

**BİR NÜKLEER SANTRALİN SOĞUTMA SUYU
SICAKLIĞINA BAĞLI ENERJİ VE EKSERJİ ANALİZİ**

**ENERGY AND EXERGY ANALYSIS OF A NUCLEAR
POWER PLANT BASED ON THE TEMPERATURE OF
COOLING WATER**

HÜLYA ESEN

Doç. Dr. SELİS ÖNEL

Tez Danışmanı

Dr. RAUF TERZİ

Eş Danışman

Hacettepe Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliğinin

Kimya Mühendisliği Anabilim Dalı için Öngördüğü

YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak hazırlanmıştır.

ÖZET

BİR NÜKLEER SANTRALİN SOĞUTMA SUYUNA BAĞLI ENERJİ VE EKSERJİ ANALİZİ

Hülya ESEN

Yüksek Lisans, Kimya Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Selis ÖNEL

Eş Danışman: Dr. Rauf TERZİ

Haziran 2023, 101 sayfa

Dünyada ve ülkemizde teknoloji ve endüstrinin gelişmesiyle daha fazla enerji üretimi için verimli, temiz, çevreci ve sürdürülebilir sistemlere ilgi artmıştır. Nükleer güç santralleri (NGS), fosil yakıtı dayalı enerji santrallerine alternatif, düşük karbon ve yüksek enerji yoğunluğuna sahip nükleer yakıt kullanan ve kesintisiz elektrik üretebilen güvenli sistemlerdir. Isı kaynaklı tüm enerji sistemlerinde olduğu gibi nükleer santrallerde açığa çıkan ısı enerjisinin tamamı kullanılabilir iş enerjisine dönüştürülememektedir. Bu sistemlerde yapılacak enerji ve ekserji analizleri ile sistem ve çevrenin etkileşimlerini anlamak ve çevre koşullarını değiştirerek sistemden elde edilebilecek verimliliği arttırmak mümkündür. Termodinamiğin ikinci yasasına bağlı olan ekserji hem sistem hem de soğutma suyunun elde edildiği çevre (ölü durum) koşullarına bağlıdır. Dolayısı ile çevre sıcaklığı sistemin verimini etkilemektedir.

Bu çalışmada, enerji ihtiyaçlarına istinaden gelecekte ülkemizde Karadeniz bölgesinde kurulabilecek bir NGS için enerji ve ekserji analizleri, İran'da bulunan ve VVER (Voda-Vodyanoi Energetichesky Reactor) tipi basınçlı su reaktörü içeren Bushehr santralinin literatür verileri kullanılarak yapılmıştır. NGS'de kondansatöre giren soğutma suyu sıcaklığının sistemin ekserji verimliliğine etkisi Karadeniz'in aylara göre deniz suyu sıcaklığı değişimine bağlı olarak hesaplanmıştır. Bu hesaplamalar sonucunda deniz suyu sıcaklığı mart ayında görülen en düşük 9,1 °C'den ağustos ayında en yüksek 24,7 °C'ye arttıkça NGS'nin yüzdeline enerji veriminin %34,19'dan %33,58'e düştüğü bulunmuştur. Deniz suyu sıcaklığının artması türbinlerden üretilen toplam işin azalmasına sebep olmuştur. Bunun sonucunda yüzdeline ekserji verimi %34,68'den %34,08'e düşmüştür. Aynı ay için hesaplanan ekserji ve enerji verimi karşılaştırıldığında, ekserji verimi enerji veriminden yaklaşık olarak %0,5 daha fazla bulunmuştur. Sistemin en verimli çalıştığı ve deniz suyu sıcaklığının en düşük olduğu mart ayı için elde edilen en düşük ekserji yıkımı ve tersinmezlik yüzdesi sırasıyla 1938,80 MW ve %64,57 olarak tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Nükleer Güç Santrali, Enerji, Ekserji, Termodinamik, Soğutma Suyu

ABSTRACT

ENERGY AND EXERGY ANALYSIS OF A NUCLEAR POWER PLANT BASED ON THE TEMPERATURE OF COOLING WATER

Hülya ESEN

Master of Science, Department of Chemical Engineering

Supervisor: Doç. Dr. Selis ÖNEL

Co- Supervisor: Dr. Rauf TERZİ

June 2023, 101 pages

The need for energy that has been rising with the developments in technology and industry around the world and in our country has moved the attention towards more efficient, clean, environmentally friendly, and sustainable systems for energy production. Nuclear power plants (NPP), alternative to fossil fuel-based power plants, are reliable systems that use nuclear fuel with low carbon and high energy density and can produce uninterrupted electricity. Power plants that depend on a heat source, including nuclear power plants, cannot completely convert the heat energy into usable work energy. It is possible to understand the interactions between the system and the surroundings by conducting energy and exergy analyses on these systems, and to increase the efficiency of the system by changing the environmental conditions. Exergy, based on the second law of thermodynamics, depends on the conditions of both the system and the environment

(dead state) from which the cooling water is obtained. Therefore, the ambient temperature affects the efficiency of the system.

In this study, the energy and exergy analyses of a nuclear power plant (NPP) that may be constructed in the Black Sea region in our country due to energy needs were conducted based on the data available in the literature for the Bushehr power plant in Iran, which includes a VVER (Voda-Vodyanoi Energetichesky Reactor) type pressurized water reactor. The effect of the temperature of the cooling water entering the condenser in the NPP on the exergy efficiency of the system was calculated depending on the monthly change of the temperature of the seawater in Black Sea. As a result of these calculations, it was found that the percent energy efficiency of the NPP decreased from 34.19% to 33.58% as the temperature of seawater increased from the lowest 9.1 °C in March to the highest 24.7 °C in August. The increase in the temperature of seawater caused a decrease in the amount of total work produced from the turbines. As a result, the percent exergy efficiency decreased from 34.68% to 34.08%. Comparing the percent exergy and energy efficiencies calculated for the same month showed that the exergy efficiency was approximately 0.5% higher than the energy efficiency. The lowest exergy destruction and percent irreversibility obtained for the month of March, when the system works most efficiently and the temperature of seawater is the lowest, was determined as 1938.80 MW and 64.57%, respectively.

Keywords: Nuclear Power Plant, Energy, Exergy, Thermodynamic, Cooling Water

TEŞEKKÜR

Tez çalıőmam konusunda beni bilgileri ve tecrübeleri ile yönlendiren ve motive eden danışmanım Doç. Dr. Selis Önel Kayran ve eő danışmanım Dr. Rauf Terzi'ye en içten dileklerle teşekkür ederim.

En önemlisi beni her zaman destekleyen ve sevgilerini eksik etmeyen değerli aileme sonsuz teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

| | |
|---|-----|
| ÖZET..... | i |
| ABSTRACT | iii |
| TEŞEKKÜR | v |
| İÇİNDEKİLER..... | vi |
| ŞEKİLLER DİZİNİ..... | ix |
| ÇİZELGELER DİZİNİ | x |
| SİMGELER VE KISALTMALAR..... | xi |
| 1 GİRİŞ | 1 |
| 2 LİTERATÜR ARAŞTIRMASI..... | 3 |
| 2.1 Nükleer Enerji | 6 |
| 2.1.1 Fisyon Tepkimesi | 7 |
| 2.1.2 Füzyon Tepkimesi | 8 |
| 2.2 Nükleer Enerji Santrali | 9 |
| 2.2.1 Nükleer Santral Bileşenleri | 10 |
| 2.2.2 Nükleer Reaktörlerin Başlıca Özellikleri | 12 |
| 2.2.2.1 Nükleer Reaktörlerin Sınıflandırılması | 14 |
| 2.2.2.1.1 Basınçlı Su Reaktörü | 15 |
| 2.2.2.1.2 Kaynar Su Reaktörü | 16 |
| 2.2.2.1.3 Basınçlı Ağır Su Reaktörü..... | 17 |
| 2.2.2.1.4 Rus Tipi Basınçlı Su Reaktörü /Su-Su Enerji Reaktörü..... | 18 |
| 2.2.2.1.5 Gaz Soğutmalı Reaktör | 18 |
| 2.3 Termodinamik Analiz..... | 19 |

| | | |
|---------|---|----|
| 2.4 | Kütle ve Enerji Analizi | 19 |
| 2.4.1 | Yatışkın-Akışlı Sistemlerde Kütle Denkliği | 19 |
| 2.4.2 | Yatışkın-Akışlı Sistemlerde Enerji Denkliği | 20 |
| 2.5 | Ekserji Analizi | 21 |
| 2.5.1 | Isı Aktarım Ekserjisi | 22 |
| 2.5.2 | İş Aktarım Ekserjisi | 23 |
| 2.5.3 | Kütle Aktarım Ekserjisi | 23 |
| 2.5.4 | Ekserji Yıkımı..... | 24 |
| 2.5.5 | Yatışkın Akışlı Sistemlerde Ekserji Denkliği..... | 26 |
| 2.6 | Nükleer Güç Santralinin Termodinamik Analizleri..... | 27 |
| 2.6.1 | Bir Nükleer Santralin Enerji ve Ekserji Analizi | 30 |
| 2.6.1.1 | Nükleer Reaktörün Enerji ve Ekserji Analizi | 32 |
| 2.6.1.2 | Türbin ve Pompanın Enerji ve Ekserji Analizi..... | 35 |
| 2.6.1.3 | Buhar Üretici, Kızdırıcı, Buhar Ayırıcı, Kondansatör, Soğutucular ve Isı Değiştiricilerde Enerji ve Ekserji Analizleri | 36 |
| 3 | MATERYAL VE YÖNTEM..... | 37 |
| 3.1 | Nükleer Güç Santrali Bileşenlerinin Kütle, Enerji ve Ekserji Analizleri | 41 |
| 3.1.1 | Kütle Eşitlikleri..... | 41 |
| 3.1.2 | Enerji ve Ekserji Eşitlikleri..... | 43 |
| 3.1.3 | Nükleer Güç Santralinin Verimliliği ve Tersinmezliği..... | 57 |
| 4 | SONUÇLAR VE TARTIŞMA | 60 |
| 5 | YORUM | 65 |
| 6 | KAYNAKLAR | 67 |
| 7 | EKLER | 71 |
| 7.1 | EK-1: Nükleer Güç Santralinin $T_0=9,1\text{ }^\circ\text{C}$ (@ $282,25\text{ K}$; $h_0=38,24\text{ kJ/kg}$, $s_0=0,1376\text{ kJ/kgK}$) ve $P_{\text{con}}=4,28\text{ kPa}$ için Termodinamik Hesaplamaları..... | 71 |
| 7.1.1 | Kondansatör Bölümünün Termodinamik Analizleri | 71 |
| 7.1.1.1 | Kondansatörün (Con) Termodinamik Eşitlikleri | 71 |
| 7.1.2 | Birincil Çevrimin Termodinamik Analizleri | 73 |

| | | |
|----------|---|----|
| 7.1.2.1 | Nükleer Reaktörün Termodinamik Eşitlikleri..... | 73 |
| 7.1.2.2 | Buhar Üreticinin (SG) Termodinamik Eşitlikleri..... | 74 |
| 7.1.2.3 | Reaktör Soğutma Pompasının (P6) Termodinamik Eşitlikleri..... | 75 |
| 7.1.3 | Güç Üretim Bölümünün Termodinamik Analizleri | 77 |
| 7.1.3.1 | Yüksek Basınçlı Türbinlerin (HP-T) Termodinamik Eşitlikleri | 77 |
| 7.1.3.2 | Alçak Basınçlı Türbinlerin (LP-T) Termodinamik Eşitlikleri | 78 |
| 7.1.3.3 | Kızdırıcının (RH) Termodinamik Eşitlikleri..... | 79 |
| 7.1.3.4 | Buhar Ayırıcısının (MS) Termodinamik Eşitlikleri | 81 |
| 7.1.4 | Ön Isıtma Bölümünün Termodinamik Analizleri | 82 |
| 7.1.4.1 | Düşük Basınçlı Su Isıtıcısı-1 (LPH1) Termodinamik Eşitlikleri | 82 |
| 7.1.4.2 | Düşük Basınçlı Su Isıtıcısı-2 (LPH2) Termodinamik Eşitlikleri | 83 |
| 7.1.4.3 | Düşük Basınçlı Su Isıtıcısı-3 (LPH3) Termodinamik Eşitlikleri | 85 |
| 7.1.4.4 | Düşük Basınçlı Su Isıtıcısı-4 (LPH4) Termodinamik Eşitlikleri | 86 |
| 7.1.4.5 | Yüksek Basınçlı Su Isıtıcısı-5 (HPH5) Termodinamik Eşitlikleri..... | 87 |
| 7.1.4.6 | Soğutucu (Cool) Termodinamik Eşitlikleri..... | 89 |
| 7.1.4.7 | Kızdırıcı Soğutucu (RHC) Termodinamik Eşitlikleri | 90 |
| 7.1.4.8 | Dearatör (OFW) Termodinamik Eşitlikleri..... | 91 |
| 7.1.4.9 | Ana Yoğuşma Suyu Pompası-1 (P1) Termodinamik Eşitlikleri | 93 |
| 7.1.4.10 | Ana Yoğuşma Suyu Pompası-2 (P2) Termodinamik Eşitlikleri | 94 |
| 7.1.4.11 | Pompa-3 (P3) Termodinamik Eşitlikleri | 95 |
| 7.1.4.12 | Pompa-4 (P4) Termodinamik Eşitlikleri | 96 |
| 7.1.4.13 | Pompa-5 (P5) Termodinamik Eşitlikleri | 97 |
| 7.1.5 | Nükleer Güç Santralinin (NGS) Termodinamik Analizleri | 98 |

ŞEKİLLER DİZİNİ

| | |
|---|----|
| Şekil 2.1. Nötron emilimi sonucunda uyarılmış enerji diyagramı..... | 7 |
| Şekil 2.2. Filyon tepkimesi [22] | 8 |
| Şekil 2.3. Füzyon tepkimesi [24] | 9 |
| Şekil 2.4. Watts Bar nükleer enerji santrali [26]..... | 10 |
| Şekil 2.5. Bir nükleer santralin üretim akış şeması ve bileşenleri [27] | 11 |
| Şekil 2.6. Bir nükleer reaktörün yapısı [26]..... | 12 |
| Şekil 2.7. Yakıt demeti [26]..... | 13 |
| Şekil 2.8. PWR basınç kabı [28]..... | 14 |
| Şekil 2.9. Dünya üzerindeki nükleer reaktör tiplerinin dağılımı | 15 |
| Şekil 2.10. PWR akış şeması [26] | 16 |
| Şekil 2.11. BWR akış şeması [26] | 17 |
| Şekil 2.12. CANDU reaktörü akış şeması [26]..... | 18 |
| Şekil 2.13. VVER nükleer santralinin birincil soğutma çevrimi [18] | 27 |
| Şekil 3.1. Bushehr nükleer güç santralinin akış şeması [18] | 37 |
| Şekil 3.2. Karadeniz bölgesi aylık ortalama deniz suyu sıcaklığının yıllara göre dağılımı [37] | 40 |
| Şekil 3.3. Kondansatör basıncının Karadeniz deniz suyu sıcaklığına bağlı değişimi..... | 41 |
| Şekil 4.1. Deniz suyu akış hızının Karadeniz deniz suyu sıcaklığına bağlı değişimi..... | 60 |
| Şekil 4.2. Nükleer reaktörün Karadeniz deniz suyu sıcaklığına bağlı ekserji verimliliği | 61 |
| Şekil 4.3. NGS'nin Karadeniz deniz suyu sıcaklığına bağlı enerji ve ekserji verimi yüzdesi | 62 |
| Şekil 4.4. Nükleer güç santralinin Karadeniz deniz suyu sıcaklığına bağlı ekserji yıkımı ve tersinmezlik oranı | 63 |
| Şekil 4.5. NGS'nin alt birimlerinin mart ayındaki Karadeniz deniz suyu sıcaklığına bağlı ekserji yıkımları..... | 64 |

ÇİZELGELER DİZİNİ

| | |
|--|----|
| Çizelge 2.1. Reaktör tipine bağlı enerji dönüşümü | 3 |
| Çizelge 2.2. Literatürde incelenen NGS'lerin termodinamik verimlerinin karşılaştırması | 6 |
| Çizelge 2.3. Dünya üzerindeki nükleer reaktör tipleri [29]..... | 15 |
| Çizelge 2.4. VVER tipi nükleer reaktörün temel özellikleri [18] | 28 |
| Çizelge 3.1. Bushehr nükleer güç santraline ait termodinamik veriler | 38 |
| Çizelge 3.2. 2021 Karadeniz deniz suyu sıcaklığına bağlı varsayılan kondansatör çalışma basıncı değerleri | 41 |
| Çizelge 3.3. Nükleer güç santrali alt sistemlerinin kütle eşitlikleri | 42 |
| Çizelge 3.4. Birincil çevrimin enerji ve ekserji eşitlikleri..... | 46 |
| Çizelge 3.5. Güç üretim bölümü enerji ve ekserji eşitlikleri..... | 48 |
| Çizelge 3.6. Kondansatör bölümü enerji ve ekserji eşitlikleri | 50 |
| Çizelge 3.7. Ön ısıtma bölümünün enerji ve ekserji eşitlikleri | 51 |

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

| | |
|------------------|---------------------------------------|
| \dot{m} | Kütle akış hızı (kg/s) |
| E | Toplam enerji (kJ) |
| \dot{E}_{in} | Sisteme giren enerji akışı (kW) |
| \dot{E}_{out} | Sistemden çıkan enerji akışı (kW) |
| \dot{Q} | Isı aktarımı (kW) |
| \dot{W} | Mekanik iş (kW) |
| V | Akış hızı (m/s) |
| g | Yer çekimi ivmesi (m/s ²) |
| z | Yükseklik (m) |
| θ | Akış enerjisi (kJ/kg) |
| h | Entalpi (kJ/kg) |
| h_0 | Çevre (ölü durum) entalpisi (kJ/kg) |
| h_{in} | Sisteme giren entalpi (kJ/kg) |
| s | Entropi (kJ/kgK) |
| s_0 | Çevre (ölü durum) entropisi (kJ/kgK) |
| s_{in} | Sisteme giren entropi (kJ/kgK) |
| $\dot{E}x_Q$ | Isı aktarım ekserjisi (kW) |
| T_0 | Çevre (ölü durum) sıcaklığı (K) |
| T_i | Sistem sıcaklığı (K) |
| $\dot{E}x_W$ | İş ekserjisi (kW) |
| \dot{W}_{surr} | Çevrenin sisteme yaptığı iş (kW) |

| | |
|---------------------|---|
| P_0 | Atmosferik basınç |
| v | Hacim |
| $\dot{E}x_m$ | Kütle aktarım ekserjisi (kW) |
| Ψ | Akış ekserjisi (kJ/kg) |
| ΔE_{sistem} | Sistemin enerji değişimi (kJ) |
| S_{in} | Sisteme giren toplam entropi (kJ/kgK) |
| S_{out} | Sistemden çıkan toplam entropi (kJ/kgK) |
| ΔS_{sistem} | Sistemin entropi değişimi (kJ/kgK) |
| S_{gen} | Entropi üretimi (kJ/kgK) |
| Ex_D | Ekserji yıkımı (kJ) |
| $\dot{W}_{u,max}$ | Maksimum iş (kW) |
| $\dot{Q}_{u,max}$ | Maksimum ısı enerjisi (kW) |
| \dot{I} | Tersinmezlik (kW) |
| \dot{W}_{actual} | Gerçek iş (kW) |
| \dot{Q}_{actual} | Gerçek ısı enerjisi (kW) |
| \dot{W}_{shaft} | Şaft işi (kW) |
| c_v | Sabit hacim özgül ısı |
| u | İç enerji |
| u_0 | Çevre (ölü durum) iç enerjisi |
| $T_{yç}$ | Yakıt çubuğu sıcaklığı (K) |
| ζ | Ekserji verimi |

Kısaltmalar

| | |
|----------|---|
| LWR | Hafif Su Reaktörü (Light Water Reactors) |
| PWR | Basıncılı Su Reaktörü (Pressurized Water Reactor) |
| BWR | Kaynar Su Reaktörü (Boiling Water Reactor) |
| VVER | Su-su reaktörü (Voda-Vodyanoi Energetichesky Reactor) |
| PHWR | Basıncılı Ağır Su Reaktörü (Pressurized Heavy Water Reactor) |
| HTGR | Yüksek Sıcaklıklı Gaz Reaktörü (High-Temperature Gas Reactor) |
| SFBR | Sodyum-Soğutmalı Hızlı Reaktör (Sodium-Cooled Gas Reactor) |
| AGR | Geliştirilmiş Gaz Soğutmalı Reaktör (Advanced Gas-Cooled Reactor) |
| LMPBR | Sıvı-Metal Hızlı Reaktör (Liquid-Metal Fast Breeding Reactor) |
| WOA | Balina Optimizasyon Algoritmasını (Whale Optimization Algorithm) |
| akb | Atomik Kütle Birimi |
| MTEP | Milyon Ton Eşdeğer Petrol |
| RH | Kızdırıcı (Reheater) |
| MS | Buhar Ayırıcı (Moisture Separator) |
| R | Reaktör |
| SG | Buhar Üretici |
| Birincil | Birincil Çevrim |
| Cool | Soğutucu (Cooler) |
| Con | Kondansatör (Condensator) |
| T | Türbin |
| P | Pompa |
| LP-T | Alçak Basıncılı türbin |
| HP-T | Yüksek Basıncılı Türbin |
| LPH | Alçak Basıncılı Isı Değiştirici (Low Pressure Heat Exchanger) |
| HPH | Yüksek Basıncılı Isı Değiştirici (High Pressure Heat Exchanger) |

| | |
|-----|---------------------------------------|
| Soğ | Soğutucu su (reaktör içindeki) |
| Yak | Yakıt Çubuğu |
| Fis | Fisyon |
| OFW | Dearatör |
| RHC | Kızdırıcı soğutucu (Reheat Cooler) |
| PS | Ön Isıtma Bölümü (Preheating Section) |
| GÜ | Güç Üretim Bölümü |
| NGS | Nükleer Güç Santrali |
| Add | Sisteme aktarılan |
| Rej | Sistemden salınan |

1 GİRİŞ

Enerji üretiminin ülkemizde ve dünyada önemli bir kısmı fosil yakıtlardan elde edilmektedir. Geleneksel enerji üretim yöntemlerinin çevre kirliliği ve iklim değişikliğine neden olduğu birçok araştırmada gösterilmiştir ve fosil yakıt rezervleri sınırlı olup giderek azalmaktadır. Çevre kirliliği ve enerji güvenliği gibi nedenlerden dolayı daha temiz, çevreci ve sürdürülebilir enerjinin kullanımı gün geçtikçe artmaktadır. Temiz çevreci ve sürdürülebilir enerji kaynakları arasında rüzgar enerjisi, jeotermal enerji ve nükleer enerji gibi kaynaklar örnek gösterilebilir.

Enerji ihtiyacı nüfusa bağlı olarak yıldan yıla artış göstermektedir. 2019 yılında Türkiye 105 milyon ton eşdeğer petrol (MTEP) enerji ithalatı yapmıştır ve ithal edilen enerji 1970 yılından beri yıldan yıla artış göstermiştir. 2018 verilerine göre ithal edilen enerji cari açığın %159'una denk gelmektedir [1]. Bu veriler ülkemizdeki enerji ihtiyacının her geçen gün arttığını göstermektedir. Bu durum ülke ekonomisini etkilemektedir ve dışa bağımlılığı arttırmaktadır. Daha fazla enerji üretimi için temiz, çevreci ve sürdürülebilir enerji politikaları uygulanabilir. Nükleer enerji yenilenebilir bir enerji olmasa dahi sürdürülebilirliği diğer fosil yakıtlardan daha fazladır ve sera gazı üretiminin en düşük olduğu enerji kaynaklarından. Nükleer enerji üretiminde ana kaynak olarak kullanılan uranyum yer kabuğunda ve okyanuslarda bulunmaktadır. 2001 yılında yapılan araştırmalara göre bilinen ve daha keşfedilmemiş olan uranyum kaynaklarının toplam 16 milyon ton olduğu gösterilmiştir. Bu verilere ve tüketim hızına dayanarak bu miktardaki uranyumun 250 yıl boyunca yeterli olduğu ön görülmektedir [2]. Uranyum miktarının önemli olmasının yanında nükleer enerji üretimi için kurulan santrallerin verimliliği de önemlidir. Isıl güç santrallerinin verimi %55-62 iken nükleer güç santralının verimi %30-42 olarak verilmektedir [3]. Gelişen teknoloji ile enerji üretimi için kurulan tesislerin ve reaktörlerin verimliliğinin ileriki yıllarda artacağı öngörülmektedir. Nükleer güç santrallerinin avantajlarının yanında nükleer atık, fazla miktarlarda soğutma suyuna ihtiyaç duyulması, doğaya salınan suyun sıcaklığının sistemi sınırlaması ve muhtemel kazaların çok yıkıcı olması gibi bazı dezavantajları da bulunmaktadır [4].

Nükleer enerji ile elde edilen ısıнын verimli enerjiye dönüştürülmesi işleminde birçok sistem yer almaktadır. Bu sistemlerde yapılacak enerji ve ekserji analizleri ile sistemin enerji verimliliği belirlenecek ve kayıpların nükleer santralin hangi ekipmanlarında olduğu tespit edilerek iyileştirme önerileri geliştirilebilecektir.

Bir nükleer santralin enerji verimliliği hesaplamaları termodinamiğin birinci ve ikinci yasaları kullanılarak yapılır. Termodinamiğin birinci yasası, enerjinin yaratılamayacağını veya yok edilemeyeceğini, sadece form değiştirebileceğini söylemektedir. Termodinamiğin ikinci yasasına göre yapılan ekserji analizinde, tersinmez bir sistemde ekserji kayıplarının miktarı ve yerleri belirlenir. Ekserji analizi nicelikten çok enerjinin niteliğiyle ilgilidir ve enerji santrallerini oluşturan bileşenlerin verimliliklerinin kapsamlı bir şekilde değerlendirilmesini sağlar. Nükleer santralde açığa çıkan ısı enerjisinin tamamı kullanılabilir iş enerjisine dönüştürülemez. Bu dönüştürülemeyen enerjiyi tanımlayabilmek ve sistemin verimlilik analizleri için ekserji analizinin yapılması gerekir.

Nükleer reaktörlerin sınıflandırılması soğutucu olarak kullanılan malzemeye dayanmaktadır. Günümüzde kullanılan %85 civarındaki reaktörler suyu soğutucu olarak kullanmaktadır. Bu reaktörlere hafif su reaktörleri (Light Water Reactors, LWR) adı verilir. Hafif su reaktörleri, basınçlı su reaktörleri (Pressurized Water Reactor, PWR) ve kaynar su reaktörleri (Boiling Water Reactor, BWR) olarak ikiye ayrılır. Su-su reaktörü (Voda-Vodyanoi Energetichesky Reactor, VVER) Rusların geliştirdiği bir PWR reaktördür. Geri kalan %15'lik kısımdaki reaktörler soğutucu olarak gaz veya ağır su (Pressurized Heavy Water, PHWR, CANDU) kullanmaktadır [5].

Bu tez kapsamında nükleer enerji santralini oluşturan sistemlerin enerji ve ekserji analizleri yapılarak, sistemi oluşturan parçaların enerji kayıpları ve verimlilikleri hesaplanmıştır. İran'da bulunan Bushehr Nükleer Enerji Santralinin literatür verileri referans alınarak nükleer güç santralinin enerji ve ekserji analizi için oluşturulan matematiksel eşitlikler Karadeniz deniz suyu sıcaklığının aylık değişimi çevre sıcaklığı olarak alınıp çözülmüştür.

2 LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Nükleer santraller, nükleer reaktör içinde gerçekleşen fisyon ve füzyon tepkimeleri sonucunda açığa çıkan ısı enerjisini elektrik enerjisine dönüştürmek için inşa edilen yapılardır. Bu durumda enerjinin form değiştirmesi ile yararlı iş olarak kullanılabilen kısmı elektrik üretiminde kullanılır. Termodinamiğin birinci yasasına göre enerji dönüşümündeki tersinmezliği hesaba katmak mümkün değildir. Bir nükleer enerji santralının ve sistemlerinin ne kadar verimlilikle çalıştığını analiz edebilmek için termodinamiğin ikinci yasasında yer alan ekserji analizlerinin yapılması gerekir. Ekserji analizleri ile nükleer santralin hangi biriminde ne kadar enerji kaybı olduğu saptanabilir ve verim arttırmak için çalışmalar yapılabilir.

Çizelge 2.1’de literatürde BWR, PWR [6] ve PHWR [7] ile yapılan çalışmalarda reaktör tiplerinin verimliliklerinin %29,3 ile %33,7 aralığında değiştiği belirtilmektedir. Ticari olarak kullanılan bu reaktör tipleri dışındaki sodyum-soğutmalı hızlı reaktörler (Sodium-Cooled Gas Reactor, SFBR), yüksek sıcaklıklı gaz reaktörleri (High-Temperature Gas Reactor, HTGR) ve geliştirilmiş gaz soğutmalı reaktörler (Advanced Gas-Cooled Reactor, AGR) bulunmaktadır. Bu reaktörler üzerine yapılan çalışmalarda görüldüğü üzere HTGR [8], SFBR [9] ve AGR [10] verimlilikleri sırası ile %38, %40,8-%44,5 ve %40 olarak verilmektedir [11].

Çizelge 2.1. Reaktör tipine bağlı enerji dönüşümü

| | BWR [6] | PWR [6] | PHWR [7] | |
|-------------------------------|---------|---------|----------|---------------|
| | | | CANDU-6 | CANDU-6 (EC6) |
| Isıl Güç, MW _t | 3323 | 3411 | 2180 | 2064 |
| Elektrik Güç, MW _e | 1062 | 1148 | 638 | 668 |
| Verimlilik (%) | 32,0 | 33,7 | 29,3 | 32,4 |

Literatürde nükleer güç santrallerinin enerji ve ekserji analizlerine yönelik olarak birçok çalışma bulunmaktadır. Poljancic ve Mrzljak [12], nükleer güç santralının bütün bileşenleri için enerji ve ekserji analizlerini yaparak, alt sistemleri incelemiştir. Ekserji

analizlerinde çevre koşullarını 25 °C ve 1 bar almışlardır. Yapılan çalışmada reaktörden üretilen ısı enerjisi 3335,73 MW'tır. Nükleer güç santralinde hesaplanan toplam türbin gücü 874,27 MW'tır. Yüksek basınçlı türbinlerin toplam enerji ve ekserji verimleri sırasıyla %71,10 ve %84,45 hesaplanmıştır. Düşük basınçlı türbinlerin enerji ve ekserji verimleri sırasıyla %71,9 ve %61,8 hesaplanmıştır. Pompaların en yüksek ve en düşük ekserji verimleri %40 ve %85 hesaplanmıştır. Isı değiştiricilerin enerji verimi hesaplamaları %84-%97 aralığında değişirken, ekserji verimi hesaplamaları %60-%90 aralığında değişmiştir. Santralin enerji kaybı 2461,46 MW ve ekserji kaybı 2261,32 MW olarak bulunmuştur. Santralin enerji ve ekserji verimliliği %26,2 ve %27,9 olarak hesaplanmıştır.

Talebi ve Norouzi [13] 1000 MW elektrik ve 3490 MW'lık ısı enerjisi kapasitesi ile çalışan VVER tipi nükleer santralin ekserji ve enerji analizlerini yapmışlardır. Ekserji analizi hesaplamaları yaparken çevre sıcaklığı 30 °C olarak alınmıştır. En fazla ekserji kaybının 1814,54 MW ile reaktörde gerçekleştiğini hesaplamışlardır. Reaktörün ekserji verimi %49,44 hesaplanmıştır. Santralin en fazla ekserji yıkımı %55 ile birincil çevrim, daha sonra %29 ile güç üretim birimi ve %16 ile ön ısıtma birimi sistemlerini içeren ikincil çevrim olarak hesaplanmıştır. Ekserji verimliliğini %28,99'dan Firefly iterasyon algoritması ile %29,3'e arttırabilmişlerdir. Bu algoritma ile birincil çevrimdeki bileşenler yani reaktör, buhar üretici ve reaktöre su besleme pompasına giren ve çıkan hatlardaki basınç ve sıcaklık değerleri iterasyon ile değiştirilerek verimliliğin artırılması amaçlanmıştır.

Khan ve arkadaşları [14], [15] 1200 MW elektrik ve 3212 MW'lık ısı enerjisi kapasitesi olan VVER tipi reaktöre sahip nükleer güç santralinin termodinamik analizleri üzerine çalışmalar yapmışlardır. Tropikal bölgede bulunan sistemin verimlilik analizlerinde çevre sıcaklığı 28 °C ve 34 °C aralığında değişim göstermiştir. Çalışmalarında çevre sıcaklığı değişimi ile kondansatör çalışma basıncı 4 kPa ile 15 kPa aralığında değişmiştir. Maksimum kondansatör basıncı düşük basınçlı türbinin güvenli çalışmasından emin olmak için 20 kPa altında tutulmuştur. Hesaplamalar sonucunda kondansatör basıncı 4 kPa'dan 15 kPa'a arttıkça nükleer santralin verimi %37,44'ten %33,65'e azalmıştır. Türbinlerden üretilen güç yaklaşık olarak 1270 MW'tan 1140 MW'a azalmıştır.

Attia [16] yaptığı çalışmada kondansatör soğutma suyunun nükleer güç santrali verimine olan etkisini incelemiştir. Bu çalışmada kondansatör basıncının sıcaklık arttıkça arttığı, buhar üreticiden çıkan hattın termodinamik özelliklerinin değişmediği, reaktörden ürettiği ısı enerjisinin soğutma suyunun mevsimsel değişiminin yavaş olmasından kaynaklı yavaş bir şekilde değişim gösterdiği, kondansatöre giren ve çıkan kütlelerin sabit olduğu ve sistemdeki kinetik enerji ve potansiyel enerjilerin yok sayıldığı varsayımları yapılmıştır. Soğutma suyu 15 °C'den 30 °C'ye artarken, kondansatör basıncı 4 kPa'dan 9 kPa'a artmıştır. Kondansatörden geçen soğutma suyunun sıcaklığının 1 °C azalması ile nükleer güç santralinden üretilen net iş %0,44 ve verim %0,15 düşüş göstermiştir.

Ebrahimgol ve arkadaşlarının [17] yaptığı çalışmada, Talebi ve Norouzi'nin [13] çalışmasında olduğu gibi aynı tip nükleer santralin analizleri yapılmıştır. Bu analizlerdeki referans çevre sıcaklığı 28 °C'dir. Santralin ekserji verimliliği %33,66 olarak hesaplamışlardır. Ebrahimgol ve arkadaşları Balina Optimizasyon Algoritmasını (Whale Optimization Algorithm, WOA) kullanarak santralin ekserji verimliliğini %36,42'ye arttırmışlardır.

Naserbegi ve arkadaşları [18] yaptıkları çalışmada 1000 MW elektrik ve 3000 MW'lık ısı enerjisi kapasitesi olan Bushehr nükleer santralinde en fazla ekserji yıkımının %50,34 ekserji yıkımı oranı ve 1511,34 MW ile reaktörde ve daha sonra da %4,88 ekserji yıkımı oranı ve 146,65 MW ile buhar üreticinde gerçekleştiğini analiz etmişlerdir. Yapılan çalışmada referans çevre sıcaklığı 28 °C ve basıncı 1 bar'dır. Santralin ekserji verimi %33,74 olarak bulunmuştur.

Marques ve arkadaşları [19] 1300 MW'lık çıkış gücüne sahip Brezilya'da konumlanmış olan Angra 2 PWR nükleer santralinin enerji ve ekserji analizleri sonucunda santralin enerji ve ekserji verimlilik değerlerini sırası ile %36,18 ve %49,24 olarak hesaplamışlardır. Bu çalışmada referans çevre sıcaklığı 25 °C'dir. Yapılan diğer çalışmalarda olduğu gibi bu çalışmada da reaktör, santralin en az verimle çalışan bileşeni olarak hesaplanmıştır.

Terzi ve arkadaşlarının [20] çalışmasında 1000 MW elektrik ve 3900 MW'lık ısı enerjisi kapasitesine sahip bir VVER nükleer santralini oluşturan bileşenlerin ve santralin

verimlilik hesaplamaları üzerine çalışılmıştır. Referans alınan çevrenin sıcaklığı 22 °C ve basıncı 1 bar'dır. Hesaplamalar sonucunda santralin verimliliği %30, reaktör ve buhar üreticinin ekserji yıkımları ise sırası ile %49 ve %13 olarak hesaplanmıştır.

Çizelge 2.2. Literatürde incelenen NGS'lerin termodinamik verimlerinin karşılaştırması

| T ₀ (°C) | Isıl Enerji (MW) | Net İş (MW) | Toplam Giren Ekserji (MW) | Toplam Çıkan Ekserji (MW) | Ekserji Verimi (%) | Ekserji Verimi Eşitliği (ζ_{ex}) | |
|------------------------|---------------------|-----------------------|------------------------------|------------------------------|-----------------------|--|------|
| 25 | 3335,7 | 874,2 | - | - | 27,9 | $\frac{\text{Toplam Net Güç}}{\text{Reak. Term. Enerji} \times 0,94^*}$ *ısı transferi için ekserji faktörü: 0,94 | [12] |
| 30 | 3490 | 1025 | - | - | 29,4 | $\frac{\text{Toplam Net Güç}}{\text{Reaktör Termal Enerji}}$ | [13] |
| 28 - 34 | 3212 | 1202,4 - 1080,8 | - | - | 37,4 - 33,7 | $\frac{\text{Toplam Net elektrik güç}}{\text{Reaktör Termal Enerji}}$ | [14] |
| 28 | 3012 | 1013 | - | - | 33,7 | $\frac{\text{Toplam Net güç}}{\text{Reaktör Termal Enerji}}$ | [17] |
| 28 | 3002 | 1013 | - | - | 33,7 | $\frac{\text{Toplam Net güç}}{\text{Reaktör Termal Enerji}}$ | [18] |
| 25 | 3771 | 1317 | 2770 | 1364 | 49,2 | $\frac{\text{Ekserji out}}{\text{Ekserji in}}$ | [19] |
| 22 | 3904 | 1214 | - | - | 30,3 | $\frac{\text{Toplam Net güç}}{\text{Reaktör Termal Enerji}}$ | [20] |

2.1 Nükleer Enerji

Nükleer enerji, nükleer reaktör içinde gerçekleşen fisyon tepkimesi ile üretilen bir enerji türüdür. Fisyon tepkimesinin gerçekleşmesi için uranyum gibi radyoaktif elementler kullanılır. Bu elementin atomu fisyon tepkimesi sonucu atom numarası daha küçük olan parçalara bölünür. Bunun sonucunda büyük bir ısı enerjisi açığa çıkar. Fisyon tepkimesi sonucunda ortaya çıkan nötronlar tekrar kullanılarak zincirleme tepkimeler sonucunda reaktör içinde gerçekleşen tepkimelerin sürekliliği sağlanır. Fisyon ve füzyon tepkimeleri nükleer enerji üretmek için kullanılır [21].

2.1.1 Filyon Tepkimesi

Çoğu izotopun nötron emilimi sonucunda nükleer uyarılma enerjisi gama ışını olarak açığa çıkar. Fakat uranyum ve plütonyum gibi ağır elementler uyarıldığında bu elementlerin çekirdekleri ikiye ayrılır. Bu tepkimeye filyon adı verilir.

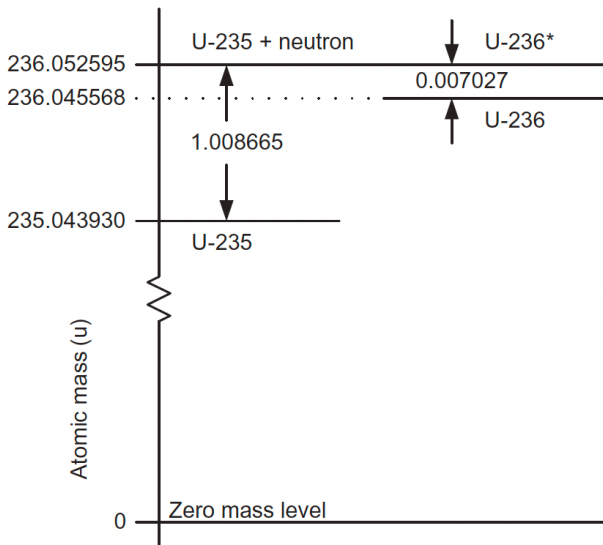
Şekil 2.2 'de U-235'in filyon tepkimesi gösterilmektedir. (A) ile gösterilen birinci aşamada nötron U-235 çekirdeğine yaklaşır. Bu yaklaşma sonucunda U-235 çekirdeği uyarılarak U-236 çekirdeğine dönüşür. Nötronun çekirdek tarafından emilimi sonucunda çekirdeğin iç enerjisi artar çünkü etkileşimde bulunan parçaların kütleleri toplamı U-236 çekirdeğinden fazladır. Birinci aşamada gerçekleşen tepkime (2.1)'de gösterildiği gibidir.



(U-236)* çekirdeğinin atomik kütle birimi (2.2) eşitliğinde hesaplanmıştır.

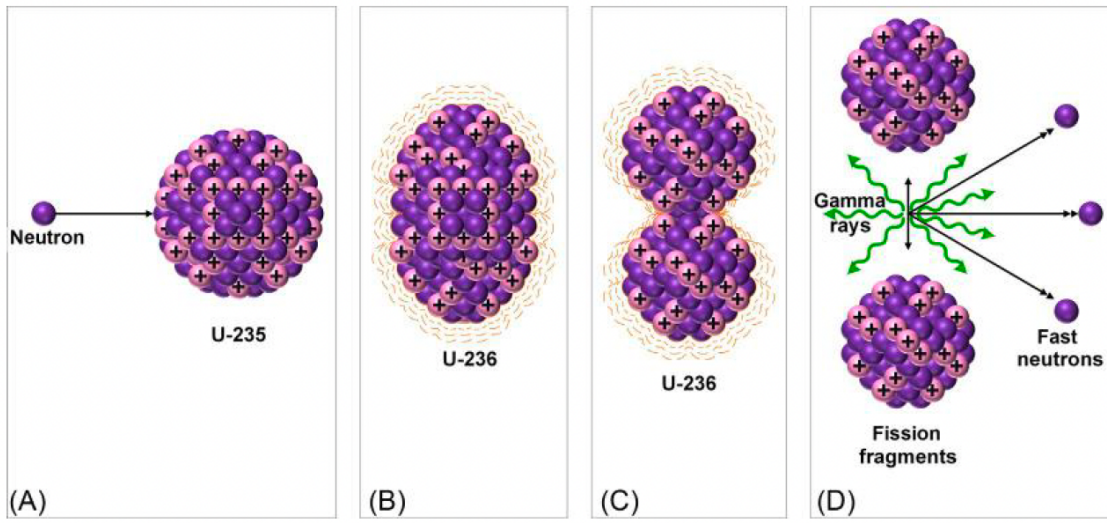
$$M_{U-236^*} = M_{U-235} + m_n = 235,04393 + 1,008665 = 236,052595 \text{ akb} \quad (2.2)$$

U-236 çekirdeğinin temel enerji düzeyindeki kütlesi 236,045568 akb'dir. Bu iki kütle arasındaki 6,55 MeV'luk (0,007027 akb) enerji farkı filyon tepkimesinin gerçekleşmesine neden olur. Bu enerji bağıntısı Şekil 2.1'de gösterilmektedir.



Şekil 2.1. Nötron emilimi sonucunda uyarılmış enerji diyagramı

Uyarılan enerji, (C) bölümünde gösterildiği gibi çekirdeğin yapısını bozarak dambıl şeklini almasına sebep olur. Bazı durumlarda oluşan fazla enerji gama ışınları olarak salınır. Elektrostatik itmenin nükleer çekim üzerindeki baskınlığı sonucunda çekirdek (D) bölümünde görüldüğü gibi ikiye ayrılır. Bu ayrılma sırasında 200 MeV'luk bir enerji açığa çıkar. 6,55 MeV'luk bir enerji farkının bu kadar yüksek bir enerji açığa çıkarabilmesinin temel sebebi, fisyon parçalarının elektrostatik kuvvet sayesinde yüksek miktarda kinetik enerjiye sahip olmalarıdır. Tepkime nükleer bir reaktör içinde gerçekleştiğinde açığa çıkan ısı enerji geri kazanılabilir [22].



Şekil 2.2. Fisyon tepkimesi [22]

2.1.2 Füzyon Tepkimesi

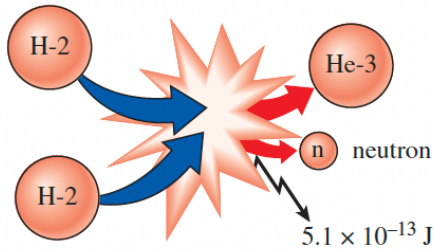
İki çekirdeğin bir araya gelerek birleşmesi füzyon tepkimesidir ve sonucunda enerji açığa çıkar. Bunun sebebi birleşmiş olan çekirdeklerin ortaya çıkardığı ürünün daha düşük bir kütleyle sahip olmasıdır. Bunun gibi bir tepkimenin gerçekleşebilmesi için fisyon parçalarının yüklü parçacıklar ile bombardımana tutulması veya gaz sıcaklığının nükleer tepkimeyi gerçekleştirebilecek bir seviyeye kadar artırılması gerekir. Füzyon tepkimesine örnek olarak hidrojen çekirdekleri ile iki nötronun birleşimi sonucunda oluşan helyum çekirdeğinin tepkimesi (2.3)'te gösterilmektedir (Şekil 2.3).



(2.3)'te gösterilen füzyon tepkimesinin kütle enerji denkliği (2.4) numaralı eşitlikle hesaplanmıştır.

$$\begin{aligned}\Delta m &= \sum M_{girenler} - M_{çıkanlar} = 2M_{H-1} + 2m_n - M_{He-4} \\ &= 2(1,007825) + 2(1,008665) - 4,002603 = 0,030377 \text{ akb}\end{aligned}\quad (2.4)$$

0,030377 akb 28,3 MeV'luk enerjiye denk gelmektedir [23].

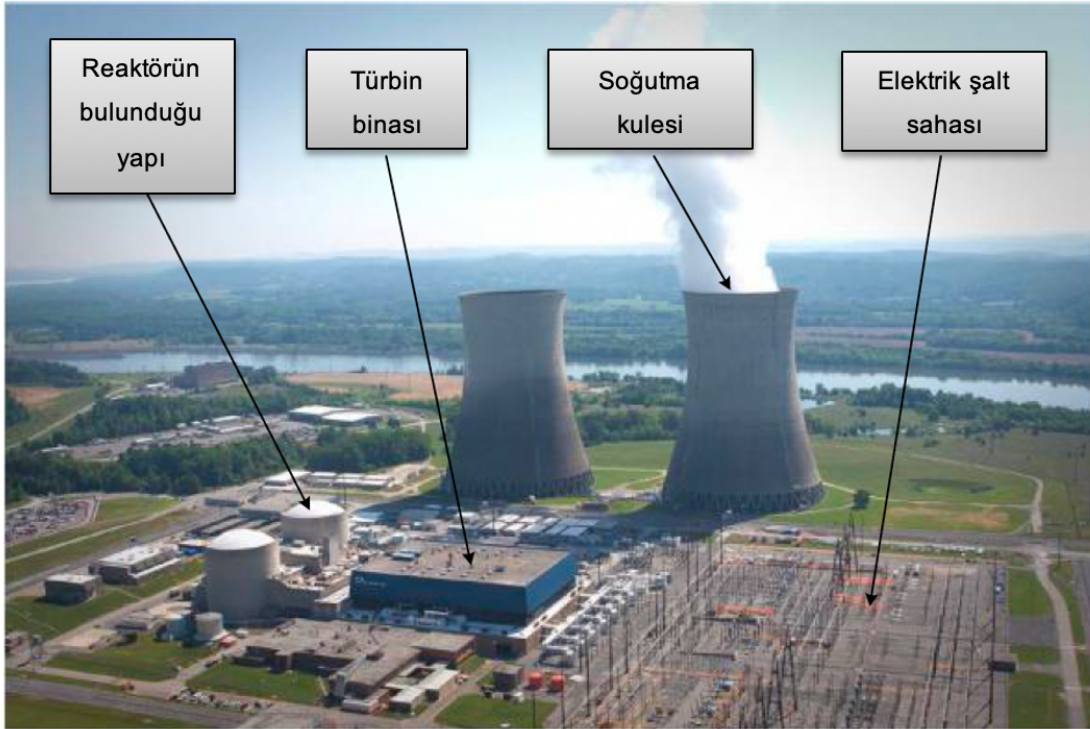


Şekil 2.3. Füzyon tepkimesi [24]

2.2 Nükleer Enerji Santrali

Nükleer santral radyoaktif bir maddeyi enerji kaynağı olarak kullanır. Bu radyoaktif maddenin nükleer tepkimeleri sonucunda ortaya çıkan ısı, nükleer santral içinde elektrik enerjisine dönüştürülür. Uranyum izotopu olan U-235, fisyon tepkimesi ile ısı açığa çıkarır. Reaktör içindeki yakıt çubukları ısınır ve bu ısıyı etrafında bulunan soğutucu ve yavaşlatıcı adı verilen suya aktarır. Isınan su reaktör içinden çıkarak buhar üreticine gider ve ısınıp buhar üreticindeki suya aktararak buhar oluşumunu sağlar. Buhar üreticiden çıkan soğutucu su reaktöre tekrar geri döner. Bu işlem sürekli tekrarlayan bir döngü halinde devam eder. Buhar üreticiden çıkan buhar, türbinlere gönderilerek ısı enerjisi mekanik enerjiye çevrilir. Türbinden çıkan buhar kondansatör (yoğunlaştırıcı) yardımı ile sıvı faza dönüştürülür. Kondansatörden çıkan su tekrar kullanılmak için buhar üreticine gönderilir [25]. Kondansatöre giren çürük su buharının sıvıya dönüştürülmesinde deniz veya nehir suyu gibi kaynaklar soğutma suyu olarak kullanılır. Şekil 2.4'te örnek olarak gösterilen Watts Bar nükleer santrali de görüldüğü üzere bir nehir kenarına kurulmuştur.

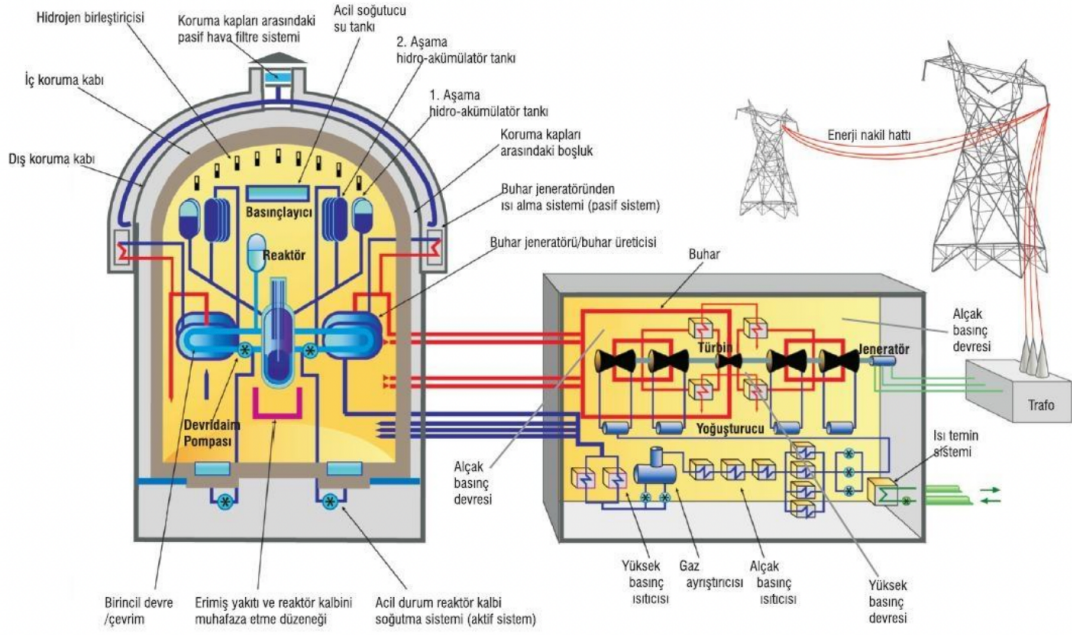
Nükleer santralin konumlandığı noktadaki soğutma suyu kaynağının sıcaklığı verimlilik açısından önemlidir.



Şekil 2.4. Watts Bar nükleer enerji santrali [26]

2.2.1 Nükleer Santral Bileşenleri

Nükleer reaktörde gerçekleşen nükleer tepkime sonrasında ısı enerjisi açığa çıkar. Açığa çıkan ısıyı elektrik enerjisine dönüştürebilmek için buhar üretimi yapılır. Üretilen buhar türbinler vasıtasıyla mekanik enerjiye dönüştürülür ve bu mekanik enerji jeneratörler yardımı ile elektrik enerjisine dönüştürülür. Şekil 2.5'te bir nükleer santralin basit bir şekilde üretim akış şeması gösterilmiştir.



Şekil 2.5. Bir nükleer santralin üretim akış şeması ve bileşenleri [27]

Nükleer santralin temel bileşenleri nükleer reaktör, soğutucu ve yavaşlatıcı, buhar üretici, türbin ve kondansatördür (yoğunlaştırıcı) [21].

1. Reaktör:

Nükleer tepkime (filyon ya da füzyon) sonucu açığa çıkan ısıdan (nükleer enerji) buhar üreten tepkime kabına nükleer reaktör, bu reaktörlerden elde edilen buharla türbinleri çevirip elektrik üreten tesislere nükleer güç santrali denir. Yakıt ve kontrol çubukları reaktör kabının içinde bulunur.

2. Soğutucu ve Yavaşlatıcı:

Reaktör içinde bulunan yakıt ve kontrol çubuklarının etrafından soğutucu ve yavaşlatıcı görevi gören soğutucu su dolanmaktadır. Bu su sayesinde filyon tepkimesi sonucunda açığa çıkan yüksek ısı reaktörden uzaklaştırılır ve buhar üretiminde kullanılır.

3. Buhar Üretici:

Reaktörü soğutmak ve tepkimeyi kontrol altında tutmak için kullanılan soğutma suyu, reaktörden aldığı ısyı buhar üreticiden geçerken buhar üretici içindeki suya aktarır ve bu suyun buhara dönüşmesini sağlar.

4. Türbin:

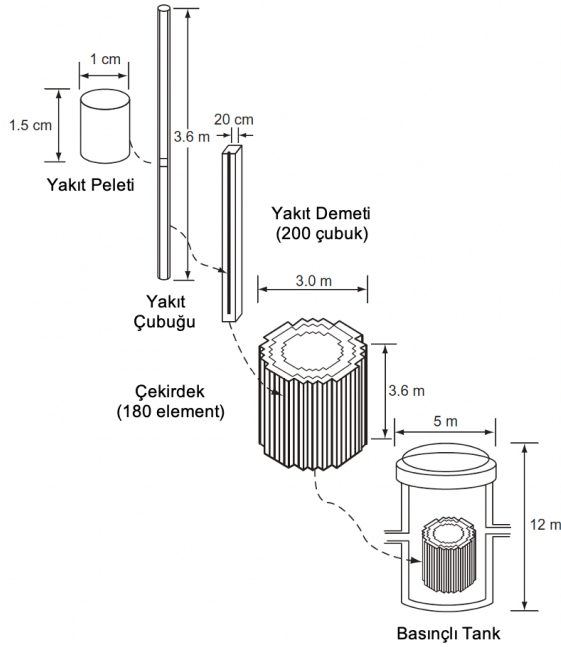
Üretilen buharın ısı enerjisi, diğer termik santrallerde olduğu gibi, bir buhar türbininden geçirilerek mekanik enerjiye dönüştürülür ve elektrik üretiminde kullanılır.

5. Kondansatör (yoğunlaştırıcı):

Türbinden çıkan enerjisi azalmış (çürük) buhar kondansatöre gelir ve soğutma su kaynağı vasıtasıyla soğutularak tekrar suya dönüştürülür ve buhar üreticine besleme suyu olarak geri gönderilir.

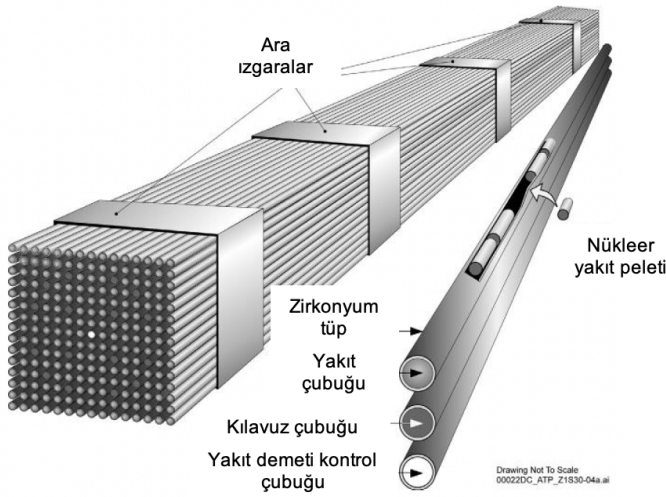
2.2.2 Nükleer Reaktörlerin Başlıca Özellikleri

Nükleer reaktörler büyük miktarlarda ısı enerjisi açığa çıkaran yapılardır bu nedenle yapıları diğer reaktörlerden farklılık gösterebilir. Şekil 2.6'da gösterilen bir nükleer reaktörün yapısında temel olarak yakıt peletleri, yakıt çubukları, yakıt demetleri, yakıt demetlerinin birleşimi ile çekirdek ve çekirdeğin içinde bulunduğu basınçlı reaktör tankı bulunur.

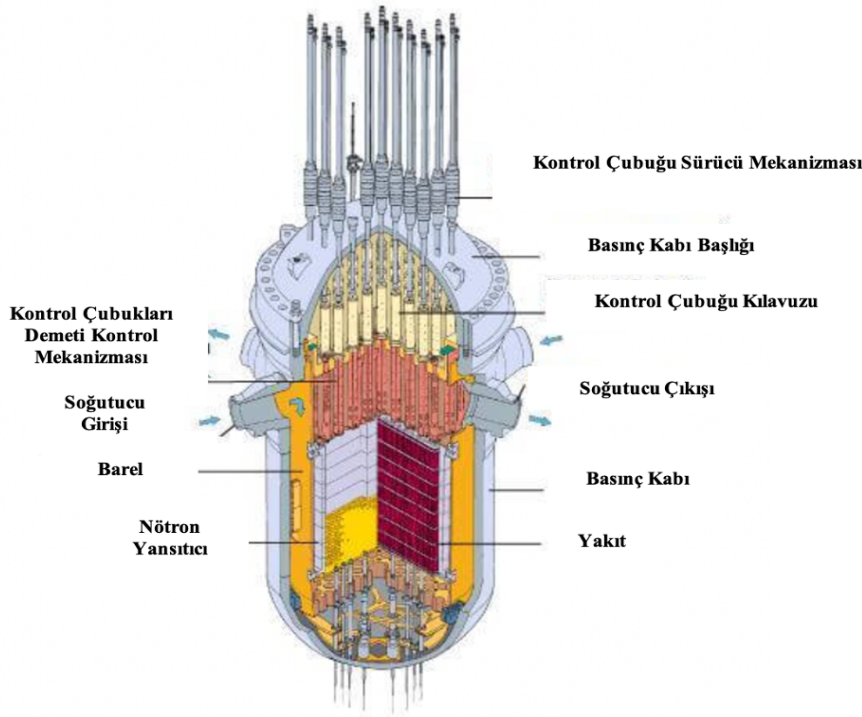


Şekil 2.6. Bir nükleer reaktörün yapısı [26]

PWR'nin içinde zenginleştirilmiş uranyum dioksit (%35 U-235) yakıtı silindir şeklinde bulunur. Yakıt, zirkonyum alaşım tüpleri içine yerleştirildikten sonra tüpün içi basınçlandırılmış helyum ile doldurulur ve kapatılır. Bu tüplere yakıt çubukları adı verilir. Filyon tepkimesi sonucunda oluşan ürünler yakıt çubukları içinde kalır ve bu sayede soğutucu ile temas etmeleri önlenir. Şekil 2.7'de gösterildiği gibi yaklaşık olarak 200 adet yakıt çubuğunun bir araya gelmesi ile yakıt demeti oluşur ve 180 yakıt demetinin bir araya gelmesi de reaktör çekirdeğini oluşturur. Çekirdek, Şekil 2.8'de gösterildiği gibi 5 m çapında, 12 m yüksekliğinde ve 30 cm kalınlığındaki duvarlara sahip çelik bir basınç tankı içinde bulunan destekleyicilere yerleştirilir [26].



Şekil 2.7. Yakıt demeti [26]



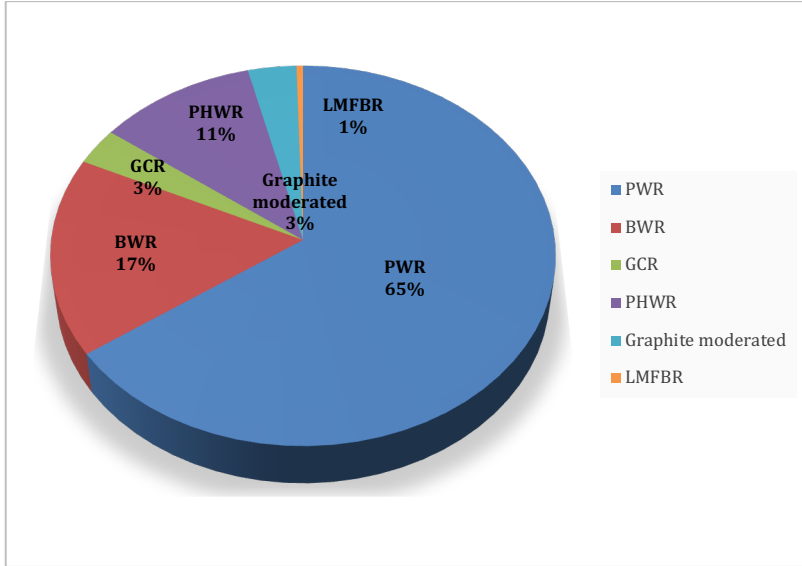
Şekil 2.8. PWR basınç kabı [28]

Nötron emilim miktarını değiştirme yeteneğine sahip olan kontrol çubukları bor karbür veya kadmiyum, gümüş ve indiyum alaşımından oluşur. PWR’de kontrol çubukları sürücü mekanizması manyetik olan boş kılavuz tüplerin içine yerleştirilmiştir. Manyetik akımın kesilmesi durumunda çubuklar yerçekiminin etkisi ile çekirdeğe geri girer. Basınçlı tank, yavaşlatıcı, soğutucu ve reflektör olarak görev alan hafif su ile dolar. Bu sayede fisyon tepkimesi sonucunda açığa çıkan ısı uzaklaştırılır ve nötron kaçıışı da önlenmiş olur. Hafif su içinde borik asit bulundurulur. Su içinde bulunan bor atomları nötronları absorbe eder ve nötron çoğalmasını engeller [26].

2.2.2.1 Nükleer Reaktörlerin Sınıflandırılması

Nükleer reaktörler kullanılan soğutucu tipine göre hafif sulu (PWR, BWR) ağır sulu (PHWR) ve gaz soğutuculu (GCR) reaktörler olarak gruplandırılır. Bunlara ek olarak dünya üzerinde kullanılan diğer reaktör tipleri grafit yavaşlatıcılı (Grafit moderated) ve sıvı metal hızlı üretken (LMPBR) reaktörlerdir [25]. Çizelge 2.3’te gösterilen American Nuclear Society 2018 verilerine dayanarak dünya üzerinde hali hazırda çalışan nükleer

reaktör sayısı toplamda 446 adettir ve bu reaktörler toplamda 392640 MWe enerji üretir. Gelecekte 97 reaktör daha kurulacağı ve üretilen elektrik enerjisinin toplamda 10931 MWe daha artacağı raporlanmıştır. En fazla kullanılan reaktör tipi 291 adet ile PWR'dir. Şekil 2.9'da dünya üzerindeki nükleer reaktör tiplerinin dağılımı gösterilmektedir.



Şekil 2.9. Dünya üzerindeki nükleer reaktör tiplerinin dağılımı

Çizelge 2.3. Dünya üzerindeki nükleer reaktör tipleri [29]

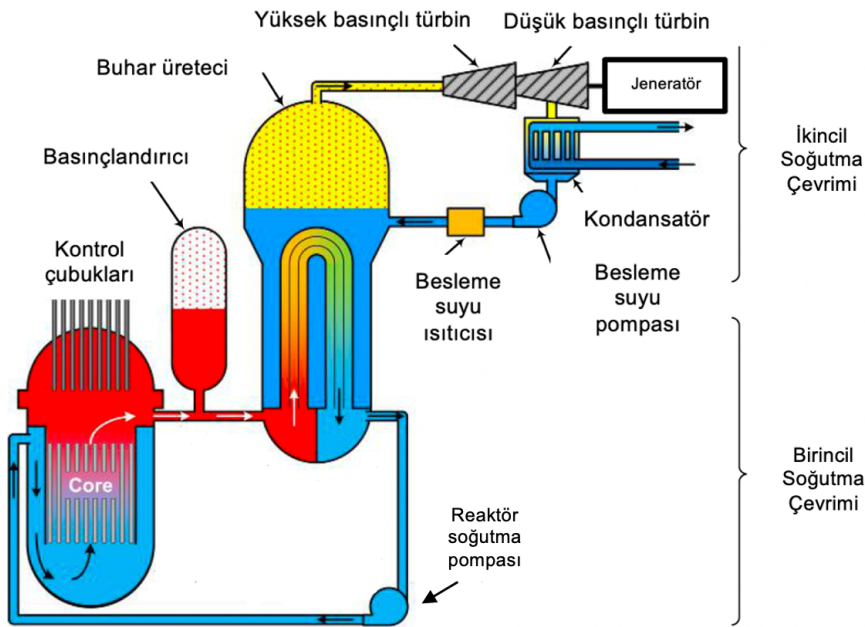
| Reaktör Tipleri | Kullanımda Olan | | Gelecekte İnşa Edilecek olan | |
|----------------------|-----------------|---------------|------------------------------|--------------|
| | Adet | Net MWe | Adet | Net MWe |
| PWR | 291 | 274975 | 79 | 86951 |
| BWR | 75 | 73816 | 6 | 7950 |
| GCR | 14 | 7685 | 1 | 200 |
| PHWR | 49 | 24596 | 8 | 5240 |
| Grafit Yavaşlatıcılı | 15 | 10219 | 0 | 0 |
| LMFBR | 2 | 1349 | 3 | 590 |
| Toplam | 446 | 392640 | 97 | 10931 |

2.2.2.1.1 Basınçlı Su Reaktörü

Basınçlı su reaktörü (Pressurized Water Reactor, PWR) en yaygın olarak kullanılan nükleer reaktör tipidir. Bu reaktörlerde soğutma suyu olarak kullanılan suyun buharlaşmasını önlemek amacı ile suyun basıncı yaklaşık olarak 15-16,5 MPa 'da tutulur.

Bu sayede suyun kaynama noktası arttırılmış olur. Bu işlem basınçlandırıcı adı verilen bir sistem yardımı ile gerçekleşmektedir [5].

Şekil 2.10’da PWR akış şeması gösterilmiştir. Nükleer tepkimeler sonucu açığa çıkan ısı reaktör içindeki basınçlandırılmış soğutucuyu ısıtır. Isınan soğutucu buhar üreticine gider ve burada ısınıp buhar üretici içindeki suya aktardıktan sonra reaktör soğutma pompası yardımı ile tekrar reaktöre geri döner. Bu çevrime birincil çevrim denir. Buhar üretici içinde ısınan su buhar üretimini sağlar. Üretilen buhar türbinlerden geçerek mekanik işe dönüştürülür. Bu mekanik iş jeneratör aracılığı ile elektrik enerjisine çevrilir. Buhar üretici içinde kullanılan su kondansatör yardımı ile nehir veya deniz gibi doğal kaynaklardan elde edilir. Bu kısma da ikincil çevrim adı verilir.

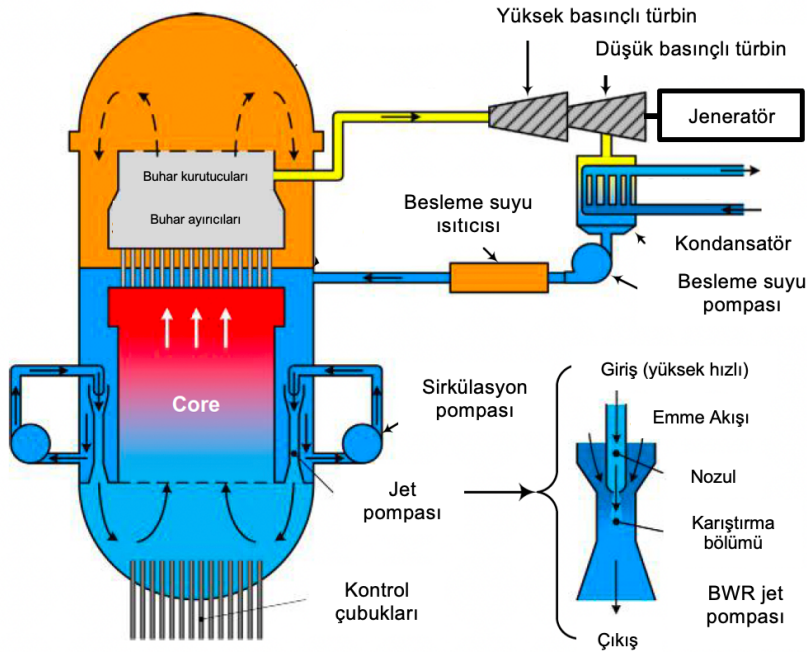


Şekil 2.10. PWR akış şeması [26]

2.2.2.1.2 Kaynar Su Reaktörü

Kaynar su reaktörü (Boiling Water Reactor, BWR) içindeki su, daha düşük basınçta tutularak suyun buharlaşması sağlanır. Bu tipte bir reaktör kullanıldığı zaman nükleer santralde buhar üreticine ihtiyaç duyulmamaktadır [5]. Şekil 2.11’de gösterildiği gibi su

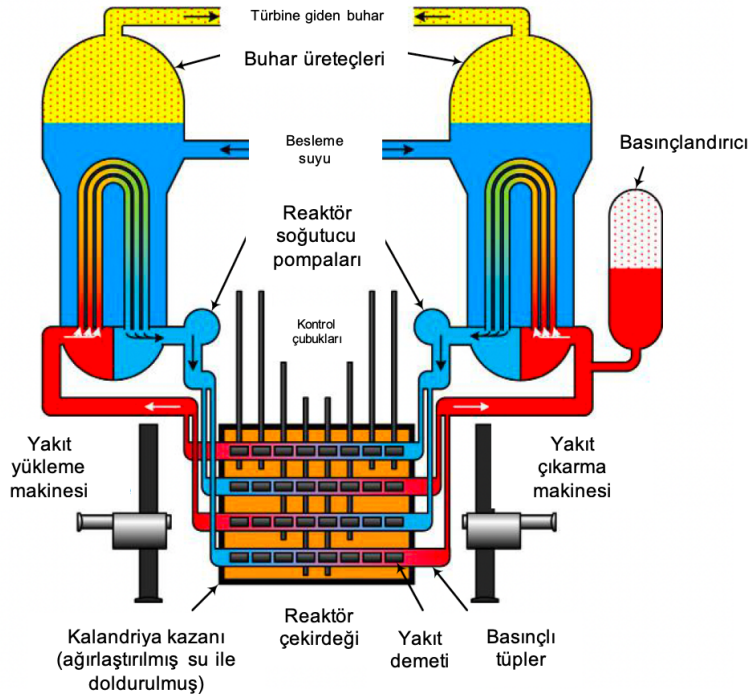
doğrudan reaktörden buhar halinde çıkarak nem ayırıcı sistemden geçer ve türbine girer. Burada ısı, mekanik enerjiye çevrilir.



Şekil 2.11. BWR akış şeması [26]

2.2.2.1.3 Basınçlı Ağır Su Reaktörü

Basınçlı ağır su reaktörü (Pressurized Heavy Water Reactor, PHWR), bir diğer adı ile CANDU reaktörü (Şekil 2.12), hidrojenin döteryum izotopunu içeren ağır suyu soğutucu ve yavaşlatıcı olarak kullanmaktadır. CANDU reaktörü içindeki su aynı PWR'de olduğu gibi basınçlandırılmış (10 MPa) sudur. Bu nedenle buharlaşmaz. Bu yapı, içinde yatay yakıt kanallarını ve soğutucu ve yavaşlatıcı ağır suyu barındırır. CANDU reaktörünü PWR ve BWR'den ayıran bir diğer özellik ise yakıt değişiminin sistem açıkken gerçekleştirilebilmesidir [5].



Şekil 2.12. CANDU reaktörü akış şeması [26]

2.2.2.1.4 Rus Tipi Basıncılı Su Reaktörü /Su-Su Enerji Reaktörü

Su-su enerji reaktörü (Voda-Vodyanoi Energetichesky Reactor, VVER) Rus yapımı bir PWR'dir. PWR ve VVER arasındaki temel fark, VVER'lerdeki buhar üreticilerinin yatay, PWR'lerdeki buhar üreticilerinin dikey olmasıdır. Bunun yanında VVER yakıt çubukları kare değil altıgen şeklindedir.

VVER içinde bulunan reaktör basınç kabı içindeki yakıt çubukları sayesinde ısı açığa çıkar ve bu ısı soğutucu su (VVER-440 için 12,3 MPa, VVER-1000 için 15,7 MPa, VVER-1200 için 16,2 MPa) ile uzaklaştırılır. Isınan su buhar üreticiden geçirilerek buhar üretilir. Üretilen buhar türbinlerden geçirilerek ısı mekanik enerjiye çevrilir [5].

2.2.2.1.5 Gaz Soğutmalı Reaktör

Gaz soğutmalı reaktör (Gas Cooling Reactor, GCR) içinde yavaşlatıcı olarak grafit bulunmaktadır. Bu tip reaktörlerde soğutucu olarak karbon dioksit, helyum ya da hava gibi gazlar kullanılır. Buradaki avantaj gazın suya göre daha yüksek sıcaklıklara ısıtılabilmesidir. Bu da reaktörün veriminin artmasını sağlamaktadır [5].

2.3 Termodinamik Analiz

Termodinamik analizlerde birinci aşama sistemin tanımlanmasıdır. Sistemin tanımlanması sonucunda sistem ile sistemin bulunduğu çevre birbirinden ayrılmış olur ve bu sayede analizler doğru bir şekilde yapılabilir [30]. Termodinamik, enerjinin mutlak değeri ile ilgili bilgi vermez, sadece toplam enerji değişimi ile ilgilenir. Termodinamik analizlerde enerjinin farklı formlarını içeren toplam enerji iki gruba ayrılır. Bunlar makroskopik ve mikroskopik enerjilerdir. Makroskopik biçimdeki enerjiler potansiyel enerji ve kinetik enerji gibi dış bir referansa bağlı olan enerji biçimleridir. Örneğin bir aracın kinetik enerjisi ve potansiyel enerjisi aracın hızına ve bulunduğu konumun başlangıç noktasından ne kadar yüksekte olduğuna bağlıdır. Mikroskopik biçimdeki enerjiler bir diğer adı ile iç enerji, sistemin moleküler yapısı ve moleküler aktivitesi ile ilgilidir ve dış bir referansa bağlı değildir. Mikroskopik enerji moleküllerin kinetik enerjisi, faz değişim enerjisi, kimyasal enerji veya nükleer enerji olabilir [24].

2.4 Kütle ve Enerji Analizi

Enerjinin ve kütlenin korunumu ilkesi doğanın en temel ilkelerinden biridir. Bu yasa temel olarak sistemin enerjisinin çevre ile etkileşimi sonucunda form değiştirebileceğini; ama sonuç olarak toplam enerjinin aynı kalacağını ifade eder. Termodinamiğin birinci yasası basitçe enerjinin korunumu ilkesi olarak ifade edilebilir. Enerji ısı, mekanik, elektrik, kimyasal ve nükleer gibi formlarda bulunabilir. Enerjinin aktarım şekli iş ya da ısı şeklinde olabileceği gibi kontrol hacimlerinde kütle akışı şeklinde de gerçekleşebilir [24].

2.4.1 Yatışkın-Akışlı Sistemlerde Kütle Denkliği

Yatışkın akışlı sistemlerde bir akışkan malzeme sürekli ve yatışkın bir şekilde kontrol hacminden geçer ve kontrol hacminin toplam kütlesi zamana bağlı değişkenlik göstermez. Bu durumda giren kütle her zaman çıkan kütleyle eşittir. Bu sistemlerde birim zaman başına akan kütle miktarı ile hesaplamalar gerçekleştirilir. Buna akış hızı denir ve \dot{m} ile gösterilir.

Eşitlik (2.5)'da kütle değişiminin sisteme giren ve çıkan toplam kütle hızına \dot{m} bağlı olduğu görülmektedir.

$$\frac{dM}{dt} = \sum_{in} \dot{m} - \sum_{out} \dot{m} \quad (2.5)$$

Eşitlik (2.5), yataşkın koşullarda sıfıra eşit olmaktadır, $dM/dt = 0$. Bu durumda aşağıdaki eşitlik elde edilmektedir:

$$\sum_{in} \dot{m} = \sum_{out} \dot{m} \quad (2.6)$$

Eşitlik (2.6)'de sisteme giren kütle sistemden çıkan kütleyle eşit olduğu ifade edilmektedir.

2.4.2 Yataşkın-Akışlı Sistemlerde Enerji Denkliği

Birçok mühendislik sistemi yataşkın koşullarda çalışır. Buna nükleer enerji santrali de dahildir. Bu sistemlerde akışkan bulunduğu bölüme göre kontrol hacmi içinde form değiştirebilir fakat bütün süreç boyunca her zaman sabit kalır. Sistemin hacmi, kütlesi ve toplam enerjisi korunur. Sonuç olarak sisteme giren toplam kütle ve toplam enerji çıkan toplam kütle ve toplam enerjiye daima eşittir [24].

$$\frac{dE}{dt} = \dot{E}_{in} - \dot{E}_{out} \quad (2.7)$$

Parametreler üzerindeki nokta parametrenin birim zamanda, yani saniye bazında değerini göstermektedir. Eşitlik (2.7)'de dE/dt enerjinin zamana bağlı değişimini ifade etmektedir. \dot{E}_{in} sürekli akışlı sistemlerde sisteme giren enerji akışını ve \dot{E}_{out} ise sistemden çıkan enerji akışını ifade eder.

Eşitlik (2.7), açık bir sistemde giren ve çıkan akışların taşıdığı enerji θ 'yı gösterecek şekilde şöyle yazılabilir:

$$\frac{dE}{dt} = \dot{Q} + \dot{W} + \sum_{in} \dot{m}\theta - \sum_{out} \dot{m}\theta \quad (2.8)$$

Burada akışların taşıdığı enerji θ , akışın taşıdığı entalpi h , kinetik enerji ke ve potansiyel enerji pe 'yi içermektedir:

$$\theta = h + ke + pe = h + \frac{1}{2}V^2 + gz \quad (2.9)$$

Eşitlik (2.8) ve (2.9) birleştirildiğinde aşağıdaki genel denklem elde edilmektedir:

$$\frac{dE}{dt} = \dot{Q} + \dot{W} + \sum_{in} \dot{m}(h + \frac{1}{2}V^2 + gz) - \sum_{out} \dot{m}(h + \frac{1}{2}V^2 + gz) \quad (2.10)$$

Sistemin enerji analizinde eşitlik (2.10)'daki genel denklem kullanılır. Burada E toplam enerjiyi (kJ), \dot{Q} ısı aktarımını (kW), \dot{W} mekanik işi (kW), \dot{m} kütle akış hızını (kg/s), h entalpiyi (kJ/kg), V ortalama akış hızını (m/s) ve g yerçekimi ivmesini (m/s^2) ifade eder.

Yatışkın halde, $dE/dt = 0$ olduğundan dolayı eşitlik (2.10) aşağıda gösterildiği gibi eşitlik (2.11)'deki haline dönüşür:

$$\dot{Q} + \dot{W} = \sum_{out} \dot{m}(h + \frac{1}{2}V^2 + gz) - \sum_{in} \dot{m}(h + \frac{1}{2}V^2 + gz) \quad (2.11)$$

Eşitlik (2.11)'de sisteme yapılan ısı aktarımı \dot{Q} ve işin \dot{W} toplamının, çıkan ve giren akışların toplam kütle akış hızı, entalpisi, kinetik enerjisi ve potansiyel enerjisi ile bağıntısı gösterilmektedir.

2.5 Ekserji Analizi

Termodinamiğin ikinci yasası enerjinin niceliği olduğu kadar niteliğinin de olduğunu ve termodinamik süreçlerin belli bir yönde gerçekleştiğini ifade etmektedir. Bir örnekleme yapacak olursak sıcak bir bardağı oda içinde bıraktığınızda bardak ısınıyor yani enerjisini odaya aktararak soğumaya başlayacaktır. Eğer odanın sıcaklığı herhangi bir ısı kaynağı ile değiştirilmezse bardak oda ile aynı sıcaklığa gelene kadar soğumaya devam edecektir. Bu işlemi tersine çevirmek durağan koşullarda mümkün değildir. Bu olaya tersinmezlik denir ve doğada bulunan bütün süreçler tersinmezdir. Bir sistemden çevre koşullarında,

yani ölü durumdayken, herhangi bir iş üretilemez. Sistem başlangıç konumundan ölü duruma geçerken tersinir süreçlerden geçtiği için sistemin maksimum işi yaptığı sonucuna varılır. Bu sistemin yararlı iş potansiyelini gösterir ve ekserji olarak tanımlanır [24]. Ekserji sistemin özelliklerine ve çevrenin özelliklerine (ölü durum) bağlıdır. Çevre koşulları değiştikçe ekserji de değişir. Ekserji analizlerinde sadece sistem koşulları değil, çevre koşulları da dikkate alınmalıdır. Ekserji, bir sistemin başlangıç konumundan ölü duruma yani çevre şartlarına geçerken gerçekleştirdiği tersinir olaylar ile ürettiği maksimum yararlı iş olarak ifade edilir. Bu tanım ile anlaşılıyor ki ekserji analizleri ile sistem ve çevrenin etkileşimlerini anlamak ve analiz etmek, sonrasında çevre koşullarını değiştirerek sistemden elde edilebilecek verimliliği arttırmak mümkündür.

2.5.1 Isı Aktarım Ekserjisi

Isı enerjisinin tamamı iş enerjisine dönüştürülemez. Sadece bir kısmı iş enerjisine dönüştürülebilir ve bu durum termodinamiğin ikinci yasasına dayanarak ifade edilir. Isı makineleri ile ısı enerjisi çevre sıcaklığından yüksek olan bir sistemden iş elde edilebilir. Arta kalan ısı çevreye geri salınır. Bu sistemden çıkan yararlı işi hesaplayabilmek için aşağıdaki şekilde ekserji analizi yapılır:

$$\sum_{i=1}^n (\dot{E}x_Q)_i = \sum_{i=1}^n \dot{Q}_i \left(1 - \frac{T_0}{T_i}\right) \quad (2.12)$$

Eşitlik (2.12)'de $\dot{E}x_Q$ ısı aktarım ekserjisini (kW), T_0 ölü durumdaki çevre sıcaklığını (K), \dot{Q}_i ısı aktarımını (kW) ve T_i sistemin sıcaklığını (K) ifade etmektedir. Isı aktarım ekserjisi eşitlik (2.12)'de ifade edildiği gibi sistem ve çevre sıcaklık farkının sistem sıcaklığına oranının ısı aktarım değeri ile çarpımına eşittir.

Eşitlik (2.12), ekserji aktarımının ısı aktarımı ile sistem sıcaklığının çevre sıcaklığından küçük veya büyük olması durumundaki bağıntıyı ifade eder. Eğer sistem sıcaklığı çevre sıcaklığından büyük ise, $T_i > T_0$ ekserji ve enerji akışı sistemden çevreye doğru gerçekleşir. Bu durumun tam tersi, $T_i < T_0$, olursa ekserji ve enerji aktarımı çevreden sisteme doğru gerçekleşir [31].

2.5.2 İş Aktarım Ekserjisi

Ekserji, $\dot{E}x_W$ şeklinde yararlı iş potansiyeli olarak da tanımlanabilir:

$$\dot{E}x_W = \begin{cases} \dot{W} - \dot{W}_{surr} & (\text{mekanik iş}) \\ \dot{W} & (\text{şaft ve elektrik işi gibi}) \end{cases} \quad (2.13)$$

Eşitlik (2.13)'te iş ekserjisi gösterilmiştir. Şaft işi ve elektrik işi gibi diğer iş formları için iş ekserjisi $\dot{E}x_W$, sistemin yaptığı işe \dot{W} 'ye eşittir [24].

Piston-silindir sistemleri gibi sistem hacminin değiştiği durumlarda iş ekserjisi aşağıdaki şekilde hesaplanır:

$$\dot{E}x_W = \dot{W} - \dot{W}_{surr} = \dot{W}_{1,2} - P_0(v_2 - v_1) \quad (2.14)$$

Eşitlik (2.14)'te P_0 atmosferik basıncı, $(v_2 - v_1)$ sistemin 1. durumdan 2. duruma geçerken ki hacim değişimini, $\dot{W}_{1,2}$ sistemin 1. durumdan 2. duruma geçerken yaptığı işi ve \dot{W}_{surr} çevrenin sisteme yaptığı işi ifade eder.

2.5.3 Kütle Aktarım Ekserjisi

Sistemin enerjisi, entropisi ve ekserjisi kütle ile orantılıdır. Kütle akışı, ekserji, entropi ve enerjinin sisteme taşınmasını veya uzaklaştırılmasını sağlar. Aşağıda gösterildiği gibi kütle aktarım ekserjisi entropi, entalpi, çevre sıcaklığı, kinetik enerji ve potansiyel enerji ile ilişkilidir [24].

$$\dot{E}x_m = \dot{m}\Psi = \dot{m}(h - h_0 - T_0(s - s_0) + \frac{V^2}{2} + gz) \quad (2.15)$$

Eşitlik ((2.15)'te $\dot{E}x_m$ kütle aktarım ekserjisini (kW), Ψ akış ekserjisini, \dot{m} kütle akış hızını (kg/s), h entalpiyi (kJ/kg), h_0 ölü durumdaki entalpiyi (kJ/kg), T_0 çevre sıcaklığını (K), s entropiyi (kJ/kgK), s_0 ölü durumdaki entalpiyi (kJ/kgK), V hızı (m/s), g yerçekimi ivmesini (m/s^2) ve z yüksekliği (m) ifade eder.

2.5.4 Ekserji Yıkımı

Sürtünme, karıştırma, kimyasal tepkimeler, sonlu bir sıcaklık farkı yoluyla ısı aktarımı, sınırsız genişleme gibi tersinmezlikler her zaman entropi üretir. Bunun gibi entropi üreten durumlar olduğu sürece sistemde ekserji yıkımı da vardır [24].

Isı, iş veya kütle aktarımı olmayan izole bir sistemde ekserji değişimine şu adımlarla ulaşılabilir:

1. İzole bir sistem için enerji denkleğinde sisteme giren enerji $E_{in} = 0$ ve çıkan enerji $E_{out} = 0$ olacaktır. Dolayısıyla:

$$E_{in} - E_{out} = \Delta E_{sistem} \quad (2.16)$$

Eşitlik (2.16)'da ΔE_{sistem} sistemin 1. durumdan 2. duruma geçerken gerçekleşen enerji değişimini ifade eder ve $E_2 - E_1$ 'e eşittir.

$$0 = E_2 - E_1 \quad (2.17)$$

E_2 sistemin 2. durumdaki enerjisini ve E_1 sistemin 1. durumdaki enerjisini ifade eder. İzole sistemlerde eşitlik (2.17)'deki gibi sistemin 1. durumdan 2. duruma geçerken enerji değişiminin olmadığı görülür.

2. İzole bir sistem için entropi denkleğinde sisteme giren entropi $S_{in} = 0$ ve çıkan entropi $S_{out} = 0$ olacaktır. Bu durumda:

$$S_{in} - S_{out} + S_{gen} = \Delta S_{sistem} \quad (2.18)$$

Eşitlik (2.18)'de ΔS_{sistem} sistemin 1. durumdan 2. duruma geçerken gerçekleşen entropi değişimini ifade eder ve $S_2 - S_1$ şeklinde tanımlanır. Giren ve çıkan entropiler sıfır olarak eşitlikte yerlerine koyulduğunda ve ΔS_{sistem} yerine $S_2 - S_1$ yazıldığında aşağıdaki eşitlik elde edilir:

$$S_{gen} - (S_2 - S_1) = 0 \quad (2.19)$$

$$S_{gen} = S_2 - S_1 \quad (2.20)$$

Eşitlik (2.20)'de sistemin 1. durumdan 2. duruma geçerken oluşan entropi değişiminin $(S_2 - S_1)$ entropi üretimine S_{gen} eşit olduğu görülür.

Eşitlik (2.17)'den çevre sıcaklığı T_0 ile çarpılmış eşitlik (2.20) çıkarıldığında:

$$-T_0 S_{gen} = E_2 - E_1 - T_0(S_2 - S_1) \quad (2.21)$$

elde edilir.

3. Hacmi değişmeyen sistemlerde ekserji denkliği aşağıdaki gibidir:

$$Ex_2 - Ex_1 = E_2 - E_1 - T_0(S_2 - S_1) \quad (2.22)$$

Eşitlik (2.22) sistemin 1. durumdan 2. duruma geçerken oluşan ekserji farkının $(Ex_2 - Ex_1)$, enerji değişiminden çevre sıcaklığı ile çarpılmış entropi değişiminin çıkarılmasına eşit olduğunu ifade eder.

Eşitlik (2.21) ile eşitlik (2.22) birleştirildiğinde aşağıdaki eşitlik elde edilir:

$$-T_0 S_{gen} = Ex_2 - Ex_1 \leq 0 \quad (2.23)$$

Eşitlik (2.23) çevre sıcaklığında gerçekleşen entropi değişiminin S_{gen} , ekserji yıkımına $(Ex_2 - Ex_1)$ kadar ekserji yıkımına eşit olduğunu göstermektedir.

Eşitlikteki T_0 çevre sıcaklığını ifade eder ve pozitif bir değerdir. Bu nedenle $T_0 S_{gen} \geq 0$ 'dır. Bu sonuç bize izole bir sistemin birinci durumdan ikinci duruma geçerken ekserji farkının sıfırdan küçük olduğunu ifade eder ($Ex_2 - Ex_1 \leq 0$). Bu durum izole bir sistemin ekserjisinin süreç boyunca her zaman azalacağını ya da tersinir süreçlerde sabit kalacağını söyler [24]. Gerçekte ekserji hiçbir zaman artmaz. Ekserjinin azalması durumu ekserji yıkımı olarak tanımlanır. Ekserji yıkımı eşitlik (2.24)'te görüldüğü gibi entropi üretimi, S_{gen} ile bağıntılıdır.

$$Ex_D = T_0 S_{gen} \geq 0 \quad (2.24)$$

Ekserji yıkımı, Ex_D gerçekte her zaman sıfırdan büyükken, tersinir olaylarda sıfıra eşittir.

2.5.5 Yatışkın Akışlı Sistemlerde Ekserji Denkliği

Yatışkın akışlı sistemlerde giren ekserjinin tüm formlarının toplamı (ısı, iş, kütle aktarımı) çıkan toplam ekserji ile ekserji yıkımının toplamına eşittir [24].

$$\dot{Ex}_D = \dot{Ex}_Q + \dot{Ex}_W + \sum_{in} \dot{Ex}_m - \sum_{out} \dot{Ex}_m \quad (2.25)$$

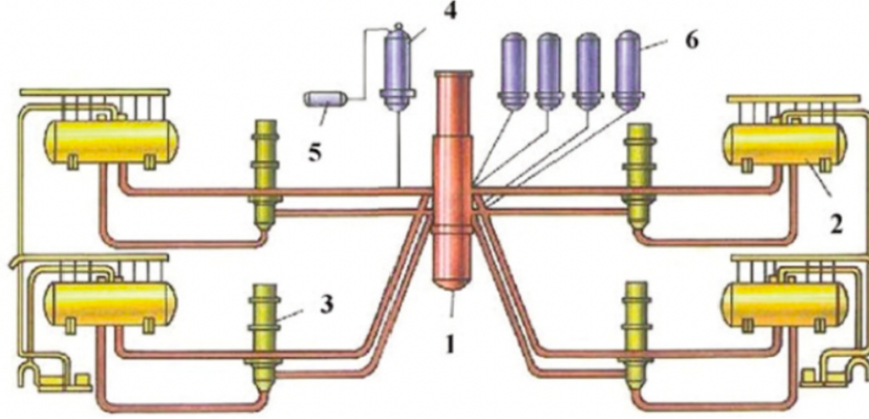
Eşitlik (2.26)'da gösterilen ekserji yıkımı \dot{Ex}_D eşitliğinde kinetik ve potansiyel enerjiler ihmal edilmiştir. Sistem veya çevre tarafından iş yapılmadığı, $\dot{Ex}_W = 0$ olduğu kabul edilerek eşitlik oluşturulmuştur.

$$\dot{Ex}_D = \sum_{i=1}^n \dot{Q}_i \left(1 - \frac{T_0}{T_i} \right) + \dot{W} + \sum_{in} \dot{m} (h - h_0 - T_0(s - s_0)) - \sum_{out} \dot{m} (h - h_0 - T_0(s - s_0)) \quad (2.26)$$

Eşitlik (2.25)'te ve ((2.26)'da \dot{Ex}_Q ısı aktarım ekserjisini (kW), \dot{Ex}_W mekanik ekserjiyi (kW), \dot{Ex}_m kütle aktarım ekserjisini (kW), T_0 ölü durumdaki çevre sıcaklığını (K), T_i sistemin sıcaklığını (K), \dot{Q}_i ısı aktarımını (kW), \dot{m} kütle akış hızını (kg/s), h entalpiyi (kJ/kg), h_0 ölü durumdaki entalpiyi (kJ/kg), s entropiyi (kJ/kgK), s_0 ölü durumdaki entalpiyi (kJ/kgK) ifade eder.

2.6 Nükleer Güç Santralinin Termodinamik Analizleri

VVER tipi bir santralin, Şekil 2.10’da akış şemasında birincil çevrimi ve ikincil çevrimi gösterilmektedir. Şekil 2.13’te VVER’nin birincil çevrimi gösterilmektedir.



1.Reaktör, 2.Buhar Üreteci, 3.Reaktör Soğutma Pompası,
4.Basınçlandırıcı, 5.Basınçlandırıcı Tahliye Tankı, 6.Akümülatör

Şekil 2.13. VVER nükleer santralinin birincil soğutma çevrimi [18]

Sistemin birincil çevriminde Şekil 2.13’te gösterildiği gibi reaktör, buhar üretici, basınçlandırıcı ve reaktör soğutma pompası yer alır.

Nükleer tepkimeler reaktör içinde gerçekleşir ve sonucunda ısı enerjisi açığa çıkar. Bu ısı enerjisi soğutucu su ile reaktör soğutma pompası kullanılarak buhar üreticiden geçirilir. Buhar üretici içinde reaktörden çıkan soğutucu su, buhar üreticisine giren besleme suyunu buhara çevirmek üzere ısıyı aktarır. Bu işlemden sonra soğutucu su tekrar reaktöre geri döner. Sistemin birincil çevrimi tamamlanmış olur. Çizelge 2.4’te reaktörün temel özellikleri verilmiştir.

Çizelge 2.4. VVER tipi nükleer reaktörün temel özellikleri [18]

| Parametre | Değer |
|--|------------|
| Reaktör nominal ısı gücü, MW | 3000 |
| Soğutucu akış hızı, m ³ /h | 84800 |
| Reaktör çekirdeği çıkışındaki basınç, MPa | 15,7 |
| Reaktör çıkışındaki soğutucu sıcaklığı, °C | 321 |
| Reaktör içinde soğutucu sıcaklık artışı, °C | 30 |
| Reaktör içindeki basınç farkı, MPa | 0,381 |
| Çevrim sayısı | 4 |
| Buhar akışı, kg/s | 437 |
| Buhar sıcaklığı, °C | 278,5 |
| Buhar basıncı, MPa | 6,28 ± 0,2 |
| Besleme suyu sıcaklığı, °C | 220 |
| Reaktör soğutucu basıncı, MPa | 15,7 ± 0,3 |
| Buhar üreticine giren soğutucu sıcaklığı, °C | 320 ± 3,5 |
| Buhar üretici iç çapı, m | 4 |
| Buhar üretici dış çapı, m | 4,29 |
| Buhar üreticiden çıkan soğutucunun sıcaklığı, °C | 286 ± 2 |
| Yakıt zenginleştirme oranı (UO ₂), % | 1,6-4,2 |

VVER tipi nükleer reaktör içeren santralin ikincil çevriminde Şekil 2.10'da görüldüğü gibi türbin, kondansatör (yoğunlaştırıcı), pompalar ve ısı değiştiriciler gibi sistemler bulunmaktadır. Bu sistemlere ek olarak buhar ayırıcısı, kızdırıcı, besleme tankı ve degazör gibi sistemler de bulunmaktadır.

İkincil çevrim sayesinde reaktörde açığa çıkan ısı elektrik enerjisine çevrilir. Buhar üreticiden çıkan kızgın buhar türbinlerden geçerek yararlı işe dönüştürülür. Bu yararlı iş jeneratörler aracılığı ile elektrik enerjisine dönüştürülür. Türbinlerden çıkan çürük buhar kondansatörde deniz veya nehir suyu gibi soğutma suyu ile soğutularak yoğunlaşması sağlanır. Yoğunlaşan suyun içinde kalan buhar degazör ile alınır. Isı

değiştiriciler ve pompalardan geçen su, buhar üreticine gönderilerek tekrar kullanımı sağlanır.

Nükleer santrallerin termodinamik analizleri yapılırken yatışkın akışlı sistemler için uygulanan enerji ve ekserji denklemleri kullanılır. Bu çalışmada incelenen nükleer santral Rankine çevrimi ile açıklanabilmektedir. Bunun sebebi Rankine çevrimindeki akışkan Brayton çevriminden farklı olarak buharlaşabilir ve yoğunlaşabilir. Bu durumda Rankine çevrimindeki akışkanın faz değiştirdiğini söyleyebiliriz [6].

1) Kütle Denkliği

Yatışkın akışlı sistemlerde kontrol hacminde bulunan kütle zamana bağlı değişkenlik göstermez. Bu durumda eşitlik (2.27)'de gösterildiği gibi giren kütle akışının toplamı her zaman çıkan kütle akışının toplamına eşittir.

$$\sum_{in} \dot{m} = \sum_{out} \dot{m} \quad (2.27)$$

2) Enerji Denkliği

Yatışkın akışlı sistemlerde enerjinin korunumu yasasına göre enerjinin türünden bağımsız toplam giren enerji, toplam çıkan enerjiye eşittir. Nükleer santralin enerji denklemleri oluşturulurken kinetik ve potansiyel enerjiler ihmal edilerek (2.28)'deki eşitlik elde edilmiştir.

$$\dot{Q} + \dot{W} = \sum_{out} \dot{m}h - \sum_{in} \dot{m}h \quad (2.28)$$

Eşitlik (2.28)'de gösterildiği gibi sisteme yapılan ısı aktarımı \dot{Q} ve iş aktarımının \dot{W} toplamı, sistemden çıkan toplam kütle akışı ile entalpinin çarpımından sisteme giren toplam kütle akışı ve entalpinin çıkarılmasına eşittir.

3) Ekserji Denkliği

Ekserji analizleri ile sistemlerin her biri için tersinir iş yani maksimum elde edilen yararlı iş hesaplanmıştır. Kinetik ve potansiyel enerjideki değişimin ihmal edildiği sistemler için ekserji şu şekilde gösterilmektedir:

$$\dot{E}x = \sum_{in} \dot{m}(h - h_0 - T_0(s - s_0)) - \sum_{out} \dot{m}(h - h_0 - T_0(s - s_0)) \quad (2.29)$$

Eşitlik (2.29)'da ekserji akışının $\dot{E}x$, sisteme giren ve sistemden çıkan toplam kütle akışı \dot{m} , birim kütle başına entalpi h , entropi s ve çevre sıcaklığına T_0 bağlı olduğu ifade edilmektedir.

2.6.1 Bir Nükleer Santralin Enerji ve Ekserji Analizi

Bu santralin enerji ekserji analizleri yapılırken kontrol hacmindeki kinetik ve potansiyel enerjiler ihmal edilmiştir ve eşitlikler santralin sadece ana bileşenlerine uygulanmıştır.

Bu varsayımlar ile elde edilen maksimum iş $\dot{W}_{u,max}$ şudur:

$$\dot{W}_{u,max} = \sum_{i=1}^l \dot{m}_i(h - T_0s)_i + (1 - \frac{T_0}{T_i}) \dot{Q} \quad (2.30)$$

Eşitlik (2.30)'da ifade edildiği gibi maksimum iş sistemin toplam kütle akışları, entalpisi h , entropisi s , çevre sıcaklığı T_0 , sistemin sıcaklığı T_i ve ısı aktarımı \dot{Q} ile ilgilidir.

Aynı kontrol hacmindeki tersinmezlik \dot{I} şöyle yazılabilir:

$$\dot{I} = -T_0 \sum_{i=1}^l \dot{m}_i s_i - \frac{T_0}{T_i} \dot{Q} = -T_0 \dot{S}_{gen} \quad (2.31)$$

Eşitlik (2.31)'de tersinmezliğin çevre sıcaklığı T_0 ve sistemde üretilen entropi \dot{S}_{gen} ile bağıntılı olduğu gösterilmektedir. Üretilen entropi arttığında yani sistemin 1. durumdan 2. duruma geçerken entropisinin artması, sistemdeki tersinmezliği de arttıracaktır. Bu eşitlik çevre sıcaklığının azalmasıyla birlikte sistemdeki tersinmezliğin de azalacağını ifade eder.

Adiabatik sistemlerde ısı aktarımı $\dot{Q} = 0$ 'dır. Bu durumda aşağıda görüldüğü gibi ısı aktarımının maksimum işe etkisi yoktur:

$$\dot{W}_{u,max} = \sum_{i=1}^l \dot{m}_i (h - T_0 s)_i \quad (2.32)$$

Eşitlik (2.32)'de maksimum işin, gerçekte kütle akışı \dot{m}_i , ve birim kütle başına entalpinin h , çarpımını ile elde edilecek işten entropi s , ve çevre sıcaklığının T_0 çarpımını ile elde edilen tersinmez işin farkına eşit olduğu görülmektedir.

$$\dot{W}_{actual} = \dot{W}_{shaft} = \sum_{i=1}^l \dot{m}_i h_i \quad (2.33)$$

Eşitlik (2.33)'te gerçek iş \dot{W}_{actual} bu eşitlikte ifade edildiği haliyle shaft işi \dot{W}_{shaft} , sistemdeki kütle akışları ile entalpilerin çarpımlarının toplamına eşittir.

$$\dot{I} = \dot{W}_{u,max} - \dot{W}_{actual} = \sum_{i=1}^l \dot{m}_i (h - T_0 s)_i - \sum_{i=1}^l \dot{m}_i h_i \quad (2.34)$$

Adiabatik sistemde tersinmezlik \dot{I} , eşitlik (2.34)'te gösterildiği gibi maksimum elde edilen işten $\dot{W}_{u,max}$, gerçek işin çıkarılması \dot{W}_{actual} , şeklinde ifade edilir.

Kontrol hacminin adiabatik olduğu, sistemin iş yapmadığı veya üretmediği durumda gerçek iş \dot{W}_{actual} , aşağıda görüldüğü gibi sıfıra eşit demektir ve maksimum iş ısı aktarımından etkilenmez:

$$\dot{W}_{actual} = \dot{W}_{shaft} = \sum_{i=1}^l \dot{m}_i h_i = 0 \quad (2.35)$$

Gerçek işin sıfıra eşit olması kütle akışının olduğu bir sistemde eşitlik (2.35)'e dayanarak entalpi değişiminin olmadığını gösterir.

$$\dot{I} = \dot{W}_{u,max} = -T_0 \sum_{i=1}^l \dot{m}_i s_i = -T_0 \dot{S}_{gen} \quad (2.36)$$

Bu durumda tersinmezlik maksimum elde edilen işe yani eşitlik (2.36)'da gösterildiği gibi çevre sıcaklığı T_0 ile üretilen entropinin \dot{S}_{gen} çarpımına eşittir.

2.6.1.1 Nükleer Reaktörün Enerji ve Ekserji Analizi

Fisyon tepkimesi sonucunda oluşan her bir element yatışkın durumda yaklaşık olarak 100 MeV kinetik enerjiye sahiptir. Eğer bu gazın termodinamik dengede ideal bir gaz olduğu düşünülürse 100 MeV, $3kT_{fis}/2$ değerine eşit olur. Buradan anlaşıldığı üzere fisyon tepkimesi sonucunda yüksek bir sıcaklık (T_{fis}) açığa çıkmaktadır. Fisyon tepkimesinin aktardığı enerjiden dolayı ısınan hattın çevre ile aynı denge sıcaklığına ulaşabilmesi için gerçekleşen tersinir olaylar sonucunda maksimum iş üretilir [32].

Reaktörden fisyon tepkimesi sonucunda üretilen maksimum ısı enerjisi şöyle gösterilebilir:

$$(\dot{Q}_{u,max})_{fis} = h_{fis} - h_0 - T_0(s_{fis} - s_0) \quad (2.37)$$

Eşitlik (2.37)'de $(\dot{Q}_{u,max})_{fis}$ fisyon enerjisi sonucu elde edilen maksimum ısı enerjisi, h_{fis} fisyon entalpisini, h_0 ölü durum entalpisini, T_0 çevre sıcaklığını, s_{fis} fisyon entropisini ve s_0 ölü durum entropisini ifade etmektedir.

Hacmi değişmeyen bir sistem için eşitlik (2.37), aşağıdaki gösterildiği haline dönüşür:

$$\begin{aligned} (\dot{Q}_{u,max})_{fis} &= u_{fis} - u_0 - T_0(s_{fis} - s_0) \\ &= c_v T_{fis} - c_v T_0 - T_0(s_{fis} - s_0) \end{aligned} \quad (2.38)$$

Eşitlik (2.38)'de u_{fis} fisyon enerjisini, u_0 ölü durumdaki iç enerjiyi, c_v hacmin sabit olduğu durumdaki özgül ısıyı ve T_{fis} fisyon sıcaklığını ifade eder.

Fisyon sıcaklığının çevre sıcaklığından çok yüksek olduğu [33] [34], $T_{fis} \gg T_0$, durumunda maksimum ısı enerjisi aşağıda gösterildiği gibi fisyon enerjisine eşittir:

$$(\dot{Q}_{u,max})_{fis} = c_v T_{fis} - c_v T_0 - T_0 (s_{fis} - s_0) \cong c_v T_{fis} \cong u_{fis} \quad (2.39)$$

Fisyon sonucunda reaktörde üretilen maksimum ısıl enerji yakıt çubuklarına aktarılır. Yakıt çubuğundaki maksimum ısıl enerjiyi hesaplarırken yakıtın sabit sıcaklıkta olduğu varsayılır ve sıcaklığı fisyon sıcaklığından çok düşüktür. Eşitlik oluşturulurken yakıt sıcaklığı ile yakıtı saran çubuğun yüzey sıcaklığının aynı olduğu kabul edilir:

$$(\dot{Q}_{u,max})_{yak} = (\dot{Q}_{u,max})_{fis} \left(1 - \frac{T_0}{T_{yç}}\right) \quad (2.40)$$

Eşitlik (2.40)'ta yakıt çubuğundan elde edilen maksimum ısıl enerji $(\dot{Q}_{u,max})_{yak}$, yakıt çubuğu ile çevre sıcaklığı farkının yakıt çubuğu sıcaklığına $T_{yç}$, oranının fisyon tepkimesi sonucunda elde edilen maksimum ısıl enerji ile çarpımına eşit olduğunu ifade etmektedir.

Yakıt çubuğunda gerçekleşen tersinmezlik \dot{I}_{yak} , eşitlik (2.41)'de gösterilmiştir.

$$\dot{I}_{yak} = (\dot{Q}_{u,max})_{fis} - (\dot{Q}_{u,max})_{yak} = (\dot{Q}_{u,max})_{fis} \left(\frac{T_0}{T_{yç}}\right) \quad (2.41)$$

Eşitlik (2.41) yakıt çubuklarında gerçekleşen tersinmezliğin fisyon sonucu üretilen maksimum ısıl enerji ile yakıt çubuğuna aktarılan maksimum ısıl enerjinin farkına eşit olduğu gösterilmektedir.

Yakıt çubuğuna aktarılan maksimum ısıl enerji reaktörü soğutmak için kullanılan soğutma suyuna aktarılır. Aşağıda görüldüğü gibi soğutma suyunun kütlesi $\dot{m}_{soğ}$, soğutma suyundan elde edilen maksimum ısıl enerji denklemine dahil olmaktadır:

$$(\dot{Q}_{u,max})_{soğ} = \dot{m}_{soğ} ((h_{out} - h_{in})_R - T_0 (s_{out} - s_{in})_R) \quad (2.42)$$

Eşitlik (2.42)'de R reaktörü, h_{out} reaktörden çıkan entalpiyi, h_{in} reaktöre giren entalpiyi, s_{out} reaktörden çıkan entropiyi ve s_{in} reaktöre giren entropiyi ifade eder.

Yakıt çubuğundan soğutucu suya enerji aktarımı sırasında gerçekleşen tersinmezlik $\dot{I}_{soğ}$ eşitlik (2.43)'te gösterildiği gibi yakıt çubuğundaki maksimum ısıl enerji $(\dot{Q}_{u,max})_{yak}$ ile soğutma suyundaki maksimum ısıl enerjinin $(\dot{Q}_{u,max})_{soğ}$ farkına eşittir.

$$\dot{I}_{soğ} = (\dot{Q}_{u,max})_{yak} - (\dot{Q}_{u,max})_{soğ} = (\dot{Q}_{u,max})_{fis} \left(\frac{T_0(s_{out}-s_{in})_R}{(h_{out}-h_{in})_R} - \frac{T_0}{T_{yç}} \right) \quad (2.43)$$

Kinetik enerji ve potansiyel enerjinin yok sayıldığı adiabatik bir nükleer reaktördeki tersinmezlik \dot{I}_R aşağıda gösterildiği gibi fisyon, yakıt çubuğu ve soğutma suyunda gerçekleşen tersinmezlikler toplamına eşittir:

$$\begin{aligned} \dot{I}_R &= \dot{I}_{fis} + \dot{I}_{yak} + \dot{I}_{soğ} \\ &= 0 + (\dot{Q}_{u,max})_{fis} \left(\frac{T_0}{T_{yç}} \right) + (\dot{Q}_{u,max})_{fis} \left(\frac{T_0(s_{out}-s_{in})_R}{(h_{out}-h_{in})_R} - \frac{T_0}{T_{yç}} \right) \end{aligned} \quad (2.44)$$

Nükleer reaktörün tersinmezlik hesaplamasında fisyon tepkimesinde tersinmezlik olmadığı kabul edilmiştir. Bu nedenle $\dot{I}_{fis} = 0$ 'dır. Fisyon sonucunda elde edilen maksimum ısıl enerjinin eşitlik (2.39)'daki gibi fisyon enerjisine eşit olduğunu biliyoruz.

$$(\dot{Q}_{u,max})_{fis} \cong u_{fis} = \dot{m}_{soğ}(h_{out} - h_{in})_R \quad (2.45)$$

Eşitlik (2.45)'te gösterildiği gibi fisyon tepkimesi ile elde edilen maksimum ısıl enerji soğutma suyunun kütle akış hızı ile reaktörden çıkanların ve girenlerin entalpi farkının çarpımına eşittir.

Eşitlik (2.45)'i eşitlik (2.44)'te maksimum fisyon enerjisi ifadesi yerine koyduğumuzda aşağıdaki eşitlik elde edilir:

$$\dot{I}_R = \dot{m}_{soğ} T_0 (s_{out} - s_{in})_R \quad (2.46)$$

Eşitlik (2.46), reaktördeki tersinmezliğin \dot{I}_R , reaktördeki entropi değişimine $(s_{out} - s_{in})_R$, soğutucu kütlelerinin akış hızına $\dot{m}_{soğ}$ ve çevre sıcaklığına T_0 bağlı olduğunu ifade eder.

2.6.1.2 Türbin ve Pompanın Enerji ve Ekserji Analizi

Türbin ve pompanın termodinamik hesaplamaları yapılırken her iki sisteminde adiabatik olduğu, kinetik ve potansiyel enerjilerin değişmediği varsayımları yapılmıştır. Bu varsayımlardan yola çıkarak türbin ve pompa için maksimum iş ve tersinmezlik aşağıda gösterildiği gibi hesaplanır:

$$(\dot{W}_{u,max})_{T,P} = \sum_{in} \dot{m}(h - T_0 s) - \sum_{out} \dot{m}(h - T_0 s) = \dot{E}x_{in} - \dot{E}x_{out} \quad (2.47)$$

Eşitlik (2.47)'de görüldüğü gibi türbin ve pompanın maksimum işi $(\dot{W}_{u,max})_{T,P}$ sisteme giren toplam ekserji aktarımı $\dot{E}x_{in}$ ile sistemden çıkan toplam ekserji aktarımının $\dot{E}x_{out}$ farkına eşittir.

Türbin ve pompanın tersinmezlik $\dot{I}_{T,P}$ hesaplaması yapılırken sistemin maksimum işinden $(\dot{W}_{u,max})_{T,P}$ gerçek iş $(\dot{W}_{actual})_{T,P}$ çıkarılır. Bu işlem sonucunda elde edilen eşitlik:

$$\begin{aligned} \dot{I}_{T,P} &= (\dot{W}_{u,max})_{T,P} - (\dot{W}_{actual})_{T,P} = \dot{E}x_{in} - \dot{E}x_{out} - (\dot{W}_{actual})_{T,P} \\ &= T_0 (\sum_{out} \dot{m}s - \sum_{in} \dot{m}s) \end{aligned} \quad (2.48)$$

türbin ve pompadaki tersinmezliğin sistemdeki entropi değişimi ve çevre sıcaklığı ile bağıntısını göstermektedir.

Türbinin ekserji verimi şöyle gösterilmektedir:

$$\zeta_T = (\dot{W}_{actual})_T / (\sum_{in} \dot{E}x + \sum_{out} \dot{E}x) \quad (2.49)$$

Pompanın ekserji verimi şöyle gösterilmektedir:

$$\zeta_P = (\sum_{out} \dot{E}x - \sum_{in} \dot{E}x) / (\dot{W}_{actual})_P \quad (2.50)$$

2.6.1.3 Buhar Üretici, Kızdırıcı, Buhar Ayırıcı, Kondansatör, Soğutucular ve Isı Değiştiricilerde Enerji ve Ekserji Analizleri

Buhar üretici, kızdırıcı, buhar ayırıcı, kondansatör, soğutucular ve ısı değiştiriciler gibi sistemlerde iş yapılmamaktadır. Bu durumda gerçek iş $\dot{W}_{actual} = 0$ 'dır. Sistem ve çevre arasında herhangi bir ısı alışverişi olmadığı varsayımı yapılmıştır. Bu varsayım ile sistemlerin adiabatik olduğu kabul edilir ve $\dot{Q} = 0$ 'dır.

Gerçek işin sıfır olduğu adiabatik sistemler için maksimum üretilen ısı enerjisi ile tersinmezlik aşağıda gösterildiği gibi birbirine eşit olur:

$$\dot{I} = \dot{Q}_{u,max} = \sum_{in} \dot{m}(h - T_o s) - \sum_{out} \dot{m}(h - T_o s) = \dot{E}x_{in} - \dot{E}x_{out} \quad (2.51)$$

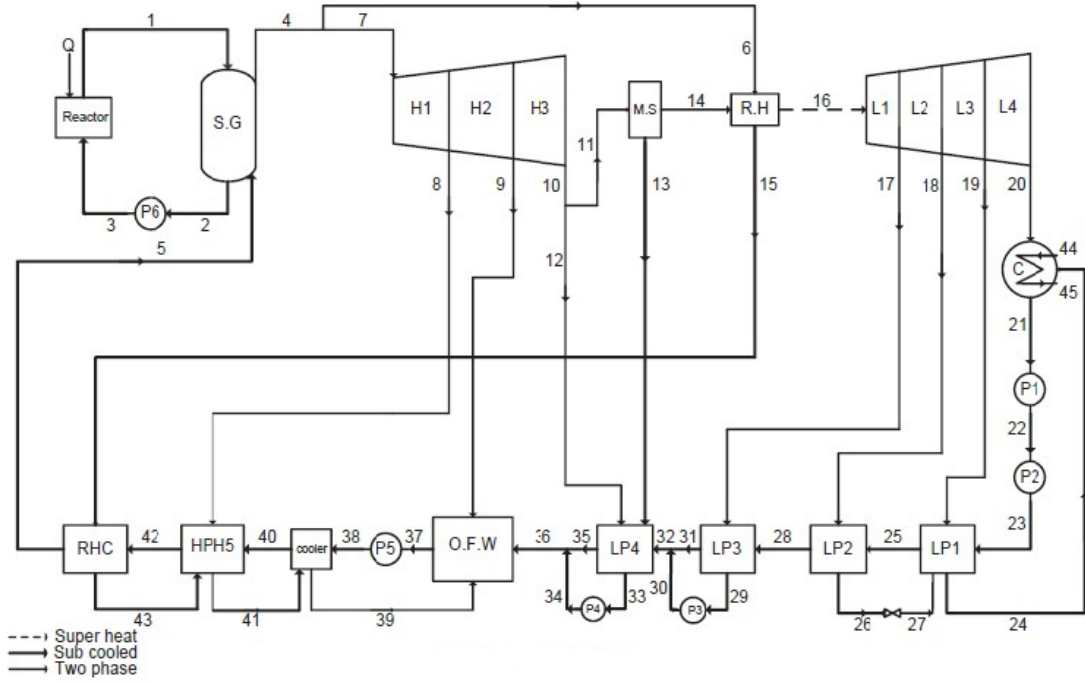
Bu sistemlerin ekserji verimliliği şöyle tanımlanmaktadır:

$$\zeta = \dot{E}_P / \dot{E}_F \quad (2.52)$$

Eşitlik (2.52)'de ekserji ürünü, \dot{E}_P sistemden çıkan ekserjilerin ve sistemde üretilen ekserjilerin toplamını ifade eder. Ekserji yakıtı, \dot{E}_F sisteme giren ekserjilerin ve sistemin harcadığı ekserjilerin toplamını ifade eder. Ekserji verimliliği eşitlik (2.52)'de gösterildiği gibi ekserji ürününün ekserji yakıtına bölünmesi ile hesaplanır [35].

3 MATERYAL VE YÖNTEM

Termodinamik analizlerin yapılabilmesi için en önemli ve ilk adım sistemi ve çevreyi tanımlamaktır. Nükleer santralin enerji ve ekserji analizleri için sistemin birimlerini içeren Şekil 3.1’de gösterilen Bushehr nükleer santrali baz alınmıştır. Her alt sistem için kütle, enerji ve ekserji denklıkları oluşturulmuştur. Analizler Çizelge 3.1’de gösterilen Bushehr nükleer santraline ait veriler [18] kullanılarak yapılmıştır.



Şekil 3.1. Bushehr nükleer güç santralinin akış şeması [18]

Çizelge 3.1. Bushehr nükleer güç santraline ait termodinamik veriler

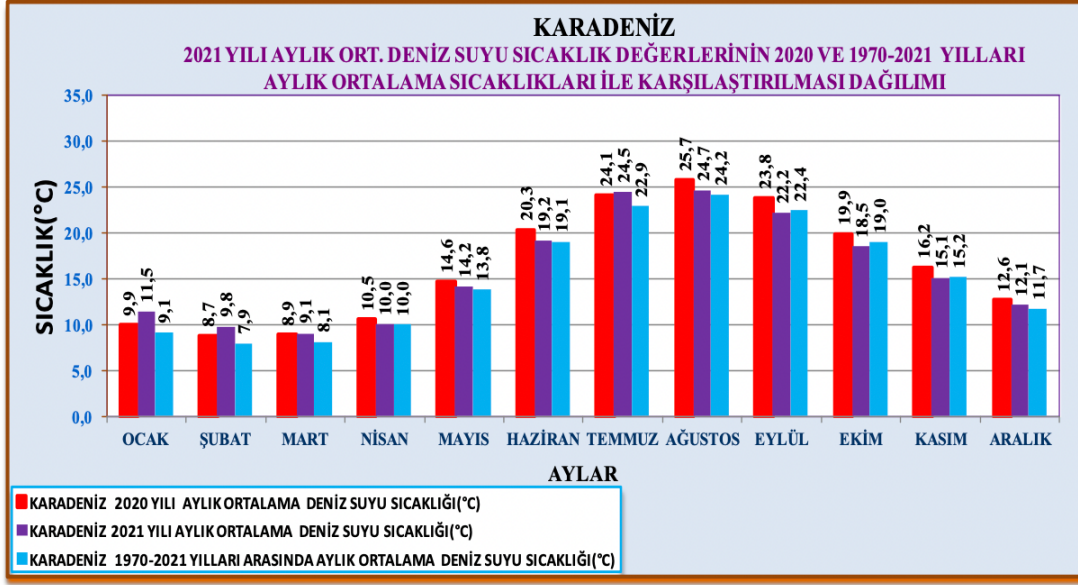
| Boru No | Kütle Akış Hızı (kg/s) | Buhar Kalitesi | Entalpi (kJ/kg) | Entropi (kJ/kgK) |
|---------|------------------------|----------------|-----------------|------------------|
| 1 | 16800 | 0 | 1469,04 | 3,46 |
| 2 | 16800 | 0 | 1289,7 | 3,16 |
| 3 | 16800 | 0 | 1290,3 | 3,16 |
| 4 | 1661,11 | 0,994 | 2776,2 | 5,88 |
| 5 | 1661,11 | 0 | 962,1 | 2,55 |
| 6 | 117,53 | 0,994 | 2776,2 | 5,88 |
| 7 | 1543,58 | 0,994 | 2776,2 | 5,88 |
| 8 | 129,94 | 0,925 | 2663,9 | 5,97 |
| 9 | 64,63 | 0,885 | 2551,3 | 6,04 |
| 10 | 1349 | 0,861 | 2481,4 | 6,02 |
| 11 | 1221,58 | 0,861 | 2481,4 | 6,02 |
| 12 | 127,42 | 0,861 | 2481,4 | 6,02 |
| 13 | 164,3 | 0 | 707,2 | 2,01 |
| 14 | 1057,27 | 0,996 | 2757,1 | 6,6 |
| 15 | 117,52 | 0 | 1190,1 | 2,9 |
| 16 | 1057,27 | 1 | 2933,5 | 7,06 |
| 17 | 46,72 | 0,998 | 2723,8 | 7,18 |
| 18 | 43,55 | 0,963 | 2584,5 | 7,18 |
| 19 | 45,72 | 0,931 | 2470,5 | 7,24 |
| 20 | 921,27 | 0,898 | 2328,7 | 7,46 |
| 21 | 1010,5 | 0 | 168,7 | 0,57 |
| 22 | 1010,55 | 0 | 169,2 | 0,57 |
| 23 | 1010,55 | 0 | 170,5 | 0,58 |
| 24 | 89,27 | 0 | 222,7 | 0,74 |
| 25 | 1010,55 | 0 | 279,8 | 0,91 |
| 26 | 43,55 | 0 | 385 | 1,21 |
| 27 | 43,55 | 0,034 | 385 | 1,22 |
| 28 | 1010,55 | 0 | 374,6 | 1,18 |
| 29 | 46,72 | 0 | 474 | 1,45 |
| 30 | 46,72 | 0 | 477,8 | 1,46 |
| 31 | 1010,55 | 0 | 477,8 | 1,46 |

Çizelge 3.1. (Devam) Bushehr nükleer güç santraline ait termodinamik veriler

| Boru No | Kütle Akış Hızı (kg/s) | Buhar Kalitesi | Entalpi (kJ/kg) | Entropi (kJ/kgK) |
|---------|------------------------|----------------|-----------------|------------------|
| 32 | 1057,27 | 0 | 478 | 1,46 |
| 33 | 291,72 | 0 | 702,9 | 2,0 |
| 34 | 291,72 | 0 | 703,9 | 2,0 |
| 35 | 1057,27 | 0 | 692,9 | 1,98 |
| 36 | 1349 | 0 | 695,3 | 1,98 |
| 37 | 1661,11 | 0 | 807,1 | 2,23 |
| 38 | 1661,11 | 0 | 813,6 | 2,24 |
| 39 | 247,46 | 0,089 | 960,9 | 2,57 |
| 40 | 1661,11 | 0 | 813,9 | 2,24 |
| 41 | 247,46 | 0 | 963 | 2,55 |
| 42 | 1661,11 | 0 | 949,1 | 2,52 |
| 43 | 117,520 | 0 | 993,9 | 2,61 |
| 44 | 61912 | 0 | 117,3 | 0,40 |
| 45 | 61912 | 0 | 149,5 | 0,51 |

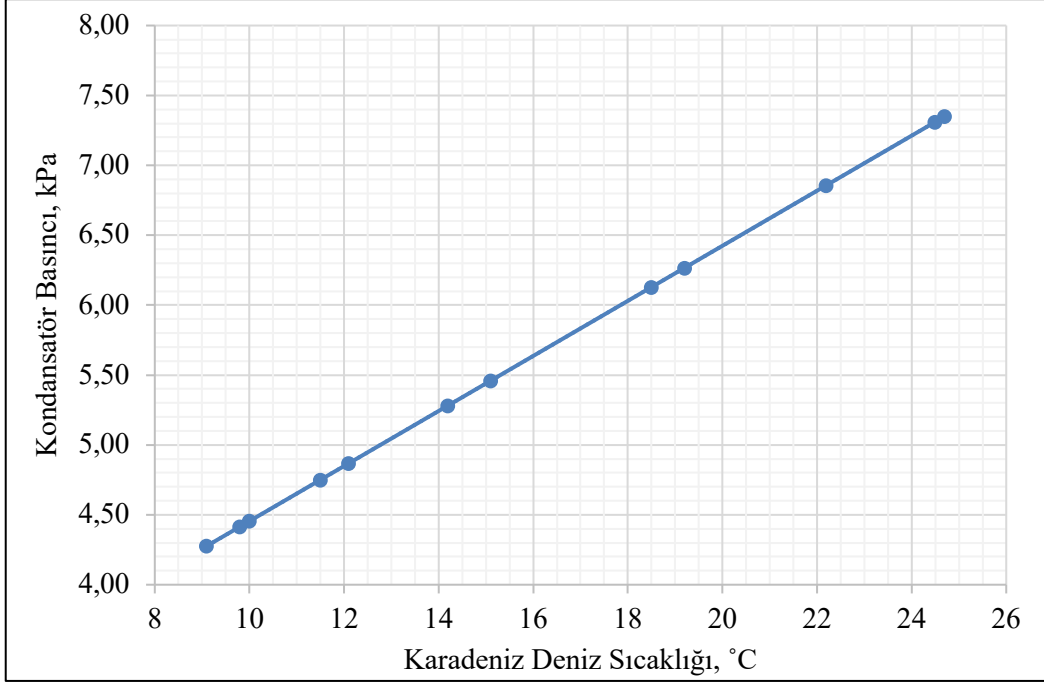
Hesaplamalar yapılırken tüm sistemler için kinetik ve potansiyel enerjiler ihmal edilmiştir. Enerji ve ekserji denklilikleri sadece sistemin ana bileşenlerine uygulanmıştır. Nükleer santral yatışkın akışlıdır ve sistemin güç üretim, kondansatör ve ön ısıtma bölümlerini içeren ikincil çevriminde herhangi bir kimyasal süreç gerçekleşmemiştir. Buhar üreticine giren ve çıkan hatların termodinamik özellikleri sabit tutulmuştur. Kondansatörün çalışma basıncı çevreden alınan deniz suyu sıcaklığına bağlı olarak değişim göstermektedir [36]. Kondansatöre giren buharın ve soğutma suyunun akış kütleleri deniz suyu sıcaklığına bağlı değişim göstermemektedir.

Nükleer santralin analizi için seçilen çevre (ölü durum) sıcaklıkları (T_0) Karadeniz bölgesinin Şekil 3.2’de gösterilen 2021 yılındaki aylık deniz suyu sıcaklıklarıdır ve çevre basıncı 1 bar’dır [37]. Nükleer güç santralinin verimlilik değişimi deniz suyunun aylık sıcaklık değişimi baz alınarak incelenmiştir.



Şekil 3.2. Karadeniz bölgesi aylık ortalama deniz suyu sıcaklığının yıllara göre dağılımı [37]

Literatür araştırmalarına göre kondansatörün çalışma basıncı 4 kPa ve 15 kPa aralığında değişmektedir ve güç üretim santrallerinde kondansatörden geçen soğutma suyunun sıcaklık değişimi santralin verimliliğini etkilemektedir [38]. Kondansatör basıncını 20 kPa'nın altında tutmak düşük basınçlı türbinin güvenli şekilde çalışması için önemlidir [14]. Referans alınan Bushehr nükleer güç santralının kondansatör çalışma basıncı 28 °C çevre sıcaklığı için 8 kPa'dır. Tez çalışması kapsamında varsayılan kondansatör çalışma basıncı 4 kPa ve 8 kPa aralığında değişmektedir. Kondansatör basıncının (P_{con}) çevreden alınan soğutma suyu sıcaklığına bağlı değişimi Şekil 3.3'te ve varsayılan çalışma basıncı değerleri Çizelge 3.2'de gösterilmiştir. Kondansatör çalışma basıncının sıcaklığa bağlı değişim aralığının 4 kPa ve 8 kPa alınması sonucunda deniz suyu sıcaklığının çıkış değeri (T_{45}) 21,1 °C ile 33,4 °C aralığında hesaplanmıştır (Çizelge 3.2). Su kirliliği kontrolü yönetmeliğinin endüstriyel atıksu deşarj standartları ve derin deniz deşarj kriterlerinin istisna hükümlerine göre; hesaplamalar sonucunda bulunan en yüksek 33,4 °C'deki sistemden doğaya deşarj edilen atıksu, nükleer santraller için uygun bir aralıktadır [39].



Şekil 3.3. Kondansatör basıncının Karadeniz deniz suyu sıcaklığına bağlı değişimi

Çizelge 3.2. 2021 Karadeniz deniz suyu sıcaklığına bağlı varsayılan kondansatör çalışma basıncı değerleri

| | | | | | | | | | | | | |
|--------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| T_0 (°C) | 9,1 | 9,8 | 10 | 11,5 | 12,1 | 14,2 | 15,1 | 18,5 | 19,2 | 22,2 | 24,5 | 24,7 |
| T_{45} (°C) | 21,1 | 21,7 | 21,9 | 23,2 | 23,7 | 25,4 | 26,1 | 28,6 | 29,2 | 31,5 | 33,2 | 33,4 |
| P_{con} (kPa) | 4,28 | 4,42 | 4,45 | 4,75 | 4,87 | 5,28 | 5,46 | 6,13 | 6,27 | 6,86 | 7,31 | 7,35 |

3.1 Nükleer Güç Santrali Bileşenlerinin Kütle, Enerji ve Ekserji Analizleri

3.1.1 Kütle Eşitlikleri

Bölüm 2’de kütle ve enerji denkliği başlığı altında anlatıldığı gibi yatışkın-akışlı sistemlerde kütle zamana bağlı değişim göstermez. Bu nedenle kontrol hacmine giren kütlelerin toplamı, çıkan kütlelerin toplamına eşittir.

Kütle eşitlikleri oluşturulurken eşitlik (2.6)’daki kütle denkliği her bir sistem için uygulanmıştır. Kütle eşitlikleri Çizelge 3.3’te gösterilmiştir. Çizelge 3.3’te gösterildiği gibi sisteme giren toplam kütle, sistemden çıkan toplam kütleyle eşittir.

Çizelge 3.3. Nükleer güç santrali alt sistemlerinin kütle eşitlikleri

| Sistemin Adı | Giren Toplam Kütle Akışı (kg/s) | Çıkan Toplam Kütle Akışı (kg/s) | Kütle Eşitliği |
|-----------------------------------|---|---|---|
| Nükleer Reaktör | $\sum \dot{m}_{in} = \dot{m}_3$ | $\sum \dot{m}_{out} = \dot{m}_1$ | $\dot{m}_3 = \dot{m}_1$ |
| Buhar Üreteci (SG) | $\sum \dot{m}_{in} = \dot{m}_1 + \dot{m}_5$ | $\sum \dot{m}_{out} = \dot{m}_2 + \dot{m}_4$ | $\dot{m}_1 + \dot{m}_5 = \dot{m}_2 + \dot{m}_4$ |
| Alçak Basıncılı Türbin (LP-T) | $\sum \dot{m}_{in} = \dot{m}_{16}$ | $\sum \dot{m}_{out} = \dot{m}_{17}$ $+ \dot{m}_{18} + \dot{m}_{19} + \dot{m}_{20}$ | $\dot{m}_{16} = \dot{m}_{17}$ $+ \dot{m}_{18} + \dot{m}_{19} + \dot{m}_{20}$ |
| Yüksek Basıncılı Türbin (HP-T) | $\sum \dot{m}_{in} = \dot{m}_7$ | $\sum \dot{m}_{out} =$ $\dot{m}_8 + \dot{m}_9 + \dot{m}_{10}$ | $\dot{m}_7 = \dot{m}_8 + \dot{m}_9 + \dot{m}_{10}$ |
| Kızdırıcı (RH) | $\sum \dot{m}_{in} = \dot{m}_6 + \dot{m}_{14}$ | $\sum \dot{m}_{out} =$ $\dot{m}_{15} + \dot{m}_{16}$ | $\dot{m}_6 + \dot{m}_{14}$ $= \dot{m}_{15} + \dot{m}_{16}$ |
| Buhar Ayırıcı (MS) | $\sum \dot{m}_{in} = \dot{m}_{11}$ | $\sum \dot{m}_{out} =$ $\dot{m}_{13} + \dot{m}_{14}$ | $\dot{m}_{11} = \dot{m}_{13} + \dot{m}_{14}$ |
| Kondansatör | $\sum \dot{m}_{in}$ $= \dot{m}_{20} + \dot{m}_{24} + \dot{m}_{44}$ | $\sum \dot{m}_{out} =$ $\dot{m}_{21} + \dot{m}_{45}$ | $\dot{m}_{20} + \dot{m}_{24} + \dot{m}_{44}$ $= \dot{m}_{21} + \dot{m}_{45}$ |
| Ana Yoğuşma Suyu Pompa-1 (P1) | $\sum \dot{m}_{in} = \dot{m}_{21}$ | $\sum \dot{m}_{out} = \dot{m}_{22}$ | $\dot{m}_{21} = \dot{m}_{22}$ |
| Ana Yoğuşma Suyu Pompa-2 (P2) | $\sum \dot{m}_{in} = \dot{m}_{22}$ | $\sum \dot{m}_{out} = \dot{m}_{23}$ | $\dot{m}_{22} = \dot{m}_{23}$ |
| Pompa-3 (P3) | $\sum \dot{m}_{in} = \dot{m}_{29}$ | $\sum \dot{m}_{out} = \dot{m}_{30}$ | $\dot{m}_{29} = \dot{m}_{30}$ |
| Pompa-4 (P4) | $\sum \dot{m}_{in} = \dot{m}_{33}$ | $\sum \dot{m}_{out} = \dot{m}_{34}$ | $\dot{m}_{33} = \dot{m}_{34}$ |
| Besi Suyu Pompa-1 (P5) | $\sum \dot{m}_{in} = \dot{m}_{37}$ | $\sum \dot{m}_{out} = \dot{m}_{38}$ | $\dot{m}_{37} = \dot{m}_{38}$ |

Çizelge 3.3. (Devam) Nükleer güç santrali alt sistemlerinin kütle eşitlikleri

| Sistemin Adı | Giren Toplam Kütle Akışı (kg/s) | Çıkan Toplam Kütle Akışı (kg/s) | Kütle Eşitliği |
|--|---|---|---|
| Reaktör Soğutucu Pompası (P6) | $\sum \dot{m}_{in} = \dot{m}_2$ | $\sum \dot{m}_{out} = \dot{m}_3$ | $\dot{m}_2 = \dot{m}_3$ |
| Düşük Basıncılı Isı Değiştirici-1 (LPH1) | $\sum \dot{m}_{in} =$ $\dot{m}_{19} + \dot{m}_{23} + \dot{m}_{27}$ | $\sum \dot{m}_{out} =$ $\dot{m}_{24} + \dot{m}_{25}$ | $\dot{m}_{19} + \dot{m}_{23} + \dot{m}_{27}$ $= \dot{m}_{24} + \dot{m}_{25}$ |
| Düşük Basıncılı Isı Değiştirici-2 (LPH2) | $\sum \dot{m}_{in} =$ $\dot{m}_{18} + \dot{m}_{25}$ | $\sum \dot{m}_{out} =$ $\dot{m}_{26} + \dot{m}_{28}$ | $\dot{m}_{18} + \dot{m}_{25}$ $= \dot{m}_{26} + \dot{m}_{28}$ |
| Düşük Basıncılı Isı Değiştirici-3 (LPH3) | $\sum \dot{m}_{in} =$ $\dot{m}_{17} + \dot{m}_{28}$ | $\sum \dot{m}_{out} =$ $\dot{m}_{29} + \dot{m}_{31}$ | $\dot{m}_{17} + \dot{m}_{28}$ $= \dot{m}_{29} + \dot{m}_{31}$ |
| Düşük Basıncılı Isı Değiştirici-4 (LPH4) | $\sum \dot{m}_{in} =$ $\dot{m}_{12} + \dot{m}_{13} + \dot{m}_{32}$ | $\sum \dot{m}_{out} =$ $\dot{m}_{33} + \dot{m}_{35}$ | $\dot{m}_{12} + \dot{m}_{13} + \dot{m}_{32}$ $= \dot{m}_{33} + \dot{m}_{35}$ |
| Yüksek Basıncılı Isı Değiştirici-5 (HPH5) | $\sum \dot{m}_{in} =$ $\dot{m}_8 + \dot{m}_{40} + \dot{m}_{43}$ | $\sum \dot{m}_{out} =$ $\dot{m}_{41} + \dot{m}_{42}$ | $\dot{m}_8 + \dot{m}_{40} + \dot{m}_{43}$ $= \dot{m}_{41} + \dot{m}_{42}$ |
| Dearatör (OFW) | $\sum \dot{m}_{in} =$ $\dot{m}_9 + \dot{m}_{36} + \dot{m}_{39}$ | $\sum \dot{m}_{out} = \dot{m}_{37}$ | $\dot{m}_9 + \dot{m}_{36} + \dot{m}_{39}$ $= \dot{m}_{37}$ |
| Soğutucu (Cool) | $\sum \dot{m}_{in}$ $= \dot{m}_{38} + \dot{m}_{41}$ | $\sum \dot{m}_{out} =$ $\dot{m}_{39} + \dot{m}_{40}$ | $\dot{m}_{38} + \dot{m}_{41}$ $= \dot{m}_{39} + \dot{m}_{40}$ |
| Kızdırıcı Soğutucu (RHC) | $\sum \dot{m}_{in} =$ $\dot{m}_{15} + \dot{m}_{42}$ | $\sum \dot{m}_{out} =$ $\dot{m}_5 + \dot{m}_{43}$ | $\dot{m}_{15} + \dot{m}_{42}$ $= \dot{m}_5 + \dot{m}_{43}$ |
| Nükleer Güç Santralinin Kütle Eşitliği Hesaplaması | $\sum \dot{m}_{in} =$ 13.818,50 kg/s | $\sum \dot{m}_{out} =$ 13.818,50 kg/s | $\sum \dot{m}_{in} - \sum \dot{m}_{out} =$ 0 kg/s |

3.1.2 Enerji ve Ekserji Eşitlikleri

Nükleer güç santralinin enerji ve ekserji denklilikleri bölüm 2’de enerji ve ekserji analizleri başlığı altında anlatılmıştır. Nükleer güç santrali gibi yatışkın-akışlı sistemlerde termodinamiğin birinci yasasına göre giren toplam enerji çıkan toplam enerjiye eşittir.

Termodinamiğin ikinci yasasına göre yapılan hesaplamalar ile sistem bileşenlerindeki tersinmezlik, maksimum iş ve gerçek iş hesaplanmıştır. Çıkan sonuçlar ile sistemlerin ne kadar verimlilikte çalıştığı ve bu verimlilik değerlerine çevre sıcaklığının, bu çalışmada kondansatörden geçen Karadeniz deniz suyu sıcaklığının, 2021 yılındaki aylık ortalama sıcaklık değişimi ile etkisi araştırılmıştır.

Reaktör:

Nükleer reaktör içinde gerçekleşen fisyon tepkimesi sonucunda yüksek sıcaklık açığa çıkar. Açığa çıkan bu enerji reaktör içerisinden soğutma suyuna aktarılır. Nükleer reaktörün enerji ve ekserji analizleri yapılırken gücün ısı transferi şeklinde gerçekleştiği, sistemin iş üretmediği veya yapmadığı varsayımı yapılmıştır.

Türbinler:

Nükleer güç santralinde bulunan alçak basınçlı ve yüksek basınçlı türbinler sayesinde ısı enerjisi mekanik enerjiye dönüştürülür. Türbinler sayesinde elde edilen mekanik enerji jeneratörler aracılığı ile elektrik enerjisine dönüştürülmektedir. Türbinler iş üretmektedir. Bu durumda türbinlerin gerçek işi sıfırdan farklıdır. Hesaplamalar yapılırken türbinlerin çevre ile ısı alışverişini yapmadığı varsayımı yapılmıştır.

Pompalar:

Çevreden alınan su kondansatörden çıktıktan sonra pompalar aracılığı ile ön ısıtma birimine taşınır. Suyun bir kısmı birinci alçak basınçlı ısı değiştiriciden sonra tekrar kondansatöre gönderilir. Diğer kısmı ön ısıtma biriminden geçtikten sonra buhar üreticisine gönderilir. Pompalar suyu sisteme geri taşıırken iş yapmaktadır. Bu sistemlerin enerji ve ekserji hesaplamaları yapılırken sistemlerin adiabatik olduğu kabul edilmiştir.

Buhar Üretici (SG), Kızdırıcı (RH), Buhar ayırıcı (MS), Soğutucu (C), Kondansatör (Con), Kızdırıcı soğutucu (RHC) ve Dearatör (OFW):

Bu sistemlerin enerji ve ekserji analizleri yapılırken sistemlerin adiabatik olduğu, iş yapmadığı ve iş üretmediği varsayımları yapılmıştır. Bu durumda sistemlerin gerçek işi sıfırdır. Sistemlerin gerçek işinin sıfır olması sistemlerde maksimum üretilen ısı enerjisi ile tersinmezliğin birbirlerine eşit olduğunu ifade eder.

Nükleer santralin birincil çevrimi, nükleer reaktörü, buhar üreticini ve reaktör soğutma pompasını (P6) içermektedir. Birincil çevrimin enerji ve ekserji eşitlikleri Çizelge 3.4'te verilmiştir.

Nükleer santralin güç üretim bölümü, türbinleri, buhar ayırıcısını (MS) ve kızdırıcıyı (RH) içermektedir. Çizelge 3.5'te güç üretim bölümünün enerji ve ekserji eşitlikleri verilmiştir.

Nükleer santralin kondansatör bölümü, kondansatörü (Con) içermektedir. Çizelge 3.6'da kondansatörün enerji ve ekserji eşitlikleri verilmiştir.

Nükleer santralin ön ısıtma bölümü, ana yoğuşma suyu pompalarını (P1, P2), pompa-3'ü (P3), pompa-4'ü (P4), besi suyu pompasını (P5), düşük basınçlı ısı değiştiricilerini (LPH1, LPH2, LPH3, LPH4), yüksek basınçlı ısı değiştiricisini (HPH5), deaeratörü (OFW), soğutucuyu (Cool) ve kızdırıcı soğutucuyu (RHC) içermektedir. Çizelge 3.7'de ön ısıtma bölümü sistemlerinin enerji ve ekserji eşitlikleri verilmiştir.

Maksimum iş, gerçek iş, tersinmezlik, giren ekserji ve çıkan ekserji megavat (MW) biriminde hesaplanmıştır. İzentropik verimliliği ve ekserji verimliliği yüzde (%) olarak hesaplanmıştır.

Çizelge 3.4. Birincil çevrimin enerji ve ekserji eşitlikleri

| Birincil Çevrim | | |
|---------------------|---------------------------|--|
| Nükleer Reaktör (R) | $(\dot{Q}_{u,max})_R$ | $\dot{m}_1(h_1 - h_3)/1000$ |
| | $(\dot{Q}_{actual})_R$ | $(\dot{E}x_{in})_R - (\dot{E}x_{out})_R$ |
| | $(\dot{E}x_{in})_R$ | $\dot{m}_3(h_3 - h_0 - T_0(s_3 - s_0))/1000$ |
| | $(\dot{E}x_{out})_R$ | $\dot{m}_1(h_1 - h_0 - T_0(s_1 - s_0))/1000$ |
| | \dot{I}_R | $ (\dot{Q}_{actual})_R - (\dot{Q}_{u,max})_R $ |
| | ζ_R | $((\dot{Q}_{u,max})_R / (\dot{Q}_{actual})_R) \times 100$ |
| Buhar Üretici (SG) | $(\dot{Q}_{actual})_{SG}$ | $(\dot{m}_2h_2 + \dot{m}_4h_4 - (\dot{m}_1h_1 + \dot{m}_5h_5))/1000$ |
| | $(\dot{Q}_{u,max})_{SG}$ | $(\dot{E}x_{in})_{SG} - (\dot{E}x_{out})_{SG}$ |
| | $(\dot{E}x_{in})_{SG}$ | $(\dot{m}_1(h_1 - h_0 - T_0(s_1 - s_0)) + \dot{m}_5(h_5 - h_0 - T_0(s_5 - s_0)))/1000$ |
| | $(\dot{E}x_{out})_{SG}$ | $(\dot{m}_2(h_2 - h_0 - T_0(s_2 - s_0)) + \dot{m}_4(h_4 - h_0 - T_0(s_4 - s_0)))/1000$ |
| | \dot{I}_{SG} | $ (\dot{E}x_F)_{SG} - (\dot{E}x_P)_{SG} $ |
| | $(\dot{E}x_P)_{SG}$ | $(\dot{m}_4(h_4 - h_0 - T_0(s_4 - s_0)) - \dot{m}_5(h_5 - h_0 - T_0(s_5 - s_0)))/1000$ |
| | $(\dot{E}x_F)_{SG}$ | $(\dot{m}_1(h_1 - h_0 - T_0(s_1 - s_0)) - \dot{m}_2(h_2 - h_0 - T_0(s_2 - s_0)))/1000$ |
| | ζ_{SG} | $\frac{(\dot{E}x_P)_{SG}}{(\dot{E}x_F)_{SG}} \times 100$ |

Çizelge 3.4. (Devam) Birincil çevrimin enerji ve ekserji eşitlikleri

| | | |
|---|---------------------------|--|
| Reaktör Soğutma Pompası (P6) | $(\dot{W}_{actual})_{P6}$ | $(\dot{m}_3 h_3 - \dot{m}_2 h_2)/1000$ |
| | $(\dot{W}_{u,max})_{P6}$ | $(\dot{E}x_{in})_{P6} - (\dot{E}x_{out})_{P6}$ |
| | $(\dot{E}x_{in})_{P6}$ | $\dot{m}_2(h_2 - h_0 - T_0(s_2 - s_0))/1000$ |
| | $(\dot{E}x_{out})_{P6}$ | $\dot{m}_3(h_3 - h_0 - T_0(s_3 - h_0))/1000$ |
| | \dot{I}_{P6} | $(\dot{E}x_F)_{P6} - (\dot{E}x_P)_{P6}$ |
| | $(\dot{E}x_P)_{P6}$ | $ (\dot{E}x_{out})_{P6} - (\dot{E}x_{in})_{P6} $ |
| | $(\dot{E}x_F)_{P6}$ | $ (\dot{W}_{actual})_{P6} $ |
| | ζ_{P6} | $\frac{(\dot{E}x_P)_{P6}}{(\dot{E}x_F)_{P6}} \times 100$ |
| Birincil Çevrimin Toplam Ekserji Yıkımı | $(\dot{E}x_D)_{Birincil}$ | $\dot{I}_R + \dot{I}_{SG} + \dot{I}_{P6}$ |

Çizelge 3.5. Güç üretim bölümü enerji ve ekserji eşitlikleri

| Güç Üretim Bölümü | | |
|----------------------------------|-----------------------------|---|
| Alçak Basınçlı Türbin (LP-T) | $(\dot{W}_{actual})_{LP-T}$ | $(\dot{m}_{17}h_{17} + \dot{m}_{18}h_{18} + \dot{m}_{19}h_{19} + \dot{m}_{20}h_{20} - \dot{m}_{16}h_{16})/1000$ |
| | $(\dot{W}_{u,max})_{LP-T}$ | $(\dot{E}x_{in})_{LP-T} - (\dot{E}x_{out})_{LP-T}$ |
| | $(\dot{E}x_{in})_{LP-T}$ | $\dot{m}_{16}(h_{16} - h_0 - T_0(s_{16} - s_0))/1000$ |
| | $(\dot{E}x_{out})_{LP-T}$ | $(\dot{m}_{17}(h_{17} - h_0 - T_0(s_{17} - s_0))$ $+ \dot{m}_{18}(h_{18} - h_0 - T_0(s_{18} - s_0))$ $+ \dot{m}_{19}(h_{19} - h_0 - T_0(s_{19} - s_0))$ $+ \dot{m}_{20}(h_{20} - h_0 - T_0(s_{20} - s_0)))/1000$ |
| | \dot{I}_{LP-T} | $(\dot{E}x_P)_{LP-T} - (\dot{E}x_F)_{LP-T}$ |
| | $(\dot{E}x_F)_{LP-T}$ | $ (\dot{E}x_{out})_{LP-T} - (\dot{E}x_{in})_{LP-T} $ |
| | $(\dot{E}x_P)_{LP-T}$ | $ (\dot{W}_{actual})_{LP-T} $ |
| | ζ_{LP-T} | $(\dot{E}x_P)_{LP-T}/(\dot{E}x_F)_{LP-T} \times 100$ |
| Yüksek Basınçlı Türbin (HP-T) | $(\dot{W}_{actual})_{HP-T}$ | $(\dot{m}_8h_8 + \dot{m}_9h_9 + \dot{m}_{10}h_{10} - \dot{m}_7h_7)/1000$ |
| | $(\dot{W}_{u,max})_{HP-T}$ | $(\dot{E}x_{in})_{HP-T} - (\dot{E}x_{out})_{HP-T}$ |
| | $(\dot{E}x_{in})_{HP-T}$ | $\dot{m}_7(h_7 - h_0 - T_0(s_7 - s_0))/1000$ |
| | $(\dot{E}x_{out})_{HP-T}$ | $(\dot{m}_8(h_8 - h_0 - T_0(s_8 - s_0)) + \dot{m}_9(h_9 - h_0 - T_0(s_9 - s_0))$ $+ \dot{m}_{10}(h_{10} - h_0 - T_0(s_{10} - s_0)))/1000$ |
| | \dot{I}_{HP-T} | $(\dot{E}x_P)_{HP-T} - (\dot{E}x_F)_{HP-T}$ |
| | $(\dot{E}x_F)_{HP-T}$ | $ (\dot{E}x_{out})_{HP-T} - (\dot{E}x_{in})_{HP-T} $ |
| | $(\dot{E}x_P)_{HP-T}$ | $ (\dot{W}_{actual})_{HP-T} $ |
| | ζ_{HP-T} | $(\dot{E}x_P)_{HP-T}/(\dot{E}x_F)_{HP-T} \times 100$ |

Çizelge 3.5. (Devam) Güç üretim bölümü enerji ve ekserji eşitlikler

| | | |
|--|---------------------------|--|
| Kızdırıcı (RH) | $(\dot{Q}_{actual})_{RH}$ | $(\dot{m}_{15}h_{15} + \dot{m}_{16}h_{16} - (\dot{m}_6h_6 + \dot{m}_{14}h_{14}))/1000$ |
| | $(\dot{Q}_{u,max})_{RH}$ | $(\dot{E}x_{in})_{RH} - (\dot{E}x_{out})_{RH}$ |
| | $(\dot{E}x_{in})_{RH}$ | $(\dot{m}_6(h_6 - h_0 - T_0(s_6 - s_0)) + \dot{m}_{14}(h_{14} - h_0 - T_0(s_{14} - s_0)))/1000$ |
| | $(\dot{E}x_{out})_{RH}$ | $(\dot{m}_{15}(h_{15} - h_0 - T_0(s_{15} - s_0)) + \dot{m}_{16}(h_{16} - h_0 - T_0(s_{16} - s_0)))/1000$ |
| | \dot{I}_{RH} | $(\dot{E}x_F)_{RH} - (\dot{E}x_P)_{RH}$ |
| | $(\dot{E}x_F)_{RH}$ | $(\dot{m}_6(h_6 - h_0 - T_0(s_6 - s_0)) - \dot{m}_{15}(h_{15} - h_0 - T_0(s_{15} - s_0)))/1000$ |
| | $(\dot{E}x_P)_{RH}$ | $(\dot{m}_{16}(h_{16} - h_0 - T_0(s_{16} - s_0)) - \dot{m}_{14}(h_{14} - h_0 - T_0(s_{14} - s_0)))/1000$ |
| | ζ_{RH} | $\frac{(\dot{E}x_P)_{RH}}{(\dot{E}x_F)_{RH}} \times 100$ |
| Buhar Ayırıcı (MS) | $(\dot{Q}_{actual})_{MS}$ | $(\dot{m}_{13}h_{13} + \dot{m}_{14}h_{14} - \dot{m}_{11}h_{11})/1000$ |
| | $(\dot{Q}_{u,max})_{MS}$ | $(\dot{E}x_{in})_{MS} - (\dot{E}x_{out})_{MS}$ |
| | $(\dot{E}x_{in})_{MS}$ | $\dot{m}_{11}(h_{11} - h_0 - T_0(s_{11} - s_0))/1000$ |
| | $(\dot{E}x_{out})_{MS}$ | $(\dot{m}_{13}(h_{13} - h_0 - T_0(s_{13} - s_0)) + \dot{m}_{14}(h_{14} - h_0 - T_0(s_{14} - s_0)))/1000$ |
| | \dot{I}_{MS} | $(\dot{E}x_F)_{MS} - (\dot{E}x_P)_{MS}$ |
| | $(\dot{E}x_F)_{MS}$ | $(\dot{m}_{14}(h_{14} - h_0 - T_0(s_{14} - s_0)))/1000$ |
| | $(\dot{E}x_P)_{MS}$ | $(\dot{m}_{11}(h_{11} - h_0 - T_0(s_{11} - s_0)) - \dot{m}_{13}(h_{13} - h_0 - T_0(s_{13} - s_0)))/1000$ |
| | ζ_{MS} | $\frac{(\dot{E}x_P)_{MS}}{(\dot{E}x_F)_{MS}} \times 100$ |
| Güç Üretim Bölümünün Toplam Ekserji Yıkımı | $(\dot{E}x_D)_{GÜ}$ | $\dot{I}_{LP-T} + \dot{I}_{HP-T} + \dot{I}_{RH} + \dot{I}_{MS}$ |

Çizelge 3.6. Kondansatör bölümü enerji ve ekserji eşitlikleri

| Kondansatör Bölümü | | |
|---|----------------------------|---|
| Kondansatör (Con) | $(\dot{Q}_{actual})_{Con}$ | $(\dot{m}_{45}h_{45} + \dot{m}_{21}h_{21} - (\dot{m}_{20}h_{20} + \dot{m}_{24}h_{24} + \dot{m}_{44}h_{44}))/1000$ |
| | $(\dot{Q}_{u,max})_{Con}$ | $(\dot{E}x_{in})_{Con} - (\dot{E}x_{out})_{Con}$ |
| | $(\dot{E}x_{in})_{Con}$ | $(\dot{m}_{20}(h_{20} - h_0 - T_0(s_{20} - s_0)) + \dot{m}_{24}(h_{24} - h_0 - T_0(s_{24} - s_0)) + \dot{m}_{44}(h_{44} - h_0 - T_0(s_{44} - s_0)))/1000$ |
| | $(\dot{E}x_{out})_{Con}$ | $(\dot{m}_{21}(h_{21} - h_0 - T_0(s_{21} - s_0)) + \dot{m}_{45}(h_{45} - h_0 - T_0(s_{45} - s_0)))/1000$ |
| | \dot{I}_{Con} | $(\dot{E}x_F)_{Con} - (\dot{E}x_P)_{Con}$ |
| | $(\dot{E}x_F)_{Con}$ | $(\dot{m}_{20}(h_{20} - h_0 - T_0(s_{20} - s_0)) + \dot{m}_{24}(h_{24} - h_0 - T_0(s_{24} - s_0)) - (\dot{m}_{21}(h_{21} - h_0 - T_0(s_{21} - s_0))))/1000$ |
| | $(\dot{E}x_P)_{Con}$ | $(\dot{m}_{45}(h_{45} - h_0 - T_0(s_{45} - s_0)) - \dot{m}_{44}(h_{44} - h_0 - T_0(s_{44} - s_0)))/1000$ |
| | ζ_{Con} | $\frac{(\dot{E}x_P)_{Con}}{(\dot{E}x_F)_{Con}} \times 100$ |
| Kondansatör Bölümünün Toplam Ekserji Yıkımı | $(\dot{E}x_D)_{Con}$ | \dot{I}_{Con} |

Çizelge 3.7. Ön ısıtma bölümünün enerji ve ekserji eşitlikleri

| Ön Isıtma Bölümü | | |
|--------------------------------|-----------------------------|--|
| Soğutucu (Cool) | $(\dot{Q}_{actual})_{Cool}$ | $(\dot{m}_{39}h_{39} + \dot{m}_{40}h_{40} - (\dot{m}_{38}h_{38} + \dot{m}_{41}h_{41}))/1000$ |
| | $(\dot{Q}_{u,max})_{Cool}$ | $(\dot{E}x_{in})_{Cool} - (\dot{E}x_{out})_{Cool}$ |
| | $(\dot{E}x_{in})_{Cool}$ | $(\dot{m}_{38}(h_{38} - h_0 - T_0(s_{38} - s_0)) + \dot{m}_{41}(h_{41} - h_0 - T_0(s_{41} - s_0)))/1000$ |
| | $(\dot{E}x_{out})_{Cool}$ | $(\dot{m}_{39}(h_{39} - h_0 - T_0(s_{39} - s_0)) + \dot{m}_{40}(h_{40} - h_0 - T_0(s_{40} - s_0)))/1000$ |
| | \dot{I}_{Cool} | $(\dot{E}x_F)_{Cool} - (\dot{E}x_P)_{Cool}$ |
| | $(\dot{E}x_F)_{Cool}$ | $(\dot{m}_{38}(h_{38} - h_0 - T_0(s_{38} - s_0)) - \dot{m}_{39}(h_{39} - h_0 - T_0(s_{39} - s_0)))/1000$ |
| | $(\dot{E}x_P)_{Cool}$ | $(\dot{m}_{40}(h_{40} - h_0 - T_0(s_{40} - s_0)) - \dot{m}_{41}(h_{41} - h_0 - T_0(s_{41} - s_0)))/1000$ |
| | ζ_{Cool} | $\frac{(\dot{E}x_P)_{Cool}}{(\dot{E}x_F)_{Cool}} \times 100$ |
| Kızdırıcı Soğutucu (RHC) | $(\dot{Q}_{actual})_{RHC}$ | $(\dot{m}_5h_5 + \dot{m}_{43}h_{43} - (\dot{m}_{15}h_{15} + \dot{m}_{42}h_{42}))/1000$ |
| | $(\dot{Q}_{u,max})_{RHC}$ | $(\dot{E}x_{in})_{RHC} - (\dot{E}x_{out})_{RHC}$ |
| | $(\dot{E}x_{in})_{RHC}$ | $(\dot{m}_{15}(h_{15} - h_0 - T_0(s_{15} - s_0)) + \dot{m}_{42}(h_{42} - h_0 - T_0(s_{42} - s_0)))/1000$ |
| | $(\dot{E}x_{out})_{RHC}$ | $(\dot{m}_5(h_5 - h_0 - T_0(s_5 - s_0)) + \dot{m}_{43}(h_{43} - h_0 - T_0(s_{43} - s_0)))/1000$ |
| | \dot{I}_{RHC} | $(\dot{E}x_F)_{RHC} - (\dot{E}x_P)_{RHC}$ |
| | $(\dot{E}x_F)_{RHC}$ | $(\dot{m}_{15}(h_{15} - h_0 - T_0(s_{15} - s_0)) - \dot{m}_{43}(h_{43} - h_0 - T_0(s_{43} - s_0)))/1000$ |
| | $(\dot{E}x_P)_{RHC}$ | $(\dot{m}_5(h_5 - h_0 - T_0(s_5 - s_0)) - \dot{m}_{42}(h_{42} - h_0 - T_0(s_{42} - s_0)))/1000$ |
| | ζ_{RHC} | $\frac{(\dot{E}x_P)_{RHC}}{(\dot{E}x_F)_{RHC}} \times 100$ |

Çizelge 3.7. (Devam) Ön ısıtma bölümünün enerji ve ekserji eşitlikleri

| | | |
|---------------------------------------|----------------------------|--|
| Dearatör (OFW) | $(\dot{Q}_{actual})_{OFW}$ | $(\dot{m}_{37}h_{37} - (\dot{m}_9h_9 + \dot{m}_{36}h_{36} + \dot{m}_{39}h_{39}))/1000$ |
| | $(\dot{Q}_{u,max})_{OFW}$ | $(\dot{E}x_{in})_{OFW} - (\dot{E}x_{out})_{OFW}$ |
| | $(\dot{E}x_{in})_{OFW}$ | $(\dot{m}_9(h_9 - h_0 - T_0(s_9 - s_0)) + \dot{m}_{36}(h_{36} - h_0 - T_0(s_{36} - s_0)) + \dot{m}_{39}(h_{39} - h_0 - T_0(s_{39} - s_0)))/1000$ |
| | $(\dot{E}x_{out})_{OFW}$ | $\dot{m}_{37}(h_{37} - h_0 - T_0(s_{37} - s_0))/1000$ |
| | \dot{I}_{OFW} | $ (\dot{Q}_{actual})_{OFW} - (\dot{Q}_{u,max})_{OFW} $ |
| | $(\dot{E}x_F)_{OFW}$ | $(\dot{m}_9(h_9 - h_0 - T_0(s_9 - s_0)) + \dot{m}_{39}(h_{39} - h_0 - T_0(s_{39} - s_0)))/1000$ |
| | $(\dot{E}x_P)_{OFW}$ | $(\dot{m}_{37}(h_{37} - h_0 - T_0(s_{37} - s_0)) - \dot{m}_{36}(h_{36} - h_0 - T_0(s_{36} - s_0)))/1000$ |
| | ζ_{OFW} | $\frac{(\dot{E}x_P)_{OFW}}{(\dot{E}x_F)_{OFW}} \times 100$ |
| Ana Yoğuşma Suyu Pompası-1 (P1) | $(\dot{W}_{actual})_{P1}$ | $(\dot{m}_{22}h_{22} - \dot{m}_{21}h_{21})/1000$ |
| | $(\dot{W}_{u,max})_{P1}$ | $(\dot{E}x_{in})_{P1} - (\dot{E}x_{out})_{P1}$ |
| | $(\dot{E}x_{in})_{P1}$ | $\dot{m}_{21}(h_{21} - h_0 - T_0(s_{21} - s_0))/1000$ |
| | $(\dot{E}x_{out})_{P1}$ | $\dot{m}_{22}(h_{22} - h_0 - T_0(s_{22} - s_0))/1000$ |
| | \dot{I}_{P1} | $(\dot{E}x_F)_{P1} - (\dot{E}x_P)_{P1}$ |
| | $(\dot{E}x_F)_{P1}$ | $ (\dot{W}_{actual})_{P1} $ |
| | $(\dot{E}x_P)_{P1}$ | $ (\dot{E}x_{out})_{P1} - (\dot{E}x_{in})_{P1} $ |
| | ζ_{P1} | $\frac{(\dot{E}x_P)_{P1}}{(\dot{E}x_F)_{P1}} \times 100$ |

Çizelge 3.7. (Devam) Ön ısıtma bölümünün enerji ve ekserji eşitlikleri

| | | |
|---------------------------------------|---------------------------|--|
| Ana Yoğuşma Suyu Pompası-2 (P2) | $(\dot{W}_{actual})_{P2}$ | $(\dot{m}_{23}h_{23} - \dot{m}_{22}h_{22})/1000$ |
| | $(\dot{W}_{u,max})_{P2}$ | $(\dot{E}x_{in})_{P2} - (\dot{E}x_{out})_{P2}$ |
| | $(\dot{E}x_{in})_{P2}$ | $\dot{m}_{22}(h_{22} - h_0 - T_0(s_{22} - s_0))/1000$ |
| | $(\dot{E}x_{out})_{P2}$ | $\dot{m}_{23}(h_{23} - h_0 - T_0(s_{23} - s_0))/1000$ |
| | \dot{I}_{P2} | $ (\dot{E}x_F)_{P2} - (\dot{E}x_P)_{P2} $ |
| | $(\dot{E}x_F)_{P2}$ | $ (\dot{W}_{actual})_{P2} $ |
| | $(\dot{E}x_P)_{P2}$ | $ (\dot{E}x_{out})_{P2} - (\dot{E}x_{in})_{P2} $ |
| | ζ_{P2} | $\frac{(\dot{E}x_P)_{P2}}{(\dot{E}x_F)_{P2}} \times 100$ |
| Pompa-3 (P3) | $(\dot{W}_{actual})_{P3}$ | $(\dot{m}_{30}h_{30} - \dot{m}_{29}h_{29})/1000$ |
| | $(\dot{W}_{u,max})_{P3}$ | $(\dot{E}x_{in})_{P3} - (\dot{E}x_{out})_{P3}$ |
| | $(\dot{E}x_{in})_{P3}$ | $\dot{m}_{29}(h_{29} - h_0 - T_0(s_{29} - s_0))/1000$ |
| | $(\dot{E}x_{out})_{P3}$ | $\dot{m}_{30}(h_{30} - h_0 - T_0(s_{30} - s_0))/1000$ |
| | \dot{I}_{P3} | $ (\dot{E}x_F)_{P3} - (\dot{E}x_P)_{P3} $ |
| | $(\dot{E}x_F)_{P3}$ | $ (\dot{W}_{actual})_{P3} $ |
| | $(\dot{E}x_P)_{P3}$ | $ (\dot{E}x_{out})_{P3} - (\dot{E}x_{in})_{P3} $ |
| | ζ_{P3} | $\frac{(\dot{E}x_P)_{P3}}{(\dot{E}x_F)_{P3}} \times 100$ |

Çizelge 3.7. (Devam) Ön ısıtma bölümünün enerji ve ekserji eşitlikleri

| | | |
|---------------------------|---------------------------|--|
| Pompa-4 (P4) | $(\dot{W}_{actual})_{P4}$ | $(\dot{m}_{34}h_{34} - \dot{m}_{33}h_{33})/1000$ |
| | $(\dot{W}_{u,max})_{P4}$ | $(\dot{E}x_{in})_{P4} - (\dot{E}x_{out})_{P4}$ |
| | $(\dot{E}x_{in})_{P4}$ | $\dot{m}_{33}(h_{33} - h_0 - T_0(s_{33} - s_0))/1000$ |
| | $(\dot{E}x_{out})_{P4}$ | $\dot{m}_{34}(h_{34} - h_0 - T_0(s_{34} - s_0))/1000$ |
| | \dot{I}_{P4} | $ (\dot{E}x_F)_{P4} - (\dot{E}x_P)_{P4} $ |
| | $(\dot{E}x_F)_{P4}$ | $ (\dot{W}_{actual})_{P4} $ |
| | $(\dot{E}x_P)_{P4}$ | $ (\dot{E}x_{out})_{P4} - (\dot{E}x_{in})_{P4} $ |
| | ζ_{P4} | $\frac{ (\dot{E}x_P)_{P4} }{ (\dot{E}x_F)_{P4} } \times 100$ |
| Besi Suyu Pompası (P5) | $(\dot{W}_{actual})_{P5}$ | $(\dot{m}_{38}h_{38} - \dot{m}_{37}h_{37})/1000$ |
| | $(\dot{W}_{u,max})_{P5}$ | $(\dot{E}x_{in})_{P5} - (\dot{E}x_{out})_{P5}$ |
| | $(\dot{E}x_{in})_{P5}$ | $\dot{m}_{37}(h_{37} - h_0 - T_0(s_{37} - s_0))/1000$ |
| | $(\dot{E}x_{out})_{P5}$ | $\dot{m}_{38}(h_{38} - h_0 - T_0(s_{38} - s_0))/1000$ |
| | \dot{I}_{P5} | $(\dot{E}x_F)_{P5} - (\dot{E}x_P)_{P5}$ |
| | $(\dot{E}x_F)_{P5}$ | $ (\dot{W}_{actual})_{P5} $ |
| | $(\dot{E}x_P)_{P5}$ | $ (\dot{E}x_{out})_{P5} - (\dot{E}x_{in})_{P5} $ |
| | ζ_{P5} | $\frac{ (\dot{E}x_P)_{P5} }{ (\dot{E}x_F)_{P5} } \times 100$ |

Çizelge 3.7. (Devam) Ön ısıtma bölümünün enerji ve ekserji eşitlikleri

| | | |
|---|-----------------------------|---|
| Düşük Basınçlı Isı Değiştirici-1 (LPH1) | $(\dot{Q}_{actual})_{LPH1}$ | $(\dot{m}_{24}h_{24} + \dot{m}_{25}h_{25} - (\dot{m}_{19}h_{19} + \dot{m}_{23}h_{23} + \dot{m}_{27}h_{27}))/1000$ |
| | $(\dot{Q}_{u,max})_{LPH1}$ | $(\dot{E}x_{in})_{LPH1} - (\dot{E}x_{out})_{LPH1}$ |
| | $(\dot{E}x_{in})_{LPH1}$ | $(\dot{m}_{19}(h_{19} - h_0 - T_0(s_{19} - s_0)) + \dot{m}_{23}(h_{23} - h_0 - T_0(s_{23} - s_0)) + \dot{m}_{27}(h_{27} - h_0 - T_0(s_{27} - s_0)))/1000$ |
| | $(\dot{E}x_{out})_{LPH1}$ | $(\dot{m}_{24}(h_{24} - h_0 - T_0(s_{24} - s_0)) + \dot{m}_{25}(h_{25} - h_0 - T_0(s_{25} - s_0)))/1000$ |
| | \dot{I}_{LPH1} | $(\dot{E}x_F)_{LPH1} - (\dot{E}x_P)_{LPH1}$ |
| | $(\dot{E}x_F)_{LPH1}$ | $(\dot{m}_{19}(h_{19} - h_0 - T_0(s_{19} - s_0)) + \dot{m}_{27}(h_{27} - h_0 - T_0(s_{27} - s_0)) - \dot{m}_{24}(h_{24} - h_0 - T_0(s_{24} - s_0)))/1000$ |
| | $(\dot{E}x_P)_{LPH1}$ | $((\dot{m}_{25}(h_{25} - h_0 - T_0(s_{25} - s_0)) - \dot{m}_{23}(h_{23} - h_0 - T_0(s_{23} - s_0)))/1000$ |
| | ζ_{LPH1} | $\frac{(\dot{E}x_P)_{LPH1}}{(\dot{E}x_F)_{LPH1}} \times 100$ |
| Düşük Basınçlı Isı Değiştirici-2 (LPH2) | $(\dot{Q}_{actual})_{LPH2}$ | $(\dot{m}_{26}h_{26} + \dot{m}_{28}h_{28} - (\dot{m}_{18}h_{18} + \dot{m}_{25}h_{25}))/1000$ |
| | $(\dot{Q}_{u,max})_{LPH2}$ | $(\dot{E}x_{in})_{LPH2} - (\dot{E}x_{out})_{LPH2}$ |
| | $(\dot{E}x_{in})_{LPH2}$ | $(\dot{m}_{18}(h_{18} - h_0 - T_0(s_{18} - s_0)) + \dot{m}_{25}(h_{25} - h_0 - T_0(s_{25} - s_0)))/1000$ |
| | $(\dot{E}x_{out})_{LPH2}$ | $(\dot{m}_{26}(h_{26} - h_0 - T_0(s_{26} - s_0)) + \dot{m}_{28}(h_{28} - h_0 - T_0(s_{28} - s_0)))/1000$ |
| | \dot{I}_{LPH2} | $ \dot{Q}_{actual})_{LPH2} - (\dot{Q}_{u,max})_{LPH2} $ |
| | $(\dot{E}x_F)_{LPH2}$ | $(\dot{m}_{18}(h_{18} - h_0 - T_0(s_{18} - s_0)) - \dot{m}_{26}(h_{26} - h_0 - T_0(s_{26} - s_0)))/1000$ |
| | $(\dot{E}x_P)_{LPH2}$ | $(\dot{m}_{28}(h_{28} - h_0 - T_0(s_{28} - s_0)) - \dot{m}_{25}(h_{25} - h_0 - T_0(s_{25} - s_0)))/1000$ |
| | ζ_{LPH2} | $\frac{(\dot{E}x_P)_{LPH2}}{(\dot{E}x_F)_{LPH2}} \times 100$ |

Çizelge 3.7. (Devam) Ön ısıtma bölümünün enerji ve ekserji eşitlikleri

| | | |
|---|-----------------------------|--|
| Düşük Basınçlı Isı Değiştirici-3 (LPH3) | $(\dot{Q}_{actual})_{LPH3}$ | $(\dot{m}_{29}h_{29} + \dot{m}_{31}h_{31} - (\dot{m}_{17}h_{17} + \dot{m}_{28}h_{28}))/1000$ |
| | $(\dot{Q}_{u,max})_{LPH3}$ | $(\dot{E}x_{in})_{LPH3} - (\dot{E}x_{out})_{LPH3}$ |
| | $(\dot{E}x_{in})_{LPH3}$ | $(\dot{m}_{17}(h_{17} - h_0 - T_0(s_{17} - s_0)) + \dot{m}_{28}(h_{28} - h_0 - T_0(s_{28} - s_0)))/1000$ |
| | $(\dot{E}x_{out})_{LPH3}$ | $(\dot{m}_{29}(h_{29} - h_0 - T_0(s_{29} - s_0)) + \dot{m}_{31}(h_{31} - h_0 - T_0(s_{31} - s_0)))/1000$ |
| | \dot{I}_{LPH3} | $(\dot{E}x_F)_{LPH3} - (\dot{E}x_P)_{LPH3}$ |
| | $(\dot{E}x_F)_{LPH3}$ | $(\dot{m}_{17}(h_{17} - h_0 - T_0(s_{17} - s_0)) - \dot{m}_{29}(h_{29} - h_0 - T_0(s_{29} - s_0)))/1000$ |
| | $(\dot{E}x_P)_{LPH3}$ | $(\dot{m}_{31}(h_{31} - h_0 - T_0(s_{31} - s_0)) - \dot{m}_{28}(h_{28} - h_0 - T_0(s_{28} - s_0)))/1000$ |
| | ζ_{LPH3} | $\frac{(\dot{E}x_P)_{LPH3}}{(\dot{E}x_F)_{LPH3}} \times 100$ |
| Düşük Basınçlı Isı Değiştirici-4 (LPH4) | $(\dot{Q}_{actual})_{LPH4}$ | $(\dot{m}_{33}h_{33} + \dot{m}_{35}h_{35} - (\dot{m}_{12}h_{12} + \dot{m}_{13}h_{13} + \dot{m}_{32}h_{32}))/1000$ |
| | $(\dot{Q}_{u,max})_{LPH4}$ | $(\dot{E}x_{in})_{LPH4} - (\dot{E}x_{out})_{LPH4}$ |
| | $(\dot{E}x_{in})_{LPH4}$ | $(\dot{m}_{12}(h_{12} - h_0 - T_0(s_{12} - s_0)) + \dot{m}_{13}(h_{13} - h_0 - T_0(s_{13} - s_0)) + \dot{m}_{32}(h_{32} - h_0 - T_0(s_{32} - s_0)))/1000$ |
| | $(\dot{E}x_{out})_{LPH4}$ | $(\dot{m}_{33}(h_{33} - h_0 - T_0(s_{33} - s_0)) + \dot{m}_{35}(h_{35} - h_0 - T_0(s_{35} - s_0)))/1000$ |
| | \dot{I}_{LPH4} | $(\dot{E}x_F)_{LPH4} - (\dot{E}x_P)_{LPH4}$ |
| | $(\dot{E}x_F)_{LPH4}$ | $((\dot{m}_{12}(h_{12} - h_0 - T_0(s_{12} - s_0)) + \dot{m}_{13}(h_{13} - h_0 - T_0(s_{13} - s_0)) - \dot{m}_{33}(h_{33} - h_0 - T_0(s_{33} - s_0)))/1000$ |
| | $(\dot{E}x_P)_{LPH4}$ | $((\dot{m}_{35}(h_{35} - h_0 - T_0(s_{35} - s_0)) - \dot{m}_{32}(h_{32} - h_0 - T_0(s_{32} - s_0)))/1000$ |
| | ζ_{LPH4} | $\frac{(\dot{E}x_P)_{LPH4}}{(\dot{E}x_F)_{LPH4}} \times 100$ |

Çizelge 3.7. (Devam) Ön ısıtma bölümünün enerji ve ekserji eşitlikleri

| | | |
|--|-----------------------------|--|
| Yüksek Basınçlı Isı Değiştirici-5 (HPH5) | $(\dot{Q}_{actual})_{HPH5}$ | $(\dot{m}_{41}h_{41} + \dot{m}_{42}h_{42} - (\dot{m}_8h_8 + \dot{m}_{40}h_{40} + \dot{m}_{43}h_{43}))/1000$ |
| | $(\dot{Q}_{u,max})_{HPH5}$ | $(\dot{E}x_{in})_{HPH5} - (\dot{E}x_{out})_{HPH5}$ |
| | $(\dot{E}x_{in})_{HPH5}$ | $(\dot{m}_8(h_8 - h_0 - T_0(s_8 - s_0)) + \dot{m}_{40}(h_{40} - h_0 - T_0(s_{40} - s_0)) + \dot{m}_{43}(h_{43} - h_0 - T_0(s_{43} - s_0)))/1000$ |
| | $(\dot{E}x_{out})_{HPH5}$ | $(\dot{m}_{41}(h_{41} - h_0 - T_0(s_{41} - s_0)) + \dot{m}_{42}(h_{42} - h_0 - T_0(s_{42} - s_0)))/1000$ |
| | \dot{I}_{HPH5} | $(\dot{E}x_F)_{HPH5} - (\dot{E}x_P)_{HPH5}$ |
| | $(\dot{E}x_F)_{HPH5}$ | $((\dot{m}_8(h_8 - h_0 - T_0(s_8 - s_0)) + \dot{m}_{43}(h_{43} - h_0 - T_0(s_{43} - s_0)) - \dot{m}_{41}(h_{41} - h_0 - T_0(s_{41} - s_0)))/1000$ |
| | $(\dot{E}x_P)_{HPH5}$ | $(\dot{m}_{42}(h_{42} - h_0 - T_0(s_{42} - s_0)) - \dot{m}_{40}(h_{40} - h_0 - T_0(s_{40} - s_0)))/1000$ |
| | ζ_{HPH5} | $\frac{(\dot{E}x_P)_{HPH5}}{(\dot{E}x_F)_{HPH5}} \times 100$ |
| Ön Isıtma Bölümünün (PS) Toplam Ekserji Yıkımı | $(\dot{E}x_D)_{PS}$ | $\dot{I}_{Cool} + \dot{I}_{RHC} + \dot{I}_{OFW} + \dot{I}_{LPH1} + \dot{I}_{LPH2} + \dot{I}_{LPH3} + \dot{I}_{LPH4} + \dot{I}_{HPH5} + \dot{I}_{P1} + \dot{I}_{P2} + \dot{I}_{P3} + \dot{I}_{P4} + \dot{I}_{P5}$ |

3.1.3 Nükleer Güç Santralının Verimliliği ve Tersinmezliği

Nükleer güç santralının toplam ürettiği net güç, türbinlerin ısı enerjisinin ne kadarını mekanik enerjiye çevirdiği ve reaktör soğutma pompasının reaktörü soğutmak için ne kadar güç kullandığı ile ilgilidir. Bu durumda aşağıdaki eşitlik nükleer güç santralının net gücünü verir:

$$(\dot{W}_{Net})_{NGS} = |(\dot{W}_{actual})_{HP-T}| + |(\dot{W}_{actual})_{LP-T}| - |(\dot{W}_{actual})_P| \quad (3.1)$$

Eşitlik (3.1)'de gösterildiği gibi nükleer santraldeki toplam üretilen net güç $(\dot{W}_{Net})_{NGS}$, türbinlerin gerçekte ürettiği toplam güç ve pompaların gerçekte harcadığı gücün farkına eşittir.

Nükleer santralin toplam tersinmezliği santralin birimlerinde gerçekleşen toplam ekserji yıkımına eşittir.

$$(\dot{E}x_D)_{NGS} = (\dot{E}x_D)_{Birincil} + (\dot{E}x_D)_{Con} + (\dot{E}x_D)_{PS} \quad (3.2)$$

(3.2)'deki eşitlik nükleer santralin birincil çevrimi, kondansatör bölümü ve ön ısıtma biriminde gerçekleşen toplam ekserji yıkımını $(\dot{E}x_D)_{NGS}$ ifade etmektedir.

Hesaplamalar yapılırken oluşan toplam hata eşitlik (3.3) ve hata oranı eşitlik (3.4) ile hesaplanmıştır:

$$Hata = |(\dot{Q}_{u,max})_R| - ((\dot{E}x_D)_{NGS} + |(\dot{W}_{Net})_{NGS}|) \quad (3.3)$$

$$Hata Oranı \% = Hata / |(\dot{Q}_{u,max})_R| \times 100 \quad (3.4)$$

Hesaplamalar sonucunda elde edilen ekserji yıkımı $(\dot{E}x_D)_{NGS}$, toplam net güç $(\dot{W}_{Net})_{NGS}$ ve hata değerlerinin toplamı nükleer güç santralının toplam enerjisini vermektedir.

$$NGS \text{ Toplam Enerji} = (\dot{W}_{Net})_{NGS} + (\dot{E}x_D)_{NGS} + Hata \quad (3.5)$$

Eşitlik (3.5)'te yapılan hesaplama gerçekte nükleer reaktörün ne kadar enerji üretebileceğini göstermektedir. Bu durumda nükleer santralin toplam enerjisi reaktörün maksimum ürettiği ısı enerjisine $(\dot{Q}_{u,max})_R$ eşittir.

Nükleer güç santralının toplam enerji verimi sistemde üretilen toplam net güç ve reaktörün ürettiği gerçek ısı enerjisi ile bağıntılıdır.

$$\eta_{NGS} = (\dot{W}_{Net})_{NGS} / |(\dot{Q}_{u,max})_R| \times 100 \quad (3.6)$$

Eşitlik (3.6)'da gösterildiği gibi nükleer güç santralının termodinamik verimliliği η_{NGS} , sistemde üretilen net gücün reaktörün ürettiği gerçek güce oranıdır.

$$(\dot{E}x_F)_{NGS} = |(\dot{Q}_{u,max})_R| + |(\dot{W}_{actual})_P| \quad (3.7)$$

Eşitlik (3.7)'de gösterildiği gibi nükleer güç santralinin ekserji yakıtı reaktörden reaktör soğutma hattına aktarılan ısı enerjisi ve pompaların harcadığı gerçek işlerin toplamına eşittir.

$$(\dot{E}x_P)_{NGS} = |(\dot{W}_{actual})_{HP-T}| + |(\dot{W}_{actual})_{LP-T}| \quad (3.8)$$

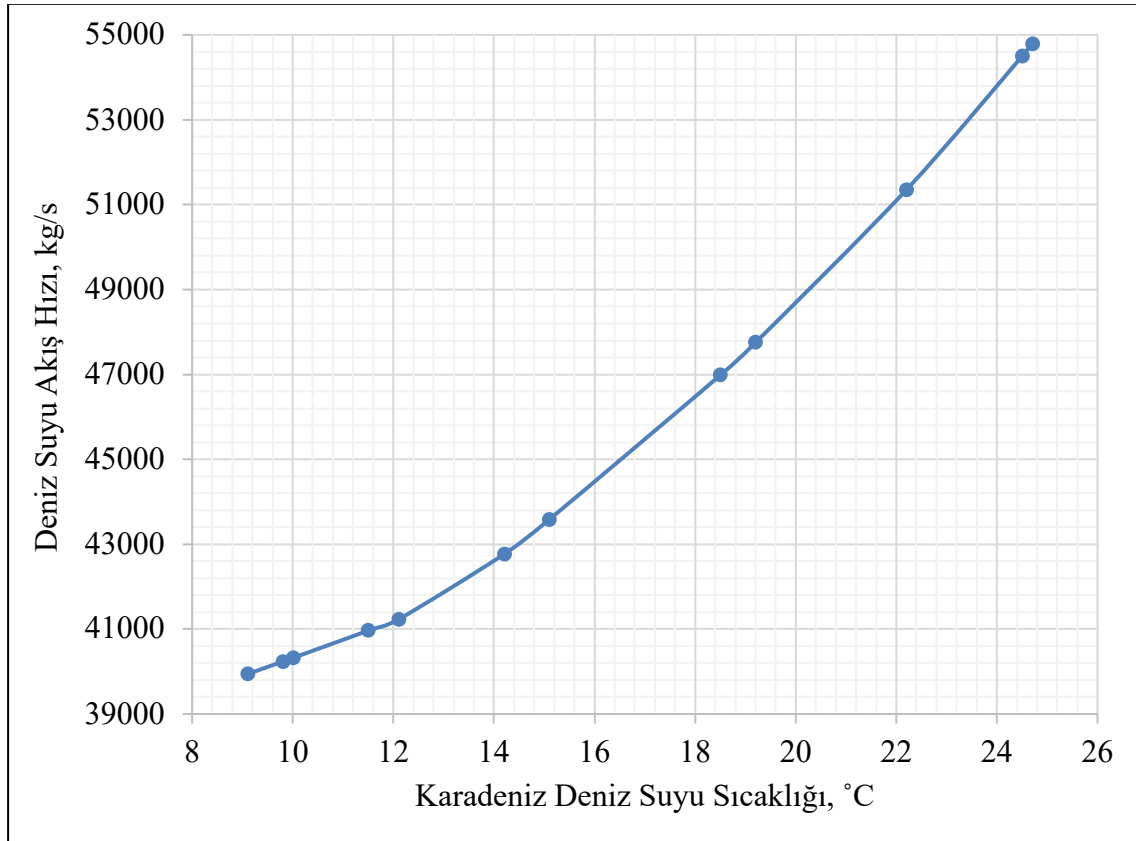
Eşitlik (3.8)'de gösterildiği gibi nükleer güç santralinin ekserji ürünü türbinlerde üretilen toplam güce eşittir.

$$\zeta_{NGS} = (\dot{E}x_P)_{NGS} / (\dot{E}x_F)_{NGS} \times 100 \quad (3.9)$$

Eşitlik (3.9)'da gösterildiği gibi nükleer güç santralinin ekserji verimliliği ζ_{NGS} , sistemde oluşan ekserji ürünü ve ekserji yakıtının birbirine oranına eşittir.

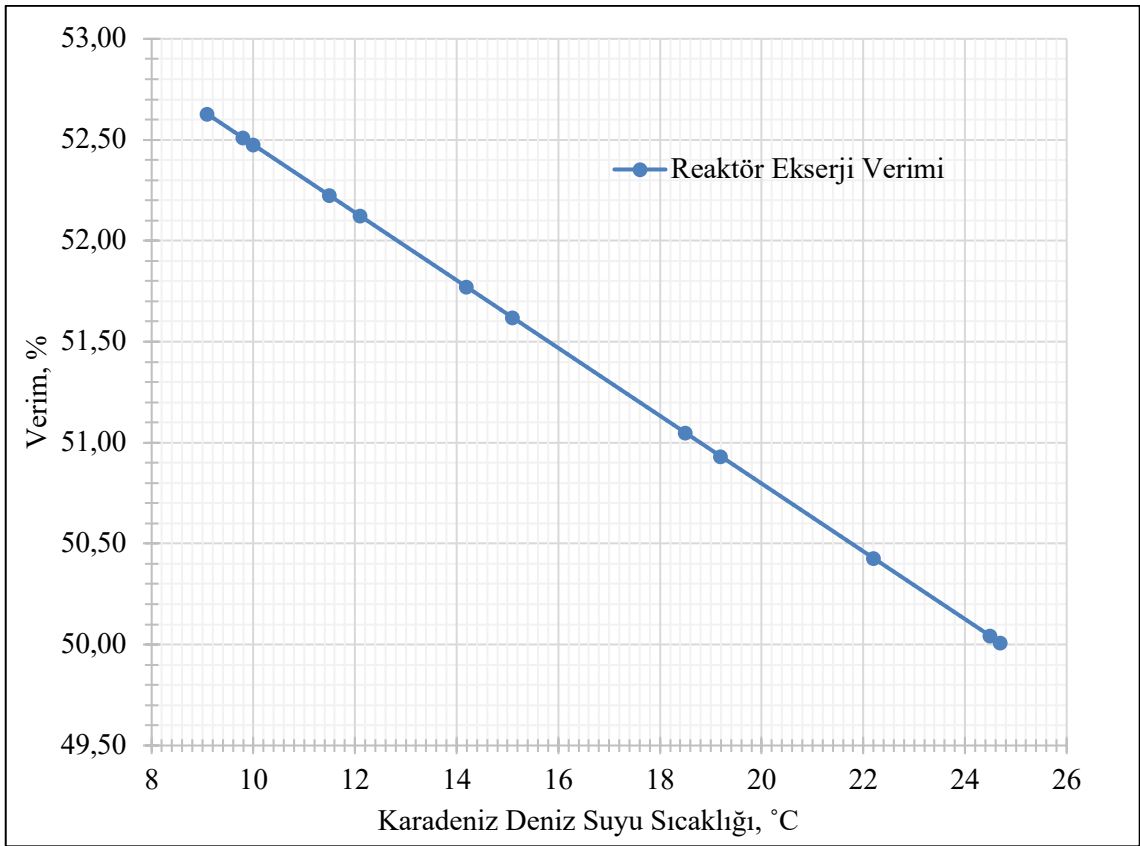
4 SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Nükleer güç santralının, termodinamik analizleri materyal ve yöntem bölümünde verilen eşitlikler, varsayımlar ve Bushehr nükleer güç santralının literatürdeki verileri kullanılarak yapılmıştır. Ekserji analizi yapılırken kondansatöre giren soğutma suyunun sıcaklığı T_0 için Şekil 3.2’de gösterilen yıllara göre aylık Karadeniz deniz suyu sıcaklıklarının 2021’deki değerleri alınmıştır. Bu sayede Karadeniz’de kurulabilecek ve deniz suyunu soğutma suyu olarak kullanan bir nükleer güç santralının aylık enerji ve ekserji verimliliği değişimi analiz edilmiştir. Nükleer güç santralının kondansatör basıncı Şekil 3.3’te gösterildiği gibi 4 kPa ve 8 kPa aralığında Karadeniz deniz suyu sıcaklığı ile değişim göstermiştir. Bu çalışma basıncı aralığında soğutma suyu olarak kondansatöre beslenen deniz suyu akış hızının Şekil 4.1’de gösterildiği gibi 39941 kg/s’den 54791 kg/s’ye arttığı hesaplanmıştır.



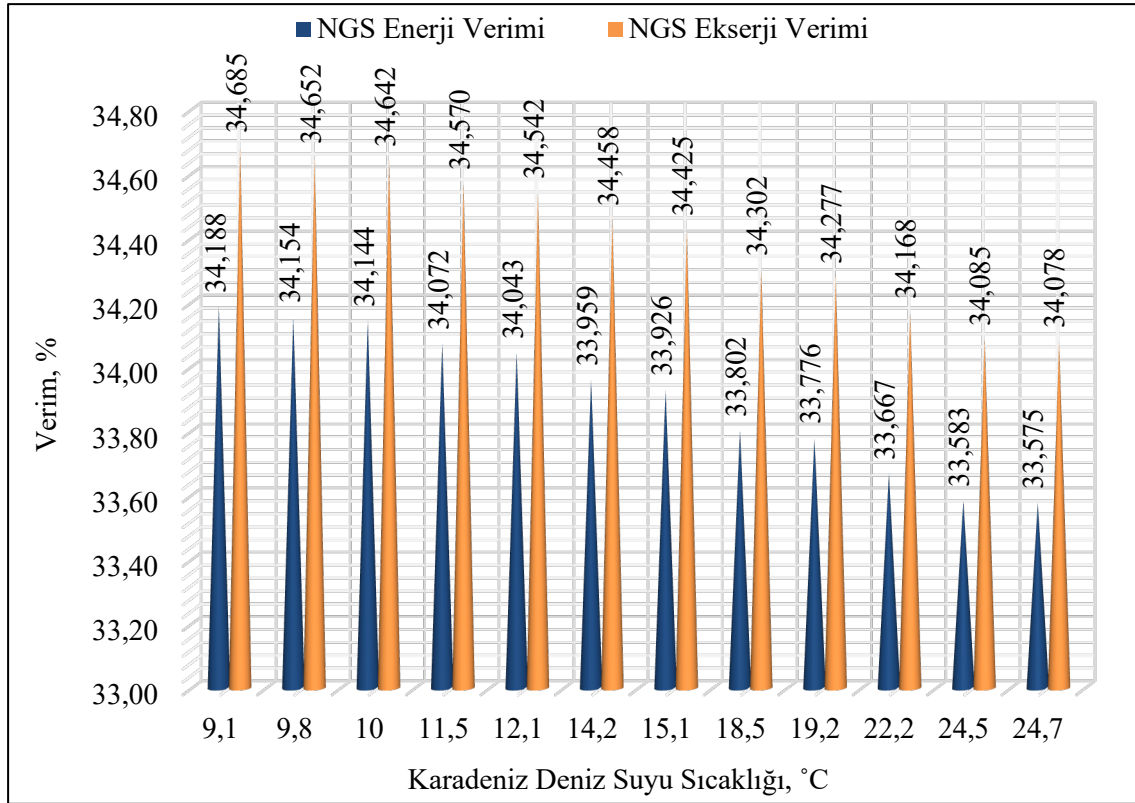
Şekil 4.1. Deniz suyu akış hızının Karadeniz deniz suyu sıcaklığına bağlı değişimi

Nükleer reaktörden elde edilen maksimum tersinir enerji 3002,8 MW olarak hesaplanmıştır. Reaktörden soğutma suyuna aktarılan enerji deniz suyu sıcaklığına bağlı değişim göstermektedir. Deniz suyu sıcaklığı arttıkça reaktörden soğutma suyuna aktarılan ısı enerjisi 1580,3 MW enerjiden 1501,7 MW enerjiye doğru azalış göstermiştir. Reaktörde fisyon tepkimesi sonucunda üretilen ısı enerjinin aktarımının azalması reaktörün verimini de azalmaktadır. Şekil 4.2’de gösterildiği gibi Karadeniz deniz suyu sıcaklığı arttıkça reaktörün ekserji verimi %52,63’ten %50,01’e düşmüştür.



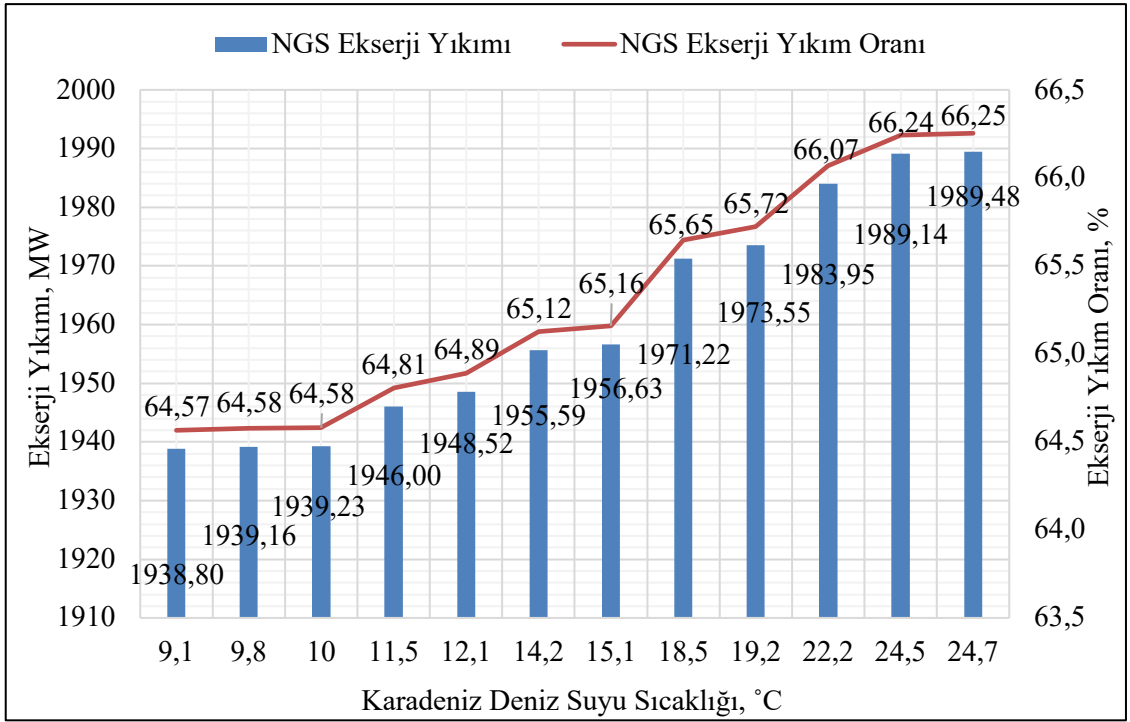
Şekil 4.2. Nükleer reaktörün Karadeniz deniz suyu sıcaklığına bağlı ekserji verimliliği

Şekil 4.3’te nükleer güç santralının enerji ve ekserji veriminin Karadeniz deniz suyu sıcaklığına bağlı değişimi çubuk grafik olarak gösterilmiştir. Bu grafiğe göre nükleer güç santralının enerji ve ekserji verimi deniz suyu sıcaklığı arttıkça azalmaktadır. Hesaplamalar sonucunda en fazla enerji ve ekserji verimi sırasıyla %34,19 ve %34,69’dur. Santralin en yüksek verimle çalıştığı ayın, deniz suyunun 9,1 °C ile en düşük olduğu mart ayı olduğu sonucuna varılmıştır. Nükleer santralin en düşük verimlilikte çalıştığı ay 24,7 °C deniz sıcaklığının gözlemlendiği ağustos ayı olarak hesaplanmıştır.



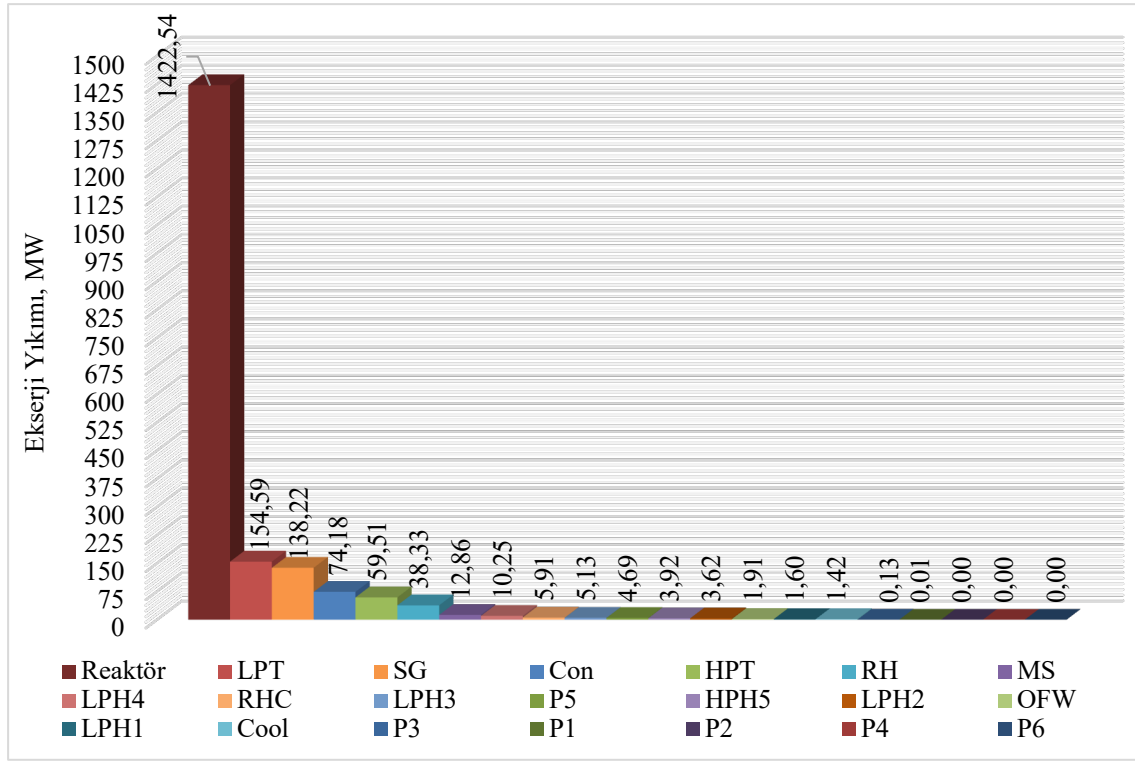
Şekil 4.3. NGS'nin Karadeniz deniz suyu sıcaklığına bağlı enerji ve ekserji verimi yüzdesi

Şekil 4.4'te nükleer güç santralının sıcaklığa bağlı tersinmezlik değeri ve oranı gösterilmektedir. NGS'nin ekserji yıkımı 1938,8 MW ile 1989,5 MW aralığında değişmektedir. Deniz suyu sıcaklığı arttıkça tersinmez güç artış göstermektedir ve tersinmezlik oranı %64,57'den %66,25'e artmaktadır.



Şekil 4.4. Nükleer güç santralının Karadeniz deniz suyu sıcaklığına bağlı ekserji yıkımı ve tersinmezlik oranı

Şekil 4.5'te NGS sistemlerinin ekserji yıkım grafiği gösterilmiştir. Ekserji yıkımının en fazla gerçekleştiği sistem 1422,54 MW ile reaktördür. Reaktörden sonra 15 MW'tan fazla ekserji yıkımına sahip olan sistemler sırası ile alçak basınçlı türbin (LP-T), buhar üretici (SG), kondansatör, yüksek basınçlı türbin (HP-T) ve kızdırıcıdır (RH). Diğer sistemlerin ekserji yıkımları 15 MW enerjinin altında hesaplanmıştır.



Şekil 4.5. NGS'nin alt birimlerinin mart ayındaki Karadeniz deniz suyu sıcaklığına bağlı ekserji yıkımları

5 YORUM

Bu tez çalışmasında, ülkemizde teknolojik ve endüstriyel gelişmelere istinaden artan enerji ihtiyaçlarını karşılamak üzere Karadeniz'in güney kıyılarına kurulabilecek bir nükleer güç santrali (NGS) termodinamik açıdan incelenmiştir ve mevsimsel olarak değişen deniz suyu sıcaklığının sistem üzerindeki etkisi enerji ve ekserji analizleri ile gösterilmiştir. Örnek sistem olarak İran'da Basra körfezi kıyısında bulunan ve Rus tasarımı VVER (Voda-Vodyanoi Energetichesky Reactor) tipi basınçlı su reaktörü içeren Bushehr santrali ve literatürde bulunan termodinamik verileri kullanılmıştır.

Hesaplamalar sonucunda NGS'nin ürettiği net gücün, deniz suyu sıcaklığı mart ayında görülen en düşük 9,1 °C'den ağustos ayında görülen en yüksek 24,7 °C'ye arttığında, 1026,6 MW'tan 1008,2 MW'a düştüğü belirlenmiştir. Deniz suyu sıcaklığının artması ile NGS'de toplam ekserji yıkımı 1938,8 MW'tan 1989,48 MW'a çıkmıştır, enerji verimi %34,19'dan %33,58'e ve ekserji verimi %34,68'den %34,08'e düşmüştür.

Sistemde en fazla enerji yıkımının olduğu birim nükleer reaktörü ihtiva eden birincil çevrimdir. NGS'de ekserji verimini en çok etkileyen sistem nükleer reaktördür. Bunun sebebi, nükleer reaktörde gerçekleşen fisyon tepkimesi sonucu açığa çıkan ısının önce yakıt çubuklarına ve daha sonra soğutucuya aktarılması sürecinde önemli kayıplar olmasıdır. Deniz suyu sıcaklığının yükselmesi nükleer reaktörün ekserji verimini olumsuz etkileyerek %52,63'ten %50,01'e düşmesine sebep olmuştur.

NGS'ye giren deniz suyu sıcaklığı 9,1 °C'den 24,7 °C'ye yükseldiğinde oluşan önemli bir sorun, santrali soğutmak için kondansatörde kullanılan bu suyun kütleli akış hızının 39942 kg/s'den 54791 kg/s'ye çıkmasıdır. Deniz suyu sıcaklığı yüksek olduğunda, kondansatörde uzaklaştırılması gereken ısıyı alabilecek daha büyük miktarda soğutma suyuna ihtiyaç duyulmaktadır. Su miktarının artması daha büyük pompalarla daha yüksek enerji sarf edilmesi ve iletkenliği yüksek olan deniz suyunun ekipmanda korozyon ve kireçlenmeye sebep olması demektir.

NGS'de kullanılan soğutma suyu sıcaklığının etkileri incelenirken iki önemli sınırlama göz önünde bulundurulmuştur. Birincisi, su sıcaklığı kondansatör çalışma basıncını etkilemektedir ve bu basınç düşük basınçlı türbinin çalışma koşullarına bağlı olarak güvenli bir aralıkta olmalıdır. Çalışmada kullanılan deniz suyu sıcaklıkları ile kondansatör 4-8 kPa güvenli çalışma aralığında kalmıştır. İkincisi, Su Kirliliği Kontrolü Yönetmeliği'nde 5. bölümde yer alan derin deniz deşarj kriterleri altında madde 35'te endüstriyel sistemlerde kullanılan soğutma suyunun denize deşarj sıcaklığının 35 °C'nin altında olması gerektiği belirtilmiştir [39]. Yapılan çalışmada kondansatörden denize deşarj edilen soğutma suyu sıcaklığının, sisteme beslenen deniz suyunun mevsimsel sıcaklığına ve kondansatörde yarattığı basınca bağlı olarak 21,12 °C ve 33,41 °C arasında değiştiği hesaplanmıştır ve mevzuata uygun olduğu tespit edilmiştir.

Bu tez çalışması, gelecekte Karadeniz kıyısında kurulabilecek bir nükleer santralin termodinamik analizi kapsamında yapılacak matematiksel modelleme çalışmaları için yol gösterici olacaktır.

6 KAYNAKLAR

1. Ağırallıoğlu, S., Ağırallıoğlu, N., *Türkiye’de Enerji ve Politikaları*. Takvim-i Vekayi, 2020. **8**(2): p. 166-198.
2. Bařođlu, B., Pezek, E., Erdemir, Z. *Nükleer Enerji ve Sürdürülebilir Kalkınma*. Nükleer Enerji Dünyası 2017 [cited 2022 8 Ekim]; Available from: http://www.nukleer.web.tr/ekonomik_idari/kalkinma01.html.
3. Dragunov, A., Saltanov, E., Pioro, I., Kirillov, P., Duffey, R. *Power Cycles of Generation III and III+ Nuclear Power Plants*. in *22nd International Conference on Nuclear Engineering ICONE22*. 2014. Prague Czech republic: ASME.
4. Akyuz, E., *Advantages and Disadvantages of Nuclear Energy in Turkey: Public Perception*. Eurasian Journal of Environmental Research, 2017. **1**: p. 1-11.
5. Bařođlu, B., Pezek, E., Erdemir, Z. *Nükleer Santral Türleri*. Nükleer Enerji Dünyası 2017 [cited 2022 8 Ekim]; Available from: http://www.nukleer.web.tr/nukleer_santral_turleri/nukleer_santral_turleri.html.
6. Todreas, N.E., Kazımı, M. S., *Principal Characteristics of Power Reactors*, in *Nuclear Systems Thermal Hydraulic Fundamentals*. 2021, CRC Press Taylor&Francis Group: Boca Raton, London NY. p. 1-31.
7. Knief, R.A., *Nuclear Engineering: Theory and Technology of Commercial Nuclear Power*. 2008, Bristol, PA: American Nuclear Society.
8. Mears, L.D., Goodjohn, A. J., *The status of high-temperature gas-cooled reactor development and design*. IAEA Bulletin, 1989. **Vol. 31**: p. 36-39.
9. Poplavski, V.M., Tsiboulia, A., Kamaev, A., Vasiliev, B., Kamanin, Yu., Timofeev, A., Ershov, V., Suknev, K., *Perspective Sodium Fast Reactor BN-1800*, in *International Conference on Fifty Years of Nuclear Power - the Next Fifty Years 2004*, International Atomic Energy Agency: Moscow/Obninsk, Russia. p. 110-111.
10. Lillington, J.L., Turland, B. D., Haste, T. J., Seiler, J. M., Tapia, J., Carretero, A., Perez, T., Geutges, A., Sehgal, B. R., Mattila, L., Holmstrom, H., Karwat, H., Maróti, L., Husarcek, J., *Main Characteristics of Nuclear Power Plants in the European Union and Candidate Countries*. 2001, AEA Technology.

11. Dudek, M., Jaszczur, M., Kolenda, Z., *Thermodynamic Analysis of Modular High-Temperature Nuclear Reactor Coupled with the Steam Cycle for Power Generation*. Archives of Thermodynamics, 2019. **40**: p. 49-66.
12. Poljancic, D., Mrzljak, V., *Energy and exergy analysis of a nuclear power plant*, in *Student Scientific Conference RiSTEM*. 2021: Croatia.
13. Talebi, S. and N. Norouzi, *Entropy and exergy analysis and optimization of the VVER nuclear power plant with a capacity of 1000 MW using the firefly optimization algorithm*. Nuclear Engineering and Technology, 2020. **52**(12): p. 2928-2938.
14. Khan, A.H. and M.S. Islam, *Prediction of thermal efficiency loss in nuclear power plants due to weather conditions in tropical region*. Energy Procedia, 2019. **160**: p. 84-91.
15. Khan, A.H., et al., *Development of an optimized thermodynamic model for VVER-1200 reactor-based nuclear power plants using genetic algorithm*. Alexandria Engineering Journal, 2022. **61**(11): p. 9129-9148.
16. Attia, S.I., *The influence of condenser cooling water temperature on the thermal efficiency of a nuclear power plant*. Annals of Nuclear Energy, 2015. **80**: p. 371-378.
17. Ebrahimgol, H., et al., *A novel approach in exergy optimization of a WWER1000 nuclear power plant using whale optimization algorithm*. Annals of Nuclear Energy, 2020. **145**.
18. Naserbegi, A., et al., *A novel exergy optimization of Bushehr nuclear power plant by gravitational search algorithm (GSA)*. Energy, 2018. **148**: p. 373-385.
19. Marques, J.G.O.A., Costa, L., Pereira, C., Fortini, A., *Energy and Exergy Analysis of ANGRA 2 Nuclear Power Plant*, in *International Nuclear Atlantic Conference - INAC*. 2017: Brazil.
20. Terzi, R., İ. Tükenmez, and E. Kurt, *Energy and exergy analyses of a VVER type nuclear power plant*. International Journal of Hydrogen Energy, 2016. **41**(29): p. 12465-12476.
21. Terzi, R., *Energy and Exergy Analyses of a VVER Type Nuclear Power Plant*, in *Chemical Engineering*. 2016, Gazi University. p. 121.

22. Murray, R.L., Holbert, K. E., *Fission*, in *Nuclear Energy: An Introduction to the Concepts, Systems, and Applications of Nuclear Processes*. 2020, Elsevier. p. 101-114.
23. Murray, R.L., Holbert, K. E., *Fusion*, in *Nuclear Energy: An Introduction to the Concepts, Systems, and Applications of Nuclear Processes*. 2020, Elsevier. p. 115-124.
24. Çengel, Y.A., Boles, M. A., *Thermodynamics: An Engineering Approach*. 8th ed. 2015: McGraw-Hill Education.
25. Türkeş, V., *Türkiyede kurulması planlanan III+ nesil bir nükleer enerji santrali için termal verimlilik hesabı*, in *Makine Mühendisliği*. 2020, Ege Üniversitesi. p. 91.
26. Murray, R.L., Holbert, K. E., *Nuclear Power Plants*, in *Nuclear Energy: An Introduction to the Concepts, Systems, and Applications of Nuclear Processes*. 2020, Elsevier. p. 325-348.
27. A.Ş., A.N.E.Ü., *Akkuyu Nükleer Güç Santrali Projesi*. 2011: Ankara, Türkiye.
28. Anonim. *Basınçlı su Reaktörü ve Nükleer Güç Santrali*. [cited 2022 8 Ekim]; Available from: <https://www.thesisat.org/basincli-su-reaktorleri-ve-nukleer-guc-santrali.html>.
29. Tompkins, B., *Power Reactors by Nation; Power Reactors by Type, Worldwide*, in *Nuclear News*. 2018, American Nuclear Society. p. 39-61.
30. Bejan, A., *Advance Engineering Thermodynamics*. 4th ed. 2016.
31. Assad, M.H.E., Rosen, M. A., *Exergy Analysis*, in *Design and Performance Optimization of Renewable Energy Systems*. 2021, Elsevier. p. 43-58.
32. Todreas, N.E., Kazımı, M. S., *Thermodynamics of Nuclear Energy Conversion Systems - Nonflow and Steady Flow: Applications of the First and Second Law of Thermodynamics*, in *Nuclear Systems Thermal Hydraulic Fundamentals*. 2021, CRC Press Taylor&Francis Group: Boca Raton, London NY. p. 215-290.
33. Ferroni, L., Natale, A., *Exergy Analysis of a PWR Nuclear Steam Supply System - Part I, General Theoretical Model*, in *73rd Conference of the Italian Thermal Machines Engineering Association*. 2018, Elsevier: Pisa Italy. p. 1230-1237.
34. Ferroni, L., Natale, A., *Exergy Analysis of a PWR Nuclear Steam Supply System - Part II, A Case Study*, in *73rd Conference of the Italian Thermal Machines Engineering Association*. 2018: Pisa Italy.

35. *Exergy, Energy System Analysis and Optimization*. 2009, Oxford United Kingdom: Eolss Publishers/UNESCO.
36. Pattanayak, L., Padhi, B. N., Kodamasingh, B., *Thermal performance assessment of steam surface condenser*. Case Studies in Thermal Engineering, 2019. **14**.
37. Taştan, F., *Karadeniz Deniz Suyu Sicakligi Analizi*. 2021, Çevre Şehircilik ve İklim Bakanlığı Meteoroloji Genel Müdürlüğü.
38. Teguh, N.H., L. Yulianti, and D.B. Darmadi, *Effect of seawater temperature rising to the performance of Northern Gorontalo small scale power plant*. Case Studies in Thermal Engineering, 2022. **32**.
39. *Su Kirliliği Kontrolü Yönetmeliği* Ç.Ş.İ. Bakanlığı, Editor. 2004, Resmi Gazete.

7 EKLER

7.1 EK-1: Nükleer Güç Santralının $T_0=9,1$ °C (@282,25 K; $h_0=38,24$ kJ/kg, $s_0=0,1376$ kJ/kgK) ve $P_{con}=4,28$ kPa için Termodinamik Hesaplamaları

7.1.1 Kondansatör Bölümünün Termodinamik Analizleri

7.1.1.1 Kondansatörün (Con) Termodinamik Eşitlikleri

Kondansatöre giren ve çıkan kütlelerin akış hızı (kg/s)

$$\begin{aligned}\dot{m}_{20} + \dot{m}_{24} &= \dot{m}_{21} \\ 921,27kg/s + 89,27kg/s - 1010,5kg/s &= 0kg/s\end{aligned}\tag{7.1}$$

Kondansatöre giren ve çıkan hatların termodinamik özelliklerinin belirlenmesi

$$\begin{aligned}T_{sat} &= 30,04 \text{ °C @ } P_{Con} = 4,28 \text{ kPa} \\ T_{44} &= T_0 = 9,1 \text{ °C} \\ C_p &= 4,197 \text{ kJ/kgK @ } 9,1 \text{ °C} \\ h_{20} &= 2307,81 \text{ kJ/kg @ } 4,28 \text{ kPa, } x_{20} = 0,898 \\ s_{20} &= 7,634 \text{ kJ/kgK @ } 4,28 \text{ kPa, } x_{20} = 0,898 \\ h_{21} &= 125,93 \text{ kJ/kg @ } 4,28 \text{ kPa, } x_{21} = 0 \\ s_{21} &= 125,93 \text{ kJ/kgK @ } 4,28 \text{ kPa, } x_{21} = 0 \\ h_{24} &= 175,74 \text{ kJ/kg @ } 4,28 \text{ kPa, } x_{24} = 0,0205 \\ s_{24} &= 0,602 \text{ kJ/kgK @ } 4,28 \text{ kPa, } x_{24} = 0,0205\end{aligned}$$

Kondansatörden çıkan deniz suyu sıcaklığının (T_{45}) hesaplaması (°C)

$$LMTD = ((T_{sat} - T_{44}) - (T_{sat} - T_{45})) / \ln((T_{sat} - T_{44}) / (T_{sat} - T_{45}))\tag{7.2}$$

$$(\dot{Q}_{Con})_{Rej} = UALMTD\tag{7.3}$$

$UA = 221519 \text{ kW/K}$ (Referans alınan makaledeki değerler kullanılarak hesaplanmıştır [18].)

$$(\dot{Q}_{Con})_{Add} = \dot{m}C_p dT = \dot{m}_{44}C_p(T_{45} - T_{44})\tag{7.4}$$

$$(\dot{Q}_{Con})_{Rej} - (\dot{Q}_{Con})_{Add} = 0$$

$$T_{45} = 21,12 \text{ °C}$$

$$h_{45} = 88,59 \text{ kJ/kg @ } 21,12 \text{ °C}$$

$$s_{45} = 0,312 \text{ kJ/kgK @ } 21,12 \text{ °C}$$

Kondansatöre giren ekserji ve çıkan ekserji (MW)

$$\begin{aligned}
 (\dot{E}x_{in})_{Con} &= (\dot{m}_{20}(h_{20}-h_0 - T_0(s_{20}-s_0)) \\
 &\quad + \dot{m}_{24}(h_{24}-h_0 - T_0(s_{24}-s_0)) \\
 &\quad + \dot{m}_{44}(h_{44}-h_0 - T_0(s_{44}-s_0)))/1000
 \end{aligned} \tag{7.5}$$

$$\begin{aligned}
 (\dot{E}x_{in})_{Con} &= ((921,27kg/s)(2307,8kJ/kg - 38,24kJ/kg \\
 &\quad - (282,25K)(7,634kJ/kgK - 0,1376kJ/kgK)) \\
 &\quad + (89,27kg/s)(175,74kJ/kg - 38,24kJ/kg \\
 &\quad - (282,25K)(0,602kJ/kgK - 0,1376kJ/kgK)) \\
 &\quad + (61912kg/s)(38,24kJ/kg - 38,24kJ/kg \\
 &\quad - (282,25K)(0,1376kJ/kgK - 0,1376kJ/kgK)))/1000 = 142,2MW
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 (\dot{E}x_{out})_{Con} &= (\dot{m}_{21}(h_{21}-h_0 - T_0(s_{21}-s_0)) \\
 &\quad + \dot{m}_{45}(h_{45}-h_0 - T_0(s_{45}-s_0)))/1000
 \end{aligned} \tag{7.6}$$

$$\begin{aligned}
 (\dot{E}x_{out})_{Con} &= ((1010,5kg/s)(125,9kJ/kg - 38,24kJ/kg \\
 &\quad - (282,25K)(0,437kJ/kgK - 0,1376kJ/kgK)) \\
 &\quad + (61912kg/s)(88,59kJ/kg - 38,24kJ/kg \\
 &\quad - (282,25K)(0,312kJ/kgK - 0,1376kJ/kgK)))/1000 = 68MW
 \end{aligned}$$

Kondansatörün ürettiği maksimum ısı enerjisi (MW)

$$\begin{aligned}
 (\dot{Q}_{u,max})_{Con} &= (\dot{E}x_{in})_{Con} - (\dot{E}x_{out})_{Con} \\
 (\dot{Q}_{u,max})_{Con} &= 142,2MW - 68MW = 74,2MW
 \end{aligned} \tag{7.7}$$

Kondansatörün ekserji yakıtı ve ekserji ürünü (MW)

$$\begin{aligned}
 (\dot{E}x_F)_{Con} &= (\dot{m}_{20}(h_{20} - h_0 - T_0(s_{20} - s_0)) + \dot{m}_{24}(h_{24} - h_0 - T_0(s_{24} - s_0)) \\
 &\quad - (\dot{m}_{21}(h_{21} - h_0 - T_0(s_{21} - s_0))))/1000
 \end{aligned} \tag{7.8}$$

$$\begin{aligned}
 (\dot{E}x_F)_{Con} &= (921,27kg/s)(2307,8kJ/kg - 38,24kJ/kg \\
 &\quad - (282,25K)(7,63kJ/kgK - 0,1376kJ/kgK)) \\
 &\quad + (89,27kg/s)(175,74kJ/kg - 38,24kJ/kg \\
 &\quad - (282,25K)(0,602kJ/kgK - 0,1376kJ/kgK)) \\
 &\quad - (1010,5kg/s)(125,93kJ/kg - 38,24kJ/kg \\
 &\quad - (282,25K)(0,437kJ/kgK - 0,1376kJ/kgK)))/1000 = 139,1MW
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 (\dot{E}x_P)_{Con} &= (\dot{m}_{45}(h_{45} - h_0 - T_0(s_{45} - s_0)) \\
 &\quad - \dot{m}_{44}(h_{44} - h_0 - T_0(s_{44} - s_0)))/1000
 \end{aligned} \tag{7.9}$$

$$\begin{aligned}
(\dot{E}x_P)_{Con} &= ((61912kg/s)(88,59kJ/kg - 38,24kJ/kg \\
&\quad - (282,25K)(0,312kJ/kgK - 0,1376kJ/kgK)) \\
&\quad - (61912kg/s)(38,24kJ/kg - 38,24kJ/kg \\
&\quad - (282,25K)(0,1376kJ/kgK - 0,1376kJ/kgK))/1000 = 64,9MW
\end{aligned}$$

Kondansatördeki tersinmezlik (MW)

$$\begin{aligned}
\dot{I}_{Con} &= (\dot{E}x_F)_{Con} - (\dot{E}x_P)_{Con} & (7.10) \\
\dot{I}_{Con} &= 139,1MW - 64,9MW = 74,2MW
\end{aligned}$$

Kondansatörün ekserji verimi (%)

$$\begin{aligned}
\zeta_{Con} &= (\dot{E}x_P)_{Con}/(\dot{E}x_F)_{Con} \times 100 & (7.11) \\
\zeta_{Con} &= (64,9MW/139,1MW) \times 100 = 46,7\%
\end{aligned}$$

Kondansatör bölümünün (Con) toplam ekserji yıkımı (MW)

$$\begin{aligned}
(\dot{E}x_D)_{Con} &= \dot{I}_{Con} & (7.12) \\
(\dot{E}x_D)_{Con} &= 74,2MW
\end{aligned}$$

7.1.2 Birincil Çevrimin Termodinamik Analizleri

7.1.2.1 Nükleer Reaktörün Termodinamik Eşitlikleri

Reaktöre giren ve çıkan soğutucu suyun kütle akış hızı (kg/s)

$$\begin{aligned}
\dot{m}_3 &= \dot{m}_1 & (7.13) \\
16800 \text{ kg/s} &= 16800 \text{ kg/s}
\end{aligned}$$

Reaktöre giren ekserji ve çıkan ekserji (MW)

$$(\dot{E}x_{in})_R = \dot{m}_3(h_3 - h_0 - T_0(s_3 - s_0))/1000 & (7.14)$$

$$\begin{aligned}
(\dot{E}x_{in})_R &= (16800kg/s)((1290,3kJ/kg - 38,24kJ/kg - (282,25K)(3,16kJ/kgK \\
&\quad - 0,1376kJ/kgK))/1000 = 6703 \text{ MW}
\end{aligned}$$

$$(\dot{E}x_{out})_R = \dot{m}_1(h_1 - h_0 - T_0(s_1 - s_0))/1000 & (7.15)$$

$$\begin{aligned}
(\dot{E}x_{out})_R &= (16800kg/s)((1469,04kJ/kg - 38,24kJ/kg \\
&\quad - (282,25K)(3,46kJ/kgK - 0,1376kJ/kgK))/1000 = 8283 \text{ MW}
\end{aligned}$$

Reaktörün ürettiği maksimum ısıl enerji (MW)

$$(\dot{Q}_{u,max})_R = \dot{m}_1(h_1 - h_3)/1000 \quad (7.16)$$

$$(\dot{Q}_{u,max})_R = ((16800\text{kg/s})(1469,04\text{kJ/kg} - 1290,3\text{kJ/kg}))/1000 = 3002,8\text{MW}$$

Reaktörün ürettiği gerçek ısıl enerji (MW)

$$(\dot{Q}_{actual})_R = (\dot{E}x_{in})_R - (\dot{E}x_{out})_R \quad (7.17)$$

$$(\dot{Q}_{actual})_R = 6703\text{MW} - 8283\text{MW} = 1580\text{MW}$$

Reaktördeki tersinmezlik (MW)

$$\dot{I}_R = |(\dot{Q}_{actual})_R| - |(\dot{Q}_{u,max})_R| \quad (7.18)$$

$$\dot{I}_R = 3002,8\text{MW} - 1580\text{MW} = 1422,8\text{MW}$$

Reaktörün ekserji verimi (%)

$$\zeta_R = (|(\dot{Q}_{actual})_R|/|(\dot{Q}_{u,max})_R|) \times 100 \quad (7.19)$$

$$\zeta_R = (1580\text{MW}/3002,8\text{MW}) \times 100 = 52,6\%$$

7.1.2.2 Buhar Üreticinin (SG) Termodinamik Eşitlikleri

Buhar üreticinin giren ve çıkan kütlelerin akış hızı (kg/s)

$$\dot{m}_1 + \dot{m}_5 = \dot{m}_2 + \dot{m}_4 \quad (7.20)$$

$$16800\text{kg/s} + 1661,11\text{kg/s} - 16800\text{kg/s} - 1661,11\text{kg/s} = 0$$

Buhar üreticisine giren ekserji ve çıkan ekserji (MW)

$$(\dot{E}x_{in})_{SG} = (\dot{m}_1(h_1 - h_0 - T_0(s_1 - s_0)) + \dot{m}_5(h_5 - h_0 - T_0(s_5 - s_0)))/1000 \quad (7.21)$$

$$(\dot{E}x_{in})_{SG} = (16800\text{kg/s})(1469,04\text{kJ/kg} - 38,24\text{kJ/kg} - (282,25\text{K})(3,46\text{kJ/kgK} - 0,1376\text{kJ/kgK})) + (1661,11\text{kg/s})(962,1\text{kJ/kg} - 38,24\text{kJ/kg} - (282,25\text{K})(2,55\text{kJ/kgK} - 0,1376\text{kJ/kgK}))/1000 = 8686,9\text{MW}$$

$$(\dot{E}x_{out})_{SG} = (\dot{m}_2(h_2 - h_0 - T_0(s_2 - s_0)) + \dot{m}_4(h_4 - h_0 - T_0(s_4 - s_0)))/1000 \quad (7.22)$$

$$(\dot{E}x_{out})_{SG} = (16800\text{kg/s})(1289,7\text{kJ/kg} - 38,24\text{kJ/kg} - (282,25\text{K})(3,16\text{kJ/kgK} - 0,1376\text{kJ/kgK})) + (1661,11\text{kg/s})((2776,2\text{kJ/kg} - 38,24\text{kJ/kg} - (282,25\text{K})(5,88\text{kJ/kgK} - 0,1376\text{kJ/kgK}))/1000 = 8548,6\text{MW}$$

Buhar üreticinin ürettiği maksimum ısıl enerji (MW)

$$(\dot{Q}_{u,max})_{SG} = (\dot{E}x_{in})_{SG} - (\dot{E}x_{out})_{SG} \quad (7.23)$$

$$(\dot{Q}_{u,max})_{SG} = 8686,9MW - 8548,6MW = 138,3MW$$

Buhar üreticinin ekserji yakıtı ve ekserji ürünü (MW)

$$(\dot{E}_F)_{SG} = (\dot{m}_1(h_1 - h_0 - T_0(s_1 - s_0)) - \dot{m}_2(h_2 - h_0 - T_0(s_2 - s_0)))/1000 \quad (7.24)$$

$$(\dot{E}_F)_{SG} = ((16800kg/s)(1469,04kJ/kg - 38,24kJ/kg - (282,25K)(3,46kJ/kgK - 0,1376kJ/kgK)) - (16800kg/s)(1289,70kJ/kg - 38,24kJ/kg - (282,25K)(3,16kJ/kgK - 0,1376kJ/kgK)))/1000 = 1590MW$$

$$(\dot{E}_P)_{SG} = \dot{m}_4(h_4 - h_0 - T_0(s_4 - s_0)) - \dot{m}_5(h_5 - h_0 - T_0(s_5 - s_0))/1000 \quad (7.25)$$

$$(\dot{E}_P)_{SG} = ((1661kg/s)(2776,20kJ/kg - 38,24kJ/kg - (282,25K)(5,88kJ/kgK - 0,1376kJ/kgK)) - (1661kg/s)(962,10kJ/kg - 38,24kJ/kg - (282,25K)(2,55kJ/kgK - 0,1376kJ/kgK)))/1000 = 1452,1MW$$

Buhar üreticinde tersinmezlik (MW)

$$\dot{I}_{SG} = (\dot{E}_F)_{SG} - (\dot{E}_P)_{SG} \quad (7.26)$$

$$\dot{I}_{SG} = 1590MW - 1452,1MW = 137,9MW$$

Buhar üreticinin ekserji verimi (%)

$$\zeta_{SG} = (\dot{E}_P)_{SG}/(\dot{E}_F)_{SG} \times 100 \quad (7.27)$$

$$\zeta_{SG} = (1452,1MW/1590MW) \times 100 = 91,3\%$$

7.1.2.3 Reaktör Soğutma Pompasının (P6) Termodinamik Eşitlikleri

P6'ya giren ve çıkan kütlelerin akış hızı (kg/s)

$$\dot{m}_2 = \dot{m}_3 \quad (7.28)$$

$$16800kg/s = 16800kg/s$$

P6'ya giren ekserji ve çıkan ekserji (MW)

$$(\dot{E}x_{in})_{P6} = \dot{m}_2(h_2 - h_0 - T_0(s_2 - s_0))/1000 \quad (7.29)$$

$$(\dot{E}x_{in})_{P6} = ((16800kg/s)(1289,7kJ/kg - 38,24kJ/kg - (282,25K)(3,16kJ/kgK - 0,1376kJ/kgK)))/1000 = 6692,9MW$$

$$(\dot{E}x_{out})_{P6} = \dot{m}_3(h_3 - h_0 - T_0(s_3 - s_0))/1000 \quad (7.30)$$

$$(\dot{E}x_{out})_{P6} = (16800kg/s)(1290,3kJ/kg - 38,24kJ/kg - (282,25K)(3,16kJ/kgK - 0,1376kJ/kgK))/1000 = 6703MW$$

P6'nin maksimum işi (MW)

$$(\dot{W}_{u,max})_{P6} = (\dot{E}x_{in})_{P6} - (\dot{E}x_{out})_{P6} \quad (7.31)$$

$$(\dot{W}_{u,max})_{P6} = 6692,9MW - 6703MW = -10,1MW$$

P6'nin gerçek işi (MW)

$$(\dot{W}_{actual})_{P6} = (\dot{m}_3h_3 - \dot{m}_2h_2)/1000 \quad (7.32)$$

$$(\dot{W}_{actual})_{P6} = (16800kg/s)(1290,3kJ/kg - 1289,7kJ/kg)/1000 = 10,1MW$$

P6'nin ekserji yakıtı ve ekserji ürünü (MW)

$$(\dot{E}_F)_{P6} = (\dot{W}_{actual})_{P6} \quad (7.33)$$

$$(\dot{E}_F)_{P6} = 10,1MW$$

$$(\dot{E}_P)_{P6} = |(\dot{W}_{u,max})_{P6}| \quad (7.34)$$

$$(\dot{E}_P)_{P6} = 10,1MW$$

P6'daki tersinmezlik (MW)

$$\dot{I}_{P6} = (\dot{E}_F)_{P6} - (\dot{E}_P)_{P6} \quad (7.35)$$

$$\dot{I}_{P6} = 10,1MW - 10,1MW = 0MW$$

P6'nin ekserji verimi (%)

$$\zeta_{P6} = ((\dot{E}x_P)_{P6}/(\dot{E}x_F)_{P6}) \times 100 \quad (7.36)$$

$$\zeta_{P6} = (10,1MW/10,1MW) \times 100 = 100\%$$

Birincil çevrimin (BÇ) toplam ekserji yıkımı (MW)

$$(\dot{E}x_D)_{Birincil} = \dot{I}_R + \dot{I}_{SG} + \dot{I}_{P6} \quad (7.37)$$

$$(\dot{E}x_D)_{Birincil} = 1422,8MW + 137,9MW + 0MW = 1560,7MW$$

7.1.3 Güç Üretim Bölümünün Termodinamik Analizleri

7.1.3.1 Yüksek Basıncılı Türbinlerin (HP-T) Termodinamik Eşitlikleri

HP-T'ye giren ve çıkan buharın kütle akış hızı (kg/s)

$$\dot{m}_7 = \dot{m}_8 + \dot{m}_9 + \dot{m}_{10} \quad (7.38)$$

$$1543,8kg/s - 129,94kg/s - 64,63kg/s - 1349kg/s = 0,23kg/s$$

Yüksek basıncılı türbinlere giren ekserji ve çıkan ekserji (MW)

$$(\dot{E}x_{in})_{HP-T} = \dot{m}_7(h_7 - h_0 - T_0(s_7 - s_0))/1000 \quad (7.39)$$

$$(\dot{E}x_{in})_{HP-T} = ((1543,8kg/s)(2776,2kJ/kg - 38,24kJ/kg - (282,25K)(5,88kJ/kgK - 0,1376kJ/kgK)))/1000 = 1724,4MW$$

$$(\dot{E}x_{out})_{HP-T} = (\dot{m}_8(h_8 - h_0 - T_0(s_8 - s_0)) + \dot{m}_9(h_9 - h_0 - T_0(s_9 - s_0)) + \dot{m}_{10}(h_{10} - h_0 - T_0(s_{10} - s_0)))/1000 \quad (7.40)$$

$$(\dot{E}x_{out})_{HP-T} = ((129,94kg/s)(2663,9kJ/kg - 38,24kJ/kg - (282,25K)(5,97kJ/kgK - 0,1376kJ/kgK)) + (64,64kg/s)(2551,3kJ/kg - 38,24kJ/kg - (282,25K)(6,04kJ/kgK - 0,1376kJ/kgK)) + (1349kg/s)(2481,4kJ/kg - 38,24kJ/kg - (282,25K)(6,02kJ/kgK - 0,1376kJ/kgK)))/1000 = 1238,1MW$$

HP-T'nin maksimum işi (MW)

$$(\dot{W}_{u,max})_{HP-T} = (\dot{E}x_{in})_{HP-T} - (\dot{E}x_{out})_{HP-T} \quad (7.41)$$

$$(\dot{W}_{u,max})_{HP-T} = 1724,4MW - 1238,1MW = 486,3MW$$

HP-T'nin gerçek işi (MW)

$$(\dot{W}_{actual})_{HP-T} = (\dot{m}_7h_7 - \dot{m}_8h_8 - \dot{m}_9h_9 - \dot{m}_{10}h_{10})/1000 \quad (7.42)$$

$$(\dot{W}_{actual})_{HP-T} = ((1543,8kg/s)(2776,2kJ/kg) - (129,94kg/s)(2663,9kJ/kg) - (64,64kg/s)(2551,3kJ/kg) - (1349kg/s)(2481,4kJ/kg))/1000 = -426,8MW$$

HP-T'nin ekserji yakıtı ve ekserji ürünü (MW)

$$(\dot{E}x_F)_{HP-T} = (\dot{W}_{u,max})_{HP-T} \quad (7.43)$$

$$(\dot{E}x_F)_{HP-T} = 486,3MW$$

$$(\dot{E}x_P)_{HP-T} = |(\dot{W}_{actual})_{HP-T}| \quad (7.44)$$

$$(\dot{E}x_P)_{HP-T} = 426,8MW$$

HP-T'deki tersinmezlik (MW)

$$\begin{aligned} \dot{I}_{HP-T} &= |(\dot{E}x_F)_{HP-T}| - |(\dot{E}x_P)_{HP-T}| \\ \dot{I}_{HP-T} &= 486,3MW - 426,8MW = 59,5MW \end{aligned} \quad (7.45)$$

HP-T'nin ekserji verimi (%)

$$\begin{aligned} \zeta_{HP-T} &= (\dot{E}x_P)_{HP-T}/(\dot{E}x_F)_{HP-T} \times 100 \\ \zeta_{HP-T} &= (426,8MW/486,3MW) \times 100 = 87,8\% \end{aligned} \quad (7.46)$$

7.1.3.2 Alçak Basıncılı Türbinlerin (LP-T) Termodinamik Eşitlikleri

LP-T'ye giren ve çıkan buharın kütle akış hızı (kg/s)

$$\begin{aligned} \dot{m}_{16} &= \dot{m}_{17} + \dot{m}_{18} + \dot{m}_{19} + \dot{m}_{20} \\ 1057,27kg/s - 46,72kg/s - 43,55kg/s - 45,72kg/s - 921,27kg/s &= 0kg/s \end{aligned} \quad (7.47)$$

LP-T'ye giren ekserji ve çıkan ekserji (MW)

$$(\dot{E}x_{in})_{LP-T} = \dot{m}_{16}(h_{16} - h_0 - T_0(s_{16} - s_0))/1000 \quad (7.48)$$

$$(\dot{E}x_{in})_{LP-T} = (1057,27kg/s)(2933,5kJ/kg - 38,24kJ/kg - (282,25K)(7,06kJ/kgK - 0,1376kJ/kgK))/1000 = 995,3MW$$

$$(\dot{E}x_{out})_{LP-T} =$$

$$(\dot{m}_{17}(h_{17} - h_0 - T_0(s_{17} - s_0)) + \dot{m}_{18}(h_{18} - h_0 - T_0(s_{18} - s_0)) + \dot{m}_{19}(h_{19} - h_0 - T_0(s_{19} - s_0)) + \dot{m}_{20}(h_{20} - h_0 - T_0(s_{20} - s_0)))/1000 \quad (7.49)$$

$$(\dot{E}x_{out})_{LP-T} =$$

$$\begin{aligned} &((46,72kg/s)(2723,8kJ/kg - 38,24kJ/kg - (282,25K)(7,18kJ/kgK - 0,1376kJ/kgK)) + (43,55kg/s)(2584,5kJ/kg - 38,24kJ/kg - (282,25K)(7,18kJ/kgK - 0,1376kJ/kgK)) \\ &+ (45,74kg/s)(2470,5kJ/kg - 38,24kJ/kg - (282,25K)(7,24kJ/kgK - 0,1376kJ/kgK)) \\ &+ (921,27kg/s)(2307,8kJ/kg - 38,24kJ/kg - (282,25K)(7,63kJ/kgK - 0,1376kJ/kgK)))/1000 = 218,1MW \end{aligned}$$

LP-T'nin maksimum işi (MW)

$$(\dot{W}_{u,max})_{LP-T} = (\dot{E}x_{in})_{LP-T} - (\dot{E}x_{out})_{LP-T} \quad (7.50)$$

$$(\dot{W}_{u,max})_{LP-T} = 995,3MW - 218,1MW = 777,2MW$$

LP-T'nin gerçek işi (MW)

$$(\dot{W}_{actual})_{LP-T} = (\dot{m}_{16}h_{16} - \dot{m}_{17}h_{17} - \dot{m}_{18}h_{18} - \dot{m}_{19}h_{19} - \dot{m}_{20}h_{20})/1000 \quad (7.51)$$

$$\begin{aligned} (\dot{W}_{actual})_{LP-T} &= ((1057,27kg/s)(2933,5kJ/kg) - (46,72kg/s)(2723,8kJ/kg) \\ &\quad - (43,55kg/s)(2584,5kJ/kg) - (45,74kg/s)(2470,5kJ/kg) \\ &\quad - (921,27kg/s)(2307,8kJ/kg))/1000 = -622,6MW \end{aligned}$$

LP-T'nin ekserji yakıtı ve ekserji ürünü (MW)

$$(\dot{E}x_F)_{LP-T} = (\dot{W}_{u,max})_{LP-T} \quad (7.52)$$

$$(\dot{E}x_F)_{LP-T} = 777,2MW$$

$$(\dot{E}x_P)_{LP-T} = |(\dot{W}_{actual})_{LP-T}| \quad (7.53)$$

$$(\dot{E}x_P)_{LP-T} = 622,6MW$$

LP-T'deki tersinmezlik (MW)

$$\dot{I}_{LP-T} = |(\dot{E}x_F)_{LP-T}| - |(\dot{E}x_P)_{LP-T}| \quad (7.54)$$

$$\dot{I}_{LP-T} = 777,2MW - 622,6MW = 154,6MW$$

LP-T'nin ekserji verimi (%)

$$\zeta_{LP-T} = ((\dot{E}x_P)_{LP-T}/(\dot{E}x_F)_{LP-T}) \times 100 \quad (7.55)$$

$$\zeta_{LP-T} = (622,6MW/777,2MW) \times 100 = 80,1\%$$

7.1.3.3 Kızdırıcının (RH) Termodinamik Eşitlikleri

RH'ye giren ve çıkan kütlelerin akış hızı (kg/s)

$$\dot{m}_6 + \dot{m}_{14} = \dot{m}_{15} + \dot{m}_{16} \quad (7.56)$$

$$117,53kg/s + 1057,27kg/s - 117,52kg/s - 1057,27kg/s = 0kg/s$$

RH'ye giren ekserji ve çıkan ekserji (MW)

$$(\dot{E}x_{in})_{RH} =$$

$$(\dot{m}_6(h_6 - h_0 - T_0(s_6 - s_0)) + \dot{m}_{14}(h_{14} - h_0 - T_0(s_{14} - s_0)))/1000 \quad (7.57)$$

$$\begin{aligned} (\dot{E}x_{in})_{RH} &= ((117,53kg/s)(2776,2kJ/kg - 38,24kJ/kg - (282,25K)(5,88kJ/kgK \\ &\quad - 0,1376kJ/kgK)) + (1057,27kg/s)(2757,1kJ/kg - 38,24kJ/kg \\ &\quad - (282,25K)(6,60kJ/kgK - 0,1376kJ/kgK))/1000 = 1077,4MW \end{aligned}$$

$$(\dot{E}x_{out})_{RH} = (\dot{m}_{15}(h_{15} - h_0 - T_0(s_{15} - s_0)) + \dot{m}_{16}(h_{16} - h_0 - T_0(s_{16} - s_0)))/1000 \quad (7.58)$$

$$(\dot{E}x_{out})_{RH} = ((117,52\text{kg/s})(1190,1\text{kJ/kg} - 38,24\text{kJ/kg} - (282,25\text{K})(2,90\text{kJ/kgK} - 0,1376\text{kJ/kgK})) + (1057,27\text{kg/s})(2933,5\text{kJ/kg} - 38,24\text{kJ/kg} - (282,25\text{K})(7,06\text{kJ/kgK} - 0,1376\text{kJ/kgK}))/1000 = 1039\text{MW}$$

RH'nin maksimum ısı enerjisi (MW)

$$(\dot{Q}_{u,max})_{RH} = (\dot{E}x_{in})_{RH} - (\dot{E}x_{out})_{RH} \quad (7.59)$$

$$(\dot{Q}_{u,max})_{RH} = 1077,4\text{MW} - 1039\text{MW} = 38,4\text{MW}$$

RH'nin ekserji yakıtı ve ekserji ürünü (MW)

$$(\dot{E}x_F)_{RH} = (\dot{m}_6(h_6 - h_0 - T_0(s_6 - s_0)) - \dot{m}_{15}(h_{15} - h_0 - T_0(s_{15} - s_0)))/1000 \quad (7.60)$$

$$(\dot{E}x_F)_{RH} = ((117,53\text{kg/s})(2776,2\text{kJ/kg} - 38,24\text{kJ/kg} - (282,25\text{K})(5,88\text{kJ/kgK} - 0,1376\text{kJ/kgK})) - (117,52\text{kg/s})(1190,1\text{kJ/kg} - 38,24\text{kJ/kg} - (282,25\text{K})(2,90\text{kJ/kgK} - 0,1376\text{kJ/kgK}))/1000 = 87,6\text{MW}$$

$$(\dot{E}x_P)_{RH} = (\dot{m}_{16}(h_{16} - h_0 - T_0(s_{16} - s_0)) - \dot{m}_{14}(h_{14} - h_0 - T_0(s_{14} - s_0)))/1000 \quad (7.61)$$

$$(\dot{E}x_P)_{RH} = ((1057,27\text{kg/s})(2933,50\text{kJ/kg} - 38,24\text{kJ/kg} - (282,25\text{K})(7,06\text{kJ/kgK} - 0,1376\text{kJ/kgK})) - (1057,27\text{kg/s})(2757,10\text{kJ/kg} - 38,24\text{kJ/kg} - (282,25\text{K})(6,60\text{kJ/kgK} - 0,1376\text{kJ/kgK}))/1000 = 49,2\text{MW}$$

RH'deki tersinmezlik (MW)

$$\dot{I}_{RH} = (\dot{E}x_F)_{RH} - (\dot{E}x_P)_{RH} \quad (7.62)$$

$$\dot{I}_{RH} = 87,6\text{MW} - 49,2\text{MW} = 38,4\text{MW}$$

RH'nin ekserji verimi (%)

$$\zeta_{RH} = (\dot{E}P)_{RH}/(\dot{E}F)_{RH} \times 100 \quad (7.63)$$

$$\zeta_{RH} = (49,2\text{MW}/87,6\text{MW}) \times 100 = 56,2\%$$

7.1.3.4 Buhar Ayırıcısının (MS) Termodinamik Eşitlikleri

MS'ye giren ve çıkan kütlelerin akış hızı (kg/s)

$$\dot{m}_{11} = \dot{m}_{13} + \dot{m}_{14} \quad (7.64)$$

$$1221,58 \text{ kg/s} - 164,3 \text{ kg/s} - 1057,27 \text{ kg/s} = 0 \text{ kg/s}$$

MS'ye giren ekserji ve çıkan ekserji (MW)

$$(\dot{E}x_{in})_{MS} = \dot{m}_{11}(h_{11} - h_0 - T_0(s_{11} - s_0))/1000 \quad (7.65)$$

$$(\dot{E}x_{in})_{MS} = ((1221,58 \text{ kg/s})(2481,4 \text{ kJ/kg} - 38,24 \text{ kJ/kg} - (282,25 \text{ K})(6,02 \text{ kJ/kgK} - 0,1376 \text{ kJ/kgK}))/1000 = 956,3 \text{ MW}$$

$$(\dot{E}x_{out})_{MS} =$$

$$(\dot{m}_{13}(h_{13} - h_0 - T_0(s_{13} - s_0)) + \dot{m}_{14}(h_{14} - h_0 - T_0(s_{14} - s_0)))/1000 \quad (7.66)$$

$$(\dot{E}x_{out})_{MS} = ((164,3 \text{ kg/s})(707,2 \text{ kJ/kg} - 38,24 \text{ kJ/kg} - (282,25 \text{ K})(2,01 \text{ kJ/kgK} - 0,1376 \text{ kJ/kgK})) + (1057,27 \text{ kg/s})(2757,1 \text{ kJ/kg} - 38,24 \text{ kJ/kg} - (282,25 \text{ K})(6,60 \text{ kJ/kgK} - 0,1376 \text{ kJ/kgK}))/1000 = 969,2 \text{ MW}$$

MS'nin maksimum ısı enerjisi (MW)

$$(\dot{Q}_{u,max})_{MS} = (\dot{E}x_{in})_{MS} - (\dot{E}x_{out})_{MS} \quad (7.67)$$

$$(\dot{Q}_{u,max})_{MS} = 956,3 \text{ MW} - 969,2 \text{ MW} = -12,9 \text{ MW}$$

MS'nin ekserji yakıtı ve ekserji ürünü (MW)

$$(\dot{E}F)_{MS} = (\dot{m}_{14}(h_{14} - h_0 - T_0(s_{14} - s_0)))/1000 \quad (7.68)$$

$$(\dot{E}F)_{MS} = ((1057,27 \text{ kg/s})(2757,10 \text{ kJ/kg} - 38,24 \text{ kJ/kg} - (282,25 \text{ K})(6,60 \text{ kJ/kgK} - 0,1376 \text{ kJ/kgK}))/1000 = 946,1 \text{ MW}$$

$$(\dot{E}P)_{MS} = (\dot{m}_{11}(h_{11} - h_0 - T_0(s_{11} - s_0))$$

$$- (\dot{m}_{13}(h_{13} - h_0 - T_0(s_{13} - s_0)))/1000 \quad (7.69)$$

$$(\dot{E}P)_{MS} = ((1221,58 \text{ kg/s})(2481,40 \text{ kJ/kg} - 38,24 \text{ kJ/kg} - (282,25 \text{ K})(6,02 \text{ kJ/kgK} - 0,1376 \text{ kJ/kgK})) - (164,30 \text{ kg/s})(707,20 \text{ kJ/kg} - 38,24 \text{ kJ/kg} - (282,25 \text{ K})(2,01 \text{ kJ/kgK} - 0,1376 \text{ kJ/kgK}))/1000 = 933,2 \text{ MW}$$

MS'deki tersinmezlik (MW)

$$\dot{I}_{MS} = (\dot{E}F)_{MS} - (\dot{E}P)_{MS} \quad (7.70)$$

$$\dot{I}_{MS} = 946,1 \text{ MW} - 933,2 \text{ MW} = 12,9 \text{ MW}$$

MS'nin ekserji verimi (%)

$$\zeta_{MS} = (\dot{E}_P)_{MS}/(\dot{E}_F)_{MS} \times 100 \quad (7.71)$$

$$\zeta_{MS} = (933,2MW/946,1MW) \times 100 = 98,6\%$$

Güç üretim bölümünün (GÜ) toplam ekserji yıkımı (MW)

$$(\dot{E}x_D)_{GÜ} = \dot{I}_{HP-T} + \dot{I}_{LP-T} + \dot{I}_{RH} + \dot{I}_{MS} \quad (7.72)$$

$$(\dot{E}x_D)_{GÜ} = 59,5MW + 154,6MW + 38,4MW + 12,9MW = 265,4MW$$

7.1.4 Ön Isıtma Bölümünün Termodinamik Analizleri

7.1.4.1 Düşük Basıncılı Su Isıtıcısı-1 (LPH1) Termodinamik Eşitlikleri

LPH1'e giren ve çıkan kütlelerin akış hızı (kg/s)

$$\dot{m}_{24} + \dot{m}_{25} = \dot{m}_{19} + \dot{m}_{23} + \dot{m}_{27} \quad (7.73)$$

$$89,27kg/s + 1010,55kg/s - 45,72kg/s - 1010,55kg/s - 43,55kg/s = 0kg/s$$

LPH-1 giren ekserji ve çıkan ekserji (MW)

$$(\dot{E}x_{in})_{LPH1} = (\dot{m}_{19}(h_{19} - h_0 - T_0(s_{19} - s_0)) + \dot{m}_{23}(h_{23} - h_0 - T_0(s_{23} - s_0)) + \dot{m}_{27}(h_{27} - h_0 - T_0(s_{27} - s_0)))/1000 \quad (7.74)$$

$$(\dot{E}x_{in})_{LPH1} = ((45,72kg/s)(2470,5kJ/kg - 38,24kJ/kg - (282,25K)(7,24kJ/kgK - 0,1376kJ/kgK)) + (1010,55kg/s)(170,5kJ/kg - 38,24kJ/kg - (282,25K)(0,58kJ/kgK - 0,1376kJ/kgK)) + (43,55kg/s)(385kJ/kg - 38,24kJ/kg - (282,25K)(1,22kJ/kgK - 0,1376kJ/kgK)))/1000 = 26MW$$

$$(\dot{E}x_{out})_{LPH1} = (\dot{m}_{24}(h_{24} - h_0 - T_0(s_{24} - s_0)) + \dot{m}_{25}(h_{25} - h_0 - T_0(s_{25} - s_0)))/1000 \quad (7.75)$$

$$(\dot{E}x_{out})_{LPH1} = ((89,27kg/s)(175,74kJ/kg - 38,24kJ/kg - (282,25K)(0,602kJ/kgK - 0,1376kJ/kgK)) + (1010,55kg/s)(279,8kJ/kg - 38,24kJ/kg - (282,25K)(0,91kJ/kgK - 0,1376kJ/kgK)))/1000 = 24,4MW$$

LPH1'in maksimum ısı enerjisi (MW)

$$(\dot{Q}_{u,max})_{LPH1} = (\dot{E}x_{in})_{LPH1} - (\dot{E}x_{out})_{LPH1} \quad (7.76)$$

$$(\dot{Q}_{u,max})_{LPH1} = 26MW - 24,4MW = 1,6MW$$

LPH1'in ekserji yakıtı ve ekserji ürünü (MW)

$$(\dot{E}_F)_{LPH1} = (\dot{m}_{19}(h_{19} - h_0 - T_0(s_{19} - s_0)) + \dot{m}_{27}(h_{27} - h_0 - T_0(s_{27} - s_0)) - \dot{m}_{24}(h_{24} - h_0 - T_0(s_{24} - s_0)))/1000 \quad (7.77)$$

$$(\dot{E}_F)_{LPH1} = ((45,72 \text{ kg/s})(2470,5 \text{ kJ/kg} - 38,24 \text{ kJ/kg} - (282,25 \text{ K})(7,24 \text{ kJ/kgK} - 0,1376 \text{ kJ/kgK})) + (43,55 \text{ kg/s})(385 \text{ kJ/kg} - 38,24 \text{ kJ/kg} - (282,25 \text{ K})(1,22 \text{ kJ/kgK} - 0,1376 \text{ kJ/kgK})) - (89,27 \text{ kg/s})(222,70 \text{ kJ/kg} - 38,24 \text{ kJ/kg} - (282,25 \text{ K})(0,74 \text{ kJ/kgK} - 0,1376 \text{ kJ/kgK}))/1000 = 20,8 \text{ MW}$$

$$(\dot{E}_P)_{LPH1} = (\dot{m}_{25}(h_{25} - h_0 - T_0(s_{25} - s_0)) - \dot{m}_{23}(h_{23} - h_0 - T_0(s_{23} - s_0)))/1000 \quad (7.78)$$

$$(\dot{E}_P)_{LPH1} = ((1010,55 \text{ kg/s})(279,80 \text{ kJ/kg} - 38,24 \text{ kJ/kg} - (282,25 \text{ K})(0,91 \text{ kJ/kgK} - 0,1376 \text{ kJ/kgK})) - (1010,55 \text{ kg/s})(170,50 \text{ kJ/kg} - 38,24 \text{ kJ/kg} - (282,25 \text{ K})(0,58 \text{ kJ/kgK} - 0,1376 \text{ kJ/kgK}))/1000 = 19,2 \text{ MW}$$

LPH1'deki tersinmezlik (MW)

$$\dot{I}_{LPH1} = (\dot{E}_F)_{LPH1} - (\dot{E}_P)_{LPH1} \quad (7.79)$$

$$\dot{I}_{LPH1} = 20,8 \text{ MW} - 19,2 \text{ MW} = 1,6 \text{ MW}$$

LPH1'in ekserji verimi (%)

$$\zeta_{LPH1} = (\dot{E}_P)_{LPH1}/(\dot{E}_F)_{LPH1} \times 100 \quad (7.80)$$

$$\zeta_{LPH1} = (19,2 \text{ MW}/20,8 \text{ MW}) \times 100 = 99,6\%$$

7.1.4.2 Düşük Basıncılı Su Isıtıcısı-2 (LPH2) Termodinamik Eşitlikleri

LPH2'ye giren ve çıkan kütlelerin akış hızı (kg/s)

$$\dot{m}_{26} + \dot{m}_{28} = \dot{m}_{18} + \dot{m}_{25} \quad (7.81)$$

$$43,55 \text{ kg/s} + 1010,55 \text{ kg/s} - 43,55 \text{ kg/s} - 1010,55 \text{ kg/s} = 0 \text{ kg/s}$$

LPH2'ye giren ekserji ve çıkan ekserji (MW)

$$(\dot{E}x_{in})_{LPH2} = (\dot{m}_{18}(h_{18} - h_0 - T_0(s_{18} - s_0)) + \dot{m}_{25}(h_{25} - h_0 - T_0(s_{25} - s_0)))/1000 \quad (7.82)$$

$$(\dot{E}x_{in})_{LPH2} = ((43,55 \text{ kg/s})(2584,5 \text{ kJ/kg} - 38,24 \text{ kJ/kg} - (282,25 \text{ K})(7,18 \text{ kJ/kgK} - 0,1376 \text{ kJ/kgK})) + (1010,55 \text{ kg/s})(279,8 \text{ kJ/kg} - 38,24 \text{ kJ/kg} - (282,25 \text{ K})(0,91 \text{ kJ/kgK} - 0,1376 \text{ kJ/kgK}))/1000 = 48,1 \text{ MW}$$

$$(\dot{E}x_{out})_{LPH2} = (\dot{m}_{26}(h_{26} - h_0 - T_0(s_{26} - s_0)) + \dot{m}_{28}(h_{28} - h_0 - T_0(s_{28} - s_0)))/1000 \quad (7.83)$$

$$(\dot{E}x_{out})_{LPH2} = ((43,55\text{kg/s})(385\text{kJ/kg} - 38,24\text{kJ/kg} - (282,25\text{K})(1,21\text{kJ/kgK} - 0,1376\text{kJ/kgK})) + (1010,55\text{kg/s})(374,6\text{kJ/kg} - 38,24\text{kJ/kg} - (282,25\text{K})(1,18\text{kJ/kgK} - 0,1376\text{kJ/kgK}))) / 1000 = 44,5\text{MW}$$

LPH2'nin maksimum ısı enerjisi (MW)

$$(\dot{Q}_{u,max})_{LPH2} = (\dot{E}x_{in})_{LPH2} - (\dot{E}x_{out})_{LPH2} \quad (7.84)$$

$$(\dot{Q}_{u,max})_{LPH2} = 48,1\text{MW} - 44,5\text{MW} = 3,6\text{MW}$$

LPH2'nin ekserji yakıtı ve ekserji ürünü (MW)

$$(\dot{E}_F)_{LPH2} = \dot{m}_{18}(h_{18} - h_0 - T_0(s_{18} - s_0)) - \dot{m}_{26}(h_{26} - h_0 - T_0(s_{26} - s_0))/1000 \quad (7.85)$$

$$(\dot{E}_F)_{LPH2} = ((43,55\text{kg/s})(2584,5\text{kJ/kg} - 38,24\text{kJ/kg} - (282,25\text{K})(7,18\text{kJ/kgK} - 0,1376\text{kJ/kgK})) - (43,55\text{kg/s})(385\text{kJ/kg} - 38,24\text{kJ/kg} - (282,25\text{K})(1,21\text{kJ/kgK} - 0,1376\text{kJ/kgK}))) / 1000 = 22,4\text{MW}$$

$$(\dot{E}_P)_{LPH2} = (\dot{m}_{28}(h_{28} - h_0 - T_0(s_{28} - s_0)) - \dot{m}_{25}(h_{25} - h_0 - T_0(s_{25} - s_0)))/1000 \quad (7.86)$$

$$(\dot{E}_P)_{LPH2} = (1010,55\text{kg/s})(374,60\text{kJ/kg} - 38,24\text{kJ/kg} - (282,25\text{K})(1,18\text{kJ/kgK} - 0,1376\text{kJ/kgK})) - (1010,55\text{kg/s})(279,80\text{kJ/kg} - 38,24\text{kJ/kg} - (282,25\text{K})(0,91\text{kJ/kgK} - 0,1376\text{kJ/kgK}))) / 1000 = 18,8\text{MW}$$

LPH2'deki tersinmezlik (MW)

$$\dot{I}_{LPH2} = (\dot{E}_F)_{LPH2} - (\dot{E}_P)_{LPH2} \quad (7.87)$$

$$\dot{I}_{LPH2} = 22,4\text{MW} - 18,8\text{MW} = 3,6\text{MW}$$

LPH2'nin ekserji verimi (%)

$$\zeta_{LPH2} = (\dot{E}_P)_{LPH2} / (\dot{E}_F)_{LPH2} \times 100 \quad (7.88)$$

$$\zeta_{LPH2} = (18,8\text{MW} / 22,4\text{MW}) \times 100 = 83,9\%$$

7.1.4.3 Düşük Basıncılı Su Isıtıcısı-3 (LPH3) Termodinamik Eşitlikleri

LPH3'e giren ve çıkan kütlelerin akış hızı (kg/s)

$$\begin{aligned}\dot{m}_{29} + \dot{m}_{31} &= \dot{m}_{17} + \dot{m}_{28} \\ 46,72\text{kg/s} + 1010,55\text{kg/s} - 46,72\text{kg/s} - 1010,55\text{kg/s} &= 0\text{kg/s}\end{aligned}\quad (7.89)$$

LPH3'e giren ekserji ve çıkan ekserji (MW)

$$\begin{aligned}(\dot{E}x_{in})_{LPH3} &= (\dot{m}_{17}(h_{17} - h_0 - T_0(s_{17} - s_0)) \\ &\quad + \dot{m}_{28}(h_{28} - h_0 - T_0(s_{28} - s_0)))/1000\end{aligned}\quad (7.90)$$

$$\begin{aligned}(\dot{E}x_{in})_{LPH3} &= ((46,72\text{kg/s})(2723,8\text{kJ/kg} - 38,24\text{kJ/kg} - (282,25\text{K})(7,18\text{kJ/kgK} \\ &\quad - 0,1376\text{kJ/kgK})) + (1010,55\text{kg/s})(374,6\text{kJ/kg} - 38,24\text{kJ/kg} \\ &\quad - (282,25\text{K})(1,18\text{kJ/kgK} - 0,1376\text{kJ/kgK}))/1000 = 75,2\text{MW}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}(\dot{E}x_{out})_{LPH3} &= (\dot{m}_{29}(h_{29} - h_0 - T_0(s_{29} - s_0)) \\ &\quad + \dot{m}_{31}(h_{31} - h_0 - T_0(s_{31} - s_0)))/1000\end{aligned}\quad (7.91)$$

$$\begin{aligned}(\dot{E}x_{out})_{LPH3} &= ((46,72\text{kg/s})(474\text{kJ/kg} - 38,24\text{kJ/kg} - (282,25\text{K})(1,45\text{kJ/kgK} \\ &\quad - 0,1376\text{kJ/kgK})) + (1010,55\text{kg/s})(477,8\text{kJ/kg} - 38,24\text{kJ/kg} \\ &\quad - (282,25\text{K})(1,46\text{kJ/kgK} - 0,1376\text{kJ/kgK}))/1000 = 70,1\text{MW}\end{aligned}$$

LPH3'ün maksimum ısı enerjisi (MW)

$$\begin{aligned}(\dot{Q}_{u,max})_{LPH3} &= (\dot{E}x_{in})_{LPH3} - (\dot{E}x_{out})_{LPH3} \\ (\dot{Q}_{u,max})_{LPH3} &= 75,2\text{MW} - 70,1\text{MW} = 5,1\text{MW}\end{aligned}\quad (7.92)$$

LPH3'ün ekserji yakıtı ve ekserji ürünü (MW)

$$\begin{aligned}(\dot{E}_F)_{LPH3} &= (\dot{m}_{17}(h_{17} - h_0 - T_0(s_{17} - s_0)) \\ &\quad - \dot{m}_{29}(h_{29} - h_0 - T_0(s_{29} - s_0)))/1000\end{aligned}\quad (7.93)$$

$$\begin{aligned}(\dot{E}_F)_{LPH3} &= ((46,72\text{kg/s})(2723,80\text{kJ/kg} - 38,24\text{kJ/kg} - (282,25\text{K})(7,18\text{kJ/kgK} \\ &\quad - 0,1376\text{kJ/kgK})) - (46,72\text{kg/s})(474\text{kJ/kg} - 38,24\text{kJ/kg} \\ &\quad - (282,25\text{K})(1,45\text{kJ/kgK} - 0,1376\text{kJ/kgK}))/1000 = 29,6\text{MW}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}(\dot{E}_P)_{LPH3} &= (\dot{m}_{31}(h_{31} - h_0 - T_0(s_{31} - s_0)) \\ &\quad - \dot{m}_{28}(h_{28} - h_0 - T_0(s_{28} - s_0)))/1000\end{aligned}\quad (7.94)$$

$$\begin{aligned}(\dot{E}_P)_{LPH3} &= ((1010,55\text{kg/s})(477,80\text{kJ/kg} - 38,24\text{kJ/kg} \\ &\quad - (282,25\text{K})(1,46\text{kJ/kgK} - 0,1376\text{kJ/kgK})) \\ &\quad - (1010,55\text{kg/s})(374,60\text{kJ/kg} - 38,24\text{kJ/kg} \\ &\quad - (282,25\text{K})(1,18\text{kJ/kgK} - 0,1376\text{kJ/kgK}))/1000 = 24,4\text{MW}\end{aligned}$$

LPH3'teki tersinmezlik (MW)

$$\dot{I}_{LPH3} = (\dot{E}_F)_{LPH3} - (\dot{E}_P)_{LPH3} \quad (7.95)$$

$$\dot{I}_{LPH3} = 5,1MW$$

LPH3'ün ekserji verimi (%)

$$\zeta_{LPH3} = (\dot{E}_P)_{LPH3} / (\dot{E}_F)_{LPH3} \times 100 \quad (7.96)$$

$$\zeta_{LPH3} = (24,4W / 29,6MW) \times 100 = 82,7\%$$

7.1.4.4 Düşük Basıncılı Su Isıtıcısı-4 (LPH4) Termodinamik Eşitlikleri

LPH4'e giren ve çıkan kütlelerin akış hızı (kg/s)

$$\dot{m}_{33} + \dot{m}_{35} = \dot{m}_{12} + \dot{m}_{13} + \dot{m}_{32} \quad (7.97)$$

$$291,72kg/s + 1057,27kg/s - 127,42kg/s - 164,3kg/s - 1057,27kg/s = 0kg/s$$

LPH4'e giren ekserji ve çıkan ekserji (MW)

$$\begin{aligned} (\dot{E}x_{in})_{LPH4} &= (\dot{m}_{12}(h_{12} - h_0 - T_0(s_{12} - s_0)) + \dot{m}_{13}(h_{13} - h_0 - T_0(s_{13} - s_0)) \\ &+ \dot{m}_{32}(h_{32} - h_0 - T_0(s_{32} - s_0)))/1000 \end{aligned} \quad (7.98)$$

$$\begin{aligned} (\dot{E}x_{in})_{LPH4} &= ((127,42kg/s)(2481,4kJ/kg - 38,24kJ/kg \\ &- (282,25K)(6,02kJ/kgK - 0,1376kJ/kgK) \\ &+ (164,3kg/s)(707,2kJ/kg - 38,24kJ/kg - (282,25K)(2,01kJ/kgK \\ &- 0,1376kJ/kgK)) + (1057,27kg/s)(478kJ/kg - 38,24kJ/kg \\ &- (282,25K)(1,46kJ/kgK - 0,1376kJ/kgK)))/1000 = 193,2MW \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} (\dot{E}x_{out})_{LPH4} &= (\dot{m}_{33}(h_{33} - h_0 - T_0(s_{33} - s_0)) \\ &+ \dot{m}_{35}(h_{35} - h_0 - T_0(s_{35} - s_0)))/1000 \end{aligned} \quad (7.99)$$

$$\begin{aligned} (\dot{E}x_{out})_{LPH4} &= ((291,72kg/s)(702,9kJ/kg - 38,24kJ/kg - (282,25K)(2,0kJ/kgK \\ &- 0,1376kJ/kgK)) + (1057,27kg/s)(692,9kJ/kg - 38,24kJ/kg \\ &- (282,25K)(1,98kJ/kgK - 0,1376kJ/kgK)))/1000 = 182,9MW \end{aligned}$$

LPH4'ün maksimum ısı enerjisi (MW)

$$(\dot{Q}_{u,max})_{LPH4} = (\dot{E}x_{in})_{LPH4} - (\dot{E}x_{out})_{LPH4} \quad (7.100)$$

$$(\dot{Q}_{u,max})_{LPH4} = 193,2MW - 182,9MW = 10,3MW$$

LPH4'ün ekserji yakıtı ve ekserji ürünü (MW)

$$(\dot{E}_F)_{LPH4} = (\dot{m}_{12}(h_{12} - h_0 - T_0(s_{12} - s_0)) + \dot{m}_{13}(h_{13} - h_0 - T_0(s_{13} - s_0)) - \dot{m}_{33}(h_{33} - h_0 - T_0(s_{33} - s_0)))/1000 \quad (7.101)$$

$$(\dot{E}_F)_{LPH4} = ((127,42kg/s)(2841,40kJ/kg - 38,24kJ/kg - (282,25K)(6,02kJ/kgK - 0,1376kJ/kgK)) + (164,30kg/s)(707,20kJ/kg - 38,24kJ/kg - (282,25K)(2,01kJ/kgK - 0,1376kJ/kgK)) - (291,72kg/s)(702,90kJ/kg - 38,24kJ/kg - (282,25K)(2,00kJ/kgK - 0,1376kJ/kgK)))/1000 = 82,3MMW$$

$$(\dot{E}_P)_{LPH4} = (\dot{m}_{35}(h_{35} - h_0 - T_0(s_{35} - s_0)) - \dot{m}_{32}(h_{32} - h_0 - T_0(s_{32} - s_0)))/1000 \quad (7.102)$$

$$(\dot{E}_P)_{LPH4} = ((1057,27kg/s)(692,90kJ/kg - 38,24kJ/kg - (282,25K)(1,98kJ/kgK - 0,1376kJ/kgK)) - (1057,27kg/s)(478kJ/kg - 38,24kJ/kg - (282,25K)(1,46kJ/kgK - 0,1376kJ/kgK)))/1000 = 72MW$$

LPH4'teki tersinmezlik (MW)

$$\dot{I}_{LPH4} = (\dot{E}_F)_{LPH4} - (\dot{E}_P)_{LPH4} \quad (7.103)$$

$$\dot{I}_{LPH4} = 82,3MW - 72MW = 10,3MW$$

LPH4'ün ekserji verimi (%)

$$\zeta_{LPH4} = (\dot{E}_P)_{LPH4}/(\dot{E}_F)_{LPH4} \times 100 \quad (7.104)$$

$$\zeta_{LPH4} = (72MW/82,3MW) \times 100 = 87,5\%$$

7.1.4.5 Yüksek Basıncılı Su Isıtıcısı-5 (HPH5) Termodinamik Eşitlikleri

HPH5'e giren ve çıkan kütlelerin akış hızı (kg/s)

$$\dot{m}_{41} + \dot{m}_{42} = \dot{m}_8 + \dot{m}_{40} + \dot{m}_{43} \quad (7.105)$$

$$247,46kg/s + 1661,11kg/s - 129,94kg/s - 1661,11kg/s - 117,52kg/s = 0kg/s$$

HPH5'e giren ekserji ve çıkan ekserji (MW)

$$(\dot{E}x_{in})_{HPH5} = (\dot{m}_8(h_8 - h_0 - T_0(s_8 - s_0)) + \dot{m}_{40}(h_{40} - h_0 - T_0(s_{40} - s_0)) + \dot{m}_{43}(h_{43} - h_0 - T_0(s_{43} - s_0)))/1000 \quad (7.106)$$

$$\begin{aligned}
(\dot{E}x_{in})_{HPH5} = & ((129,94kg/s)(2663,9kJ/kg - 38,24kJ/kg \\
& - (282,25K)(5,97kJ/kgK - 0,1376kJ/kgK) \\
& + (1661,11g/s)(813,9kJ/kg - 38,24kJ/kg \\
& - (282,25K)(2,24kJ/kgK - 0,1376kJ/kgK)) \\
& + (117,52kg/s)(993,9kJ/kg - 38,24kJ/kg \\
& - (282,25K)(2,61kJ/kgK - 0,1376kJ/kgK)))/1000 = 460,3MW
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
(\dot{E}x_{out})_{HPH5} = & (\dot{m}_{41}(h_{41} - h_0 - T_0(s_{41} - s_0)) \\
& + \dot{m}_{42}(h_{42} - h_0 - T_0(s_{42} - s_0)))/1000 \quad (7.107)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
(\dot{E}x_{out})_{HPH5} = & ((247,46kg/s)(963kJ/kg - 38,24kJ/kg - (282,25K)(2,55kJ/kgK \\
& - 0,1376kJ/kgK)) + (1661,11kg/s)(949,1kJ/kg - 38,24kJ/kg \\
& - (282,25K)(2,52kJ/kgK - 0,1376kJ/kgK)))/1000 = 456,3MW
\end{aligned}$$

HPH5'in maksimum ısı enerjisi (MW)

$$(\dot{Q}_{u,max})_{HPH5} = (\dot{E}x_{in})_{HPH5} - (\dot{E}x_{out})_{HPH5} \quad (7.108)$$

$$(\dot{Q}_{u,max})_{HPH5} = 460,3MW - 456,3MW = 4MW$$

HPH5'in ekserji yakıtı ve ekserji ürünü (MW)

$$\begin{aligned}
(\dot{E}_F)_{HPH5} = & (\dot{m}_8(h_8 - h_0 - T_0(s_8 - s_0)) + \dot{m}_{43}(h_{43} - h_0 - T_0(s_{43} - s_0)) - \\
& \dot{m}_{41}(h_{41} - h_0 - T_0(s_{41} - s_0)))/1000 \quad (7.109)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
(\dot{E}_F)_{HPH5} = & ((129,94kg/s)(2663,90kJ/kg - 38,24kJ/kg \\
& - (282,25K)(5,97kJ/kgK - 0,1376kJ/kgK)) \\
& + (117,52kg/s)(993,90kJ/kg - 38,24kJ/kg \\
& - (282,25K)(2,61kJ/kgK - 0,1376kJ/kgK)) \\
& - (247,46kg/s)(963kJ/kg - 38,24kJ/kg - (282,25K)(2,55kJ/kgK \\
& - 0,1376kJ/kgK)))/1000 = 97,2MW
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
(\dot{E}_P)_{HPH5} = & (\dot{m}_{42}(h_{42} - h_0 - T_0(s_{42} - s_0)) \\
& - \dot{m}_{40}(h_{40} - h_0 - T_0(s_{40} - s_0)))/1000 \quad (7.110)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
(\dot{E}_P)_{HPH5} = & ((1661,11kg/s)(949,10kJ/kg - 38,24kJ/kg \\
& - (282,25K)(2,52kJ/kgK - 0,1376kJ/kgK)) \\
& - (1661,11kg/s)(813,90kJ/kg - 38,24kJ/kg \\
& - (282,25K)(2,24kJ/kgK - 0,1376kJ/kgK)))/1000 = 93,3MW
\end{aligned}$$

HPH5'teki tersinmezlik (MW)

$$\dot{I}_{HPH5} = (\dot{E}_F)_{HPH5} - (\dot{E}_P)_{HPH5} \quad (7.111)$$

$$\dot{I}_{HPH5} = 97,2MW - 93,3MW = 3,9MW$$

HPH5'in ekserji verimi (%)

$$\zeta_{HPH5} = (\dot{E}_P)_{HPH5}/(\dot{E}_F)_{HPH5} \times 100 \quad (7.112)$$

$$\zeta_{HPH5} = (93,3MW/97,2MW) \times 100 = 96\%$$

7.1.4.6 Soğutucu (Cool) Termodinamik Eşitlikleri

Cool giren ve çıkan kütlelerin akış hızı (kg/s)

$$\dot{m}_{39} + \dot{m}_{40} = \dot{m}_{38} + \dot{m}_{41} \quad (7.113)$$

$$247,46kg/s + 1661,11kg/s - 1661,11kg/s - 247,46kg/s = 0kg/s$$

Cool giren ekserji ve çıkan ekserji (MW)

$$(\dot{E}x_{in})_{Cool} = (\dot{m}_{38}(h_{38} - h_0 - T_0(s_{38} - s_0)) + \dot{m}_{41}(h_{41} - h_0 - T_0(s_{41} - s_0)))/1000 \quad (7.114)$$

$$(\dot{E}x_{in})_{Cool} = ((1661,11kg/s)(813,6J/kg - 38,24kJ/kg - (282,25K)(2,24kJ/kgK - 0,1376kJ/kgK)) + (247,46g/s)(963kJ/kg - 38,24kJ/kg - (282,25K)(2,55kJ/kgK - 0,1376kJ/kgK)))/1000 = 362,6MW$$

$$(\dot{E}x_{out})_{Cool} = (\dot{m}_{39}(h_{39} - h_0 - T_0(s_{39} - s_0)) + \dot{m}_{40}(h_{40} - h_0 - T_0(s_{40} - s_0)))/1000 \quad (7.115)$$

$$(\dot{E}x_{out})_{Cool} = ((247,46kg/s)(960,9kJ/kg - 38,24kJ/kg - (282,25K)(2,57kJ/kgK - 0,1376kJ/kgK)) + (1661,11kg/s)(813,9kJ/kg - 38,24kJ/kg - (282,25K)(2,24kJ/kgK - 0,1376kJ/kgK)))/1000 = 361,1MW$$

Cool maksimum ısı enerjisi (MW)

$$(\dot{Q}_{u,max})_{Cool} = (\dot{E}x_{in})_{Cool} - (\dot{E}x_{out})_{Cool} \quad (7.116)$$

$$(\dot{Q}_{u,max})_{Cool} = 362,6MW - 361,1MW = 1,5MW$$

Cool ekserji yakıtı ve ekserji ürünü (MW)

$$(\dot{E}_F)_{Cool} = (\dot{m}_{38}(h_{38} - h_0 - T_0(s_{38} - s_0)) - \dot{m}_{39}(h_{39} - h_0 - T_0(s_{39} - s_0)))/1000 \quad (7.117)$$

$$(\dot{E}_F)_{Cool} = ((1661,11kg/s)(813,60kJ/kg - 38,24kJ/kg - (282,25K)(2,24kJ/kgK - 0,1376kJ/kgK)) - (247,46kg/s)(960,90kJ/kg - 38,24kJ/kg - (282,25K)(2,57kJ/kgK - 0,1376kJ/kgK)))/1000 = 304,2MW$$

$$(\dot{E}_P)_{Cool} = (\dot{m}_{40}(h_{40} - h_0 - T_0(s_{40} - s_0)) - \dot{m}_{41}(h_{41} - h_0 - T_0(s_{41} - s_0)))/1000 \quad (7.118)$$

$$(\dot{E}_P)_{Cool} = ((1661,11kg/s)(813,90kJ/kg - 38,24kJ/kg - (282,25K)(2,24kJ/kgK - 0,1376kJ/kgK)) - (247,46kg/s)(963kJ/kg - 38,24kJ/kg - (282,25K)(2,55kJ/kgK - 0,1376kJ/kgK)))/1000 = 302,8MW$$

Cool tersinmezlik (MW)

$$\dot{I}_{Cool} = (\dot{E}_F)_{Cool} - (\dot{E}_P)_{Cool} \quad (7.119)$$

$$\dot{I}_{Cool} = 304,2MW - 302,8MW = 1,4MW$$

Cool ekserji verimi (%)

$$\zeta_{Cool} = (\dot{E}_P)_{Cool}/(\dot{E}_F)_{Cool} \times 100 \quad (7.120)$$

$$\zeta_{Cool} = (302,8W/304,2MW) \times 100 = 99,5\%$$

7.1.4.7 Kızdırıcı Soğutucu (RHC) Termodinamik Eşitlikleri

RHC'ye giren ve çıkan kütlelerin akış hızı (kg/s)

$$\dot{m}_5 + \dot{m}_{43} = \dot{m}_{15} + \dot{m}_{42} \quad (7.121)$$

$$1661,11kg/s + 117,52kg/s - 117,52kg/s - 1661,11kg/s = 0kg/s$$

RHC'ye giren ekserji ve çıkan ekserji (MW)

$$(\dot{E}x_{in})_{RHC} = (\dot{m}_{15}(h_{15} - h_0 - T_0(s_{15} - s_0)) + \dot{m}_{42}(h_{42} - h_0 - T_0(s_{42} - s_0)))/1000 \quad (7.122)$$

$$(\dot{E}x_{in})_{RHC} = ((117,52kg/s)(1190,1kJ/kg - 38,24kJ/kg - (282,25K)(2,90kJ/kgK - 0,1376kJ/kgK)) + (1661,11kg/s)(949,1kJ/kg - 38,24kJ/kg - (282,25K)(2,52kJ/kgK - 0,1376kJ/kgK)))/1000 = 439,7MW$$

$$(\dot{E}x_{out})_{RHC} = (\dot{m}_5(h_5 - h_0 - T_0(s_5 - s_0)) + \dot{m}_{43}(h_{43} - h_0 - T_0(s_{43} - s_0)))/1000 \quad (7.123)$$

$$(\dot{E}x_{out})_{RHC} = ((1661,11kg/s)(962,1kJ/kg - 38,24kJ/kg - (282,25K)(2,55kJ/kgK - 0,1376kJ/kgK)) + (117,52kg/s)(993,9kJ/kg - 38,24kJ/kg - (282,25K)(2,61kJ/kgK - 0,1376kJ/kgK)))/1000 = 433,9MW$$

RHC'nin maksimum ısı enerjisi (MW)

$$(\dot{Q}_{u,max})_{RHC} = (\dot{E}x_{in})_{RHC} - (\dot{E}x_{out})_{RHC} \quad (7.124)$$

$$(\dot{Q}_{u,max})_{RHC} = 439,7MW - 433,9MW = 5,8MW$$

RHC'nin ekserji yakıtı ve ekserji ürünü (MW)

$$(\dot{E}_F)_{RHC} = (\dot{m}_{15}(h_{15} - h_0 - T_0(s_{15} - s_0)) - \dot{m}_{43}(h_{43} - h_0 - T_0(s_{43} - s_0)))/1000 \quad (7.125)$$

$$(\dot{E}_F)_{RHC} = ((117,52kg/s)(1190,1kJ/kg - 38,24kJ/kg - (282,25K)(2,90kJ/kgK - 0,1376kJ/kgK))) - (117,52kg/s)(993,9kJ/kg - 38,24kJ/kg - (282,25K)(2,61kJ/kgK - 0,1376kJ/kgK)))/1000 = 13,4MW$$

$$(\dot{E}_P)_{RHC} = (\dot{m}_5(h_5 - h_0 - T_0(s_5 - s_0)) - \dot{m}_{42}(h_{42} - h_0 - T_0(s_{42} - s_0)))/1000 \quad (7.126)$$

$$(\dot{E}_P)_{RHC} = ((1661,11kg/s)(962,1kJ/kg - 38,24kJ/kg - (282,25K)(2,55kJ/kgK - 0,1376kJ/kgK)) - (1661,11kg/s)(949,1kJ/kg - 38,24kJ/kg - (282,25K)(2,52kJ/kgK - 0,1376kJ/kgK)))/1000 = 7,5MW$$

RHC'deki tersinmezlik (MW)

$$\dot{I}_{RHC} = (\dot{E}_F)_{RHC} - (\dot{E}_P)_{RHC} \quad (7.127)$$

$$\dot{I}_{RHC} = 13,4MW - 7,5MW = 5,9MW$$

RHC'nin ekserji verimi (%)

$$\zeta_{RHC} = (\dot{E}_P)_{RHC}/(\dot{E}_F)_{RHC} \times 100 \quad (7.128)$$

$$\zeta_{RHC} = (7,5MW/13,4MW) \times 100 = 56\%$$

7.1.4.8 Dearatör (OFW) Termodinamik Eşitlikleri

OFW'ya giren ve çıkan kütlelerin akış hızı (kg/s)

$$\dot{m}_{37} = \dot{m}_9 + \dot{m}_{36} + \dot{m}_{39} \quad (7.129)$$

$$1661,11kg/s - 64,63kg/s - 1349kg/s - 247,46kg/s = 0kg/s$$

OFW'ya giren ekserji ve çıkan ekserji (MW)

$$(\dot{E}x_{in})_{OFW} = (\dot{m}_9(h_9 - h_0 - T_0(s_9 - s_0)) + \dot{m}_{36}(h_{36} - h_0 - T_0(s_{36} - s_0)) + \dot{m}_{39}(h_{39} - h_0 - T_0(s_{39} - s_0)))/1000 \quad (7.130)$$

$$\begin{aligned}
(\dot{E}x_{in})_{OFW} = & ((64,63kg/s)(2551,3kJ/kg - 38,24kJ/kg - (282,25K)(6,04kJ/kgK \\
& - 0,1376kJ/kgK)) + (1349kg/s)(695,3kJ/kg - 38,24kJ/kg \\
& - (282,25K)(1,98kJ/kgK - 0,1376kJ/kgK)) \\
& + (247,46kg/s)(960,9kJ/kg - 38,24kJ/kg \\
& - (282,25K)(2,57kJ/kgK - 0,1376kJ/kgK)))/1000 = 298MW
\end{aligned}$$

$$(\dot{E}x_{out})_{OFW} = \dot{m}_{37}(h_{37} - h_0 - T_0(s_{37} - s_0))/1000 \quad (7.131)$$

$$\begin{aligned}
(\dot{E}x_{out})_{OFW} = & ((1661,11kg/s)(807,1kJ/kg - 38,24kJ/kg \\
& - (282,25K)(2,23kJ/kgK - 0,1376kJ/kgK)))/1000 = 296,1MW
\end{aligned}$$

OFW'nun maksimum ısı enerjisi (MW)

$$(\dot{Q}_{u,max})_{OFW} = (\dot{E}x_{in})_{OFW} - (\dot{E}x_{out})_{OFW} \quad (7.132)$$

$$(\dot{Q}_{u,max})_{OFW} = 298MW - 296,1MW = 1,9MW$$

OFW'nun ekserji yakıtı ve ekserji ürünü (MW)

$$\begin{aligned}
(\dot{E}_F)_{OFW} = & (\dot{m}_9(h_9 - h_0 - T_0(s_9 - s_0)) \\
& + \dot{m}_{39}(h_{39} - h_0 - T_0(s_{39} - s_0)))/1000
\end{aligned} \quad (7.133)$$

$$\begin{aligned}
(\dot{E}_F)_{OFW} = & ((64,63kg/s)(2551,3kJ/kg - 38,24kJ/kg - (282,25K)(6,04kJ/kgK \\
& - 0,1376kJ/kgK)) + (247,46kg/s)(960,9kJ/kg - 38,24kJ/kg \\
& - (282,25K)(2,57kJ/kgK - 0,1376kJ/kgK)))/1000 = 298,1MW
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
(\dot{E}_P)_{OFW} = & (\dot{m}_{37}(h_{37} - h_0 - T_0(s_{37} - s_0)) \\
& - \dot{m}_{36}(h_{36} - h_0 - T_0(s_{36} - s_0)))/1000
\end{aligned} \quad (7.134)$$

$$\begin{aligned}
(\dot{E}_P)_{OFW} = & ((1661,11kg/s)(807,1kJ/kg - 38,24kJ/kg - (282,25K)(2,23kJ/kgK \\
& - 0,1376kJ/kgK)) - (1349kg/s)(695,3kJ/kg - 38,24kJ/kg \\
& - (282,25K)(1,98kJ/kgK - 0,1376kJ/kgK)))/1000 = 296,2MW
\end{aligned}$$

OFW'daki tersinmezlik (MW)

$$\dot{I}_{OFW} = (\dot{E}_F)_{OFW} - (\dot{E}_P)_{OFW} \quad (7.135)$$

$$\dot{I}_{OFW} = 298,1MW - 296,2MW = 1,9MW$$

OFW'nun ekserji verimi (%)

$$\zeta_{OFW} = (\dot{E}_P)_{OFW}/(\dot{E}_F)_{OFW} \times 100 \quad (7.136)$$

$$\zeta_{OFW} = (296,2W/298,1MW) \times 100 = 99,4\%$$

7.1.4.9 Ana Yoğuşma Suyu Pompası-1 (P1) Termodinamik Eşitlikleri

P1'e giren ve çıkan kütlelerin akış hızı (kg/s)

$$\dot{m}_{22} = \dot{m}_{21} \quad (7.137)$$

$$1010,55 \text{ kg/s} = 1010,55 \text{ kg/s}$$

P1'e giren ekserji ve çıkan ekserji (MW)

$$(\dot{E}x_{in})_{P1} = \dot{m}_{21}(h_{21} - h_0 - T_0(s_{21} - s_0))/1000 \quad (7.138)$$

$$(\dot{E}x_{in})_{P1} = ((1010,55 \text{ kg/s})(125,93 \text{ kJ/kg} - 38,24 \text{ kJ/kg} - (282,25 \text{ K})(0,437 \text{ kJ/kgK} - 0,1376 \text{ kJ/kgK}))/1000 = 3,1 \text{ MW}$$

$$(\dot{E}x_{out})_{P1} = \dot{m}_{22}(h_{22} - h_0 - T_0(s_{22} - s_0))/1000 \quad (7.139)$$

$$(\dot{E}x_{out})_{P1} = (1010,55 \text{ kg/s})(126,43 \text{ kJ/kg} - 38,24 \text{ kJ/kg} - (282,25 \text{ K})(0,44 \text{ kJ/kgK} - 0,1376 \text{ kJ/kgK}))/1000 = 3,6 \text{ MW}$$

P1'in maksimum işi (MW)

$$(\dot{W}_{u,max})_{P1} = (\dot{E}x_{in})_{P1} - (\dot{E}x_{out})_{P1} \quad (7.140)$$

$$(\dot{W}_{u,max})_{P1} = 3,1 \text{ MW} - 3,6 \text{ MW} = -0,5 \text{ MW}$$

P1'in gerçek işi (MW)

$$(\dot{W}_{actual})_{P1} = (\dot{m}_{22}h_{22} - \dot{m}_{21}h_{21})/1000 \quad (7.141)$$

$$(\dot{W}_{actual})_{P1} = (1010,55 \text{ kg/s})(126,43 \text{ kJ/kg} - 125,93 \text{ kJ/kg})/1000 = 0,5 \text{ MW}$$

P1'in ekserji yakıtı ve ekserji ürünü (MW)

$$(\dot{E}x_F)_{P1} = (\dot{W}_{actual})_{P1} \quad (7.142)$$

$$(\dot{E}x_F)_{P1} = 0,5 \text{ MW}$$

$$(\dot{E}x_P)_{P1} = |(\dot{W}_{u,max})_{P1}| \quad (7.143)$$

$$(\dot{E}x_P)_{P1} = 0,5 \text{ MW}$$

P1'deki tersinmezlik (MW)

$$\dot{I}_{P1} = (\dot{E}x_F)_{P1} - (\dot{E}x_P)_{P1} \quad (7.144)$$

$$\dot{I}_{P1} = 0,5 \text{ MW} - 0,5 \text{ MW} = 0 \text{ MW}$$

P1'in ekserji verimi (%)

$$\zeta_{P1} = ((\dot{E}x_P)_{P1}/(\dot{E}x_F)_{P1}) \times 100 \quad (7.145)$$

$$\zeta_{P1} = (0,5MW/0,5MW) \times 100 = 100\%$$

7.1.4.10 Ana Yoğuşma Suyu Pompası-2 (P2) Termodinamik Eşitlikleri

P2'ye giren ve çıkan kütlelerin akış hızı (kg/s)

$$\dot{m}_{23} = \dot{m}_{22} \quad (7.146)$$

$$1010,55kg/s = 1010,55kg/s$$

P2'ye giren ekserji ve çıkan ekserji (MW)

$$(\dot{E}x_{in})_{P2} = \dot{m}_{22}(h_{22} - h_0 - T_0(s_{22} - s_0))/1000 \quad (7.147)$$

$$(\dot{E}x_{in})_{P2} = ((1010,55kg/s)(126,43kJ/kg - 38,24kJ/kg - (282,25K)(0,44kJ/kgK - 0,1376kJ/kgK)))/1000 = 3,6MW$$

$$(\dot{E}x_{out})_{P2} = \dot{m}_{23}(h_{23} - h_0 - T_0(s_{23} - s_0))/1000 \quad (7.148)$$

$$(\dot{E}x_{out})_{P2} = (1010,55kg/s)(127,43kJ/kg - 38,24kJ/kg - (282,25K)(0,44kJ/kgK - 0,1376kJ/kgK))/1000 = 4,6MW$$

P2'nin maksimum işi (MW)

$$(\dot{W}_{u,max})_{P2} = (\dot{E}x_{in})_{P2} - (\dot{E}x_{out})_{P2} \quad (7.149)$$

$$(\dot{W}_{u,max})_{P2} = 3,6MW - 4,6MW = -1MW$$

P2'nin gerçek işi (MW)

$$(\dot{W}_{actual})_{P2} = (\dot{m}_{23}h_{23} - \dot{m}_{22}h_{22})/1000 \quad (7.150)$$

$$(\dot{W}_{actual})_{P2} = (1010,55kg/s)(127,43kJ/kg - 126,43kJ/kg)/1000 = 1MW$$

P2'nin ekserji yakıtı ve ekserji ürünü (MW)

$$(\dot{E}x_F)_{P2} = (\dot{W}_{actual})_{P2} \quad (7.151)$$

$$(\dot{E}x_F)_{P2} = 1MW$$

$$(\dot{E}x_P)_{P2} = |(\dot{W}_{u,max})_{P2}| \quad (7.152)$$

$$(\dot{E}x_P)_{P2} = 1MW$$

P2'deki tersinmezlik (MW)

$$\dot{I}_{P2} = (\dot{E}x_F)_{P2} - (\dot{E}x_P)_{P2} \quad (7.153)$$

$$\dot{I}_{P2} = 1MW - 1MW = 0MW$$

P2'nin ekserji verimi (%)

$$\zeta_{P2} = ((\dot{E}x_P)_{P2}/(\dot{E}x_F)_{P2}) \times 100 \quad (7.154)$$

$$\zeta_{P2} = (1MW/1MW) \times 100 = 100\%$$

7.1.4.11 Pompa-3 (P3) Termodinamik Eşitlikleri

P3'e giren ve çıkan kütlelerin akış hızı (kg/s)

$$\dot{m}_{30} = \dot{m}_{29} \quad (7.155)$$

$$46,72kg/s = 46,72kg/s$$

P3'e giren ekserji ve çıkan ekserji (MW)

$$(\dot{E}x_{in})_{P3} = \dot{m}_{29}(h_{29} - h_0 - T_0(s_{29} - s_0))/1000 \quad (7.156)$$

$$(\dot{E}x_{in})_{P3} = ((46,72kg/s)(474kJ/kg - 38,24kJ/kg - (282,25K)(1,45kJ/kgK - 0,1376kJ/kgK)))/1000 = 3,02MW$$

$$(\dot{E}x_{out})_{P3} = \dot{m}_{30}(h_{30} - h_0 - T_0(s_{30} - s_0))/1000 \quad (7.157)$$

$$(\dot{E}x_{out})_{P3} = (46,72kg/s)(477,8kJ/kg - 38,24kJ/kg - (282,25K)(1,46kJ/kgK - 0,1376kJ/kgK))/1000 = 3,07MW$$

P3'ün maksimum işi (MW)

$$(\dot{W}_{u,max})_{P3} = (\dot{E}x_{in})_{P3} - (\dot{E}x_{out})_{P3} \quad (7.158)$$

$$(\dot{W}_{u,max})_{P3} = 3,02MW - 3,07MW = -0,05MW$$

P3'ün gerçek iş (MW)

$$(\dot{W}_{actual})_{P3} = (\dot{m}_{30}h_{30} - \dot{m}_{29}h_{29})/1000 \quad (7.159)$$

$$(\dot{W}_{actual})_{P3} = (46,72kg/s)(477,8kJ/kg - 474kJ/kg)/1000 = 0,2MW$$

P3'ün ekserji yakıtı ve ekserji ürünü (MW)

$$(\dot{E}x_F)_{P3} = (\dot{W}_{actual})_{P3} \quad (7.160)$$

$$(\dot{E}x_F)_{P3} = 0,2MW$$

$$(\dot{E}x_P)_{P3} = |(\dot{W}_{u,max})_{P3}| \quad (7.161)$$

$$(\dot{E}x_P)_{P3} = 0,05MW$$

P3'teki tersinmezlik (MW)

$$\dot{I}_{P3} = (\dot{E}x_F)_{P3} - (\dot{E}x_P)_{P3} \quad (7.162)$$

$$\dot{I}_{P3} = 0,2MW - 0,05MW = 0,15MW$$

P3'ün ekserji verimi (%)

$$\zeta_{P3} = ((\dot{E}x_P)_{P3}/(\dot{E}x_F)_{P3}) \times 100 \quad (7.163)$$

$$\zeta_{P3} = (0,05MW/0,2MW) \times 100 = 25,7\%$$

7.1.4.12 Pompa-4 (P4) Termodinamik Eşitlikleri

P4'e giren ve çıkan kütlelerin akış hızı (kg/s)

$$\dot{m}_{34} = \dot{m}_{33} \quad (7.164)$$

$$291,72kg/s = 291,72kg/s$$

P4'e giren ekserji ve çıkan ekserji (MW)

$$(\dot{E}x_{in})_{P4} = \dot{m}_{33}(h_{33} - h_0 - T_0(s_{33} - s_0))/1000 \quad (7.165)$$

$$(\dot{E}x_{in})_{P4} = ((291,72kg/s)(702,9kJ/kg - 38,24kJ/kg - (282,25K)(2,0kJ/kgK - 0,1376kJ/kgK)))/1000 = 40,4MW$$

$$(\dot{E}x_{out})_{P4} = \dot{m}_{34}(h_{34} - h_0 - T_0(s_{34} - s_0))/1000 \quad (7.166)$$

$$(\dot{E}x_{out})_{P4} = (291,72kg/s)(703,9kJ/kg - 38,24kJ/kg - (282,25K)(2,0kJ/kgK - 0,1376kJ/kgK))/1000 = 40,7MW$$

P4'ün maksimum işi (MW)

$$(\dot{W}_{u,max})_{P4} = (\dot{E}x_{in})_{P4} - (\dot{E}x_{out})_{P4} \quad (7.167)$$

$$(\dot{W}_{u,max})_{P4} = 40,4MW - 40,7MW = -0,3MW$$

P4 gerçek iş (MW)

$$(\dot{W}_{actual})_{P4} = (\dot{m}_{34}h_{34} - \dot{m}_{33}h_{33})/1000 \quad (7.168)$$

$$(\dot{W}_{actual})_{P4} = (291,72kg/s)(703,9kJ/kg - 702,9kJ/kg)/1000 = 0,3MW$$

P4'ün ekserji yakıtı ve ekserji ürünü (MW)

$$(\dot{E}x_F)_{P4} = (\dot{W}_{actual})_{P4} \quad (7.169)$$

$$(\dot{E}x_F)_{P4} = 0,3MW$$

$$(\dot{E}x_P)_{P4} = |(\dot{W}_{u,max})_{P4}| \quad (7.170)$$

$$(\dot{E}x_P)_{P4} = 0,3MW$$

P4'teki tersinmezlik (MW)

$$\dot{I}_{P4} = (\dot{E}x_F)_{P4} - (\dot{E}x_P)_{P4} \quad (7.171)$$

$$\dot{I}_{P4} = 0,3MW - 0,3MW = 0MW$$

P4'ün ekserji verimi (%)

$$\zeta_{P4} = ((\dot{E}x_P)_{P4}/(\dot{E}x_F)_{P4}) \times 100 \quad (7.172)$$

$$\zeta_{P4} = (0,3MW/0,3MW) \times 100 = 100\%$$

7.1.4.13 Pompa-5 (P5) Termodinamik Eşitlikleri

P5'e giren ve çıkan kütlelerin akış hızı (kg/s)

$$\dot{m}_{38} = \dot{m}_{37} \quad (7.173)$$

$$1661,11kg/s = 1661,11kg/s$$

P5'e giren ekserji ve çıkan ekserji (MW)

$$(\dot{E}x_{in})_{P5} = \dot{m}_{37}(h_{37} - h_0 - T_0(s_{37} - s_0))/1000 \quad (7.174)$$

$$(\dot{E}x_{in})_{P5} = ((1661,11kg/s)(807,1kJ/kg - 38,24kJ/kg - (282,25K)(2,23kJ/kgK - 0,1376kJ/kgK)))/1000 = 295,2MW$$

$$(\dot{E}x_{out})_{P5} = \dot{m}_{38}(h_{38} - h_0 - T_0(s_{38} - s_0))/1000 \quad (7.175)$$

$$(\dot{E}x_{out})_{P5} = (1661,11kg/s)(813,6kJ/kg - 38,24kJ/kg - (282,25K)(2,24kJ/kgK - 0,1376kJ/kgK))/1000 = 301,3MW$$

P5'in maksimum işi (MW)

$$(\dot{W}_{u,max})_{P5} = (\dot{E}x_{in})_{P5} - (\dot{E}x_{out})_{P5} \quad (7.176)$$

$$(\dot{W}_{u,max})_{P5} = 295,2MW - 301,3MW = -6,1MW$$

P5'in gerçek işi (MW)

$$(\dot{W}_{actual})_{P5} = (\dot{m}_{38}h_{38} - \dot{m}_{37}h_{37})/1000 \quad (7.177)$$

$$(\dot{W}_{actual})_{P5} = (1661,11kg/s)(813,6kJ/kg - 807,1kJ/kg)/1000 = 10,8MW$$

P5'in ekserji yakıtı ve ekserji ürünü (MW)

$$(\dot{E}x_F)_{P5} = (\dot{W}_{actual})_{P5} \quad (7.178)$$

$$(\dot{E}x_F)_{P5} = 10,8MW$$

$$(\dot{E}x_P)_{P5} = |(\dot{W}_{u,max})_{P5}| \quad (7.179)$$

$$(\dot{E}x_P)_{P5} = 6,1MW$$

P5'teki tersinmezlik (MW)

$$\dot{I}_{P5} = (\dot{E}x_F)_{P5} - (\dot{E}x_P)_{P5} \quad (7.180)$$

$$\dot{I}_{P5} = 10,8MW - 6,1MW = 4,7MW$$

P5'in ekserji verimi (%)

$$\zeta_{P5} = ((\dot{E}x_P)_{P5}/(\dot{E}x_F)_{P5}) \times 100 \quad (7.181)$$

$$\zeta_{P5} = (6,1MW/10,8MW) \times 100 = 56,6\%$$

Ön ısıtma bölümünün (PS) toplam ekserji yıkımı (MW)

$$(\dot{E}x_D)_{PS} = \dot{I}_{Cool} + \dot{I}_{RHC} + \dot{I}_{OFW} + \dot{I}_{LPH1} + \dot{I}_{LPH2} + \dot{I}_{LPH3} + \dot{I}_{LPH4} + \dot{I}_{HPH5} + \dot{I}_{P1} \\ + \dot{I}_{P2} + \dot{I}_{P3} + \dot{I}_{P4} + \dot{I}_{P5} \quad (7.182)$$

$$(\dot{E}x_D)_{PS} = 1,5MW + 5,8MW + 1,9MW + 3,8MW + 3,6MW + 5,1MW + 10,3MW \\ + 4MW + 0MW + 2,9MW + 0,1MW + 0MW + 4,7MW = 40,1MW$$

7.1.5 Nükleer Güç Santralinin (NGS) Termodinamik Analizleri

NGS'de üretilen net iş (MW)

$$(\dot{W}_{Net})_{NGS} = |(\dot{W}_{actual})_{HP-T} + (\dot{W}_{actual})_{LP-T}| - |(\dot{W}_{actual})_P| \quad (7.183)$$

$$(\dot{W}_{Net})_{NGS} = |-426,8MW - 622,6MW| - 22,9MW = 1026,5MW$$

NGS'deki toplam ekserji yıkımı (MW)

$$(\dot{E}x_D)_{NGS} = (\dot{E}x_D)_{Birincil} + (\dot{E}x_D)_{Gü} + (\dot{E}x_D)_{Con} + (\dot{E}x_D)_{PS} \quad (7.184)$$

$$(\dot{E}x_D)_{NGS} = 1560,8MW + 265,3MW + 74,2MW + 38,6MW = 1938,8MW$$

Hata (MW) ve hata oranı (%)

$$Hata = |(\dot{Q}_{u,max})_R| - ((\dot{E}x_D)_{NGS} + |(\dot{W}_{Net})_{NGS}|) \quad (7.185)$$

$$Hata = 3002,8MW - (1938,8MW + 1026,5MW) = 37,4MW$$

$$Hata Oranı \% = Hata/|(\dot{Q}_{u,max})_R| \times 100 \quad (7.186)$$

$$Hata Oranı \% = (37,4MW/3002,8MW) \times 100 = 1,2\%$$

NGS'nin termodinamik verimi (%)

$$\eta_{NGS} = (\dot{W}_{Net})_{NGS}/|(\dot{Q}_{u,max})_R| \times 100 \quad (7.187)$$

$$\eta_{NGS} = (1026,6MW/3002,8MW) \times 100 = 34,2\%$$

NGS'nin ekserji yakıtı ve ekserji ürünü (MW)

$$(\dot{E}x_F)_{NGS} = |(\dot{Q}_{u,max})_R| + |(\dot{W}_{actual})_P| \quad (7.188)$$

$$(\dot{E}x_F)_{NGS} = 3002,8MW + 22,9MW = 3025,7MW$$

$$(\dot{E}x_P)_{NGS} = |(\dot{W}_{actual})_{HP-T}| + |(\dot{W}_{actual})_{LP-T}| \quad (7.189)$$

$$(\dot{E}x_P)_{NGS} = 426,8MW + 622,6MW = 1049,4MW$$

NGS'nin ekserji verimi (%)

$$\zeta_{NGS} = ((\dot{E}x_P)_{NGS}/(\dot{E}x_F)_{NGS}) \times 100 \quad (7.190)$$

$$\zeta_{NGS} = (1049,4MW/3025,7MW) \times 100 = 34,7\%$$

