



**T.C.  
YALOVA ÜNİVERSİTESİ  
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

**ENERJİ SİSTEMLERİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI  
ENERJİ SİSTEMLERİ MÜHENDİSLİĞİ BİLİM DALI**

**KOMBİNE ÇEVİRİMLİ BİR GÜÇ SANTRALİNİN TERMODİNAMİK  
PERFORMANS ANALİZİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Perihan AYIK**

**DANIŞMAN: Doç. Dr. Mehmet Selçuk MERT**

**YALOVA  
HAZİRAN 2024**



T.C.  
YALOVA ÜNİVERSİTESİ  
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

ENERJİ SİSTEMLERİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI  
ENERJİ SİSTEMLERİ MÜHENDİSLİĞİ BİLİM DALI

KOMBİNE ÇEVİRİMLİ BİR GÜÇ SANTRALİNİN TERMODİNAMİK  
PERFORMANS ANALİZİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Perihan AYIK  
218107013

DANIŞMAN: Doç. Dr. Mehmet Selçuk MERT

YALOVA  
HAZİRAN 2024

## ETİK BEYAN

Yalova Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Tez Yazım Kuralları'na uygun olarak hazırladığım “Kombine Çevrimli Bir Güç Santralinin Termodinamik Performans Analizi” başlıklı bu tez çalışmada; tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi, tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu, tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi, kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı, bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu bildirir, aksinin tespiti halinde doğabilecek her türlü hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi taahhüt ve beyan ederim.

İmza

Perihan AYIK

*(Faint watermark text: YALOVA ÜNİVERSİTESİ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ TEZ YAZIM KURALLARI)*

## ÖNSÖZ

Yüksek lisans eğitimim boyunca benden yardımlarını esirgemeyen, akademik anlamda bana her zaman destek olan ve doğru yolu gösteren sayın danışman hocam Doç. Dr. Mehmet Selçuk MERT'e teşekkür ederim. Her zaman yanımda oldukları ve benden desteklerini hiçbir zaman esirgemedikleri için eşime, aileme teşekkür ederim.

Bu tez çalışmasının desteklenmesine olanak sağlayan Yalova Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri (BAP) Koordinasyon Birimine (Proje No 2023/YL/0011) teşekkür ederim.

Haziran-2024

Perihan AYIK



## İÇİNDEKİLER

|                                                  |      |
|--------------------------------------------------|------|
| ETİK BEYAN .....                                 | i    |
| ÖNSÖZ.....                                       | ii   |
| İÇİNDEKİLER.....                                 | iii  |
| SİMGELER ve KISALTMALAR LİSTESİ .....            | v    |
| SİMGELER .....                                   | v    |
| KISALTMALAR .....                                | vi   |
| TABLolar LİSTESİ .....                           | vii  |
| ŞEKİLLER LİSTESİ.....                            | viii |
| ÖZET.....                                        | ix   |
| ABSTRACT .....                                   | x    |
| 1. GİRİŞ .....                                   | 1    |
| 2. KAYNAK ARAŞTIRMASI .....                      | 3    |
| 3. DÜNYADA ENERJİ .....                          | 7    |
| 3.1. Dünya’da Enerji Görünümü .....              | 7    |
| 3.2.Türkiye’de Enerji Görünümü .....             | 9    |
| 4.KOMBİNE GÜÇ SANTRALLERİ .....                  | 11   |
| 4.1. Kombine Çevrim Nedir? .....                 | 11   |
| 4.2.Kombine Çevrim Elemanları.....               | 12   |
| 4.2.1 Gaz Türbini .....                          | 12   |
| 4.2.2 Isı Geri Kazanım Buhar Üretici (HRSG)..... | 13   |
| 4.2.3 Buhar Türbinleri .....                     | 13   |
| 4.2.4 Kondenser .....                            | 14   |
| 4.2.5 Jeneratör Ünitesi .....                    | 15   |
| 4.3 Doğalgaz Kombine Çevrim Kavramları.....      | 15   |
| 4.3.1 Rankine Çevrimi .....                      | 15   |
| 4.3.2 Brayton Çevrimi .....                      | 17   |
| 4.3.3 Kombine Çevrimde Verim.....                | 19   |
| 5. EKSERJİ KAVRAMI VE 2.YASA .....               | 23   |
| 5.1.Potansiyel Ekserji .....                     | 24   |
| 5.2 Kinetik Ekserji.....                         | 24   |
| 5.3 Kimyasal Ekserji .....                       | 24   |
| 5.4 Fiziksel Ekserji .....                       | 25   |
| 5.5 İş, Isı ve Kütle ile Ekserji Transferi.....  | 26   |
| 5.6 Ekserjide Denge.....                         | 26   |

|                                                              |    |
|--------------------------------------------------------------|----|
| 5.7 Ekserjide Performansı Kriterleri.....                    | 27 |
| 5.7.1 Ekserji Verimi (Rasyonel Verim) .....                  | 27 |
| 5.7.2 Ekserji Kaybı (Tersinmezlik Oranı) .....               | 27 |
| 5.7.3 Geliştirme Potansiyeli.....                            | 27 |
| 6. SANTRAL TANITIMI VE HESAPLARI.....                        | 28 |
| 6.1. Ekserji Dengesi.....                                    | 30 |
| 6.1.1 Genel Akış Şeması.....                                 | 30 |
| 6.1.2 Kompresör İçin Analiz.....                             | 33 |
| 6.1.3 Yanma Odası İçin Analiz.....                           | 35 |
| 6.1.4 Gaz Türbini İçin Analiz .....                          | 37 |
| 6.1.5 Isı Geri Kazanım Buhar Üretici (HRSG) İçin Analiz..... | 39 |
| 6.1.6 Buhar Türbini İçin Analiz.....                         | 41 |
| 7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER .....                                | 46 |
| KAYNAKLAR.....                                               | 48 |
| ÖZGEÇMİŞ .....                                               | 51 |
| TEZDEN TÜRETİLEN YAYIN VE ESERLER.....                       | 51 |

## SİMGELER ve KISALTMALAR LİSTESİ

### SİMGELER

|               |                                         |
|---------------|-----------------------------------------|
| COP           | : Etkinlik Katsayısı                    |
| E             | : Toplam Enerji (kJ)                    |
| g             | : Yerçekimi İvmesi(m <sup>2</sup> /s)   |
| G             | : Geliştirme Potansiyeli                |
| h             | : Entalpi (kJ/kg)                       |
| $h_0$         | : Ölü Hal durumunda ki entalpi (kJ/kg)  |
| K             | : Kelvin                                |
| m             | : Kütle (kg)                            |
| $\dot{m}$     | : Kütleli debi (kg/s)                   |
| P             | : Basınç (bar)                          |
| $P_{atm}$     | : Atmosfer Basıncı (bar)                |
| $P_g$         | : Giriş Basıncı (bar)                   |
| $P_{\dot{c}}$ | : Çıkış Basıncı (bar)                   |
| $P_0$         | : Çevre Basıncı (bar)                   |
| Q             | : Toplam Isı Geçişi (kJ)                |
| R             | : Gaz Sabiti (kJ/kgK)                   |
| $s_0$         | : Ölü Hal Durumunda ki entropi(kJ/kg.K) |
| $S_{\dot{u}}$ | : Entropi üretimi (kJ/kg.K)             |
| T             | : Sıcaklık (K)                          |
| $T_0$         | : Çevre Sıcaklığı (K)                   |
| u             | : İç Enerji (kJ/kg)                     |
| $u_0$         | : Çevre İç Enerjisi (kJ/kg)             |
| v             | : Özgöl Hacim (m <sup>3</sup> /kg)      |
| V             | : Toplam Hacim (m <sup>3</sup> )        |
| W             | : İş (kJ)                               |
| $W_{tr}$      | : Tersinir İş (kJ)                      |
| $W_y$         | : Yararlı İş (kJ)                       |
| X             | : Ekserji (kJ)                          |
| $X_{pe}$      | : Potansiyel Ekserji (kJ)               |
| $X_{ke}$      | : Kinetik Ekserji (kJ)                  |
| $X_{ph}$      | : Fiziksel Ekserji (kJ)                 |
| $X_{ch}$      | : Kimyasal Ekserji (kJ)                 |
| $X_D$         | : Ekserji Kaybı (kJ)                    |
| $x_{IsI}$     | : Isı Transferi ile Geçen Ekserji (kJ)  |
| $X_y$         | : Ekserji Yok Oluşu (kJ)                |
| $X_W$         | : Ekserji Geçişi (kJ)                   |
| z             | : Yükseklik (m)                         |
| $\eta_{IsI}$  | : Isıl Verim                            |
| $\eta_{\Pi}$  | : Ekserji Verimi                        |

## KISALTMALAR

|       |                                           |
|-------|-------------------------------------------|
| AB    | : Alçak basınç                            |
| CH    | : Kimyasal                                |
| COP   | : Performans katsayısı                    |
| CT    | : Soğutma kulesi                          |
| DEA   | : Dearatör                                |
| DKGS  | : Doğal gaz Kombine Çevrimli Güç Santrali |
| EJ    | : Eksajoule                               |
| Gt    | : GigaTon                                 |
| GT    | : Gaz türbini                             |
| GW    | : Gigawatt                                |
| HRSG  | : Atık ısı kazanı                         |
| IEA   | : Uluslararası Enerji Ajansı              |
| KÇGS  | : Kombine Çevrimli Güç Santrali           |
| kg    | : Kilogram                                |
| kJ    | : Kilojoule                               |
| kV    | : Kilo-Volt                               |
| kW    | : Kilowatt                                |
| kWh   | : Kilowatt-saat                           |
| MW    | : Megawatt                                |
| MWh   | : Megawatt-saat                           |
| OB    | : Orta basınç                             |
| ST    | : Buhar türbini                           |
| TEİAŞ | : Türkiye Elektrik İletim Anonim Şirketi  |
| TEP   | : Ton eşdeğer petrol                      |
| TWh   | : Terawat-saat                            |
| YB    | : Yüksek basınç                           |
| YÜ    | : Yakıt Ürünü                             |

## TABLÖLER LİSTESİ

|                                                                                  |    |
|----------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tablo 5.1. Bazı maddelerin standart kimyasal ekserji değerleri [33].....         | 25 |
| Tablo 6.1. Ovaakça Doğalgaz Kombine Güç Santral Bilgileri .....                  | 28 |
| Tablo 6.2. Santral Akış Özellikleri.....                                         | 32 |
| Tablo 6.3. Havanın mol kesirleri ve standart kimyasal ekserjileri.....           | 33 |
| Tablo 6.4. Kompresörün ekserji, madde denklik hesapları .....                    | 34 |
| Tablo 6.5. Kompresörün ekserji hesaplamaları.....                                | 35 |
| Tablo 6.6. Doğalgazın mol kesirleri ve standart kimyasal ekserjileri .....       | 36 |
| Tablo 6.7. Yanma Gazlarının mol kesirleri ve standart kimyasal ekserjileri.....  | 36 |
| Tablo 6.8. Yanma Odasının ekserji, madde denklik hesapları .....                 | 36 |
| Tablo 6.9. Yanma Odasının Ekserji Hesaplamaları .....                            | 36 |
| Tablo 6.10. Gaz Türbinin ekserji, madde denklik hesapları .....                  | 38 |
| Tablo 6.11. Gaz Türbininin Ekserji Hesaplamaları.....                            | 38 |
| Tablo 6.12. HRSG için ekserji, madde denklik hesapları .....                     | 40 |
| Tablo 6.13. Isı Geri Kazanım Buhar Üreticinin (HRSG) Ekserji Hesaplamaları ..... | 40 |
| Tablo 6.14. Buhar Türbini için ekserji, madde denklik hesapları .....            | 43 |
| Tablo 6.15. Buhar Türbininin Ekserji Hesaplamaları .....                         | 43 |
| Tablo 6.16. Santralde yer alan Buhar Türbini Özellikleri.....                    | 43 |

## ŞEKİLLER LİSTESİ

|                                                                         |    |
|-------------------------------------------------------------------------|----|
| Şekil 3.1. Çin'de Yenilenebilir Enerji Kapasitesindeki Büyüme [21]..... | 7  |
| Şekil 3.2. Dünya Enerji Arzı ve Elektrik Üretiminin Dağılımı [17].....  | 8  |
| Şekil 4.1. Kombine Çevrim Şematik Gösterimi [5].....                    | 11 |
| Şekil 4.2. Kombine Çevrim T-S Diyagramı [5].....                        | 12 |
| Şekil 4.3. Gaz Türbini [24].....                                        | 12 |
| Şekil 4.4. Buhar Türbin Kısımları [26] .....                            | 14 |
| Şekil 4.5. Ovaakça Kombine Doğalgaz Santrali Soğutma Kulesi [27].....   | 15 |
| Şekil 4.6. Rankine Çevrimi ve T-s Diyagramı [1] .....                   | 16 |
| Şekil 4.7. Brayton Çevrimi ve T-s P-V Diyagramı [29] .....              | 18 |
| Şekil 4.8. Kombine Çevrim ve T-s P-V Diyagramı [10] .....               | 20 |
| Şekil 5.1. Ekserji bileşenleri [33] .....                               | 24 |
| Şekil 6.1. Santralin Görseli [27].....                                  | 29 |
| Şekil 6.2. Santral Akış Şeması .....                                    | 31 |
| Şekil 6.3. Kompresör Akış Şeması.....                                   | 34 |
| Şekil 6.4. Yanma Odası Akış Şeması.....                                 | 35 |
| Şekil 6.5. Gaz Türbini Akış Şeması .....                                | 37 |
| Şekil 6.6. Santralde Kullanılan Gaz Türbini Görseli .....               | 38 |
| Şekil 6.7. HRSG Akış Şeması.....                                        | 39 |
| Şekil 6.8. Santralde Kullanılan Atık Isı Kazan Görseli.....             | 41 |
| Şekil 6.9. Buhar Türbini Akış Şeması.....                               | 42 |
| Şekil 6.10. Santralde Kullanılan Buhar Ünitesi Görseli.....             | 42 |
| Şekil 6.11. Ünitelerin Ekserji Kayıpları .....                          | 44 |
| Şekil 6.12. Ünitelerin Geliştirme Potansiyelleri.....                   | 44 |
| Şekil 6.13. Ünitelerin Ekserji Verimleri.....                           | 45 |

# KOMBİNE ÇEVİRİMLİ BİR GÜÇ SANTRALİNİN TERMODİNAMİK PERFORMANS ANALİZİ

## ÖZET

Elektrik enerjisi günümüz dünyasında vazgeçilmesi mümkün olmayan bir konumdadır. Her anlamda gelişen dünya ile enerjiye olan talep de sürekli artmaktadır. Bu talebi karşılamak için dünya genelinde birçok elektrik üretim yöntemi mevcuttur ve yeni üretim yöntemleri ile sektör sürekli gelişmektedir. Bu elektrik üretim yöntemlerinden önemli bir yere sahip olan kombine çevrimli güç santralleri hem elektrik üretimi ile hem atık ısının geri kazanımı ile verimlilik yönünden de çevresel yönden de avantajlara sahiptir. Yüksek güç üretimi ve esnek çalışmaları ile sektörde yer alan kombine güç çevrimi santrallerinde yakıt olarak doğalgaz, kömür, petrol vb. yakıtlar tercih edilmektedir.

Kombine çevrimli güç santralleri termodinamik analiz uygulanarak tasarlanır ve işletme kısmında da termodinamikten sık sık faydalanılmaktadır. Termodinamiğin ikinci yasasına değinen ekserji analizi de tercih edilen analiz aracıdır. Ekserji analizi yapılarak santraldeki kayıplar ve kayıpların ne kadarının geliştirileceği gibi birçok büyüklük hesaplanabilir. Bu sayede verimlilik artırma çalışmaları planlamasında odak noktaları belirlenmiş olur.

Bu çalışmada, ele alınan santral 1408,9 MW kurulu gücünde Türkiye'nin Güney Marmara bölgesinde hizmet veren doğalgaz yakıtlı bir kombine çevrimli güç santralidir. Santralin işletme verileri kullanılarak ekserji analizi yapılmıştır. Her bir ünite için akış şemaları incelenerek kütle, enerji ve ekserji denklemleri oluşturulmuş, ekserji kayıpları ve ekserji verimliliği hesaplanmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Enerji, Ekserji Analizi, Kombine Çevrim, Gaz Türbini, Buhar Türbini

# **THERMODYNAMIC PERFORMANCE ANALYSIS OF A COMBINED CYCLE THERMAL POWER PLANT**

## **ABSTRACT**

Electrical energy is in an indispensable position in today's world. With the world developing in every sense, the demand for energy is constantly increasing. In order to meet this demand, there are many electricity generation methods worldwide and the sector is constantly developing with new production methods. Combined cycle power plants, which have an important place among these electricity generation methods, have advantages in terms of both electricity generation and waste heat recovery, efficiency and environmental aspects. Natural gas, coal, oil, etc. are preferred as fuel in combined cycle power plants, which are in the sector with their high power generation and flexible operation.

Combined cycle power plants are designed by applying thermodynamic analysis and thermodynamics is frequently utilized in operation. Exergy analysis, which refers to the second law of thermodynamics, is also the preferred analysis tool. Exergy analysis can be used to calculate many quantities such as the losses in the power plant and how much of the losses will be improved. In this way, focal points can be identified in the planning of efficiency improvement efforts.

The power plant considered in this study is a natural gas-fired combined cycle power plant with an installed capacity of 1408.9 MW serving in the South Marmara region of Türkiye. Exergy analysis were performed using the operating data of the power plant. By analyzing the flow charts for each unit, mass, energy and exergy balances were created, exergy losses and exergy efficiency were calculated.

**Keywords:** Energy, Exergy Analysis, Combined Cycle, Gas turbine, Steam turbine

## 1. GİRİŞ

Enerji, modern toplumların sürdürülebilir gelişimi ve ekonomik büyümesi için kritik bir öneme sahiptir. Dünyada ve Türkiye'de enerji ihtiyacı her geçen gün artarken, bu ihtiyacı karşılamak için çeşitli enerji kaynakları ve teknolojileri kullanılmaktadır. 2024 yılı itibariyle dünya enerji görünümüne bakacak olursak oldukça karmaşık ve dinamik bir yapıya sahip olduğunu söyleyebiliriz. COVID-19 pandemisinin etkilerinden toparlanma süreci, Ukrayna'daki savaşın meydana getirmiş olduğu belirsizlikler, küresel ekonomik dalgalanmalar enerji piyasalarını da etkilemeye devam etmektedir. Dünyada tüm bunlar yaşanırken, yenilenebilir enerji kaynaklarının son hızıyla büyümesi dikkat çekmektedir. Güneş ve rüzgar enerjisinin 2050 yılına kadar dünya enerji karışımında önemli bir paya sahip olması bekleniyor. IEA (Uluslararası Enerji Ajansı) “Küresel Enerji Görünümü 2024: Zirveler mi, Yaylalar mı?” raporuna göre özellikle güneş enerjisinin, mevcut seviyelerinin 10 katına kadar çıkabileceği öngörülmüyor.

Türkiye, enerji talebinin büyük bir kısmını doğal gaz ve petrol gibi fosil yakıtlardan karşılamaktadır. Ancak, son yıllarda yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelik yatırımlar da artmıştır. Türkiye'nin rüzgar, güneş, hidrolik ve jeotermal gibi yenilenebilir enerji potansiyeli yüksektir ve bu kaynaklar enerji üretiminde giderek daha fazla kullanılmaktadır.

Enerji politikaları açısından, Türkiye enerji arz güvenliğini artırmaya yönelik adımlar atmaktadır. Bu kapsamda, enerji verimliliği önlemleri ve yerli enerji kaynaklarının kullanımı teşvik edilmektedir. Ayrıca, enerji ithalatının azaltılması, enerji arzının çeşitlendirilmesi hedeflenmektedir.

Kombine çevrim santralleri elektrik üretimi için yaygın olarak kullanılan verimli ve çevre dostu bir teknolojidir. Bu santraller, yakıtı yakarak elektrik üretirken atık gazları da ikinci bir turda kullanarak daha fazla elektrik üretirler. Yüksek verimlilikleriyle bilinirler. Bu tesisler, yaklaşık %50 ile %60 arasında bir enerji verimliliği sağlayabilirler. Ayrıca, atık ısıнын ikinci bir çevrimde kullanılmasıyla toplam verimlilik daha da artabilir. Diğer geleneksel santrallere göre atmosfere salınan zararlı emisyonları azaltırlar. Özellikle, Avrupa ve Kuzey Amerika'da yaygın olarak kullanılmaktadırlar.

Kombine çevrim santralleri Dünya'da olduğu gibi ülkemizde de enerji üretimi açısından önemli bir yere sahiptir. Elektrik üretiminin yanı sıra atık gaz sıcaklığından yararlanılarak elde edilen ısıyı kullanarak binaları veya endüstriyel tesisleri ısıtmak veya soğutmak için de

kullanılabilirler. Bu tesisler, doğalgaz, kömür, petrol ve biyokütle gibi çeşitli yakıtlarla çalışabilirler.

Kombine güç santrallerinde ekserji analizi enerji verimliliğini artırmak ve kaynak kullanımını optimize etmek için önemli bir araçtır. Enerji analizi ise verimliliğin artırılması, maliyet tasarrufu sağlanması, çevresel etkilerin azaltılması ve operasyonel performansın iyileştirilmesi açısından kritik bir öneme sahiptir. Kayıpların tespit edilmesi, sistemin hangi bileşenlerinde verimliliğin artırılması gerektiğini ortaya koyar. Bu da, daha az yakıt tüketimi ve dolayısıyla, daha az zararlı emisyon anlamına gelir. Kısacası, ekserji ve enerji analizi, atık ısının ve diğer enerji kayıplarının minimize edilmesine yardımcı olur.

Bu çalışma; 1409,8 MW gücünde mevcut bir doğalgaz yakıtlı kombine çevrim santrali olan Ovaakça Kombine Güç Santrali'nin işletme verileri kullanılarak yapılmıştır. Santral alanı yaklaşık 90.000 m<sup>2</sup> olup bölgenin enerji ihtiyacını karşılamaktadır. Santral; iki adet kombine çevrim bloğunu içermektedir. Her bir bloğun gücü 704,9 MW'dır. İki blok da iki gaz türbin jeneratör ünitesi ve bir buhar türbin jeneratör ünitesinden oluşmaktadır.

## 2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Kombine güç santralleri; 1939 yılından itibaren atık ısıyı sisteme yeniden kazandırma amacıyla kullanıma başlamıştır. İlk kullanımlarda verim değerleri %32 civarında olsa da çalışmalar ile günümüzde verimin %60 değerine ulaşabildiğini ortaya koymaktadır. Bu bölümde günümüze kadar yapılmış kombine çevrim santralleri çatısı altında enerji ve ekserji analizi, verimliliğe etki eden parametreler, termoekonomik analizleri gibi çalışmalar ele alınmıştır.

Hesselmann (1986), Avgoisti ve diğ. (1989) gibi araştırmacılar, yatırım maliyeti-ekserji kaybı, ekserji- ürün kaybı bağıntısını ele alan çalışmalar üzerinde durmuşlardır [1].

Kotas (1995), "The Exergy Method of Thermal Plant Analysis" isimli eserinde ekserjinin temel bağıntılarını detaylıca çalışmış, termal sistemlerin analizleri üzerinde durarak farklı süreçlerin ekserji analizlerinden de bahsetmiştir [2].

Özçelik (1996) faaliyette olan bir sistemin enerji ve ekserji analizini yapmıştır. Sonuçta sistemin maksimum enerji kaybının %30'unun yanma odasında, %22'sinin buhar jeneratör ısı geri kazanım sisteminde, %12,5'unun bacada meydana geldiği tespit edilmiştir. Benzer güç santrallerinde verimleri artırmanın santraldeki donanım sayısına bağlı olduğu sonucuna varmıştır [3].

Erduranlı (1997), Karabük'de yer alan Demir Çelik termik santralının ekserji analizini yapmıştır. Santral ünitelerinden kondenser, ısıtıcı, kazan ve türbinin enerji-ekserji analizi yapılmıştır. Yaptığı çalışmada sonuç olarak maksimum kaybın kazanda meydana geldiğini gözlemlemiştir [4].

Ünver ve Kılıç (2005), çalışmasında termodinamiğin birinci ve ikinci yasalarını kullanarak yakıtı doğalgaz olan kombine güç santralının çevre sıcaklığı ve yük durumuna bağlı performansı üzerine çalışmışlardır. Sisteme ait her bir ünitenin faydalı güç, tersinir güç ve tersinmezliklerini bularak verim hesabı yapmışlar, yapılan hesapların sonucunda ise atmosfer sıcaklığının artmasının verimi olumlu yönde etkilemediği, özgül yakıt harcamasının arttığını gözlemlemişlerdir [5].

Cihan vd. (2006), kombine çevrimli güç santrali için enerji ve ekserji analizi yapmış, kaybın en fazla bacada ve en az yanma odası, gaz türbini ve atık ısı geri kazanım ünitelerinde olduğunu gözlemlemişlerdir [6].

Başaran (2010), 1350 MW gücündeki Ambarlı Santrali üzerinde KÇGS'lerinin performansa bağlı oluşan kayıplarının ölçme ve modellemesi üzerine çalışmışlardır [7].

Altay (2010), devrede olan kombine çevrimli güç santrali için modelleme ile santral ünitelerini analiz ederek verimlilik ve tasarruf olanaklarını incelemeyi hedeflemişlerdir. Santral verimliliğini arttırmak için ne yapılması gerektiğini, enerji tüketiminde verimlilik artışı için alınacak önlemleri çalışmıştır. İlaveten; bölgesel ısıtma ve soğutma, sera ısıtması gibi uygulamalarda atık ısının kullanılmasını da çalışmasında ele almıştır [8].

Hacıhafizoğlu (2011), kombine çevrimli güç santrallerinde kompresör havasının soğutulması, türbine giren havanın ısıtılması ve yanma odasına enjekte edilen buharın Kombine çevrimli güç santrali performansına olan etkisi incelemiştir [9].

Özgür (2011), kombine çevrimli güç santralinde üniteleri ayrı ele alarak MATLAB programındaki modellemesi ile incelemiştir. Santralde performansın izleme kriterlerini ve yöntemlerini ele almıştır. Çalışma sonucunda ortaya çıkan sonuçları mevcuttaki santral ile mukayese ederek, sonuçların yakınlığını ve doğruluğunu incelemiştir [10].

Karagöz, F. (2011), 82 MW gücünde enerji üreten doğal gaz yakıtlı kombine çevrim güç santraline ait gerçek veriler ile enerji ve ekserji analizini çalışmıştır. %48,43 değeriyle en fazla ekserji kaybının yanma odasında oluştuğunu gözlemlemiştir. Hesaplamalar sonucunda santral; %49 değeriyle ısı verim, %47 değeriyle ekserji verimine sahip olmuştur. Çalışmanın sonucunda öneri olarak yapılacak iyileştirme ve verim arttırma çalışmalarının yanma odası, buhar türbini, kondenser ve baca ünitelerinde olması gerektiği sonucuna varmıştır [11].

Mert (2010), Ereğli’de yer alan demir çelik fabrikasına ait yakıtı doğalgaz olan 39,5 MW gücüne sahip kojenerasyon tesisinin ekserji hesabı ile ekonomik analizini; kütle, enerji, ekserji eşitliğini hesaplamışlardır. Kojenerasyon tesisi bir saatte 80 tonluk buhar üretim kapasitesine sahiptir. En yüksek ekserji kaybının çalışmalar sonucunda yanma odasında olduğunu tespit etmiş, geliştirme ve iyileştirme olarak en verimi yüksek ünite ise gaz türbini olduğu sonucuna varmışlardır [12].

Karaağaç (2018), ele aldığı 240 MW güce sahip doğalgaz çevrimli kombine çevrim güç santrali için yaptığı enerji ve ekserji analizlerinde dış ortam sıcaklığının santral performansına etkisini incelemiş ve sonuç olarak santralin gücünü direkt etkilediğini gözlemlemiştir [13].

Gümüş (2019), ele aldığı çalışmasında bir doğalgaz kombine çevrim santralinin enerji, ekserji analizini yapmıştır. Santral işletmesinden çalışma şartları ile ilgili bilgi alarak santralin bazı kısımlarına Aspen programı ile benzetimi yapılmış, sonuçlar gerçek santral bilgileri ile mukayese edilmiştir. Çalışmada, 0 °C, 10 °C, 20 °C ve 30 °C’lik sıcaklıklardaki durumlarda

benzetimler yapılmış, yapılan benzetim ve hesaplama sonuçlarına göre, gaz türbin ünitesinin verimi aynı sıra ile %38,26, %38,13, %38,00 ve %37,88 olarak hesaplanmıştır [14].

Dikili ve diğ. (2021), İstanbul'da 410,8 MW elektrik üreten doğalgaz yakıtlı kombine güç çevrim santralının enerji ve ekserji analizini yapmışlardır. Santralde yer alan ünitelerde kaybedilen birim zaman başı enerji miktarı ve tersinmezlik değeri hesaplanmış ve termodinamiğin birinci yasa verimi %55,88, ikinci yasa verimi ise %53,06 olarak hesaplanmıştır. En fazla tersinmezliğin yanma odasında, en fazla enerji kaybının kondenserde ve toplam ekserji kaybının 363,3 MW olduğu sonucuna varılmıştır [15].

Adem ve diğ. (2023), Sivas Kangal termik santraline ait 16 adet ünite, 34 adet akım için ekserji ve enerji analizi yapmışlar, en fazla ekserji kaybının kazanda gerçekleştiği sonucuna varmışlardır. Kondenserdeki kayıpların azaltılması için içindeki boruların belirli aralıklar ile temizlenmesi gerektiği önerisinde bulunmuşlardır [16].

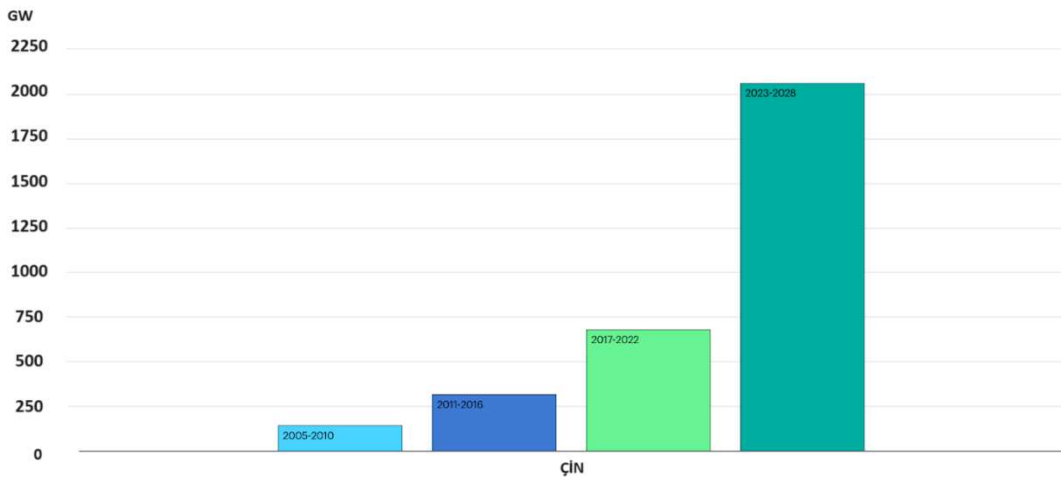


### 3. DÜNYADA ENERJİ

#### 3.1. Dünya’da Enerji Görünümü

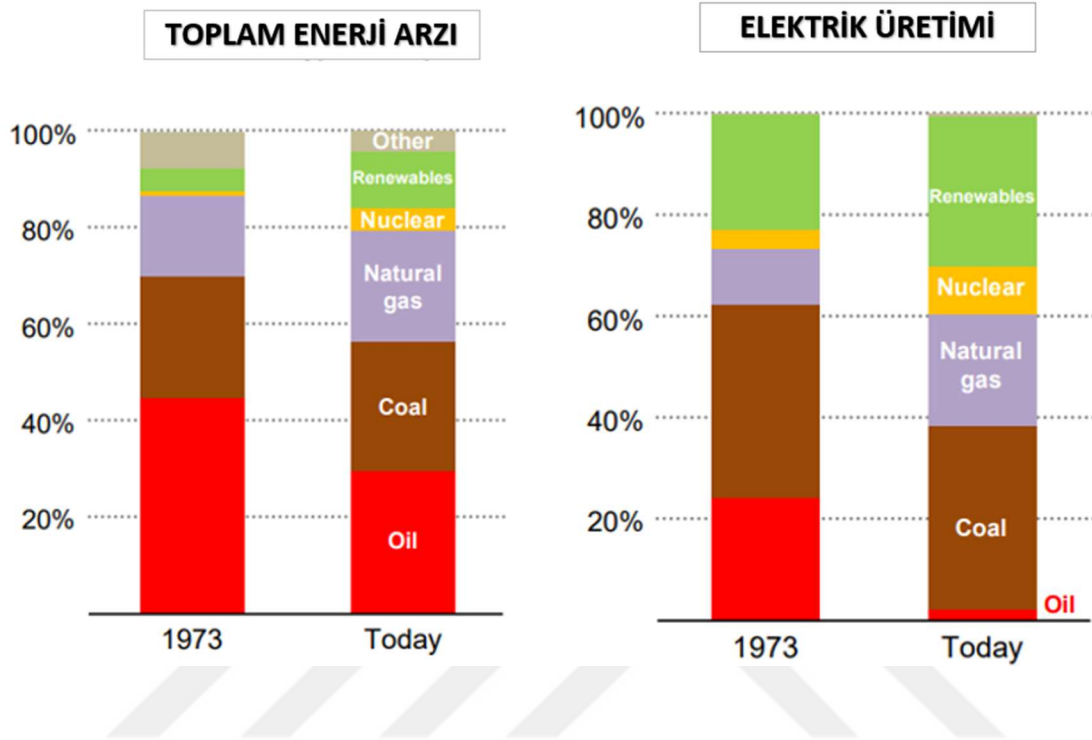
Sanayileşmenin hızlanması, nüfusun artması, deniz üssü ticaretin yaygınlaşması, tüketim alışkanlıklarının artarak değişmesi, teknolojinin gelişmesi, dijitalleşme gibi etkenler enerji talebini giderek artırmaktadır. Artan enerji talebi ise çevre ve doğal kaynaklar üzerinde daha fazla ihtiyaç oluşturmakta zaman zaman arz güvenliğine yönelik endişeleri de beraberinde artırmaktadır. Dünya’da enerji sektörü COVID-19 pandemi ve Ukrayna’daki savaşın etkisiyle dalgalı bir dönemden geçiyor. 2023 yılında küresel enerji talebi %2,4 artarak 97,5 EJ’e yükseldi [17]. Küresel olarak yenilenebilir enerji kapasitesi %10 artarak 3.600 GW’a, kömür kullanımı %1 artarak 8,2 EJ’e ulaştı [18]. Dünya karbon emisyonu ise %1,2 artış göstererek 33,5 Gt’a ulaştı [19].

Asya Pasifik bölgesi küresel enerji talebinin %40’lık kısmını oluşturmaktadır. Bu doğrultuda 2023 yılı içerisinde enerji talebinde en hızlı büyüyen bölge olmuştur. Bölge içerisinde kömür kullanımı hala çok yüksek olsa da yenilenebilir enerji yatırımları da artış göstermektedir. Avrupa’da ise hedef 2030 hedefi olarak yenilenebilir enerji payını %40 seviyesine çıkarmaktır [20]. Bu doğrultuda yatırımlar gün geçtikçe artmaktadır. Kuzey Amerika’da diğer bölgelere kıyasla enerji talebinin artması daha yavaştır. Bölge içerisinde doğalgaz yaygın olmakla beraber yenilenebilir enerji yatırımları artışı da yavaştır. Bölge, fosil yakıtlara bağlı olarak ifade edilebilir. Afrika ise, enerji talebinin en hızlı artış gösterdiği diğer bir bölgedir. Elektrik erişimi sınırlı olan bölgede, yenilenebilir enerji yatırımları, enerji talebini karşılamak için büyük önem taşımaktadır.



Şekil 3.1. Çin’de Yenilenebilir Enerji Kapasitesindeki Büyüme [21]

Çin, 2023 yılında; tüm dünyanın 2022'de devreye aldığı kadar güneş enerjisi santralini devreye alırken, kurduğu rüzgar santralleri de bir önceki yıla göre %66 artış göstermiştir. Bu gelişmeler ile küresel olarak, güneş enerjisi tek başına dünya çapındaki yenilenebilir kapasite ilavelerinin dörtte üçünü oluşturmuştur [17].



Şekil 3.2. Dünya Enerji Arzı ve Elektrik Üretiminin Dağılımı [17]

IEA Dünya Enerji Görünümü 2023 raporunda yer alan grafikte toplam enerji arzı ve elektrik üretimi grafiklerine bakıldığında sektördeki fosil yakıtların yüzdesel olarak dağılımlarındaki ağırlıkları net bir şekilde görülebilmektedir. 1973’de dünyanın toplam enerji arzında petrolün payı yüzde 45, kömürün payı yüzde 25, doğalgazın payı yüzde 15 iken, bugün petrolün payı yüzde 30’a gerilemiş, kömür aynı konumunu korumuş, doğalgaz ise payını yüzde 20’nin üzerine taşımıştır [21].

Günümüz dünyasında, hemen hemen tüm enerji projeksiyonlarında yenilenebilir enerji kaynaklarından üretilen enerjinin giderek artacağı öngörülmektedir. Yenilenebilir enerjideki bu artış, sanayi devrimi ile enerji tüketiminin her geçen gün hızla arttığı, dünya genelinde fosil yakıtların bu talebi karşıladığı bir piyasada yüzdesel olarak çok ufak bir paya sahiptir. Bu yüzden, fosil yakıtların karşılamış olduğu talebi karşılaması uzun zaman alması öngörülmektedir [12].

### 3.2.Türkiye’de Enerji Görünümü

2020 yılındaki Covid-19 salgını ve 2022 yılındaki Rusya Ukrayna Savaşı tüm ülkeler için tehdit oluşturmuştur. Küresel piyasadaki fiyatlarındaki bu tehdit Türkiye’de de elektrik, doğalgaz ve kömür fiyatlarında önemli artışlara neden olurken tüm tedarik zincirini etkilemiştir. Fosil yakıtlar üzerine kurulmuş bir piyasanın neredeyse tamamını ithal eden Türkiye’nin, petrol ve doğalgazda dışa bağıllığının kaçınılmaz bir sonucu olarak küresel piyasalardaki fiyat artışlarından doğrudan etkilenmektedir. Bu artış, Türkiye’yi enerjide dışa bağıllığı azaltmak ve cari açığı kırılganlığı önlemek hedefiyle düşük karbonlu enerji dönüşümüne itmektedir. Bu kapsamda gerek mevzuat gerek ise yapılan yatırımlar da 2053 net sıfır emisyon hedefini desteklemektedir.

Türkiye’de enerji sektörünün dışa bağımlı olması, artan enerji talebi ve sürdürülebilirliğin sağlanması gibi sebepler ile riskli bir durumdadır. Bu duruma karşın, gün geçtikçe yenilenebilir enerji yatırımları artmakta enerji verimliliği çalışmaları ise daha çok gündeme gelmektedir. Türkiye'nin enerji sisteminin sürdürülebilir olması için yenilenebilir enerjiye yatırımların artması, enerji verimliliği çalışmalarının hızla sürdürülmesi büyük önem taşımaktadır.

Türkiye elektrik enerjisi tüketimi 2023 yılında 2022 yılına göre %0,2 oranında azalarak 330,3 TWh, elektrik üretimi ise 2022 yılına göre %0,6 azalarak 326,3 TWh olarak gerçekleşmiştir.

2023 yılında elektrik üretimimizin, %36,3’ü kömürden, %21,4’ü doğalgazdan, %19,6’sı hidrolik enerjiden, %10,4’ü rüzgardan, %5,7’si güneşten, %3,4’ü jeotermal enerjiden ve %3,2’si diğer kaynaklardan elde edilmiştir [22].

TEİAŞ’ın yayınlamış olduğu “Türkiye Brüt Elektrik Üretiminin Birincil Enerji Kaynaklarına Göre Aylık Dağılımı” grafiğine göre, 2024 yılı nisan ayı sonu itibariyle, 14.453,6 GWh enerji üretimi doğalgaz/LNG yakıtı kullanılarak üretilmiştir [23].

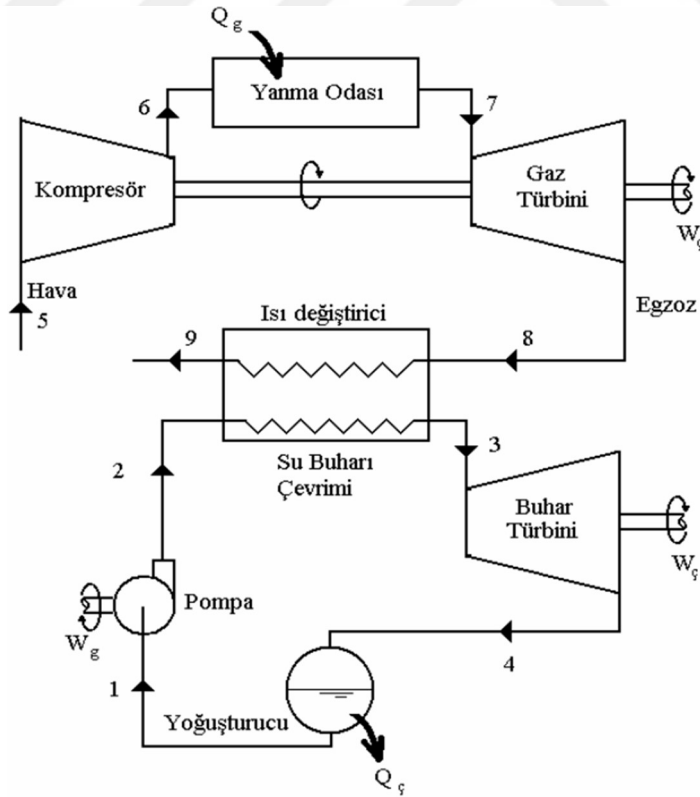


## 4.KOMBİNE GÜÇ SANTRALLERİ

### 4.1. Kombine Çevrim Nedir?

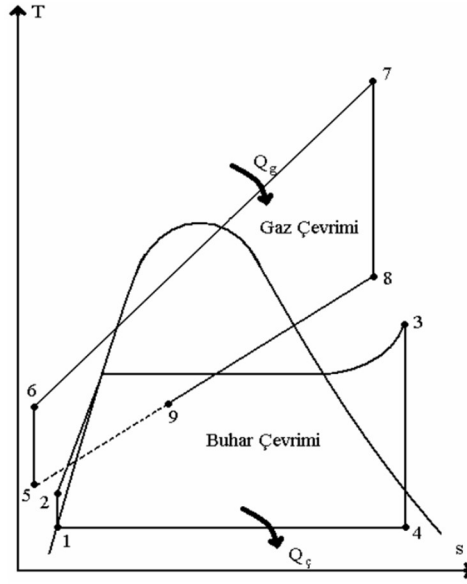
Doğalgaz yakıtlı kombine çevrimli güç santralleri elektrik üretmek için iki veya daha fazla çevrimi bir arada bulunduran elektrik santrali türüdür. En yaygın kullanılan ise gaz türbini ve buhar türbinini birleştiren sistemdir. Gaz türbini elektrik üretmek için doğalgazı yakar. Atık ısı ise buhar türbinini çalıştırır. Bu sistem, geleneksel bir elektrik santralinden daha fazla elektrik üretmek için aynı miktarda yakıt kullanmayı mümkün kılar. Hızlı inşa edilmeleri ise oluşacak enerji talebine karşın avantaj sağlarken, maliyet olarak dezavantaj sağlamaktadır.

Atmosferden alınan hava gaz türbininin kompresörüne girerek burada sıkışır. Sıkıştırılmış hava yanma odasına giderek doğalgaz ile karıştırılarak yakılır. Yanma sonucunda meydana gelen basınçlı gazlar türbin kanatlarını döndürür. Türbinden çıkan yüksek sıcaklığa sahip egzoz atık ısı kazanına gönderilir. Türbinden kazana gelen atık ısı ile sudan buhar üretilir. Buhar; buhar türbininin kanatlarını döndürerek elektrik üretir. Türbinden çıkan buhar bir kondenserde soğutulur tekrar sıvı hale dönüştürülür. Dönüştürülen su tekrar kazana gönderilerek çevrimi devam ettirir.



Şekil 4.1. Kombine Çevrim Şematik Gösterimi [5]

Kombine doğalgaz çevrim santralleri elektrik üretimi için iki termodinamik çevrimi birleştiren yüksek verimli enerji santralleridir. İki çevrim, gaz türbininin temelini oluşturan Brayton çevrimi ve buhar türbininin temelini oluşturan Rankine çevrimidir.



Şekil 4.2. Kombine Çevrim T-S Diyagramı [5]

## 4.2.Kombine Çevrim Elemanları

### 4.2.1 Gaz Türbini

Kombine çevrim santrallerinde, gaz türbinleri, elektrik üretmek için kullanılan ilk aşamadaki termodinamik çevrimi oluşturur. Kombine çevrimlerde hava soğutmalı ve su soğutmalı gaz türbini olarak 2 çeşit gaz türbini kullanılır.



Şekil 4.3. Gaz Türbini [24]

Gaz türbini; yanmadan kaynaklı ısı enerjisini mekanik enerjiye çeviren bir sisteme sahiptir. Çalışma prensibi ise; kompresör havayı sıkıştırır, basınç ve sıcaklık artar. Yüksek basınçlı hava, yanma odasına gelir. Yanma sonucunda meydana gelen yüksek sıcaklığa sahip gazlar, türbinde çevrenin sahip olduğu basınca genişler ve böylece iş yapmış olur. Türbin, çıkış şaftıyla jeneratör ve kompresörü çalıştırır [25].

#### **4.2.2 Isı Geri Kazanım Buhar Üretici (HRSG)**

Kombine çevrim santrallerinde ısı geri kazanım buhar üretici diğer bir adıyla atık ısı kazanı, gaz türbininden çıkan yüksek sıcaklıktaki egzoz gazlarını kullanarak buhar üretmek için kullanılır. Bu buhar, buhar türbinini çalıştırarak ek elektrik üretir. Atık ısı kazanları, gaz türbininin egzoz gazlarının özelliklerine göre tasarlanır. Kazan kapasitesi, gaz türbininin gücüne ve istenen buhar miktarına bağlıdır.

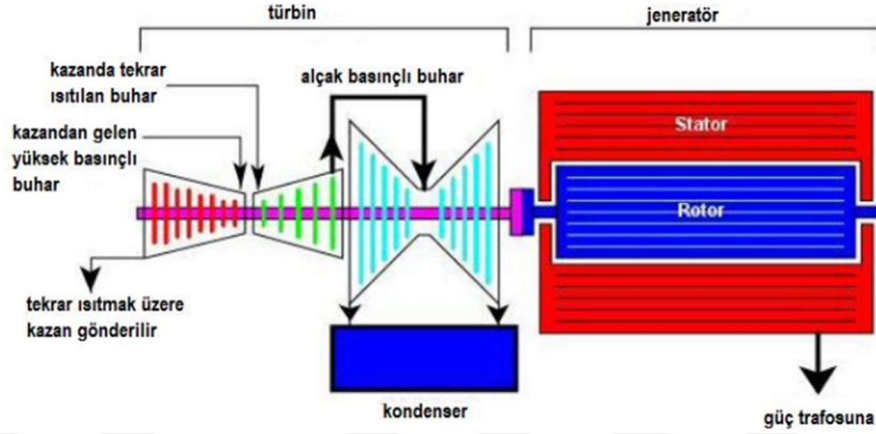
Atık ısı kazanı su buhar devresi, dört ana kısımdan (ekonomizer, su buhar devresi, evaporatör, baca gazı kanalında bulunan kızdırıcı) oluşan ve atık ısıdan faydalanarak buhar türbinlerini besleyen bir sistemdir. Soğuyan kondensat suyu atık ısıyla ısıtılarak doyma noktasına çok yakın bir sıcaklığa gelir. Bu sayede atık ısı geri kazanılmış verimlilik artırılmış olur. Daha sonra ısıtılmış kondensat evaporatörde buharlaşır. Doymuş buhar ardından kızdırıcıya giderek ilave ısı ile kızgın buhar haline gelir. Buharın kızdırılması; yüksek basınç ve yüksek sıcaklık sebebi ile türbinden daha fazla güç elde edilmesine sebep olur. Yanma sonucu meydana gelen gazlar baca gazı kanalından atılır.

Atık ısı kazanında üretilmiş şekilde türbine gelen buhar, türbinde genişleyerek enerji dönüşümü meydana gelir. Türbin tahrikiyle türbin-jeneratöründen elektrik enerjisi üretilmiş olur. Alçak basınç ve sıcaklıktaki buhar, buhar türbininden çıkar, su soğutmalı bir yoğuşturucuda yoğuşturulur. Ardından kazanlara su olarak gelir, yeniden buharlaştırılır ve çevrim devam eder [11].

#### **4.2.3 Buhar Türbinleri**

Kombine çevrimlerde buhar türbini, bir diğer termodinamik çevrimi tamamlayarak elektrik üretmek için kullanılır. Gaz türbininden gelen yüksek sıcaklığa sahip egzoz gazları atık ısı kazanına gelir ve burada buhar üretmek amacıyla kullanılır. Üretilen buhar, buhar türbinini çalıştırır ve elektrik üretir.

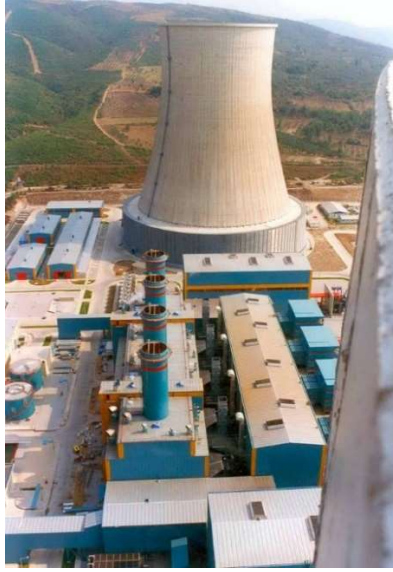
Atık ısı kazanından çıkan kızgın vaziyetteki buhar, türbin kanatlarına çarpar, ardından genişleşerek türbinin miline hareket kazandırmış olur. Kızgın buhar türbinde enerji dönüşümünü tamamladıktan sonra sıcaklığı düşer ve yoğuşması için kondensere gider.



Şekil 4.4. Buhar Türbin Kısımları [26]

#### 4.2.4 Kondenser

Kombine santrallerde yer alan kondenser, buhar türbininden çıkan buharı yoğuşturarak tekrar çevrime vermek üzere kazan besleme suyuna dönüştürmek için kullanılır. Güç santrallerinde kondenser kullanılmasının önemli iki sebebi vardır. En önemli sebebi, buharın ısısından en fazla yararı alabilmesi için türbin çıkışında düşük basınç oluşturur, türbin gücü ve verimi arttırmaktır. Diğer sebebi ise, türbin çıkışındaki buharı yoğuşturarak su haline getirip ardından kazana geri göndermesidir. Kondenserin yaklaşık 1-50 oranında soğutma suyu ihtiyacı vardır. Yüksek güçteki santraller bu yüzden deniz, büyük akarsu gibi sulak alanların kenarlarına kurulmaktadır. Eğer su kaynağına yakın olmayan yerde santral kurulacak ise soğutma kuleleri kullanılır. Soğutma kulelerinin soğutma etkisi deniz veya akarsuya göre daha düşüktür. Bu da mutlaka tesisin verim ve üretilen gücünü birinci dereceden etkileyen bir unsurdur [25].



Şekil 4.5. Ovaakça Kombi Doğalgaz Santrali Soğutma Kulesi [27]

#### 4.2.5 Jeneratör Ünitesi

Jeneratörler; mekanik hareketi yüksek oranlarla elektrik gücüne elektromanyetik indüksiyon prensibi kullanarak dönüştüren yüksek verime sahip makinelerdir. Jeneratörler başka bir güç kaynağı ile döndürülerek elektrik üretebilirler. Jeneratörlerin dönme hareketini sağlayan çeşit çeşit makine olmasına rağmen, günümüzde en yaygın kullanılan makineler su, gaz, buhar türbinleridir [11].

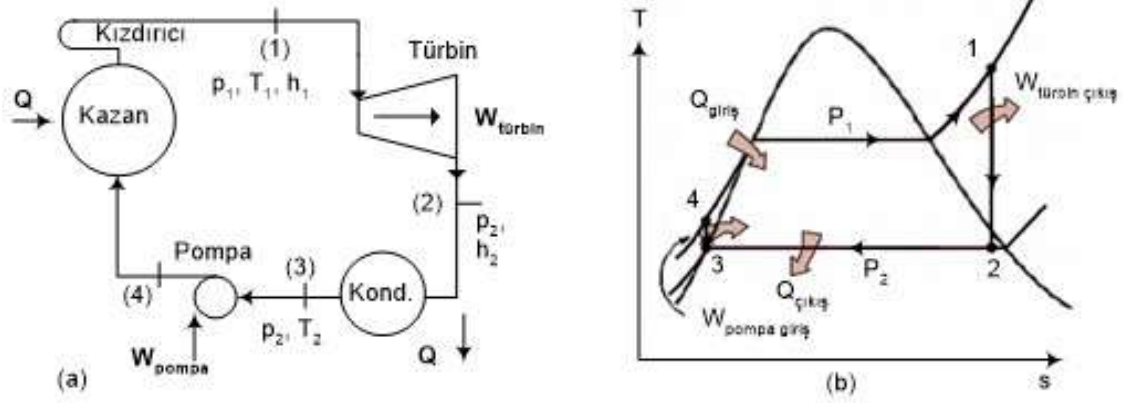
Jeneratörler farklı voltaj ve akım seviyelerine göre elektrik üretebilir. Doğru akım (DC) jeneratörleri, yok denecek kadar az tercih edilir. Bu yüzden, günümüzdeki jeneratörlerin tamamına yakını alternatif akım (AC) jeneratörleridir.

Alternatif akım jeneratörleri basit yapıda ve sağlamlardır. Bakımları kolaydır. Sabit kısım diyebileceğimiz stator ve döner kısım diyebileceğimiz rotor kısımdan oluşurlar. Rotor üzerinde kutup sargıları yer alır. İçerisindeki mıknatıslar rotorun döner hareketi ile manyetik alan oluşturur. Stator, alternatif gerilim (AC) üretildiği kısımdır ve üzerinde sargılar yer alır [28].

### 4.3 Doğalgaz Kombi Çevrim Kavramları

#### 4.3.1 Rankine Çevrimi

Buharlı güç santrallerinde ideal çevrim olarak adı geçen Rankine çevrimi temelde 4 elemana sahiptir. Çevrim; basınçlandırmayı yapan pompa, ısı değiştirici görevi gören kazan, işin elde edilmesini sağlayan türbin ve sistemdeki akışkanı yoğunlaştırarak sisteme yeniden sunan yoğunlaştırıcıdan oluşur.



Şekil 4.6. Rankine Çevrimi ve T-s Diyagramı [1]

Bu çevrim için enerji denklemi,

$$(q_{giren} - q_{çıkan}) + (w_{türbin} - w_{pompa}) = 0 \quad (4.1)$$

Net güç;

$$w_{net} = w_{türbin} - w_{pompa} \quad (4.2)$$

çevrimin ısı verimi,

$$\eta_{\text{Çevrim, ısı}} = \frac{w_{net}}{q_{buharlaştırıcı}} \quad (4.3)$$

olarak verilmiştir.

İdeal Rankine çevriminde kazan ve yoğuşturucuda basınç sabit kalırken, pompa ve türbinin ise izantropik şartlarda (entropinin sabit kaldığı durumda) çalıştığı kabulü yapılır. Pompa ile besleme suyu, kazanın çalışma basıncına ulaşana dek sıkıştırılır. Kazana gelmiş olan su, ısı alır ve buharlaşır. Seçilen ısı kaynağı, Rankine çevriminin tasarımı ve performansı üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Almış olduğu ısı enerjisi; kömür, petrol, biyokütle, nükleer yakıt veya KÇGS için gaz türbini egzoz gazlarının sahip olduğu enerji kaynaklı olabilir [14].

Rankine çevrimi günümüzde sanayi ve enerji üretim gibi sektörlerde sıklıkla tercih edilmektedir. Çevrim içerisinde akışkan olarak sıklıkla su tercih edilir. Sistem yüksek sıcaklık ve yüksek basınç şartlarında çalışır. Eğer düşük sıcaklık aralığında akışkan olarak su yerine organik akışkan kullanılırsa organik Rankine çevrimi olarak adlandırılır. Günümüzde, yenilenebilir enerji kaynakları ile yapılan uygulamalarda organik Rankine çevrimi daha çok tercih edilmektedir [29].

Rankine çevrimlerinde herhangi bir ilave bir sistem kullanmadan (ara ısıtma vb.) verimi arttırmanın yolları; türbin giriş sıcaklığını arttırmak, yoğunlaşma basıncını düşürmek, daha yüksek kritik sıcaklık ve buhar basıncına sahip akışkan seçmek, sistemdeki ünitelerin verimini arttırmak, çevrim şartlarını optimize etmek, sistemin periyodik bakımlarını eksiksiz yapmak gibi sıralanabilir.

#### 4.3.2 Brayton Çevrimi

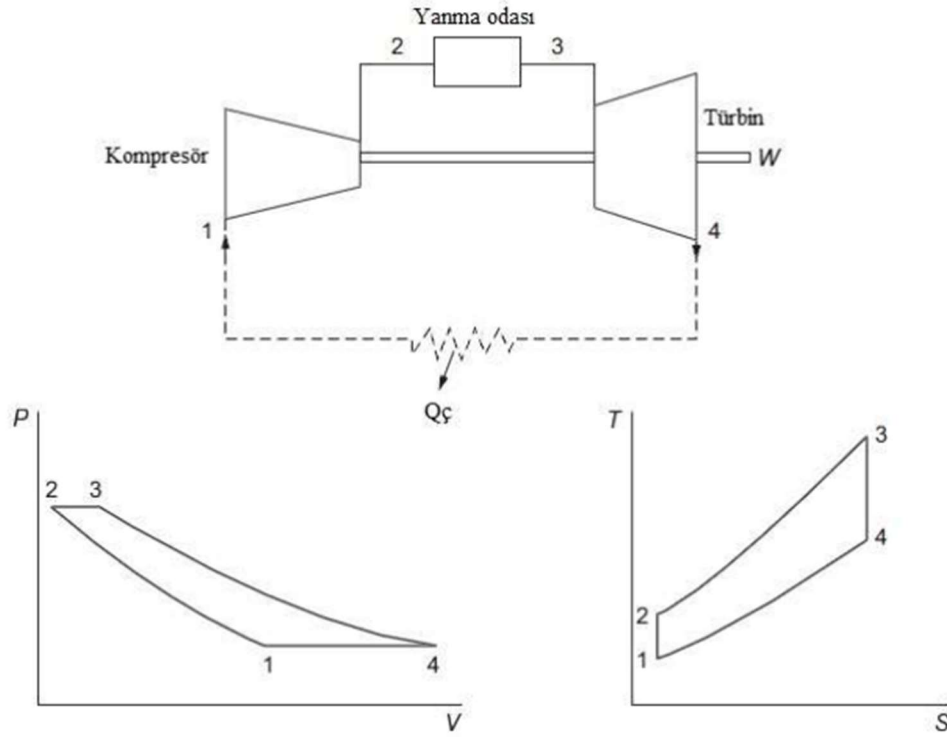
Brayton çevrimi, gaz türbinli sistemler olarak da adlandırılmakta olup sistemde mekanik güç üretimi yapılmaktadır. Gaz türbinleri günümüzde birçok farklı sektörde geniş bir kullanım alanına sahiptir. Boyutlarına oranla yüksek güç üretebilmeleri, düşük yatırım maliyetine sahip olmaları, modüler bir tasarıma sahip olmaları, hafif olmaları, hızlı başlatma ve durdurulabilir olmaları, kısa kurulum süresine sahip olması, yüksek güvenilirlikli olması, farklı yakıtlarla çalışabilmeleri, çevre dostu olmaları, işletme bakım maliyetlerin düşük olması gibi birçok avantajlarından dolayı, gaz türbinli sistemler sektörde oldukça fazla uygulama alanı bulmuştur [30].

Brayton çevrimi diğer bir deyimle gaz türbinli sistemler; elektrik güç santralleri, uçak ve helikopterler, gaz nakil hatlarındaki pompalama istasyonları, lokomotifler, gemiler, tank ve taşıma araçları gibi birçok uygulama alanına sahiptirler. Kombine çevrim santrallerinde de buhar türbinleriyle beraber yer alırlar.

Brayton çevrimi yüksek sıcaklıklara çıkabilen bir sisteme sahiptir. Türbin kanatlarının sıcaklığa dayanıklı malzemelerle yapılması, havayla soğutma yapılabilmesine rağmen, çevrimi çok yüksek sıcaklıklarda terk ettikleri için, ısı verim değeri yüksek değerlere ulaşamamaktadır [31].

Brayton çevriminin çalışma prensibi kısaca;

- 1. Sıkıştırma:** Dışarıdaki hava kompresörde sıkıştırılır ve ısınır.
- 2. Yanma:** Sıkıştırılmış hava, yakıt ile yanma odasında sabit bir basınçta yanar.
- 3. Genleşme:** Yanma ürünü gazlar türbinden geçerek genişler ve iş üretir.
- 4. Egzoz:** Soğuk gazlar salınır.



Şekil 4.7. Brayton Çevrimi ve T-s P-V Diyagramı [29]

Brayton çevriminde ısı verim ifadesi;

$$\eta_{\text{çevrim}} = \frac{W_{\text{net}}}{Q_{\text{yanma}}} \quad (4.4)$$

olarak verilmiştir. Atık ısı ismiyle anılan enerjinin kaynağı 4 ve 1 noktaları arasındaki entalpi farkıdır.

Sıkıştırma oranı kısaca kompresör çıkış basıncının, kompresör giriş basıncına oranıdır. Fakat, sıkıştırma oranında artış belli bir noktadan sonra verimdeki etkin artışını sürdürmeden ilerler. Bu yüzden, sıkıştırma oranında bir optimum değer yakalamak önemlidir. Bu optimum değerden sonra, sıkıştırma oranındaki artışın verimdeki artışı marjinal hale gelerek maliyeti ve riskleri artırır. Günümüzde sektördeki gaz türbinleri 11-18 gibi bir sıkıştırma oranında çalışmaktadır. [14]. Brayton çevriminde sıkıştırma oranı ifadesi;

$$P_{\text{sık.}} = \frac{P_2}{P_1} \quad (4.5)$$

olarak verilmiştir.

### 4.3.3 Kombine Çevrimde Verim

Fosil yakıtla çalışan santraller arasında verimi en yüksek santraller kombine güç santralleridir. Günümüzde %60 değeri gibi yüksek verim değerine ulaşma avantajına sahiplerdir. Her ne kadar yakıt fiyatlarına göre farklılık gösterse de diğer buhar santrallerine bakacak olunursa kombine çevrim santrallerinde birim üretim (kWh) maliyeti daha azdır [5].

Kombine güç çevrim santrallerinin yapısı ve tasarımı sistemin santral verimine etki eden unsurlardandır. Örnek olarak, üç basınç kademeli ve tekrar kızdırmalı kombine çevrimlerde %55'e ulaşan verim değerleri mevcuttur. Bir diğer örnek olarak atık ısı kazanındaki ısı emici yüzey alanı %20 gibi bir oranda arttırılırsa santral genel verimi %1-2 oranında artabilir. Bunun yanı sıra, santralin konumu, çevrimdeki ünitelerin seçimi, soğutma suyunun temini gibi unsurların da verime önemli etkisi vardır.

Kombine çevrim santralleri yüksek verime sahip olma avantajına ek olarak emre amadelik ve güvenilirlik oranlarının da yüksek olması kombine güç santrallerinin tercih edilmesine neden olmaktadır. Kombine güç santralleri kısa sürede çalıştırılabilirler. Bu sayede ani elektrik talebine hızlı bir dönüş sağlarlar. Bu yüzden, toplam yatırım geri ödeme süresi olabildiğince kısa olmaktadır [25].

1985 yılında Türkiye'nin ilk doğalgaz kombine çevrim santrali olarak faaliyetine başlayan ve Lüleburgaz'da kurulmuş olan 1.200 MW Trakya Doğalgaz Kombine Çevrim Santralinin dört kombine çevrim bloğunda toplam 8 gaz türbin ünitesi, 8 atık ısı kazanı, 4 buhar türbin ünitesi bulunmaktadır. Yılda 7,2 milyar kWh elektrik üretme kapasitesine sahip olan santralin ısı verimliliği yaklaşık olarak %51 değerlerindedir [8].

İstanbul Avcılar'da kurulmuş olan ve Dünya'nın en hızlı devreye giren santrali unvanını alan 1.350 MW gücündeki Ambarlı Doğalgaz Kombine Çevrim Santralinin üç kombine çevrim bloğunda toplam 6 atık ısı kazanı, 6 gaz türbin ünitesi, 3 buhar türbin ünitesi yer almaktadır. Santralde 1,6 milyar Nm<sup>3</sup> doğalgaz kullanılarak 8,1 milyar kWh elektrik enerjisi üretilmekte ve santral Türkiye'deki elektrik üretiminin ortalama %2 gibi bir kısmını karşılamaktadır [8].

Bu çalışmada ele alınan Bursa Ovaakça Doğalgaz Kombine Çevrim Santrali'nde her biri 704,9 MW gücünde iki adet kombine çevrim bloğu yer almaktadır. Her bir kombine çevrim bloğunda iki gaz türbin- jeneratör ünitesi ve bir buhar türbin- jeneratör ünitesi yer almaktadır. Tesiste "F" tipi olarak adı geçen gaz türbinleri kullanılmaktadır. Santralin atık ısı kazanı-buhar türbini grubu, üç basınç kademeli- tekrar kızdırmalıdır ve net santral verimi %55 civarındadır [8].

Kombine çevrim santralleri için genel ısı verim ifadesi;

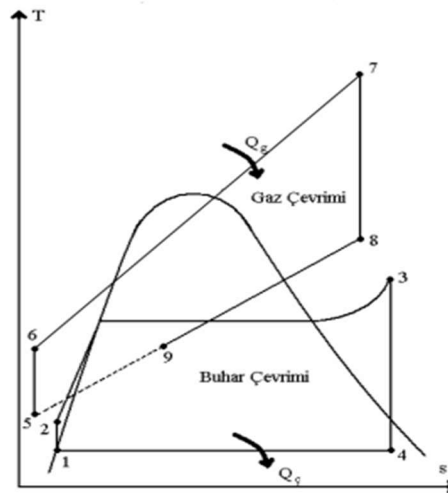
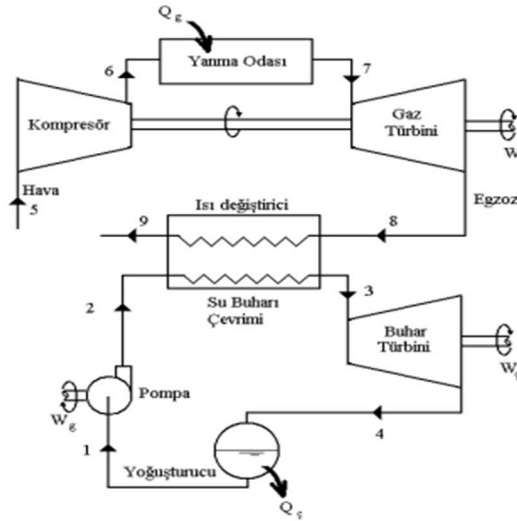
$$\eta_{CC} = \frac{P_{GT} + P_{BT}}{\dot{Q}_{GT} + \dot{Q}_{SF}} \quad (4.6)$$

olarak hesaplanır. Bu denklemde  $P_{GT}$  gaz türbininden üretilen güç,  $P_{BT}$  buhar türbininden üretilen güç,  $\dot{Q}_{GT}$  gaz türbinine verilmiş ısı,  $\dot{Q}_{SF}$  atık ısı buhar kazanına verilmiş ısı olarak adlandırılır. Gerçek verim ifadesinin hesaplanabilmesi için elektriksel kayıp, sistemde yer alan araçların harcadıkları güç harcamaları gibi kayıpları verim hesabına dahil etmek gereklidir. Bu kayıpları tek bir ifade ile toplayarak  $P_{out}$  olarak ifade edebiliriz. Kayıpların dahil edilerek yapılan verim ifadesi;

$$\eta_{CC,net} = \frac{P_{GT} + P_{BT} - P_{out}}{\dot{Q}_{GT} + \dot{Q}_{BT}} \quad (4.7)$$

olarak tanımlanır.

Aşağıda kombine bir çevrimi ve çevrime ait T-S diyagramı verilmiştir.



Şekil 4.8. Kombine Çevrim ve T-s P-V Diyagramı [10]

Çevrimi oluşturan gaz ve buhar türbininin verim ifadelerine yer verecek olursak;

$$\eta_{CT} = \frac{P_{GT}}{\dot{Q}_{GT}} \quad (4.8)$$

$$\eta_{BT} = \frac{P_{BT}}{\dot{Q}_{GT,Exh} + \dot{Q}_{SF}} \quad (4.9)$$

$$\dot{Q}_{GT,Exh} \cong \dot{Q}_{GT} (1 - \eta_{CT}) \quad (4.10)$$

olarak tanımlanır.

Buhar çevriminin denklemi ise bu iki denklem birleştirilerek;

$$\eta_{BT} = \frac{P_{BT}}{\dot{Q}_{GT} (1 - \eta_{CT}) + \dot{Q}_{SF}} \quad (4.11)$$

denklemi oluşur.

İlave yanmasız sistemlerde  $\dot{Q}_{SF}$  atık ısı buhar kazanı bulunmadığından verim ifadesi;

$$\eta_{\text{çevrim}} = \frac{W_{\text{çevrim}}}{Q_{\text{yanma}}} \quad (4.12)$$

olarak tanımlanır.



## 5. EKSERJİ KAVRAMI VE 2.YASA

Termodinamiğin birinci yasasında elimizdeki verimin gerçek durumunu ifade ederken, ikinci yasa verimi ise ideal bir termodinamik sistemi tanımlar ve sistemin gerçek sistemlerden nasıl farklı olduğunu ortaya koyar. İkinci yasa bir sistemin ne kadar faydalı iş üretebileceğini sınırlar, hal değişiminin yönünü de belirler. Ayrıca, ikinci yasaya göre hiçbir sistemin verimi %100 olamaz.

Ekserji bir sistemdeki iş potansiyelinin bir ölçüsüdür, bir enerji kaynağından elde edilebilecek minimum faydalı iş olarak da tanımlanabilir. Enerjinin faydalı kısmı olarak adlandırılan ekserji, çevre şartlarında çalışan sistemlerde; kullanılabilir enerji olarak da adlandırılabilir [32].

Günümüzde termodinamik sistem tasarım ve analizlerinde ikinci yasa ve ekserji analizi hesaplamaları sıklıkla tercih edilmektedir. Santrallerin verimli bir şekilde işletilmesi için günümüzde ekserji analizi yapılmasının önemi her geçen yıl artmaktadır.

İkinci yasa verimi genel bir ifade ile aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$\varepsilon = \frac{\text{Elde Edilen Ekserji}}{\text{Giren Ekserji}} = 1 - \frac{\text{Ekserji Tahribi}}{\text{Giren Enerji}} \quad (5.1)$$

İş üreten sistemlerde ise bu ifade;

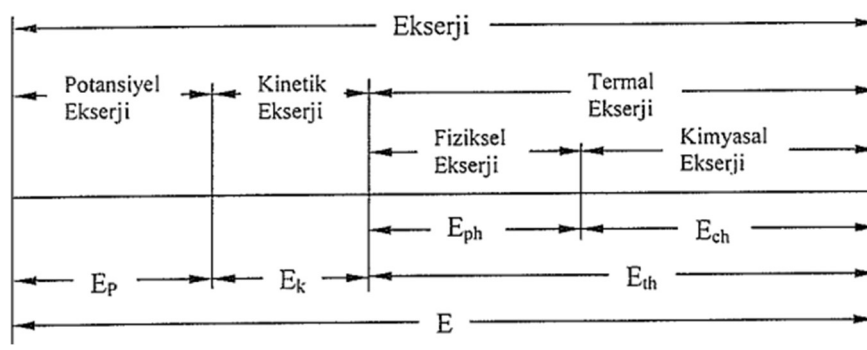
$$\varepsilon = \frac{\dot{W}_c}{\dot{W}_{tr}} \quad (5.2)$$

olarak tanımlanabilir.

Ekserjinin de çeşitli türleri mevcuttur. Bunlar başlıca potansiyel, kimyasal, fiziksel, kinetik olarak dört grupta sıralanabilir. Ekserji şu şekilde ifade edilebilir:

$$X = X_{pe} + X_{ke} + X_{ch} + X_{ph} \quad (5.3)$$

Denklemden  $X_{pe}$  potansiyel ekserjiyi,  $X_{ke}$  Kinetik ekserjiyi,  $X_{ch}$  kimyasal ekserjiyi,  $X_{ph}$  fiziksel ekserjiyi ifade etmektedir.



Şekil 5.1. Ekserji bileşenleri [33]

### 5.1. Potansiyel Ekserji

Potansiyel ekserji sıcaklık ve basınçtan bağımsız durumda sistemin göreceli yüksekliğinden kaynaklı ekserjidir. Tamamen işe çevrilebilir.

$$X_{pe} = gz \quad (5.4)$$

Bu ifadede g yerçekimi ivmesi ve z göreceli yüksekliktir.

Bir sistemin iş yapabilme potansiyeli zamanla azalır ve sonuç olarak sıfıra ulaşır. Sistem, çevre şartlarıyla termodinamik dengeye ulaşır ve artık iş yapamaz hale gelir.

Potansiyel ekserji, teknoloji ve enerjinin birçok dalında önemli bir rol oynar. Nükleer enerji, kömür, doğalgaz gibi kaynaklar, potansiyel ekserji olarak avantajlıdır ve elektrik üretmek için kullanılabilir.

### 5.2 Kinetik Ekserji

Kinetik ekserji de tıpkı potansiyel ekserji gibi sıcaklık ve basınçtan etkilenmezler. Tamamen işe çevrilebilir. Kinetik ekserji ifadesinde sahip olunan hız değeri ile hesap yapılır.

$$X_{ke} = \frac{v^2}{2} \quad (5.5)$$

### 5.3 Kimyasal Ekserji

Belirli bir bileşimden meydana gelen akımın tepkime sonucu denge haline geçtiğinde maksimum iş eldesi edilmesi kimyasal ekserji olarak tanımlanabilir. Yakıtın doğalgaz olduğu kombine çevrim santrallerinde yer alan denklem; yakıtın yani doğalgazın bileşenlerinden kaynaklı kimyasal ekserjidir. Gaz akışlarındaki mevcut ekserji, ekserji tablolarındaki değerler kullanılarak formül ile hesaplanır [14].

$$X_{ch} = \sum x_i \overline{e}_x^{ch} + RT_0 \sum x_i \ln(x_i) \quad (5.6)$$

Bu denklemde  $x_i$  kısmi gaz basıncını,  $\overline{e}_x^{ch}$  gazların standart ekserjilerini, R gaz sabitini ve  $T_0$  çevre sıcaklığını ifade etmektedir.

Bazı çevre malzeme özellikleri kullanılarak maddelerin standart kimyasal ekserjileri hesaplanmıştır. Standart kimyasal ekserji değerleri 25 °C sıcaklık ve 1 atm basıncına bağlıdır [12].

Tablo 5.1. Bazı maddelerin standart kimyasal ekserji değerleri [33]

| Faz Durumu | Madde       | Mol Ağırlığı (kg/kmol) | Standart Kimyasal Ekserji (kJ/kmol) |
|------------|-------------|------------------------|-------------------------------------|
| Katı       | $Ag$        | 107,8                  | 73730                               |
| Katı       | $Al_2O_3$   | 101,9                  | 204270                              |
| Gaz        | $CO_2$      | 44,0                   | 20140                               |
| Sıvı       | $H_2O$      | 18,0                   | 3120                                |
| Gaz        | $H_2O$      | 18,0                   | 11710                               |
| Sıvı       | $C_8H_{18}$ | 114,0                  | 5440030                             |
| Gaz        | $CH_4$      | 16,0                   | 836510                              |

#### 5.4 Fiziksel Ekserji

Bir sistemin ölü hal değerinden denge durumuna gelene kadar alınabilecek maksimum iş miktarı fiziksel ekserji olarak tanımlanabilir [24].

$$x_{ph} = (h - h_0) - T_0 (s - s_0) \quad (5.7)$$

Bu ifade de h, s değerleri mevcut durumda entalpi ve entropi değerlerini,  $h_0$   $T_0$  ve  $s_0$  değerleri çevre şartlarında akışkana ait entalpi ve entropiyi temsil etmektedir [33].

Eğer bir sistemde iki farklı şartlar altındaki sistemler arasında fiziksel ekserji farkı mevcut ise şu şekilde ifade edilebilir:

$$x_{ph1} - x_{ph2} = (h_1 - h_2) - T_0 (s_1 - s_2) \quad (5.8)$$

## 5.5 İş, Isı ve Kütle ile Ekserji Transferi

Ekserji; yararlı iş potansiyelidir ve ekserji geçişi aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$X_W = \begin{cases} W - W_{\text{çevre}} & (\text{sınır işi}) \\ W & (\text{diğer iş şekilleri}) \end{cases} \quad (5.9)$$

$$w_{\text{çevre}} = P_0(v_2 - v_1) \quad (5.10)$$

$P_0$ , atmosfer basıncı,  $V_1$ ,  $V_2$  değerleri ise sistemin ilk ve son hacimleridir. Diğer işlerde ise iş, aktarılan ekserjiye eşittir.

Isı yoluyla elde edilebilecek maksimum iş miktarı, sistemin çevre şartlarında denge haline kadar aktarabileceği maksimum iş miktarı kadardır. Mutlak sıcaklıkta ( $T$ ), belirli bir yerdeki ısı geçişindeki ( $Q$ ) ekserji aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$x_{\text{ısı}} = Q \left( 1 - \frac{T_0}{T} \right) \quad (5.11)$$

Eğer  $T$  değeri  $T_0$ 'dan büyükse sistemdeki ısı geçişi sistemin ekserjisini artırır, sistemden dışarıya olan ısı geçişi de ekserjiyi azaltır. Eğer  $T$  değeri  $T_0$ 'dan küçük ise tam tersi olarak ısı geçişi sistem ekserjisini azaltır.  $T$  ve  $T_0$  değerleri eşit ise ısı yoluyla geçen ekserji de sıfıra eşit olacaktır [34].

Bir akışa ait entropi kaynaklı ekserji kütleli akış ile doğrudan aktarılabilir ve aşağıdaki şekilde ifade edilir:

$$\dot{X} = \dot{m}x \quad (5.12)$$

$$x = (h - h_0) - T_0(s - s_0) + \frac{v^2}{2} + gz \quad (5.13)$$

Kütle; enerji, entropi ve ekserjiyi içerir. Bu yüzden sisteme ya da sistemden kütle akışında enerji, entropi ve ekserji geçişi içerir.

## 5.6 Ekserjide Denge

Ekserji enerji gibi her zaman korunmaz. Sistemin ekserji değişimi toplam giren ekserjiden, yok olan ve çıkan ekserjinin çıkarılmasıyla hesaplanır.

$$\dot{X}_D = \dot{X}_{xg} - \dot{X}_{xç} - \dot{X}_{xy} \quad (5.14)$$

Yok olan ekserji ifadesi hiçbir zaman sıfırdan daha küçük olamaz, fakat eşit olduğunda ideal sistemdir.

Sisteme giriş çıkış yapan akımların kütle kaynaklı ekserji değişimi ifadesi,

$$x_g - x_ç = (h_g - h_ç) - T_0(s_g - s_ç) + \frac{V_g^2 - V_ç^2}{2} + g(z_g - z_ç) \quad (5.15)$$

şeklinde yazılabilir.

## 5.7 Ekserjide Performansı Kriterleri

Sistem verimlilik etmeni olan performansın derecesi, enerji girdisini direkt etkiler. Bu yüzden, enerji sistemlerinde birçok farklı performans kriteri geliştirilmiş ve sistem performans derecesi bu kriterlere göre değerlendirilmiştir [35].

Isıl sistemlerinde ekserji analizi kullanılarak birçok performans kriteri geliştirilmiştir.

### 5.7.1 Ekserji Verimi (Rasyonel Verim)

Herhangi bir sistemde sistemden elde edilen ekserjinin sisteme verilen ekserjiye oranına ekserji verimi diğer bir deyişle rasyonel verim denir.

$$\varepsilon = \frac{\sum x_ç}{\sum x_g} \quad (5.16)$$

### 5.7.2 Ekserji Kaybı (Tersinmezlik Oranı)

Sisteme ait her bir elemana ait tersinmezliklerin, toplam tersinmezliğe oranına denir. Tersinmezlik oranına bakarak sisteme ait elemanların performansları kıyaslanabilir veya iyileştirmeler için fikir oluşturulabilir [35].

$$y_i = \sum_1 \frac{x_{D1}}{x_D} \quad (5.17)$$

### 5.7.3 Geliştirme Potansiyeli

Bir sistemde iyileştirme yaparken ne miktarda ve yapılma imkanını gösteren bir ölçüt olan geliştirme potansiyeli; Van Gool'a göre geliştirme potansiyeli [36]:

$$\dot{G}_{pot} = \sum x_T (1 - \varepsilon) \quad (5.18)$$

## 6. SANTRAL TANITIMI VE HESAPLARI

Enerji talebinin oldukça fazla olduğu Güney Marmara bölgesinin elektrik enerji talebinin karşılanması amacıyla Bursa İli içerisinde planlanarak doğal gaz kombine çevrim santrali 1409,8 MW güç kapasitesinde iki ayrı bloktan meydana gelmektedir. Santral işletmesinden alınan verileri özetlemek istersek;

Tablo 6.1. Ovaakça Doğalgaz Kombine Güç Santral Bilgileri

| GENEL BİLGİLERİ                        |                                            |
|----------------------------------------|--------------------------------------------|
| Net Güç                                | 1409,8 MW                                  |
| Yıllık Üretim Kapasitesi               | 9,87 Milyar kWh                            |
| Yıllık Yakıt Gideri                    | 1,94 Milyar M <sup>3</sup>                 |
| Yeri                                   | BURSA / Ovaakça                            |
| Tesisin Başlama Tarihi                 | 06 EYLÜL 1996 (Avans ödemeni başlaması)    |
| Fiili Başlangıç Tarihi                 | 01.01.1997                                 |
| TEKNİK ÖZELLİKLERİ                     |                                            |
| Santral Toplam Kapasitesi              | 1408,9 MW (2 Blok)                         |
| Kombine Çevrim Blok Kapasitesi         | 704,9 MW (2 Gaz Türbini + 1 Buhar Türbini) |
| Gaz Türbini Nominal Kapasitesi (Iso)   | 239 MW                                     |
| Buhar Türbini Nominal Kapasitesi (Iso) | 237,5 MW                                   |
| Santralin Çalışma Saati                | 7,000 Saat/yıl                             |
| Net Harcanan Isı Miktarı               | 1,564 kcal/ kWh                            |
| Santral Verimi                         | % 55                                       |
| Doğal Gazın Alt Isıl Değeri            | 8,100 kcal/Sm <sup>3</sup>                 |

Bursa Doğal Gaz Kombine Çevrim Güç Santrali'nde bir tanesinin gücü 704,9 MW olan iki adet kombine çevrim bloğu yer almaktadır. Her bir blok 2 gaz türbin -jeneratör ünitesiyle 1 buhar türbin- jeneratör ünitesinden meydana gelmektedir. Santraldeki sirkülasyon suyunun soğutulması; kapalı çevrimli, kuru tipte ve doğal çekişli soğutma kuleleriyle sağlanmaktadır. İlave olarak

santralde gaz türbinlerine bağlı olan dört adet ilave yanma olmayan atık ısı kazanı ve diğer yardımcı üniteler de yer almaktadır.



Şekil 6.1. Santralin Görseli [27]

Yakıtı doğalgaz tercih edilen santrallerde, gaz türbin-jeneratör grubundan elde edilen elektriğin yanında türbin sistemindeki egzozun ortalama 558 °C atık ısının kazana verilmesiyle ilave bir yakıtı ihtiyaç duyulmadan elde edilen buhar kullanılarak ek elektrik üretimi sağlanmaktadır.

Ovaakça Doğalgaz Kombine Güç Santraline ait ilk çevrim bloğu, sözleşmenin devreye girmesinden 3 yıl sonra, ikinci çevrim bloğu ise 2 ay sonra devreye alınmıştır. Santralde, yıllık doğalgaz tüketimi yaklaşık 1,7 – 1,9 milyar m<sup>3</sup> civarında olmakla beraber yaklaşık 10 milyar kWh /yıl elektrik enerjisi üretilmektedir.

Bir ünite için yaklaşık saatlik yakıt tüketimi 68.000 Sm<sup>3</sup> olup 4 ünitenin toplam 1 saatlik tüketilen yakıt miktarı 270.000 Sm<sup>3</sup>'dir. Yakıtın alt ısı değeri 8.100 kcal/Sm<sup>3</sup>, % 100 tam yükte 2 Gaz Türbini+1 Buhar Türbininde 1.564 kcal/kWh harcanan ısıda, net verimi yaklaşık % 55

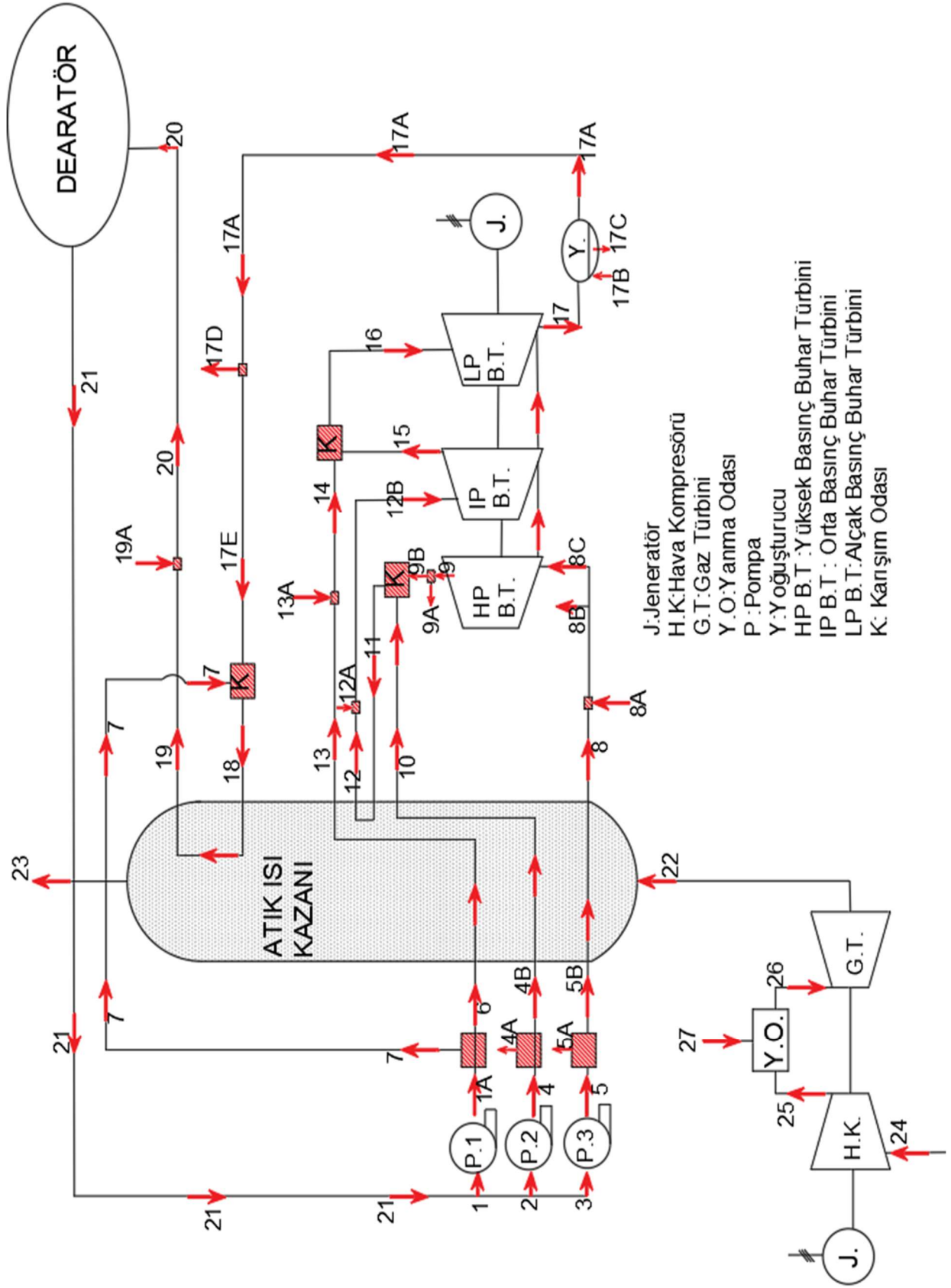
civarında, 1 Gaz Türbini+1 Buhar Türbininde 1590 kcal/kWh harcanan ısıda, net verimi %54,1 olan kombine çevrimi; aşağıda yer alan ünite ve sistemlerden oluşmaktadır.

- Gaz Türbin-Jeneratör Üniteleri
- Atık Isı Kazanları
- Buhar Türbin- Jeneratör Üniteleri
- Soğutma Suyu ve Buhar Kondensasyon Sistemi
- Su Arıtma (Demineralizasyon) Sistemi
- Şalt ve Elektrik Sistemleri
- Kontrol ve Kumanda Sistemleri

## **6.1. Ekserji Dengesi**

### **6.1.1 Genel Akış Şeması**

Santralin akış şeması basitleştirilerek daha sade bir şekilde çizilmiştir. Şekil 6.2.'de sadeleştirilmiş akış şeması ve santraldeki akımların basınç, entalpi, sıcaklık, entropi değerlerinin değerleri de Tablo 6.2.'de yer almaktadır. Her bir ünitenin ekserji analizi yapılmıştır.



Şekil 6.2. Santral Akış Şeması

Tablo 6.2. Santral Akış Özellikleri

| Akım | Faz   | Sıcaklık T (C°) | Basınç(bar) | Debi (ton/h) | Entalpi (kJ/kg) | Entropi (kJ/kgK) | H <sub>0</sub> (kJ/kgK) | S <sub>0</sub> (kJ/kgK) |
|------|-------|-----------------|-------------|--------------|-----------------|------------------|-------------------------|-------------------------|
| 1    | Su    | 139,70          | 3,7000      | 212,70       | 586,923         | 1,7400           | 104,7340                | 0,3780                  |
| 1A   | Su    | 139,70          | 5,6000      | 106,35       | 586,923         | 1,7400           | 104,7340                | 0,3780                  |
| 2    | Su    | 139,70          | 3,7000      | 107,30       | 586,923         | 1,7400           | 104,7340                | 0,3780                  |
| 3    | Su    | 139,70          | 3,7000      | 478,20       | 586,923         | 1,7400           | 104,7340                | 0,3780                  |
| 4    | Su    | 139,70          | 5,6000      | 107,30       | 586,923         | 1,7400           | 104,7340                | 0,3780                  |
| 4A   | Su    | 139,70          | 5,6000      | 53,65        | 586,923         | 1,7400           | 104,7340                | 0,3780                  |
| 4B   | Su    | 139,70          | 5,6000      | 53,65        | 586,923         | 1,7400           | 104,7340                | 0,3780                  |
| 5    | Su    | 139,70          | 120,6000    | 478,20       | 594,646         | 1,7400           | 104,7340                | 0,3780                  |
| 5A   | Su    | 139,70          | 120,6000    | 239,10       | 594,646         | 1,7400           | 104,7340                | 0,3780                  |
| 5B   | Su    | 139,70          | 120,6000    | 239,10       | 594,646         | 1,7400           | 104,7340                | 0,3780                  |
| 6    | Su    | 139,70          | 5,6000      | 48,35        | 586,923         | 1,7400           | 104,7340                | 0,3780                  |
| 7    | Su    | 139,70          | 5,6000      | 58,00        | 586,923         | 1,7400           | 104,7340                | 0,3780                  |
| 8    | Buhar | 535,00          | 120,6000    | 239,10       | 3529,841        | 6,6046           | 104,7340                | 0,3780                  |
| 8A   | Buhar | 535,00          | 120,6000    | 239,10       | 3529,841        | 6,6046           | 104,7340                | 0,3780                  |
| 8B   | Buhar | 535,00          | 120,6000    | 456,30       | 3529,841        | 6,6046           | 104,7340                | 0,3780                  |
| 8C   | Buhar | 535,00          | 120,6000    | 21,90        | 3529,841        | 6,6046           | 104,7340                | 0,3780                  |
| 9    | Buhar | 366,00          | 37,7000     | 456,30       | 3142,825        | 6,6799           | 104,7340                | 0,3780                  |
| 9A   | Buhar | 366,00          | 37,7000     | 228,15       | 3142,825        | 6,6799           | 104,7340                | 0,3780                  |
| 9B   | Buhar | 366,00          | 37,7000     | 228,15       | 3142,825        | 6,6799           | 104,7340                | 0,3780                  |
| 10   | Buhar | 275,30          | 37,7000     | 53,65        | 2923,721        | 6,2747           | 104,7340                | 0,3780                  |
| 11   | Buhar | 345,90          | 37,0000     | 281,80       | 3097,323        | 6,6126           | 104,7340                | 0,3780                  |
| 12   | Buhar | 537,00          | 35,0000     | 281,80       | 3534,303        | 7,2651           | 104,7340                | 0,3780                  |
| 12A  | Buhar | 537,00          | 35,0000     | 281,80       | 3534,303        | 7,2651           | 104,7340                | 0,3780                  |
| 12B  | Buhar | 535,00          | 34,2000     | 563,60       | 3529,841        | 7,2709           | 104,7340                | 0,3780                  |
| 13   | Buhar | 249,80          | 5,6000      | 48,35        | 2957,897        | 7,2164           | 104,7340                | 0,3780                  |
| 13A  | Buhar | 249,80          | 5,6000      | 48,35        | 2957,897        | 7,2164           | 104,7340                | 0,3780                  |
| 14   | Buhar | 249,80          | 5,6000      | 96,70        | 2957,897        | 7,2164           | 104,7340                | 0,3780                  |

|     |       |          |         |          |          |        |          |        |
|-----|-------|----------|---------|----------|----------|--------|----------|--------|
| 15  | Buhar | 249,80   | 4,3000  | 563,60   | 3017,577 | 7,2164 | 104,7340 | 0,3780 |
| 16  | Buhar | 277,00   | 5,6000  | 660,30   | 3005,846 | 7,3222 | 104,7340 | 0,3780 |
| 17  | Su    | 45,00    | 0,0076  | 660,30   | 2583,138 | 8,2840 | 104,7340 | 0,3780 |
| 17A | Su    | 40,60    | 4,3000  | 682,20   | 169,892  | 0,5803 | 104,7340 | 0,3780 |
| 17D | Su    | 40,60    | 4,3000  | 341,10   | 169,892  | 0,5803 | 104,7340 | 0,3780 |
| 17E | Su    | 40,60    | 4,3000  | 341,10   | 169,892  | 0,5803 | 104,7340 | 0,3780 |
| 18  | Su    | 55,00    | 4,3000  | 399,10   | 230,044  | 0,7678 | 104,7340 | 0,3780 |
| 19  | Su    | 139,70   | 3,7000  | 399,10   | 586,923  | 1,7400 | 104,7340 | 0,3780 |
| 19A | Su    | 139,70   | 3,7000  | 399,10   | 586,923  | 1,7400 | 104,7340 | 0,3780 |
| 20  | Su    | 139,70   | 3,7000  | 798,20   | 586,923  | 1,7400 | 104,7340 | 0,3780 |
| 21  | Su    | 139,70   | 3,7000  | 798,20   | 586,923  | 1,7400 | 104,7340 | 0,3780 |
| 22  | YÜ    | 558,00   | 0,0010  | 2.391,90 | 599,071  | 9,6010 | 31,6830  | 6,5290 |
| 23  | YÜ    | 103,50   | 0,0010  | 2.391,90 | 112,159  | 8,7640 | 31,6830  | 6,5290 |
| 24  | Hava  | 25,00    | 1,0100  | 2.337,64 | 4,034    | 6,4890 | 4,0340   | 6,4890 |
| 25  | Hava  | 480,00   | 16,0000 | 2.337,64 | 480,796  | 6,6560 | 4,0340   | 6,4890 |
| 26  | YÜ    | 1.350,00 | 15,8000 | 2.391,90 | 1547,072 | 7,7070 | 31,6830  | 6,5290 |
| 27  | Yakıt | 200,00   | 40,0000 | 54,26    | 635,898  | 11,548 | 31,683   | 6,529  |

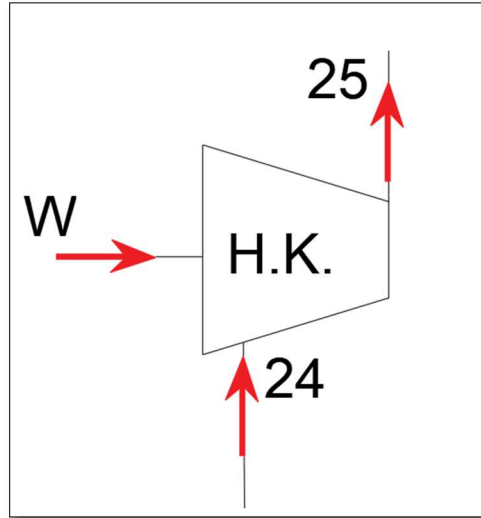
### 6.1.2 Kompresör İçin Analiz

Türbine basınçlı hava yollamak için Şekil 6.3’de kompresöre giren kuru hava çevre koşullarında ( $T_{24} = 25^{\circ}C$  ve  $P_{24} = 1,01 \text{ bar}$ ) sıkıştırılarak  $T_{25} = 480^{\circ}C$  ve  $P_{25} = 16 \text{ bar}$  değerleriyle kompresörü terk eder.

Kompresöre giren havanın mol kesirleri, standart kimyasal ekserjileri Tablo 6.3’de yer almaktadır. Kimyasal ekserji hesaplamalarında Szargut ve diğ. literatürde “Model II” olarak isimlendirilen referans çevre modeli kullanılmıştır [37].

Tablo 6.3. Havanın mol kesirleri ve standart kimyasal ekserjileri

|             | <b>N<sub>2</sub></b> | <b>O<sub>2</sub></b> |
|-------------|----------------------|----------------------|
| y (hava)    | 0,79                 | 0,21                 |
| e (kJ/kmol) | 640                  | 3950                 |



Şekil 6.3. Kompresör Akış Şeması

Kompresör için ilgili bağıntılar:

$$\dot{m}_{24} = \dot{m}_{25} \quad (6.1)$$

$$\dot{E}_{24} + \dot{W}_k = \dot{E}_{25} \quad (6.2)$$

$$\dot{X}_{24} + \dot{W}_k = \dot{X}_{25} \quad (6.3)$$

$$\dot{X}_D = \dot{X}_{24} + \dot{W}_k - \dot{X}_{25} \quad (6.4)$$

$$\varepsilon = (\dot{X}_{25} - \dot{X}_{24}) / \dot{W}_k \quad (6.5)$$

$$\dot{G}_{pot} = \dot{X}_D \cdot (1 - \varepsilon) \quad (6.6)$$

Yukarıda yer alan bağıntılar kullanılarak;

Tablo 6.4. Kompresörün ekserji, madde denklik hesapları

| Akım  | Debi<br>( $kg s^{-1}$ ) | Basınç<br>(bar) | Sıcaklık<br>(°C) | Entalpi<br>( $kJ kg^{-1}$ ) | Entropi<br>( $kJ kg^{-1} K^{-1}$ ) | Ekserji<br>(MW) |
|-------|-------------------------|-----------------|------------------|-----------------------------|------------------------------------|-----------------|
| 24    | 649,34                  | 1,01            | 25               | 4,034                       | 6,48                               | 0               |
| Güç   |                         |                 |                  |                             |                                    | 309,6           |
| 25    | 649,34                  | 16              | 480              | 480,796                     | 6,656                              | 277,25          |
| Kayıp |                         |                 |                  |                             |                                    | 32,35           |

Kompresörün analizi sonucunda;

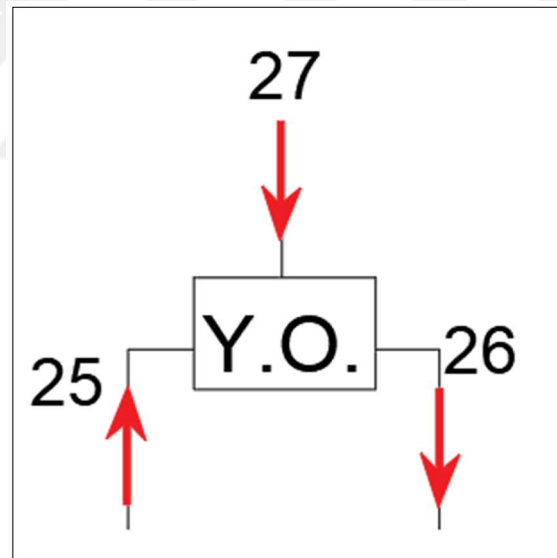
Tablo 6.5. Kompresörün ekserji hesaplamaları

|                                        | $\dot{X}_D(\text{MW})$ | $\varepsilon$ (%) | $\dot{G}_{pot}(\text{MW})$ |
|----------------------------------------|------------------------|-------------------|----------------------------|
| <b>Kompresör Ekserji Hesaplamaları</b> | 32,35                  | 0,90              | 3,38                       |

Santral işletmesinden alınan bilgiye göre Ovaakça kombine doğalgaz çevrim santralinde kullanılan kompresör tipi; buhar gücü veya elektrik enerjisi ile tahrik edilebilen aksiyal pistonlu kompresördür. Kompresör 17 kademeli, basınç oranı 16 dır. Havanın akışı ise 649 kg/s dir.

### 6.1.3 Yanma Odası İçin Analiz

$T_{25} = 480^\circ\text{C}$  ve  $P_{25} = 16 \text{ bar}$  olarak kompresörden gelen sıkıştırılmış hava ve doğalgaz;  $T_{27} = 200^\circ\text{C}$  ve  $P_{27} = 40 \text{ bar}$  ile yanarak  $T_{26} = 1350^\circ\text{C}$  ve  $P_{26} = 15,8 \text{ bar}$  olarak yanma odasından çıkış yapar.



Şekil 6.4. Yanma Odası Akış Şeması

Yanma odası için denklikler ve ekserji kaybı, ekserji verimi ve geliştirme potansiyel değerleri için bağıntılar:

$$\dot{m}_{25} + \dot{m}_{27} = \dot{m}_{26} \quad (6.7)$$

$$\dot{E}_{25} + \dot{E}_{27} = \dot{E}_{26} \quad (6.8)$$

$$\dot{X}_{25} + \dot{X}_{27} = \dot{X}_{26} \quad (6.9)$$

$$\dot{X}_D = \dot{X}_{25} + \dot{X}_{27} - \dot{X}_{26} \quad (6.10)$$

$$\varepsilon = \dot{X}_{26} / (\dot{X}_{25} + \dot{X}_{27}) \quad (6.11)$$

$$\dot{G}_{pot} = \dot{X}_D \cdot (1 - \varepsilon) \quad (6.12)$$

Yanma odasındaki yakıtın mol kesri ve standart kimyasal ekserjileri Tablo 6.6' verilmiştir.

Tablo 6.6. Doğalgazın mol kesirleri ve standart kimyasal ekserjileri

|             | Metan  | Etan    | Propan  | Bütan   | N <sub>2</sub> |
|-------------|--------|---------|---------|---------|----------------|
| y (hava)    | 0,885  | 0,047   | 0,016   | 0,002   | 0,050          |
| e (kJ/kmol) | 824348 | 1482033 | 2154000 | 3231000 | 640            |

Yanma gazlarının mol kesri ve standart kimyasal ekserjileri Tablo 6.7 'da verilmiştir.

Tablo 6.7. Yanma Gazlarının mol kesirleri ve standart kimyasal ekserjileri

|             | CO <sub>2</sub> | H <sub>2</sub> O | N <sub>2</sub> | O <sub>2</sub> |
|-------------|-----------------|------------------|----------------|----------------|
| y (hava)    | 0,008           | 0,015            | 0,783          | 0,192          |
| e (kJ/kmol) | 141175          | 8635             | 640            | 3950           |

Yukarıda yer alan bağıntılar kullanılarak;

Tablo 6.8. Yanma Odasının ekserji, madde denklik hesapları

| Akım  | Debi<br>(kg s <sup>-1</sup> ) | Basınç<br>(bar) | Sıcaklık<br>(°C) | Entalpi<br>(kJ kg <sup>-1</sup> ) | Entropi<br>(kJ kg <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> ) | Ekserji<br>(MW) |
|-------|-------------------------------|-----------------|------------------|-----------------------------------|---------------------------------------------------|-----------------|
| 25    | 649,34                        | 16              | 480              | 480,796                           | 6,656                                             | 277,25          |
| 26    | 664,42                        | 15,8            | 1350             | 1547,07                           | 7,707                                             | 773,49          |
| 27    | 15,07                         | 40              | 200              | 635,898                           | 11,548                                            | 718,05          |
| Kayıp |                               |                 |                  |                                   |                                                   | 221,81          |

Yanma odası analizi sonucunda;

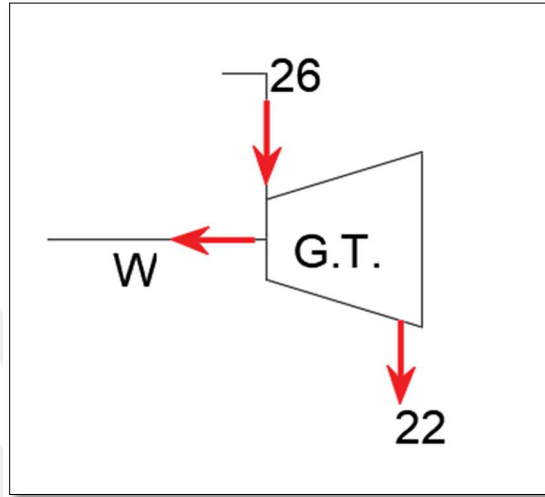
Tablo 6.9. Yanma Odasının Ekserji Hesaplamaları

|                                   | $\dot{X}_D$ (MW) | $\varepsilon$ (%) | $\dot{G}_{pot}$ (MW) |
|-----------------------------------|------------------|-------------------|----------------------|
| Yanma Odası Ekserji Hesaplamaları | 221,81           | 0,78              | 49,43                |

Santral işletmesinden alınan bilgiye göre Ovaakça kombine doğalgaz çevrim santralinde kullanılan yanma odasının tipi Multi-Can'dır. Ateşlemesi kıvılcımlı, yanma odası sayısı 20, alev monitörü UV ve alev monitör sayısı 2'dir.

### 6.1.4 Gaz Türbini İçin Analiz

Gaz türbini yanma odasında yakılmış doğalgaz ürünü basınçlı yanma gazlarıyla rotorun ve rotora bağlı şaftın dönmesiyle güç üretir. ( $T_{26} = 1350\text{ }^{\circ}\text{C}$  ve  $P_{26} = 15,8\text{ bar}$  ) Kalan yanma gazları  $T_{22} = 558\text{ }^{\circ}\text{C}$  ve  $P_{22} = 0,00104\text{ bar}$  basıncında gaz türbininden çıkar.



Şekil 6.5. Gaz Türbini Akış Şeması

Gaz türbini için denklikler ve ekserji kaybı, ekserji verimi ve geliştirme potansiyel değerleri için bağıntılar:

$$\dot{m}_{22} = \dot{m}_{26} \quad (6.13)$$

$$\dot{E}_{22} + \dot{W}_{gt} = \dot{E}_{26} \quad (6.14)$$

$$\dot{X}_{22} + \dot{W}_{gt} = \dot{X}_{26} \quad (6.15)$$

$$\dot{X}_D = \dot{X}_{26} - \dot{X}_{22} - \dot{W}_{gt} \quad (6.16)$$

$$\varepsilon = \dot{W}_{gt} / (\dot{X}_{26} - \dot{X}_{22}) \quad (6.17)$$

$$\dot{G}_{pot} = \dot{X}_D \cdot (1 - \varepsilon) \quad (6.18)$$

Bağıntılar kullanılarak elde edilen değerler Tablo 6.10.' da verilmiştir.

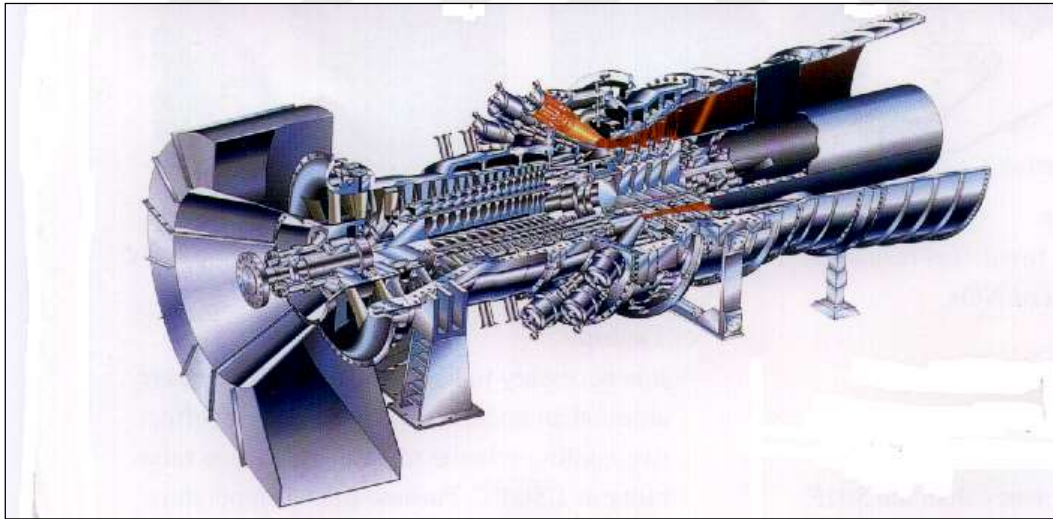
Tablo 6.10. Gaz Türbinin ekserji, madde denklik hesapları

| Akım  | Debi<br>( $kg s^{-1}$ ) | Basınç<br>(bar) | Sıcaklık<br>(°C) | Entalpi<br>( $kJ kg^{-1}$ ) | Entropi<br>( $kJ kg^{-1} K^{-1}$ ) | Ekserji<br>(MW) |
|-------|-------------------------|-----------------|------------------|-----------------------------|------------------------------------|-----------------|
| 26    | 664,42                  | 15,80000        | 1350             | 1547,07                     | 7,707                              | 773,490         |
| 22    | 664,42                  | 0,00104         | 558              | 599,07                      | 9,601                              | 164,642         |
| Güç   |                         |                 |                  |                             |                                    | 478             |
| Kayıp |                         |                 |                  |                             |                                    | 130,848         |

Gaz türbini analizi sonucunda;

Tablo 6.11. Gaz Türbininin Ekserji Hesaplamaları

|                                   | $\dot{X}_D$ (MW) | $\varepsilon$ (%) | $\dot{G}_{pot}$ (MW) |
|-----------------------------------|------------------|-------------------|----------------------|
| Gaz Türbini Ekserji Hesaplamaları | 130,848          | 0,79              | 28,12                |

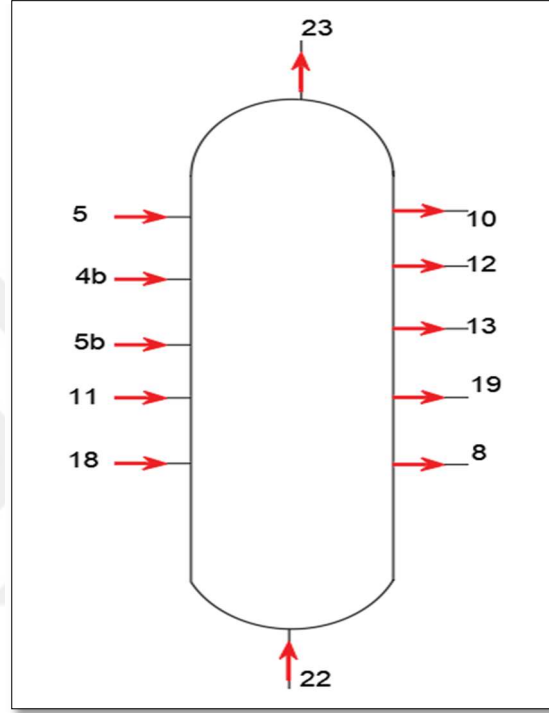


Şekil 6.6. Santralde Kullanılan Gaz Türbini Görseli

Santral işletmesinden alınan bilgiye göre Ovaakça kombine doğalgaz çevrim santralinde kullanılan gaz türbini MITSUBISHI 701 F Serisi olup, 3000 devir gaz türbin gücü 239 MW dır. 4 kademeli türbin kullanılarak giriş sıcaklığı yükseltilmiştir.

### 6.1.5 Isı Geri Kazanım Buhar Üretici (HRSG) İçin Analiz

Gaz türbininden çıkan yanma gazları yanma kanalıyla HRSG 'ye gelir. ( $T_{26} = 1350\text{ }^{\circ}\text{C}$  ve  $P_{26} = 15,8\text{ bar}$ ) HRSG 'den çıkan yüksek ( $T_8 = 535\text{ }^{\circ}\text{C}$  ve  $P_8 = 120,6\text{ bar}$ ) orta ( $T_{10} = 275,3\text{ }^{\circ}\text{C}$  ve  $P_{26} = 37,7\text{ bar}$ ) ve düşük basınçlı buhar ( $T_{13} = 249,8\text{ }^{\circ}\text{C}$  ve  $P_{13} = 5,6\text{ bar}$ ), buhar türbinine gider. Kullanılan yanma gazı atık olarak atılır ( $T_{23} = 103,5\text{ }^{\circ}\text{C}$  ve  $P_{23} = 0,00102\text{ bar}$ ).



Şekil 6.7. HRSG Akış Şeması

HRSG için denklikler ve ekserji kaybı, ekserji verimi ve geliştirme potansiyel değerleri için bağıntılar:

$$\dot{m}_{18} = \dot{m}_{19} \quad (6.19)$$

$$\dot{m}_{11} = \dot{m}_{12} \quad (6.20)$$

$$\dot{m}_5 = \dot{m}_{13} \quad (6.21)$$

$$\dot{m}_{4b} = \dot{m}_{10} \quad (6.22)$$

$$\dot{m}_{5b} = \dot{m}_8 \quad (6.23)$$

$$\dot{m}_{22} = \dot{m}_{23} \quad (6.24)$$

$$\dot{E}_{18} + \dot{E}_{11} + \dot{E}_5 + \dot{E}_{4b} + \dot{E}_{5b} + \dot{E}_{22} = \dot{E}_{19} + \dot{E}_{12} + \dot{E}_{13} + \dot{E}_{10} + \dot{E}_8 + \dot{E}_{23} \quad (6.25)$$

$$\dot{X}_{18} + \dot{X}_{11} + \dot{X}_5 + \dot{X}_{4b} + \dot{X}_{5b} + \dot{X}_{22} = \dot{X}_{19} + \dot{X}_{12} + \dot{X}_{13} + \dot{X}_{10} + \dot{X}_8 + \dot{X}_{23} \quad (6.26)$$

$$\dot{X}_D = (\dot{X}_{18} + \dot{X}_{11} + \dot{X}_5 + \dot{X}_{4b} + \dot{X}_{5b} + \dot{X}_{22}) - (\dot{X}_{19} + \dot{X}_{12} + \dot{X}_{13} + \dot{X}_{10} + \dot{X}_8 + \dot{X}_{23}) \quad (6.27)$$

$$\varepsilon = (\dot{X}_{19} + \dot{X}_{12} + \dot{X}_{13} + \dot{X}_{10} + \dot{X}_8 - \dot{X}_{18} - \dot{X}_{11} - \dot{X}_5 - \dot{X}_{4b} - \dot{X}_{5b}) / (\dot{X}_{22} - \dot{X}_{23}) \quad (6.28)$$

$$\dot{G}_{pot} = \dot{X}_D \cdot (1 - \varepsilon) \quad (6.29)$$

Bağıntılar kullanılarak elde edilen değerler Tablo 6.12.'de verilmiştir.

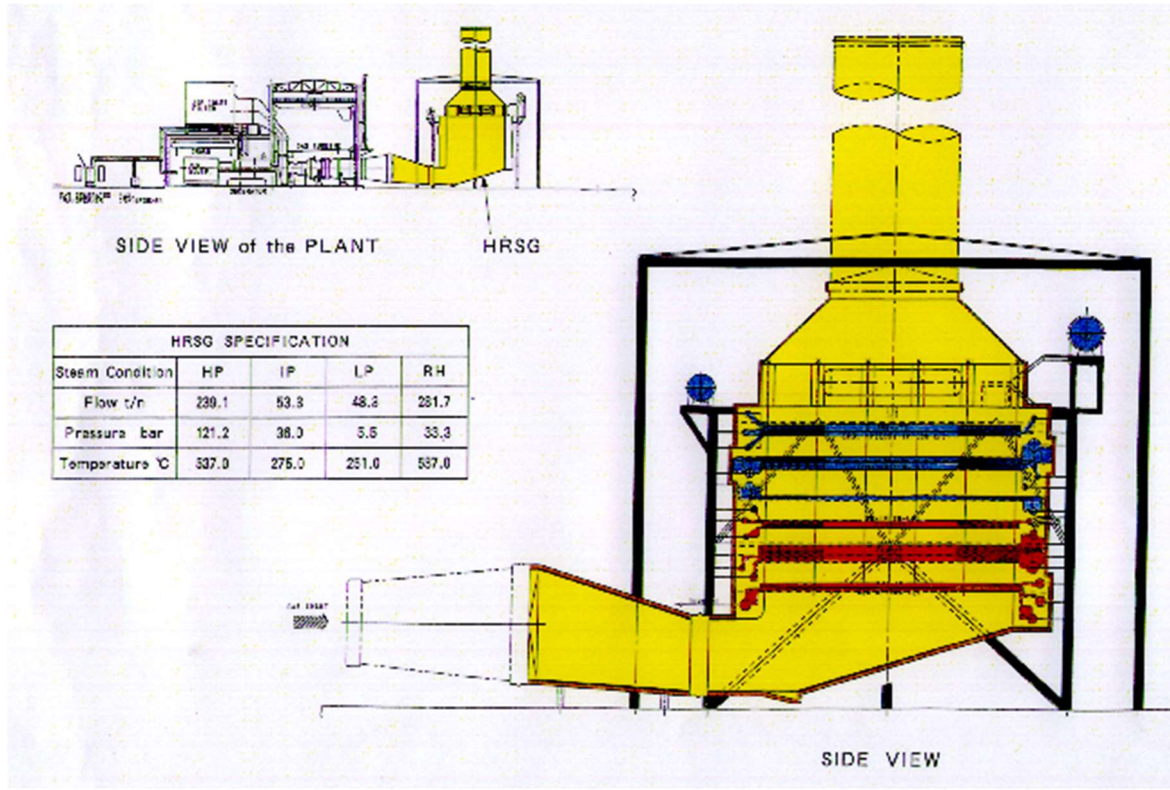
Tablo 6.12. HRSG için ekserji, madde denklik hesapları

| Akım  | Debi<br>( $kg s^{-1}$ ) | Basınç<br>(bar) | Sıcaklık<br>(°C) | Entalpi<br>( $kJ kg^{-1}$ ) | Entropi<br>( $kJ kg^{-1} K^{-1}$ ) | Ekserji<br>(MW) |
|-------|-------------------------|-----------------|------------------|-----------------------------|------------------------------------|-----------------|
| 5     | 13,43                   | 5,6             | 139,7            | 586,923                     | 1,855                              | 0,594           |
| 4b    | 14,90                   | 5,6             | 139,7            | 586,923                     | 1,855                              | 0,623           |
| 5b    | 66,41                   | 120,6           | 139,7            | 594,646                     | 1,874                              | 2,914           |
| 11    | 78,27                   | 37              | 345,9            | 3097,323                    | 6,815                              | 84,014          |
| 18    | 110,86                  | 4,300           | 55               | 230,044                     | 0,791                              | 0,247           |
| 22    | 664,42                  | 0,00104         | 558              | 599,070                     | 9,601                              | 164,642         |
| 8     | 66,41                   | 120,600         | 535              | 3529,840                    | 7,359                              | 89,180          |
| 10    | 14,90                   | 37,700          | 275,3            | 2957,897                    | 6,639                              | 14,188          |
| 12    | 78,27                   | 35              | 537              | 3534,300                    | 7,364                              | 105,338         |
| 13    | 13,43                   | 5,600           | 249,8            | 2957,897                    | 7,273                              | 10,709          |
| 19    | 110,86                  | 3,700           | 139,7            | 586,923                     | 1,855                              | 4,636           |
| 23    | 664,41                  | 0,00102         | 103,5            | 112,590                     | 8,764                              | 6,920           |
| Kayıp |                         |                 |                  |                             |                                    | 22,063          |

Isı Geri Kazanım Buhar Üretici (HRSG) analizi sonucunda;

Tablo 6.13. Isı Geri Kazanım Buhar Üreticinin (HRSG) Ekserji Hesaplamaları

|                            | $\dot{X}_D$ (MW) | $\varepsilon$ (%) | $\dot{G}_{pot}$ (MW) |
|----------------------------|------------------|-------------------|----------------------|
| HRSG Ekserji Hesaplamaları | 22,063           | 0,86              | 3,08                 |



Şekil 6.8. Santralde Kullanılan Atık Isı Kazan Görseli

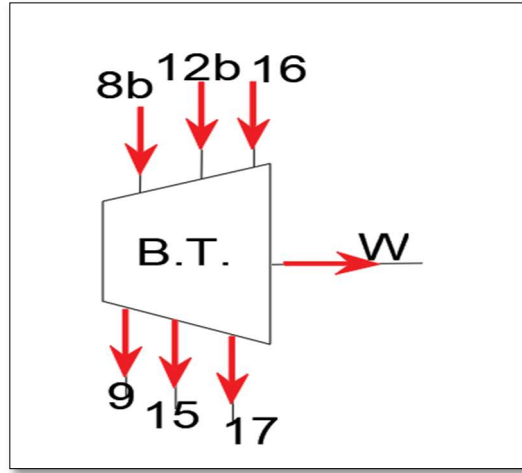
Santral işletmesinden alınan bilgiye göre Ovaakça kombine doğalgaz çevrim santralinde kullanılan atık ısı kazanında;

- Üç kademe basınç sistemi (Alçak, orta, yüksek)
- Her buharlaştırıcı arası doğal sirkülasyon
- Spiral fin borular
- Hazır modüller mevcuttur.

Gaz türbininden egzoz olarak çıkan sıcaklığı yüksek gaz, atık ısı kazanına kanalla gelir ve gelen sıcaklığı yüksek gaz, basınç odasında genişletilerek yukarıya doğru gönderilir. Yukarıya çıkan sıcak gaz, yatay yerleştirilmiş boru yüzeylerinden temas ile ısı transferini gerçekleştirir. Gaz bir diğer bölüme geçerek atmosfer havasına egzoz olarak bırakılır. Sistemdeki tüm ısı transfer yüzeyleri, yatay olarak yan yana paralel sıralanmış ve destek plakalarıyla tutturulmuştur.

### 6.1.6 Buhar Türbini İçin Analiz

Buhar türbinine giren yüksek, orta ve düşük basınçlı buhar jeneratörü döndürerek elektrik üretir. Düşük basınçtan çıkan atık buhar yoğunlaştırıcıya yoğunlaşarak deaeratore gelir.



Şekil 6.9. Buhar Türbini Akış Şeması

Buhar türbini için denklikler ve ekserji kaybı, ekserji verimi ve geliştirme potansiyel değerleri için bağıntılar:

$$\dot{m}_{8b} = \dot{m}_9 \quad (6.30)$$

$$\dot{m}_{12b} = \dot{m}_{15} \quad (6.31)$$

$$\dot{m}_{16} = \dot{m}_{17} \quad (6.32)$$

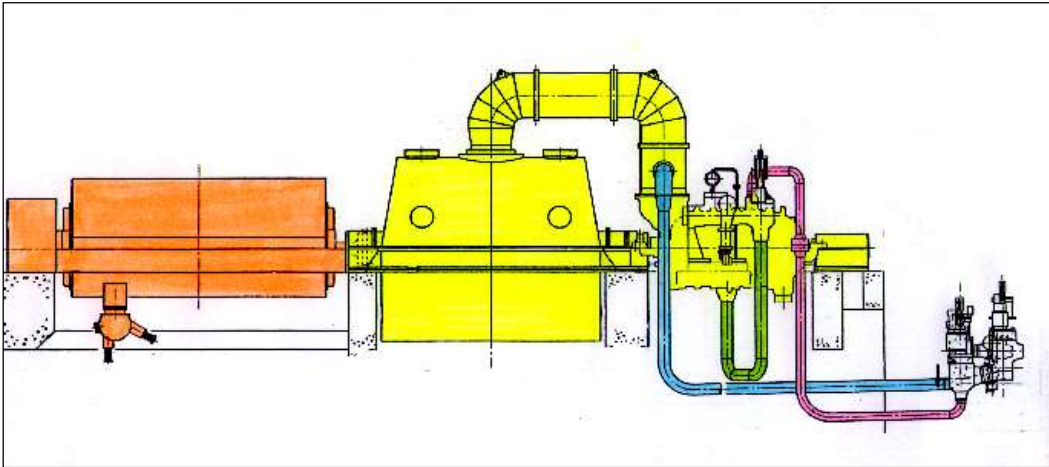
$$\dot{E}_{8b} + \dot{E}_{12b} + \dot{E}_{16} = \dot{E}_9 + \dot{E}_{15} + \dot{E}_{17} + \dot{W}_{bt} \quad (6.33)$$

$$\dot{X}_{8b} + \dot{X}_{12b} + \dot{X}_{16} = \dot{X}_9 + \dot{X}_{15} + \dot{X}_{17} + \dot{W}_{bt} \quad (6.34)$$

$$\dot{X}_D = (\dot{X}_{8b} + \dot{X}_{12b} + \dot{X}_{16}) - (\dot{X}_9 + \dot{X}_{15} + \dot{X}_{17} + \dot{W}_{bt}) \quad (6.35)$$

$$\varepsilon = \dot{W}_{bt} / (\dot{X}_{8b} + \dot{X}_{12} + \dot{X}_{16} - \dot{X}_9 - \dot{X}_{15} - \dot{X}_{17}) \quad (6.36)$$

$$\dot{G}_{pot} = \dot{X}_D \cdot (1 - \varepsilon) \quad (6.37)$$



Şekil 6.10. Santralde Kullanılan Buhar Ünitesi Görseli

Bağıntılar kullanılarak elde edilen değerler Tablo 6.14’ de verilmiştir.

Tablo 6.14. Buhar Türbini için ekserji, madde denklik hesapları

| Akım  | Debi<br>( $kg s^{-1}$ ) | Basınç<br>(bar) | Sıcaklık<br>(°C) | Entalpi<br>( $kJ kg^{-1}$ ) | Entropi<br>( $kJ kg^{-1} K^{-1}$ ) | Ekserji<br>(MW) |
|-------|-------------------------|-----------------|------------------|-----------------------------|------------------------------------|-----------------|
| 8b    | 126,750                 | 120,6000        | 535              | 3529,841                    | 7,359                              | 170,317         |
| 12b   | 156,472                 | 34,20000        | 535              | 3529,841                    | 7,359                              | 210,255         |
| 16    | 183,417                 | 5,60000         | 273              | 3005,846                    | 7,352                              | 146,564         |
| 9     | 126,7500                | 37,70000        | 366              | 3142,825                    | 6,860                              | 140,120         |
| 15    | 156,472                 | 4,30000         | 277              | 3017,577                    | 7,481                              | 124,408         |
| 17    | 183,417                 | 0,0076          | 45               | 2583,138                    | 8,284                              | 22,236          |
| Güç   |                         |                 |                  |                             |                                    | 228,350         |
| Kayıp |                         |                 |                  |                             |                                    | 12,022          |

Buhar Türbini analizi sonucunda;

Tablo 6.15. Buhar Türbininin Ekserji Hesaplamaları

|                                           | $\dot{X}_D$ (MW) | $\epsilon$ (%) | $\dot{G}_{pot}$ (MW) |
|-------------------------------------------|------------------|----------------|----------------------|
| Buhar Türbini<br>Ekserji<br>Hesaplamaları | 12.022           | 0,95           | 0,6                  |

Santral işletmesinden alınan bilgiye göre Ovaakça kombine doğalgaz çevrim santralinde kullanılan buhar türbini MITSUBISHI marka olup özellikleri Tablo 6.16.’ da yer almaktadır.

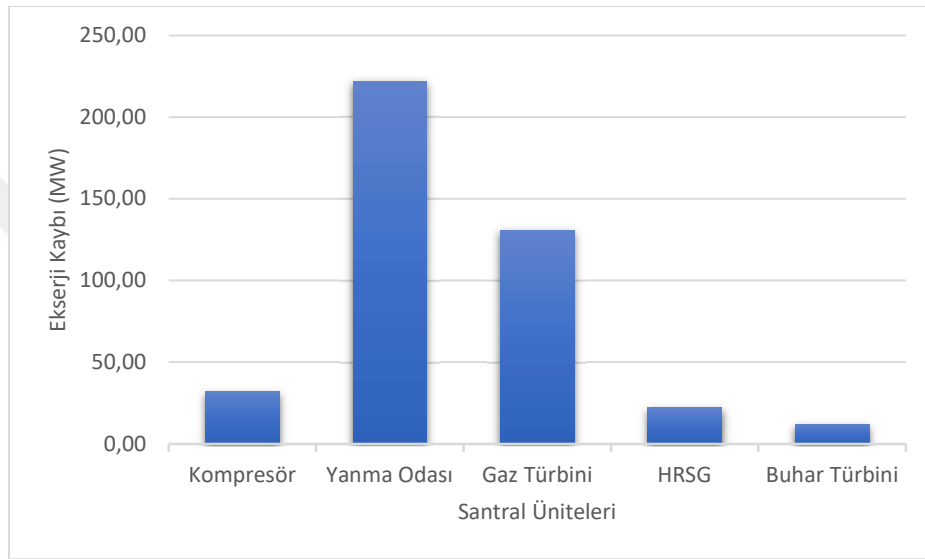
Tablo 6.16. Santralde yer alan Buhar Türbini Özellikleri

|                                                    |                                           |
|----------------------------------------------------|-------------------------------------------|
| ÇIKIŞ GÜCÜ                                         | 237,5 MW                                  |
| ISI SARFIYATI                                      | 2.384 kcal/kWh                            |
| HIZI                                               | 3000 rpm                                  |
| GERİ BASINÇ                                        | 0.0775 ata                                |
| YÜKSEK BASINÇ TAZE BUHAR<br>BASINÇ /SICAKLIK /DEBİ | 119,6kg/cm <sup>2</sup> /535°C /478,29t/h |
| ORTA BASINÇ TAZE BUHAR BASINÇ<br>/SICAKLIK /DEBİ   | 33,2kg/cm <sup>2</sup> /535°C /563,6t/h   |
| DÜŞÜK BASINÇ TAZE BUHAR<br>BASINÇ /SICAKLIK /DEBİ  | 4,6kg/cm <sup>2</sup> /249,8°C /96,76t/h  |

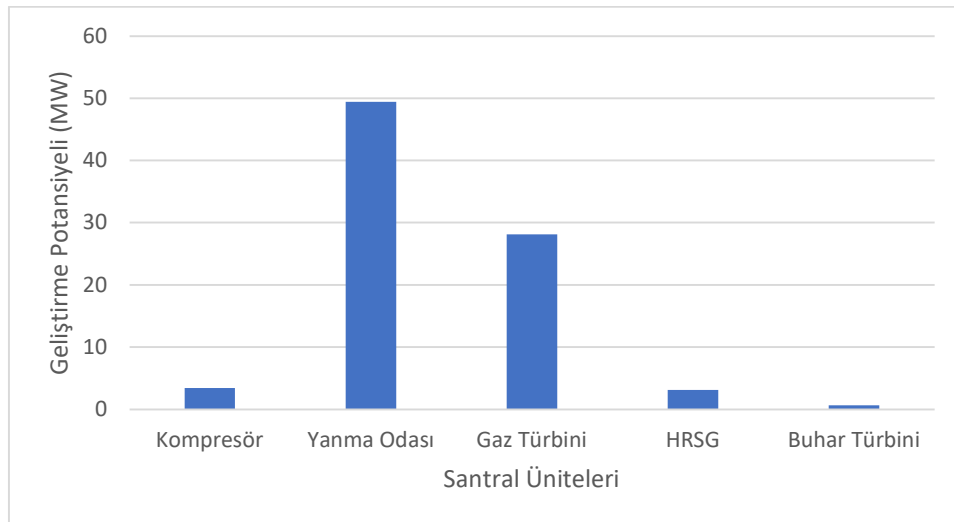
İşletmede yüksek verimli bir buhar türbini gücü 237,5 MW’dır. Yüksek basınç ve orta basınç bir, alçak basınç ise diğer bir grupta olmak üzere gruplanmışlardır. Farklı basınç işletmeleri

sayesinde ara yük verimliliği arttırılmıştır. Bu yüzden bütün kademeler reaksiyon tipidir ve hızı regüle eden kademe bulunmamaktadır.

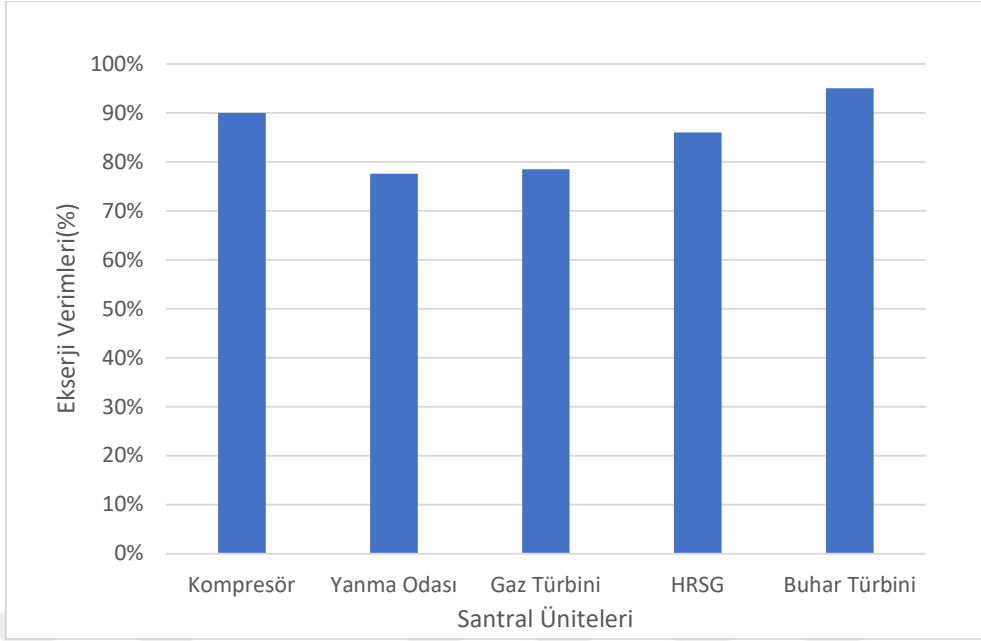
Sonuç olarak, sistemdeki ünitelerin ekserji kayıpları, geliştirme potansiyelleri ve ünitelerin ekserji verimleri sırasıyla, Şekil 6.11., Şekil 6.12. ve Şekil 6.13.'de verilmiştir. Buna göre, en yüksek ekserji kaybı 221,81 MW değeri ile yanma odasına, en yüksek ekserji verimi %95 değeri ile buhar türbinine, en yüksek geliştirme potansiyelinin ise 49,43 MW değeri ile yanma odasına ait olduğu görülmektedir.



Şekil 6.11. Ünitelerin Ekserji Kayıpları



Şekil 6.12. Ünitelerin Geliştirme Potansiyelleri



Şekil 6.13. Ünitelerin Ekserji Verimleri

## 7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, Brayton ve Rankine çevrimlerinden oluşan Bursa ilinde bulunan, yakıtı doğalgaz olan 1409,8 MW kurulu güce sahip doğalgaz kombine çevrim santrali incelenmiştir. Sisteme ait ünitelerine giriş ve çıkış yapan akımların gösterildiği akış şeması çizilmiştir. Şekil üzerinde gösterilen ana ünitelerin mevcuttaki şartlarda kütlesi, sıcaklığı, basıncı, entalpi ve entropisi, ekserji ve enerji gibi denklilikleri ile sistemin termodinamik analizi yapılmıştır. Yapılan hesaplamalar ile, tesisi oluşturan ünitelerin enerji, ekserji, ekserji kaybı ve geliştirme potansiyel değerleri bulunmuş ve kıyaslanmıştır. Yapılan analizlerde tersinmezlikler nedeniyle meydana gelen santral ünitelerine ait kayıplar belirlenmiş, daha sonra kayıp değerlerine bağlı olarak her bir ünite için ilgili denklilikler ile geliştirme potansiyeli, ekserji verimi ve ekserji kaybı değerleri bulunarak tablolara işlenmiştir.

Ekserji kaybı incelendiğinde, en yüksek ekserji kaybı yanma odasına (221,81 MW) aittir. Diğer ünitelerin ekserji kayıpları sırasıyla, kompresör (32,35 MW), gaz türbini (130,85 MW), HRSG (22,06 MW), buhar türbini (12,02 MW) şeklindedir. Ekserji kaybının en fazla olduğu santral ünitesi olan yanma odasında; yüksek sıcaklıklar sonucunda  $NO_x$  gazları oluşabilmektedir. Kızgın buhar enjeksiyon yöntemi ile yanma odasında meydana gelen alevin yüksek sıcaklığı kontrol altına alınabilir, bu sayede  $NO_x$  gazlarının oluşumu azaltılabilir. Yanma odasında hava-yakıt oranı, buhar enjeksiyonu-yakıt oranı gibi oranlar en verimli şartlara getirilerek, ekserji verimi artıracak yönde değişiklikler meydana getirebilir.

Santral ünitelerinin geliştirme potansiyelleri karşılaştırıldığında geliştirme potansiyelinin en yüksek yanma odasına (49,43 MW) ait olduğu görülmektedir. Diğer ünitelerin geliştirme potansiyelleri sırasıyla, kompresör (3,38MW), gaz türbini (28,12 MW), HRSG (3,08 MW), buhar türbini (0,6 MW) şeklindedir.

Her bir ünitenin ekserji verimleri karşılaştırıldığında en yüksek ekserji verimi buhar türbinine (%95) aittir. Diğer ünitelerin ekserji verimleri sırasıyla, kompresör (%90) yanma odası (%77,6) gaz türbini (%78,5), HRSG (%86) şeklindedir. Ekserji verimi en düşük olan ünite ise yanma odasıdır.

Santralde verimi artırmak için ısı kayıp noktalarının tespiti için her bir ünite termal kamera ile incelenebilir, gerekli kısımlara yalıtım yapılarak, kayıpların önüne geçilebilir. Bu sayede, harcanan yakıt miktarları azalacak ve böylece kızgın buhar ve güç maliyetleri düşecektir. Dolayısıyla, enerji maliyetleri azaltılarak hem ekonomik açıdan hem de çevreye salınan emisyon açısından fayda sağlanabilir.

Kombine çevrim güç santralleri (KÇGS) Türkiye’de dahil olmak üzere elektrik üretim sektöründe büyük bir öneme sahiptir. Kombine çevrim güç santrallerinde (KÇGS) genellikle yakıt olarak doğalgaz kullanıldığı için düşük emisyon salınımı ile diğer fosil yakıtlı güç santrallerine kıyasla çevreye daha duyarlı ve güvenilir enerji dönüşüm sistemine sahiplerdir. Bununla birlikte, bu santrallerin ekserji yöntemi ile incelenerek verimli bir şekilde işletilmeleri önem arz etmektedir.



## KAYNAKLAR

- [1] Başı and G. Başı, "Bursa Doğal Gaz Kombine Çevrim Santrali Ekserji Analizi," Lisans Tezi, Yalova Üniversitesi, Yalova, 2014.
- [2] T. J. Kotas, *The Exergy Method of Thermal Plant Analysis*, Reprint ed., Krieger Publishing Company, Malabar, 1995.
- [3] [3] Z. Özçelik, "An Energy and Exergy Analysis in Interger-ENKA, İzmir Natural Gas Combined Cycle Power Plant," Yüksek Lisans Tezi, İzmir, Türkiye, 1996.
- [4] P. Erduranlı, "Enerji Santraline Ekserji Analizinin Uygulanması," Yüksek Lisans Tezi, Zonguldak Karaelmas Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Zonguldak, Türkiye, 1997.
- [5] Ünver, Ü. ve Kılıç, M. (2005). "Çevre sıcaklığının bir kombine çevrim güç santralının performansına etkisi". *Uludağ Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 10(1), 49-58.
- [6] Cihan, O. Hacıhafızoğlu, and K. Kahveci, "Energy-Exergy Analysis and Modernization Suggestions for A Combined-Cycle Power Plant," *Int. J. Energy Res.*, vol. 30, pp. 115, 2006.
- [7] T. Başaran, "Performance and Degradation Evaluation of a Combined Cycle Power Plant," Yüksek Lisans Tezi, Sabancı Üniversitesi, Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü, Mekatronik Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul, 2010.
- [8] H. Altay, "Kombine çevrim santrallerinde verimlilik ve tasarruf olanaklarının belirlenmesi: Örnek bir tesisin incelenmesi," Yüksek Lisans Tezi, Enerji Enstitüsü, [İstanbul Teknik Üniversitesi], 2010.
- [9] O. Hacıhafızoğlu, "Energy-Exergy Analysis of Gas Turbine Cycle in a Combined Cycle Power Plant," *Energy Educ. Sci. Technol. Part A: Energy Sci. Res.*, vol. 27, no. 1, pp. 123–138, 2011.
- [10] R. Özgür, "Kombine Çevrim Santrallerinde Performans İzleme Yöntemleri," Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Türkiye, 2011.
- [11] F. Karagöz, "Kombine Çevrimli Bir Güç Santralının Enerji ve Ekserji Analizinin Yapılması," Yüksek Lisans Tezi, Trakya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Edirne, Türkiye, 2011.
- [12] M. S. Mert, "Bir güç santralının ekserjik ve termoekonomik analizi," Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2010.
- [13] M. O. Karaağaç, A. Kabul, and F. Yiğit, "Kombine doğalgaz çevrim santralının performans analizi," *Politeknik Derg.*, vol. 22, no. 2, pp. 319-325, 2018.
- [14] S. Gümüş, "Bir doğalgaz kombine çevrim güç santralinde enerji ve ekserji analizi," Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yalova Üniversitesi, Yalova, 2019.

- [15] K. Dikili, M. Kopaç, B. Erdoğan, and A. Topuz, "Doğalgaz Yakıtlı Kombine Çevrim Santralinde Enerji ve Ekserji Analizi," *Journal of the Institute of Science and Technology*, vol. 11, no. 3, pp. 2268-2277, 2021.
- [16] H. C. Adem and C. Gürlek, "Kangal Termik Santralının 3. Ünitesinin Enerji ve Ekserji Analizi," *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, vol. 38, no. 1, pp. 233-242, 2023.
- [17] Uluslararası Enerji Ajansı (IEA), "World Energy Outlook 2023", <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2023>. [Erişim Tarihi: 21 Nisan 2024].
- [18] REN21, "Global Status Report," <https://www.ren21.net/gsr-2023/>. [Erişim Tarihi: 21 Nisan 2024].
- [19] BP, "Energy Outlook 2023," <https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/energy-outlook/bp-energy-outlook-2023.pdf>. [Erişim Tarihi: 21 Nisan 2024].
- [20] Avrupa Komisyonu, "EU Climate Action: Climate Pact 2030 Climate Target Plan European Climate Law," <https://www.akib.org.tr/download/files/downloads/pagefiles/%7Bf0377912-de9e-4ec5-925d-0e1e1a0e22ae%7D/files/AB%20iklim%20eylemi-iklim%20pakt%C4%B1-2030%20Hedef%20Plani.pdf>. [Erişim Tarihi: 21 Nisan 2024].
- [21] IEA, "Renewable Electricity Capacity Growth in China, Main Scenario, 2005-2028," <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/renewable-electricity-capacity-growth-in-china-main-scenario-2005-2028>, [Erişim Tarihi: 21 Nisan 2024].
- [22] Türkiye Cumhuriyeti Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, "Enerji Bilgi Merkezi," <https://enerji.gov.tr/bilgi-merkezi-enerji-elektrik> [Erişim Tarihi: 21 Nisan 2024].
- [23] Türkiye Elektrik İletim A.Ş. (TEİAŞ), "Aylık Elektrik Üretim ve Tüketim Raporları," <https://www.teias.gov.tr/aylik-elektrik-uretim-tuketim-raporlari>. [Erişim Tarihi: 13 Haziran 2024].
- [24] "Enerji Sistemleri Mühendisliği," <https://www.enerjisistemlerimuhendisligi.com/gaz-turbini/3502/>. [Erişim Tarihi: 13 Haziran 2024].
- [25] Özgürel and S. Egeli, "Doğal Gaz Yakıtlı Kombine Çevrim Santralleri," *Uluslararası Doğal Gaz Konferansı Bildiriler Kitabı*, TMMOB Makine Mühendisleri Odası, pp. 1-4, 1995.
- [26] "DeneySan," [http://deneySan.com/Content/images/documents/es-02\\_67338194.pdf](http://deneySan.com/Content/images/documents/es-02_67338194.pdf). [Erişim Tarihi: 20 Mayıs 2024].
- [27] ENKA, "Bursa Doğal Gaz Kombine Çevrim Santrali," <https://www.enka.com/tr/portfolio-item/bursa-dogal-gaz-kombine-cevrim-santrali/>. [Erişim Tarihi: 20 Mayıs 2024].

- [28] Elektrikport, "Elektrik Üretimindeki Önemli Aktör: Jeneratörler," <http://www.elektrikport.com/teknik-kutuphane/elektrikuretimindeki-onemli-aktor-jeneratörler/8002#ad-image-0>. [Erişim Tarihi: 20 Mayıs 2024].
- [29] Y. A. Çengel and M. A. Boles, *Thermodynamics: An Engineering Approach*, 5th ed., McGraw-Hill, 2005, ch. 9, pp. 8862.
- [30] Noroozian and M. Bidi, "An Applicable Method for Gas Turbine Efficiency Improvement," *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, vol. 28, pp. 95-105, 2016.
- [31] Çetin, "Basit Brayton çevriminde elektrik üretimi maliyetinin parametrik analizi," *Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, vol. 29, no. 2, pp. 1-8, 2017.
- [32] Y. Çengel ve M. A. Boles, *Mühendislik Yaklaşımıyla Termodinamik*, 2. Baskı, ISBN: 975-8431-91-9, Literatür Yayıncılık, İstanbul, s. 867, 1996.
- [33] K. Çomaklı, "Atatürk Üniversitesi Isıtma Merkezinin Enerji ve Ekserji Analizi," Erzurum, 2002.
- [34] T. Tetik, "Doğalgaz Yakıtlı Bireysel Isıtma Sisteminin Enerji ve Ekserji Analizi," Yüksek Lisans Tezi, Hitit Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 2011.
- [35] Ö. F. Dilmaç, "Bir Ham Petrol Destilasyon Ünitesinin Kullanılabilir Enerji ve Termoeconomik Analizi," İstanbul, 2010
- [36] W. Van Gool, "Exergy Analysis of Industrial Processes," *Energy*, cilt. 17, no. 8, ss. 791–803, 1992.
- [37] J. Szargut, D. R. Morris ve F. R. Steward, *Exergy Analysis of Thermal, Chemical, and Metallurgical Processes*, Hemisphere, New York, ss. 297-309, 1988.

## **ÖZGEÇMİŞ**

İlk ve orta öğrenimini Yalova’da tamamladı. 2016 yılında girdiği Gazi Üniversitesi Enerji Sistemleri Mühendisliği Bölümünden 2020 yılında mezun oldu. 2021 yılında Yalova Üniversitesi Enerji Sistemleri Mühendisliği bölümünde lisansüstü eğitimini aldı. 2021 yılından beri Yalova Organize Sanayi Bölgesi Müdürlüğünde Enerji Sistemleri Mühendisi olarak çalışmaya devam ediyor.

## **TEZDEN TÜRETİLEN YAYIN VE ESERLER**

Ayık, P., Mert, M.S., “Kombine Çevrimli Bir Termik Santralin Termodinamik Performans Analizi”, 4. Uluslararası Bilimsel Araştırmalar ve Yenilikçi Çalışmalar Sempozyumu, 13-16 Mart, 2024