



**KOMBİNE BRAYTON VE RANKİNE
ÇEVİRİMLERİNİN EKSERJİ ANALİZİ VE
OPTİMİZASYONU**

Ali BOZKURT

Yüksek Lisans Tezi

Makine Mühendisliği

Ana Bilim Dalı

Doç. Dr. Rabi KARAALİ

Öğr. Gör. Dr. Arzu KEVEN

2025

(Her Hakkı Saklıdır)

T.C.
BAYBURT ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ TEZLİ YÜKSEK LİSANS PROGRAMI

KOMBİNE BRAYTON ve RANKİNE ÇEVİRİMLERİNİN EKSERJİ ANALİZİ
VE OPTİMİZASYONU

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Ali BOZKURT

Danışman: Doç. Dr. Rabi KARAALİ

İkinci Danışman: Öğr. Gör. Dr. Arzu KEVEN

BAYBURT - 2025

KABUL VE ONAY

Doç. Dr. Rabi KARAALİ ve Öğr. Gör. Dr. Arzu KEVEN danışmanlığında, Ali BOZKURT tarafından hazırlanan “Kombine Brayton ve Rankine Çevrimlerinin Ekserji Analizi ve Optimizasyonu” başlıklı bu çalışma, 22.01.2024 tarihinde yapılan savunma sınavı sonucunda oy birliği ile başarılı bulunarak jürimiz tarafından Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

Başkan : Doç. Dr. Rabi KARAALİ

Üye : Doç. Dr. Hüseyin ŞANLI

Üye : Dr. Öğr. Üyesi Erman Kadir ÖZTEKİN

Bu tezin kabulü Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Yönetim Kurulu’nun/...../20... tarih ve 20...../.....-..... sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Doç. Dr. Bünyamin ALIM
Enstitü Müdürü

BEYANNAME

Bayburt Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü tez yazım kılavuzuna göre Doç. Dr. Rabi KARAALİ ve Öğr. Gör. Dr. Arzu KEVEN danışmanlığında hazırlamış olduğum “Kombine Brayton ve Rankine Çevrimlerinin Ekserji Analizi ve Optimizasyonu” başlıklı yüksek lisans tezimin bilimsel etik değerlere ve kurallara uygun, özgün bir çalışma olduğunu, aksinin tespit edilmesi halinde her türlü yasal yaptırımını kabul edeceğimi beyan ederim.

21.03.2025

Ali BOZKURT



ÖN SÖZ

Bu çalışmamda bana desteklerini esirgemeyen hocam Sayın Doç. Dr. Rabi KARAALİ, Sayın Öğr. Gör. Dr. Arzu KEVEN, Yeğenim İsmail BOZKURT değerli Arkadaşım ve Meslektaşım Namık KARAKAŞOĞLU ve Sevgili Eşim Öznur BOZKURT'a teşekkür ederim. Bu çalışmamın faydalı olmasını temenni ederim.

Ali BOZKURT



ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

KOMBİNE BRAYTON VE RANKİNE ÇEVİRİMLERİNİN EKSERJİ ANALİZİ VE OPTİMİZASYONU

Ali BOZKURT

Bayburt Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Rabi KARAALİ

İkinci Danışman: Öğr. Gör. Dr. Arzu KEVEN

Bayburt-2025, Sayfa: 69

Bu tezde enerji kavramından ve enerjinin tarihsel süreç içerisinde ne gibi değişikliklere uğradığı, hangi yönde nasıl gelişmeler gösterdiği ele alınmıştır. Enerji kaynaklarının iki alt başlığı olan yenilenebilir ve yenilenemez enerji kaynakları incelenmiş ve ilk olarak yenilenebilir enerji kaynakları araştırılmıştır. Bu kaynaklar güneş, rüzgâr, hidrolik, jeotermal, biyokütle ve dalga enerjileridir. Bu enerji türleri kendi içerisinde sürdürülebilir ve çevreye zarar vermeyen enerji kaynaklarıdır. Daha sonra ise tükenebilir ve çevreye çoğu zaman zararlar veren yenilenemez enerji kaynakları olan kömür, petrol, doğal gaz ve nükleer enerjiler araştırılmıştır. Tüm bu enerji kaynaklarının dünyada ve Türkiye de kullanımları, coğrafi olarak dağılımları gibi özellikleri gösterilerek ekserji kavramı ve ekserjinin ne gibi önemli noktaları olduğundan ekserjinin türleri olan kinetik ve potansiyel ekserji, fiziksel ekserji, kimyasal ekserji, ısı ile ekserji, iş ile ekserji, kütle ile ekserji ve ekserjinin yıkımı kombine çevrimler için incelenmiştir.

Rankine çevriminin pompa basıncının 400 kPa'dan 7600 kPa'ya artması ile ekserji verimi %76'dan %85'e çıkmakta ve Brayton çevriminin kompresyon basıncının 400 kPa'dan 2200 kPa'ya çıkması ile de ekserji verimi %72'den %79'a yükselmektedir. Burada iki çevrimin optimum çalışacağı bu çalışma şartları beraber uygulandığında tüm sistemin ekserji verimi %86'yı aşmaktadır. Brayton ve Rankine çevriminin maksimum verimli olduğu çalışma şartları beraber uygulandığında sistemin optimum çalışma şartları elde edilmektedir.

Anahtar Kelimeler: Brayton, Rankine, enerji, ekserji, optimizasyon.

ABSTRACT

M. SC. THESIS

EXERGY ANALYSIS AND OPTIMIZATION OF COMBINED BRAYTON AND RANKINE CYCLES

Ali BOZKURT

Bayburt University

Institute of Graduate Studies

Department of Mechanical Engineering

Thesis Advisor: Assoc. Prof. Dr. Rabi KARAALI

Second Advisor: Dr. Lec. Arzu Keven

Bayburt-2025, Pages: 69

This thesis deals with the concept of energy and how energy has changed throughout the historical process, and in which direction and development it has shown. The two subheadings of energy sources, renewable and non-renewable energy sources, have been examined and firstly renewable energy sources have been investigated. These sources are solar, wind, hydraulic, geothermal, biomass and wave energies. These types of energy are sustainable and do not harm the environment in themselves. Then, coal, oil, natural gas and nuclear energies, which are exhaustible and often harmful to the environment, have been investigated. The usage of all these energy sources in the world and in Turkey, their geographical distributions and their features have been shown, and the concept of exergy and the important points of exergy, the types of exergy, kinetic and potential exergy, physical exergy, chemical exergy, exergy with heat, exergy with work, exergy with mass and destruction of exergy have been examined for combined cycles.

As the pump pressure of the Rankine cycle increases from 400 kPa to 7600 kPa, the exergy efficiency increases from 76% to 85%, and as the compression pressure of the Brayton cycle increases from 400 kPa to 2200 kPa, the exergy efficiency increases from 72% to 79%. When these operating conditions, where the two cycles will operate at their optimum, are applied together, the exergy efficiency of the entire system exceeds 86%. When the operating conditions, where the Brayton and Rankine cycles are at their maximum efficiency, are applied together, the optimum operating conditions of the system are obtained.

Keywords: Brayton, Rankine, energy, exergy, optimization.

İÇİNDEKİLER

KABUL VE ONAY.....	II
BEYANNAME	III
ÖN SÖZ	IV
ÖZET	V
ABSTRACT	VI
İÇİNDEKİLER.....	VII
TABLOLAR.....	IX
ŞEKİLLER.....	IX
KISALTMALAR.....	X
SİMGELER.....	XI
GİRİŞ.....	1
Araştırmanın Konusu ve Problemi	1
Araştırmanın Amacı	1
Araştırmanın Önemi ve Gerekçesi	2
İlgili Araştırmalar	2
BİRİNCİ BÖLÜM	7
1. ENERJİ	7
1.1. ENERJİ KAVRAMI.....	7
1.2. ENERJİ KULLANIMININ TARİHSEL GELİŞİMİ	7
1.3. ENERJİ KAYNAKLARI	10
1.3.1. Yenilenebilir enerji kaynakları	12
1.3.1.1. Güneş enerjisi	12
1.3.1.2. Rüzgâr enerjisi.....	13
1.3.1.3. Hidrolik enerji	14
1.3.1.4. Jeotermal enerji.....	14
1.3.1.5. Biyokütle enerjisi.....	15
1.3.1.6. Dalga enerjisi.....	16
1.3.2. Yenilenemez Enerji Kaynakları.....	17
1.3.2.1. Kömür.....	17
1.3.2.2. Petrol.....	18
1.3.2.3. Nükleer enerji	20
1.3.2.4. Doğalgaz.....	22
1.4. DÜNYADA VE TÜRKİYE’DE ENERJİ GÖRÜNÜMÜ	23
1.4.1. Yenilenemez Enerjinin Dünyada ve Türkiye’deki Görünümü.....	23
1.4.2. Yenilenebilir Enerjinin Dünyada ve Türkiye’deki Görünümü.....	26
İKİNCİ BÖLÜM	29
2. YÖNTEM	29
2.1. KOMBİNE ÇEVİRİM KAVRAMI.....	29
2.2. KOMBİNE ÇEVİRİMİN AVANTAJLARI	30
2.3. GÜÇ ÜRETİMİNDE KULLANILAN KOMBİNE ÇEVİRİMLİ SANTRALLER.....	31
2.4. KOMBİNE ÇEVİRİM SANTRAL TÜRLERİ.....	33
2.4.1. İlave Yanmasız Kombine Çevrimler	34
2.4.1.1. Buhar türbinlerine gaz türbinleri ilavesi ile güç ve verim artırımı	35

2.4.1.2. Gaz türbinlerinde buhar türbini ilavesi ile güç ve verim artırımı	35
2.4.2. Tam Yanmalı Kombine Çevrim	35
2.4.3. Paralel Güç Üniteli Kombine Çevrim	35
2.5. DOĞAL GAZ KOMBİNE ÇEVİRİM SANTRALI ANA BİLEŞENLERİ	35
2.6. DOĞALGAZ KOMBİNE ÇEVİRİM SANTRALLERİNİN ÇALIŞMA PRENSİBİ	36
2.7. EKSERJİ KAVRAMI	37
2.8. EKSERJİ VERİMİ	42
ÜÇÜNCÜ BÖLÜM.....	44
3. BULGULAR	44
SONUÇ, TARTIŞMA VE ÖNERİLER.....	59
KAYNAKÇA.....	60
EKLER	63
ÖZ GEÇMİŞ	69



TABLÖLAR

Tablo 1: Tarihsel Enerji Tüketimi	10
Tablo 2: Kütle, Enerji Dengesi ve Entropi Üretimi Denklemleri.....	45
Tablo 3: Ekserji, Entropi Dengesi ve Ekserji Verimi Denklemleri	44
Tablo 4: Yaz Ayları Özellik Tablosu	45
Tablo 5: Kütle, Enerji Dengesi ve Entropi Üretimi Denklemleri.....	45
Tablo 6: Sistemin Kompresör ve Pompa Basıncına Göre Optimum Çalışma Şartları	58
Tablo 7: Sistemin Pompa Çıkış Basıncı ile Brayton Cihazlarındaki Ekserji Kaybı.....	63
Tablo 8: Sistemin Pompa Çıkış Basıncı ile Ekserji Verimi.....	63
Tablo 9: Sistemin Pompa Çıkış Basıncı ile Rankine Ekserji Verimi	63
Tablo 10: Sistemin Pompa Çıkış Basıncı ile Brayton Ekserji Verimi.....	64
Tablo 11: Sistemin Pompa Çıkış Basıncı ile Kütleli Debi	64
Tablo 12: Sistemin Pompa Çıkış Basıncı ile Buhar Türbini ve Pompa Gücü.....	64
Tablo 13: Sistemin Pompa Çıkış Basıncı ile Gaz Türbini ve Kompresör Gücü	65
Tablo 14: Sistemin Pompa Çıkış Basıncı ile Tüm Gücü	65
Tablo 15: Sistemin Kompresör Çıkış Basıncı ile Gaz Türbini ve Kompresör Ekserji Kaybı ..	65
Tablo 16: Sistemin Kompresör Çıkış Basıncı ile Rankine Çevrim Cihazları Ekserji Kaybı ..	44
Tablo 17: Sistemin Kompresör Çıkış Basıncı ile Sistemin Ekserji Verimi.....	66
Tablo 18: Sistemin Kompresör Çıkış Basıncı ile Gaz Türbini ve Kompresör Ekserji Verimi	66
Tablo 19: Sistemin Kompresör Çıkış Basıncı ile Rankine Çevrim Cihazları Ekserji Verimi.	67
Tablo 20: Sistemin Kompresör Çıkış Basıncı ile Buhar Türbini ve Pompa Güçleri.....	67
Tablo 21: Sistemin Kompresör Çıkış Basıncı ile Gaz Türbini ve Kompresör Gücü	67
Tablo 22: Sistemin Kompresör Çıkış Basıncı ile Kütleli Debi	68

ŞEKİLLER

Şekil 1: Türkiye 2018 Yılı Ocak Ayı Elektrik Enerjisi Üretiminin Kaynaklar Dağılımı	22
Şekil 2: Dünya Kömür Rezervlerinde Ülkelerin Payları.....	23
Şekil 3: Ülkelere Göre Ham Petrol Rezervleri.....	24
Şekil 4: Doğal Gazın Dünya Genelindeki Kullanım Alanları.....	24
Şekil 5: Ülkelere Göre Doğalgaz Rezervleri.....	25
Şekil 6: Dünyada Yenilenebilir Enerjiye Dayalı Kurulu Güç Dağılımı	26
Şekil 7: Türkiye’de Yenilenebilir Enerjiye Dayalı Kurulu Güç Dağılımı	26
Şekil 8: Dünyada Yenilenebilir Enerji Kaynaklarından Üretilen Elektrik Enerjisi	27
Şekil 9: Türkiye’de Yenilenebilir Enerji Kaynaklarından Üretilen Elektrik	28
Şekil 10: 2021’de Yenilenebilir Enerji Kurulum Maliyetleri	28
Şekil 11: Kombine Çevrimin Şematik Gösterimi	31
Şekil 12: Kombine Çevrim İçin T-s Diyagramı.....	32
Şekil 13: Ekserji Verimiyle Yıkımın, Kaynak Tüketimiyle Kayıp Ekserji Emisyonu İlişkisi	38
Şekil 14: Bölgesel Isıtmalı Brayton ve Rankine Çevrimli Kombine Çevrim	44
Şekil 15: Sistemin Pompa Çıkış Basıncının Cihazlardaki Ekserji Kaybına Etkisi	47
Şekil 16: Sistemin Pompa Çıkış Basıncının Brayton Cihazlarındaki Ekserji Kaybına Etkisi	48
Şekil 17: Sistemin Pompa Çıkış Basıncının Tüm Sistemin Ekserji Verimine Etkisi	48
Şekil 18: Sistemin Pompa Çıkış Basıncının Rankine Cihazları Ekserji Verimine Etkisi	49
Şekil 19: Sistemin Pompa Çıkış Basıncının Brayton Cihazlarındaki Ekserji Verimine Etkisi	50
Şekil 20: Sistemin Pompa Çıkış Basıncının Rankine’deki Kütlesel Debiye Etkisi	50
Şekil 21: Sistemin Pompa Çıkış Basıncının Buhar Türbini ve Pompa Gücüne Etkisi	51
Şekil 22: Sistemin Pompa Çıkış Basıncının Gaz Türbini ve Kompresör Gücüne Etkisi	52
Şekil 23: Sistemin Pompa Çıkış Basıncının Tüm Sistemin Gücüne Etkisi	52
Şekil 24: Kompresör Çıkış Basıncının Gaz Türbini ve Kompresör Ekserjisine Etkisi	53
Şekil 25: Kompresör Çıkış Basıncının Rankine Çevrimi Cihazları Ekserji Kaybına Etkisi	54
Şekil 26: Kompresör Çıkış Basıncının Tüm Sistemin Ekserji Verimine Etkisi	54
Şekil 27: Kompresör Çıkış Basıncının Brayton Çevrimi Cihazları Ekserji Verimine Etkisi	55
Şekil 28: Kompresör Çıkış Basıncının Rankine Çevrimi Cihazları Ekserji Verimine Etkisi	55
Şekil 29: Kompresör Çıkış Basıncının Buhar Türbini ve Pompa Gücüne Etkisi	56
Şekil 30: Kompresör Çıkış Basıncının Gaz Türbini ve Kompresör Gücüne Etkisi	57
Şekil 31: Kompresör Çıkış Basıncının Rankine Çevrimi Kütlesel Debisine Etkisi	57

KISALTMALAR

UEA	: Uluslararası Enerji Ajansı
EJ	: Exajoule
TEP	: Ton Eşdeğer Petrol
W	: Watt
V	: Volt
MTEP	: Mega Ton Eşdeğer Petrol
m²	: Metrekare
m³	: Metreküp
CO₂	: Karbon Dioksit
MPa	: Mega Pascal
MWe	: Megawatt Elektrik
T	: Sıcaklık
K	: Kelvin
Ex	: Ekserji
H	: Entalpi
s	: Entropi
Q	: Isıl Enerji
m	: Kütle
P	: Basınç
E	: Enerji
Kg	: Kilogram
w	: İş (kW)
MWt	: Megawatt Termal
ST	: Buhar Türbini
GT	: Gaz Türbini
IGBJ	: Isı Geri Kazanım Buhar Jeneratörü
Ex	: Ekserji
c	: Isı Kapasitesi

SİMGELER

%	: Yüzde
°C	: Santigrat Derece
Σ	: Toplam
η	: Verim



GİRİŞ

Araştırmanın Konusu ve Problemi

Dünya üzerinde, ülkelerin rekabet edebilme güçlerini arttıran en önemli unsurlardan bir tanesi enerjidir. Enerji ülkelerin sosyal ve ekonomik alanlarda ilerlemesine yardımcı olurken insanların yaşam kalitelerini arttırmaktadır. Enerjiye olan talep nüfus artışı, kentleşme, sanayileşme, ticaret olanaklarının artması ve sürekli gelişmekte olan teknolojinin insan yaşamının temelleri arasına girmesi ile beraber gittikçe artmaktadır. Artan bu talepler doğrultusunda ülkeler enerji sektörüne yatırımlar yapmaktadırlar. Bu yatırımlar sayesinde çevreye duyarlı, kesintisiz ve düşük maliyetli enerji üretimi sağlamak amaçlanmaktadır. Dünya üzerinde en yaygın şekilde kullanılan enerji elektrik enerjisidir. Bu enerji elektrik üretim santrallerinde üretilmekte ve üretimde kullandıkları kaynaklara göre hidroelektrik santraller, doğal gaz kombine çevrim santraller, nükleer santralleri vb. şeklinde isimlendirilmektedir. Dünya elektrik üretimi için kullanılan kaynaklar ele alındığında en yaygın olarak kömür kullanıldığı görülmektedir. Kömürün ardından en fazla kullanılan kaynak ise doğalgazdır.

Türkiye'deki enerji talebi her geçen gün artış göstermektedir. Bu nedenle Türkiye'de sürdürülebilir enerji politikaları yapılmaktadır. Bu politikaların temel noktaları ise maliyetin en aza indirilmesi ve verimin en üst seviyeye çıkarılmasıdır. Bu anlamda mevcut elektrik üretim santrallerinin verimli olarak çalıştırılması hedeflenmektedir.

Ekserji analizleri, enerji korunumu ve kütle korunumu ilkelerini termodinamiğin ikinci yasası ile beraber başta ısı sistemleri kullanılarak çeşitli sistemlerin analiz ve tasarımlarında kullanmak için uygulanan bir yöntemdir. Enerji maliyetlerinin oldukça fazla olması sebebi ile enerji tasarrufu büyük bir önem kazanmıştır ve bununla beraber enerjinin kalitesinde önem kazanmıştır. Bu sebeple enerji yalnızca miktar olarak değil kalite olarak da değerlendirilmeye başlamıştır.

Araştırmanın Amacı

Dünyadaki enerji kaynaklarının tükenebilir olması ve hızlı bir şekilde azalması ve bu nedenle de enerji için harcanan miktarların aynı oranla artması sebebi ile termik sistemlerdeki enerji kayıplarının belirlenmesi adına ekserji analizi büyük bir öneme sahiptir. Ekserji enerji kaynağından alınabilecek yararlı enerji miktarı veya o enerjinin iş yapabilme potansiyeli şeklinde tanımlanabilir. Ekserji analizinin öneminin anlaşılması ile beraber ekserji analizi son yıllarda çeşitli sistemlere ve süreçlere uygulanarak birçok çalışmada kullanılmıştır. Daha sonra bu analizler ekonomik analizler ile beraber kullanılarak ekserji tabanlı analiz çalışmaları yürütülmüştür. Bu analizlerden yola çıkarak optimizasyon çalışmaları güçlendirilmiştir. Bu

anlamda sistemlerden hem ekonomik olarak hem de verim olarak yararlanmak istenmiştir. Fakat bu çalışmaların temelinde yine ekserji analizi yer almaktadır. Ekserji kayıplarının azalması bu sebeplerde ekserji veriminin yükselmesi halinde süreçte oluşan yıkım, ekserji kayıpları ve kaynak tüketimi ile ters oranda azalma göstermektedir. Bu bağlamda ekserji analizlerinin enerji üretim ve tüketimi açısından ne kadar önemli oldukları konusunda araştırmalar yapılmış ve önemli olup olmadıkları incelenmiştir.

Araştırmanın Önemi ve Gerekçesi

Kombine çevrim santrallerinin yüksek güç ve verim sunmasının yanı sıra esnek işletme şartlarına uygun, çabuk devreye alınabilen, değişken yük ve tam yük durumlarına kolay bir şekilde adapte olabilen, bununla beraber değişken yük durumlarında yüksek verimle çalışma niteliğine sahip olmaktadır. Hazırda bulunan santrallerin iyileştirilmesine ve yeni yapılacak olan santrallerin tasarımlarında enerjinin sadece dönüşümlerine değil, kullanılabilirliğine de dikkat edilmesi gerekmektedir. Yapılan çeşitli araştırmalar doğrultusunda enerji kullanım analizleri için ekserji ve enerji etkinliklerinin hesaplanmasının yararlı bir yöntem olduğu gözlemlenmiştir.

İlgili Araştırmalar

Ekserji kavramı 1865-1868 döneminde ortaya çıkmış olup, ekserji ile ilgili çalışmalar 1974-1976 yıllarında başlamıştır. Özellikle 1986 yılından itibaren bu konu üzerinde yapılan araştırmalara ilgi giderek artmaktadır (Erduranlı, 1997). Şu anda, ekserji analizi, kendisine adanmış çok sayıda çalışma ile yaygın olarak tartışılan bir konudur. Literatürde adı geçen son araştırmalardan birkaçı:

Akdeniz (2007), bir kojenerasyon tesisinin enerji, ekserji ve eksergoekonomik yönlerinin analizini yapmıştır. Santral, Süleyman Demirel Üniversitesi yerleşkesinin elektrik ihtiyacını karşılamak üzere 10 MW elektrik üretecek şekilde inşa edilmiştir. Ürün sisteminin seçimi, hesaplanan elektrik ihtiyacı, üretim maliyeti, toplam tüketim değeri ve yıllık tasarruf esas alınarak yapılmalıdır.

Rahim (2008), Thermoflex paket uygulamasını kullanarak merkezi analogilere ve optimizasyona odaklanan bir doğal gaz kombine çevrim santrali üzerinde bir çalışma yürütmüştür. Gaz türbini sıcaklığını giriş sıcaklığına düşürmek için üç soğutma yöntemi kullanılmıştır. Atık ısı kazanında emisyonların en aza indirilmesi için katalizör sisteminin uygulanmasını da içeren bu yöntemlerin sistem performansı üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Ayrıca, termodinamik ve termoekonomik optimizasyon alanındaki araştırmalar, bu görev için

özel olarak tasarlanmış bilgisayar yazılımının kullanılması, verimliliğin elde edilmesi ve sürecin hızlandırılması açısından çok önemli olduğunu ileri sürmüştür.

Köylü (2009), gaz ve buhar türbinlerini kullanan Habaş Kombine Çevrim Elektrik Santrali Ünitelerini anlatmaktadır. Bu türbinler akış, sıcaklık ve basınç gibi faktörleri düzenlemek için elektronik veya manuel olarak kontrol edilebilir. Kompresör, gaz türbini, pompa ve buhar türbininin değerleri kullanılarak enerji analizi yapılmıştır. Gaz türbini çevriminde değişen giriş havası sıcaklıklarına dayalı bir analiz gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar, ekteki grafiklerde de gösterildiği gibi sıcaklık arttıkça çevrim verimliliğinin azaldığını göstermiştir.

Ergün (2010), Ankara'da bir ticari merkezin enerji ve ekserji incelemesini gerçekleştirmiştir. Egzersiz analizine dayalı olarak elde edilen bulgular, Chiller soğutma sistemi ve kazandaki iyileştirmelerin enerji verimliliğini artıracığını ve daha gerçekçi sonuçlara yol açacağını göstermektedir.

Altay (2010), kombine bir ısı ve enerji santrali olan ABC tesisinde mahsul verimliliğini artırmaya ve enerji kullanımını azaltmaya yönelik teknikler üzerine araştırma yapmıştır. Analiz, hesaplanan döngü veriminin ortalama değerlere yakın olduğunu ancak ilave iyileştirme potansiyeli bulunduğunu bulmuştur. Tartışma, maliyet hesaplamaları ve yanma sıcaklığının yükseltilmesi, tesise gelen havanın soğutulması, baca gazı sıcaklığının 10-15 0C düşürülmesi ve yalıtım noktalarının iyileştirilmesi gibi çeşitli önlemler yoluyla verimdeki iyileşmenin incelenmesi etrafında dönmüştür. Hesaplamalara göre yıllık 280.000 TL tutarında mali tasarruf elde edilebileceği tahmin edilmektedir.

Karagöz (2011), 82 MW'lık doğalgaz kombine çevrim santralinin gerçek özelliklerini kullanarak enerji ve ekserji analizi yapmıştır. Her bir elemanın enerji ekseni kaybı ve yüzde dilimleri hesaplandı ve santralin enerji ekseni için bir bilanço oluşturulmuştur. Bulgularını görsel temsillerle sergiledi ve benzetmeler yapmıştır.

Ece (2011), ara ısıtma, ara soğutma ve rejeneratörü içeren bir gaz türbini çevriminin eksergoekonomik analizini gerçekleştirmiştir. Kullanıcı, bir benzetim oluşturmak ve bireysel sistem bileşenlerinin eksergoekonomik modellemesini gerçekleştirmek için EES uygulamasını kullanmıştır. Araştırma, her bir bileşenin ekserji maliyetinin belirlenmesiyle sonuçlanmış ve bu daha sonra görseller kullanılarak ölçüldü ve yorumlanmıştır.

Ersayın (2012), tarafından yapılan çalışmada, bir kombine çevrim tesisi termodinamiğin 1. ve 2. kanun prensiplerine göre bir firmanın gerçek operasyonel verileri kullanılarak incelenmiştir. Tesis, her bir bileşen için ekserjik verim ve kayıp oranlarını belirlemiştir. Santraldeki iyileştirme çalışmaları öncesi ve sonrası enerji ekseni verim değerlerini değerlendirdi ve toplanan verilere dayanarak olası iyileştirme çalışmaları ile karşılaştırdı.

Açıklap (2013), çalışmasında, Eskişehir'de bulunan doğal gazla çalışan bir elektrik santrali ve gaz-dizel motorlu trijenerasyon tesisinin performansını değerlendirmek için ileri ekserji ve ekserjoekonomik analiz tekniğini kullanmıştır. Santralin ekserji verimliliği %40,2 olarak belirlenirken, eksergoekonomik faktör ise 0,270 olarak bulunmuştur. İleri ekserji yaklaşımına göre sistem donanımlarının sınırlı geliştirme potansiyeline sahip olduğunu ve büyük ölçüde gaz türbini ve yanma odasına odaklanması gerektiğini belirtti. Trijenerasyon tesisinin ekserji verimliliği %35,4 ve eksergoekonomik faktörü 0,069'du. Trijenerasyon tesisinin yüksek bir gelişme potansiyeline sahip olduğu gösterilmiştir. Turbo hava kompresörü ve motorunun geliştirilmesine öncelik verilmesi gerektiğini vurguladı. Ayrıca geleneksel ve gelişmiş ekserji tekniklerinden elde edilen sonuçların karşılaştırmalı bir analizini gerçekleştirdi. Tontu (2013), yaptıkları çalışmada bir buhar santralinin üç farklı yük senaryosunu (%100, %70, %40) incelemiştir. Güç üretimi ve tüketimi, elemanların tersinmezliği, enerji-ekserji kayıpları ve genel verimlilik gibi birçok faktörü incelediler.

Yılmaz (2015), tarafından yapılan çalışmada yazar, 50 MW'lık gaz yakıtlı kombine çevrim santralinde ekserji kaybının yerlerini ve alanlarını belirlemiştir. Bu hem geleneksel hem de ileri ekserji analiz tekniklerinin uygulanmasıyla başarıldı. Araştırmada ayrıca geliştirilebilecek potansiyel alanlar da vurgulandı. Sonuç olarak kazandaki ekserji tahribatının 6.874 kW'ının önlenebileceği, 12.371 kW'ının ise kaçınılmaz olduğu sonucuna varılmıştır. Önlenebilecek en yüksek ekserji yıkımı bu lokasyonda bulunmuştur. Kondenserde 22.997 kW ile en yüksek ekserji yıkımı görülürken bunun önemli bir kısmının, özellikle 20.193 kW'ın kaçınılmaz olduğunu ileri sürmüştür. Ayarlamaların 17.260 kW'lık kaçınılabılır bir ekserji değeri ile sonuçlanacağını mümkün.

Terhan (2015), doğal gazla çalışan bir kazanın baca gazındaki enerji kayıplarının su buharını yoğunlaştırarak geri kazanılması için bir çalışma yapmış ve bir yöntem geliştirmiştir. Yapılan hesaplamalara göre 3 adet yoğunlaşmalı ekonomizör kullanılarak 184 dairenin sıcak su ihtiyacının karşılanabileceği tespit edilmiştir. Bu çözümün hayata geçirilmesinin toplam maliyeti 205.176 Türk Lirası (TL), geri ödeme süresi ise 3 ay olarak tahmin ediliyor. 20 yıllık dönemde ise 12.443.041 TL tasarruf öngörülüyor.

Hoque (2016), hem geleneksel gaz türbini çevriminin hem de hava hazırlama gaz türbini çevriminin ekserjisini ve gücünü artırmak için bir çalışma yürütmüştür. Klasik gaz türbini çevriminin ve hava hazırlama gaz türbini çevriminin performans özellikleri üzerindeki etkisini değerlendirmek için, termodinamiğin 1. ve 2. yasalarının prensiplerini kullanarak giriş nemlendirici güç artırma teknolojisinin varlığını ve yokluğunu inceliyoruz. Çıkış gücünü, yakıt tüketimini, her bir bileşenin ekserji dengesini ve genel sistemi analiz etmek için "Cycle-Tempo" termodinamik modelleme programından yararlanıldı. Analiz, hava hazırlama döngüsü boyunca

ekserjideki artışın, ekstra bileşenlerin eklenmesinden kaynaklanan ekserji kaybını aştığını ve bunun sonucunda yakıtın ekserjisinde yaklaşık %8,5'lik bir tasarruf elde edildiğini göstermektedir. Giriş nemlendirici sisteminin kurulumu çevrim için güç çıkışında artışa yol açtı. Spesifik olarak, klasik gaz türbini çevriminin ortalama gücü %21,9 oranında artarken, hava hazırlama çevriminin gücü ise %25,2 civarında arttı. Hava hazırlama çevriminin nemlendiricili veya nemlendiricisiz olarak 1. ve 2. kanunlar açısından klasik çevrime göre üstün verim gösterdiği tespit edilmiştir.

Ahmad (2017), İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü'ndeki kombine çevrim tesisinin enerji analizine ilişkin bir değerlendirme yapmıştır. Ayrıca Türkiye ve Avrupa ülkelerindeki kojenerasyon sistemi uygulamalarının karşılaştırmalı analizini yaptı. Amaç, kojenerasyon tesisinin iki farklı operasyonel senaryosunu (gaz türbini ve pistonlu motor) değerlendirerek en uygun seçimi belirlemektir. Pistonlu motor üstün bir çözüm sunar. Çift basıncılı ısı geri kazanımlı buhar jeneratörü, tek basınç senaryosuna kıyasla daha yüksek verimlilik gösterir ve ekonomik olarak %10 daha uygundur. Pistonlu motorun sıcaklık kontrolü ve buhar türbininden buhar çıkarma aşaması sayesinde elde edilen ısı geri kazanım verimliliği %10-15 arasında değişmektedir. Bunu geliştirmenin mümkün olduğunu ve bunun sonucunda emisyonlarda önemli bir azalmaya yol açtığını belirlemiştir.

Topal vd. (2017), yaptıkları çalışmada, ısı enerjisinin yoğunlaştırıcı aracılığıyla çevreye salınmasını en aza indirmek amacıyla Çatalağzı Termik Santrali'nin kojenerasyon tesisine dönüştürülme potansiyelini araştırmışlardır. Araştırmacılar, ara buharı çıkarmak için dört farklı model kullanarak yerel ısıtma potansiyelini değerlendirdiler. Elde ettikleri bulgulara göre, türbin çıkışı ara buhar girişine yaklaştıkça, kondenserden salınan enerji miktarında azalma olduğunu, bunun da elektrik üretiminde azalan oranda düşüşe yol açtığını gözlemlediler.

Şen (2018), çalışmasında gaz türbini, buhar türbini ve kombine çevrimin güç çıkış değerleri ve verimleri karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma, 240 MW Kurulu güce sahip bir doğal gaz kombine çevrim santralının 8-23 °C hava sıcaklığı aralığındaki çalışma koşulları temel alınarak yapılmıştır. Sonuç olarak, sıcaklıktaki artışın gaz türbini, buhar türbini ve kombine çevrimin enerji çıkışında ve verimliliğinde azalmaya yol açtığı bulunmuştur. Santral 8°C sıcaklıkta %43,3 verimle 228 MW elektrik enerjisi üretiyor. 23 derece sıcaklıkta 197 MW elektrik enerjisi üretme veriminin %42,7 olduğu görüldü. Bu nedenle üretkenliği ve verimliliği uygun seviyelerde tutmak için yalnızca gelen havayı soğutan özel sistemlerin kurulumunu önerdi. Gaz türbininin türbin bölümünün toplam ekserji kaybının %86,8'ini, kompresör bölümünün ise %13,2'sini oluşturduğu sonucuna varılmıştır. Açıklamaya göre buhar türbini en büyük ekserji kaybını %84 ile AB türbin kısmında yaşadı. OB türbin bölümünde %11,2 oranında ekserji kaybı yaşanırken, YB türbin bölümünde %4,3 oranında ekserji kaybı yaşandı.

Ayrıca kurulumu tamamlanan ancak henüz işletmeye girmeyen 800 MW'lık kombine çevrim santralının enerji-ekserji analizini gerçekleştirdi.



BİRİNCİ BÖLÜM

1. ENERJİ

1.1. ENERJİ KAVRAMI

Enerji kavramı Yunanca “en” (iç) ve “ergon” (iş) sözcüklerinden türetilmektedir. Bilimsel anlamda pilleri şarj etme, makinelere itici güç sağlama ve yakıt yakma gibi süreçlerdeki yaygın özelliklere yardımcı olmaktadır. Bu süreçler ya da diğer süreçler enerjinin çeşitli biçimleri olarak tanımlanabilmektedir. Örneğin; kimyasal enerji (yakıtlarda ya da pillerde), termal enerji (sıcaklıkta), kinetik enerji (hareketli nesnelerde), yerçekimi potansiyel enerjisi, elektrik enerjisi ve diğerleri olmaktadır (Boyle, 2004). Enerji, bir maddenin veya maddelerden oluşan bir sistemin iş yapabilme kapasitesi olarak tanımlanmaktadır. Hareket edebilme yeteneğine sahip olan insan, bir cisim veya bir madde her an iş yapabilme kabiliyetine sahip olduğu için bu kaynaklardan enerji temin etme durumu söz konusu olabilir. Temel olarak bakıldığında zaman enerji her durum için aynı kabul edilmektedir. Ancak enerjinin içinde bulunduğu hale göre değişiklik gösteren bir tarafı vardır buda enerjinin kaynağıdır (Başol, 1994). Günlük yaşamda yapılan çoğu şey için enerjiye ihtiyaç duyulmaktadır. Güçlü olmak adına yemek yenir ve bu yemekten enerji sağlanır. Bu yemekleri yapmak için ocak ya da fırından yararlanılır ve bu eşyalarda enerji ile çalışmaktadır. Yemeklerin hammaddelerini dahi yetiştirmek ve mutfaklara ulaştırmak adına enerjiden yararlanılmaktadır. Enerjinin potansiyel (depolanmış) ve kinetik (hareketli) olmak üzere iki türü vardır. Enerjilerin elde edilesi adına kullanılan enerji kaynakları da yenilenebilir ve yenilenebilir olmayan kaynaklar olarak iki gruba ayrılmaktadır. Rüzgâr, güneş, hidrolik enerji yenilenebilir enerji kaynakları arasında yer alırken, nükleer enerji ve petrol, doğalgaz, kömür gibi fosil yakıtlar ise yenilenemeyen enerji kaynakları arasında yer almaktadır (Özil vd., 2012).

1.2. ENERJİ KULLANIMININ TARİHSEL GELİŞİMİ

İnsanoğlu, varoluşundan günümüze kadar enerjinin farklı çeşitlerinden yararlanmıştır. Ekonominin gelişmesiyle beraber enerji türleri çeşitlenmektedir. Bazı dönemlerde enerji çeşitlerinde artış ve azalışlar görmek mümkündür. Binlerce yıl öncesinde insanoğlunun kendi ihtiyaçları doğrultusunda ateşi bulmasıyla beraber enerji fiilen kullanılmaya başlamıştır. Ateşi ilk öncelerde ısıtmak, yiyecekleri pişirmek ve aydınlanmak amacıyla, daha sonraki dönemlerde ise metalleri işlemek adına kullanmışlardır. Bunun yanı sıra tuğla yapmak ve kil tabletleri pişirmek için de ateşten yararlanmışlardır. Isı seviyesini değiştiren ateşi insanlar pek çok amaç doğrultusunda kullanmışlardır. Tarımın gelişimiyle beraber başlayan döneme kadar insanoğlu

hayvanların hareketlerini gözlemleyerek yaşamlarına devam etmişlerdir. Birkaç bin yıl öncesinde rüzgârdan ilk olarak gemileri yüzdürme amacıyla yararlanılmıştır. Bundan birkaç bin yıl kadar sonra ise rüzgâr ve su değirmenleri tahılları öğütmek için kullanılmıştır. Günümüzden bin sene öncesinde ise gelgit olaylarından faydalanarak enerji kullanılmıştır. Tamamıyla doğadan elde edilen yenilenebilir ve temiz enerji kaynakları üretim ve ulaşım için uzun süreler boyunca kullanılmıştır. Bin yıl boyunca, doğal enerji kaynakları, ileri endüstriyel sistemler, mimari, ticaret ve çok sayıda medeniyetin diğer çeşitli alanlarında değişen derecelerde önem kazanmıştır. On sekizinci yüzyıl sanayi devrimi sırasında yakıtın, özellikle de kömür, doğal gaz ve petrolün kullanılması, toplumların refahını önemli ölçüde artırdı. Süreç üç ayrı aşamaya ayrılmıştır (Şen, 2002):

- Başlangıçta bireyler su gücünün bol olduğu bölgelerde su değirmenleri inşa etmişler ve uzun süreler boyunca verimlilik için kullanmışlardır. Buhar motorunun ortaya çıkışı, su gücünün yerini kok kömürü ve petrol kaynaklarının almasına yol açmıştır.
- Bin sekiz yüzlü yıllarda kömür yataklarının yakacak elde edilmesinde kullanılmasıyla beraber demir ve diğer maden çeşitlerinin eritilmesi işleminde de kullanılmıştır. Buhar makinasının uzun mesafelere taşınabilmesi ile beraber sanayileşme hızı da artış göstermiştir. O çağlarda demir ve kömür yatakları oldukça çok kullanılmış ve düşük verimli tesisler kullanılmış ancak bu tesislerin çevreye olan zararlı etkileri göz önünde bulundurulmamıştır.
- Yirminci yüzyılın başında içten yanmalı motorlar ve elektrik günlük yaşamda kullanım alanı bulmuştur. Bununla beraber gaz ve petrolün ek yakıt şeklinde kullanılmasıyla birlikte kimya sanayisinde dayanıklı ve yeni maddeler gelişmeye başlamıştır. Gaz ve petrolün ilave yakıt olarak yanmalı motorlarda kullanılması ile direkt güç sağlanmakta veya dolaylı yoldan kullanımlarıyla elektrik enerjisi elde edilmektedir. Ucuz petrolden enerji sağlanması, bunun yanında plastik ve metal karışımlar gibi maddelerin sağlanması ile ulaşım alanında gelişmeler yaşanmıştır. Bu pozitif etkiler sayesinde sanayileşme alanında gelişimler de artmıştır. Yirminci yüzyılın ortalarına doğru elektrik ağı sayesinde enerjinin her yere erişimi sağlanmıştır. Petrol ucuz bir enerji kaynağı olduğundan dolayı üretim noktalarında kullanılan teknoloji de yavaş kalıp özellikle petrolün yakılmasıyla çevreye zarar verilmesi görmezden gelinmiştir.

Endüstri gelişimini tamamlamış olan toplumlar günümüzde gelişmiş toplumlar olarak da tanımlanabilmektedir. Fakat bu durum toplumun en önemli etkinliği olma niteliğini kaybetmesine neden olmuştur. Bilgi, hizmet ve iletişim süreçleri bunun yerine önem arz etmiş ve bunların yardımı ile gelişmiş teknolojiler desteklenmiştir. Bununla beraber son dönemlerde

teknoloji ve bilim alanında büyük gelişmeler yaşanmıştır. 1960 yılından sonraki dönemde sanayileşmenin çevreye olan olumsuz etkileri anlaşılmaya başlamıştır. Bununla birlikte petrol yakılmasının ve petrol atıklarının çevreye zarar verdikleri kabul edilmiştir. Bundan on yıl sonraki dönemlerde petrol krizinin ortaya çıkmasıyla oluşan ekonomik sıkıntılar ile beraber hali hazırda olan enerji kaynakları nasıl daha verimli kullanılır sorusu gündeme gelir ve yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımı da gündeme gelmiştir. Düşük enerjiyle çalışabilen gereçlerin üretimi gibi konular ele alınmış, petrol kullanımının büyük bir seviyede azaltılabileceği anlaşılmıştır. 1990'lı yıllarda petrolün çevreye olan zararı iyice idrak edilmiş ancak ekonomik olarak sıkıntı yaşanacağı için uygulama da geçime yapılmıştır. 1980 yılı sonrasında petrol fiyatlarının düşüşe geçmesi petrol kullanımında kısıtlama amacıyla yapılacak tedbirleri çok daha zor bir duruma getirmiştir. Bu sebeple fosil yakıtlara nazaran daha çevreci ve ekonomik enerji kaynaklarının gelişim süreci zorlaşmıştır (Şen, 2002).

1990'larda küresel enerji arzının %25'i kömürden, %30'u hidrolik ve nükleer enerjiden, %45'i ise petrolden sağlanıyordu. Petrol sadece bir enerji kaynağı olarak değil, aynı zamanda sanayi ve ulaşımda da temel bir ham kaynak olarak hizmet etmekte ve dolayısıyla çağdaş zorlukların ortaya çıkmasına katkıda bulunmaktadır.

Tarım alanına bakıldığında zaman sektöründe oluşan modernleşme hareketleri, makinalı tarım kullanımı, petrole olan talebin artmasında başka bir etken olmuştur. Petrolün üstünlüklerinin olması diğer kaynaklara göre daha çok tercih edilmesini sağlamaktadır. Bunların başında ucuz olması ve kalori değerlerinin yüksek olması, kolay taşınabilir olması, az yer kaplaması ve toz, kül benzeri artık maddeler bırakmadığı için çevre kirliliğine daha az etki etmesi gibi örnekler verilmektedir. Doğal gaz da pratik kullanımı ve ucuz olmasından dolayı petrolün yerine kullanılabilen bir madde olma özelliğindedir. Ancak doğal gaz da petrole benzer şekilde maliyetinin yüksekliğinin yanı sıra siyasal ve stratejik etkileri de arkasından getirmektedir. Kömür ise maliyetli ve çıkarılması zor bir kaynak olduğundan dolayı bu alanda yapılacak yeni yatırım fikirleri olumlu karşılanmamıştır. Su kaynaklarından faydalanma giderek çoğalmasından dolayı petrolün yerine geçmesi söz konusu olmamaktadır. Nükleer enerji ise çok maliyetlidir ayrıca çevreye çok fazla olumsuz etkisi vardır hatta kalıcı hasarlara dahi neden olabilmektedir. Başka bir enerji kaynağı olan gel-git olayları, rüzgârlar, çöpler, sıcak denizlerdeki derinlikteki ve yüzeydeki ısı farkından dolayı tercih edilmemektedir. Bununla beraber denizdeki akıntılardan yararlanmak adına milyon liralara harcanması gerekmektedir (Başol, 1994). Bütün bu olumsuzlukların yanına bir de fosil yakıtların tükenmesi tehlikesi eklendiğinde enerjiyle ilgili problem gittikçe büyümektedir. Günümüzdeki kullanımı ile düşünülecek olursa, dünyadaki petrol rezervlerinin 12 yıl, doğal gazın 57 yıl ve kömürün ise 207 yıl sonra tükeneceği düşünülmektedir. Bu sebeple enerji krizinin kısa süre içerisinde daha

kuvvetli bir biçimde yeniden oluşması kaçınılmaz olmaktadır. Bu fosil enerji kaynaklarının tükenme tehlikesi ya da direkt sınırlı oluşu insanları yenilenebilir enerji kaynakları olan su, rüzgâr ve güneş kaynaklara yöneltmektedir. Dünyanın dört bir yanında yenilenebilir ve temiz enerji kaynaklarından faydalanabilmek adına ok yoğun bir şekilde araştırmalar yapılmaktadır. Ayrıca bunlarla alakalı teknolojilerde gün geçtikçe daha ekonomik gelişmeler yaşanmaktadır (Şen, 2002). Çağlar boyu enerji farklı dallarda farklı yoğunlukla kullanılmıştır. Zaman içerisinde yeni enerji kaynakları bulunmuştur ve bu enerji kaynaklarının kullanılması insanoğlunun geçirdiği kademelerde büyük bir rol oynamıştır. Enerjiye olan talep insanlığın ekonomik ve sosyal gelişmeleriyle paralel bir şekilde artış göstermiştir (Berberoğlu, 1982).

Tablo 1: Tarihsel Enerji Tüketimi (Fanchi, 2004)

Fert Başına Günlük Tüketim (1000 kcal)						
Dönem	Endüstri ve Tarım	Konut ve Hizmet	Gıda	Ulaşım	Toplam	
İlkel			2		2	
Avcılık		2	3		5	
İlkel Tarım	4	4	4		12	
Gelişmiş Tarım	7	12	6	1	26	
Endüstri	24	32	7	14	77	
Teknoloji	91	66	10	63	230	

1.3. ENERJİ KAYNAKLARI

Ülkeler şehirleşme, nüfus artışı, sanayileşme ve teknolojik ilerleme ile paralel bir şekilde yükselen enerji talebini yerine getirebilmek adına temiz, kesintisiz ve düşük maliyetli enerji arayışında bulunmuşlardır. Sosyal ve ekonomik kalkınma adına en önemli girdi olan enerji en genel şekilde; Bir sistemin belli bir mesafe boyunca bir güç gibi dış etkilere sebep olma yeteneğidir. Daha basit bir anlatımla eş yapabilme kabiliyeti olarak belirtilen enerji; potansiyel, ısı, elektrik, kimyasal, mekanik, kinetik, manyetik ve nükleer enerji gibi çeşitli şekillerde görülebilmektedir (Quaschnig, 2005). Enerji farklı kaynaklardan elde edilebildiği için bunların türlü kategorilere ayrılması mümkün olmaktadır (Bhattacharyya, 2011). Bu anlamda enerjinin hiçbir şekilde bir dönüşüm veya değişime uğramamış hali birincil enerji olarak adlandırılmaktadır. Birincil enerji kaynakları uluslararası enerji literatüründe; petrol, hidrolik enerji, yeni enerji (jeotermal, biyogaz, güneş, rüzgâr), katı yakıtlar (linyit, kömür), doğalgaz, nükleer enerji, ticari ve geleneksek olmayan enerjiler (bitki, odun ve hayvan atıkları) şeklinde ele alınmaktadır. Birincil enerjinin dönüşmesiyle elde edilen ikincil enerji kaynaklarının en çok kullanılan şekli elektrik enerjisidir.

Enerji kaynakları, kaynak rezervlerinin tükenebilir olup olmayışına göre yenilenebilir ve yenilenemez enerji kaynakları olarak iki grupta incelenmektedir. Yenilenebilir enerji kaynakları, doğada bol miktarda bulunan, tüketim oranlarına eşit veya daha hızlı bir oranla kendini yenileyebilen kalıcı kaynaklardır (Maradin, 2017). Bu çeşit enerji kaynakları aracılığıyla elde edilen enerji hem mevcut kaynakları niteliksel ve niceliksel şekilde tüketilmekte hem de çevreye olan zararı çok az olmaktadır. Bu kaynaklar; hidrolik, rüzgâr, hidrojen ve dalga enerjisi, güneş, jeotermal, biyokütle olarak sınıflandırılmaktadır. Yenilenebilir olmayan enerji kaynakları (konvansiyonel, fosil yakıtlar) ise; doğada kendiliğinden var olan fakat kendini yenileme özelliğine sahip olmadığı için tüketildikçe azalan enerji kaynaklarıdır. Dönemimiz enerji ihtiyacının büyük bir çoğunluğunu karşılayan bu kaynaklar ise petrol, kömür ve doğalgaz olarak gruplandırılmaktadır (Kelly, 2007).

Enerji kaynakları piyasada bir yer edinip edinmemesine göre ticari ve ticari olmayan enerji kaynakları olarak ayrılabilir. Ticari olmayan enerjilere verilebilecek en yaygın örnek kişisel olarak tüketilen enerjidir. Ticari enerjilere verilebilecek örnekler de elektrik, gaz ve petrol olarak söylenebilir (Maradin, 2017).

Enerji kaynakları son olarak temin edildiği teknolojiye bağlı olarak konvansiyonel ve konvansiyonel olmayan enerji olmak üzere iki ayrı grupta incelenmektedir. Bu anlamda konvansiyonel enerjiler ağırlıklı olarak kullanılan teknolojilerin kullanılmasıyla elde edilen enerjilerken, konvansiyonel olmayan enerjiler ise kaynaklar ve yeni teknolojiler aracılığıyla elde edilebilen enerjiler olarak tanımlanabilir (Bhattacharyya, 2011).

1.3.1. Yenilenebilir Enerji Kaynakları

Yenilenebilir enerji, doğal ve sürekli enerji kaynaklarından elde edilen enerjiyi ifade eder. Yenilenebilir enerji ve çevre dostu enerji olarak da bilinen bu kaynakların tükenme olasılığı, kaynağın kendini yenileme olasılığından daha azdır. Yenilenebilir enerji kaynakları arasında rüzgâr, jeotermal, okyanus dalgaları, güneş radyasyonu, hidroelektrik, biyokütle ve gelgit gibi kaynaklar yer almaktadır (Twidell ve Weir, 2015).

1.3.1.1. Güneş enerjisi

Yenilenebilir enerji kaynaklarının en önemli enerji kaynağı güneştir. Zira güneş radyasyonu bazı karmaşık süreçlerden geçerek dünya atmosferinde yer alan rüzgârın, dalga enerjisinin ve pek çok enerji kaynağının meydana gelmesinde direkt bir etkiye sahiptir (Sorensen, 2000).

Güneş enerjisi, güneş içindeki hidrojen gazının yüksek sıcaklıklarda helyum gazına dönüştürüldüğü füzyon süreciyle üretilen ışıma enerjisidir. Güneş'in yüzeyi, çekirdeğindeki

hidrojen atomları arasında devam eden nükleer füzyon süreçleri sonucunda sıcaklığı 6000 C'de tutar. Bu nükleer reaksiyonların süreci yavaş yavaş tüm hidrojeni daha büyük atom ağırlığına sahip elementlere dönüştürür. Ancak kademeli doğası gereği Güneş'in 5 milyar yıl daha müthiş bir enerji deposu olarak hizmet vermeye devam edeceğine inanılıyor. Bu gerekçeden dolayı güneş enerjisi yenilenebilir enerji kaynağı olarak sınıflandırılmaktadır (Boyle, 2003). Güneş enerjisinin yoğunluğu yeryüzünde 1100 W/m² seviyesindeyken, atmosferin dışında 1367 W/m² seviyelerindedir. Dünya üzerindeki güneş ışıınım gücü; hava koşullarına, yerleşim yoğunluğuna, coğrafi konuma ve çevre kirliliğine göre değişiklik göstermektedir. Güneş enerjisi büyü bir yelpaze ile değişik enerji şekillerine dönüşebilmektedir. Güneş radyasyonu üç değişik şekilde kullanılabilir ve yararlanılabilir. Bunlar arsında birinci olarak, ısıyı emen malzemelerden yapılan kolektörlerin yardımı ile üretilen temel enerji, ikinci olarak fotovoltaiik elektrik ve üçüncü olarak da fotovoltaiik hücreler tarafınca yakalanan ve direkt olarak elektriğe dönüştürülebilen güneş radyasyonu olarak söylenebilmektedir (Paceşila, 2015). Solar termal sistemler ve fotovoltaiik paneller bu enerjilerden yararlanabilmek adına iki büyük doğrudan güneş enerjisi değişim teknolojileridir. Güneş ışığını direkt elektriğe çeviren fotovoltaiik paneller; solar termal sistemleri, endüstriyel süreçlerde ve binalarda (güneş enerjisi sayesinde sıcak su ya da binaların güneş enerjisi aracılığıyla ısıtılması gibi) güneş destekli termokimyasal üretimi barındırmaktadır.

1.3.1.2. Rüzgâr enerjisi

Rüzgâr enerjisinin ana kaynağı güneş ışıınımıdır. Küresel rüzgârlar, Dünya'yı ısıtan güneş ışıınımının eşit olmayan dağılımından kaynaklanan basınç eşitsizliklerinden kaynaklanır. Güneş ışıınımının Dünya üzerindeki farklı bölgeler tarafından eşit olmayan şekilde emilmesi, atmosferik basınçta değişikliklere yol açarak havanın yüksek basınç alanlarından alçak basınç alanlarına doğru hareket etmesine neden olur (Öztürk, 2013). Dünyanın eğriliği, enlem arttıkça güneş ışıınlarına daha fazla maruz kalınmasına neden olur. Enlem arttıkça güneş ışığı atmosfere nüfuz etmeye devam eder. Sonuç olarak güneş enerjisinin önemli bir kısmı yüzeye ulaşmadan önceki yolculuğu sırasında emilir. Bu olgunun bir sonucu olarak, alçak enlemlerde yüksek enlemlere göre daha sıcak sıcaklıklar yaşanır. Rüzgârlar, dünyanın ısınmasının birçok süreci tarafından üretilir (Boyle, 2004).

Rüzgârdaki enerji rüzgâr hızının küpüyle doğru orantılıdır. Rüzgâr enerjisinden etkin bir şekilde yararlanabilmek için uygun yerlerin belirlenmesi gerekmektedir. Bu nedenle rüzgâr türbinlerinin doğru değerlendirilmesi ve rüzgâr kaynağının özelliklerinin anlaşılması önemli faktörlerdir. Rüzgârın enerji kaynağı olarak en önemli niteliği değişken olmasıdır. Bu

değişimler coğrafi konum ve aynı bölgede zamana bağlı olarak geçici değişimler olmasından kaynaklı olmaktadır (Burton, 2011).

Rüzgâr içinde 10 milyon MW'a yakın enerjinin devamlı olarak bulunduğu tahmin edilmektedir. Burada yer alan kinetik enerji rüzgâr türbinleri aracılığıyla elektrik enerjisine çevrilmektedir (Herbert, 2007). Rüzgâr türbinlerinin bu enerjiyi dönüştürürken dört ana aşaması bulunmaktadır. Rüzgâr, türbinin sürtünme seviyesine erişemez ise türbin hareket etmez ve enerji üretilmez. Rüzgârın hızı 3 m/s hıza ulaştığı zaman türbin elektrik üretmeye başlamaktadır. Rüzgârın hızı arttığı sürece rüzgâr türbini üretebileceği en fazla güç miktarına gelene kadar enerji üretmeye devam eder.

Fakat fırtına gibi doğal afetler oluştuğunda zarar görmemek adına türbin kendini devre dışı bırakır (Seifried ve Witzel, 2010). Rüzgâr enerjisinin elektrik üretmede, su pompalamada ve yel değirmenlerinde kullanımıyla uzun bir tarihsel geçmişi vardır. Uygun fiyatlı, temiz ve maliyeti nispeten daha düşük olan rüzgâr enerjisi geleneksel enerji kaynakları ile kıyaslandığı zaman rekabet edebilecek oranda elektrik üretim kapasitesine sahip olmaktadır.

Rüzgâr enerjisi üretimi, ürettiği gürültü nedeniyle iklim ve estetik açısından olumsuz çevresel etkilere sahip olabilmektedir (Nurbay ve Çınar, 2005). Karada kurulu rüzgâr türbinlerinin yarattığı işitsel ve görsel bozulma, hem yaban hayatı, özellikle kuş türleri hem de insanlar üzerinde zararlı etkilere sahip olabilir. Ayrıca rüzgâr türbinleri, gece ısınma ve gündüz soğuma yoluyla yüzey sıcaklıklarını değiştirme kapasitesine sahiptir ve bu da kuraklığa yol açabilir. Ayrıca rüzgâr türbinlerinin arkasında oluşan türbülans, havayı dikey ve yatay olarak etkili bir şekilde karıştırarak yerel iklim değişikliklerine neden olabilir (Karadağ, 2009).

1.3.1.3. Hidrolik enerji

Hareket halindeki suyun kinetik enerjisinden elde edilen hidrolik enerji, su türbinleri kullanılarak elektrik enerjisine dönüştürülebilmektedir. Bu süreçte dönüştürülen enerjiye hidroelektrik enerji adı verilmektedir. Hidroelektrik enerji, güneş ışınımının etkisiyle hareket eden suyun kinetik enerjisinden yararlanılarak üretilir. Barajlardan çoğunlukla hidroelektrik enerji üretimi için yararlanılıyor ancak dalga ve gelgit kuvvetlerinden de yararlanılmaktadır (Ellabban vd., 2014). Hidroelektrik santraller düşen suda depolanan potansiyel enerjiyi elektrik enerjisine dönüştürür. Bu konumda üretilen enerji, suyun hacimsel akış hızına, yoğunluğuna ve yerçekimi kuvvetine göre dalgalanır (Jorde ve Kaltschmitt, 2007). Suyun düşüş yüksekliği ve akan suyun hacimi ne kadar fazla olursa hidroelektrik santralinde üretilen enerji üretiminde bir o kadar fazladır (Pandey ve Karki, 2017).

Hidroelektrik santraller su kaynakları, türbinler, mimari gibi birçok faktöre göre sınıflandırılmaktadır. Nehir tipi santral olarak bilinen bir tür hidroelektrik santral, bir nehrin

dalgalandan su seviyeleri ve doğal akışından elde edilen enerjiyi elektrik üretmek için kullanır. (Bozkurt ve Tür, 2015) Bu santrallerin bir kısmı doğrudan nehirden, bir kısmı ise kanaldan beslenmektedir. Göz önünde bulundurulması gereken bir diğer faktör, depolama sistemleriyle donatılmış hidroelektrik enerji tesislerinin sürekli olarak sabit bir su akışını sürdüremeyebileceğidir. Yüksek bölgelerde yer alır ve kardan eriyen sudan yararlanarak enerji üretir. Bu hidroelektrik santralin amacı, dağ sırası boyunca çeşitli yerlerdeki su kütlelerini boru hatları kullanarak birbirine bağlayarak potansiyel enerjinin dönüşümünü optimize etmektir. Pompaj depolamalı hidroelektrik santraller, enerji arzının düşük olduğu dönemlerde suyu alt rezervuardan üst rezervuara pompalamak için fazla enerjiyi kullanarak yüksek enerji taleplerini hızlı bir şekilde karşılamak üzere tasarlanmıştır. Depolanan su daha sonra enerji tedarikinin arttığı zamanlarda üst rezervuardan alt rezervuara bırakılır (Acar, 2008).

1.3.1.4. Jeotermal enerji

Dünyanın iç ısıyla elde edilen enerji, jeotermal enerji olarak adlandırılmaktadır. Yer altı ısı, sıg magma odalarından veya birkaç yüz metreden birkaç kilometre derinliğe kadar uzanan sıcak kayalardan akarken su ısıtıldığında üretilir. Bu bölgedeki su genellikle çatlaklardan veya çatlaklardan sızan doğal olarak oluşan yüzey altı suyundan oluşur. Ancak bazı durumlarda su, yüzeyden pompalanarak yapay olarak serbest bırakılabilir. Jeotermal enerji, yerin derinliklerinde doğal olarak bulunan ısıyı toplanıp yüzeye çıkarılmasıyla elde edilir (Yılmaz, 2012).

Jeotermal enerji, Dünya'nın iç kısmındaki toryum, uranyum ve potasyum radyoizotoplarının doğal bozunması ile üretilen, doğal olarak oluşan bir termal enerji şeklidir. Dolayısıyla jeotermal enerji, güneş ışığından veya güneş ve ayın çekimsel etkilerinden etkilenmeyen tek yenilenebilir enerji kaynağı olarak öne çıkıyor. Jeotermal enerji, iç mekân ısıtmasının yanı sıra doğal kaplıcalarda ve çeşitli endüstriyel faaliyetlerde doğrudan kullanılmaktadır. Jeotermal enerjiden enerji üretimi alanında yalnızca dolaylı olarak yararlanılmaktadır. Jeotermal enerji, jeotermal enerji santralinden üretilen suyun aşırı sıcaklığı nedeniyle, kombine güç ve ısı uygulamaları için oldukça verimlidir. Bu şekilde kullanıldığında, enerji alışverişi verimliliği diğer birçok enerji kaynağından önemli ölçüde üstündür. Jeotermal enerji tesisleri, sürekli çalışmaları, %95'in üzerinde kapasiteyle çalışmaları ve önemli miktarda ısı üretmeleriyle bilinmektedir (Younger, 2015).

Taşıyıcının, önemli miktarda ısıyı verimli bir şekilde dünyanın derinliklerine iletme yeteneğine sahip olması gerekir. Genel olarak ısı, derinliklerden yeraltı bölgelerine iletilir ve daha sonra taşıyıcı görevi gören jeotermal akışkanlar tarafından konveksiyon yoluyla iletilir.

Bu sıvılar çoğunlukla yer kabuğuna sızan, sıcak kayalarla temas ederek ısınan ve zaman zaman yüksek sıcaklık ve basınç altında rezervuarlarda biriken yağışlardan oluşur (Barbier, 2002).

1.3.1.5. Biyokütle enerjisi

Gittikçe daha fazla ülkenin yenilenebilir enerji politikalarına ağırlıklı olarak yer verdikleri biyokütle enerjisi artık önceden söylendiği üzere “*bir geçiş enerji kaynağı*” şeklinde değerlendirilmemektedir. Çünkü potansiyel olarak biyokütle enerji kaynakları dünyanın en sürdürülebilir ve büyük enerji kaynağıdır. Hali hazırda bulunan enerji kaynaklarından 450 EJ (egzajoule) yakınlarında enerji üretilirken, biyokütle enerji kaynakları dünyanın gıda talebine etki etmeden en az 800 EJ’ye kadar enerji üretimine yardım etmektedir (Rasillo-Calle vd., 2015). Biyokütle enerjisi, akaryakıt ürünleri, odun ve türevi yakıtlar ile hayvansal, endüstriyel ve tarımsal ürünlerin enerji üretimi amacıyla kullanılmasını ifade etmektedir. Biyokütleden elde edilen enerjiye biyoenerji denir. Bu enerji formunun temel bileşimi, daha sonra organizmalarında depolanan güneş enerjisidir.

Biyoenerji taşıyıcıları olarak da bilinen biyoyakıtlar, güneş enerjisini kimyasal enerji formunda depolayan yenilenebilir enerji kaynaklarıdır. Ancak bunların yenilenebilirliği biyokütle üretiminin devam etmesine bağlıdır (Loo ve Koppejan, 2008). Fotosentez, bitki dokularında hem yapısal hem de yapısal olmayan karbonhidratların sentezine yol açar. Fotosentez, bitkilerin klorofil kullanarak güneş enerjisini yakaladığı bir süreçtir. Uygun koşullar altında ışık, su, karbondioksit ve klorofil birleşerek oksijen, karbon ve hidrojenle oluşan karbonhidratlar üretir. Yanma sonrasında bu karbonhidratlar, karbondioksit ve suyun yeniden oluşmasıyla sonuçlanan bir kimyasal reaksiyona girer, böylece güneşten elde edilen enerji bir kez daha açığa çıkar (Klass, 1998).

Organik maddeden elde edilen biyokütle enerjisi, bitkilerde fotosentez işleminin gerçekleştirilmesi ve bitkilerin hayvanlar tarafından tüketilmesi nedeniyle çeşitli bileşikler açısından zengindir. Biyokütle hemiselüloz, selüloz, lipitler, monosakkaritler, su, kül, lignin, proteinler, nişastalar ve diğer maddeleri içerir. Tüm bileşiklerin yoğunlaşma türlerine, büyüme evresine, bitki dokusunun tipine ve büyüme şartlarına bağlı bir şekilde değişiklik göstermektedir (Özcan, 2015). Biyoenerji çoğunlukla ısıtma işlemleri için kullanılsa da elektrik üretiminde, ulaşımda yakıt ve kimyasal işlemler için de kullanılabilir. Biyoenerji dünyanın her yerinde sürdürülebilir bir temelde kullanılacak kaynaklara dayalı olmakta bu durum da aslında bölgesel kalkınma adına büyük fırsatlar tanımaktadır (Kapluhan, 2014).

Biyokütle enerji kaynakları; türlü yöntemler kullanılarak işlenir ve katı, sıvı, gaz hale dönüştürülebildiğinden dolayı çok çeşitli biyokütle yakıtı elde edilmektedir. Bu yakıtlar sıvı fosil yakıt rezervi bulunmayan yerlerde sıvı ulaştırma yakıtlarının talebinin arttırılmasını, enerji

güvenliğinin yükseltilmesini ve enerji birim başına atmosfere bırakılan karbon miktarının düşürülmesini sağlamaktadır. Bununla beraber, biyokütle enerjisinin artan bir biçimde kullanılması tarımsal üretimin devam ettirebilirliğini tehlikeye sokarak gıda rekabetine, tarımsal kirleticiler vasıtasıyla su kirliliğine, doğal yerlerin yok olmasına, arazi piyasasındaki rekabet sebebi ile gıda fiyatlarının artmasına neden olabilmektedir (Aslantaş, 2018).

1.3.1.6 Dalga enerjisi

Dalga enerjisi rüzgâr hareketlilikleri ile temin edildiği için aslında dolaylı olarak bir güneş enerji şeklidir (Ağaçiğer, 2010). Bu anlamda dalga enerjisi, güneş enerjisinin yoğunlaştırılmış bir biçimidir. Güneş, dünya çapında sıcaklık değişiklikleri oluşturmakta bu durum da okyanuslar aşan rüzgârlara sebebiyet vermektedir. Deniz yüzeyindeki rüzgâr dalgalarına aktarılacak dalga enerjisi üretilir. Su dalgaları minimum enerji kaybıyla bin kilometreye kadar mesafelere yayılabilir. Dalga enerjisi, güneş ve rüzgâr enerjisine kıyasla önemli ölçüde daha fazla kuvvet yoğunluğuna sahiptir. Bir dalga hem potansiyel hem de kinetik enerjiye sahiptir. Bir dalganın toplam enerjisi iki faktöre bağlıdır: dalganın süresi ve genliği. Bir dalga kıyı gibi sıkı yerlerle karşılaştığında hızı düşer, bu da dalga boyunun kırılmasına ve azalmasına neden olur. En önemli enerji kayıpları bu gedikler sırasında meydana geliyor ve bunun sadece bir kısmının kıyıya ulaşmasıyla sonuçlanmaktadır (Sağlam ve Uyar, 2005).

Dalgalar, deniz altı depremleri, ay ve güneş yerçekimi, deniz tekneleri ve rüzgâr gibi dış kuvvetlerin ürettiği deniz yüzeyi hareketleri nedeniyle oluşur. Bununla birlikte, rüzgâr ve diğer katkıda bulunan unsurların neden olduğu deniz dalgalarıyla karşılaştırıldığında daha fazla yükseklik sergiler. Bu nedenle enerji üretiminde öncelikli odak noktası rüzgârın ürettiği dalgalardır. Küresel deniz yenilenebilir enerji potansiyeli biyokütle, hidroelektrik ve rüzgâr enerjisini geride bırakıyor (Özdamar vd., 2004). Dalganın yoğunluğu, hareketinin süresine ve büyüklüğünün karesine bağlı olarak dalgalanır. Önemli genliklere ve uzun sürelerle sahip dalgalar, metre başına 40 ila 70 kilowatt saat arasında değişen oranlarda enerji üretir. Bir dalga kıyıya yaklaştıkça deniz tabanı ile etkileşimi sonucu enerji yoğunluğu ortalama olarak azalır. Bu durum kıyıya yakın dalgaların daha fazla enerjiye sahip olduğunu ve kıyı bölgelerinde enerji kullanım verimliliğinin arttığını göstermektedir (Akkaya, 2007).

Enerji dönüştürücüler, dalga enerjisini tutup elektrik enerjisine dönüştürmek amacı ile kullanılmaktadır. Bu gayeyle kıyıdan uzak, kıyıya yakın ve kıyı şeridi noktalarında enerji üretmek için üç farklı teknik uygulama yapılmaktadır. Kıyı şeridi işlemlerinde kıyıya gömülü veya sabit şekilde bulunan enerji üretim yapıları bulunduğu için derin su bağlantılarına ve karmaşık bir yapıya ihtiyaç duyulmamaktadır. Kıyıya yakın bölgelerdeki uygulamalarda 10 ila 25 metre derinliklerden enerji temin edilirken, kıyıdan uzak yerlerde 40 metreden daha derin sulardan

enerji temin edildiğın dolayı bu uygulamada daha karmaşık ve daha uzun bir teknik yapı ihtiyaç duyulmaktadır (Ün, 2013).

Dalgaların yenilenebilir enerji kaynağı olarak kullanılmasının, diğer enerji üretim yöntemlerine nazaran bazı önemli avantajları bulunmaktadır: Yenilenebilir enerji kaynakları içinde en yoğun enerjiye sahip kaynak deniz dalgalarıdır. Yatay düzlem üzerinde güneş enerjisi yoğunluğu tipik bir şekilde 0.1-0.3 kW/m² iken su yüzeyinin altında dalga yayılımının yönüne dik bir şekilde dikey düzlem üzerinde bu oran 2-3 kW/m² güç akış yoğunluğuna dönüşebilir. Dalga güç cihazları güneş ve rüzgâr enerjisi cihazlarının ürettiği %20-30 arasındaki kuvvete kıyasla %90'a kadar güç üretebilir. Diğer yandan dalga enerjisi minimum enerji kaybıyla uzun mesafeler boyunca gidebilmekte ve bu süreç içerisinde çevreye çok az zarar vermektedir. Fakat her ne kadar dalga enerji santralleri, geleneksel enerji santralleriyle karşılaştırıldığında çevreye olan olumsuz etkisi az da olsa büyük ölçekte uygulandığı zaman bazı tehditlerin önünü açabilmektedir. Bu olumsuz etkilerden bazıları; larvaların gelişiminin azalması, organizmaların giriş borularına çarparak ölmelerine sebep olması, deniz ortamında kurulan dalga enerji santrallerinin deniz suyu sıcaklığını değiştirerek organizmaların doğal yaşantısını bozması, zehirli kimyasalların su yüzeyine bırakılması gibi etkilerdir. Bu sebeple yüksek potansiyelli okyanus enerji teknolojileri geliştirilirken, kirlilik, iklim değişiklikleri, aşırı avlanma ve habitat kaybı gibi pek çok tehditle karşı karşıya kalan deniz ortamına zarar gelmemesini sağlamak çok önemli bir yere sahiptir (Uygur vd., 2006).

1.3.2. Yenilenemez Enerji Kaynakları

Fosil yakıtlar, yüksek basınç, sıcaklık, kimyasal reaksiyon ve zaman içinde değişim gösteren karbon temel tabanlı ölü organizma birikintileridir (Ebenhack, 1995). Güneş enerjisinin bir yan ürünü olan yenilenemez enerji kaynakları uzun yıllar boyunca çürüyen hayvan ve bitki kalıntılarının yüksek sıcaklık ve basınca maruz kalıp dönüşmesi ve yoğunlaşması sayesinde enerji sağlayabilmektedir. Birçok ülkede hasla enerji için yoğun bir şekilde fosil yakıtlar olarak isimlendirilen petrol, kömür ve doğalgaz kullanılmaktadır.

1.3.2.1. Kömür

Kömür, esas olarak karbon atomlarından oluşan yanıcı, siyah tortul bir kayadır. Karbonifer Dönemi'nde antik bataklıklarda bitki kalıntılarının birikmesinden kaynaklanmıştır. Bu organik çökeltinin oluşumu, ayrışma sürecini engelleyen düşük oksijen seviyeleri ile karakterize edilen durgun bataklıklarda meydana gelir. Toprağın sıkışması, bataklıkların çökmesi, deniz seviyelerinin yükselmesi, çöp ve kil gibi atık ürünlerin birikmesi nedeniyle organik madde yeraltına gömülür. Yüzyılları kapsayan uzun bir süre boyunca organik madde,

üzerindeki toprağın ağırlığı nedeniyle sıkışarak kömür oluşumuna neden olur. Kömür yatakları şu anda küresel olarak kireçtaşı, kumtaşı ve kil katmanlarının altında gizlenmiş olarak bulunmaktadır. Bu yataklar, yatakların belirli konumu ve derinliğine göre belirlenen, alt bitümlü kömür, linyit, antrasit ve bitümlü kömür gibi birçok biçimde mevcuttur (Pykh ve Pykh, 2002).

Bitki maddelerini kömüre dönüştüren jeopolitik süreç kömürleşme olarak adlandırılmaktadır. Bu süreç içinde ortaya çıkan karbon miktarı %90'dan fazla ise antrasit, %80 ile %90 arasında ise bitümlü kömür, %80 ise alt bitümlü kömür, %75 ise linyit, %70 ise de turba oluşmaktadır. Kömür yataklarının jeolojik özellikleri ve kalitesi kömür rezervre açısından önemli parametrelerdir. Bu sebeple doğalgaz ve petrolden daha çok heterojen bir enerji türü olan kömürün kalitesi bölgeden bölgeye değişiklikler göstermektedir (Pykh ve Pykh, 2002). Kalitesinde farklar olmasına rağmen kömür, 50'yi aşkın ülkede üretilmesi, iki yüz yıldan fazla kullanım ömrü ve fiyat dalgalanmalarından çok az etkilenmesi sebebiyle enerji kaynakları arasında büyük bir önem arz etmektedir. 19. Yüzyılın başlarından beri kömür rezervlerine sahip olan ve bunu enerji temininde etkili bir biçimde kullanan birçok ülke günümüzde gelişmiş ülkeler olarak gruplandırılmaktadır. Kömür; elektriks santrallerinde, demir-çelik sanayisinde ve çimento üretiminde ağırlıklı olarak kullanılmaktadır.

Elektrik üretiminin önde gelen kaynaklarından olan kömür 21. Yüzyılın ilk yarısında ekonomik krizden çıkış bileti olarak görülmüştür. Fakat kömür üretimi birçok negatif çevresel, ekonomik ve sosyal etki oluşturabilmektedir (Yılmaz ve Uslu, 2007). Esasında kömürün çıkarılması fazla maliyetli olabilir. Nitekim kömür yataklarının bir çoğu, yeraltının derinliklerinde bulunmaktadır. Kömür yeryüzüne çıkarıldığında ise demiryolu ya da gemiler ile taşınması gerekmektedir. Bu yüksek maliyetlerin göze alınması gerekmektedir. İkinci olarak da; iyi işlenmiş kömür tozu veya doğalgazın birikmesi ile patlama olabilmektedir. Bu sebeple böyle durumlar kömür madenciliği endüstrisinin maliyetine (madenciler için sigorta, maden güvenliği ihtiyacı, tıbbi masraflar gibi) yansımaktadırlar (Pykh ve Pykh, 2002). Bununla beraber odun ve kömür gibi katı yakıtların yakılması ile yapısında yer alan yüksek hidrojen ve karbon oranı sebebiyle atmosferdeki karbon miktarını arttırmakta, bu durumda çevre kirliliği, asit yağmurları ve küresel iklim farklılıkları gibi çevresel maliyetlere sebebiyet vermektedir (Ebenhack, 1995).

1.3.2.2. Petrol

Petrol sözcüğü, Latince 'de taş demek olan “Petra” ve yağ demek olan “Oleum” kelimelerinin birleşimi ile oluşmaktadır. Kaya yağı demek olan petrol tortul kayalardan meydana gelmektedir. Oksijen, sülfür ve nitrojen bileşimlerini içeriğinde bulunduran be çok

karmaşık bir yapıya sahip olan petrolün oluşmasıyla alakalı birçok farklı teori olsa da uzun yıllar önceki hayvan ve bitki kalıntılarının denizin dibinde yer alan çökeller ve kum ile karışarak çürümesi ve belirli basınç ve sıcaklıkla beraber ayrışmasından meydana geldiği genel anlamda kabul edilmektedir (Bayraç, 1999). Kimyasal bileşimine göre petrolün yoğunluğu değişmektedir. Motorin, benzin ve gazyağı hafif petrolün rafinajından elde edilmektedir. Oil, fueloil ve asfalt gibi ağır ürünler ise ağır petrolün rafinajından elde edilmektedir. Doğada petrol katı, sıvı, gaz formlarında bulunmaktadır. İşlem görmemiş petrole ham petrol, gaz formundaki petrole doğalgaz, katı veya yarı katı formda bulunan ve ağır hidrokarbonları içeriğinde bulunduran petrole de kullanım yolları ve yapılarına göre zift, katran ve asfalt gibi adlar verilmektedir (Petrol İşleri Genel Müdürlüğü, 2017). 19. yüzyılın ikinci yarısı itibariyle petrol doğalgaz ile beraber giderek artan bir öneme sahip olmuştur. Petrol pek çok alanda mutlak enerji kaynağı olmasının yanında dizel ve benzinli yağlardan türlü kimyasal ve petrokimyasal ürünlere kadar birçok insan yapımı sentetik materyaller, materyaller, eczacılık ürünleri ve plastik ürünler için ana girdi şeklinde kullanılmaktadır (Olah, 2005). Bazı temel özellikler petrol endüstrisinin işleyişini karakterize etmektedir:

- Kullanım maliyetine dikkat edilmesi gerekmektedir. Çünkü işleyişi doğal olan bir kaynağın sömürülmesine dayanmaktadır.
- Çok sektörlü ve küresel bir endüstridir. Ham petrolün rafine edilmesi ile yakıt gibi pek çok ürünün oluşması çok sektörlülüğünü, dünya enerji tüketiminde büyük bir payının olması da küreselliğidir.
- Her biri farklı kişinin kontrolünde ve farklı yerlerde olan türlü faaliyetlerden (üretim, arama, rafinaj, ulaşım ve dağılım) meydana gelen bir endüstridir.
- Sermayesi yoğun bir endüstridir ve bu sebeple yüksek giriş engellerine sahip sektör, önemli ölçüde sermaye harcamaları yapabilecek finansal gruplarla sınırlıdır.
- Arama çalışmalarından dolayı oldukça yüksek risk sahibi olan bir endüstridir.
- Ham petrolün heterojen olmasıyla beraber hem mekan hem de zaman da değişebilen bir üretim maliyeti olması sebebiyle belirgin değişiklikleri sahip olan bir endüstridir.
- Üç önemli aktör olan, petrol ithal eden ülkeler, petrol ihraç eden ülkeler ve çok uluslu firmaları birleştiren bir sektördür.

Petrol endüstrisi devamlı bir devinim durumunda olan dinamik bir piyasa olduğu için sosyokültürel, siyasi ve teknolojik dengeler altında devamlı olarak değişiklik göstermektedir. Bu özelliği sayesinde petrol piyasasındaki gelişimlere yalnızca deyimlere dayalı tedbir almak mümkün değildir (Ürün, 2003).

1973’de İsrail-Arap savaşının etkisiyle ortaya çıkan ilk petrol krizi ve Petrol İhraç Eden Ülkeler Birliği (OPEC) altındaki ülkelerin üretimi azaltmalarıyla birlikte ortaya çıkan fiyat yükselmelerinin sebep olduğu 1979’de çıkan ikinci petrol krizi buna verilebilecek en belirgin örneklerdir. Birçok gelişmiş ülkenin petrole bağımlı olması sebebi ile, petrol fiyatlarındaki yükselişler makroekonomik değişkenler üstünde çok yönlü etkileri olmaktadır. Petrol fiyatlarında meydana gelen yükselişler ya üretim maliyetleri ve fiyatlandırma nedeni ile ya da toplam arz ve toplam talepte oluşturduğu etkiler nedeniyle ekonomiler üstünde büyük bir paya sahiptir.

1.3.2.3. Nükleer enerji

Nükleer enerjinin fosil yakıtlar gibi yenilenemez enerji kaynakları arasında değerlendirilmesinin sebebi, üretiminin doğada çok az bulunan uranyum ile doğrudan bağlı olmasıdır. Fakat fosil yakıtların kısa dönemde tükenme senaryoları göz önünde bulundurulduğu zaman ise fosil yakıtlara alternatif olarak yenilenebilir enerji kaynaklarının yanı sıra nükleer enerjide dikkat çekmektedir.

Genellikle atom enerjisi olarak bilinen nükleer enerji, hayvan ve bitki kalıntılarının güneş ışığı altında dönüşümünden ziyade, atom çekirdeklerinin birleşimini veya parçalanmasını içeren kimyasal reaksiyonlardan elde edilmesi nedeniyle fosil yakıtlardan farklıdır. Bu şekilde ortaya çıkan enerji, ya "filyon" adı verilen nötron bombardımanı sonucu büyük atom çekirdeklerinin bozunmasıyla, ya da "füzyon" adı verilen iki veya daha fazla atom çekirdeğinin birleşerek ortaya çıkan oluşumuyla üretilir. Yeni bir atom çekirdeğinin getirme tekniğı ile elde edilir (Hubbert, 1956; Üçgöl ve Elibüyöl, 2016).

Nükleer enerji alanı son elli yılda hem politika oluşturma hem de kamuoyu algısı açısından önemli bir dönüşüm yaşadı. İlk atom bombası 1945'te üretildi ve atom bölünmesiyle açığa çıkan enerjiden elektrik üretimi 1950'lerde başladı. Nükleer enerji, küresel enerji taleplerini karşılayabilecek tükenmez bir enerji kaynağı olarak kabul edilmektedir. Nükleer enerjinin temiz ve yüksek talep gören yapısına rağmen yapımı uzmanlık birikimini gerektirmektedir. Ancak nükleer reaktörlerin ürettiğı aşırı radyoaktivite, nükleer silah geliştirme potansiyeli nedeniyle güvenlik endişelerini artırıyor. Referans, Bodansky'nin 2004'te yayınlanan 18. sayfasındaki çalışmasından alınmıştır. Bu endişelerin temel nedeni, 1986'da Çernobil ve Three Mile Island nükleer enerji tesislerinde görülen felaketlere benzer bir nükleer felaketin meydana gelme potansiyelidir. çevre açısından telafisi mümkün olmayan olumsuz sonuçlara yol açmaktadır. 1980'li ve 1990'lı yıllarda meydana gelen bu felaketlerin yarattığı aksaklıklara ve ardından nükleer santrallerin güvenliğini artırmak için tüm ülkeler tarafından alınan önlemlere rağmen, bu tesisler enerji üretiminin ana kaynağı olmaya devam ediyor.

Nükleer enerji, en başta silah endüstrisi olmak üzere tıpta, elektrik üretiminde ve sanayide yaygın olarak kullanılmaktadır. Nükleer enerjinin yüksek yatırım maliyetleri, üretim safhasında bakım ve işletme giderleri, planlama döneminin uzunluğu, üretimin durdurulmasından sonra nükleer santralin sökülmesi ve radyoaktif atıkların depolanmasındaki maliyetlerin yüksekliği gibi birçok dezavantajı vardır. Diğer taraftan yakıt fiyatlarındaki dalgalanmalardan etkilenmemesi, işletme ömürlerinin uzun olması, enerji kalitelerinin ve potansiyel rezervlerinin yüksek olması ayrıca pek çok enerji kaynağına göre çok daha az kirletici etkileri olması taraflarıyla da birçok avantajlı yönü bulunmaktadır (Temurçin ve Aliagaoglu, 2003).

1.3.2.4. Doğalgaz

Doğal gaz, diğer fosil yakıtlar gibi, bitki ve hayvanlarda bulunan organik maddelerin zamanla parçalanmasıyla üretilir. Organik artıkların üzerindeki toprak ve çamur zamanla taşlaşma sürecine girerek katı kayaya dönüşüyor. Kaya, bir bariyer görevi görerek çöplerin kaçmasını ve toprağın altına gömülmesini önler. Belirli basınç ve sıcaklık koşulları altında, bu organik birikimlerin bir kısmı dönüşüme uğrayarak petrol, kömür veya doğal gaz oluşumuyla sonuçlanır.

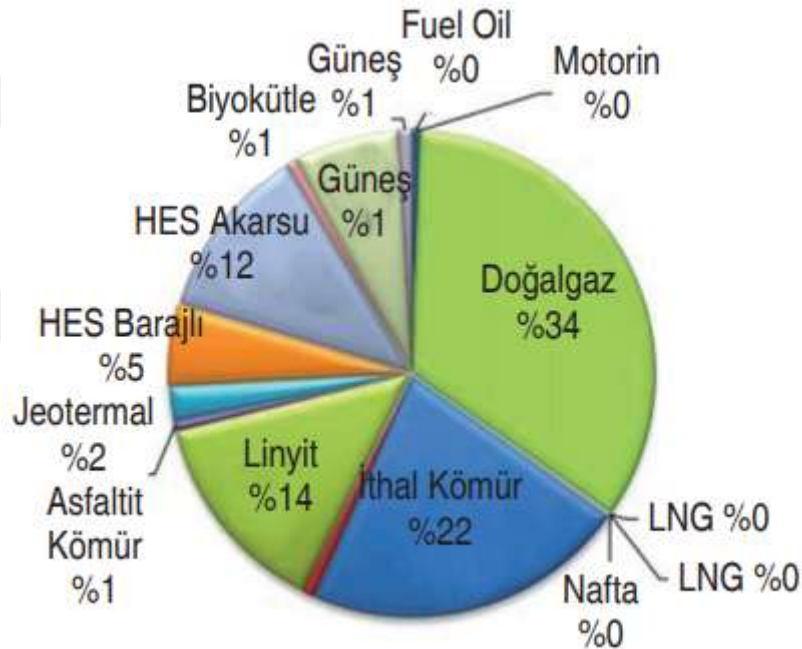
Organik şekilde olan kalıntıların hangi şekilde fosil yakıtlara dönüşeceği oluşan kayanın değişimin ortaya çıktığı yerin şartlarına ve özelliğine göre değişiklik göstermektedir (Speight, 2007). Doğalgaz hidrokarbon ve hidrokarbon olmayan farklı birçok bileşimden meydana gelmektedir. İçerisinde büyük oranda metan ve düşük oranlarda propan, butan, etan, bütan gibi gazlar ve ağır hidrokarbonlar vardır. En yaygın kullanım alanı yakıt sektörü olan doğalgaz, tatsız, renksiz, şekilsiz, kokusuz ve havadan daha hafiftir.

Doğal gazın çıkarılması süreci dört ayrı aşamadan oluşur: arama, sondaj, tamamlama ve üretim. Bu faaliyetlerin yarattığı doğal gaz rezervlerinde son dönemdeki artışa rağmen, karada bulunan, tüketicilere yakın ve kolay üretilebilen rezervlerin yanı sıra deniz yataklarından çıkarılması zor olan rezervlerin oranı da giderek artıyor. Bu kaynakların çıkarılması, gaz fiyatını aşabilecek nakliye ve üretim masrafları nedeniyle sektöre uğramaktadır (Mokhatab ve Poe, 2012). Fosil yakıtlar arasında doğal gaz, uygulama alanı bakımından en yüksek düzeyde çok yönlülüğe sahiptir. Bu madde doğrudan ısı ve güç üretmek için kullanılabilir gibi, taşıma amacıyla dizel yakıtı da dönüştürülebilir. Alternatif olarak, plastik ve gübre gibi diğer değerli maddeleri elde etmek için kimyasal işlemlere de tabi tutulabilir. Ayrıca bu operasyonların diğer fosil yakıtlara göre daha düşük emisyonla, çok rekabetçi maliyet ortamında ve önemli miktarlarda tedarik edilerek gerçekleştirilmesine olanak sağlıyor (Chandra, 2006). Doğal gaz hem nihai ürün olarak konut tüketiminde hem de endüstriyel

işlemlerde aracı olarak yaygın şekilde kullanılmaktadır. Bu mantık nedeniyle, doğal gazın hem sosyal hem de ekonomik bağlamda diğer birçok enerji kaynağının yerine geçebilecek bir alternatif olduğu yaygın olarak kabul edilmektedir. Doğal gaz oligopol özellikleri gösterir. Fosil yakıtların dengesiz dağılımı nedeniyle doğal gaz yatakları seçilmiş birkaç ülkede yoğunlaşmıştır. Doğal gaz yataklarına sahip ülkeler, elverişli jeopolitik konumları nedeniyle doğal gaz piyasasında rekabet avantajına sahiptir. Doğal gaz piyasasındaki bu rekabet gücünü etkileyen faktörlerin başında, doğal gaz sektörünü doğrudan etkileyen hava koşulları ve doğal gazın ikamesi olabilecek petrol fiyatlarındaki artışlar gelmektedir (Brown ve Yücel, 2008).

1.4. DÜNYADA VE TÜRKİYE’DE ENERJİ GÖRÜNÜMÜ

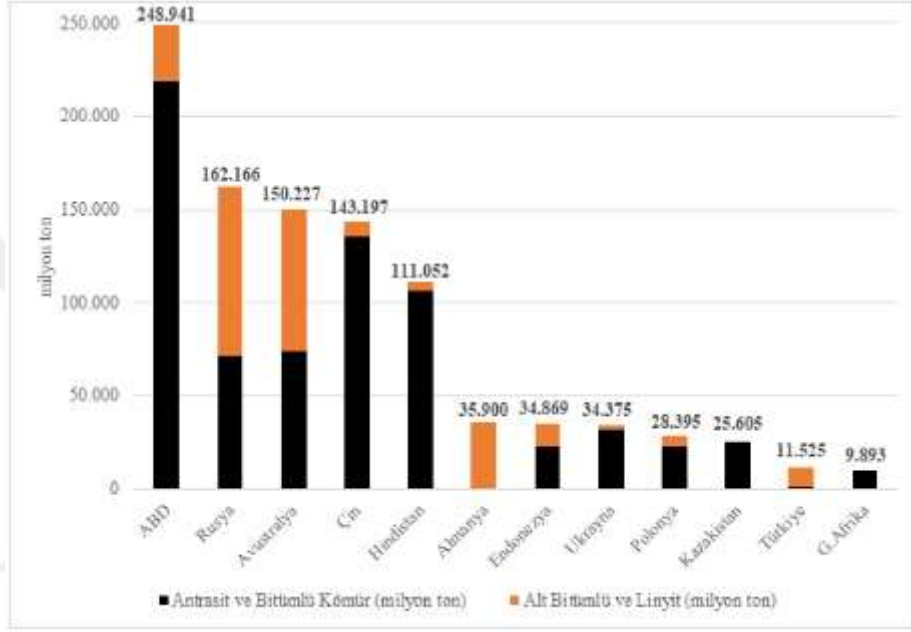
1.4.1. Yenilenemez Enerjinin Dünyada ve Türkiye’deki Görünümü



Şekil 1: Türkiye 2018 Yılı Ocak Ayı İtibariyle Elektrik Enerjisi Üretiminin Kaynaklar Bazında Dağılımı (Türkiye Elektrik İletim A.Ş., 2018)

Yenilenemez enerji kaynakları başlıca; doğalgaz, kömür ve petrol fosil kaynaklar ve çekirdek kaynaklı olarak da nükleerdir. (Yağlı, vd., 2016). Fosil yakıt kaynakları rezervleri gün geçtikçe azalma ve bununla beraber özellikle de doğalgaz ve petrol kaynakları kritik seviyelere düşmektedir. 2017 yılından itibaren dünya çapında yenilenemeyen enerji kaynaklarının rezerv ve kalan yıllık kullanım durumları Şekil 2 de gösterilmiştir. Petrol ve kömür milyar ton, doğalgaz ise trilyon metreküp biriminden gösterilmektedir. Dünya kömür rezervleri yıllık üretim bakımından 114 yıl boyu tüketimi karşılayacak olmakta ve diğer fosil kaynaklı yakıtlar arasında en fazla rezerv üretimine sahip olmaktadır. 2022 yılı verilerine göre dünya “antrasit

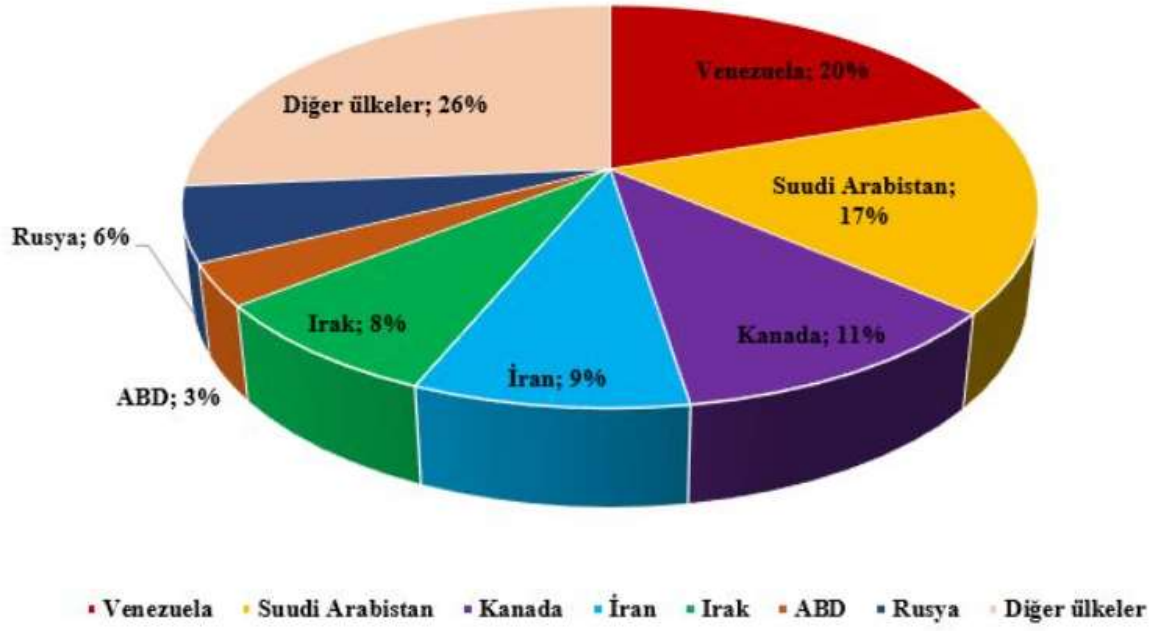
ve bitümlü kömür rezervleri”nin en büyük dilimi %29,1’lik pay ile (218,94 milyar ton) ABD’de bulunmaktadır. ABD’yi sırası ile %17,9 payla Çin (135,07 milyar ton), %14,1 ile Hindistan (105,98 milyar ton), %9,8 ile Avusturalya (73,72 milyar ton) ve %9,5 pay ile Rusya (71,72 milyar ton) izlemektedir. Dünyada “alt bitümlü kömür ce linyit rezervleri”nin de en büyük dilimi %28,2 (90,45 milyar ton) pay ile Rusya’ya aittir. Rusya’nın hemen arkasından %23,9’la (76,51 milyar ton) Avusturalya takip etmektedir. Avustralya’dan sonra sırası ile %11,2’yle (35,90 milyar ton) Almanya, %9,4 (30,00 milyar ton) ile ABD, %3,7 (11,73 milyar ton) ile Endonezya ve %3,4 (10,98 milyar ton) ile Türkiye yer almaktadır.



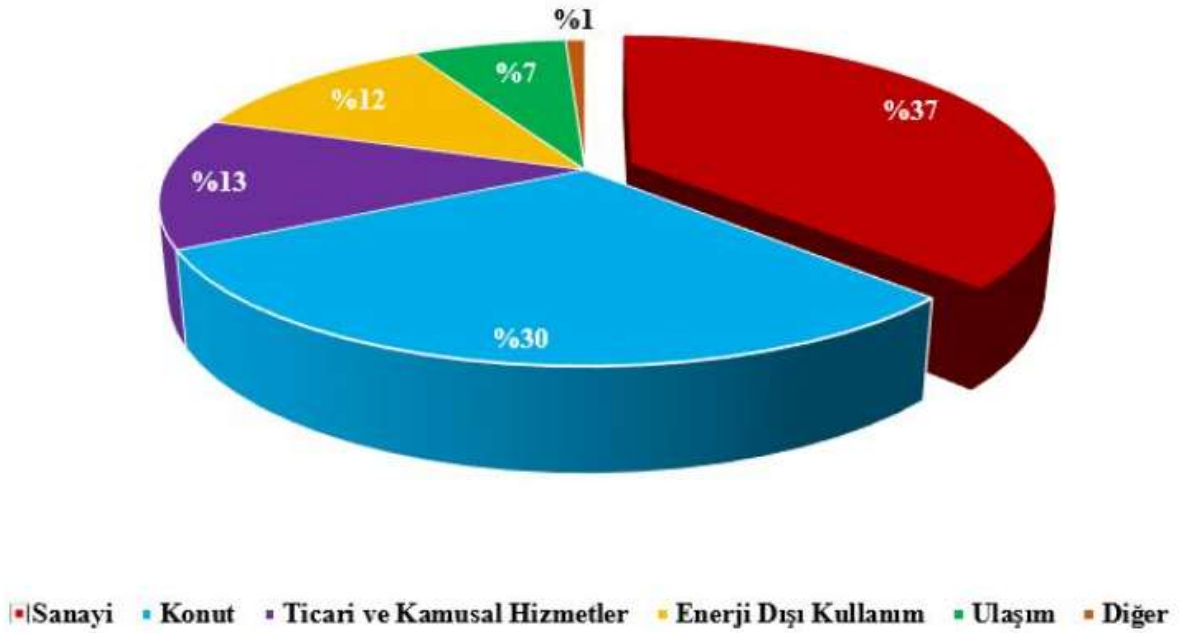
Şekil 2: Dünya Kömür Rezervlerinde Ülkelerin Payları (T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, 2023)

2021 yılı itibarıyla dünya çapında toplam ham petrol rezervi 244,4 milyar ton olmaktadır. Burada %20’lik bir pay ile Venezuela ham petrol rezervlerinin dağılımında en büyük paya sahip olan ülke olmaktadır. Aynı yılın üretim verilerine göre, dünya çapındaki en fazla ham petrol üreticisi, dünya üretiminin %17’sini karşılayarak ABD olmaktadır.

2022 yılında Türkiye’de 3,58 milyon ton petrol üretimi yapılmasına rağmen 33,49 milyon ton da ham petrol ithalatı yapılmıştır. Bu verilere dayanarak Türkiye’nin %90 oranında ham petrol ithalatına bağımlı olduğunu söylemek mümkündür. Türkiye’nin 2022 yılı itibarıyla üretilebilir rezervi yaklaşık olarak 70 milyon tondur. Türkiye’de 2022 yılında 421,408 metre sondaj yapılmış ve 191 adet ham petrol kuyusu açılmıştır.

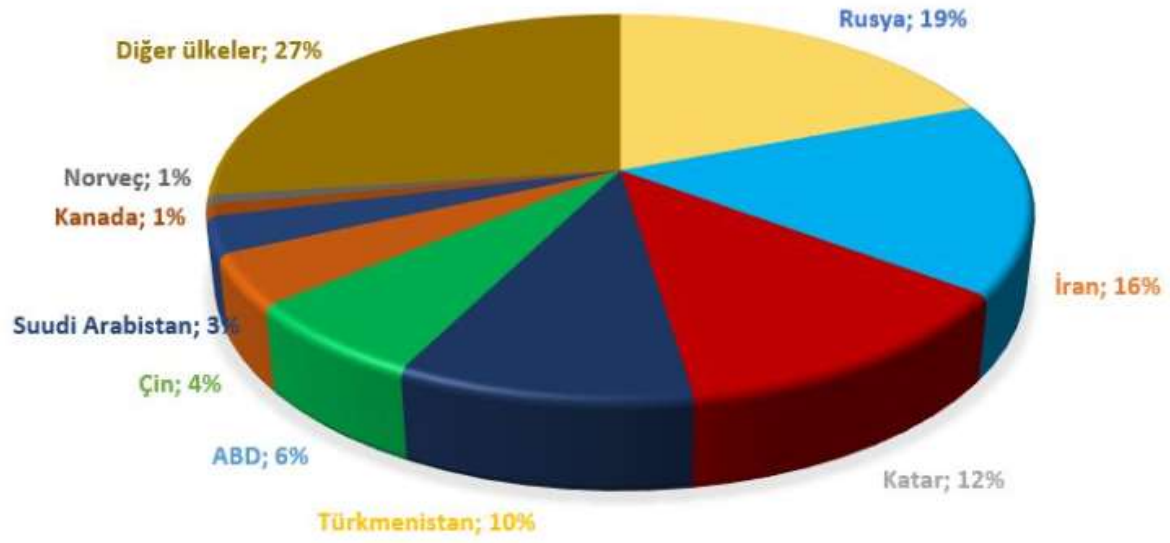


Şekil 3: Ükelere Göre Ham Petrol Rezervleri (T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, 2023)



Şekil 4: Doğal Gazın Dünya Genelindeki Kullanım Alanları (T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, 2023)

2021 yılı verilerine göre, küresel olarak doğal gaz rezervleri yaklaşık olarak 188,1 trilyon m³ olmaktadır. Dünya doğal gaz rezervleri sıralamasında ilk sırada %19'luk bir pay ile Rusya yer almaktadır. 2021 yılı verilerine göre dünyanın en büyük doğal gaz üreticisi ABD olmakta ve dünya üretiminin %23'ünü karşılamaktadır.



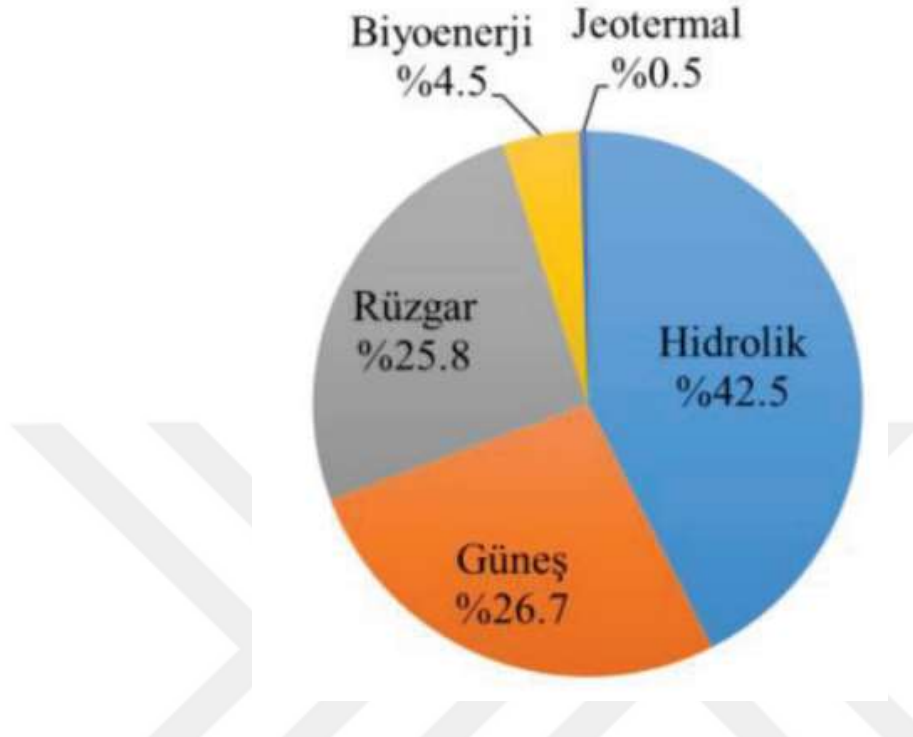
Şekil 5: Ülkelere Göre Doğalgaz Rezervleri (T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, 2023)

2022 yılında Türkiye’de 408 milyon m³ doğal gaz üretimi yapılmasına rağmen 54,6 milyar m³ doğal gaz ithal edilmiştir. Bu veriler doğrultusunda Türkiye’nin %99 oranında doğal gaz ithalatına bağımlı olduğu söylenebilmektedir. Türkiye’nin üretilebilir rezervi 2022 yılı itibarıyla 544 milyar m³ civarındadır. Karadeniz bölgesinde keşfedilen Sakarya sahasının geliştirilmesi ile beraber doğal gaz rezervlerinin daha da artması beklenmektedir.

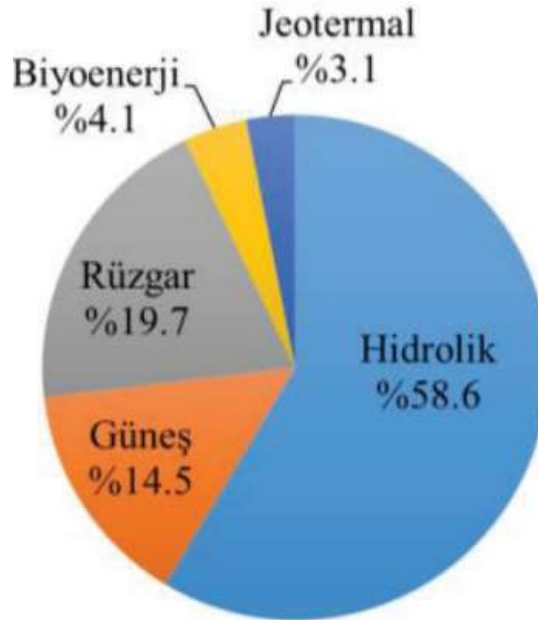
1.4.2. Yenilenebilir Enerjinin Dünyada ve Türkiye’deki Görünümü

Dünyada yenilenebilir enerji türleri başlıca; güneş, rüzgâr, hidrojen, hidrolik, jeotermal, biokütle ve dalga olarak sayılabilmektedir. Dünya elektrik üretiminde yenilenebilir enerji kullanımı kendi doğal yöntemleri ile tükenmeyen enerji üretebilmesi ve doğaya zarar vermemesi açısından önemli bir yere sahip olmaktadır. Fosil yakıtlı enerji kaynaklarının çok hızlı bir şekilde tükenmesi ve çevreye verdikleri zarar sebebiyle dünyada ve Türkiye’de yenilenebilir enerji kaynaklarına verilen önem gitgide artmaktadır. Türkiye coğrafi konumu sebebi ile büyük bir güneş enerjisi potansiyeline sahiptir. Aynı şekilde Türkiye’nin yer şekilleri özellikleri sebebiyle önemli bir hidrolik ve rüzgâr enerji potansiyeline sahiptir. Bunun yanı sıra jeotermal enerji bakımından dünya potansiyelinin %8’ini meydana getirmektedir (Yılmaz, 2012). Yaygın bir şekilde kullanılan yenilenebilir enerji kaynaklarının 2021 yılına ait dünyada ve Türkiye’deki Kurulu güç dağılımı Şekil 6 ve 7’de verilmektedir. Dünya ve Türkiye’de en yüksek kurulu güç hidrolik enerjiye ait olmaktadır. Dünyada yenilenebilir enerjiye dayanan kurulu gücün %42,5’ini, Türkiye’de ise %58,6’sını hidrolik enerji oluşturmaktadır. Türkiye’nin hidrolik enerjiden sonra kurulu güçleri sırası ile (%19,7) rüzgâr, (%14,5) güneş, (%4,1)

biyoenerji ve (%3,1) jeotermal enerji olarak sıralanmaktadır. Dünya'nın ise hidrolik enerjiden sonra en büyük kurulu güçleri sırası ile (%26,7) güneş, (25,8) rüzgâr, (%4,5) biyoenerji ve son olarak da (%0,5) jeotermal enerji yer almaktadır (T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, 2022; Ritchie vd., 2022; Renewable Energy Statistics, 2022).

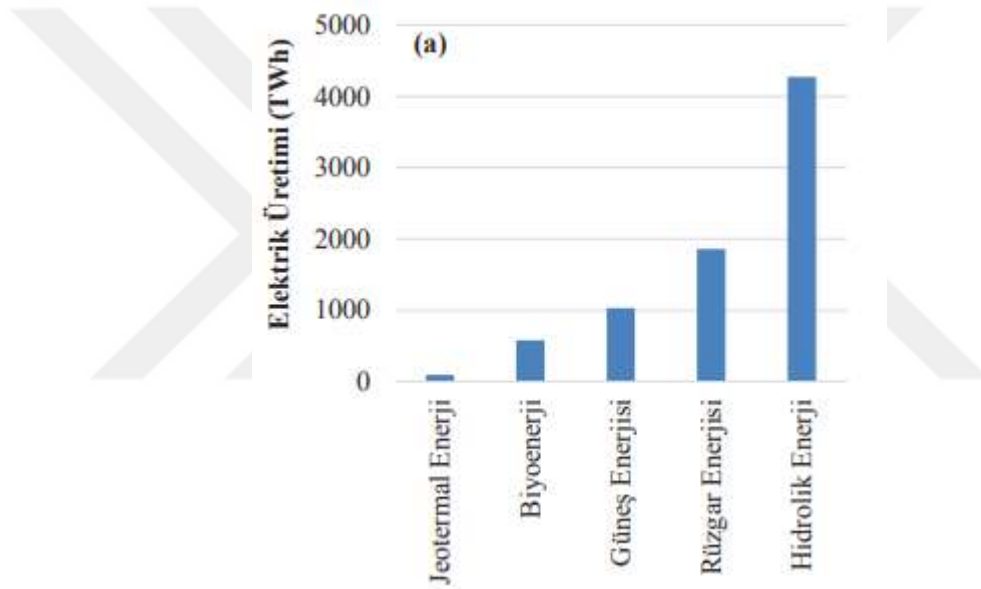


Şekil 6: Dünyada Yenilenebilir Enerjiye Dayalı Kurulu Güç Dağılımı (T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, 2022; Ritchie vd., 2022; Renewable Energy Statistics, 2022).



Şekil 7: Türkiye’de Yenilenebilir Enerjiye Dayalı Kurulu Güç Dağılımı (T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, 2022; Ritchie vd., 2022; Renewable Energy Statistics, 2022).

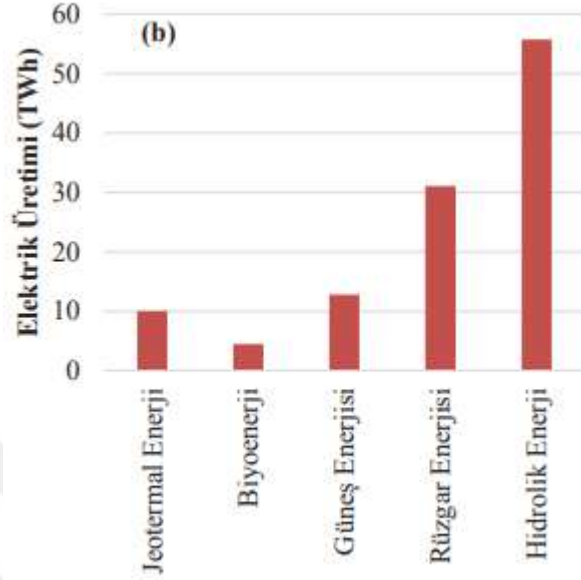
Son on yıl içerisinde dünyada yenilenebilir enerji kaynaklarından temin edilen elektrik enerji üretimi genel hali ile artış göstermektedir. Türkiye’de ise güneş, biyoenerji, jeotermal ve rüzgâr enerjisinden üretilen elektrik enerjisi geçen her yıl artarken, hidrolik enerjiden üretilen elektrik enerjisi kuraklığa ve bu sebeple de su seviyesine bağlı bir şekilde büyük değişkenlik göstermektedir. 2021’de Türkiye’de ve dünyada yenilenebilir enerji kaynaklarından üretilen elektrik enerjisi dereceleri Şekil 8 ve 9’da gösterilmektedir. Türkiye’de ve dünyada yenilenebilir enerji kaynakları içerisinde en fazla elektrik enerjisi üretimini hidrolik enerji üstlenmiştir. Bu anlamda dünyada yenilenebilir enerji kaynaklarından elde edilen en fazla elektrik enerjisi üretimi sırası ile hidrolik, rüzgâr, güneş, biyoenerji ve jeotermal enerjiden sağlanmıştır. Türkiye’de de sırası ile hidrolik, rüzgâr, güneş, jeotermal ve son olarak da ile biyoenerji gelmektedir (Renewable Energy Statistics, 2022).



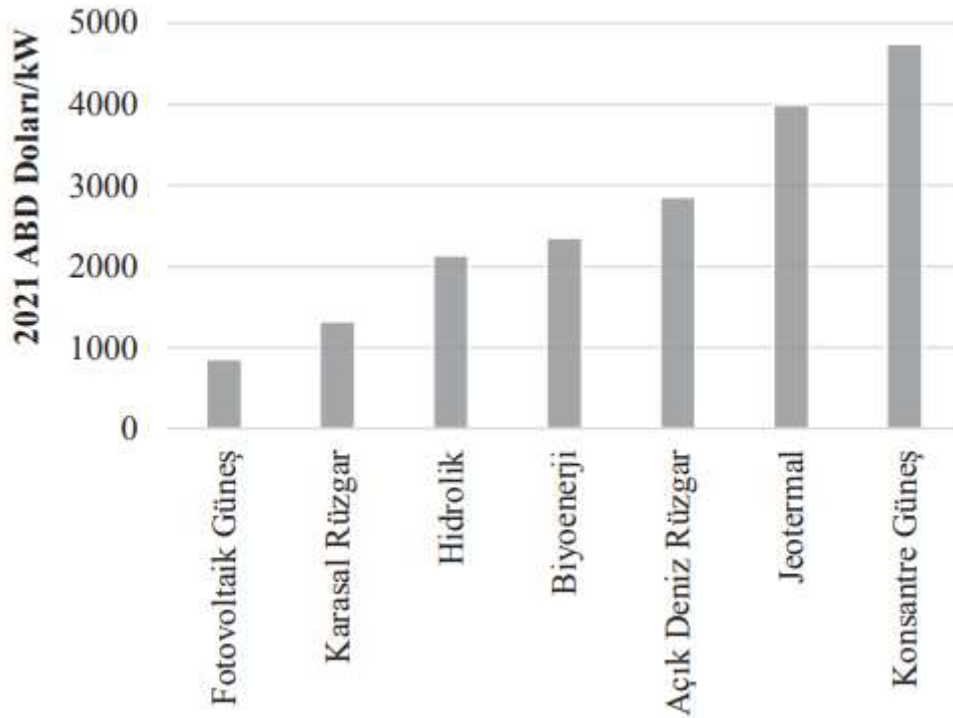
Şekil 8: Dünyada Yenilenebilir Enerji Kaynaklarından Üretilen Elektrik Enerjisi (T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, 2022; Ritchie vd., 2022; Renewable Energy Statistics, 2022)

2021 yılındaki yenilenebilir enerji kaynaklarına ait yoğunluklu ortalama toplam kurulum maliyetleri Şekil 10’da gösterilmektedir. Şekilde ABD Doları, 2021 yılındaki doların değerini belirtmektedir. 2010 ve 2021 yılları arasında yoğunlaştırılmış güneş, açık deniz rüzgâr enerjisi, fotovoltaik güneş ve karasal rüzgâr enerjisi için “küresel ağırlıklı toplam kurulum maliyetleri” de trend genellikle azalış yönünde olmaktadır. Yine aynı zaman aralığında hidrolik enerji için kurulum maliyetleri genel haliyle artış göstermektedir. Bununla birlikte, biyoenerji adına kurulum maliyetleri büyük bir değişkenlik göstermemektedir ve 2010 yılı ile karşılaştırıldığı zaman kurulum maliyetleri 2021’de düşüş göstermektedir. 2012 yılından itibaren jeotermal enerji santrallerinin kurulum maliyetlerinde çok fazla değişim gözlenmemektedir. 2010 yılı ile karşılaştırıldığında kurulum maliyeti artmaktadır. Bu anlamda

2021’de yenilenebilir enerjiye ait en yüksek ağırlıktaki toplam kurulum maliyetleri sırası ile yoğunlaştırılmış güneş, jeotermal, açık deniz rüzgâr, biyoenerji, hidrolik, karasal rüzgâr, fotovoltaik güneş enerjisinde görülmektedir (Renewable Power Generation Costs in 2021, 2022).



Şekil 9: Türkiye’de Yenilenebilir Enerji Kaynaklarından Üretilen Elektrik (T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, 2022; Ritchie vd., 2022; Renewable Energy Statistics, 2022).



Şekil 10: 2021’de Yenilenebilir Enerji Kurulum Maliyetleri (Renewable Power Generation Costs in 2021, 2022)

İKİNCİ BÖLÜM

2. YÖNTEM

2.1. KOMBİNE ÇEVİRİM KAVRAMI

Karışık çevrim sırasında, gaz türbininin yanma odaları doğal gaz ve hava karışımını yakar. Dışarı atıldığında genişleyen ve yanan gaz, türbin kanatlarına kuvvetli bir şekilde çarparak onların dönüşünü başlatır. Sonuç olarak gaz türbininin kinetik enerjisi, türbin miline bağlı jeneratörün uyarılmasıyla elektrik enerjisine dönüştürülür. Daha sonra 500-550 C sıcaklık aralığında atık gaz enerjisine dönüştürülerek gaz türbininin egzozundan dışarı atılır. Kazan borularındaki su buhara dönüşür ve buhar daha sonra buhar türbinine yönlendirilerek türbinin dönmesi sağlanır. Sonuç olarak buhar türbininde üretilen enerji, türbin miline bağlı jeneratörün devreye girmesiyle elektrik enerjisine de dönüştürülür. Kombine çevrim enerji santralleri, olağanüstü verimlilik elde etme yeteneklerinden dolayı günümüzde oldukça değerlidir. Tipik olarak karma çevrim ifadesi, buhar çevrimi ile gaz türbini çevriminin tamamlayıcı bir şekilde birlikte çalıştıkları bir sisteme uyumunu ifade eder. Bu çerçevede kombine çevrim sistemlerinin ana bileşenleri atık ısı kazanı, buhar türbini ve gaz türbininden oluşmaktadır. Kombine çevrimin çalışma mekanizması kısaca şu şekilde özetlenebilir: Atmosferdeki hava bir sistem kullanılarak filtrelendirilir. Hava filtrelendikten sonra gaz türbininin kompresör kısmına girer. Bu alanda hava sıkıştırılarak yanma odasına gönderilir. Yanma odasında basınçlı hava yakıtla karışarak yanar. Bu konumda üretilen yüksek basınçlı, ısıtılmış gazlar, gaz türbini kanatlarından akar. Yayılan bu gazların dönme hareketi türbini çalıştırır ve türbin de ilgili jeneratör aracılığıyla elektrik enerjisi üretir.

Yüksek sıcaklıktaki atık gazlar gaz türbininden çıkarak egzoz kanalı vasıtasıyla atık ısı kazanına taşınır. Egzoz gazları, termal enerjilerini su/buhar çevrimine aktararak soğumaya uğrar ve ardından kazan bacası aracılığıyla atmosfere atılır. Atık ısı kazanları tipik olarak ısı değişimi için üç ayrı bölümden oluşur. Su/buhar döngüsü sırasında, su/yoğuşma suyu ilk olarak kazanın ekonomizör bölümüne girer ve doyma sıcaklığının biraz altına ulaşana kadar sıcaklığını yükseltir. Daha sonra sıvı faz değişimine uğrar ve buharlaştırıcı bölümünde buhara dönüşür. Tamamen doymuş olan bu buhar daha sonra kızdırıcı bölümünde tekrar ısıtılır ve daha sonra kızdırılmış buhar olarak buhar türbinine verilir. Burada tek basınçlı kazan/buhar türbini grubu için su/buhar çevrimi basit bir şekilde açıklanmaktadır. Bununla birlikte, kazan/buhar türbini gruplarının, yeniden ısıtılmalı veya ısıtmasız, iki veya üç basınç kademesinden oluşması durumunda, ekonomizör, evaporatör ve kızdırıcı bölümleri, her basınç seviyesi için kazan içerisinde ayrı ayrı konumlandırılır. Ayrıca su/buhar çevriminde bu basınç seviyelerine göre

farklı çevrimler üretilir. Atık su kazanında üretilen buhar, türbine beslenir ve burada birçok aşamada genişlemeye uğrar. Ancak termal enerji mekanik enerjiye dönüşür. Türbin devreye girdiğinde ona bağlı olan jeneratör enerji üretir. Buhar türbininden çıkan düşük sıcaklık ve basınçlı buhar, kondensere yönlendirilir ve burada soğutma sistemi aracılığıyla yoğunlaşarak sıvı suya dönüşür. Daha sonra, yoğunlaşma pompalarında bulunan yoğunlaşmamış gazların giderilmesi amacıyla yoğunlaşma suyu hava gidericiye/besleme tankına taşınır. Besleme suyu pompaları, suyu besleme suyu deposundan atık ısı kazanına geri taşır. Su/buhar kapalı çevrimi, kondenserin buhar türbini ile kazan arasındaki çevrime dâhil edilmesini içerir.

2.2. KOMBİNE ÇEVİRİMİN AVANTAJLARI

Fosil yakıtlı santraller arasında en yüksek verime sahip olması kombine çevrimin en büyük avantajıdır. Bu günlerde, 200 MW'tan yüksek güçlere haiz gaz türbinlerine dayalı olarak yeniden kızdırmalı ve üç basınç kademeli kombine çevrimlerde net olarak %55 verime ulaşılmaktadır. Yüksek verimin yanı sıra kombine çevrim santrallerinin daha pek çok avantajlı yönü vardır. Bunlar arasında kombine çevrimlerin pek çok farklı alanda hizmet verebilecek esneklikte olması yer alır. Kombine çevrim santrallerinde sadece elektrik üretimi yapılabilir.

Bunun yanında ister buhar türbininden ister kazandan alınacak ara buharın proste veya bölgesel ısıtmada kullanılması ile, yaklaşık %85-90 arasındaki bir ısı verimliliği ile bir araya gelerek ısı-güç sistemi olarak da hizmet verebilmektedir. Kombine çevrimlerde ham petrolden fueloil ve motorin, doğalgazın her türüne kadar tüm likit yakıtlarla gazlaştırma yolu ile kömür bile olmakla beraber çok geniş bir yakıt kullanım olanağına sahiptir. Ayrıyeten istenildiği zaman gaz türbin brülörleri iki yakıt yakabilecek biçimde dizayn edilebilmektedir. Örneğin bazı kombine çevrim santrallerinde doğalgazın yanı sıra ihtiyaca göre akaryakıt da kullanılmaktadır. Kombine çevrim santrallerinde soğutma suyu ihtiyacı diğer konvansiyonel santrallere göre daha düşüktür. Bununla birlikte, kombine çevrimlerde buhar türbinleri toplam elektrik üretiminin yalnızca %33'ünü oluşturmaktadır.

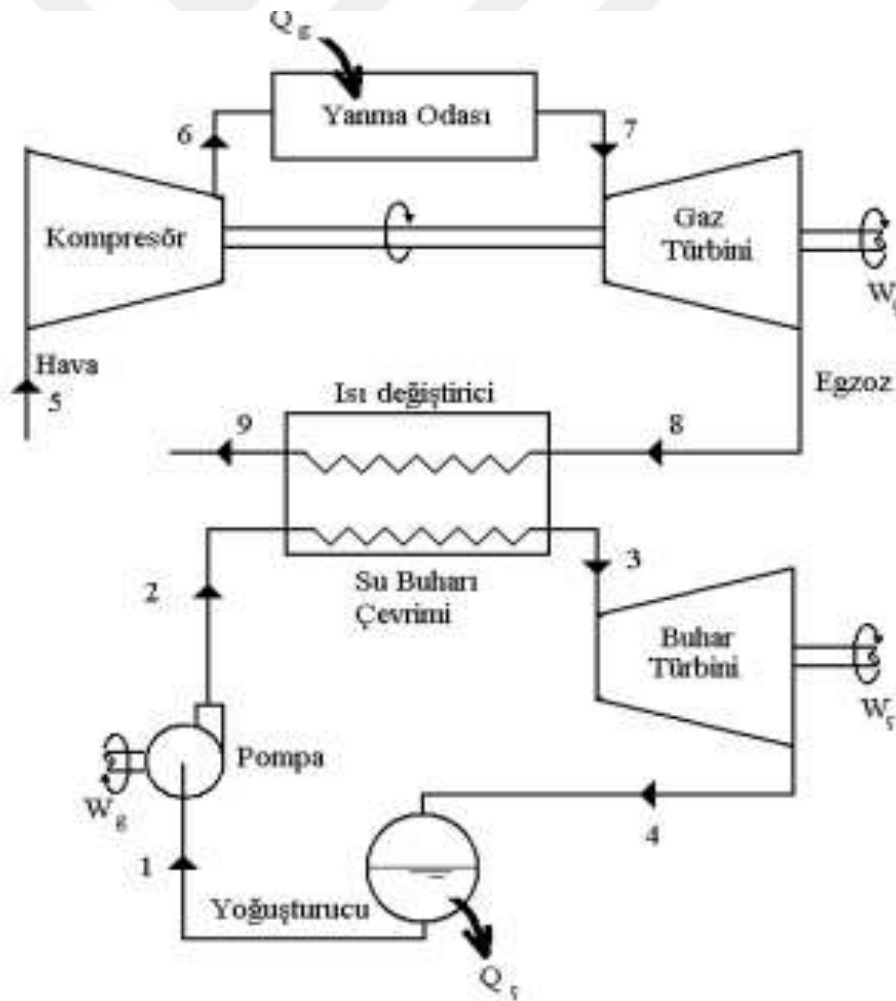
Sonuç olarak, soğutma suyuyla ilgili birçok sorun önemli ölçüde azaltılarak sistem masraflarının ve çevreye ısı salınımının azalması sağlanır. Kombine çevrim santralleri maliyet etkinliği nedeniyle tercih edilmektedir. Kazan/buhar türbini birim yatırım maliyetinin düşük olması nedeniyle diğer seçeneklere göre daha ekonomiktir. Konuya çevre açısından bakıldığında kombine çevrim enerji santrallerinin bir diğer önemli faydası da ortaya çıkıyor. Son zamanlarda çevreye verilen önemde önemli bir artış olmuş ve bunun sonucunda tehlikeli madde emisyonlarının izin verilen seviyelerinde büyük bir azalma sağlanmıştır. Sonuç olarak, artık kombine çevrim teknolojilerine olan ihtiyaç giderek artıyor. Burada önemli olan, yüksek verimle çalışan kombine çevrim santrallerinin, diğer termik santrallere göre üretilen birim

elektrik enerjisi başına %40-45 daha az CO₂ salımı yapmasıdır. Ancak özellikle doğalgaz kombine çevrim santrallerinde katı madde emisyonu oluşmamakta ve NO_x emisyonları kabul edilebilir eşik değerlerin oldukça altındadır. Bunların yanı sıra entegre santrallerin şu şekilde ifade edilebilecek başka avantajlı özellikleri de bulunmaktadır:

- Konvansiyonel termik santrallere göre modüler yapısı daha kolay ve tesis süreci daha az olan kombine çevrim santrallerinin işletmesi daha basittir. Bu sebeple işletmenin personel ihtiyacı daha az olmaktadır.
- Santralin tümü için gereken alan konvansiyonel termik santrallerden daha azdır.

2.3. GÜÇ ÜRETİMİNDE KULLANILAN KOMBİNE ÇEVİRİMLİ SANTRALLER

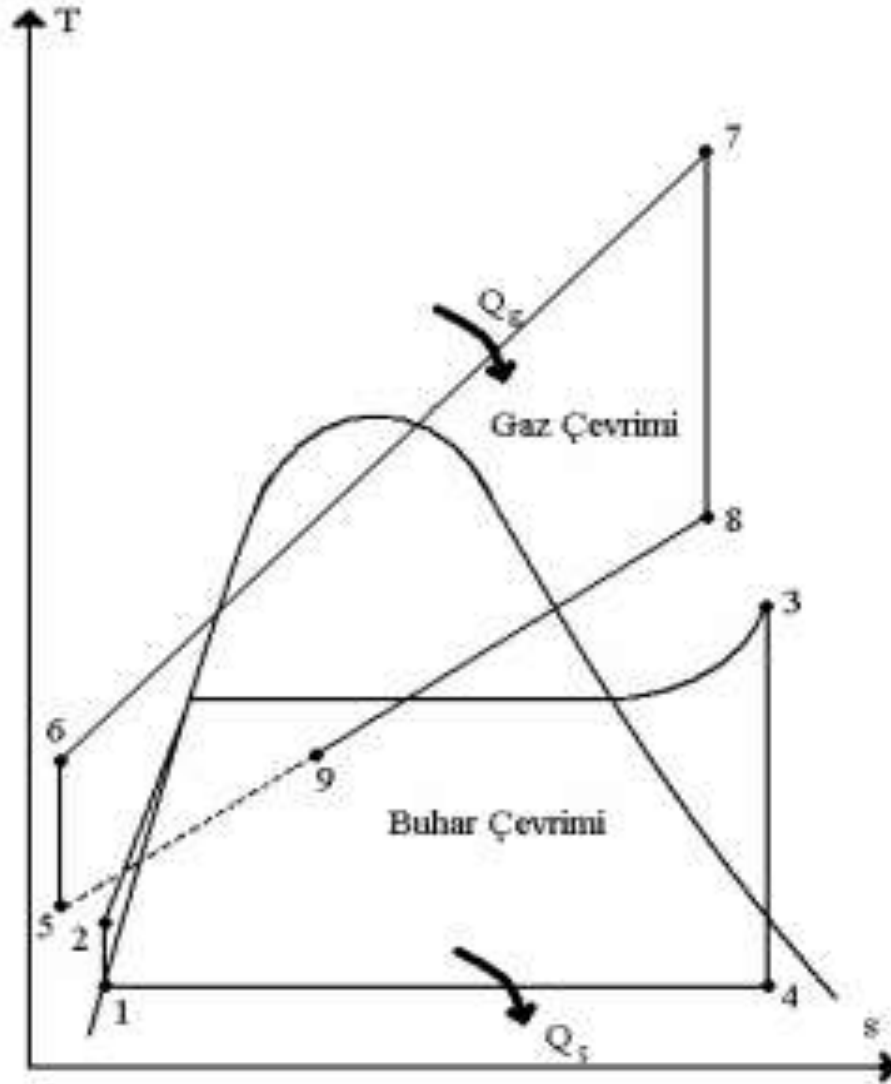
Çağımızda en uygun güç üretim sistemlerinin arayışı, yeni araştırmaların ve yenilikçi teknolojilerin ortaya çıkmasına yol açmıştır. Bu hedefe ulaşmak için sistem, her bir enerji üretim bileşeninin faydalarını kombine bir çevrimde kullanır, aynı zamanda ulaşılabilir en verimli seviyeye ulaşmak için dezavantajlarını en aza indirir.



Şekil 11: Kombine Çevrimin Şematik Gösterimi

"Kombine çevrim" terimi, bir sistem içindeki buhar türbini çevrimi ile gaz türbini çevriminin koordineli çalışmasını ifade eder. Bu özel bağlamda kombine çevrim sistemlerinin temel bileşenleri bir buhar türbini, bir gaz türbini ve bir atık ısı kazanından oluşur. Buhar türbinlerini ve gaz türbinlerini bütünleşme yöntemleri üç temel sınıfa ayrılabilir. Bu sistemler, tam yanmanın olduğu, daha fazla yanmanın olmadığı ve paralel güç ünitelerinin bulunduğu karma çevrimli sistemler olarak adlandırılmaktadır. Bu birleşim her birinde elde edilen kombine çevrim verimliliği, bağımsız bir gaz türbini çevriminin veya yeniden ısıtılmış bir kazan/türbin çevriminin verimini aşmaktadır.

Kombine çevrimler genellikle elektrik üretimi için kullanılsa da, istenirse çevrimden ara buharın çıkarılması ve santralin kombine ısı ve güç olarak çalıştırılması da mümkündür. Bu özelliğin dâhil edilmesiyle birleşik çevrimler, ısı-güç üretimine yönelik en verimli çağdaş yaklaşım olarak oluşturulmuştur.



Şekil 12: Kombine Çevrim İçin T-s Diyagramı

Genel olarak "kombine çevrim" terimi hem buhar türbininin hem de gaz türbininin tek bir çevrimde kullanılmasını ifade eder. Esas olarak, bir veya daha fazla gaz türbininin ürettiği fazla ısı, ekstra enerji üretmek amacıyla sıkıştırılarak yanma odasına gönderilir. Yakıt, hava ile birleştiği ve yanmaya uğradığı yanma odasına enjekte edilir. Yanmayı takiben sıcaklığı 1000 °C'yi aşan yüksek basınçlı gaz türbinin dönmesini sağlar. Bu dönüş, bağlı jeneratör aracılığıyla elektrik enerjisi üretir. Atık ısı kazanı, sıcaklığı 500 ila 600 santigrat derece arasında değişen egzoz gazını almak için gaz türbinine bağlanır. Kazanda yüksek sıcaklık ve basınçta buhar üretilir. Buhar türbini, bağlı jeneratör aracılığıyla elektrik enerjisi üretmek için buharı kullanır (Wunsch, 1980).

2.4. KOMBİNE ÇEVİRİM SANTRAL TÜRLERİ

Tam yakmalı kombine çevrim, ilave yanmasız kombine çevrim ve paralel-güç üniteli kombine çevrim bu üç uygulama biçiminden birisinin seçilmesi tamamıyla yakıtın mevcut olması ile zaten var olan bir santralin daha iyi bir hale getirilmesi ya da yeni bir santralin kurulması halinde yapılacak planlamalara bağlıdır.

2.4.1. İlave Yanmasız Kombine Çevrimler

İlave yanma olmadan çalışan bir yanma türbinli enerji santralinde, yanma işlemi yalnızca gaz türbini ile sınırlandırılır ve ortaya çıkan egzoz gazı, atık ısı kazanına yönlendirilir. Basit konveksiyon tarzı ısı eşanjörlerine sahip atık ısı kazanlarında buhar, yakıtın herhangi bir ek yanmasına gerek kalmadan yalnızca gaz türbininden çıkan egzoz gazlarının yüksek sıcaklığından yararlanılarak üretilir. Çoğu zaman gaz türbinlerine eşit miktarda olan atık ısı kazanları, buhar kapasitesine bağlı olarak bir veya daha fazla buhar türbinine bağlanır. Bu kombine çevrim enerji santrallerinde, buhar çevrimi ya "iki basınç kademeli/yeniden ısıtmasız" ya da "üç basınç kademeli/yeniden ısıtmasız" yapılandırma. Temel yeniden ısıtmalı buhar çevrimleri olmasına rağmen, iki basınç kademeli kombine çevrimler mükemmel termal verimlilik sergiler.

2.4.1.1. Buhar türbinlerine gaz türbinleri ilavesi ile güç ve verim artırımı

Bu sistem, mevcut atık ısı kazanlarının, santraldeki buhar türbininin orijinal veya güncellenmiş buhar parametrelerine uyum sağlayabilecek yenileri ile değiştirilmesini içermektedir. Ayrıca atık ısı kazanlarının yerine eşit sayıda gaz türbini sisteme dâhil edilmiştir. Bu rotasyon özellikle uygundur çünkü buhar türbinlerinin çalışma ömrü kömür yakıtlı kazanların ömrünü aşmaktadır. Bu nedenle, santralin verimliliğinin %37-38'den yaklaşık %50

gibi etkileyici bir seviyeye çıkarılmasının yanı sıra, gaz türbini/buhar türbini kapasitesi de dikkate alınarak santralin toplam kapasitesi de iki ila üç kat artırılmıştır.

2.4.1.2. Gaz türbinlerinde buhar türbini ilavesi ile güç ve verim artırımı

Buhar türbini ve atık ısı kazanının bir araya getirilmesiyle basit çevrimde çalışan mevcut gaz türbini ünitelerinin kombine çevrim enerji santraline dönüştürülmesi mümkündür. Bu senaryoda, gaz türbininin egzozundan çıkan ısıнын tamamının atık ısı kazanında kullanılması nedeniyle en yüksek verim elde edilmektedir. Ancak santralin yakıt tüketiminde herhangi bir artış olmaksızın minimum %50 oranında bir artış yaşanacaktır.

2.4.2. Tam Yanmalı Kombine Çevrim

Bu santraller, 1960'ların ortasından 1970'lerin sonlarına kadar olan dönemde çoğunlukla Orta Avrupa'daki elektrik üretim tesislerinde kullanılmıştır. Günümüz koşullarına göre daha düşük giriş ve çıkış sıcaklıklarında çalışan gaz türbinlerinden oluşan ünitelerin verimliliğinin artırılması amaçlanmıştır. Tam yanmalı kombine çevrimlerde, gaz türbini egzozu, cebri çekişli fanlar kullanılarak atmosferik hava ile birleştirilir. Bu karışım daha sonra buhar kazanlarında birincil yakıtın (çoğunlukla kömür) yakılması için gereken yanma havasını önceden ısıtmak için kullanılır. Bu teknik tam yanmanın sağlanmasını sağlar. Hem atmosferik hava girişinde hem de gaz türbini egzozunda mevcut olan oksijenin çoğunluğunun birincil yakıtın yakılmasında kullanılması nedeniyle, bacadan oksijenin yalnızca %3-5'i kadar küçük bir kısmı açığa çıkar. Bu nedenle NO_x yoğunlaşma daha düşük bir seviyeye düşürülür. Ayrıca, herhangi bir geleneksel buhar kazanı türbin sistemini, gaz türbini ünitelerinin eklenmesiyle tam yanmalı kombine çevrim enerji santraline dönüştürmek mümkündür. Kazanlarda gaz türbini egzozundan ve ilave fanlardan gelen havanın kullanımını kolaylaştırmak için mevcut ünitenin cebri çekişli fanlarının ve ön ısıtıcılarının ortadan kaldırılması zorunludur.

2.4.3. Paralel Güç Üniteli Kombine Çevrim

Paralel-güç üniteli kombine çevrim santrallerinde buhar türbinleri iki ayrı ve otonom güç kaynağından beslenir. Tipik olarak birincil kaynak geleneksel bir buhar kazanı, ikincil kaynak ise gaz türbinine bağlı bir atık ısı kazanıdır. Paralel güç ünitesi kombine çevrimi, tamamlayıcı yakıt çevriminin tam yanma çevrimi ile birleşimi olarak görülebilir. Bu sistemdeki atık ısı kazanı egzoz gazını gaz türbininden alır. Diğer buhar kazanlarında yakıtın yanmasına yardımcı olma amacına hizmet etmez. Sistemin en büyük avantajı hem çalışma hem de yakıt açısından sağlam uyarlanabilirliğinde yatmaktadır. Buhar türbinlerinin ve gaz türbinlerinin kapasitesinin yanı sıra sıvı veya gaz yakıtların katı yakıtlara oranı serbestçe seçilebilir. Ayrıca kömürle çalışan kazanların baca gazı emisyonlarının izin verilen standartlara indirilmesi için

arıtma tesislerinin kurulması gerekebilmektedir. Mevcut buhar türbini ünitelerini paralel güçlü kombine çevrim enerji santrallerine dönüştürmek için iki farklı teknoloji kullanılabilir. İlk yaklaşım, sisteme bir atık ısı tankı ve bir gaz türbininin dâhil edilmesini içerir. Bu ilaveden elde edilen buhar, mevcut kazanın ürettiği buharla birleştirilerek buhar türbininin maksimum verimde çalışması sağlanır. Tipik olarak buhar kazanları, buhar türbinlerine kıyasla daha kısa bir ömre sahiptir. Ancak zamanla kazanların daha düşük kapasitede çalışması gerekse bile bu sistem yine de uygulanabilmektedir. İkinci yaklaşım, atık ısı kazanının ve gaz türbinlerinin yalnızca mevcut sistemdeki yoğunlaşma suyunu ve/veya besleme suyunu ısıtmak amacıyla kullanılmasını içerir. Böylece santralin verimliliği ve çıkış gücü artırılmaktadır.

2.5. DOĞAL GAZ KOMBİNE ÇEVİRİM SANTRALI ANA BİLEŞENLERİ

Doğal gaz kombine çevrim santrallerinin ana bileşenleri gaz türbini, buhar türbini, jeneratör, kondenser, transformatör, atık ısı kazanı ve soğutma kulesinden oluşmaktadır. Gaz türbinleri jeneratörler için başlatma mekanizması görevi görür. Devreye alma süresi ve kurulum masrafları minimum düzeydedir. Kendilerine fayda sağladığı için sisteme bir an önce uyum sağlamaları gerekiyor. Gaz türbinleri üç temel bileşenden oluşur: kompresör, türbin ve yanma odası. Kompresör, havanın hacmini azaltırken aynı zamanda basıncı da artıran bir yapılandırmaya sahiptir. Yanma odası, püskürtülen yakıt ile kompresörün sağladığı havanın birleştirilip ateşlendiği bölmedir. Türbin, enerjiyi basınç ve sıcaklıktan mekanik enerjiye dönüştüren aerodinamik bir yapıdır. (Bayrakçı, 2019). Atık ısı kazanı, gaz türbinlerinin uçlarındaki egzoz gazlarından gelen termal enerjiyi, sağlanan suyla birleştirildiğinde buhar üretmek için kullanan bir cihazdır. Atık ısı kazanlarının çok sayıda çeşidi mevcuttur. Çerçevesinin bileşimi buharlaştırıcı, ekonomizör ve kızdırıcı gibi dâhili bileşenlerden oluşur. Ekonomizer, atık su kazanının buhar üretmek için su alan ilk bileşenidir. Evaporatör, ekonomizerden giren suyun buhar ve sıvı suya ayrıldığı yerdir. Kızdırıcı, buharın sıcaklığının daha yüksek seviyelere yükseltilmesinden sorumludur.

Buhar türbini, kazanlarda meydana gelen basınç ve sıcaklığın önce kinetik, daha sonra da mekanik enerjiye dönüştürülmesini yapan bölümdür. Kondenserler ve soğutma kuleleri ise sistem geri kazanımını sağlamak adına buhar ve su karışımını tekrardan su formuna getirir ve santralde kullanılması için sunar. Diğer ekipman sınıfından vanalar, pompalar ve borular ise santral genelinde mevcut olan elemanlardır (Gümüş, 2019).

Jeneratörler yüksek hızlarda çalışan önemli elektrik bileşenleridir. Soğutmaları çok önemlidir ve çok sayıda çeşidi vardır. Genel olarak orta gerilim seviyesinde elektrik enerjisi üretirler. Transformatörler, jeneratör tarafından üretilen elektrik enerjisinin gerilim kategorisine dönüştürülerek kullanılmak üzere şebekeye iletilmesinde kullanılan cihazlardır. Şalt, doğal gaz

kombine çevrim santrallerinde üretilen elektriğin şebekeye iletilmeden önce gerekli gereksinimleri karşılayacak şekilde hazırlandığı belirlenmiş alandır. Paneller iki tipe ayrılır: orta gerilim panelleri ve alçak gerilim panelleri. Bu paneller orta ve alçak gerilim sistemlerinin düzenlenmesi ve denetlenmesi amacına hizmet etmektedir. Ekipmanın yardımcı hizmet kategorisine ait transformatörler, alçak gerilimle ilgili yükleri düzenlemek için kullanılır. Doğalgaz kombine çevrim santrallerinde meydana gelebilecek aksaklıklara anında müdahale edebilmek için acil durum sistemleri kullanılmaktadır. Ayrıca montaj elemanları, kablolar ve kablo tavlama doğalgaz kombine çevrim santrallerinin her aşamasında kullanılan temel ekipmanlardır.

2.6. DOĞALGAZ KOMBİNE ÇEVİRİM SANTRALLERİNİN ÇALIŞMA PRENSİBİ

Doğal gaz kombine çevrim santralının her bir üretim bloğu 2 adet kompresör, 2 adet atık ısı kazanı, 2 adet gaz türbini, 2 adet gaz türbini jeneratörü, 2 adet kondenser ünitesi, 1 adet buhar türbini ve 1 adet buhar türbini jeneratöründen oluşmaktadır. Santralde kuru tip veya deniz suyu soğutmalı ıslak tip soğutma kuleleri, su arıtma tesisi, şalt tesisi, kontrol ve kumanda sistemleri bulunmaktadır. Doğal gaz kombine çevrim santrallerindeki üretim blokları otonom olarak çalışmaktadır. Ancak bazı kurumlarda bloklar toplu olarak kullanılmaktadır. Kombine çevrim santrallerinde elektrik üretimi iki farklı süreçle gerçekleşmektedir. Bu santrallerin temel amacı, atık ısı gazlarından faydalanarak buhardan yararlanarak elektrik üretmek ve verimliliği artırmaktır. Kombine çevrim enerji santralleri, elektrik enerjisi üretmek için hem buhardan hem de atık ısıdan faydalanmaları açısından geleneksel gaz santrallerinden farklılık göstermektedir. Gaz santralleri çok düşük doğal verime sahiptir. Ancak kombine çevrim teknolojisi kullanıldığında verimlilikleri önemli ölçüde artmakta ve ülke ekonomisine önemli bir katkı sağlanmaktadır.

Doğal gaz kombine çevrim santrallerinde elektrik üretimi iki aşamalı bir süreçle gerçekleşmektedir. Yaklaşımın operasyonel prosedürü şu şekilde açıklanabilir: Gaz türbinlerinin kompresörleri, filtrelendikten sonra atmosferik havayı doğrudan alır. Hava, kompresör yardımıyla 15,5-16,5 bar basınç aralığına kadar sıkıştırıldıktan sonra 470-490 C sıcaklıktaki yanma odasına iletilir. Bu odada hava ve doğal gaz karışımı birleşerek yanma işlemine tabi tutulur. Yakıt, gaz türbinlerinde yakılır ve bu türbin, türbinle aynı shafta bağlı bir jeneratörü çalıştırarak başlangıç aşamasında elektrik üretimi sağlar. Eş zamanlı olarak yanma prosesi, sıcaklığı 1000 ile 1250 °C arasında değişen gazlar üretir. Türbinlerde genişleyen buharın varlığı, termal enerjinin mekanik enerjiye dönüştüğünün kanıtıdır. Jeneratörler türbine bağlandıktan sonra elektrik üretimini başlatarak sistemin kesintisiz ve sorunsuz bir şekilde çalışmasını sağlar. Türbinlerden tahliye edilen buharın sıcaklığı düştü ve bu da basıncın

düşmesine neden oldu. Bu nedenle buhar yoğunlaşmaya uğrar. Ancak sıvı haldeki bu buhar, yoğunlaşamayan gazlar içerir. Bu gazların ayrıştırılması için su temin tankları pompalar kullanılarak taşınmaktadır. Tam bir su döngüsü oluşturmak için su, atık ısı kazanına yönlendirilir. Su, kondenserler ile türbinler arasından bu şekilde geçer. Türbinler doğal gaz kombine çevrim santrallerinin en önemli bileşenidir. Bu olgunun temel nedeni buhar veya gaz türbinlerinin kullanılması yoluyla enerji üretilmesidir. Türbinler devre dışı bırakıldığında ilgili ünite veya blok devre dışı kaldığı için sistem durdurulur. Bununla birlikte, bazı çevrim santralleri, gaz türbinlerinden gelen sıcak gazın bir by-pass bacası aracılığıyla doğrudan atmosfere salınmasına olanak tanıyan by-pass hatları ile donatılmıştır. Bu özellik, ısı kazanlarında veya buhar türbinlerinde herhangi bir arıza olması durumunda, yalnızca gaz türbinleri aracılığıyla elektrik üretimine devam edilmesini sağlar. Ayrıca bu sistemler, enerji santralindeki diğer sistemlerle karşılaştırıldığında daha yüksek seviyede yapısal karmaşıklık sergilemektedir.

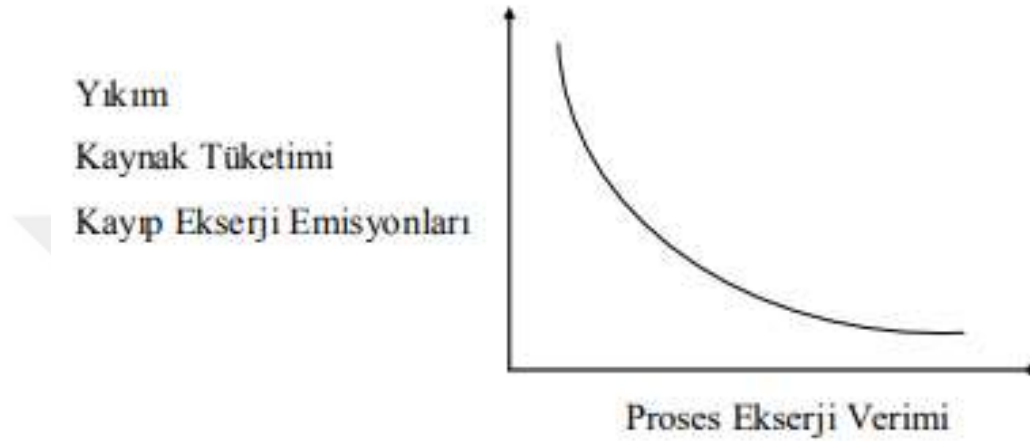
Doğal gaz kombine çevrim santrallerinde kesintisiz elektrik üretiminin sağlanmasında önemli bir faktör, türbinlerin çalışma sürelerine göre (örn. 8000 saat-minor, 16000 saat-minor, 24000 saat-minor vb.) düzenli bakımlarının yapılmasıdır. Santralin geçici olarak kapatıldığı planlı santral bakım periyotlarının programlanması, buhar ve gaz türbinlerinin kümülatif çalışma saatleri baz alınarak hesaplanmaktadır. Santraldeki diğer sistemlerin revizyon bakımları türbinin bu durumda olmasına bağlıdır. Elektrik santrali yalnızca genellikle 30 ile 60 gün arasında süren planlı inceleme dönemleri sırasında kesintisiz olarak devre dışı bırakılır. Sonuç olarak, enerji santralinin çeşitli sistemlerindeki ekipmanların bakımını bu planlı inceleme süreleri sırasında gerçekleştirmek, dünya çapında enerji santrali operatörleri tarafından takip edilen bir uygulamadır. Ayrıca atık ısı kazanı, tamamı türbin ekipmanına bağlı olan ölçüm bazlı ve elektrikli ekipmanların önemli bir kısmı ile birbirine bağlıdır. Bu durumda santralin periyodik ve revizyon bakımları türbinlere bağlıdır (Özcan ve Eren, 2013).

2.7. EKSERJİ KAVRAMI

Ekserji, ortam sıcaklığında çalışan enerji sistemleri bağlamında "kullanılabilir enerji" veya enerjinin gerçekten yararlı olan kısmı olarak kavramsallaştırılabilir. Kullanılabilir enerji bileşeni, enerjinin başka bir enerji türüne dönüştürülebilen kısmını ifade eder. Ekserji, bir madde veya enerji akışından elde edilebilecek potansiyel işin ölçüsüdür. Bu bağlamda soğutma suyu, baca gazı ve ısı kaybı şeklinde çevreye salınır. Ekserji yıkımı ve ekserji kaybı, "termodinamiğin ikinci yasa analizi" olarak da bilinen Ekserji Analizinin uygulanmasıyla ölçülür. Termodinamiğin ikinci yasası, bir enerji taşıyıcısının termodinamik değerini doğru bir şekilde belirleyerek, sistem veya süreçlerden kaynaklanan kayıpları ölçerek ve gerçek

termodinamik eksikliği değerlendirerek bir enerji dengesi kurar. Ekserji yok oluşu sistem içindeki tersinmezliğin bir sonucu olarak ortaya çıkar.

Dünyada birincil enerji kaynaklarının sınırlı olması ve hızla azalmakta olması, bu sebeple de enerji maliyetlerinin hızlı bir şekilde artması nedeniyle, termik sistemlerdeki enerji kayıplarının belirlenmesi için ekserji analizleri önemli bir noktadadır. Ekserji kayıplarının düşmesi, yani ekserji veriminin yükselmesi durumunda proseste gerçekleşen yıkım, kayıp ekserji emisyonları ve kaynak tüketimi ters orantılı bir şekilde azalacaktır.



Şekil 13: Ekserji Verimiyle Yıkımın, Kaynak Tüketimiyle Kayıp Ekserji Emisyonu İlişkisi (Rosen ve Dinçer, 1997)

Ekserjinin boyutları

- Ekserji, çevre ve sistemin oluşturduğu birleşik çevrimden elde edilebilecek maksimum potansiyel işi ifade eder. Sistem, başlangıç durumundan çevreyle denge durumu olarak bilinen son duruma geçiş yapar. Sistem tamamen hareketsiz durumdayken enerjiye sahiptir ancak ekserjisi yoktur.
- Ekserji sistemin tüm durumları için daima negatif değildir.
- Kullanıcının metni bir madde işareti sembolünden oluşur. Sistem durumuna bağlı olan ekserji kapsamlı bir özellik olarak kabul edilir. Tartışmaya geçmeden önce söz konusu ortamı tanımlamak gerekir. Ekserji, mol veya kütle cinsinden ifade edilir ve bu da onu ölçülebilir bir kalite haline getirir.
- Ekserji, bir sistemin durumu ile çevresinin durumu arasındaki farkı ölçen bir ölçümdür. Belirli bir durum ile ortamın sıcaklığı (X_0) arasındaki sıcaklık farkı ($X - X_0$) arttığında ekserji değeri orantılı olarak artar.
- Ekserji büyüklüğü, sistemin çevreye göre belirlenen hem potansiyel hem de kinetik enerji değerlerini kapsar.

- Ekserji, termo-mekanik ve kimyasal bileşenlerin birleştirilmesiyle ölçülür. Termo-mekanik ekserji potansiyel, kinetik ve fiziksel ekserji olarak sınıflandırılır.
- Ekserji, sistemler arasında çift yönlü aktarım yeteneğine sahiptir ve sistem içindeki geri dönüşümsüzlük sonucu tükenebilmektedir. Ayrıca ekserji, bir ekserji dengesi kullanılarak ölçülebilir.

Ekserji, manyetik, nükleer, yüzey gerilme ve elektriksel etkilerinin olmaması halinde; kinetik, kimyasal, fiziksel ve potansiyel ekserji bileşenlerinden meydana gelmektedir.

$$ex = ex^{ch} + ex^k + ex^p + ex^{ph} \quad (2.1)$$

Denklemden ex^{ch} kimyasal ekserji, ex^k kinetik ekserji, ex^p potansiyel ekserji ve ex^{ph} fiziksel ekserji terimleridir.

Kinetik ekserji ve potansiyel ekserji, çevrenin basınç ve sıcaklık koşullarından etkilenmeyen mekanik enerji türleridir. Böylece bu enerjilerin her ikisini de faydalı işe dönüştürmek mümkün olur. Basitçe söylemek gerekirse, kinetik ve potansiyel enerjinin ekserjisi, ilgili enerji miktarlarına eşdeğerdir ve aşağıdaki gibi temsil edilebilir.

$$ex^p = g \cdot z \quad (2.2)$$

$$ex^k = \frac{1}{2} V^2 \quad (2.3)$$

Burada V hız ve z çevreden kaynaklanan yükseklik farkıdır. Sistemin çevresi ile aynı referans değerlerde olduğu hallerde ex^p ve ex^k değerleri “0” olur. Bu durumlarda ön plana fiziksel ekserji çıkmaktadır.

Fiziksel ekserji, basınç ve sıcaklığı bilinen bir sistemin bu halinden, basınç ve sıcaklık çevre şartları (P_0 , T_0) ile dengeye getirildiği zaman sistemden elde edilecek en yüksek iş şeklinde tanımlanır. Bir akımın özgül fiziksel ekserjisi;

$$ex^{ph} = [h - h_0 - T_0 (s - s_0)] \quad (2.4)$$

Burada h ve s indis kullanılmadan mevcut haldeki entropi ve entalpiyi, h_0 , T_0 ve s_0 ise, P_0 ve T_0 çevre koşullarında, akışkanın entropi ve entalpisini temsil etmektedir. Bu akımın bir süreç esnasında iki nokta arasındaki fiziksel ekserji farkı ise;

$$ex_g^{PH} - ex_\varphi^{PH} = h_g - h_\varphi - T_0 (s_g - s_\varphi) \quad (2.5)$$

Daha sonra bu değerler kütleli debisi ile çarpılır ve toplam fiziksel ekserjiler hesaplanır.

Fiziksel ekserji kavramında sistemin termodinamik denge durumu P_0 ve T_0 ortam koşulları tarafından belirlenir. Kimyasal ekserji bağlamında, bu durum başlangıç noktası olarak kabul edilir ve çevreyle ısı veya madde alışverişini içeren işlemlerle madde denge durumuna getirildiğinde elde edilebilecek maksimum iş miktarı olarak ölçülür. Yakıtların kimyasal

ekserjisinin hesaplanması, yakıtı oluşturan bileşenlere bağlıdır. Szargut (1988), yakıtın ekserjisi ile düşük kalorifik değeri arasındaki oran kavramını ortaya attı.

$$\beta = \frac{ex_F^{CH}}{LHV} \quad (2.6)$$

Burada ex_F^{CH} , yakıtın özgül kimyasal ekserjisini ve LHV yakıtın net kalorifik değerini belirlemektedir. Yakıtın kütlesi ile özgül ekserji değeri çarpılır ve yakıtın toplam ekserjisi hesaplanır. Burada önemli nokta β değerinin yakıt bileşenlerinin bir fonksiyonu şeklinde hesaplanmasıdır. Bu fonksiyonlar sıvı ve katı yakıtlar için ayrı bir şekilde tanımlanmıştır.

C, O, H ve N içeren, bununla beraber içinde bulunan Oksijen/ Karbon (O/C) kütleli oranı 0,667'den daha az olan ve içeriğinde nem olmayan katı fosil yakıtlar için β oranı;

$$\beta_{katı} = 1,0437 + 0,1882 \frac{y_{H_2}}{y_c} + 0,061 \frac{y_{O_2}}{y_c} + 0,0404 \frac{y_{N_2}}{y_c} \quad (2.7)$$

Burada y değerleri hidrojen, azot, karbon ve oksijenin yakıtın içindeki kütleli oranı ifade eder. Bu ifade ile yukarıda belirtilmiş olan O/C oranını sağlayan odun dışındaki katı fosil yakıtların çoğunluğu için $\pm\%1$ sapmayla uygulanabilir. Odun ve O/C oranı “ $2,67 > O/C > 0,067$ ” aralığında olan nem içermeyen katı fosil yakıtlar için ise aşağıda ifade yine $\pm\%1$ sapma ile uygulanabilmektedir;

$$\beta_{katı} = \frac{1,0438 + 0,1882 \frac{y_{H_2}}{y_c} - 0,2509 \left(1 + 0,7256 \frac{y_{H_2}}{y_c} \right) + 0,383 \frac{y_{N_2}}{y_c}}{1 - 0,3035 \frac{y_{O_2}}{y_c}} \quad (2.8)$$

Kükürdün etkisine de dikkat ederek sıvı yakıtlar için kimyasal ekserji oranı ise $\pm\%0.38$ sapma oranı ile aşağıdaki yer aldığı gibi hesaplanmaktadır;

$$\beta_{sv} = 1,401 + 0,1728 \frac{y_{H_2}}{y_c} + 0,0432 \frac{y_{O_2}}{y_c} + 0,2169 \frac{y_S}{y_c} \left(1 - 2,0628 \frac{y_{H_2}}{y_c} \right) + 0,0428 \quad (2.9)$$

Bunun yanı sıra genellikle maddeler için standart kimyasal ekserji tabloları tanımlanmıştır. Bu standart ekserjiler belirli bir referansa göre hesaplanmaktadır. Gaz karışımlarının kimyasal ekserjileri de bu standart kimyasal ekserji değerleri ele alınarak şu şekilde hesaplanır;

$$ex^{-CH} = \sum x_i ex_i^{-CH} + RT_0 \sum X_i \ln(X_i) \quad (2.10)$$

Formülde x_i terimi her bir gazın kısmi basınçlarını, ex_i^{-CH} terimi ise gazların standart kimyasal ekserji değerlerini, T_0 referans çevre sıcaklığını, R evrensel gaz sabitini temsil etmektedir.

Ekserji üç farklı mekanizma yoluyla taşınabilir: iş, kütle veya ısı transferi. Ancak kütlenin sabit olduğu veya kütle aktarımının olmadığı kapalı sistemlerde ekserji yalnızca emek ve ısı aktarımı yoluyla aktarılabilir.

Bir kontrol hacmi bağlamında, ısı biçimindeki ekserji transferi, sistemin sıcaklığı ile çevre sıcaklığı arasında çalışan bir ısı makinesinden elde edilebilecek işe eşdeğerdir. Isı ve

ekserji transferi, her ikisi de ısı makinesinden kazanılabilecek iş miktarına bağlı olduğundan eşittir.

$$\dot{E}x_Q = \left(1 - \frac{T_0}{T}\right) \dot{Q} \quad (2.11)$$

Bağıntısıyla belirtilmektedir. Burada $\dot{Q}$ birim zamandaki toplam ısı geçişini, T sistem sıcaklığını ve T_0 çevre sıcaklığını ifade etmektedir.

Ekserjinin işe dönüşümü sırasında, ekserji eşdeğeri gerçekte faydalı veya üretken olan işe eşdeğerdir. Yalıtılmış hacimleri değişen sistemlerde çevreye karşı yapılan iş başka bir sisteme aktarılamaz ve kullanılamaz. Hacim değişimi yaşayan kapalı sistemlerde ekserji eşdeğeri, çevreye karşı yapılan işin, $W_{\text{Çevre}} = P_0(V_2 - V_1)$ hareketli sınır işinden çıkarılmasıyla hesaplanır. Ekserji diğer tüm sistemlerdeki işe eşdeğerdir.

$$Ex = W_y = \begin{cases} W_{\text{sınır}} - P_0(V_2 - V_1) & \text{sınır işi için} \\ W_{\text{diğer}} & \text{diğer işler için} \end{cases} \quad (2.12)$$

Kütle entropi ve enerjiye sahip olduğu gibi ekserjiye de sahip olmaktadır. Bir sistemin kütle ve ekserji geçişi de kütleli debisi ile paralellik göstermektedir.

$$\dot{E}x = \dot{m} \cdot ex \quad (2.13)$$

Adyabatik sistemlerde ısı geçişi ile birlikte olan ekserji transfer değeri, kapalı sistemlerde de kütle geçişi ile beraber olan ekserji transferi değeri sıfırdır.

Bir sistemin bir hal değişimi esnasındaki ekserji değişimi sisteme giren ekserjilerle çıkan ekserjiler ve ekserji yıkımı arasındaki fark kadardır ve ekserji dengesi en genel durumuyla,

$$\dot{E}x_g - \dot{E}x_{\text{ç}} - \dot{E}x_{\text{yık}} = \Delta \dot{E}x_{\text{sistem}} \quad (2.14)$$

Bir kapalı sistemin hal değişimi esnasında birim zamandaki ekserji dengesi,

$$\sum \left(1 - \frac{T_0}{T}\right) \dot{Q} - \left(\dot{W} - P_0 \frac{dV_{\text{sistem}}}{dt}\right) - T_0 \dot{S}_{\text{üretim}} = \frac{dEx_{\text{sistem}}}{dt} \quad (2.15)$$

Bu denklemlerde sisteme doğru ısı transferine ve sistemin yaptığı işe pozitif sayılar atanır. Denklemdaki $T_0 \dot{S}_{\text{üretim}}$ kelimesi ekserjinin dağılmasını ifade eder. Bir kontrol hacmini analiz ederken, denklem ayrıca hacme giren ve çıkan kütle terimlerinin toplamını da içerir. Yeni örnekte kontrol hacminin faz değişimi sırasında, belirli bir zamandaki ekserji dengesi, kontrol hacmini belirtmek için kh alt simgesini, dışarı akışı belirtmek için 3 alt simgesini ve gelen akışı belirtmek için g alt simgesini kullanır.

$$\sum \left(1 - \frac{T_0}{T}\right) \dot{Q} - \left(\dot{W} - P_0 \frac{dV_{kh}}{dt}\right) + \sum \dot{m}_g ex_g - \sum \dot{m}_{\text{ç}} ex_{\text{ç}} - \dot{E}x_{\text{yıkım}} = \frac{dEx_{kh}}{dt} \quad (2.16)$$

Kompresörlerde, türbinlerde, ısı değiştiricilerde, borularda vb. gibi ekipmanların kontrol hacimlerinde her zaman akışlı hal değişimi yaklaşımı yapılabilir ve bu durumda proses

sırasında entropilerinde, ekserjilerinde, kütlelerinde ve hacimlerinde zamana bağlı olarak değişim olmamaktadır. Yani; $\frac{dV_{kh}}{dt} = 0$ ve $\frac{dEx_{kh}}{dt} = 0$ olur.

Bir kontrol hacmi için her zaman akışlı hal değişimi sırasında ekserji dengesi,

$$\sum \left(1 - \frac{T_0}{T}\right) \dot{Q} - \dot{W} + \sum \dot{m}_g ex_g - \sum \dot{m}_c ex_c - \dot{Ex}_{yıkım} = 0 \quad (2.17)$$

Bir akımın iki noktası arasında ya da her zaman akışlı bir kontrol hacminin hal değişimi için ekserji dengesi:

$$\sum \left(1 - \frac{T_0}{T}\right) \dot{Q} - \dot{W} + \dot{m}(ex_g - ex_c) - \dot{Ex}_{yıkım} = 0 \quad (2.18)$$

Burada $\dot{m}$ akımın kütleli debisini simgelemektedir ve akımın değişimi,

$$ex_g - ex_c = (h_g - h_c) - T_0(s_g - s_c) + \frac{V_g^2 - V_c^2}{2} + g(z_g - z_c) \quad (2.19)$$

2.8. EKSERJİ VERİMİ

Sistem içerisine giriş yapan ekserji çıkış yapan ekserjiden fazladır. Buna neden olan ekserji bozunumu ve kayıplar olmaktadır. Sürekli akış için;

$$E_g = E_c + E_D + E_L \quad (2.20)$$

Ekserji bozunumu E_D ve ekserji kaybı E_L sistemin termodinamik bakımdan veriminin bir ölçütüdür. Bozunum sürtünmeden ve ısı transferlerinden kaynaklanmaktadır. Isı transferinden kaynaklanan ekserji bozunumu

$$E_q = \left(1 - \frac{T_0}{T_a}\right) Q \quad (2.21)$$

Toplam bozunum yazılmak istenirse:

$$E_D = \left(1 - \frac{T_0}{T_a}\right) Q + \dot{m}[(h_g - h_c) - T_0(s_g - s_c)] \quad (2.22)$$

Denklem hem girişin hem de çıkışın potansiyel, kimyasal ve kinetik ekserjilerini göz ardı eder. Bu kaynakların verimsizliği ekserji bozunma hızına (y_D) ve ekserji kayıp hızına (y_L) bağlıdır. Ekserji bozunma hızı, sistemin ekserji bozunmasının yakıt tarafından sağlanabilecek toplam ekserjiye oranı anlamına gelir.

$$y_D = \frac{\dot{E}_D}{\dot{E}_y} \quad (2.23)$$

Bu oran, bir sistemdeki çeşitli parçaların karşılaştırılmasını kolaylaştırır ve aynı yakıtı kullanan diğer sistemlerdeki benzer elemanların karşılaştırılmasına olanak tanır. Ekserji kaybı, sistemin toplam yakıttan aldığı ekserji oranı olarak tanımlanır ve y_L olarak gösterilir.

$$y_L = \frac{\dot{E}_L}{\dot{E}_y} \quad (2.24)$$

Enerji verimliliği termodinamik performansı ölçmek için kullanılan ölçümdür. Böylece enerji sisteminin performansının termodinamiğe göre kesin bir değerlendirmesini sunar.

Ekserjinin verimliliği, yakıt ve ürünün termodinamik analizi yapılarak belirlenir. Ürün, sürecin nihai hedefidir. Ürün açıklamasında maliyetler ve kullanılan sistem belirtilmelidir. Yakıt, ürünün oluşturulmasını kolaylaştıran temel kaynaktır. Sürekli bir sistemde ekserji dengesi, yakıt verildiğinde ve ürünler üretildiğinde oluşur.

$$E_y = E_{\ddot{u}} + E_D + E_L \quad (2.25)$$

Ekserji verimi de:

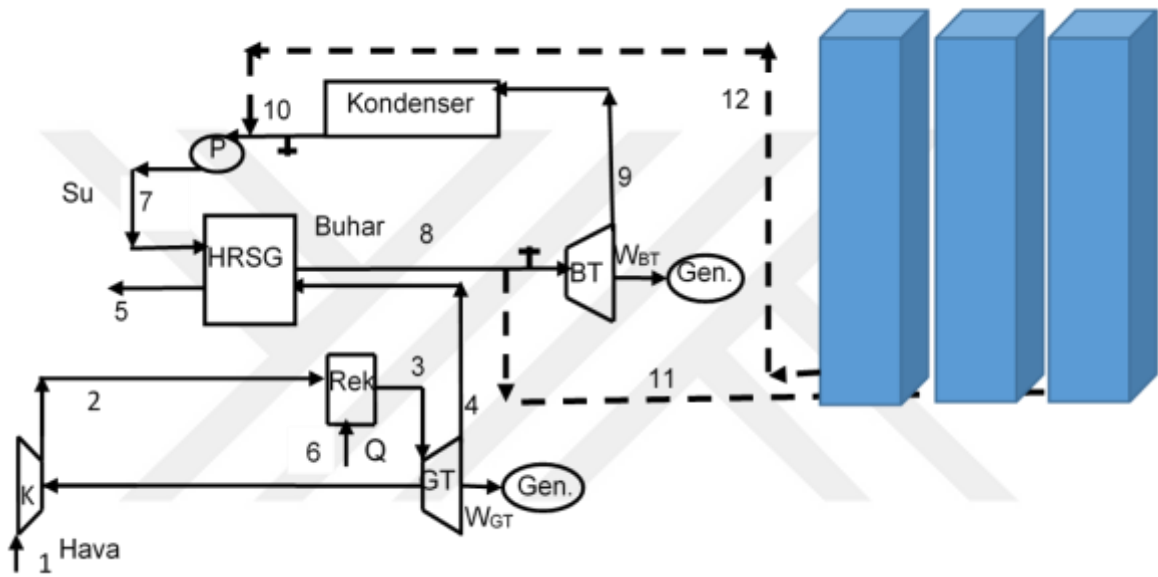
$$\eta_{II} = \frac{E_{\ddot{u}}}{E_y} = 1 - \frac{E_D + E_L}{E_y} \quad (2.26)$$

Kayıp ve bozulma nedeniyle yakıt israfının oranını gösterir. Bir tesisin ekserji verimliliğini hesaplamak için öncelikle tesisi oluşturan bileşenlerin verimliliklerini belirlememiz gerekir. Daha sonra bu bileşenler, tesisin etkinliğini belirlemek için birleştirilir.

ÜÇÜNCÜ BÖLÜM

3. BULGULAR

Bu tezde incelenen, enerji, ekserji ve performans analizi yapılan bölgesel ısıtma sistemli Brayton ve Rankine çevrimlerinden oluşan kombine çevrim Şekil 14’te verilmiştir. Burada görüldüğü gibi sistem kışın bir kojenerasyon sistemi gibi bölgesel ısıtmada çalıştırılabilmekte yazın da ısı enerjisine ihtiyaç duyulmadığından kombine çevrim olarak elektrik enerjisi üretmektedir. Ortak referans çevre koşulları aşağıda verilmiştir.



Şekil 14: Bölgesel Isıtmalı Brayton ve Rankine Çevrimli Kombine Çevrim

Çevrim için alınan ortak referans çevre koşulları ortam sıcaklığı için $T_0 = 20^\circ\text{C}$, ortam basıncı için $P_0 = 101,3 \text{ kPa}$, ortam sıcaklığı $T_{0K} = T_0 + 273,15$ ve havanın kütleli debisi $m_{\text{hava}} = 200 \text{ kg/s}$ şeklindedir.

Kompresöre giren hava debisi sabit alınmış olup, enerji, ekserji ve performans analizinde kullanılan formüller ve eşitlikler Tablolarda aşağıda verilmiştir. Yapılan hesaplamalar sonucu elde edilen veriler hem tablolar şeklinde EKLER kısmında verilmiş hem de çizilen eğriler aşağıda yorumlanarak sunulmuştur. Tablo 2 ve Tablo 3’te Rankine ve Brayton kombine çevriminde kullanılan sistem elemanlarının kütle dengesi, enerji dengesi, entropi üretimi, ekserji dengesi ve ekserji verimi formülleri verilmiştir.

Tablo 2: Kütle, Enerji Dengesi ve Entropi Üretimi Denklemleri

CİHAZ	Aralık	Kütle Dengesi	Enerji Dengesi	Entropi Üretimi
Kompresör	1-2	$\dot{m}_1 = \dot{m}_2$	$\dot{m}_1 h_1 + \dot{W}_K = \dot{m}_2 h_2$	$\dot{m}_1 s_1 - \dot{m}_2 s_2 + S_{Gen,K} = 0$
Rekuperatör	2-3	$\dot{m}_2 = \dot{m}_3$	$\dot{m}_2 h_2 + \dot{Q}_R = \dot{m}_3 h_3$	$\dot{m}_2 s_2 - \dot{m}_3 s_3 + S_{Gen,R} = 0$
Gaz Türbini	3-4	$\dot{m}_3 = \dot{m}_4$	$\dot{m}_3 h_3 = \dot{W}_{GT} + \dot{m}_4 h_4$	$\dot{m}_3 s_3 - \dot{m}_4 s_4 + S_{Gen,GT} = 0$
Isı Değiştirici (HRSG)	4-5 7-8	$\dot{m}_4 = \dot{m}_5$ $\dot{m}_7 = \dot{m}_8$	$\dot{m}_4 h_4 - \dot{m}_5 h_5$ $= \dot{m}_8 h_8 - \dot{m}_7 h_7$	$\dot{m}_4 s_4 - \dot{m}_5 s_5 + \dot{m}_7 s_7 - \dot{m}_8 s_8$ $+ S_{Gen,I} = 0$
Buhar Türbini	7-8	$\dot{m}_7 = \dot{m}_8$	$\dot{m}_7 h_7 = \dot{W}_{ST} + \dot{m}_8 h_8$	$\dot{m}_7 s_7 - \dot{m}_8 s_8 + S_{Gen,ST} = 0$
Yoğuşturucu	9-10	$\dot{m}_9 = \dot{m}_{10}$	$\dot{m}_9 h_9$ $= \dot{Q}_Y + \dot{m}_{10} h_{10}$	$\dot{m}_9 s_9 - \dot{m}_{10} s_{10} + S_{Gen,Y} = 0$
Pompa	10-7	$\dot{m}_{10} = \dot{m}_7$	$\dot{m}_{10} h_{10} + \dot{W}_P$ $= \dot{m}_7 h_7$	$\dot{m}_{10} s_{10} - \dot{m}_7 s_7 + S_{Gen,P} = 0$

Tablo 3: Ekserji, Entropi Dengesi ve Ekserji Verimi Denklemleri

Materyal	Aralık	Ekserji Yıkımı	Ekserji verimi
Kompresör	1-2	$\dot{E}x_1 + \dot{W}_K - \dot{E}x_2$ $= E_{kayıp,K}$	$\eta_{ex,Reaktör} = \frac{\dot{E}x_2}{\dot{E}x_1 + \dot{W}_K}$
Rekuperatör	2-3	$\dot{E}x_3 - \dot{E}x_2 = \dot{E}_{kayıp,R}$	$\eta_{ex,R} = \frac{\dot{E}x_3 - \dot{E}x_2}{\dot{Q}_F}$
Gaz Türbini	3-4	$\dot{E}x_3 - \dot{W}_{GT} - \dot{E}x_4$ $= \dot{E}_{kayıp,GT}$	$\eta_{ex,GT} = \frac{\dot{W}_{GT} + \dot{E}x_4}{\dot{E}x_3}$
Isı Değiştirici (HRSG)	4-5 7-8	$\dot{E}x_4 - \dot{E}x_5 - \dot{E}x_7 + \dot{E}x_8$ $= \dot{E}_{kayıp,HRSG}$	$\eta_{ex,HRSG} = \frac{\dot{E}x_7 - \dot{E}x_8}{\dot{E}x_4 - \dot{E}x_5}$
Buhar Türbini	7-8	$\dot{E}x_7 - \dot{E}x_8 - \dot{W}_{ST} =$ $E_{kayıp,ST}$	$\eta_{ex,ST} = \frac{\dot{E}x_8 + \dot{W}_{ST}}{\dot{E}x_7}$
Yoğuşturucu	9-10	$\dot{E}x_9 - \dot{E}Q_Y - \dot{E}x_7$ $= \dot{E}_{kayıp,Y}$	$\eta_{ex,Y} = \frac{\dot{E}Q_Y + \dot{E}x_7}{\dot{E}x_9}$
Pompa	10-7	$\dot{E}x_{10} + \dot{W}_P$ $= \dot{E}x_7 + E_{kayıp,P}$	$\eta_{ex,P} = \frac{\dot{E}x_7}{\dot{E}x_{10} + \dot{W}_P}$

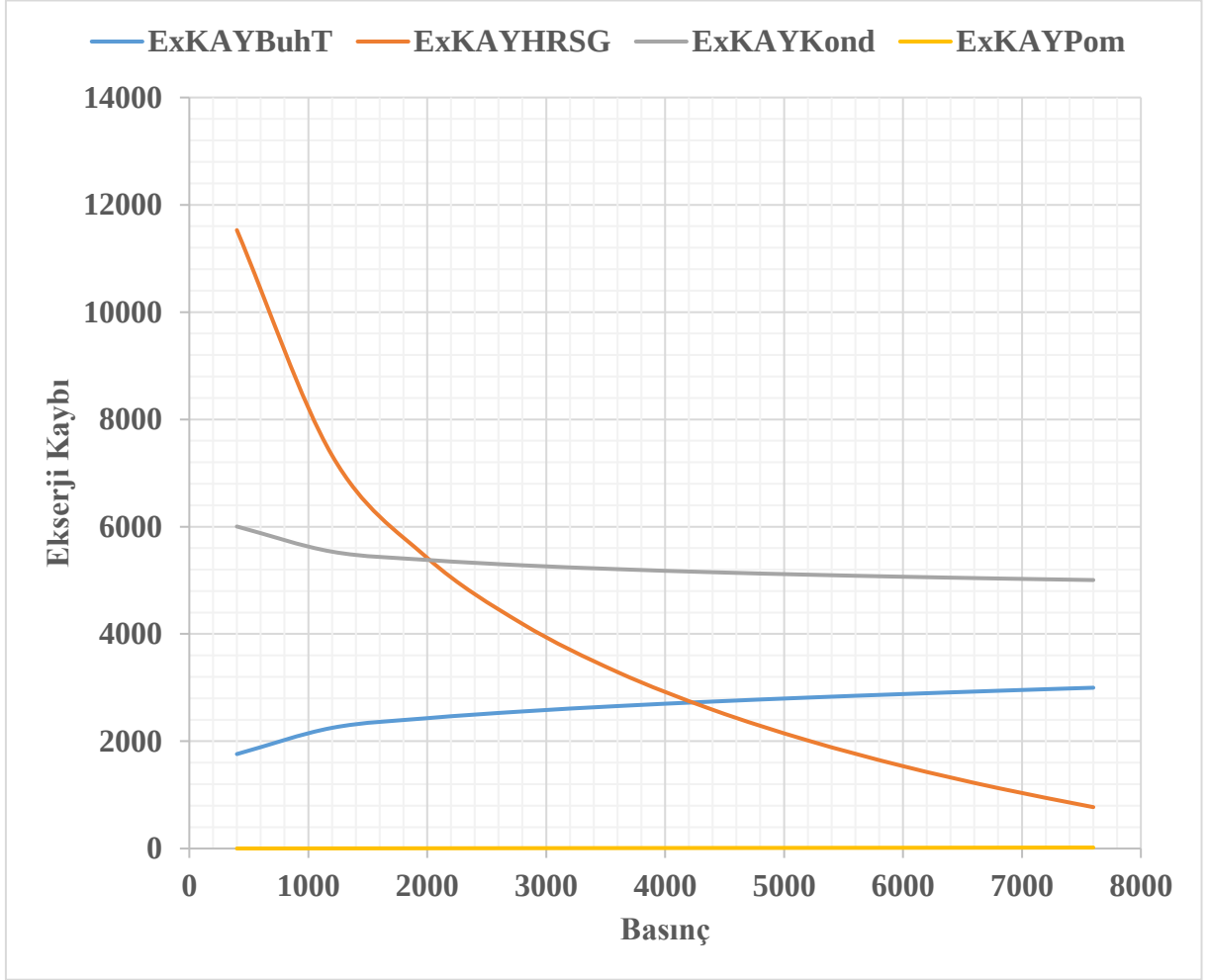
Tablo 4’te yaz ayları özellik tablosu verilmiştir. Burada sistem Brayton ve Rankine çevrimli kombine çevrim şeklinde elektrik üretmektedir.

Tablo 4: Yaz Ayları Özellik Tablosu

HAL NO	Akışkan	Sıcaklık (°C)	Basınç (kPa)	Kütleli Debi(kg/s)	Entalpi (kJ/kg)	Enerji (kW)	Entropi (kJ/kgK)	Ekserji (kW)
0	Hava	20	100	-	293,4	-	6,847	-
0	Su	20	100	-	83,93	-	0,2962	-
1	Hava	20	101,3	200	293,3	0	6,842	0
2	Hava	454	2200	200	743,3	89993	6,892	87022
3	Hava	1200	2200	200	707,3	262453	7,703	211937
4	Hava	501,9	120	200	1606	100329	7,798	44244
5	Hava	40	110	200	313,5	4022	6,884	1518
6	-	-	-	-	-	172461	-	124915
7	Su	35,36	7600	29,75	154,9	2110	0,5073	271,2
8	Su	494,9	7600	29,75	154,3	98417	6,739	42225
9yaz	Su	45,81	10	29,75	2235	63991	7,054	42225
10yaz	Su	35	10	29,75	2134	1864	0,5051	43,44
11kış	Su	-	-	-	-	-	-	-
12kış	Su	-	-	-	-	-	-	-

Tablo 5: Ekserji Kaybı Basınç Tablosu

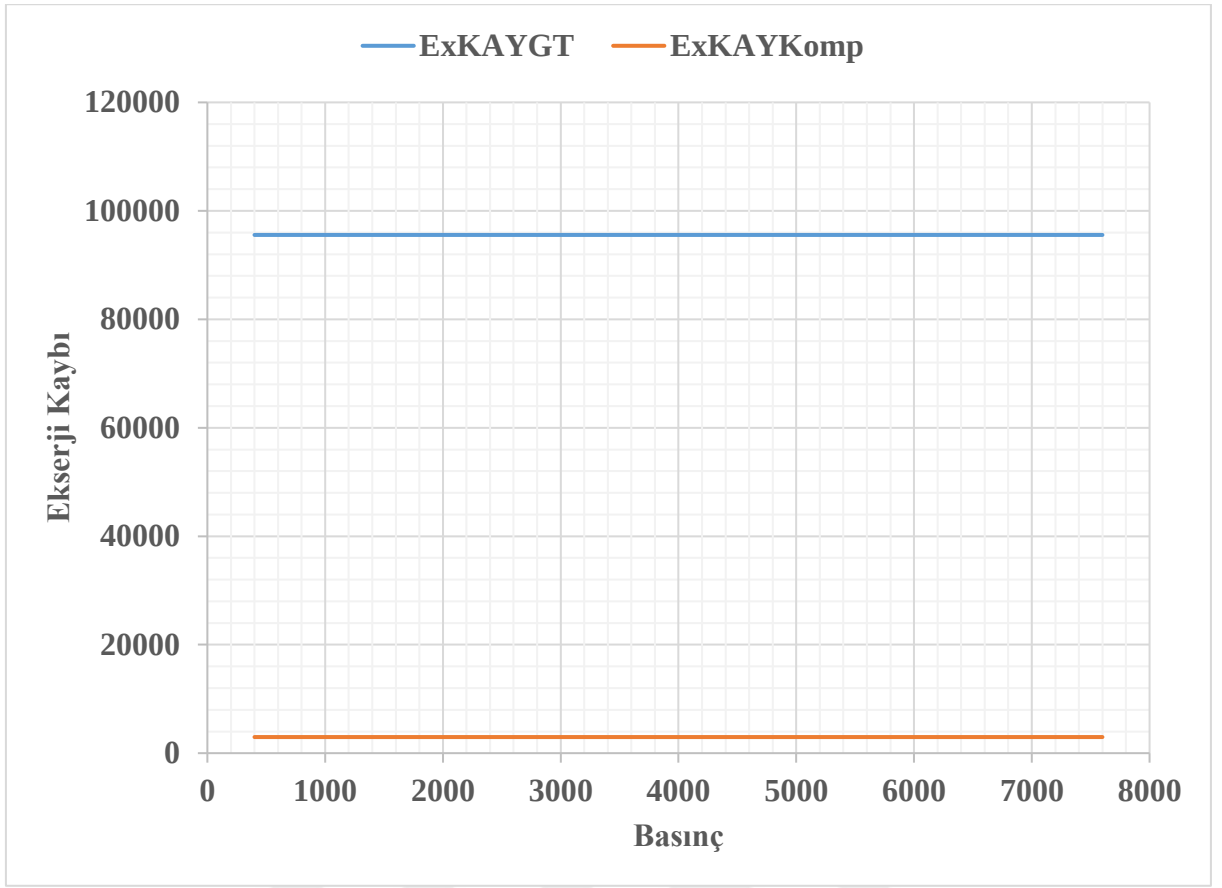
RANKİNE ÇEVİRİMİ				
P7	ExKAYBuhT	ExKAYHRSG	ExKAYKond	ExKAYPom
7600	2998	771,8	5005	18,75
6800	2941	1127	5034	16,72
6000	2880	1536	5067	14,71
5200	2814	2015	5105	12,71
4400	2740	2587	5151	10,72
3600	2656	3290	5208	8,74
2800	2556	4189	5280	6,774
2000	2430	5419	5380	4,818
1200	2250	7328	5534	2,874
400	1761	11528	6003	0,9393



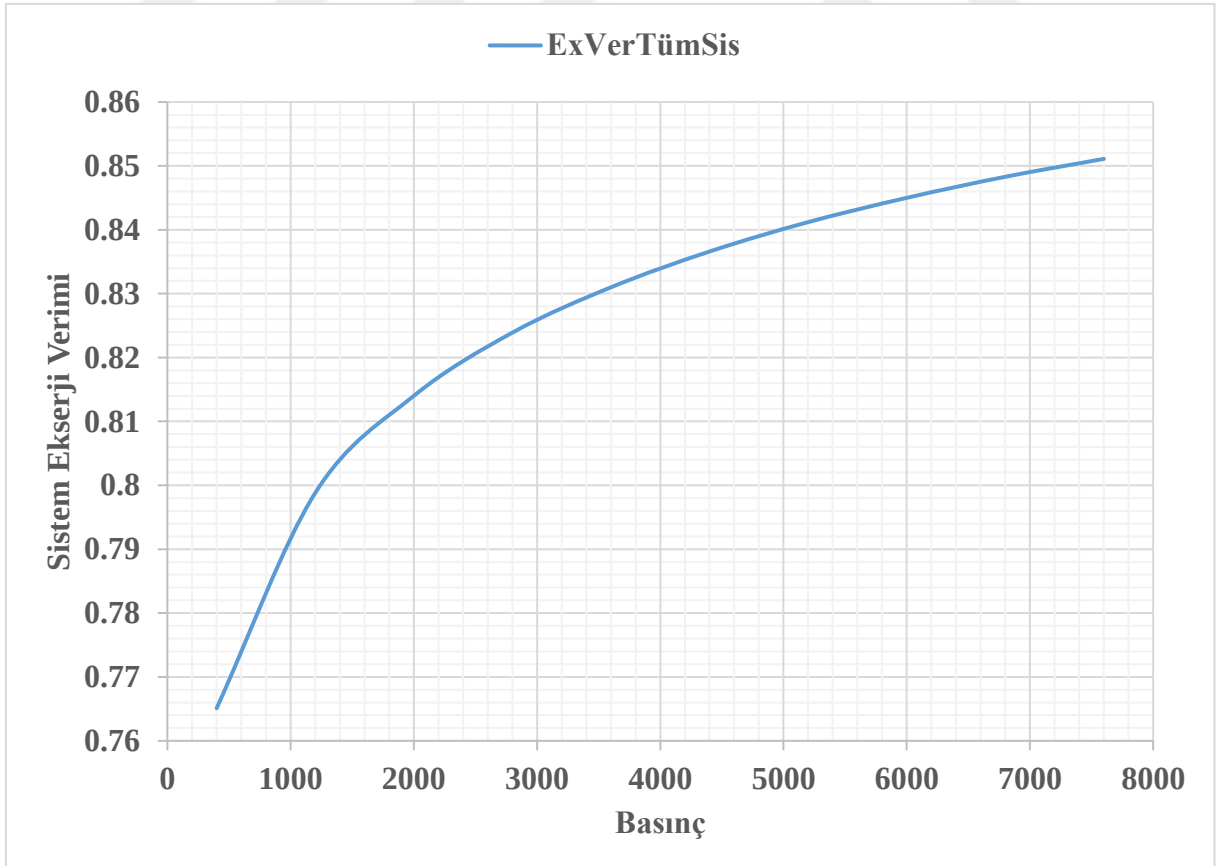
Şekil 15: Sistemin Pompa Çıkış Basıncının Cihazlardaki Ekserji Kaybına Etkisi

Şekil 15’te sistemin pompa çıkış basıncının cihazlardaki ekserji kaybına etkisi eğriler şeklinde verilmiştir. İlgili değerler ayrıca Tablo 5’te verilmiştir. Pompa çıkış basıncı artırıldığında buhar türbinindeki ekserji kaybı %50 civarında artmaktadır. Pompada ekserji kaybı çok az ve yaklaşık sabit iken HRSG’nin ekserji kaybı ciddi oranda (yaklaşık %90) düştüğü görülmektedir. Kondenserdeki ekserji kaybı ise %15 civarında azalmaktadır. Bu cihazlar Rankine çevriminin cihazları olup pompa basıncındaki değişimden önemli ölçüde etkilendiği anlaşılmaktadır.

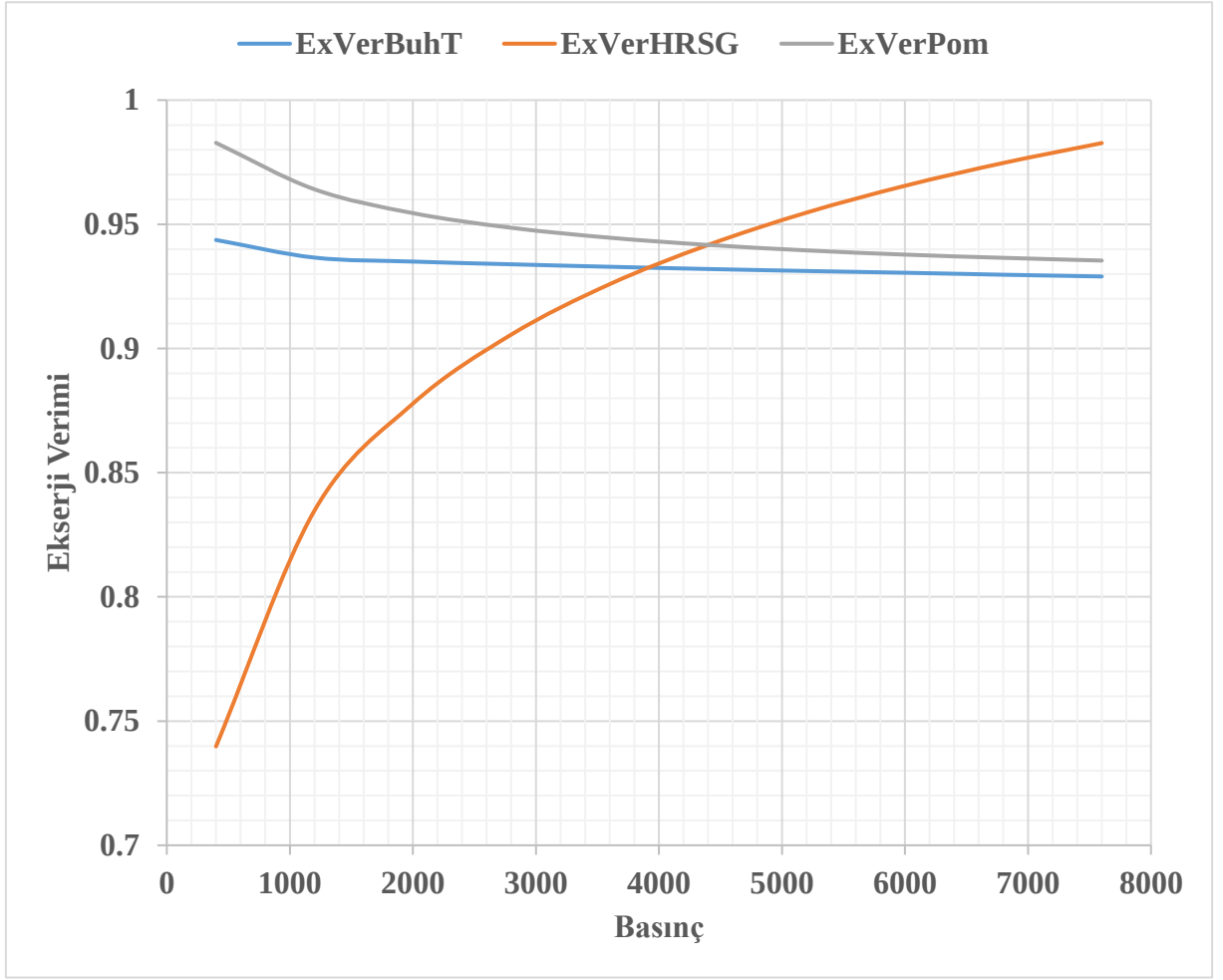
Şekil 16’da sistemin pompa çıkış basıncının Brayton cihazlarındaki ekserji kaybına etkisi eğriler şeklinde verilmiştir. İlgili değerler ayrıca Tablo 7’de verilmiştir. Pompa çıkış basıncı artırıldığında Brayton çevriminin gaz türbini ve kompresör cihazlarındaki ekserji kaybı sabit kalmaktadır. Yani pompa çıkış basıncı Brayton çevrimini etkilememektedir.



Şekil 16: Sistemin Pompa Çıkış Basıncının Brayton Cihazlarındaki Ekserji Kaybına Etkisi



Şekil 17: Sistemin Pompa Çıkış Basıncının Tüm Sistemin Ekserji Verimine Etkisi

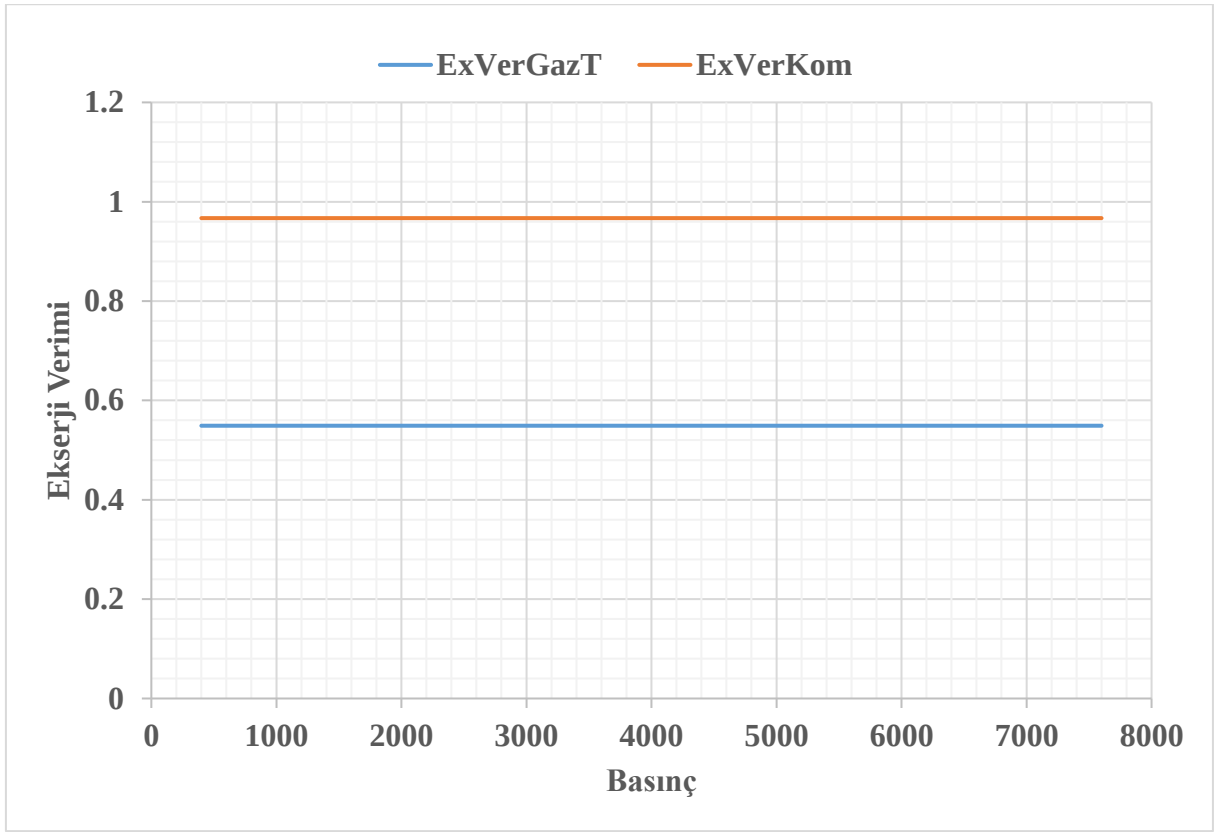


Şekil 18: Sistemin Pompa Çıkış Basıncının Rankine Çevrim Cihazları Ekserji Verimine Etkisi

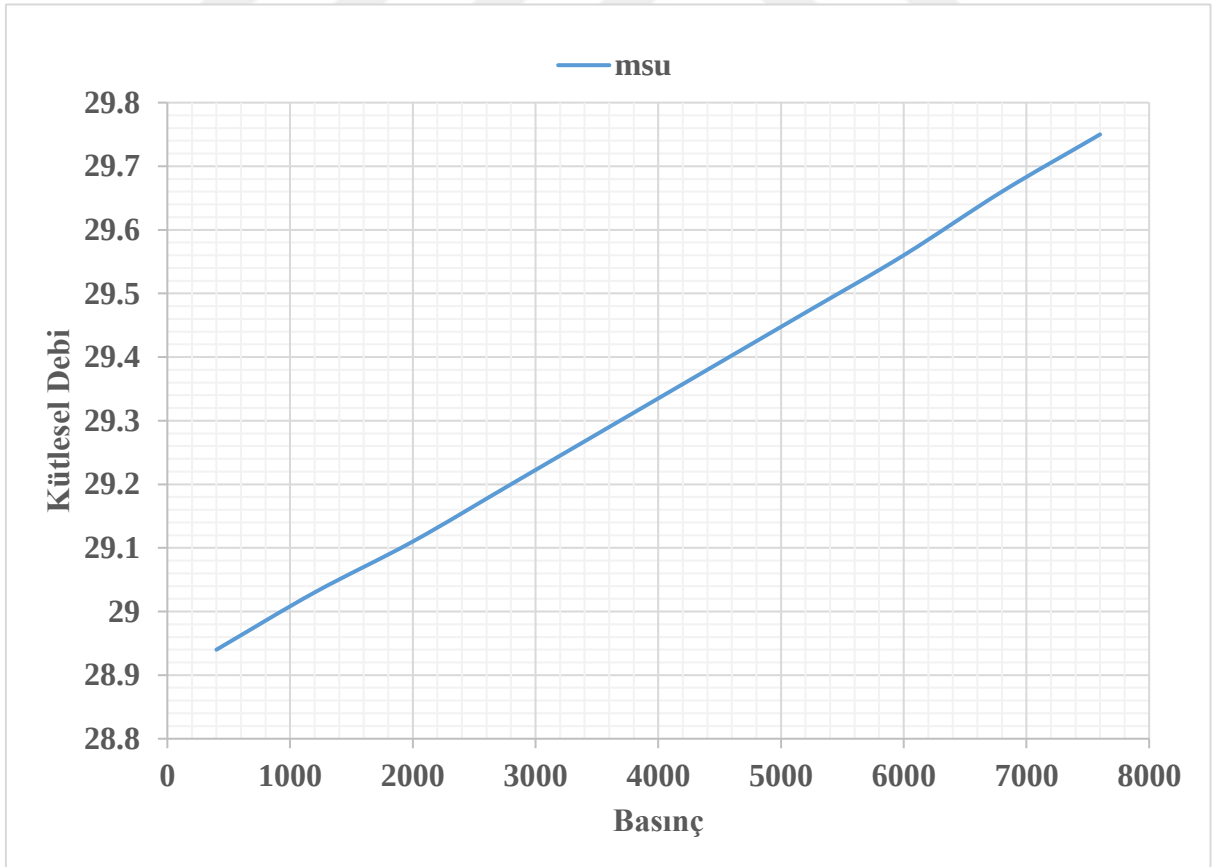
Şekil 17’de sistemin pompa çıkış basıncının tüm sistemin ekserji verimine etkisi eğriler şeklinde verilmiştir. İlgili değerler ayrıca Tablo 8’de verilmiştir. Pompa çıkış basıncı artırıldığında tüm sistemin ekserji verimi %76.5’ten %85.5’e çıkmaktadır. Bu da pompa çıkış basıncının tüm sistemin ekserji verimini %10 civarında artırdığı görülmektedir.

Şekil 18’de sistemin pompa çıkış basıncının Rankine çevriminin cihazlarının ekserji verimine etkisi eğriler şeklinde verilmiştir. İlgili değerler ayrıca Tablo 9’da verilmiştir. Pompa çıkış basıncı artırıldığında buhar türbini ekserji verimi %3, pompanın ekserji verimide %5 civarında düşmekte, ancak HRSG’nin ekserji verimi %74’ten %97’ye çıkmaktadır.

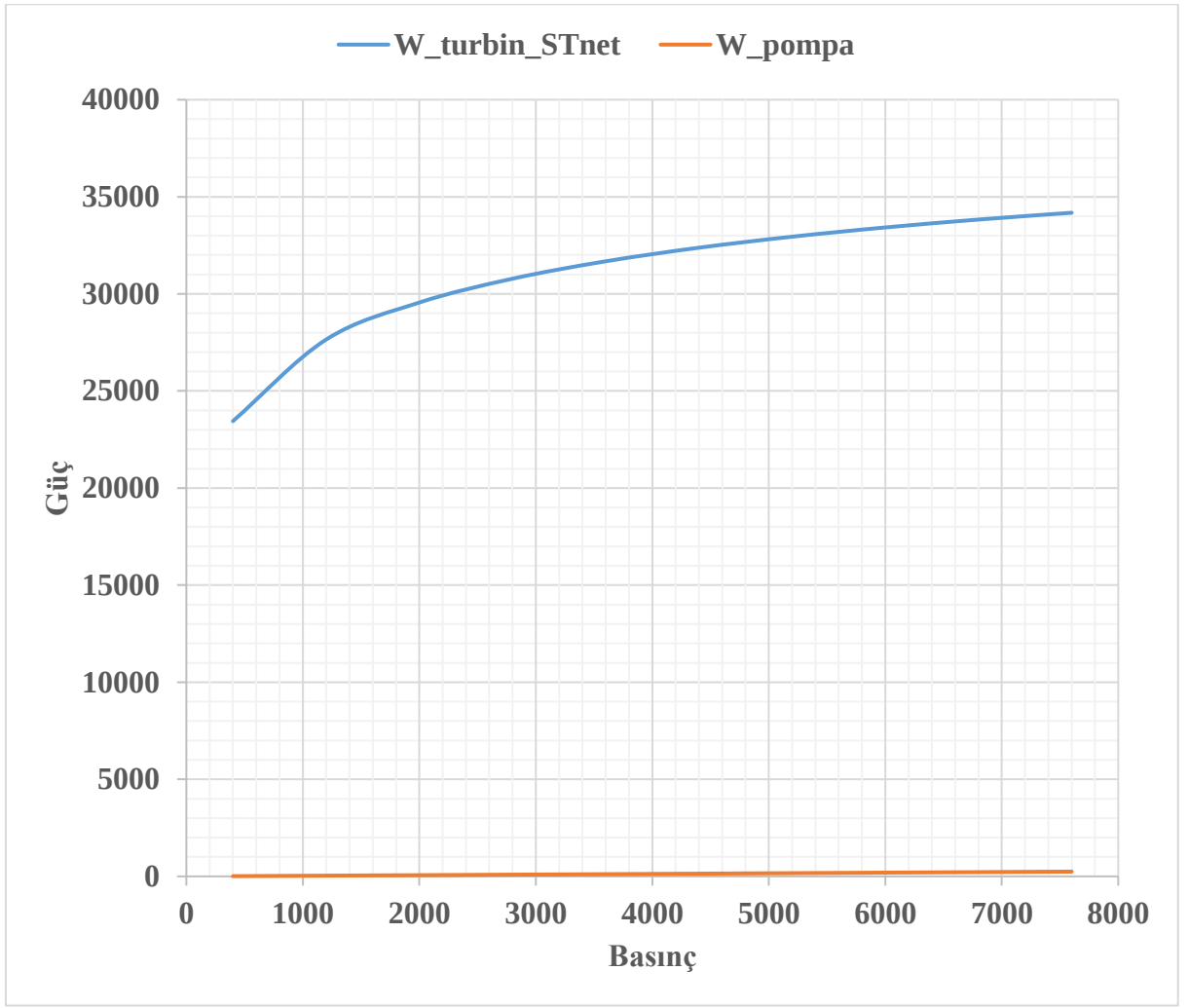
Şekil 19’da sistemin pompa çıkış basıncının Brayton cihazlarındaki ekserji verimine etkisi eğriler şeklinde verilmiştir. İlgili değerler ayrıca Tablo 10’da verilmiştir. Pompa çıkış basıncı artırıldığında kompresör ve gaz türbininin ekserji verimi sabit kalmaktadır. Yani pompa çıkış basıncı Brayton cihazları üzerinde etkili değildir.



Şekil 19: Sistemin Pompa Çıkış Basıncının Brayton Cihazlarındaki Ekserji Verimine Etkisi



Şekil 20: Sistemin Pompa Çıkış Basıncının Rankine'deki Kütleli Debiye Etkisi

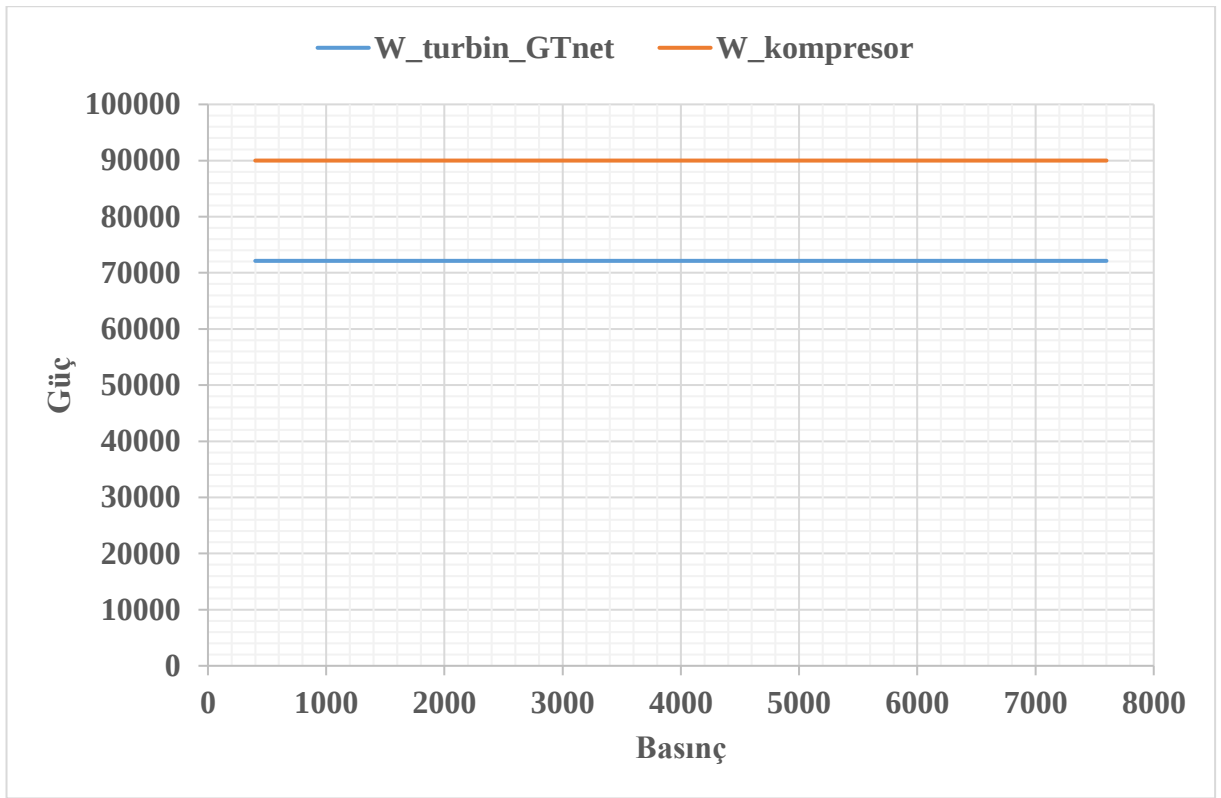


Şekil 21: Sistemin Pompa Çıkış Basıncının Buhar Türbini ve Pompa Gücüne Etkisi

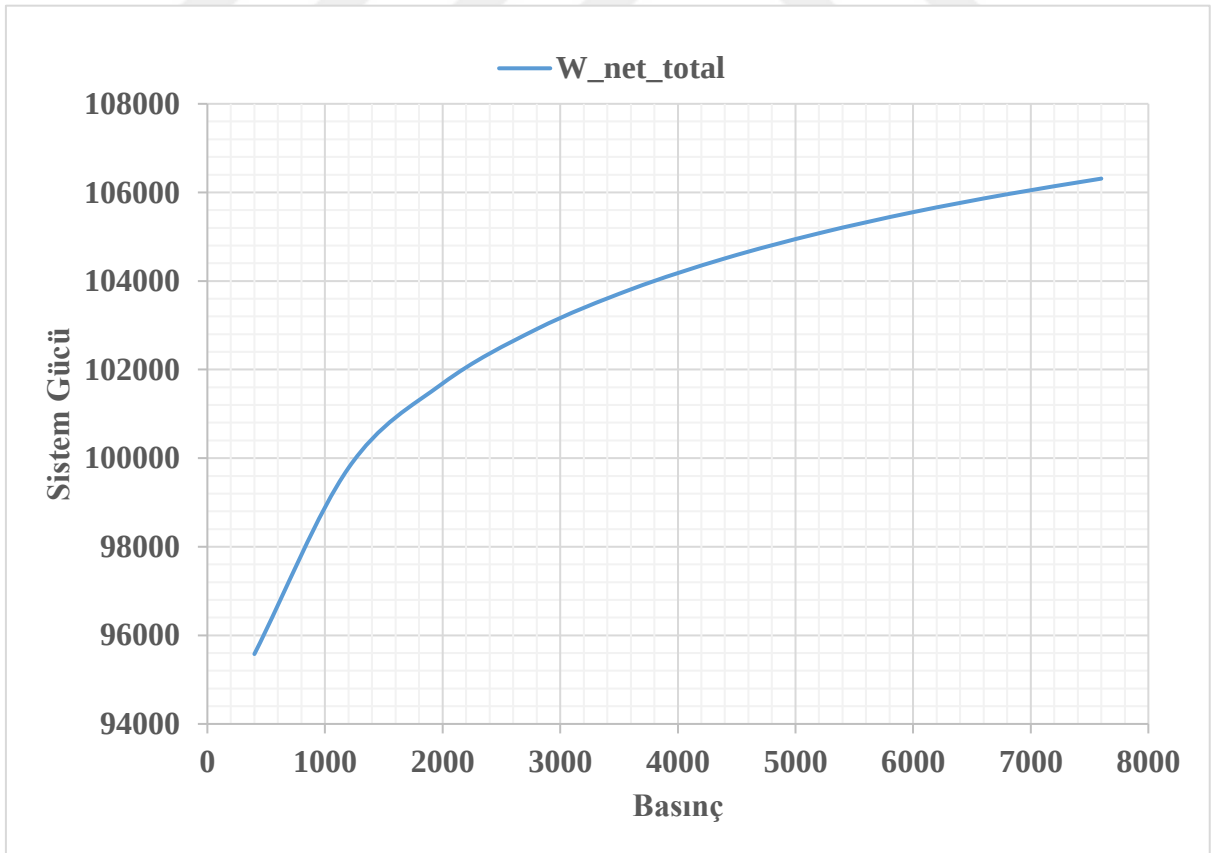
Şekil 20’de sistemin pompa çıkış basıncının Rankine’deki iş akışkanının kütleli debisine etkisi eğriler şeklinde verilmiştir. İlgili değerler ayrıca Tablo 11’de verilmiştir. Pompa çıkış basıncı artırıldığında Rankine’deki iş akışkanı olan suyun kütleli debisini %3 civarında artırmaktadır.

Şekil 21’de sistemin pompa çıkış basıncının buhar türbini ve pompa gücüne etkisi eğriler şeklinde verilmiştir. İlgili değerler ayrıca Tablo 12’de verilmiştir. Pompa çıkış basıncı artırıldığında Rankine’deki buhar türbininden alınan güç 23500 kW’tan 34200 kW’a yani %50 civarında artarken, pompaya harcanan gücü 12 kW’tan 246 kW’a çıkarmaktadır. Burada pompa basıncını artırmak elde edilen gücü büyük oranda artırmaktadır.

Şekil 22’de sistemin pompa çıkış basıncının gaz türbini ve kompresör gücüne etkisi eğriler şeklinde verilmiştir. İlgili değerler ayrıca Tablo 13’te verilmiştir. Pompa çıkış basıncı artırıldığında gaz türbini ve kompresör gücü sabit kalmaktadır.

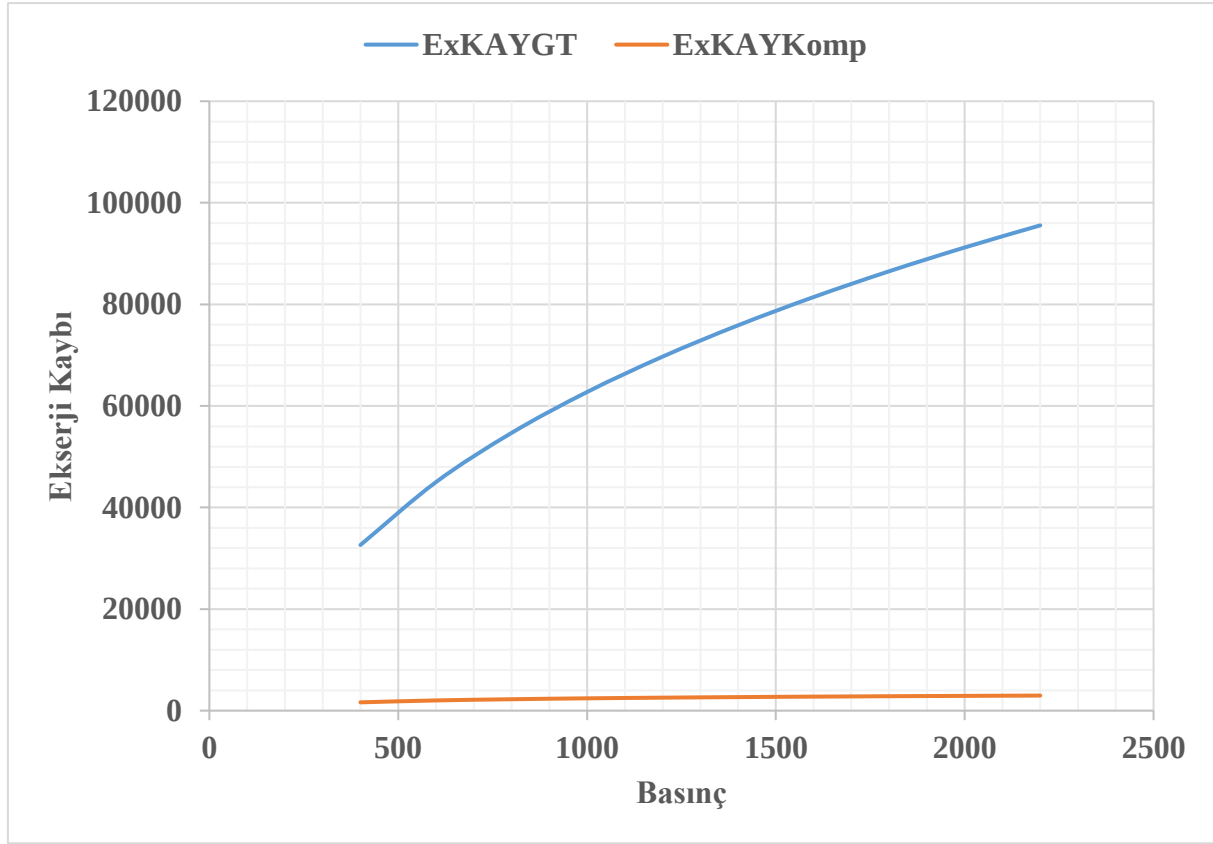


Şekil 22: Sistemin Pompa Çıkış Basıncının Gaz Türbini ve Kompresör Gücüne Etkisi



Şekil 23: Sistemin Pompa Çıkış Basıncının Tüm Sistemin Gücüne Etkisi

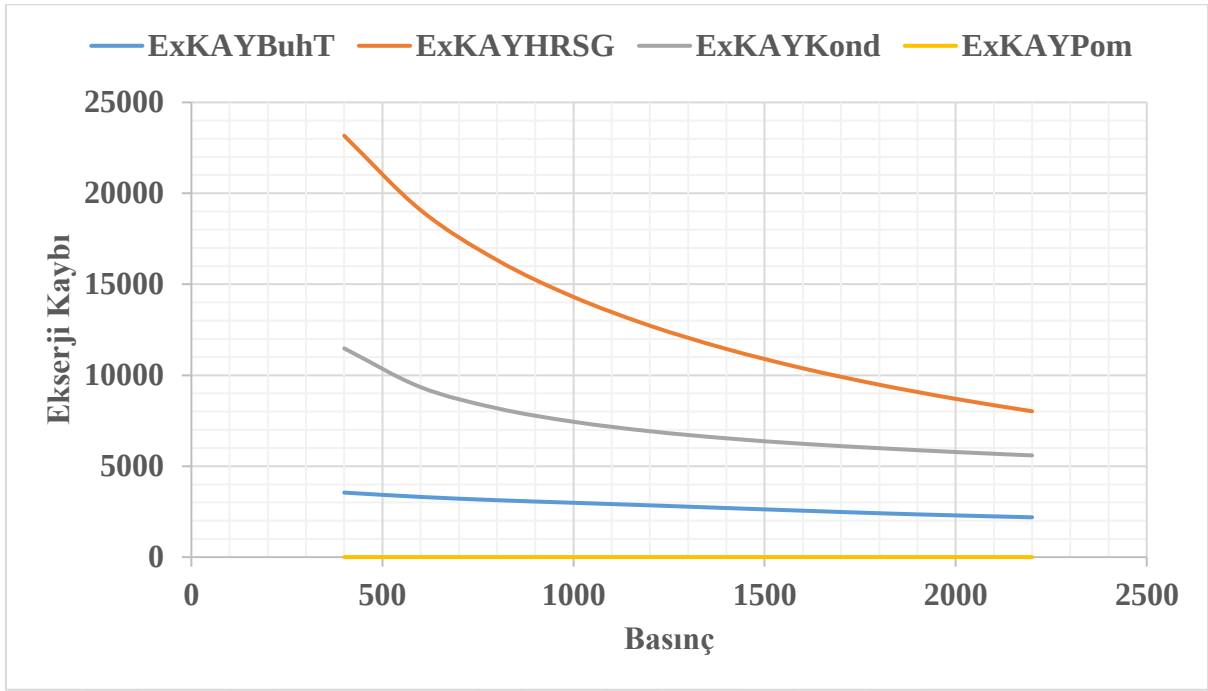
Şekil 23'te sistemin pompa çıkış basıncının tüm sistemin gücüne etkisi eğriler şeklinde verilmiştir. İlgili değerler ayrıca Tablo 14'te verilmiştir. Pompa çıkış basıncı artırıldığında tüm sistemin gücü 95600 kW'tan 106300 kW'a çıkmakta yani %12 civarında artmaktadır.



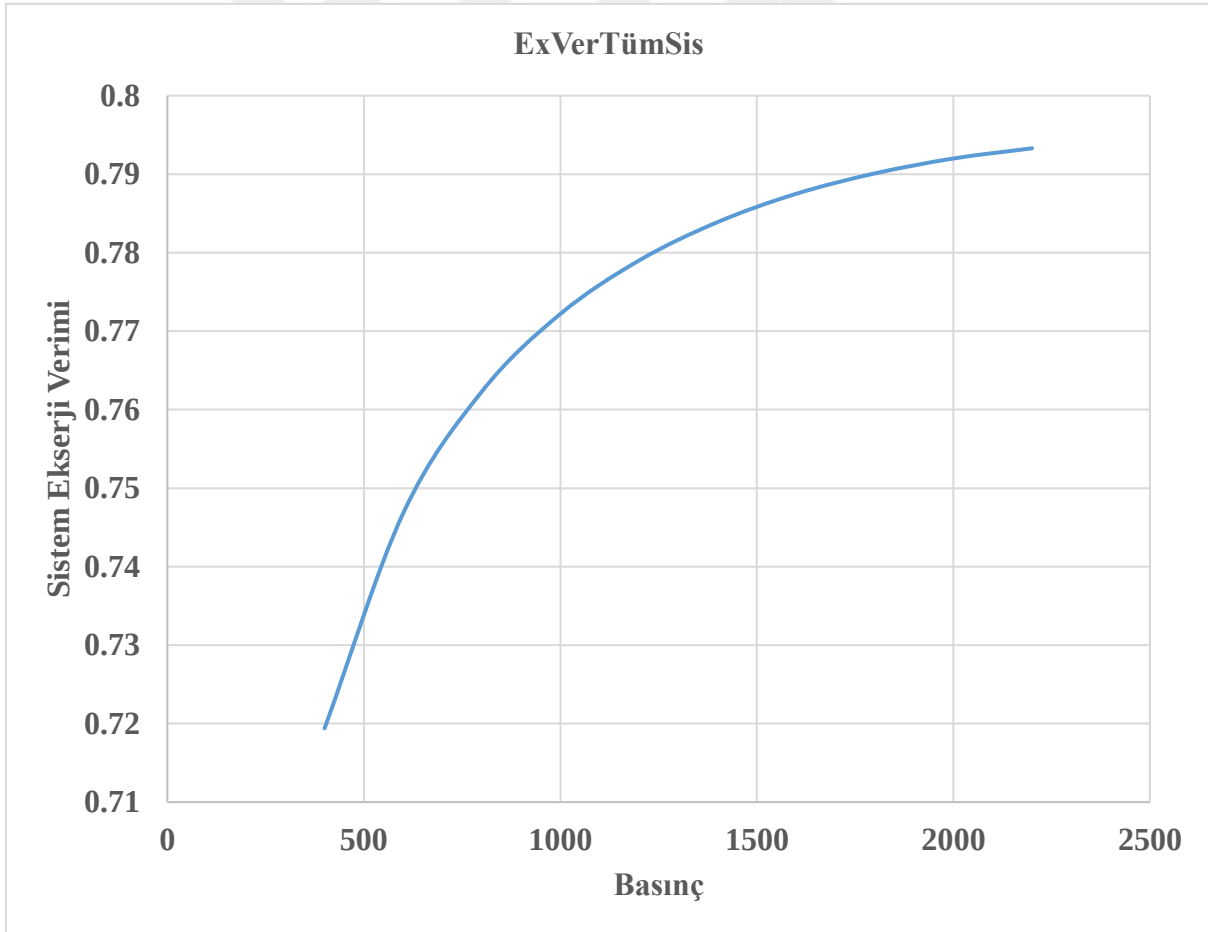
Şekil 24: Kompresör Çıkış Basıncının Gaz Türbini ve Kompresör Ekserji Kaybına Etkisi

Şekil 24'te sistemin kompresör çıkış basıncının gaz türbini ve kompresör ekserji kaybına etkisi eğriler şeklinde verilmiştir. İlgili değerler ayrıca Tablo 15'te verilmiştir. Kompresör çıkış basıncı artırıldığında kompresörün ekserji kaybı çok az miktarda artarken gaz türbinindeki ekserji kaybı 32600 kW'tan 95600 kW'a çıkmaktadır. Gaz türbininde ekserji kaybı %300 civarındadır.

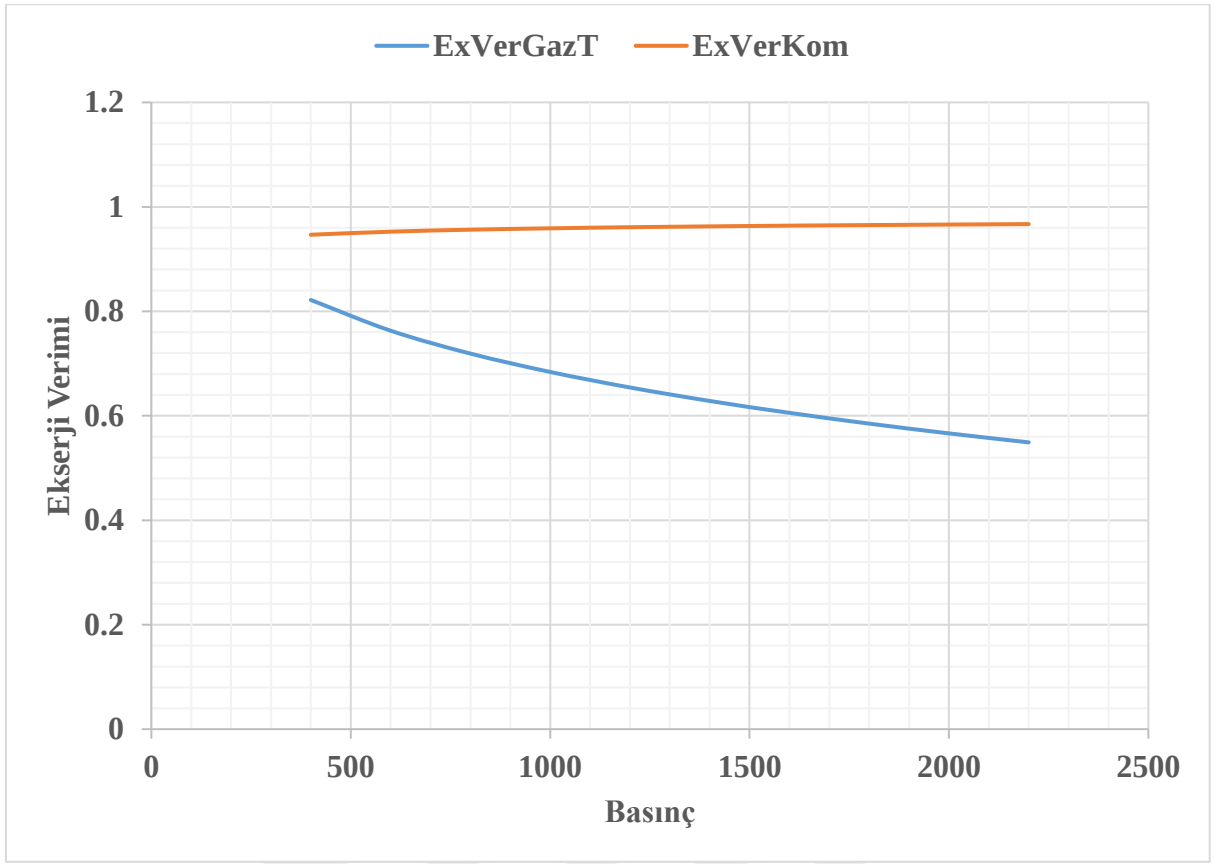
Şekil 25'te sistemin kompresör çıkış basıncının Rankine çevrimi cihazlarının ekserji kaybına etkisi eğriler şeklinde verilmiştir. İlgili değerler ayrıca Tablo 16'da verilmiştir. Kompresör çıkış basıncı artırıldığında buhar türbininde ekserji kaybı %33 civarında, kondenserdeki ekserji kaybı %50 civarında, HRSG'de ekserji kaybı %73 civarında azalmaktadır. Kompresör çıkış basıncının artırılması Rankine çevrimi cihazlarının ekserji kaybını azaltmakta ve Rankine çevrimini iyileştirmektedir.



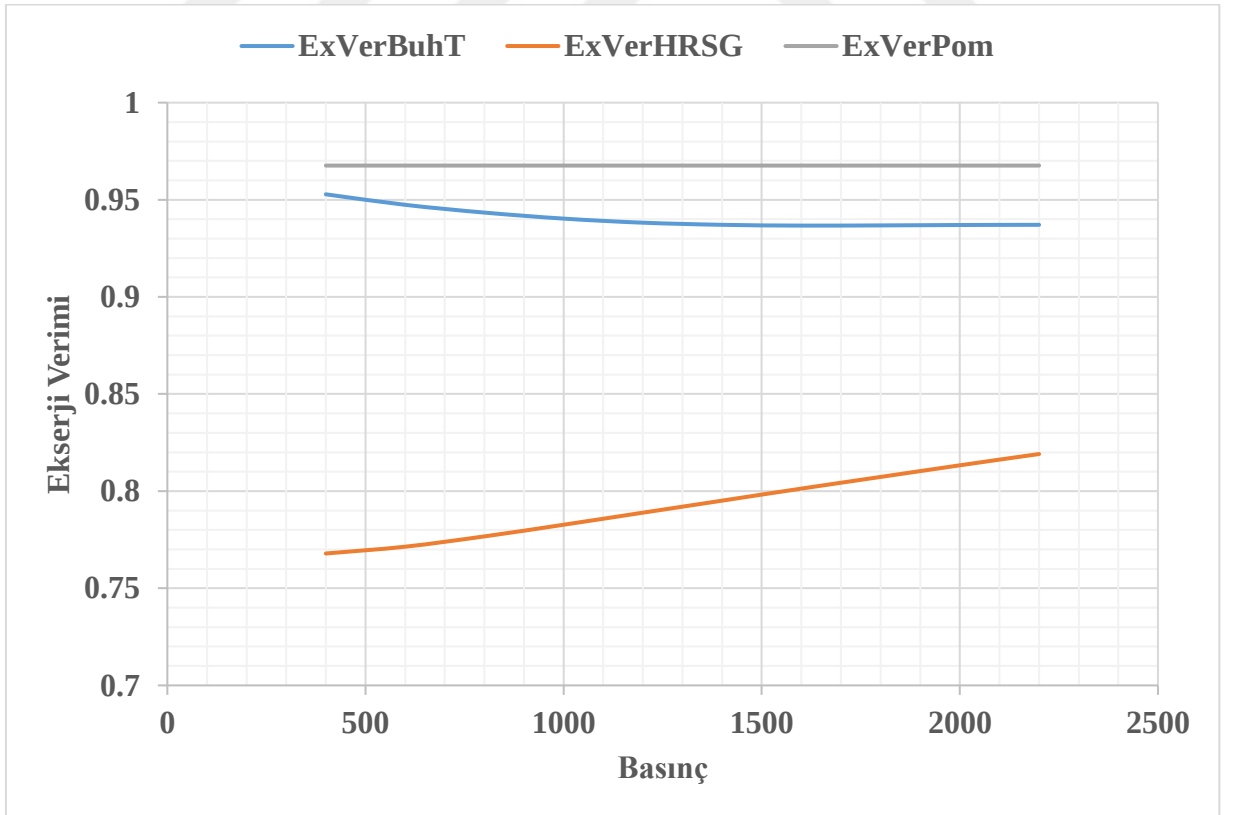
Şekil 25: Kompresör Çıkış Basıncının Rankine Çevrimi Cihazları Ekserji Kaybına Etkisi



Şekil 26: Kompresör Çıkış Basıncının Tüm Sistemin Ekserji Verimine Etkisi



Şekil 27: Kompresör Çıkış Basıncının Brayton Çevrimi Cihazları Ekserji Verimine Etkisi

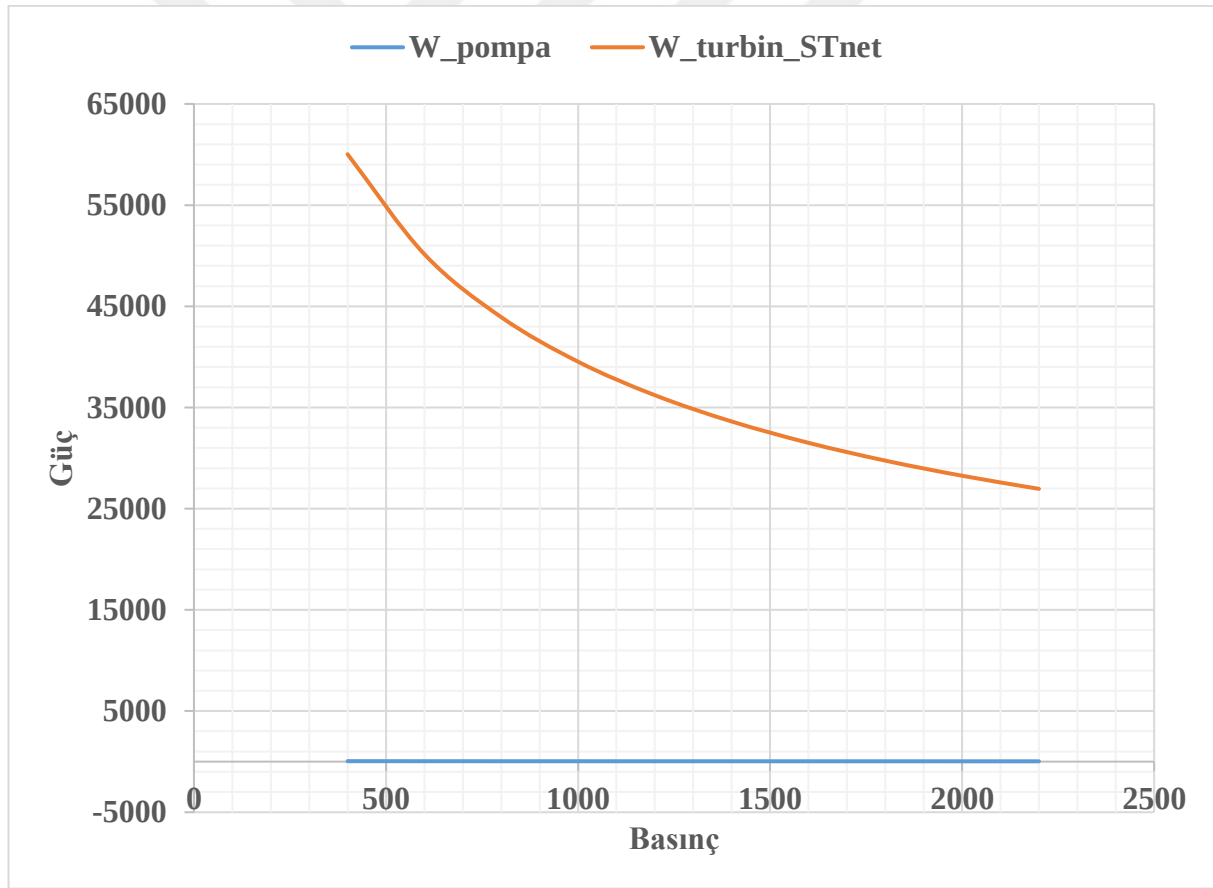


Şekil 28: Kompresör Çıkış Basıncının Rankine Çevrimi Cihazları Ekserji Verimine Etkisi

Şekil 26’da sistemin kompresör çıkış basıncının tüm sistemin ekserji verimine etkisi eğriler şeklinde verilmiştir. İlgili değerler ayrıca Tablo 17’de verilmiştir. Kompresör çıkış basıncı artırıldığında tüm sistemin ekserji verimi %72’den %79’a çıkmaktadır. Yani ekserji verimi artışı %10 civarındadır. Kompresör çıkış basıncının artırılması Brayton çevrimini de iyileştirmektedir.

Şekil 27’de sistemin kompresör çıkış basıncının Brayton çevrimi cihazlarının ekserji verimine etkisi eğriler şeklinde verilmiştir. İlgili değerler ayrıca Tablo 18’de verilmiştir. Kompresör çıkış basıncı artırıldığında kompresör verimi %2 civarında artmakta, ancak gaz türbini verimi %28 civarında azalmaktadır.

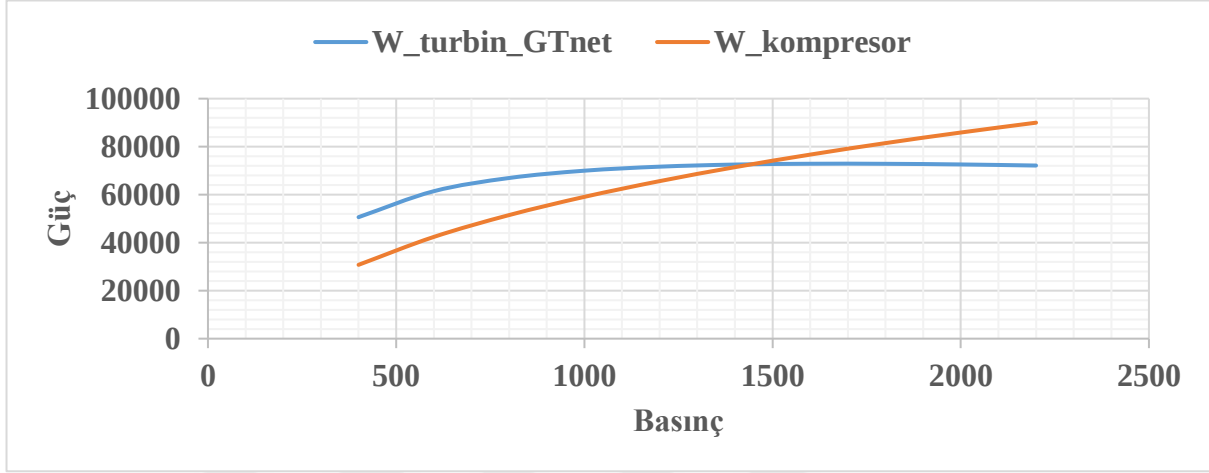
Şekil 28’de sistemin kompresör çıkış basıncının Rankine çevrimi cihazlarının ekserji verimine etkisi eğriler şeklinde verilmiştir. İlgili değerler ayrıca Tablo 19’da verilmiştir. Kompresör çıkış basıncı artırıldığında pompa verimi sabit kalırken, buhar türbini verimi %2 civarında azalmakta ve HRSG ekserji verimi %6 civarında artmaktadır.



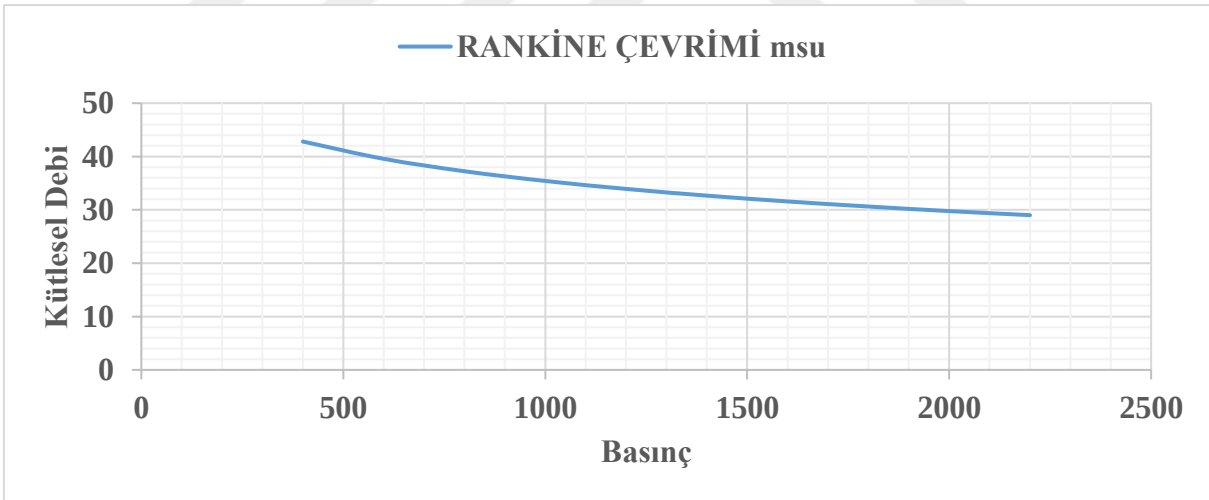
Şekil 29: Kompresör Çıkış Basıncının Buhar Türbini ve Pompa Gücüne Etkisi

Şekil 29’da sistemin kompresör çıkış basıncının buhar türbini ve pompa gücü üzerine etkisi eğriler şeklinde verilmiştir. İlgili değerler ayrıca Tablo 20’de verilmiştir. Kompresör çıkış basıncı artırıldığında pompa gücü sabit kalırken buhar türbini gücü %53 kadar azalmaktadır.

Şekil 30’da sistemin kompresör çıkış basıncının gaz türbini ve kompresör gücü üzerine etkisi eğriler şeklinde verilmiştir. İlgili değerler ayrıca Tablo 21’de verilmiştir. Kompresör çıkış basıncı artırıldığında gaz türbininden elde edilen net güç 2200 kPa basınca kadar artmakta ancak daha yüksek basınçlarda gaz türbini gücü düşmektedir. Kompresöre harcanan güç ise hızla artmaktadır.



Şekil 30: Kompresör Çıkış Basıncının Gaz Türbini ve Kompresör Gücüne Etkisi



Şekil 31: Kompresör Çıkış Basıncının Rankine Çevrimi Kütlesel Debisine Etkisi

Şekil 31’de sistemin kompresör çıkış basıncının Rankine çevriminin iş akışkanının kütlesel debisi üzerine etkisi eğriler şeklinde verilmiştir. İlgili değerler ayrıca Tablo 22’de verilmiştir. Kompresör çıkış basıncı artırıldığında Rankine çevriminin iş akışkanının kütlesel debisi %27 civarında azalmaktadır.

Tablo 6: Sistemin Kompresör ve Pompa Basıncına Göre Optimum Çalışma Şartları

OPTİMUM ÇALIŞMA ŞARTLARI VE NOKTALAR			
<i>P2=2200 kPa ve P7=7600 kPa için</i>			
ExVerGazT=0,5491	h0=293,3 kJ/kg	ExVerHRSG=0,9827	T0=20 [C]
REKcik=262453 kW	h0su=84,01 kJ/kg	ExVerKom=0,967	T0K=293,2 [K]
REKgir=262453 kW	h1=293,3 kJ/kg	ExVerPom=0,9354	T1=20 [C]
BuhTURcik=98397 kW	h10=146,6 kJ/kg	ExVerTümSis=0,8511	T10=35 [C]
BuhTURgir=98417 kW	h2=743,3 kJ/kg	GTurbincik=262453 kW	T2=454 [C]
effi=0,92	h2s=707,3 kJ/kg	GTurbingir=262453 kW	T3=1200 [C]
En1=0 kW	h3=1606 kJ/kg	s0=6,842 kJ/kgK	T4=501,9 [C]
En10=1864 kW	h4=795 kJ/kg	s0su=0,2965kJ/kgK	T5=40 [C]
En2=89993 kW	h4s=724,5 kJ/kg	s1=6,842 kJ/kgK	T7=35,36 [C]
En3=262453 kW	h5=313,5 kJ/kg	s10=0,5051 kJ/kgK	T8=494,9 [C]
En4=100329 kW	h7=154,9 kJ/kg	s2=6,892 kJ/kgK	T9=45,81 [C]
En5=4022 kW	h7s=154,3 kJ/kg	s2s=6,842 kJ/kgK	TUMTEScik=172461kW
En6=172461 kW	h8=3392 kJ/kg	s3=7,703 kJ/kgK	TUMTESgir=172461kW
En7=2110 kW	h9=2235 kJ/kg	s4=7,798 kJ/kgK	W_komp=89993 kW
En8=98417 kW	h9s=2134 kJ/kg	s4s=7,703 kJ/kgK	W_kompiz=82793 kW
En9=63991 kW	KOMcik=82793 kW	s5=6,884 kJ/kgK	W_net_tot=106311 kW
Ex1=0 kW	KOMgiren=82793 kW	s7=0,5073 kJ/kgK	W_pompa=246,5 kW
Ex10=43,44 kW	msu=29,75 kg/s	s7s=0,5051 kJ/kgK	W_pompaiz=226,8 kW
Ex11=42225 kW	mhava=200 kg/s	s8=6,739 kJ/kgK	WturGTiznet=86230 kW
Ex12=43,44 kW	P0=101,3 kPa	s9=7,054 kJ/kgK	WturGTnet=72132 kW
Ex2=87022 kW	P1=101,3 kPa	s9s=6,739 kJ/kgK	WturSTiznet=37192 kW
Ex3=211937 kW	P10=10 kPa	HRSGcik=102439 kW	WturbSTnet=34179 kW
Ex4=44244 kW	P2=2200 kPa	HRSGgir=102439 kW	Yoguscik=63991 kW
Ex5=1518 kW	P3=2200 kPa	ExKAYKomp=2971 kW	Yogusgiren=63991 kW
Ex6=124915 kW	P4=120 kPa	ExKAYKond=5005 kW	POMPcik=2110 kW
Ex7=271,2 kW	P5=110 kPa	ExKAYPom=18,75 kW	POMPgir=2110 kW
Ex8=42225 kW	P7=7600 kPa	ExVerBuhT=0,929	Qgir=172461 kW
Ex9=5049 kW	P8=7600 kPa	ExKAYHRSG=772 kW	Qconden=62128 kW
ExKAYBuhT=2998 kW	P9=10 kPa	ExKAYGT=95561 kW	

SONUÇ, TARTIŞMA VE ÖNERİLER

Enerji ekonomi sektörünün temel girdisi olması sebebi ile ülkelerin ekonomik, sosyal ve kültürel gelişmelerinde önemli faktörler arasında yer almaktadır. Bu sebeple üretimin her evresinde girdi olarak bulunan enerjinin hangi kaynaklardan ve nasıl temin edildiği önemli bir role sahiptir. Ekonomik gelişmeler sonucu enerji türlerinde çeşitlilikler oluşmaktadır. Günümüzde enerji kaynakları iki alt grupta incelenmektedir. Bunlar yenilenebilir ve yenilenemez enerji kaynaklarıdır. Yenilenebilir enerji kaynakları doğada bir şekilde kendini tekrar edebilen enerji akışının kalıcı olduğu enerji kaynaklarıdır. Bu kaynakların yenilenme oranları kaynağın tükenme oranından daha yüksektir. Yenilenemeyen enerji kaynakları ise doğal bir şekilde yenilenme özelliğine sahip olmayan tükenbilir enerji kaynaklarıdır. Enerji kaynaklarının azalması ile beraber mevcut olan enerji kaynaklarını daha iyi kullanabilmek amacı ile termodinamiğin ikinci kanun analizi olarak da bilinen ekserji analizi geliştirilmiştir. Ekserji, üretim yapılan enerjinin yararlı bölümü olarak tanımlanmaktadır. Yararlı bölümünden kasıt enerjinin başka bir enerji biçimine dönüştürülebilen bölümüdür. Ekserji analizi ile termal sistemlerdeki enerji kayıpları belirlenir ve bu kayıpların azaltılması adına bazı önlemler alınır.

Rankine çevriminin pompa basıncının 400 kPa'dan 7600 kPa'ya artması ile ekserji verimi %76'dan %85'e çıkmakta ve Brayton çevriminin kompresyon basıncının 400 kPa'dan 2200 kPa'ya çıkması ile de ekserji verimi %72'den %79'a yükselmektedir. Burada iki çevrimin optimum çalışacağı bu çalışma şartları beraber uygulandığında tüm sistemin ekserji verimi %86'yı aşmaktadır. Brayton ve Rankine çevriminin maksimum verimli olduğu çalışma şartları beraber uygulandığında sistemin optimum çalışma şartları elde edilmektedir.

KAYNAKÇA

- Barbier, E. (2002). Geothermal energy technology and current status: An overview. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 6.
- Başol, K. (1994). *Doğal kaynaklar ekonomisi; Doğal kaynaklar, enerji ve çevre sorunları*. İzmir: Anadolu Matbaası.
- Bayrakçeken, H. B. (2019). *Doğal gazlı kombine çevrimli bir santralin ekserji analizi ile incelenmesi* (Yüksek lisans tezi). Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makina Mühendisliği Ana Bilim Dalı.
- Berberoğlu, N. (1982). *Türkiye'nin ekonomik gelişmesinde enerji sorunu*. Eskişehir: Eskişehir İktisadi ve Ticari İlimler Akademisi Yayınları.
- Bhattacharyya, S. (2011). *Energy economics concepts, issues, markets and governance*. New York: Springer London Dordrecht Heidelberg.
- Boyle, G. (2004). *Renewable energy; Power for a sustainable future*. London: Oxford Pub.
- Burton, T., Jenkins, N., Sharpe, D. ve Bossanyi, E. (2011). *Wind Energy Handbook*. United Kingdom: Wiley Publication.
- Dickson, M. ve Fanelli, M. (2003). *Geothermal energy: Utilization and technology. India: United nations educational, scientific and cultural organization*. Oxford: Oxford University Press.
- Ebenhack, W. (1995). *Energy resources avilabilty, use and impact*. Tulsa Oklahoma: PennWell Publishing Company.
- Ellebban, O., Abu-rub, H. ve Blaabjerg, F. (2014). Renewable energy resources: Current status, future prospects and their enabling technology. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 39.
- Fanchi, J. R. (2004). *Energy technology and directions for the future*. USA: Elsevier Academic Pres.
- Gümüş, B.S. (2019). *Bir doğalgaz kombine çevrim güç santralinde enerji ve ekserji analizi* (Yüksek lisans tezi). Yalova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Enerji Sistemleri Mühendisliği Ana Bilim Dalı.
- Herbert, G., Iniyar, S., Sreevalsan, E. ve Rajapandian, S. (2007). A review of wind energy technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 11.
- Jorde, K. ve Kaltschmitt, M. (2007). *Hydroelectric power generation. Renewable energy: technology, economics and environment*. Germany: Springer.
- Kelly, R. A. (2007). *Energy supply and renewable resources*. New York: Infobase Publusing.
- Klass, D. (1998). *Biomass for renewable energy, fuels and chemicals*. USA: Academic Press.

- Loo, V. ve Koppejan, J. (2008). *The handbook of biomass combustion and cofiring*. London: Earthscan.
- Maradin, D., Cerovic, L. ve Mjeda, T. (2017). Economic effects of renewable energy technologies. *Naše Gospodarstvo/Our Economy*, 63(2).
- Özil, E., Şişbot, S. ve Olgun, B. (2012). *Elektrik enerjisi teknolojileri ve enerji verimliliği*. İstanbul: TESAB Yayınları.
- Özcan, E.C., Eren, T. (2013). Bakım planlamasında TOPSIS yöntemi uygulaması: Doğalgaz kombine çevrim santrali örneği. *International Journal of Engineering Research and Development*, 6(2).
- Özdamar, A., Gürsel, K. T., Örer, G. ve Pekbey, Y. (2004). Investigation of the potential of wind-waves as a renewable energy resource: By the example of Cesme-Turkey. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 8.
- Paceşila, M. (2015). Solar energy policy developments in Europe. *Theoretical and Empirical Researches in Urban Management*, 10(1).
- Pandey, B. ve Karki, A. (2017). *Hydroelectric energy: Renewable energy and the environment*. New York: CRC Press.
- Pykh-Malkina, I. ve Pykh, Y. (2002). *Sustainable energy: Resources, technology and planning*. Boston: WIT Press.
- Quaschnig, V. (2005), *Understanding renewable energy systems*. USA: Quicksilver Drive Sterling.
- Rasillo-calle, F., Groot, P., Hemstock, S. ve Woods, J. (2015). *The biomass assessment handbook: Energy for a sustainable environment*. New York: Routledge.
- Renewable Energy Statistics. (2022). International Renewable Energy Agency (IRENA). Erişim adresi: <https://www.irena.org/publications/2022/Jul/Renewable-Energy-Statistics-2022>.
- Seifried, D. ve Witzel, W. (2010). *Renewable energy-The facts*. London: Earthscan.
- Sorensen, B. (2000). *Renewable energy: Its physics, engineering, use, environmental impacts, economy and planning aspects*. Denmark: Academic Press.
- Şen, Z. (2002). *Temiz enerji ve kaynakları*. İstanbul: Su Vakfı Yayınları.
- T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı. (2022). Enerji. Erişim adresi: www.enerji.gov.tr.
- Türkiye Elektrik İletim A.Ş., Elektrik İstatistikleri, “Türkiye Aylık Elektrik Enerjisi İstatistik Raporu 1,” www.enerji.gov.tr/tr-TR/EIGM-Raporlari.
- Twidell, J. ve Weir, T. (2015). *Renewable energy sources*. Oxon: Routledge Taylor & Francis Group.
- Ün, Ü. (2013). Dalga enerjisi: Teknolojisi, ekonomisi, çevresel etkisi ve Dünya’daki durumu. *II. Yenilenebilir Enerji Kaynakları Sempozyumu*.

- Yağlı, H., Koç, Y., Koç, A., Görgülü, A., ve Tandiroğlu, A. (2016). Parametric optimization and exergetic analysis comparison of subcritical and supercritical organic Rankine cycle (ORC) for biogas fuelled combined heat and power (CHP) engine ex-haust gas waste heat. *Energy*, 111.
- Yılmaz, M. (2012). Türkiye'nin enerji potansiyeli ve yenilenebilir enerji kaynaklarının elektrik enerjisi üretimi açısından önemi. *Ankara Üniversitesi Çevre Bilimleri Dergisi*, 4(2).
- Yılmaz, A. O. ve Uslu, T. (2007). The role of coal in energy production consumption and sustainable development of Turkey. *Energy Policy*, 35.
- Yılmaz, A. O. ve Uslu, T. (2007). The role of coal in energy production consumption and sustainable development of Turkey. *Energy Policy*, 35.
- Younger, P. (2015). Geothermal Energy: Delivering on the Global Potential. *Energies*, 8(10).



EKLER

Ek 1. Hesaplanan ve Eğrisi Çizilen Çalışma Şartları

Tablo 7: Sistemin Pompa Çıkış Basıncı ile Brayton Cihazlarındaki Ekserji Kaybı

BRAYTON ÇEVİRİMİ		
P7	ExKAYGT	ExKAYKomp
7600	95561	2971
6800	95561	2971
6000	95561	2971
5200	95561	2971
4400	95561	2971
3600	95561	2971
2800	95561	2971
2000	95561	2971
1200	95561	2971
400	95561	2971

Tablo 8: Sistemin Pompa Çıkış Basıncı ile Ekserji Verimi

TÜM ÇEVİRİM	
P7	ExVerTümSis
7600	0,8511
6800	0,8483
6000	0,8450
5200	0,8412
4400	0,8366
3600	0,8310
2800	0,8239
2000	0,8140
1200	0,7988
400	0,7651

Tablo 9: Sistemin Pompa Çıkış Basıncı ile Rankine Ekserji Verimi

RANKİNE ÇEVİRİMİ			
P7	ExVerBuhT	ExVerHRSG	ExVerPom
7600	0,9290	0,9827	0,9354
6800	0,9297	0,9747	0,9365
6000	0,9305	0,9655	0,9378
5200	0,9312	0,9547	0,9395
4400	0,9320	0,9417	0,9417
3600	0,9329	0,9259	0,9446
2800	0,9339	0,9056	0,9486
2000	0,9350	0,8778	0,9545
1200	0,9366	0,8347	0,9641
400	0,9437	0,7398	0,9818

Tablo 10: Sistemin Pompa Çıkış Basıncı ile Brayton Ekserji Verimi

BRAYTON ÇEVİRİMİ		
P7	ExVerGazT	ExVerKom
7600	0,5491	0,9670
6800	0,5491	0,9670
6000	0,5491	0,9670
5200	0,5491	0,9670
4400	0,5491	0,9670
3600	0,5491	0,9670
2800	0,5491	0,9670
2000	0,5491	0,9670
1200	0,5491	0,9670
400	0,5491	0,9670

Tablo 11: Sistemin Pompa Çıkış Basıncı ile Kütlesel Debi

TÜM ÇEVİRİM	
P7	msu
7600	29,75
6800	29,66
6000	29,56
5200	29,47
4400	29,38
3600	29,29
2800	29,20
2000	29,11
1200	29,03
400	28,94

Tablo 12: Sistemin Pompa Çıkış Basıncı ile Buhar Türbini ve Pompa Gücü

RANKİNE ÇEVİRİMİ		
P7	W_turbin_STnet	W_pompa
7600	34179	246,5
6800	33828	219,9
6000	33422	193,4
5200	32946	167,1
4400	32378	140,9
3600	31678	114,9
2800	30782	89,03
2000	29555	63,32
1200	27648	37,76
400	23446	12,34

Tablo 13: Sistemin Pompa Çıkış Basıncı ile Gaz Türbini ve Kompresör Gücü

BRAYTON ÇEVİRİMİ		
P7	W_turbin_GTnet	W_kompresor
7600	72132	89993
6800	72132	89993
6000	72132	89993
5200	72132	89993
4400	72132	89993
3600	72132	89993
2800	72132	89993
2000	72132	89993
1200	72132	89993
400	72132	89993

Tablo 14: Sistemin Pompa Çıkış Basıncı ile Tüm Gücü

TÜM ÇEVİRİM	
P7	W_net_total
7600	106311
6800	105959
6000	105554
5200	105078
4400	104510
3600	103810
2800	102914
2000	101687
1200	99780
400	95578

Tablo 15: Sistemin Kompresör Çıkış Basıncı ile Gaz Türbini ve Kompresör Ekserji Kaybı

BRAYTON ÇEVİRİMİ		
P2	ExKAYGT	ExKAYKomp
2200	95561	2971
2000	91205	2910
1800	86520	2841
1600	81441	2763
1400	75879	2671
1200	69708	2561
1000	62741	2426
800	54681	2252
600	45003	2013
400	32620	1642

Tablo 16: Sistemin Kompresör Çıkış Basıncı ile Rankine Çevrim Cihazları Ekserji Kaybı

RANKİNE ÇEVİRİMİ				
P2	ExKAYBuhT	ExKAYHRSG	ExKAYKond	ExKAYPom
2200	2188	8018	5590	2,389
2000	2293	8699	5778	2,452
1800	2413	9478	5989	2,523
1600	2553	10381	6230	2,601
1400	2699	11444	6531	2,691
1200	2846	12723	6920	2,795
1000	2987	14303	7441	2,917
800	3130	16329	8181	3,067
600	3309	19077	9344	3,259
400	3548	23167	11475	3,526

Tablo 17: Sistemin Kompresör Çıkış Basıncı ile Sistemin Ekserji Verimi

TÜM ÇEVİRİM	
P2	ExVerTümSis
2200	0,7933
2000	0,7920
1800	0,7901
1600	0,7875
1400	0,7839
1200	0,7790
1000	0,7722
800	0,7623
600	0,7468
400	0,7194

Tablo 18: Sistemin Kompresör Çıkış Basıncı ile Gaz Türbini ve Kompresör Ekserji Verimi

BRAYTON ÇEVİRİMİ		
P2	ExVerGazT	ExVerKom
2200	0,5491	0,9670
2000	0,5663	0,9661
1800	0,5850	0,9651
1600	0,6056	0,9640
1400	0,6284	0,9626
1200	0,6542	0,9610
1000	0,6839	0,9589
800	0,7191	0,9563
600	0,7629	0,9525
400	0,8217	0,9466

Tablo 19: Sistemin Kompresör Çıkış Basıncı ile Rankine Çevrim Cihazları Ekserji Verimi

RANKİNE ÇEVİRİMİ			
P2	ExVerBuhT	ExVerHRSG	ExVerPom
2200	0,9371	0,8191	0,9676
2000	0,9370	0,8133	0,9676
1800	0,9368	0,8073	0,9676
1600	0,9367	0,8013	0,9676
1400	0,9371	0,7951	0,9676
1200	0,9382	0,7889	0,9676
1000	0,9403	0,7827	0,9676
800	0,9434	0,7767	0,9676
600	0,9474	0,7714	0,9676
400	0,9528	0,7679	0,9676

Tablo 20: Sistemin Kompresör Çıkış Basıncı ile Buhar Türbini ve Pompa Güçleri

RANKİNE ÇEVİRİMİ		
P2	W_pompa	W_turbin_STnet
2200	31,39	26959
2000	32,23	28252
1800	33,15	29748
1600	34,18	31506
1400	35,36	33616
1200	36,72	36213
1000	38,34	39525
800	40,31	43926
600	42,83	50147
400	46,34	60028

Tablo 21: Sistemin Kompresör Çıkış Basıncı ile Gaz Türbini ve Kompresör Gücü

BRAYTON ÇEVİRİMİ		
P2	W_turbin_GTnet	W_kompresor
2200	72132	89993
2000	72584	85887
1800	72855	81472
1600	72875	76686
1400	72535	71447
1200	71666	65636
1000	69978	59077
800	66938	51493
600	61433	42393
400	50618	30760

Tablo 22: Sistemin Kompresör Çıkış Basıncı ile Kütlesel Debi

RANKİNE ÇEVİRİMİ	
P2	msu
2200	29,01
2000	29,77
1800	30,63
1600	31,58
1400	32,67
1200	33,93
1000	35,42
800	37,24
600	39,57
400	42,81

ÖZ GEÇMİŞ

Ali BOZKURT İlkokul ve ortaokulu Ardahan da tamamladı. Lise öğrenimini İstanbul Ümraniye de tamamladı. Marmara Üniversitesi Talaşlı Üretim Öğretmenliği, Bayburt Üniversitesi Makine Mühendisliği Lisans programlarını bitirdi. Rumeli Üniversitesi İş Sağlığı ve Güvenliği Alanında Yüksek Lisansını bitirdi. Özel setörde inşaat alanında kendi iş yerini işletti. Daha sonra sırasıyla Ardahan İl Milli Eğitim Müdürlüğünde Ücretli Sınıf Öğretmenliği, Ardahan İl Özel İdaresinde Şantiye Şefi olarak çalıştı. Şu an hala Yalova İl Özel İdaresinde Makine Mühendisi olarak çalışmaktadır.

