{tuz,i}$ deniz suyunun tuz bileşeninin mol oranını, M_{tuz} tuz bileşeninin molar kütleini, M_{su} su bileşeninin molar kütleini, Denklem 4.48b'de $x_{su,i}$ su bileşeninin mol oranını, $mf_{su,i}$ su bileşeninin kütle oranını ifade etmektedir.

Deniz suyunun molar kütlei, su ve tuz bileşenlerinin mol oranları ile aşağıdaki gibi bulunabilmektedir:

$$M_{ds,i} = x_{tuz,i}M_{tuz} + x_{su,i}M_{su} \quad (4.49)$$

Denklem 4.49'da $M_{ds,i}$ deniz suyunun i noktasındaki molar kütleini ifade etmektedir.

Deniz suyunun su bileşeninin kütle oranı, deniz suyunun molar kütlei ile şu şekilde hesaplanabilmektedir:

$$mf_{su,i} = \frac{\dot{m}_{su,i}}{\dot{m}_{ds,i}} = \frac{N_{su,i}M_{su}}{N_{ds,i}M_{ds,i}} = x_{su,i} \frac{M_{su}}{M_{ds,i}} \quad (4.50)$$

Denklem 4.50'de $N_{su,i}$ deniz suyunun i noktasındaki su bileşeninin mol sayısını, $N_{ds,i}$ ise deniz suyunun i noktasındaki toplam mol sayısını ifade etmektedir.

Deniz suyunun tuz bileşeninin T_i sıcaklığındaki sırasıyla entalpisi ve entropisi,

$$h_{tuz,i} = h_{tuz,0} + c_{ps}(T_i - T_0) \quad (4.51a)$$

$$s_{tuz,i} = s_{tuz,0} + c_{ps} \ln \left(\frac{T_i}{T_0} \right) \quad (4.51b)$$

olarak hesaplanmaktadır. Denklem 4.51a'da c_{ps} tuz bileşeninin özgül ısısını, T_i deniz suyunun sıcaklığını, $h_{tuz,i}$ tuz bileşeninin T_i sıcaklığındaki entalpisini, Denklem 4.51b'de $s_{tuz,i}$ tuz bileşeninin T_i sıcaklığındaki entropisini ifade etmektedir.

Deniz suyunun entalpisi ve entropisi, bileşenlerinin kütle oranları ile sırasıyla şu şekilde hesaplanmaktadır:

$$h_{ds,i} = mf_{tuz,i}h_{tuz,i} + mf_{su,i}h_{su,i} \quad (4.52a)$$

$$s_{ds,i} = m_{f_{tuz,i}} s_{tuz,i} + m_{f_{su,i}} s_{su,i} - \left(\frac{R_u}{M_{ds,i}} \right) (x_{tuz,i} \ln x_{tuz,i} + x_{su,i} \ln x_{su,i}) \quad (4.52b)$$

Denklem 4.52a'da $h_{ds,i}$ deniz suyunun i noktasındaki entalpisini, $h_{su,i}$ su bileşeninin entalpisini, Denklem 4.52b'de $s_{ds,i}$ deniz suyunun i noktasındaki entropisini, $s_{su,i}$ su bileşeninin entropisini ve R_u evrensel gaz sabitini ifade etmektedir.

Nükleer enerji santralinden çekilen buhardan deniz suyuna sağlanan birim zamanda proses ısı miktarı şu şekilde hesaplanmıştır:

$$\dot{Q}_{buhar} = \dot{m}_{ds,80} (h_{ds,81} - h_{ds,80}) \quad (4.53)$$

Deniz suyu pompası için sırasıyla kütle, enerji korunumu ve ekserji denge denklemleri:

$$\dot{m}_{ds,0} = \dot{m}_{ds,72} \quad (4.54a)$$

$$\dot{m}_{ds,0} h_{ds,0} + \dot{W}_{DSP} = \dot{m}_{ds,72} h_{ds,72} \quad (4.54b)$$

$$\dot{m}_{ds,0} \psi_0 + \dot{W}_{DSP} = \dot{m}_{ds,72} \psi_{72} + \dot{X}_{yuk,DSP} \quad (4.54c)$$

Denklem 4.54b'de \dot{W}_{DSP} deniz suyu pompasında tüketilen işi temsil etmektedir. Tahliye edilen deniz suyunun ikiye ayrılması prosesi için sırasıyla kütle, enerji korunumu ve ekserji denge denklemleri:

$$\dot{m}_{ds,73} = \dot{m}_{ds,74} + \dot{m}_{ds,88} \quad (4.55a)$$

$$\dot{m}_{ds,73} h_{ds,73} = \dot{m}_{ds,74} h_{ds,74} + \dot{m}_{ds,88} h_{ds,88} \quad (4.55b)$$

$$\dot{m}_{ds,73} \psi_{73} = \dot{m}_{ds,74} \psi_{74} + \dot{m}_{ds,88} \psi_{88} + \dot{X}_{yuk,DST} \quad (4.55c)$$

Kısılma vanası için sırasıyla kütle, enerji korunumu ve ekserji denge denklemleri:

$$\dot{m}_{ds,74} = \dot{m}_{ds,75} \quad (4.56a)$$

$$\dot{m}_{ds,74} h_{ds,74} = \dot{m}_{ds,75} h_{ds,75} \quad (4.56b)$$

$$\dot{m}_{ds,74} \psi_{74} = \dot{m}_{ds,75} \psi_{75} + \dot{X}_{yuk,KV} \quad (4.56c)$$

Devirdaim pompası için sırasıyla kütle, enerji korunumu ve ekserji denge denklemi:

$$\dot{m}_{ds,78} = \dot{m}_{ds,79} \quad (4.57a)$$

$$\dot{m}_{ds,78}h_{ds,78} + \dot{W}_{DP} = \dot{m}_{ds,79}h_{ds,79} \quad (4.57b)$$

$$\dot{m}_{ds,78}\psi_{78} + \dot{W}_{DP} = \dot{m}_{ds,79}\psi_{79} + \dot{X}_{yık,DP} \quad (4.57c)$$

Denklem 4.57b'de \dot{W}_{DP} devirdaim pompasında birim zamanda tüketilen iştir. ÇKŞD ünitesi için sırasıyla kütle, enerji korunumu ve ekserji denge denklemi:

$$\dot{m}_{ds,72} + \dot{m}_{ds,75} + \dot{m}_{ds,79} + \dot{m}_{ds,81} \quad (4.58a)$$

$$= \dot{m}_{ds,73} + \dot{m}_{ds,78} + \dot{m}_{ds,80} + \dot{m}_{ds,77} + \dot{m}_{76}$$

$$\dot{m}_{ds,72}h_{ds,72} + \dot{m}_{ds,75}h_{ds,75} + \dot{m}_{ds,79}h_{ds,79} + \dot{m}_{ds,81}h_{ds,81} \quad (4.58b)$$

$$= \dot{m}_{ds,73}h_{ds,73} + \dot{m}_{ds,78}h_{ds,78} + \dot{m}_{ds,80}h_{ds,80} + \dot{m}_{ds,77}h_{ds,77} + \dot{m}_{76}h_{76}$$

$$\dot{m}_{ds,72}\psi_{72} + \dot{m}_{ds,75}\psi_{75} + \dot{m}_{ds,79}\psi_{79} + \dot{m}_{ds,81}\psi_{81} \quad (4.58c)$$

$$= \dot{m}_{ds,73}\psi_{73} + \dot{m}_{ds,78}\psi_{78} + \dot{m}_{ds,80}\psi_{80} + \dot{m}_{ds,77}\psi_{77} + \dot{m}_{76}\psi_{76} + \dot{X}_{yık,ÇKŞD}$$

Tuzlu su ısıtıcısı için sırasıyla kütle, enerji korunumu ve ekserji denge denklemi:

$$\dot{m}_{82} = \dot{m}_{83} \quad (4.59a)$$

$$\dot{m}_{ds,80} = \dot{m}_{ds,81} \quad (4.59b)$$

$$\dot{m}_{82}h_{82} + \dot{m}_{ds,80}h_{ds,80} = \dot{m}_{83}h_{83} + \dot{m}_{ds,81}h_{ds,81} \quad (4.59c)$$

$$\dot{m}_{82}\psi_{82} + \dot{m}_{ds,80}\psi_{80} = \dot{m}_{83}\psi_{83} + \dot{m}_{ds,81}\psi_{81} + \dot{X}_{yık,TSI} \quad (4.59d)$$

Damıtılmış su pompası için sırasıyla kütle, enerji korunumu ve ekserji denge denklemi:

$$\dot{m}_{76} = \dot{m}_{84} \quad (4.60a)$$

$$\dot{m}_{76}h_{76} + \dot{W}_{DASP} = \dot{m}_{84}h_{84} \quad (4.60b)$$

$$\dot{m}_{76}\psi_{76} + \dot{W}_{DASP} = \dot{m}_{84}\psi_{84} + \dot{X}_{yık,DASP} \quad (4.60c)$$

Denklem 4.60b'de \dot{W}_{DASP} damıtılmış su pompasında birim zamanda tüketilen işi ifade etmektedir. Damıtılmış suyun tesis çıkışında ölü hal sıcaklığı ve basıncına ulaşması işlemi için sırasıyla kütle, enerji korunumu ve ekserji denge denklemleri:

$$\dot{m}_{84} = \dot{m}_{87} \quad (4.61a)$$

$$\dot{m}_{84}h_{84} = \dot{m}_{87}h_{87} \quad (4.61b)$$

$$\dot{m}_{84}\psi_{84} = \dot{m}_{87}\psi_{87} + \dot{X}_{yük,DS} \quad (4.61c)$$

Tuzlu su pompası için sırasıyla kütle, enerji korunumu ve ekserji denge denklemleri:

$$\dot{m}_{ds,77} = \dot{m}_{ds,85} \quad (4.62a)$$

$$\dot{m}_{ds,77}h_{ds,77} + \dot{W}_{TSP} = \dot{m}_{ds,85}h_{ds,85} \quad (4.62b)$$

$$\dot{m}_{ds,77}\psi_{77} + \dot{W}_{TSP} = \dot{m}_{ds,85}\psi_{85} + \dot{X}_{yük,TSP} \quad (4.62c)$$

Denklem 4.62b'de \dot{W}_{TSP} tuzlu su pompasında birim zamanda tüketilen işi ifade etmektedir. Tuzlu suyun tesis çıkışında ölü hal sıcaklığı ve basıncına ulaşması işlemi için sırasıyla kütle, enerji korunumu ve ekserji denge denklemleri:

$$\dot{m}_{ds,85} = \dot{m}_{ds,86} \quad (4.63a)$$

$$\dot{m}_{ds,85}h_{ds,85} = \dot{m}_{ds,86}h_{ds,86} \quad (4.63b)$$

$$\dot{m}_{ds,85}\psi_{85} = \dot{m}_{ds,86}\psi_{86} + \dot{X}_{yük,TS} \quad (4.63c)$$

Nükleer desalinasyon kojenerasyon tesisine birim zamanda giren toplam ısının ekserjisi şu şekilde hesaplanmıştır:

$$\dot{X}_{ısı,BÜ} = \dot{Q}_{BÜ} \left(1 - \frac{T_0}{T_{BÜ}} \right) \quad (4.64)$$

Nükleer desalinasyon kojenerasyon tesisinin yaptığı net güç üretimi şu şekilde hesaplanmıştır:

$$\begin{aligned} \dot{W}_{net,NKT} = \eta_J(\dot{W}_{YBT} + \dot{W}_{ABT}) - \sum_{i=P1}^{P9} \dot{W}_i \\ - (\dot{W}_{DSP} + \dot{W}_{DP} + \dot{W}_{DASP} + \dot{W}_{TSP}) \end{aligned} \quad (4.65)$$

Nükleer santralin ikinci çevriminden desalinasyon tesisine giren toplam ekserji şu şekilde hesaplanmıştır:

$$\dot{X}_{proses} = \dot{m}_{82}\psi_{82} - \dot{m}_{83}\psi_{83} \quad (4.66)$$

Nükleer santralin ikinci çevriminin, ÇKŞD tesisinin ve nükleer desalinasyon kojenerasyon tesisinin sırasıyla toplam ekserji yıkımları şu şekilde hesaplanmıştır:

$$\begin{aligned} \dot{X}_{yik,NS} = \dot{X}_{yik,BÜ} + \dot{X}_{yik,YBT} + \dot{X}_{yik,NA} + \dot{X}_{yik,AI} + \dot{X}_{yik,34,35 \rightarrow 36} \\ + \dot{X}_{yik,ABT} + \dot{X}_{yik,YOĞ} + \sum_{i=P1}^{P9} \dot{X}_{yik,i} + \sum_{j=BSI1}^{BSI7} \dot{X}_{yik,j} \\ + \dot{X}_{yik,JEN} \end{aligned} \quad (4.67a)$$

$$\begin{aligned} \dot{X}_{yik,DT} = \dot{X}_{yik,ÇKŞD} + \dot{X}_{yik,TSI} + \dot{X}_{yik,KV} + \dot{X}_{yik,DST} + \dot{X}_{yik,TS} \\ + \dot{X}_{yik,DS} + \dot{X}_{yik,DSP} + \dot{X}_{yik,DP} + \dot{X}_{yik,DASP} + \dot{X}_{yik,TSP} \end{aligned} \quad (4.67b)$$

$$\dot{X}_{yik,NKT} = \dot{X}_{yik,NS} + \dot{X}_{yik,DT} \quad (4.67c)$$

Denklem 4.67a'da $\dot{X}_{yik,NS}$ nükleer santralin ikinci çevrimindeki toplam ekserji yıkımını, Denklem 4.67b'de $\dot{X}_{yik,DT}$ desalinasyon tesisindeki toplam ekserji yıkımını ve Denklem 4.67c'de $\dot{X}_{yik,NKT}$ nükleer desalinasyon kojenerasyon tesisinin toplam ekserji yıkımını ifade etmektedir. Amaç fonksiyonları olarak tesisin termal verimi, ekserji verimi, ısıl yararlanma oranı, ekolojik performans katsayısı, ekserji yıkım faktörü ve atık ekserji oranı sırasıyla şu şekilde hesaplanmıştır:

$$\eta_{t,NKT} = \frac{\dot{W}_{net,NKT}}{\dot{Q}_{BÜ}} \quad (4.68a)$$

$$\eta_{eks,NKT} = \frac{\dot{W}_{net,NKT} + \dot{X}_{proses}}{\dot{X}_{ısl,BÜ}} \quad (4.68b)$$

$$\epsilon_y = \frac{\dot{W}_{net,NKT} + \dot{Q}_{buhar}}{\dot{Q}_{BÜ}} \quad (4.68c)$$

$$ECOP_{kojen} = \frac{\dot{W}_{net,NKT} + \dot{X}_{proses}}{\dot{X}_{yik,NKT}} \quad (4.68d)$$

$$f_{yık,eks} = \frac{\dot{X}_{yık,NKT}}{\dot{X}_{ısl,BÜ}} \quad (4.68e)$$

$$r_{atık,eks} = \frac{\dot{X}_{yık,NS} + \dot{m}_{23}\psi_{23} - \dot{m}_{21}\psi_{21}}{\dot{X}_{ısl,BÜ}} \quad (4.68f)$$

Denklem 4.68a'da $\eta_{t,NKT}$ nükleer desalinasyon kojenerasyon tesisinin termal verimini, Denklem 4.68b'de $\eta_{eks,NKT}$ ekserji verimini, Denklem 4.68c'de ϵ_y ısı yararlanma oranını, Denklem 4.68d'de $ECOP_{kojen}$ ekolojik performans katsayısını, Denklem 4.68e'de $f_{yık,eks}$ ekserji yıkım faktörünü ve Denklem 4.64f'de $r_{atık,eks}$ nükleer santralin ikinci çevriminin atık ekserji oranını ifade etmektedir.

5. BULGULAR VE TARTIŞMA

Nükleer desalinasyon kojenerasyon tesisinin verimliliği, ısıl yararlanma oranı, ekolojik performans katsayısı, ekserji yıkım faktörü ve atık ekserji oranı gibi amaç fonksiyonlarının değerlendirildiği enerji-ekserji analizi çalışmasında nükleer santralin ikinci çevrim modellemesinde kullanılan tasarım parametrelerinin değerleri Çizelge 5.1’de, ÇKŞD tesisinin modellemesinde kullanılan tasarım parametrelerinin değerleri ise Çizelge 5.2’de, bu parametrelerin sabit tutulduğu analizler için, sunulmuştur.

Çizelge 5.1 : Nükleer santralin ikinci çevrim dizayn parametreleri.

| Parametreler | Değerler |
|------------------------------------|-----------|
| Ölü Hal Sıcaklığı | 300,15 K |
| Ölü Hal Basıncı | 1 atm |
| Buhar Üretici Termal Enerji Girişi | 3300 MWth |
| Buhar Üretici Sıcaklığı | 620 K |
| Taze Buhar Sıcaklığı | 550,15 K |
| Ön Isıtıcılarının Sayısı | 7 |
| Pompa Verimi | %85 |
| Jeneratör Verimi | %98 |
| Net Elektrik Güç Üretimi | 1050 MWe |

Çizelge 5.2 : ÇKŞD tesisinin dizayn parametreleri.

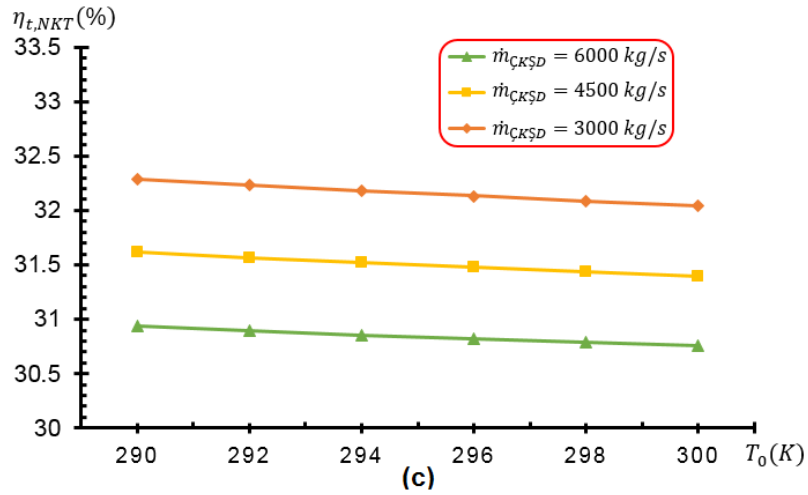
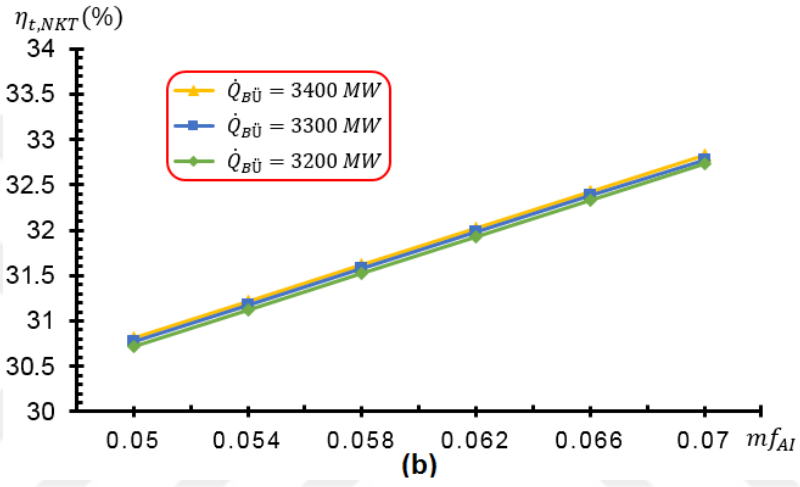
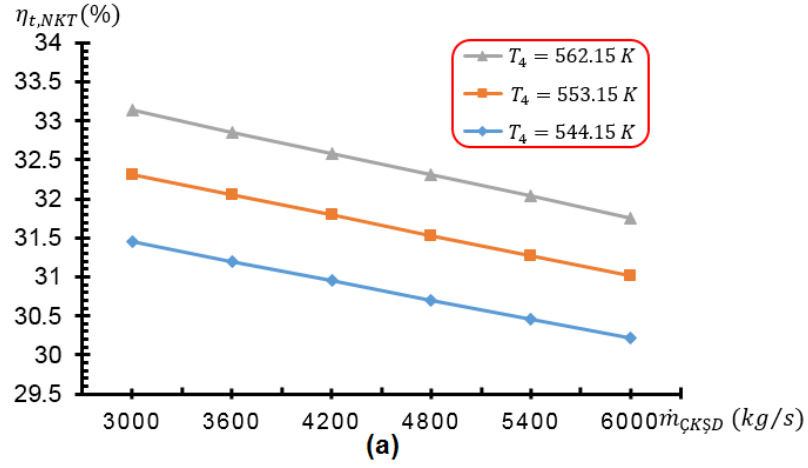
| Parametreler | Değerler |
|---|------------------|
| Deniz Suyu Tuzluluğu | 38000 ppm |
| Ünitede Buharlaşmayan Tuzlu Suyun Tuzluluğu | 60000 ppm |
| Tuz Bileşeninin Molar Kütlesi | 58,443 kg/kmol |
| Su Bileşeninin Molar Kütlesi | 18,0153 kg/kmol |
| Deniz Suyu Sıcaklığı | 300,15 K |
| Tuzun Özgül Isısı | 0,8368 kj/kgK |
| Evrensel Gaz Sabiti | 8,31447 kj/kmolK |
| Deniz Suyunun Kütlesel Debisi | 2400 kg/s |
| Pompa Verimi | %85 |
| Temiz Su Üretimi | 270 kg/s |

Nükleer santralin ikinci çevrim analizinde kullanılan termodinamik veriler, [56]’dan alınarak geliştirilen yazılım ile interpolate edilmiştir. Çevrimdeki deniz suyu hariç tüm noktaların entalpi ve entropi değerleri, bu verilere göre belirlenmiştir. Nükleer

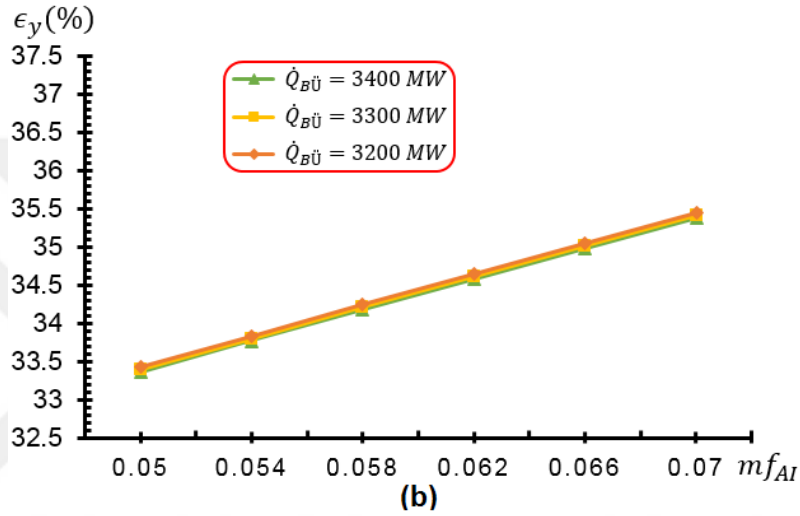
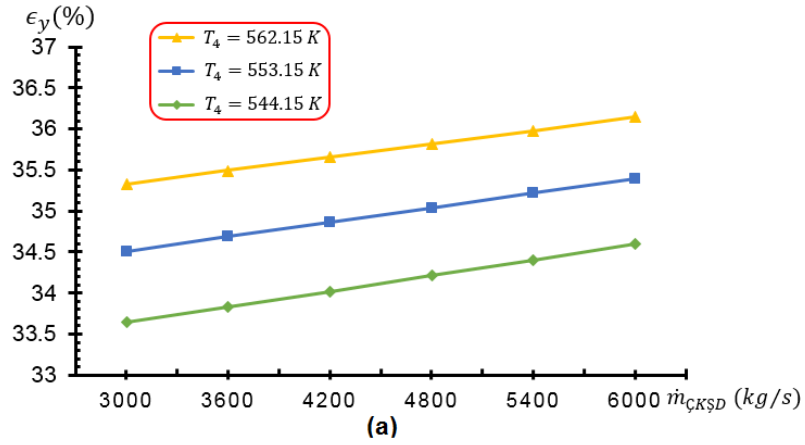
desalinasyon kojenerasyon tesisindeki akan akışkanın akım ekserjisi için Denklem 4.4 kullanılmıştır.

Besi deniz suyu kütleli debisinin nükleer desalinasyon kojenerasyon tesisinin termal verimi üzerindeki etkisi üç farklı taze buhar sıcaklığı için Şekil 5.1a'da gösterilmiştir. Tuzlu su ısıtıcısına giren besi deniz suyu kütleli debisinin 3000 kg/s artışı ile termal verim, yaklaşık %1,3 azalırken; taze buhar sıcaklığının 9 K artırılması ile yaklaşık %0,8 artmaktadır. Ara ısıtıcı kütleli debi oranının tesisin ısı verimi üzerindeki etkisi üç farklı tesise giren termal enerji girişi için Şekil 5.1b'de gösterilmiştir. Ara ısıtıcı kütleli debi oranının $0,02$ oranında artırılmasıyla termal verimin yaklaşık %2 oranında arttığı termal enerji girişinin 200 MW 'lık artırılması ile termal verimde küçük bir artış olduğu görülmüştür. Ölü hal sıcaklığının tesisin termal verimi üzerindeki etkisi üç farklı besi deniz suyu kütleli debisi için Şekil 5.1c'de gösterilmiştir. Ölü hal sıcaklığının 290 K 'den 300 K 'e yükselmesi ile tesisin termal verimi, yaklaşık %0,2 oranında azaldığı bulunmuştur.

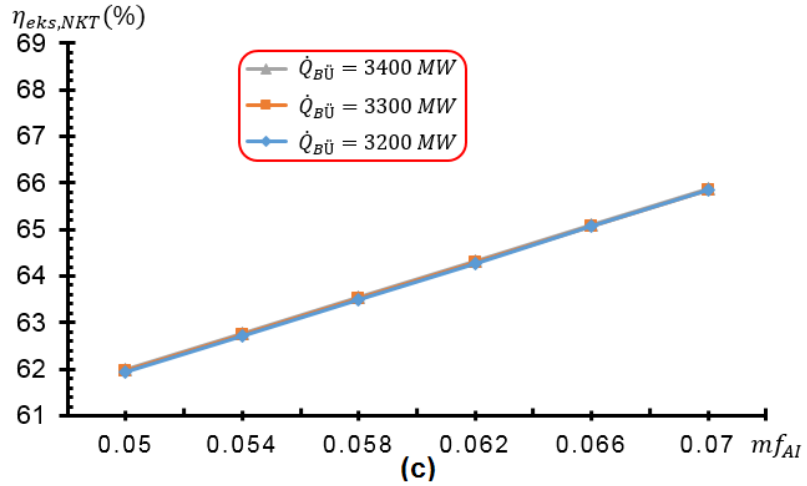
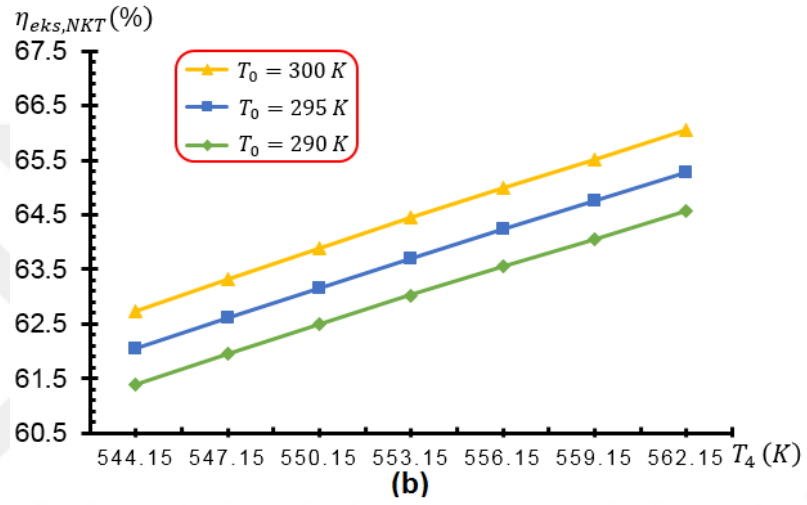
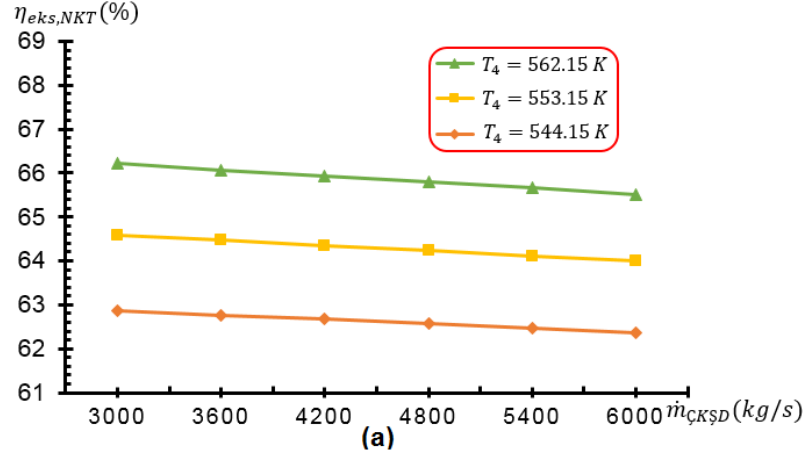
Besi deniz suyu kütleli debisinin tesisin ısı yararlanma oranı üzerindeki etkisi üç farklı taze buhar sıcaklığı için Şekil 5.2a'da verilmiştir. 3000 kg/s artan besi deniz suyu kütleli debisi, ısı yararlanma oranı değerlerini yaklaşık %0,9 arttırmıştır. Buhar üreticiden aktarılan buharın sıcaklığı 18 K arttığında ise ısı yararlanma oranı, yaklaşık %1,6 oranında artmıştır. Ara ısıtıcı kütleli debi oranının tesisin ısı yararlanma oranı üzerindeki etkisi üç farklı termal enerji girişi değeri için Şekil 5.2b'de gösterilmiştir. Termal enerji girişindeki 200 MW 'lık artış, ısı yararlanma oranı üzerinde olumlu bir etki yapmazken ara ısıtıcı kütleli debi oranının artırılması ile tesisin ısı yararlanma oranı, yaklaşık %2 oranında artmıştır.



Şekil 5.1 : Termal verimin (a) T_4 'ün üç değeri için besi deniz suyu kütleli debisine, (b) $\dot{Q}_{BÜ}$ 'nün üç değeri için ara ısıtıcı kütleli debi oranına ve (c) \dot{m}_{CKSD} 'nin üç değeri için ölü hal sıcaklığına göre değişimi.



Şekil 5.2 : Isıl yararlanma oranının (a) T_4 'ün üç değeri için besi deniz suyu kütleli debisine ve (b) $\dot{Q}_{B\dot{U}}$ 'nün üç değeri için ara ısıtıcı kütleli debi oranına göre değişimi. Besi deniz suyu kütleli debisinin tesisin ekserji verimine etkisi üç farklı taze buhar sıcaklığı için Şekil 5.3a'da gösterilmiştir. Besi deniz suyu kütleli debisinin artışıyla ekserji veriminde çok az bir değişim görülürken taze buhar sıcaklığının 544,15 K'den 562,15 K'e artmasıyla ekserji veriminin yaklaşık %3,2 oranında arttığı görülmüştür. Taze buhar sıcaklığının ekserji verimine etkisi üç farklı ölü hal sıcaklığı için Şekil 5.3b'de gösterilmiştir. Ölü hal sıcaklığının 10 K'lik yükselmesi ile ekserji verimi, yaklaşık %1,4 oranında artmaktadır. Ara ısıtıcı kütleli debi oranının ekserji verimine etkisi üç farklı termal enerji girişi için Şekil 5.3c'de gösterilmiştir. Ara ısıtıcı kütleli debi oranının artması, ekserji verimine yaklaşık %3,9 oranında olumlu bir etkisi olurken termal enerji girişinin artması ise ekserji veriminde çok az bir etkiye sahiptir.



Şekil 5.3 : Ekserji veriminin (a) T_4 'ün üç değeri için besi deniz suyu kütleli debisine, (b) T_0 'ın üç değeri için taze buhar sıcaklığına ve (c) \dot{Q}_{Bu} 'nün üç değeri için ara ısıtıcı kütleli debi oranına göre değişimi.

Taze buhar sıcaklığının üç değeri için besi deniz suyu kütleli debisinin tesisin ekolojik performans katsayısına etkisi Çizelge 5.3'te gösterilmiştir. Besi deniz suyu

kütlesel debisi artışının ekolojik performans katsayısı üzerinde etkisi az iken taze buhar sıcaklığının $18 K$ artması ile ekolojik performans katsayısı, yaklaşık $0,23$ değerinde artmaktadır. Termal enerji girişinin üç değeri için ara ısıtıcı kütlesel debi oranının ekolojik performans katsayısına etkisi Çizelge 5.4'te gösterilmiştir. Ara ısıtıcıya gönderilen kütlesel debi oranının $0,02$ oranında artması ile tesisin ekolojik performans katsayısı, yaklaşık $0,28$ değerinde artış göstermektedir.

Çizelge 5.3 : Ekolojik performans katsayısının ($ECOP_{kojen}$) taze buhar sıcaklığının üç değeri için besi deniz suyu kütlesel debisine göre değişimi.

| $\dot{m}_{\text{ÇKŞD}}$ | $T_4 = 544.15K$ | $T_4 = 553.15K$ | $T_4 = 562.15K$ |
|-------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| 3000 | 1.65594 | 1.77966 | 1.90731 |
| 3600 | 1.63258 | 1.75186 | 1.87430 |
| 4200 | 1.60981 | 1.72483 | 1.84229 |
| 4800 | 1.58760 | 1.69852 | 1.81122 |
| 5400 | 1.56592 | 1.67291 | 1.78106 |
| 6000 | 1.54476 | 1.64797 | 1.75176 |

Çizelge 5.4 : Ekolojik performans katsayısının ($ECOP_{kojen}$) termal enerji girişinin üç değeri için ara ısıtıcı kütlesel debi oranına göre değişimi.

| mf_{AI} | $\dot{Q}_{BÜ} = 3200 MW$ | $\dot{Q}_{BÜ} = 3300 MW$ | $\dot{Q}_{BÜ} = 3400 MW$ |
|-----------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| 0.050 | 1.57371 | 1.57793 | 1.58192 |
| 0.054 | 1.62537 | 1.62985 | 1.63409 |
| 0.058 | 1.67913 | 1.68389 | 1.68839 |
| 0.062 | 1.73514 | 1.74020 | 1.74498 |
| 0.066 | 1.79353 | 1.79891 | 1.80399 |
| 0.070 | 1.85446 | 1.86018 | 1.86559 |

Üç farklı taze buhar sıcaklığı için besi deniz suyu kütlesel debisinin, üç farklı ölü hal sıcaklığı için taze buhar sıcaklığının ve üç farklı termal enerji girişi için ara ısıtıcı kütlesel debi oranının tesisin ekserji yıkım faktörüne etkisi sırasıyla Çizelge 5.5, Çizelge 5.6 ve Çizelge 5.7'de gösterilmiştir. Besi deniz suyu kütlesel debisi $3000 kg/s$ arttırıldığında ekserji yıkım faktörü, yaklaşık $\%2,5$ oranında artarken taze buhar sıcaklığı $18 K$ arttırıldığında ekserji yıkım faktörü, yaklaşık $\%3,1$ oranında azalmaktadır. Ölü hal sıcaklığının $10 K$ 'lik yükselmesinde ve ara ısıtıcı kütlesel debi oranının artışında ekserji yıkım faktörü, sırasıyla yaklaşık $\%1,4$ ve $\%3,9$ oranında azalmaktadır.

Üç farklı ölü hal sıcaklığı için taze buhar sıcaklığının ve üç farklı termal enerji girişi için ara ısıtıcı kütlesel debi oranının tesisin atık ekserji oranına etkisi sırasıyla Çizelge 5.8 ve Çizelge 5.9'da gösterilmiştir. Atık ekserji oranı, $10 K$ 'lik ölü hal sıcaklığı

değişiminde ve 18 K'lik taze buhar sıcaklığı artışında sırasıyla yaklaşık %1,4 ve %3,2 oranında azalmaktadır. Termal enerji girişinin artışı, atık ekserji oranında küçük bir etki oluştururken ara ısıtıcı kütleli debi oranının 0,02 artması ile atık ekserji oranı, yaklaşık %3,9 oranında azalmaktadır.

Çizelge 5.5 : Ekserji yıkım faktörünün ($f_{yık,eks}$) taze buhar sıcaklığının üç değeri için besi deniz suyu kütleli debisine göre değişimi.

| $\dot{m}_{ÇKŞD}$ | $T_4 = 544.15K$ | $T_4 = 553.15K$ | $T_4 = 562.15K$ |
|------------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| 3000 | 0.379629 | 0.362921 | 0.347158 |
| 3600 | 0.384456 | 0.368010 | 0.352532 |
| 4200 | 0.389283 | 0.373099 | 0.357907 |
| 4800 | 0.394111 | 0.378188 | 0.363281 |
| 5400 | 0.398938 | 0.383277 | 0.368655 |
| 6000 | 0.403765 | 0.388366 | 0.374029 |

Çizelge 5.6 : Ekserji yıkım faktörünün ($f_{yık,eks}$) ölü hal sıcaklığının üç değeri için taze buhar sıcaklığına göre değişimi.

| T_4 | $T_0 = 290 K$ | $T_0 = 295 K$ | $T_0 = 300 K$ |
|--------|---------------|---------------|---------------|
| 544.15 | 0.398434 | 0.391830 | 0.384659 |
| 547.15 | 0.393064 | 0.386353 | 0.379072 |
| 550.15 | 0.387796 | 0.380978 | 0.373590 |
| 553.15 | 0.382639 | 0.375716 | 0.368222 |
| 556.15 | 0.377617 | 0.370592 | 0.362993 |
| 559.15 | 0.372674 | 0.365547 | 0.357845 |
| 562.15 | 0.367787 | 0.360559 | 0.352755 |

Çizelge 5.7 : Ekserji yıkım faktörünün ($f_{yık,eks}$) termal enerji girişinin üç değeri için ara ısıtıcı kütleli debi oranına göre değişimi.

| mf_{AI} | $\dot{Q}_{BÜ} = 3200 MW$ | $\dot{Q}_{BÜ} = 3300 MW$ | $\dot{Q}_{BÜ} = 3400 MW$ |
|-----------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| 0.050 | 0.393625 | 0.392700 | 0.391830 |
| 0.054 | 0.385905 | 0.384972 | 0.384095 |
| 0.058 | 0.378185 | 0.377245 | 0.376360 |
| 0.062 | 0.370464 | 0.369517 | 0.368625 |
| 0.066 | 0.362744 | 0.361789 | 0.360890 |
| 0.070 | 0.355023 | 0.354061 | 0.353154 |

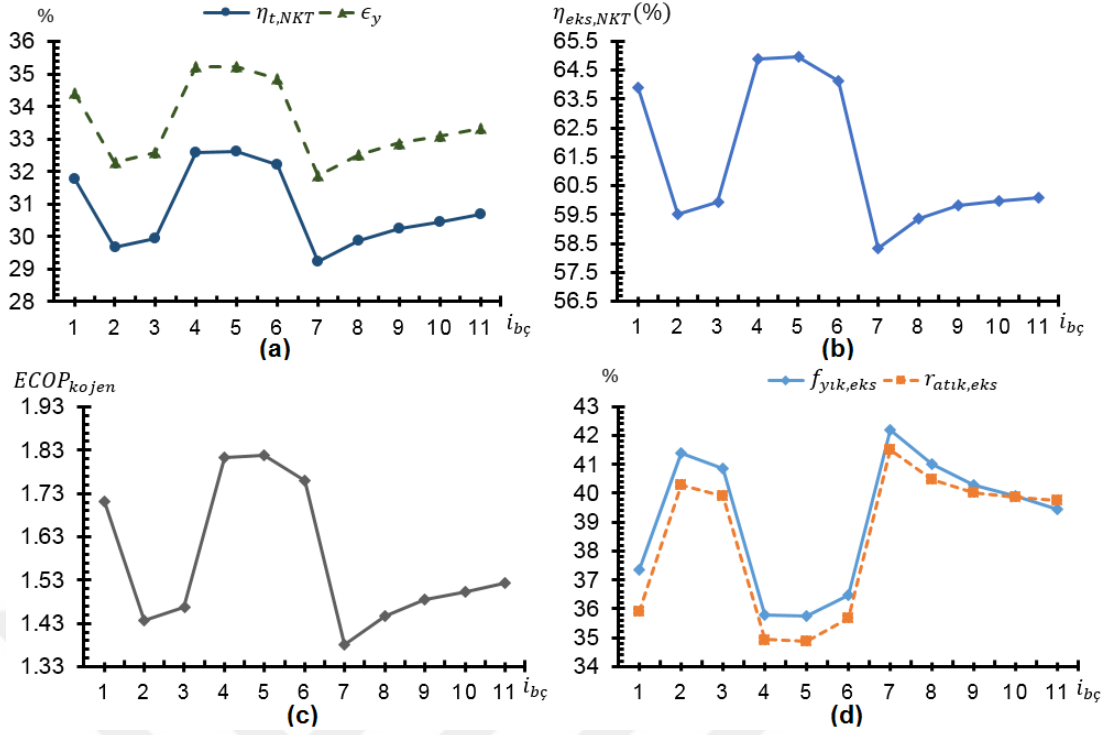
Çizelge 5.8 : Atık ekserji oranının ($r_{atık,eks}$) ölü hal sıcaklığının üç değeri için taze buhar sıcaklığına göre değişimi.

| T_4 | $T_0 = 290 K$ | $T_0 = 295 K$ | $T_0 = 300 K$ |
|--------|---------------|---------------|---------------|
| 544.15 | 0.384403 | 0.377898 | 0.370833 |
| 547.15 | 0.378840 | 0.372223 | 0.365044 |
| 550.15 | 0.373382 | 0.366654 | 0.359362 |
| 553.15 | 0.368039 | 0.361201 | 0.353798 |
| 556.15 | 0.362834 | 0.355889 | 0.348377 |
| 559.15 | 0.357710 | 0.350658 | 0.343039 |
| 562.15 | 0.352643 | 0.345485 | 0.337758 |

Çizelge 5.9 : Atık ekserji oranının ($r_{atık,eks}$) termal enerji girişinin üç değeri için ara ısıtıcı kütleli debi oranına göre değişimi.

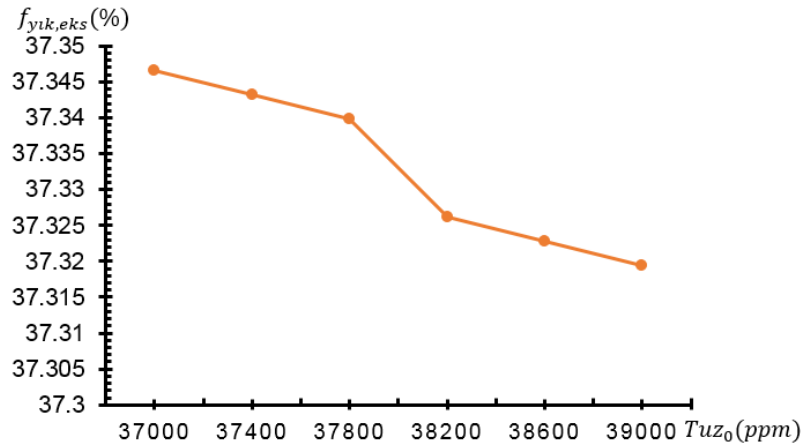
| mf_{AI} | $\dot{Q}_{BÜ} = 3200 MW$ | $\dot{Q}_{BÜ} = 3300 MW$ | $\dot{Q}_{BÜ} = 3400 MW$ |
|-----------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| 0.050 | 0.378785 | 0.378637 | 0.378497 |
| 0.054 | 0.37100 | 0.370844 | 0.370698 |
| 0.058 | 0.363215 | 0.363052 | 0.362898 |
| 0.062 | 0.355431 | 0.355260 | 0.355099 |
| 0.066 | 0.347646 | 0.347468 | 0.347300 |
| 0.070 | 0.339862 | 0.339676 | 0.339500 |

Tesisin tüm amaç fonksiyonlarının desalinasyon prosesi için Şekil 4.1’de sırasıyla 52, 53, ..., 62 noktalarına karşılık gelen 11 farklı buhar çekme noktasına göre değişimi Şekil 5.4’te gösterilmiştir. 1’den 11’e kadar yapılan numaralandırma, Şekil 4.1’de sırasıyla 52, 53, ..., 62 numaralara karşılık gelmektedir. Termal verim, ekserji verimi, ısıl yararlanma oranı ve ekolojik performans katsayısı farklı buhar çıkışlarına göre benzer etkiler gösterirken ekserji yıkım faktörü ve atık ekserji oranı, bunlara zıt etkiler göstermiştir. Buhar çekme noktaları değişimine göre tesisin ekserji yıkım faktörünün ve atık ekserji oranının artış gösterdiği noktalarda diğer amaç fonksiyonları azalmış; ekserji yıkım faktörünün ve atık ekserji oranının azalış gösterdiği noktalarda ise diğer amaç fonksiyonları artmıştır. Tesisin termal veriminin, ısıl yararlanma oranının, ekserji veriminin ve ekolojik performans katsayısının maksimum değerleri, nem ayırıcısı ve ara ısıtıcı arasındaki buhar çıkışının bulunduğu Şekil 4.1’de 56 nolu noktaya karşılık gelen 5 nolu noktada elde edilmiştir ve bunlar sırasıyla %32,6, %35,2, %64,97 ve 1,82’dir. Tesisin ekserji yıkım faktörünün ve atık ekserji oranının minimum değerleri ise yine 5 nolu noktada elde edilmiş olup bunlar sırasıyla %35,7 ve 34,8’dir.



Şekil 5.4 : Desalinasyon prosesi için buhar çekme noktaları değişiminin tesisin (a) termal verimine, ısıl yararlanma oranına, (b) ekserji verimine, (c) ekolojik performans katsayısına, (d) ekserji yıkım faktörüne ve atık ekserji oranına etkisi.

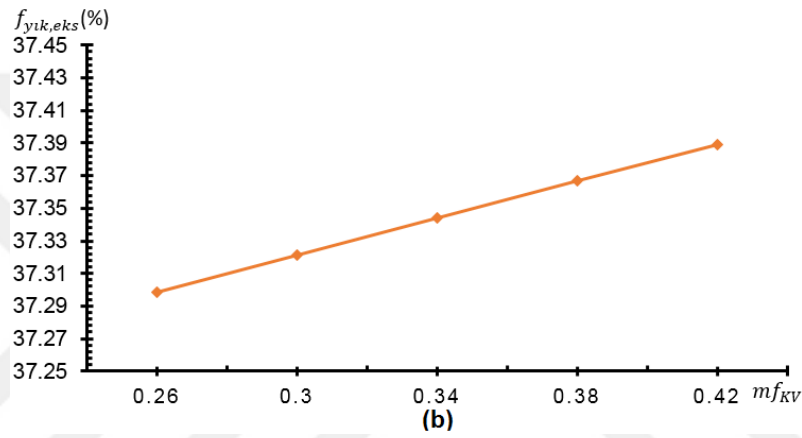
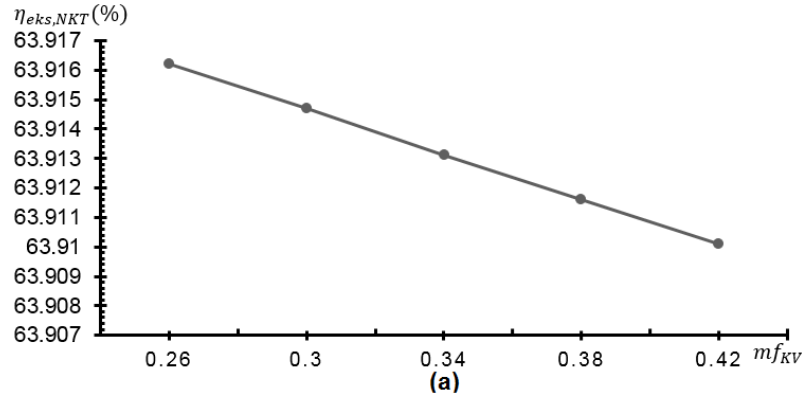
Deniz suyu tuzluluğunun tesisin ekserji yıkım faktörü üzerindeki etkisi Şekil 5.5’de gösterilmiştir. Deniz suyu tuzluluğunun 37000 ppm’den 39000 ppm’e artmasıyla ekserji yıkım faktörü, azalma eğilimindedir.



Şekil 5.5 : Ekserji yıkım faktörünün deniz suyu tuzluluğuna göre değişimi.

Kısılma vanası kütleli debi oranının tesisin ekserji verimine ve ekserji yıkım faktörüne etkisi Şekil 5.6’da gösterilmiştir. Kısılma vanasına giren kütleli debi oranı

0,16 kadar arttırıldığında tesisin ekserji verimi, azalma eğilimi gösterirken ekserji yıkım faktörü ise artma eğilimindedir.



Şekil 5.6 : Kısılma vanası kütleli debi oranının (a) ekserji verimine ve (b) ekserji yıkım faktörüne etkisi.

Tesisin amaç fonksiyonlarının tuzlu su ısıtıcısına giren besi deniz suyu sıcaklığı (T_{80}) ile değişimi Çizelge 5.10'da gösterilmiştir. Tesisin termal verimi, ekserji verimi ve ekolojik performans katsayısı, tuzlu su ısıtıcısı girişinde besi deniz suyu sıcaklığının 20 K artması ile azalırken ısı yararlanma oranı, ekserji yıkım faktörü ve atık ekserji oranı yükselmiştir. Ancak bu değişimler, ihmal edilebilir düzeyde azdır.

Çizelge 5.10 : Amaç fonksiyonlarının tuzlu su ısıtıcısına giren besi deniz suyunun sıcaklığına göre değişimi.

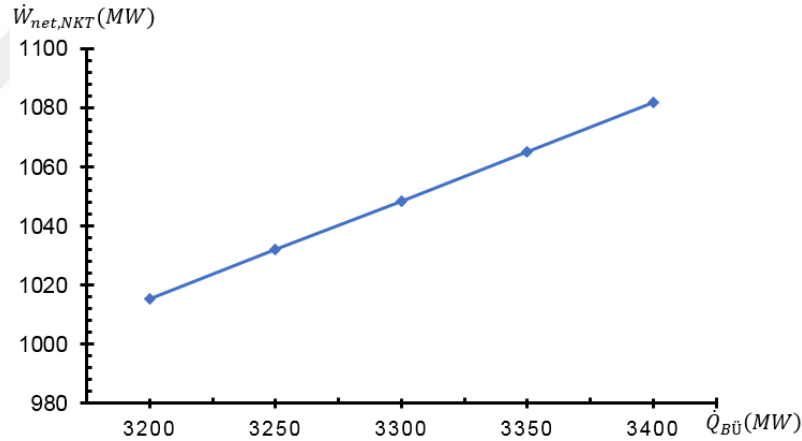
| $T_{80}(K)$ | $\eta_{t,NKT}$ | ϵ_y | $\eta_{eks,NKT}$ | $ECOP_{kojen}$ | $f_{yik,eks}$ | $r_{atık,eks}$ |
|-------------|----------------|--------------|------------------|----------------|---------------|----------------|
| 350 | 0.317785 | 0.344059 | 0.639142 | 1.71194 | 0.373344 | 0.359149 |
| 354 | 0.317779 | 0.344064 | 0.639140 | 1.71187 | 0.373357 | 0.359152 |
| 358 | 0.317766 | 0.344074 | 0.639135 | 1.71175 | 0.373381 | 0.359156 |
| 362 | 0.317750 | 0.344087 | 0.639129 | 1.71159 | 0.373412 | 0.359162 |
| 366 | 0.317733 | 0.344100 | 0.639123 | 1.71142 | 0.373445 | 0.359168 |
| 370 | 0.317717 | 0.344113 | 0.639117 | 1.71126 | 0.373478 | 0.359174 |

Tesisin amaç fonksiyonlarının damıtılmış suyun kütleli debisi (\dot{m}_{76}) ile değişimi Çizelge 5.11’de gösterilmiştir. Damıtılmış su kütleli debisinin 200 kg/s ’den 400 kg/s ’ye artışı ile tesisin atık ekserji oranı sabit kalırken ekolojik performans katsayısı değerleri, artmış ve diğer amaç fonksiyonu değerleri, azalmıştır. Ancak bu değişimler, oransal olarak ihmal edilebilir düzeyde azdır.

Çizelge 5.11 : Amaç fonksiyonlarının damıtılmış su kütleli debisine göre değişimi.

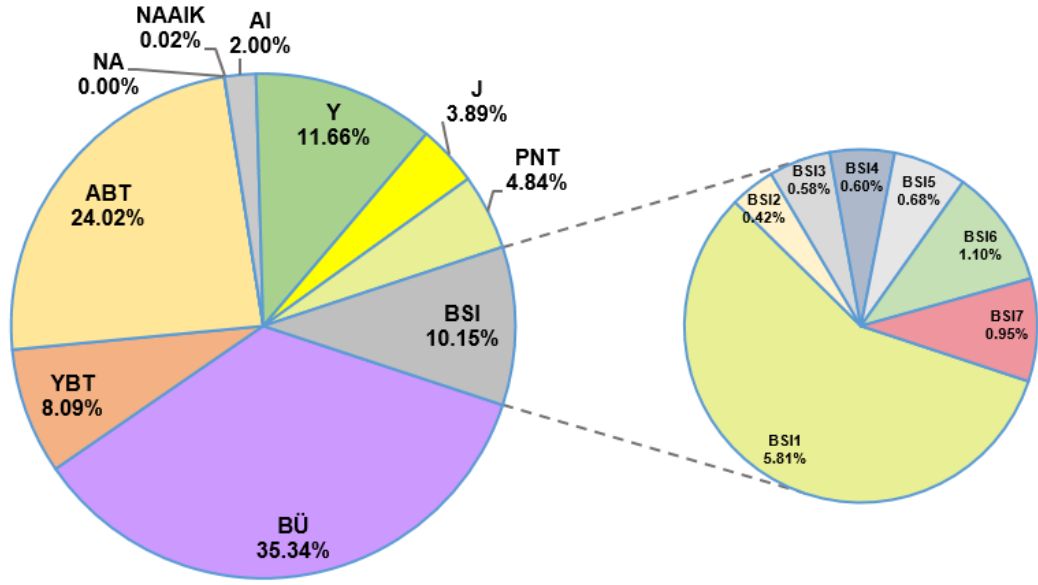
| $\dot{m}_{76}(\text{kg/s})$ | $\eta_{t,NKT}$ | ϵ_y | $\eta_{eks,NKT}$ | $ECOP_{kojen}$ | $f_{yık,eks}$ | $r_{atık,eks}$ |
|-----------------------------|----------------|--------------|------------------|----------------|---------------|----------------|
| 200 | 0.317773 | 0.344081 | 0.639149 | 1.70952 | 0.373877 | 0.359156 |
| 250 | 0.317768 | 0.344076 | 0.639139 | 1.71111 | 0.373522 | 0.359156 |
| 300 | 0.317763 | 0.344071 | 0.639129 | 1.71271 | 0.373168 | 0.359156 |
| 350 | 0.317758 | 0.344066 | 0.639120 | 1.71432 | 0.372814 | 0.359156 |
| 400 | 0.317754 | 0.344061 | 0.639110 | 1.71592 | 0.372459 | 0.359156 |

Buhar üreticisine giren termal enerji girişinin nükleer desalinasyon kojenerasyon tesisinin net elektrik güç üretimine etkisi Şekil 5.7’de gösterilmiştir. Termal enerji girişinin 200 MW artması ile tesisin net elektrik güç üretimi, yaklaşık 67 MW yükselmiştir.

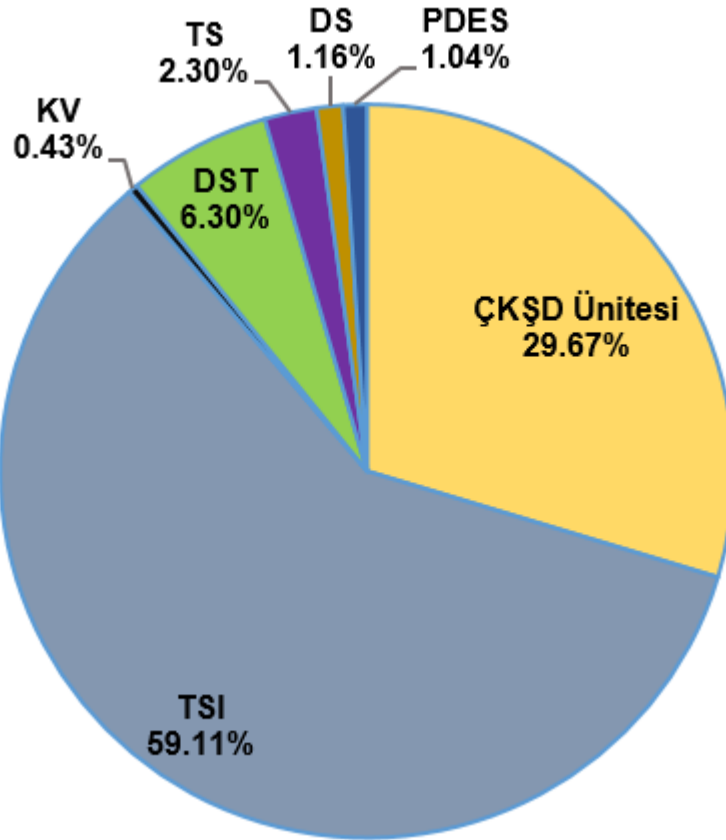


Şekil 5.7 : Termal enerji girişinin tesisin net elektrik güç üretimine etkisi.

Nükleer desalinasyon kojenerasyon tesisinin enerji ve ekserji analizi sonucunda nükleer santralin ikinci çevrimi ve ÇKŞD tesisi bileşenlerinin ekserji yıkım yüzdeleri sırasıyla Şekil 5.8 ve Şekil 5.9’da gösterilmiştir. Nükleer santralin ikinci çevriminde en fazla ekserji yıkımı, buhar üretici bileşeninde gerçekleşirken ÇKŞD tesisinde ise tuzlu su ısıtıcısı bileşeninde gerçekleşmiştir.



Şekil 5.8 : Nükleer santralin ikincil çevrim bileşenlerinin ekserji yıkım yüzdeleri dağılımları.



Şekil 5.9 : ÇKŞD tesisi bileşenlerinin ekserji yıkım yüzdeleri dağılımları.

6. SONUÇLAR

Bu tez çalışmasında Akdeniz kıyısında kurulabilecek bir nükleer santralin ikinci çevrimine entegre ÇKŞD desalinasyon prosesi kullanılan bir nükleer desalinasyon kojenerasyon tesisinin enerji ve ekserji analizi yapılmıştır. Tesisin tüm termodinamik özellikleri belirlendikten sonra analiz sonucunda amaç fonksiyonlarının ve elektrik güç üretiminin tesisin besi deniz suyu kütleli debisi, taze buhar sıcaklığı, ölü hal sıcaklığı, termal enerji girişi, ara ısıtıcı kütleli debi oranı, desalinasyon için buhar çekme noktaları ve deniz suyu tuzluluğu gibi tasarım parametreleri ile ne şekilde değiştiği ve potansiyelinin ne olduğu incelenmiştir.

Termodinamik analiz sonucunda, taze buhar sıcaklığının artması ile tesisin verimliliği, ısı yararlanma oranı ve ekolojik performans katsayısı üzerinde pozitif bir etki gözlemlenmiştir. Aynı zamanda tesisin ekserji yıkım faktörü ve atık ekserji oranında, taze buhar sıcaklığının $18 K$ artması ile yaklaşık %3'ün üzerinde azalma olduğu bulunmuştur. Ara ısıtıcı kütleli debi oranının yükseltilmesi, tesisin termal verimini, ısı yararlanma oranını, ekserji verimini ve ekolojik performans katsayısını önemli oranda arttırmıştır. Kütleli debi oranının 0,02'lik artışı ile tesisin ekserji yıkım faktörü ve atık ekserji oranı ise yaklaşık %3,9 oranında azalmıştır. Ölü hal sıcaklığının $10 K$ 'lik yükselmesi sonucunda tesisin ekserji verimi, yaklaşık %1,4 oranında artarken termal verimi, ekserji yıkım faktörü ve atık ekserji oranı ise sırasıyla %0,2, %1,4 ve %1,4 oranlarında azalmaktadır. Besi deniz suyu kütleli debisinin artışı, tesisin ısı yararlanma oranının ve ekserji yıkım faktörünün yükselmesine neden olurken termal ve ekserji verimini azaltmaktadır. Desalinasyon prosesi için ikinci çevrimdeki buhar çekme noktalarının amaç fonksiyonları üzerine etkisine bakıldığında nem ayırıcısı ve ara ısıtıcı arasındaki buhar çıkışının bulunduğu Şekil 4.1'de 56 nolu noktaya karşılık gelen 5 nolu nokta, tesisin verimliliği, ısı yararlanma oranı ve ekolojik performans katsayısı üzerinde maksimum yarar sağlamaktadır. Deniz suyu tuzluluğunun artışı, ekserji yıkım faktörünün azalmasını sağlarken kısılma vanası kütleli debi oranı artışı, ekserji yıkım faktörünü arttırmıştır. $200 MW$ 'lık termal enerji girişi artışı ise tesisin elektrik güç üretimini yaklaşık $67 MW$ yükseltmiştir.

KAYNAKLAR

- [1] **IAEA** (2000). Introduction of Nuclear Desalination (Technical Reports Series No. 400). Vienna: International Atomic Energy Agency.
- [2] **Yuksel I.** (2015), Water management for sustainable and clean energy in Turkey, *Energy Reports*, 1, 129-133.
- [3] **DPT** (2007). Dokuzuncu Kalkınma Planı, Toprak ve Su Kaynaklarının Kullanımı ve Yönetimi, Ankara:DPT.
- [4] **Aydın, O., Ünalı, Ü.E., Duman, N., Çiçek, İ., Türkoğlu, N.** (2017). Türkiye’de su kıtlığının mekânsal ölçekte değeriendirilmesi, *Türk Coğrafya Dergisi*, 11-18.
- [5] **İnşaat Mühendisleri Odası Su Çalışma Grubu** (2009). Su Hakkı Raporu, TMH-454-2009/2.
- [6] **Megahed, M. M.** (2000). Nuclear desalination: history and prospects, *Desalination*, 135(1-3), 169-185.
- [7] **Sánchez-Cervera, I.G, Kavvadias, K., Khamis, I.** (2013). DE-TOP: A new IAEA tool for the thermodynamic evaluation of nuclear desalination, *Desalination*, 321, 103-109.
- [8] **Manesh, M.H.K., Amidpour, M.** (2009). Multi-objective thermoeconomic optimization of coupling MSF desalination with PWR nuclear power plant through evolutionary algorithms, *Desalination*, 249(3), 1332-1344.
- [9] **Ansari, K., Sayyaadi, H., Amidpour, M.** (2010). Thermoeconomic optimization of a hybrid pressurized water reactor (PWR) power plant coupled to a multi effect distillation desalination system with thermo-vapor compressor (MED-TVC), *Energy*, 35(5), 1981-1996.
- [10] **Ansari, K., Sayyaadi, H., Amidpour, M.** (2011). A comprehensive approach in optimization of a dual nuclear power and desalination system, *Desalination*, 269(1-3), 25-34.
- [11] **Şekerçi, H., Demir, E., Tanbay, T., Durmayaz, A** (2019). Thermodynamic analysis of a nuclear desalination cogeneration plant, *22nd Congress on Thermal Science and Technology*, September 11-14.
- [12] **Khalid, F., Dincer, I., Rosen, M.A.** (2016). Comparative assessment of CANDU 6 and Sodium-cooled Fast Reactors for nuclear desalination, *Desalination*, 379, 182-192.
- [13] **Naserbegi, A., Rezaei, A., Alahyarizadeh, G., Aghaie, M.** (2019). Energy management of nuclear desalination plant by efficient coupling a pressurized water reactor and a multi-effect distillation system–

thermodynamic evaluation, *Desalination and Water Treatment*, 151, 34-46.

- [14] **Khalid, F., Dinçer, İ., Rosen, M.A.** (2016). Analysis and assessment of a gas turbine-modular helium reactor for nuclear desalination, *Journal of Nuclear Engineering and Radiation Science*, 2(3), 031014.
- [15] **Asiedu-Boateng, P., Akaho, E.H.K., Nyarko, B.J.B., Yamoah, S.** (2011). Modeling and simulation of cogeneration nuclear power plant for seawater desalination, *Nuclear Engineering and Design*, 242, 143-147.
- [16] **Dong, Z., Liu, M., Huang, X., Zhang, Y., Zhang, Z., Dong, Y.** (2019). Dynamical modeling and simulation analysis of a nuclear desalination plant based on the MED-TVC process, *Desalination*, 456, 121-135.
- [17] **Priego, E., Alonso, G., del Valle, E., Ramirez, R.** (2017). Alternatives of steam extraction for desalination purposes using SMART reactor, *Desalination*, 413, 199-216.
- [18] **Ragheb, M.** (2010). Single and dual purpose nuclear desalination, *1st International Nuclear and Renewable Energy Conference (INREC)*, Amman, Jordan, Mart 21-24.
- [19] **Asiedu-Boateng, P., Yamoah, S., Ameyaw, F., Dzide, S., Tuffour-Acheampong, K.J.** (2012). Performance analysis of thermal vapour compression desalination system coupled to cogeneration nuclear power plant, *Research Journal of Applied Sciences Engineering and Technology*, 4(8), 941-948.
- [20] **Adak, A.K., Tewari, P.K.** (2013). Technical feasibility study for coupling a desalination plant to an Advanced Heavy Water Reactor, *Desalination*, 337, 76-82.
- [21] **Al. Ansari, M.S.** (2012). Optimization of dual purpose plant for seawater desalination and electricity production, *World Journal of Engineering*, 9(6), 541-548.
- [22] **Nisan, S., Caruso, G., Humphries, J.R., Mini, G., Naviglio, A., Bielak, B., Alonso, O. A., Martins, N., Volpi, L.** (2002). Sea-water desalination with nuclear and other energy sources: the EURODESAL Project, *Nuclear Engineering and Design*, 221(1-3), 251-275.
- [23] **Caruso, G., Naviglio, A., Nisan, S., Asuar, A., Bielak, B., Cinotti, L., Humphries, J.R., Martins, N., Volpi, L.** (2002). Optimal Coupling of a Nuclear Reactor and a Thermal Desalination Plant, *International Conference on Advanced Power Plants*, Florida USA, Haziran 10-13.
- [24] **Slesarenko, V. V.** (2003). Thermodynamics of a desalination system at nuclear power stations, *International journal of nuclear desalination*, 1(1), 58-68.
- [25] **Park, M.Y., Kim, E.S.** (2014). Thermodynamic evaluation on the integrated system of VHTR and forward osmosis desalination process, *Desalination*, 337, 117-126.
- [26] **Raha, A., Rao, I. S., Srivastava, V. K., Tewari, P. K.** (2010). Safety analysis of hybrid nuclear desalination plant coupled to High Temperature Gas Cooled Reactor, *2nd International Conference on Reliability, Safety*

and Hazard-Risk-Based Technologies and Physics-of-Failure Methods (ICRESH), Mumbai: India.

- [27] **Dewita, E., Ariyanto, T., Susiati, H., Pancoko, M.** (2019). Conceptual Design of Indonesia Experimental Power Reactor Coupled with Desalination Unit, *SENTEN*.
- [28] **Nel, R.** (2011). Thermal fluid analysis of combined power and desalination concepts for a high temperature reactor, North-West University.
- [29] **Pan, Y., Dong, Z.** (2018). Dynamic Model of a Seawater Desalination Plant Based on the Nuclear Heating Reactor and MED-TVC, *26th International Conference on Nuclear Engineering*, London, Temmuz 22-26.
- [30] **Sunaryo, G.R.** (2007). Prospect on Desalination and Other Non-Electric Applications of Nuclear Energy In Indonesia, *Center for Reactor Technology and Nuclear Safety*, 33(1), 33-45.
- [31] **Nisan, S., Dardour, S., Dumont, Y., Reguigui, N.** (2004). Inter-regional collaborative nuclear desalination studies by France and Tunisia; the TUNDESAL Project, *International journal of nuclear desalination*, 1(3), 308-324.
- [32] **Nisan, S., Dardour, S.** (2006). Economic evaluation of nuclear desalination systems, *Desalination*, 205(1-3), 231-242.
- [33] **Elaskary, A.M.** (2013). System Simulation for Coupling Nuclear Power Plants and Desalination in Different Scenarios, *International Journal of Scientific Engineering Research*, 4, 1116.
- [34] **Nisan, S., Benzarti, N.** (2007). A comprehensive economic evaluation of integrated desalination systems using fossil fuelled and nuclear energies and including their environmental costs, *Desalination*, 229(1-3), 125-146.
- [35] **Nisan, S.** (2009). Utilisation of the exergy method for the cost evaluation of integrated nuclear desalination systems, *Desalination Water Treatment*, 8(1-3), 225-235.
- [36] **Khan, S. U. D.** (2017). Karachi Nuclear Power Plant (KANUPP): As case study for techno-economic assessment of nuclear power coupled with water desalination, *Energy*, 127, 372-380.
- [37] **Darwish, M. A., Eleshaky, M. E., Al-Najem, N. M., Alazmi, B. S. A.** (2008). Alternative primary energy for power desalting plants in Kuwait: the nuclear option II—The steam cycle and its combination with desalting units, *Desalination Water Treatment*, 1(1-3), 42-57.
- [38] **Belkaid, A., Amzert, S.A., Bouaichaoui, Y., Chibane, H.** (2012). Economic study of nuclear seawater desalination for mostaganem site, *Procedia engineering*, 33, 134-145.
- [39] **IAEA** (2005). Optimization of the Coupling of Nuclear Reactors and Desalination Systems (Technical Reports Series No. 1444). Vienna: International Atomic Energy Agency.

- [40] **IAEA** (2002). Status of Design Concepts of Nuclear Desalination Plants (Technical Reports Series No. 1326). Vienna: International Atomic Energy Agency.
- [41] **IAEA** (2007). Status of Nuclear Desalination in IAEA Member States (Technical Reports Series No. 1524). Vienna: International Atomic Energy Agency.
- [42] **IAEA** (2010). Environmental Impact Assessment of Nuclear Desalination (Technical Reports Series No. 1642). Vienna: International Atomic Energy Agency.
- [43] **IAEA** (2015). New Technologies for Seawater Desalination Using Nuclear Energy (Technical Reports Series No. 1753). Vienna: International Atomic Energy Agency.
- [44] **IAEA** (2012). Advances in Nuclear Power Process Heat Applications (Technical Reports Series No. 1682). Vienna: International Atomic Energy Agency.
- [45] **Kamennicky, R.** (2013). Seawater Desalination, BRNO University of Technology, Faculty of Mechanical Engineering Energy Institute.
- [46] **IDA Water Security Handbook, 2019 – 2020 and GWI DesalData.** (t.y.). Erişim: 13 Mayıs 2020, <https://idadesal.org>
- [47] **Aydın, F., Ardali, Y.** (2012). Seawater Desalination Technologies, *Sigma*, 30, 156-178.
- [48] **Ghalavand, Y., Hatamipour, M. S., Rahimi, A.** (2014). A review on energy consumption of desalination processes, *Desalination and Water Treatment*, 54(6), 1526-1541.
- [49] **Pellegrino, F.** (2013). Flexibility of nuclear power: SMRs, cogeneration and option to switch.
- [50] **Watson, I. C., Morin, O. J., Henthorne, L.** (2003). Desalting handbook for planners, *Desalination research and development program report*, 72.
- [51] **Ali, M. B., Kairouani, L.** (2016). Multi-objective optimization of operating parameters of a MSF-BR desalination plant using solver optimization tool of Matlab software, *Desalination*, 381, 71–83.
- [52] **Al-Karaghoul, A., Kazmerski, L. L.** (2013). Energy consumption and water production cost of conventional and renewable-energy-powered desalination processes, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 24, 343–356.
- [53] **Onishi, V. C., Carrero-Parreño, A., Reyes-Labarta, J. A., Ruiz-Femenia, R., Salcedo-Díaz, R., Fraga, E. S., Caballero, J. A.** (2017). Shale gas flowback water desalination: Single vs multiple-effect evaporation with vapor recompression cycle and thermal integration, *Desalination*, 404, 230–248.
- [54] **Junyou, Z.** (2011). Forward Osmosis Membrane Bioreactor for Water Reuse. (Yüksek Lisans Tezi). National University of Singapore, Department of Civil and Environmental Engineering, Singapore.

- [55] **He, T. X., Yan, L. J.** (2009). Application of alternative energy integration technology in seawater desalination, *Desalination*, 249(1), 104-108.
- [56] **Puretec Industrial Waters.** (t.y.). Erişim: 13 Ocak 2020, <https://puretecwater.com/reverse-osmosis/what-is-reverse-osmosis>.
- [57] **Boles, M. A. , Cengel, Y. A.** (2015). Thermodynamics: an engineering approach, 8th Edition McGraw-Hill: USA.
- [58] **Atlı, G.** (2018). *Kömür yakıtlı bir enerji santralinin enerji-finansal değerlendirmesi ve Zonguldak ili için bir uygulama* (Yüksek lisans tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, Enerji Enstitüsü, İstanbul.
- [59] **Kahraman, N. , Cengel, Y. A.** (2005). Exergy analysis of a MSF distillation plant, *Energy Conversion and Management*, 46(15-16), 2625-2636.
- [60] **IAEA.** (t.y.). Erişim: 18 Eylül 2021, <https://www.iaea.org/sites/default/files/18/07/de-top-manual.pdf>.



ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad : Erdem Akyürek

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2009, Dumlupınar Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği

TEZDEN TÜRETİLEN ESERLER, SUNUMLAR VE PATENTLER:

- Akyürek, E. ve Tanbay, T. (2021). Exergoenvironmental analysis of a nuclear cogeneration desalination plant, *II. International Science and Innovation Congress*, 25-27 Haziran 2021.