



**YENİLENEBİLİR ENERJİ KAYNAKLARININ
EKSERJETİK ANALİZİ**

Ayşe MENTEŞE

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

YENİLENEBİLİR ENERJİ KAYNAKLARININ EKSERJETİK ANALİZİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Ayşe MENTEŞE

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, Ayşe MENTEŞE tarafından hazırlanan “Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının Ekserjetik Analizi” başlıklı bu çalışma, 22.01.2025 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 “Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının Ekserjetik Analizi” başlıklı program seçin tezimin bilimsel etik değerlere ve kurallara uygun, özgün bir çalışma olduğunu, aksinin tespit edilmesi halinde her türlü yasal yaptırımını kabul edeceğimi beyan ederim.

24.03.2025

Ayşe MENTEŞE



ÖN SÖZ

Bu tez çalışmasının hazırlanmasında bilgi ve tecrübeleriyle bana rehberlik eden, yol gösterici katkılarını esirgemeyen değerli hocalarım Doç. Dr. Rabi Karaali'ye ve Dr. Öğr. Üyesi Arzu Keven'e en içten teşekkürlerimi sunarım.

Akademik yolculuğum boyunca her daim yanımda olan, sevgisini ve desteğini esirgemeyen canım anneme, babama ve her zaman güç kaynağım olan biricik kardeşime ve ailesine şükranlarımı sunuyorum. Varlıklarıyla bana ilham veren sevdiklerimin manevi desteği, bu süreci daha anlamlı ve değerli kılmıştır.

Emek veren, katkı sağlayan ve yanımda olan herkese en derin teşekkürlerimle...

Ayşe MENTEŞE

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

YENİLENEBİLİR ENERJİ KAYNAKLARININ EKSERJETİK ANALİZİ

AYŞE MENTEŞE

Bayburt Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Rabi KARAALİ

İkinci Danışman: Öğr. Gör. Dr. Arzu KEVEN

Bayburt-2024, Sayfa: 71

Enerji sistemlerinde yalnızca mevcut performansın belirlenmesi yeterli değildir; aynı zamanda sistemin nasıl daha verimli, sürdürülebilir ve ekonomik hale getirilebileceği de analiz edilmelidir. Bu bağlamda sistemin genel optimizasyonu, tüm bileşenlerin bir bütün olarak değerlendirilmesiyle gerçekleştirilmelidir. Burada Brayton ve Rankine Çevrimleri basınç değerlerine göre optimizasyonları yapılmış daha sonra her iki çevrimin optimum çalıştığı çalışma şartları için kombine çevrimin optimizasyonu yapılmıştır. Sistemin optimizasyonu sonucu elde edilen çalışma şartları tablolarla ve eğriler halinde verilmiştir. Tüm sistemin kompresör ve pompa basınçlarına göre optimum çalışma şartlarının toplu gösterimi de ayrıca verilmiştir.

Bu analiz sistemin ekserji kaybının hangi cihazlarda ne kadar gerçekleştiğini göstermiştir. Sistem verimliliğini artırmaya yönelik çalışmalarda öncelikli iyileştirme hedefi cihazların performansının artırılması olmalıdır. Ayrıca özellikle ısı geçişi ve genleşme süreçlerinin optimize edilmesi, sistemin ikinci yasa verimliliğini önemli ölçüde iyileştirecektir.

Anahtar kelimeler: Yenilenebilir enerji, ekserji, verim, performans.

ABSTRACT

M. SC. THESIS

EXERGIC ANALYSIS OF RENEWABLE ENERGY SOURCES

Bayburt University

Institute of Graduate Studies

Department of Mechanical Engineering

Thesis Advisor: Assoc. Prof. Dr. Rabi KARAALI

Second Thesis Advisor: Dr. Lec. Arzu KEVEN

Bayburt-2025, Pages:71

In energy systems, it is not enough to determine only the current performance; it should also be analyzed how the system can be made more efficient, sustainable and economical. In this context, the overall optimization of the system should be carried out by evaluating all components as a whole. Here, Brayton and Rankine Cycles were optimized according to pressure values, then the combined cycle was optimized for the operating conditions where both cycles operate optimally. The operating conditions obtained as a result of the optimization of the system are given in tables and curves. The collective representation of the optimum operating conditions of the entire system according to the compressor and pump pressures is also given.

This analysis has shown how much exergy loss occurs in which devices of the system. In studies aimed at increasing system efficiency, the primary improvement target should be to increase the performance of the devices. In addition, optimizing the heat transfer and expansion processes in particular will significantly improve the second law efficiency of the system.

Keywords: Renewable energy, exergy, efficiency, performance.

İÇİNDEKİLER

KABUL VE ONAY.....	II
BEYANNAME.....	III
ÖN SÖZ	IV
ÖZET	V
ABSTRACT	VI
İÇİNDEKİLER.....	VII
TABLOLAR.....	IX
ŞEKİLLER.....	X
KISALTMALAR.....	XI
GİRİŞ.....	1
Araştırmanın Konusu ve Problemi	1
Araştırmanın Amacı	1
Araştırmanın Önemi ve Gerekçesi	1
Araştırmanın Sınırlılıkları	2
Varsayımlar	2
Terim ve Tanımları	2
BİRİNCİ BÖLÜM.....	3
1. YENİLENEBİLİR ENERJİ KAYNAKLARI	3
1.1. YENİLENEBİLİR ENERJİ NEDİR	3
1.2. YENİLENEBİLİR ENERJİ KAYNAKLARI NELERDİR	3
1.2.1. Hidroelektrik Enerjisi	5
1.2.2. Rüzgâr Enerjisi	6
1.2.3. Güneş Enerjisi	6
1.2.4. Jeotermal Enerji.....	7
1.2.5. Biokütle Enerjisi	7
1.2.6. Dalga.....	8
1.2.7. Hidrojen Enerjisi	8
1.3. YENİLENEBİLİR ENERJİ KAYNAKLARININ VERİMLİLİĞİNİ ETKİLEYEN FAKTÖRLER	9
1.4. YENİLENEBİLİR ENERJİ KAYNAKLARININ ÇEVRESEL FAKTÖRLER İÇİN ÖNEMİ.....	10
İKİNCİ BÖLÜM	13
2. MATERYAL VE METOT.....	13
2.1. EKSERJİ KAVRAMI	13
2.1.1. Ekserji Çeşitleri	14
2.2. EKSERJİ ANALİZİ	15
2.3. YENİLENEBİLİR ENERJİ KAYNAKLARININ EKSERJETİK ANALİZİ	16
2.3.1. Güneş Enerjisi Sistemi için Ekserji Analizi	17
2.3.3. Jeotermal Enerji Sistemi için Ekserji Analizi.....	26
2.3.4. Biyokütle Enerjisi Sistemi için Ekserji Analizi.....	31
2.3.5. Hidroelektrik Enerji Sistemi için Ekserji Analizi.....	36
2.4. JEOTERMAL ENERJİ KAYNAKLARINDA ORGANİK RANKİNE ÇEVİRİMİ.....	42
2.4.1. ORC'nin Jeotermal Enerjide Kullanımı.....	42

2.4.2. Orc Sistemi Bileşenleri.....	43
2.5. ORGANİK RANKİNE ÇEVİRİMİ ÇALIŞMA PRENSİBİ	45
2.5.1. Çok Kademeli Çevrimler için Termodinamik Analiz	46
ÜÇÜNCÜ BÖLÜM.....	51
3. BULGULAR	51
3.1. BULGULAR	51
3.2. GENEL SİSTEM OPTİMİZASYONU	63
SONUÇ VE ÖNERİLER	67
KAYNAKÇA.....	68
ÖZ GEÇMİŞ	71



TABLÖLAR

Tablo 1: Ekserji ve Enerji Karşılaştırması.....	13
Tablo 2: Çeşitli Maddelerin Standart Kimyasal Ekserjileri.....	15
Tablo 3: Kaskad Bir Çevrimde Cihazlarının Kütle ve Enerji Dengesi ve Entropi Üretimi. ...	48
Tablo 4: Kombine Bir Çevrimde Cihazlarının Entropi Dengesi, Ekserji Kaybı ve Ekserji Verimi	50
Tablo 5: Sistemin Genel Verileri.....	64
Tablo 6: Çevrimdeki Cihazlarının Entropi Dengesi, Ekserji Kaybı ve Ekserji Verimi.....	64
Tablo 7: Çevrimdeki Cihazlarının Kütle ve Enerji Dengesi ve Entropi Üretimi	65



ŞEKİLLER

Şekil 1: Mart 2023 Dönemi Lisanslı Elektrik Üretiminin Kaynak Bazında Dağılımı.....	5
Şekil 2: Hidrolik Enerji Üretim Şeması	5
Şekil 3: Toplam Rüzgâr Kurulum Kapasitelerinin Tarihsel Gelişimi.....	6
Şekil 4: Güneş Enerjisi Üretim Şeması.....	7
Şekil 5: Biokütle Enerjisi Üretim Şeması	8
Şekil 6: Ekserji Bileşenleri.....	14
Şekil 7: Verilen İki Durum Arasındaki Fiziksel Ekserji	14
Şekil 7: Organik Rankine Çevrimi Çalışma Prensibi.....	45
Şekil 8: Brayton ve Rankine Çevrimlerinden Oluşan Kombine Çevrim	47
Şekil 9: Brayton Çevriminde Kompresör Basıncındaki Artışın Ekserji Kaybı Üzerindeki Etkisi	51
Şekil 10: Rankine Çevriminde Kompresör Basıncındaki Artışın Ekserji Kaybı Üzerine Etkisi	52
Şekil 11: Kompresör Basıncına Göre Tüm Sistemde Üretilen İş Miktarının Değişimi.....	53
Şekil 12: Kompresör Basıncının Brayton Çevriminde Gaz Türbini ve Kompresör Üzerine Etkisi	53
Şekil 13: Tüm Sistem Ekserji Verimi ile Kompresör Basıncı Arasındaki İlişki	54
Şekil 14: Kompresör Basıncının, Buhar Türbini, Isı Geri Kazanım Buhar Jeneratörü, Isı Değiştiricisi ve Pompanın Ekserji Verime Olan Etkisi.....	55
Şekil 15: Kompresör Basıncının Tüm Sistem Ekserji Verimine Olan Etkisi	55
Şekil 16: Kompresör Basıncının Gaz Türbini, Reaktör ve Kompresör Enerji Üretimi Üzerine Etkisi	56
Şekil 17: Kompresör Basıncına Bağlı Olarak Net Türbin Gücü ve Pompa Gücünün Değişimi	57
Şekil 18: Pompa Basıncının Isı Gücü Üzerindeki Etkisi	57
Şekil 19: Kompresör Basıncı ile Rankine Çevrimi Akışkanı Olan Pentan Arasındaki Etkileşimler	58
Şekil 20: Pompa Basıncının Ekserji Üzerindeki Etkisi.....	58
Şekil 21: Brayton Çevriminde Pompa Basıncının Gaz Türbini Ve Kompresördeki Ekserji Kayıplarına Etkisi.....	59
Şekil 22: Rankine Çevriminde Pompa Basıncının (Kpa) Çevrimdeki Bileşenlerin Ekserji Verimleri Üzerindeki Etkisi	59
Şekil 23: Brayton Çevriminde Pompa Basıncının Gaz Türbini ve Kompresörün Ekserji Verimi Üzerindeki Etkisi	60
Şekil 24: Pompa Basıncının Tüm Sistemin Ekserji Verimi Üzerindeki Etkisi	60
Şekil 25: Brayton Çevriminde Pompa Basıncının Çevrimin Farklı Enerji Bileşenleri Üzerindeki Etkisi.....	61
Şekil 26: Rankine Çevriminde Pompa Basıncının Farklı Enerji Bileşenleri Üzerindeki Etkisi	62
Şekil 27: Pompa Basıncının Tüm Sistemin Net İş Üretimi Üzerindeki Etkisi	62
Şekil 28: Pompa Basıncı ile Rankine Çevrimi Akışkanı Olan Pentanın Kütlesel Debisi Arasındaki Etkileşimler.....	63

KISALTMALAR

ε	: Birim ekserji(kJ/kg)
e	: Birim enerji(kJ/kg)
E	: Enerji (kJ)
E_k	: Kinetik Ekserji
E_p	: Potansiyel Ekserji
EX	: Ekserji(kJ)
H	: Entalpi
T	: Sıcaklık
K	: Kelvin
Ex	: Ekserji
H	: Entalpi
s	: Entropi
Q	: Isıl Enerji
m	: Kütle
P	: Basınç
E	: Enerji
Kg	: Kilogram
w	: İş (kW)
ST	: Buhar Türbini
GT	: Gaz Türbini
$HRSG$	: Isı Geri Kazanım Buhar Jeneratörü
I	: Tersinmezlik
P	: Basınç (kPa)
W	: İş
Ex	: Ekserji
c	: Isı Kapasitesi
b	:Betz Limiti
v	:Rüzgar Hızı
A	: Alan
ρ	: Havanın yoğunluğu

SİMGELER

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



GİRİŞ

Dünya nüfusunun sürekli artması ve endüstrileşmiş toplumların enerji taleplerinin giderek yükselmesi, enerji sektörünü yenilenebilir enerji kaynaklarına olan ilgiyi artırmaya yöneltmiştir. Bu bağlamda, sürdürülebilir enerji çözümleri, enerji verimliliği ve çevresel etkilerin minimize edilmesi, küresel enerji dönüşümünün temel hedefleri olarak öne çıkmaktadır.

Günümüzde, güneş, rüzgâr, hidroelektrik ve diğer yenilenebilir enerji kaynakları, enerji üretim portföyümüzü çeşitlendirme potansiyeli taşımaktadır. Ancak, bu kaynakların ekserji performansının detaylı bir şekilde incelenmesi ve anlaşılması, enerji sistemlerimizin etkinliği ve çevresel sürdürülebilirliği açısından kritik önem arz etmektedir.

Araştırmanın Konusu ve Problemi

- Yenilenebilir enerji kaynaklarının ekserji analizi üzerine odaklanan bu araştırma, enerji sistemlerinin verimliliği ve sürdürülebilirliği açısından önemli bir konuyu ele almaktadır.
- Yenilenebilir enerji kaynaklarının ekserji analizi, bu kaynakların enerji dönüşüm süreçlerindeki kayıpların belirlenmesine ve optimize edilmesine yönelik bir perspektif sunmaktadır.

Araştırmanın Amacı

- Bu araştırmanın temel amacı, yenilenebilir enerji kaynaklarının ekserji analizini yaparak enerji sistemlerinin verimliliğini artırmaya yönelik potansiyel stratejileri incelemektir.
- Elde edilen sonuçlar, enerji mühendisliği ve sürdürülebilir enerji uygulamaları açısından değerli katkılarda bulunacaktır.

Araştırmanın Önemi ve Gerekçesi

- Dünya genelinde enerji talebinin artması ve çevresel sorunların önemi, yenilenebilir enerji kaynaklarına olan ilgiyi artırmıştır.
- Yenilenebilir enerji kaynaklarının ekserji analizi, enerji sistemlerinin tasarımı ve işletilmesinde daha etkili ve sürdürülebilir çözümler geliştirmek adına kritik bir öneme sahiptir.

Araştırmanın Sınırlılıkları

- Bu çalışma, belirli yenilenebilir enerji kaynaklarına odaklanacak ve genel bir perspektif sunacaktır.
- Yenilenebilir enerji teknolojilerindeki en güncel gelişmeleri içermeyecek olup, belirli bir tarih aralığındaki verilere dayanacaktır.

Varsayımlar

- Araştırma sürecinde kullanılan verilerin güvenilir ve doğru olduğu varsayılmaktadır.
- Ekserji analizde kullanılan metodolojilerin, enerji sistemlerinin karmaşıklığına uygun olduğu varsayılmaktadır.

Terim ve Tanımları

- Ekserji Analizi: Bir enerji sistemindeki işlemlerin ve enerji transferinin, kullanılabilirlik yönünden termodinamik olarak analizi.
- Yenilenebilir Enerji Kaynakları: Rüzgâr, güneş, hidroelektrik, jeotermal gibi doğal süreçlerle oluşturulan enerji kaynakları.
- Verimlilik: Bir sistemden elde edilen yararlı iş çıkışının, girdiye oranı.

BİRİNCİ BÖLÜM

1. YENİLENEBİLİR ENERJİ KAYNAKLARI

Yenilenebilir enerji kaynakları, doğal süreçlerle devamlı olarak oluşturulan ve insan müdahalesi olmaksızın tükenmeyen enerji kaynaklarını ifade eder. Güneş, rüzgâr, hidroelektrik, jeotermal ve biyoenjerji gibi kaynaklar, bu kategoriye örnek teşkil eder.

1.1. YENİLENEBİLİR ENERJİ NEDİR

Yenilenebilir enerji, doğanın kendi evrimi içinde, bir sonraki gün aynen mevcut olabilen enerji kaynağını ifade etmektedir (Turan 2006). Yenilenebilir enerji kaynakları, yenilenebilir oluşları, en az düzeyde çevresel etki yaratmaları, işletme ve bakım masraflarının az olması ve ulusal nitelikleri ile güvenilir enerji sağlama özellikleri ile dünya ve ülkemiz için önemli bir yere sahiptir (Haskök, 2005).

Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının Elektrik Enerjisi Üretimi Amaçlı Kullanımına ilişkin Kanun Tasarısı Taslağı'nın 3. maddesinde yenilenebilir enerji kaynakları içerisinde hidrojen, rüzgâr, güneş, jeotermal, biyokütle, biyogaz, dalga ve gel-git gibi kaynaklar sıralanmaktadır (Turan, 2006).

Günümüzde AB ülkeleri enerji tüketimlerinin %5,6'sını yenilenebilir enerji kaynaklarından sağlamaktadır. Avrupa Birliği'nin 2010 yılında, toplam elektrik üretiminin %22,1'inin, toplam enerji tüketiminin ise, %12'sinin yenilenebilir kaynaklardan karşılanması hedeflenmektedir.

Türkiye'de ise yenilenebilir enerji kaynaklarının tüketim içindeki payı 2000 yılında sadece %11 seviyesindedir. Bu rakamın uygulanan politikalar sonucunda 2010 yılında %7'ye düşmesi beklenmektedir (Turan, 2006).

1.2. YENİLENEBİLİR ENERJİ KAYNAKLARI NELERDİR

En genel anlatımla, yenilenebilir enerji kaynağı; enerji kaynağından alınan enerjiye eşit oranda veya kaynağın tükenme hızından daha çabuk bir şekilde kendini yenileyebilmesi ile tanımlanır.

Yenilenebilir enerji kaynakları, genel olarak yedi gruba ayrılmaktadır;

- 1) Hidroelektrik Enerjisi
- 2) Rüzgâr Enerjisi
- 3) Güneş Enerjisi
- 4) Jeotermal Enerji

5) Biyokütle Enerjisi

6) Dalga Enerjisi

7) Hidrojen Enerjisi

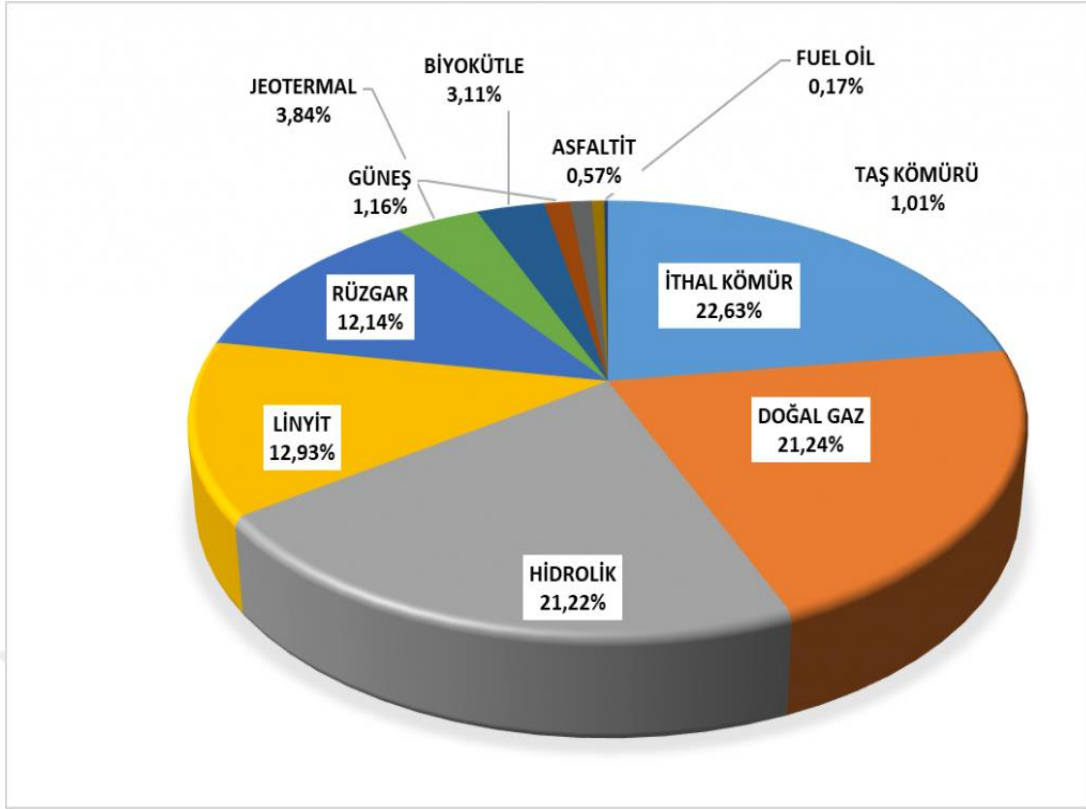
Dünyada var olan ve gerçekleşen doğal olaylar sonucunda elde edilebilen bu enerjiler; hidroelektrik enerjisi, rüzgâr enerjisi, güneş enerjisi, jeotermal enerji, biyokütle enerjisi, okyanus kaynaklı dalga ve gel-git enerjisidir. Bu kaynaklar kullanıldıkça tükenmez, kısa süre içerisinde yenilenir (Adıyaman, 2012).

Dünyanın 21. yüzyılda karşı karşıya bulunduğu en büyük sorunlardan biri güvenli enerji tedarikidir. Günümüzde, ülkelerin enerjiyi üretme ve kullanma biçimi sürdürülebilir değildir. Bunun en açık kanıtı insan kaynaklı iklim değişikliğidir. Enerji tüketiminin 1990-2008 yılları arasında %40 arttığı dünyada, enerjinin %80'i fosil kaynaklıdır.

Yenilenebilir enerji tükenmeyen enerji kaynağıdır ve bu kaynaklar doğada mevcut olup, enerji üretimi sırasında doğaya herhangi bir zararları da yoktur. Yenilenebilir enerjinin tanımı çeşitli şekillerde yapılmıştır. Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu'nun 04/08/2002 tarih ve 24836 sayılı Resmî Gazetede yayımlanarak yürürlüğe giren Elektrik Piyasası Lisans Yönetmeliği'ne göre; rüzgâr, güneş, jeotermal, dalga, gel-git, biyokütle, biyogaz ve hidrojen enerjisine dayalı üretim tesisleri ile rezervuarsız nehir ve kanal tipi hidroelektrik üretim tesisleri ve kurulu gücü 20 megavat (MW) ve altında olan rezervuarlı hidroelektrik üretim tesisleri yenilenebilir enerji sınıfında değerlendirilmektedir (Savrul, 2010).

Ülkemiz yenilenebilir enerji kaynakları bakımından oldukça zengin bir yatağa sahiptir. Buna rağmen kullanım oranı kaynak yoğunluğuna oranla düşüktür.

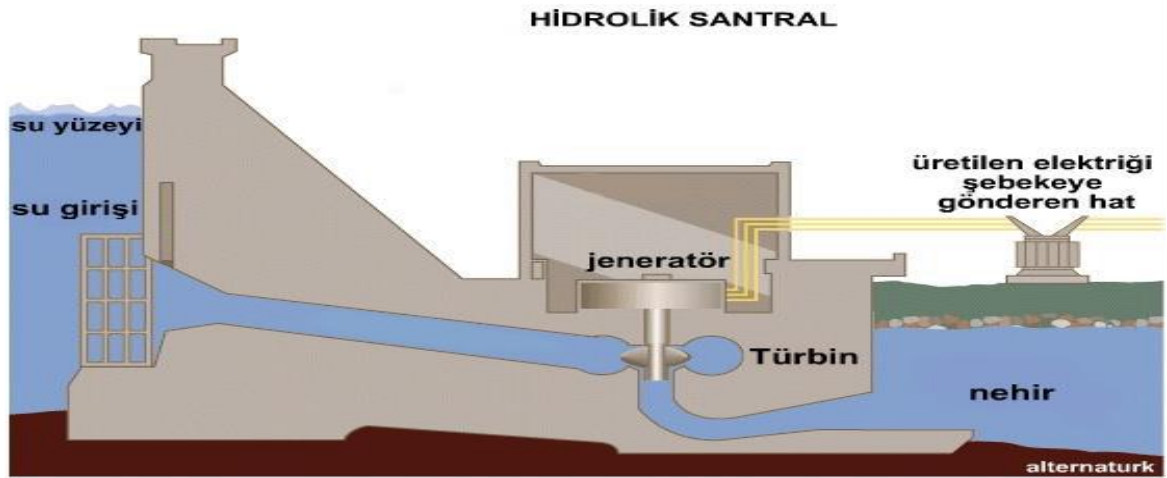
Türkiye'de yenilenebilir enerji kullanımının artırılması amacıyla çeşitli teşvikler yapılmaktadır. 6446 sayılı Elektrik Piyasası Lisans Yönetmeliğine göre yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanılması durumunda lisans bedelinin yalnızca %1'i ödenecek ve yenilenebilir enerji kaynaklarını kullanan üretim tesisleri, lisans sözleşmesinde belirtilen tamamlanma süresini takip eden ilk sekiz yıl lisans ücreti ödemeyeceklerdir.



Şekil 1: Mart 2023 Dönemi Lisanslı Elektrik Üretim Kaynak Bazında Dağılımı (%) (EPDK, 2024)

1.2.1. Hidroelektrik Enerjisi

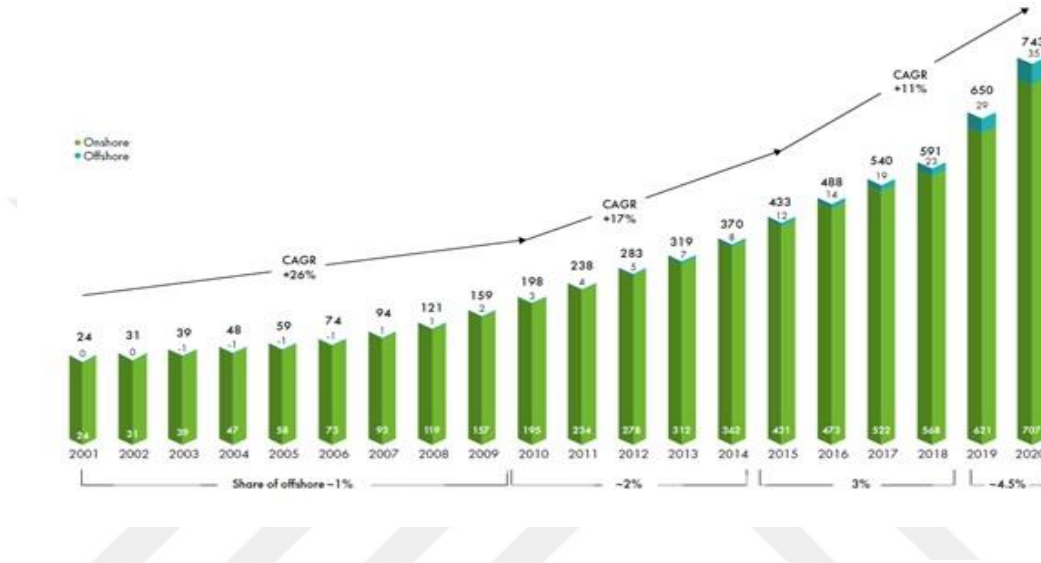
Hidroelektrik enerjinin kaynağı sudur. Hidroelektrik yüksek bir noktadan aşağıda akışta bulunan suyun hareketinden elde edilen bir enerji çeşididir. Bu enerji hidroelektrik santraller aracılığı ile üretilip, kullanılabilir bir kaynak haline getirilir. İlk hidroelektrik santrali 1882 yılında Amerika'da inşa edilmiştir. Yıllar içinde dünya genelinde yaygın kullanılan bir enerji çeşidi olmuştur.



Şekil 2: Hidrolik Enerji Üretim Şeması (Gupta, 2006)

1.2.2. Rüzgâr Enerjisi

Türkiye'de rüzgârdan faydalanılarak elde edilen enerji, gelişme potansiyeli yüksek olan yenilenebilir enerji kaynaklarından birisidir. Türkiye'nin etrafının denizlerle çevrili olması nedeniyle, denizden karaya doğru olan hava akımı rüzgâr enerjisi elde etme olanağını arttırmaktadır. Türkiye'de 1998 yılında kurulan ilk rüzgâr enerji santralleri sırasıyla, Çeşme Germiyan ve Çeşme Alaçatı'da bulunmaktadır. Çeşme Germiyan santralleri 1,7 MW ve Çeşme Alaçatı santralleri ise 7,2 MW seviyesindedir (Koçaslan, 2010).

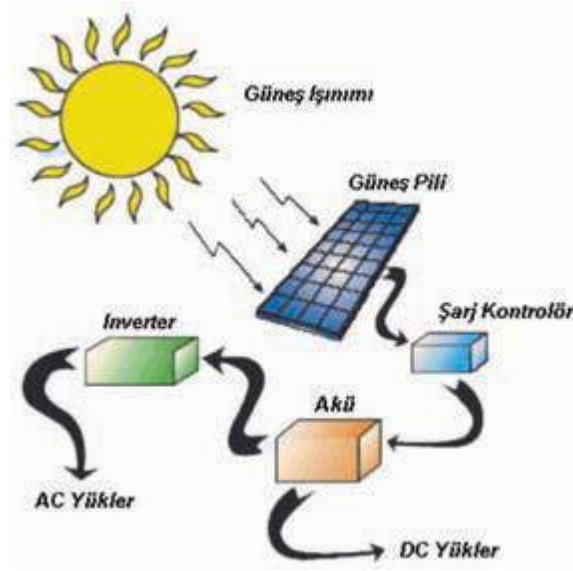


Şekil 3: Toplam Rüzgâr Kurulum Kapasitelerinin Tarihsel Gelişimi (World Energy Council, 2022)

1.2.3. Güneş Enerjisi

Enerjinin temel kaynağı güneştir. Burada ki güneş enerjisi, güneşin çekirdeğindeki hidrojen gazının kimyasal tepkimeler sonucunda helyuma dönüşmesiyle birlikte ortaya ışıma enerjisidir. Geçmişte güneş enerjisi sadece ısı enerjisine dönüştürülen bir kaynak olarak kullanılırken, zamanımızda güneş panelleri kullanılarak elektrik enerjisi de üretilmektedir. Güneş kaynaklı enerji ile ocaklar, güneş pilleri, sıcak su eldesi, güneş enerjisinden faydalanılan otomobiller, su arıtma ve tarımsal sulama gibi alanlarda karşılaşılmaktadır (TC. Serhat Kalkınma Ajansı, 2015).

Günümüzde dünyaya ulaşan güneş enerjisinin değerlendirilmesinde iki yol izlenmektedir. Bunlar; ısıya dönüştürme ve elektrik enerjisine çevirmedir. Güneş enerjisini ısı enerjisine dönüştürmede “toplaçlar”; doğrudan elektriğe dönüştürmede de “güneş hücreleri-güneş pilleri” kullanılmaktadır. Şekil 4’de güneş enerjisi üretim aşamaları gösterilmiştir. Burada elektrik enerjisine dönüştürmede güneş pilleri kullanılmıştır.



Şekil 4: Güneş Enerjisi Üretim Şeması (TC. Serhat Kalkınma Ajansı, 2015)

1.2.4. Jeotermal Enerji

Jeotermal enerji, yer kabuğunun altında sıcak su, buhar ve gazların kullanılmasına dayanır. Dünyanın çekirdeği, elementlerin kademeli olarak radyoaktif bozulması nedeniyle 5000 °C'lık bir sıcaklığı korur. Isı enerjisi sürekli olarak sıcak çekirdekten kabuğa akar ve volkanik faaliyetler bu sıcak malzemeyi kabuktan, yer kabuğunun altındaki yakın yüzeye taşır ve sıcak su, buhar veya gaz şeklinde bir termal enerji yer kabuğunun altında depolanır. Jeotermal sistemler bu enerjiyi ya elektrik üretmek ya da ısınmak için kullanır (Baria, 1990).

Jeotermal enerji projeleri, sera gazı emisyonları, hava kalitesi, arazi kullanımı ve su kalitesi gibi düşük çevresel etkilerle genel olarak temiz ve yenilenebilirdir. Amerika, Afrika ve Kuzey Asya en yüksek jeotermal potansiyele sahiptir. Türkiye yüksek jeotermal potansiyele sahip ülkeler arasındadır.

1.2.5. Biokütle Enerjisi

Biokütle enerjisi en eski enerji kaynaklarından biridir ve yüz yıllardır kullanılmaktadır. Basitçe, organik maddelerden enerji üretimine biokütle enerjisi denir. Biyoenerjinin besleme stokunun sürekli olması, her yerde bulunabilmesi ve gereksinimlere bağlı olarak kolaylıkla depolanabilmesi önemli özelliklerindendir. Potansiyel hammadde aşağıda listelenmiştir (Demirbaş, 2008).

- Tarımsal kalıntılar: mısır, şeker kamışı küspesi, kabuklar, buğday samanı, meyve çekirdekleri;
- Otsu bitkiler (enerji bitkileri): filotu (çın kamışı), dallı darı, bambu ve diğer otlar;

-

1.2.6. Dalga

Periyodik dalga hareketlerinden yararlanılarak enerji üretilmesi fikri yeni olmayıp yaklaşık 200 yıl kadar öncesine dayanmaktadır. 1799 yılından beri pek çok mekanik üreteç patenti alınmış olmakla birlikte direkt elektrik enerjisi üretimine yönelik çalışmalar XX. yüzyılda Amerika'nın California ve San Francisco eyaletlerinde sürdürülmüştür (Mutlu, 2013).

Hidrojen, havadan 14,4 kez daha hafif olup, basit yapıya sahiptir ve sık rastlanan elementidir. Ayrıca hidrojen zehirsiz, rengi ve kokusu olmayan bir gaz özelliğindedir. Hidrojen, güneş ve diğer yıldızların termonükleer tepkime vermiş olduğu ısı yakıt olarak evrenin temel enerji kaynağıdır.

Hidrojen gazı (H_2) yaklaşık $-2530^{\circ}C$ 'de sıvılaştırılarak depolanma yapılabilir. Sıvı hidrojenin hacmi, gaz halindeki hacminin oranı 1/700'ü kadar düşük seviyededir.

Hidrojen gazı bilenen tüm yakıtlar karşılaştırıldığında birim kütle başına en yüksek enerji veren bir enerji kaynağıdır. (1kg hidrojen gazı, 2,1 kg doğalgaz veya 2,8 kg petrolün sahip olduğu enerjiye eşdeğerdir.). Hidrojen doğada serbest bir şekilde değil bileşikler halinde bulunmaktadır. Hidrojen enerjisi elde edilmesinde çevre kirletici hiçbir gaz ve zararlı kimyasal madde salınımı söz konusu değildir.

1.3. YENİLENEBİLİR ENERJİ KAYNAKLARININ VERİMLİLİĞİNİ ETKİLEYEN FAKTÖRLER

Yenilenebilir enerji kaynaklarının verimliliğini etkileyen bir dizi faktör bulunmaktadır. Bu faktörler, genellikle enerji üretim sistemlerinin tasarımı, çevresel koşullar, teknolojik gelişmeler ve ekonomik unsurlar gibi çeşitli alanlarda bulunmaktadır. İşte yenilenebilir enerji kaynaklarının verimliliğini etkileyen önemli faktörler:

- **Hava Koşulları ve İklim:** Rüzgâr enerjisi, güneş enerjisi ve hidroelektrik enerji gibi birçok yenilenebilir enerji kaynağı, hava koşullarına ve iklim şartlarına bağlıdır. Rüzgâr türbinleri için yeterli rüzgâr hızı, güneş enerjisi sistemleri için güneş ışığı, süre ve yoğunluğu, hidroelektrik enerji için su seviyeleri gibi faktörler enerji üretim verimliliğini etkiler (IPCC, 2021; IEA, 2023).
- **Teknolojik Gelişmeler:** Yenilenebilir enerji teknolojilerindeki gelişmeler verimliliği artırabilir. Örneğin, fotovoltaiik panellerin verimliliği zaman içinde artmış ve maliyetleri düşmüştür. Yenilikçi tasarımlar, malzeme geliştirmeleri ve daha etkili enerji dönüşüm süreçleri enerji üretiminde daha yüksek verimlilik sağlayabilir (Fraunhofer, 2022).
- **Depolama Teknolojileri:** Yenilenebilir enerji kaynaklarının arzı genellikle değişkendir. Bu nedenle enerji depolama teknolojileri, enerjiyi depolayarak talep artışlarına veya arz düşüşlerine karşı esneklik sağlar. Gelişmiş depolama sistemleri enerji verimliliğini artırabilir (DOE Energy Storage Grand Challenge, 2020).
- **Enerji İletim Altyapısı:** Yenilenebilir enerji kaynakları genellikle rüzgâr alanları, güneş tarlaları veya hidroelektrik barajlar gibi uzak bölgelerde bulunabilir. Bu nedenle etkili bir enerji iletim altyapısı, enerjinin üretildiği yerden tüketildiği yere taşınmasını sağlar. Enerji iletim hatlarındaki kayıplar ve gelişmiş iletim teknolojileri sistem verimliliğini etkiler (World Bank, 2022).

- **Maliyetler:** Yenilenebilir enerji teknolojilerinin maliyeti, genellikle yatırımcılar ve enerji endüstrisi için önemli bir faktördür. Maliyetlerin düşmesi, bu teknolojilerin daha geniş çapta kullanılmasını teşvik eder. Sübvansiyonlar, teşvikler ve ekonomik politikalar da yenilenebilir enerji kullanımını artırabilir (IRENA, 2023).
- **Toplumsal Kabul ve Politik Destek:** Yenilenebilir enerji projelerinin toplum tarafından kabul görmesi ve politik destek alması önemlidir. Çevresel etkilerin yönetilmesi, yerel toplulukların katılımı ve politik düzenlemeler projelerin başarısını etkileyebilir (UNEP, 2020).
- **Politika ve Düzenlemeler:** Yenilenebilir enerjiyi teşvik eden ve destekleyen etkili politika ve düzenlemeler sektördeki büyümeyi etkiler. FiT (Feed-in Tariff) gibi teşvik mekanizmaları, karbon kredileri ve hükümetin enerji politikaları yenilenebilir enerji projelerinin finansmanını ve uygulanabilirliğini etkiler (REN21, 2022).
- **Teknoloji Entegrasyonu:** Yenilenebilir enerji sistemlerinin mevcut enerji altyapısıyla nasıl entegre edileceği önemlidir. Enerji depolama, akıllı şebeke teknolojileri ve enerji yönetimi sistemleri gibi gelişmiş teknolojilerin entegrasyonu, verimliliği artırabilir ve enerji sisteminin güvenilirliğini sağlayabilir (IEEE Smart Grid, 2021).

Bu faktörler, yenilenebilir enerji kaynaklarının verimliliğini etkileyen ancak bunlarla sınırlı olmayan pek çok değişkeni içermektedir. Yenilenebilir enerji sektörü, sürekli olarak bu faktörleri göz önünde bulundurarak teknolojik ve operasyonel gelişmeleri teşvik etmektedir.

1.4. YENİLENEBİLİR ENERJİ KAYNAKLARININ ÇEVRESEL FAKTÖRLER İÇİN ÖNEMİ

Yenilenebilir enerji kaynaklarının çevresel faktörler için önemi büyük ölçüde çevre sürdürülebilirliği, iklim değişikliğiyle mücadele ve doğal kaynakların korunmasıyla ilgilidir. İşte bu önemin altını çizen bazı ana noktalar:

- **Düşük Karbon Ayak İzi:** Yenilenebilir enerji kaynakları, fosil yakıtlara kıyasla daha düşük karbon ayak izine sahiptir. Bu, yenilenebilir enerji kullanımının sera gazı emisyonlarını azaltarak iklim değişikliğiyle mücadelede etkili bir strateji olduğu anlamına gelir (IPCC, 2021; IEA, 2023).
- **Temiz Hava ve Su:** Yenilenebilir enerji teknolojileri, hava ve su kirliliğine neden olan zararlı emisyonları minimumda tutar. Bu durum, hava kalitesini artırır, su kaynaklarını korur ve ekosistemlere zarar vermez (UNEP, 2020).

- **Doğal Kaynakları Koruma:** Fosil yakıtların çıkarılması ve kullanılması, doğal kaynakları tüketir ve çeşitli çevresel sorunlara yol açar. Yenilenebilir enerji kaynakları, sürdürülebilir doğal kaynakları kullanır ve bu kaynakları korur (IRENA, 2023).
- **Bio çeşitliliği Destekleme:** Yenilenebilir enerji projeleri, uygun bir şekilde planlandığında ve uygulandığında, bio çeşitliliği destekleyebilir. Proje alanlarının bio çeşitlilik açısından zengin habitatlara dönüştürülmesi, çeşitli bitki ve hayvan türlerinin yaşam alanlarını koruyabilir (Bank, 2022).
- **Çevresel Etki Değerlendirmesi:** Yenilenebilir enerji projeleri genellikle çevresel etki değerlendirme süreçlerinden geçer. Bu süreç, projenin çevresel etkilerini değerlendirmek ve olumsuz etkileri en aza indirmek için alınacak önlemleri belirlemek amacıyla kullanılır (REN21, 2022).
- **Enerji Depolama ve İletim İhtiyaçlarını Azaltma:** Yenilenebilir enerji kaynaklarının yerel olarak kullanılması, enerji iletim hatlarının uzun mesafelerde döşenmesine ve buna bağlı olarak çevresel etkilere yol açan enerji kayıplarını azaltabilir (IEEE Smart Grid, 2021).
- **Toplum Katılımı ve Güç Dağılımı:** Yenilenebilir enerji projeleri, yerel toplulukları projeye dahil etme ve enerji üretimine daha fazla kontrol sağlama potansiyeli taşır. Bu, yerel toplulukların çevresel etkiler üzerinde daha fazla söz sahibi olmalarına olanak tanır (UNEP, 2020).

Bu unsurların bir araya gelmesi, yenilenebilir enerji kaynaklarının çevresel faktörler açısından önemini vurgular. Bu kaynaklar, temiz, sürdürülebilir ve çevre dostu enerji üretimi için önemli bir alternatif sunar. Ancak, projelerin planlanması ve uygulanması sırasında dikkatlice çevresel etkilerin yönetilmesi gerekmektedir. Eğer yenilenebilir enerji projeleri dikkatlice planlanmaz ve yönetilmezse, çeşitli olumsuz sonuçlar ortaya çıkabilir. İşte bu durumda karşılaşılabilecek potansiyel sorunlardan bazıları:

- **Ekosistem Zararları:** Yenilenebilir enerji tesisleri, doğal yaşam alanlarına yerleştirildiklerinde, ekosisteme zarar verebilir. Özellikle bio çeşitlilik açısından zengin bölgelerde yapılan plansız projeler, bitki ve hayvan türlerinin habitatlarını kaybetmelerine neden olabilir (IUCN, 2023).
- **Su Kaynaklarına Etki:** Hidroelektrik projeleri ve bazı diğer yenilenebilir enerji türleri su kaynaklarını etkileyebilir. Akarsu rejimlerindeki değişiklikler, su kirliliği

ve habitat kaybı gibi faktörler su ekosistemlerini olumsuz etkileyebilir (World Bank, 2022)

- **Toplum ve Nüfus Etkileşimi:** Yenilenebilir enerji projeleri, yerel toplulukları etkileyebilir. Plansız veya toplumun katılımına dayanmayan projeler, yerel halk arasında hoşnutsuzluğa ve çatışmalara yol açabilir. Bu, projenin başarısını ve sürdürülebilirliğini etkileyebilir (UNEP, 2020)
- **Gürültü ve görsel kirlilik:** Rüzgâr türbinleri, güneş panelleri ve diğer enerji altyapısı unsurları, çevresel gürültü ve görsel kirlilik yaratabilir. Bu durum, çevresel estetiği ve yerel alanların kullanılabilirliğini olumsuz etkileyebilir (IRENA, 2023).
- **Doğal Kaynak Tükenmesi:** Yenilenebilir enerji tesislerinin inşası için kullanılan malzemeler, doğal kaynakları tüketebilir. Özellikle nadir toprak elementleri gibi bazı malzemelerin çıkarılması ve işlenmesi çevresel etkileri beraberinde getirebilir (World Bank, 2022).
- **Enerji Depolama ve İletim Zorlukları:** Yenilenebilir enerji üretimi genellikle değişkendir ve talep ile eşleştirilmesi zordur. Plansız projeler, enerji depolama ve iletim sistemlerini yetersiz bırakabilir, bu da enerji güvenliğini etkileyebilir (IEEE Smart Grid, 2021)
- **İklim ve Toprak Değişiklikleri:** Yenilenebilir enerji projelerinin inşası ve işletimi, yerel iklim ve toprak özelliklerini değiştirebilir. Bu durum, erozyon, toprak kaybı ve mikro iklim değişiklikleri gibi çevresel sorunlara yol açabilir (UNEP, 2020).

Bu nedenle, yenilenebilir enerji projeleri planlanırken ve uygulanırken, çevresel etkilerin azaltılması, toplum katılımının sağlanması ve sürdürülebilirlik ilkelerine uygunluk gibi faktörlere özel önem verilmesi önemlidir. Etkin bir çevresel etki değerlendirmesi ve proje yönetimi süreci, olumsuz etkileri en aza indirmeye ve uzun vadeli sürdürülebilirliği sağlamaya yardımcı olabilir.

İKİNCİ BÖLÜM

2. MATERYAL VE METOT

2.1. EKSERJİ KAVRAMI

Tanım olarak ekserji, sistemin çevresi ile denge halinde olmadığı durumdan denge haline doğru tersinir geçişi ile ilgili olarak elde edilebilecek maksimum iş olarak tanımlanır (Çengel, 2002; Hepbaşlı, 2003)

Bir enerji kaynağından alınabilecek kullanılabilir iş, kaynağın bulunduğu çevrenin durumuna bağlıdır. Kaynak ve çevre arasındaki fark ne kadar büyükse sistemden alınacak iş de o kadar büyük olur (Rosen, 2004). Kısaca ekserji bir akım ölü duruma ulaştığında, kazanılabilen en fazla iştir (Bejan, 1988). Daha anlaşılır bir tanımlama ile ekserji, enerjinin belirli termodinamik koşullar altında diğer bir tür enerji şekline dönüşebilen bölümüdür.

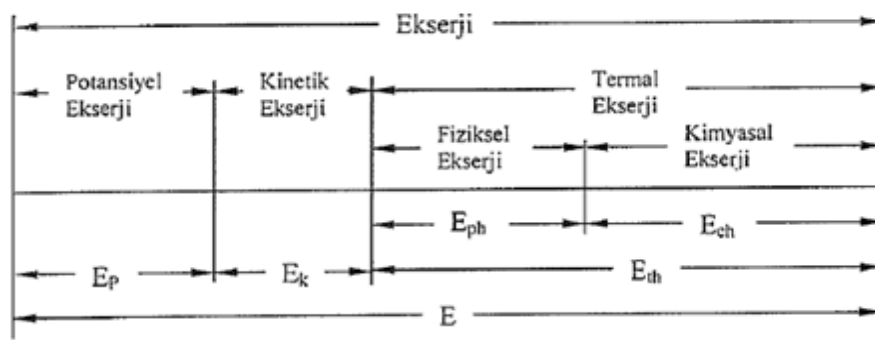
Tersinmez işlemlerde her zaman belirli bir miktar entropi artışı ile birlikte iş kaybı oluşmasına karşın, en fazla iş sadece tersinmez işlemlerde elde edilir. Ekserji, ideal veya tersinir işlemler dışında, enerji gibi korunan bir büyüklük değildir. Bu nedenle, enerjinin korunumu yasasına uymaz. Gerçek işlemlerde, tersinmezlikler nedeni ile ekserji tüketilir veya yok edilir. İşlem süresince gerçekleşen ekserji tüketimi, işleme ilişkin tersinmezlikler nedeni ile yaratılan entropi ile orantılıdır. Enerji ve ekserji kavramları Tablo 1 de karşılaştırılmıştır (Çengel, 2002; Hepbaşlı, 2003).

Tablo 1: Ekserji ve Enerji Karşılaştırması (Çengel, 2002; Hepbaşlı, 2003)

Kriter	Enerji	Ekserji
Tanım	Enerji, yok edilemez veya yaratılmaz, ancak bir formdan diğerine dönüşebilir.	Ekserji, bir enerji kaynağının iş yapabilme potansiyelini ifade eder.
Korunumu	Termodinamiğin 1. yasasına göre korunur.	Termodinamiğin 2. yasasına göre, ekserji kayıplara uğrayarak zamanla azalır.
Tükenme Durumu	Enerji hiçbir zaman tükenmez, sadece form değişir.	Ekserji tüketilebilir; tersinmezlikler nedeniyle yok olur.
İş Üretme Yeteneği	Tüm enerji türleri iş yapmaya uygun değildir.	Sadece ekserji, tamamen işe dönüştürülebilir.
Atık ve Kayıplar	Düşük sıcaklıklı enerji hâlâ mevcuttur ancak işe dönüştürülemez.	Kullanılmayan enerji kayıplar ekserji kaybıdır ve geri kazanılamaz.
Analiz Yöntemi	Enerji analizi, sistemin enerji giriş ve çıkışlarını inceler.	Ekserji analizi, sistemin enerji kalitesini ve tersinmezliklerini belirler.

2.1.1. Ekserji Çeşitleri

Bir sistemin ekserjisi; termal, kinetik ve potansiyel ekserji şeklinde üç ana kısımdan meydana gelir. Sistemin potansiyel ve kinetik enerjisi sistemin potansiyel ve kinetik ekserjisine eşittir. Termal ekserji, fiziksel ve kimyasal ekserjilerin toplamıdır (Çengel ve Boles, 2012).

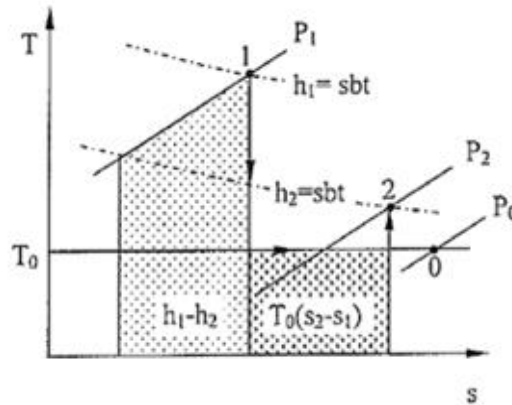


Şekil 6: Ekserji Bileşenleri (Çengel ve Boles, 2012).

Bir fiziksel olay, tersinir bir süreç yoluyla giriş sıcaklığı T ve giriş basıncı P olan ilk hâlden, çevrenin sıcaklığı T_0 ve basıncı P_0 ile termodinamik dengeye ulaştığında elde edilebilecek maksimum iş, fiziksel ekserji olarak tanımlanır (Tekel, 2006).

$$\varepsilon_{ph} = h - h_0 - T_0(s - s_0) \quad (2.1)$$

$$\varepsilon_{ph1} - \varepsilon_{ph2} = (h_1 - h_2) - T_0(s_1 - s_2) \quad (2.2)$$



Şekil 7: Verilen İki Durum Arasındaki Fiziksel Ekserji (Tekel, 2006)

Kimyasal ekserji; maddenin çevresiyle kimyasal denge halinde, madde alışverişi ve ısı transferinden dolayı, yaptığı maksimum iştir (Dincer ve Rosen, 2007).

İş ekserjisi; ekserji maksimum iş potansiyeli olarak tanımlandığından, tüm süreçlerde iş, ekserjiye eşit alınır (Dincer ve Rosen, 2007).

$$\dot{E}_{x,w} = \dot{W} \quad (2.3)$$

Tablo 2: Çeşitli Maddelerin Standart Kimyasal Ekserjileri (Çengel ve Boles, 2012)

Madde	Faz	Mol ağırlığı (kg/kMol)	Standart kimyasal ekserji(kJ/kMol)
H ₂ O	Sıvı	18	3120
CH ₄	Gaz	16	836510
CO ₂	Gaz	44	20140
H ₂ O	Gaz	18	11710
C ₈ H ₁₈	Sıvı	114	5440030
Ag	Katı	107,8	73730
Al ₂ O ₃	Katı	101,9	204270

Isı Transfer Ekserjisi, ısı geçişinden dolayı ortaya çıkan ekserji (Tekel, 2006).

$$B_{ısı} = B_{fiz} B_{kım} \quad (2.4)$$

İş ekserjisi Ekserji, maksimum iş potansiyeli olduğundan, bütün süreçlerde iş ekserjiye eşittir. (Tekel, 2006)

$$B_{iş} = W \quad (2.5)$$

Ekserji Kaybı:

Aşağıdaki denklemde bir sistemin ekserji kaybı veya tersinmezliğinin nasıl hesaplanacağı ifade edilmektedir. Bu denklemden de görüleceği gibi ekserji kaybı net entropi değişimi ile çevre sıcaklığının çarpımına eşittir (Tekel, 2006).

$$\delta B = {}_0T \sum \Delta = \Delta_{net} S T S_0 \quad (2.6)$$

2.2. EKSERJİ ANALİZİ

İkinci yasaya dayanan bir termodinamik analiz olan ekserji analizi, hal değişimlerini ve enerji sistemlerini anlamlı ve gerçekçi bir şekilde değerlendirme ve karşılaştırma için yapılan bir analizdir (Karaali, 2017). Buna göre sistemde ortaya çıkan kayıpların yeri, miktarı ile sebepleri belirlenebilir. Bu yüzden, ekserji analizi ile elde edilen sonuçlar, sistemin performansının ve tasarımlarının iyileştirilmesinde kullanılıp, en iyi performans değerinde

alışması sağlanabilir. Akış halinde olan bir maddenin manyetik, nükleer, elektrik ve yüzey gerilimleri ihmal edildiği durumda ekserji, fiziksel, potansiyel, kinetik ve kimyasal ekserji şeklinde dörde ayrılabilir (engel ve Boles, 2012).

evresine göre hareketsiz olan bir sistemde, potansiyel ve kinetik ekserji sıfır olarak alınır. Sistemin toplam ekserjisi kimyasal ve fiziksel ekserjilerinden oluşur. Toplam zgl ekserji şu şekilde yazılır (engel ve Boles, 2012).

$$ex^{top} = ex^k + ex^p + ex^{fiz} + ex^{kim} \quad (2.7)$$

Ekserji analizi, enerji sistemlerinde ısı kayıplarını, tersinmezlikleri ve düşük verimli bölgeleri belirleyerek optimum tasarım ve iyileştirme stratejileri geliştirilmesini sağlar. Geleneksel enerji analizi yalnızca enerji giriş-çıkış dengesine odaklanırken, ekserji analizi kullanılabilir enerji miktarına odaklanarak sistemin gerçek performansını değerlendirir

Ekserji analizi özellikle aşağıdaki alanlarda yaygın olarak kullanılmaktadır:

- Jeotermal Enerji Sistemleri: ORC (Organik Rankine evrimi) gibi düşük sıcaklıklı g üretim sistemlerinde atık ısıının işe dnştrlebilirliğini belirlemek.
- Atık Isı Geri Kazanımı: Endüstriyel süreçlerde açığa çıkan ısıının ne kadarının geri kazanılabileceğini analiz etmek.
- Termik ve Nükleer Santraller: Trbın, kazan ve kondenser gibi bileşenlerin verimliliğini artırmak.
- İçten Yanmalı Motorlar: Egzoz gazlarından ve soğutma sistemlerinden atılan enerjinin ne kadarının işe dönüştürülebileceğini belirlemek.

2.3. YENİLENEBİLİR ENERJİ KAYNAKLARININ EKSERJETİK ANALİZİ

Enerji ve ekserji analizi, termodinamiğin birinci ve ikinci kanunlarını birlikte ele alan ve enerjinin maksimum kullanımı veya kullanılabilirliğini ifade eden bir analiz şeklidir. Özellikle birinci kanun enerji analizi yapmakta kullanılırken, ikinci kanun tersinir ve tersinmezliği belirlediği için ekserji analizini yapmamızı sağlar (Wall, 1986; amdalı, 2004).

Enerji ve ekserji metotları ısıl proseslerde kullanılan doğruluğu kanıtlanmış metotlardır. Termodinamiğin birinci yasa analizi; ısı ve iş arasındaki farkı önemsemeden tüketilen enerji miktarını hesaplayan bir analiz olup mühendislik sistemlerinin dizayn ve analizlerinde yeterli değildir (Talbi ve Agnew, 2000). Bu nedenle, ikinci yasa olarak bilinen ekserji metodu ile termodinamikte önemli bir yeri olan tersinmezliklerden kaynaklanan ekserji kayıpları

hesaplanabilir (Sözen, 2003). Böylece bir sistem için enerji yerine ekserji hesapları da yapıldığında, enerji kaliteleri arasındaki fark da dikkate alınmış olur. Bu nedenle ekserjiye dayalı sistem değerlendirmeleri daha uygun bir yaklaşım olmaktadır.

İkinci yasa analizinde, sistemi oluşturan bileşenler ayrı ayrı göz önünde bulundurulabilir ve buna bağlı olarak hangi bileşenin ısı, boyutsal ve mali yönden geliştirilmesi gerektiği bulunabilir (Sözen, 2001; Ismail, 1989). Böylece enerji ve ekserji analizi yaparak, sistemlerde tersinmezliklere bağlı olarak meydana gelen kayıplar tespit edilerek sistemde yapılması gereken iyileştirmeler belirlenebilir. Bununla beraber sistemlerin bu şekilde analizi ile hem verimlilikleri hem de ekonomik yönden ne kadar sürede kendini amorti edip, mali olarak da kar sağlayacağı bulunabilir. Fakat burada tersinmezlik kaynaklı sistemde yapılacak kayıpları önleyici faaliyetler maliyeti arttırabilir.

Bu şekilde yapılacak tüm hesaplamalar hem ekonomik hem de verimlilik olarak yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımı amaçlanmaktadır.

2.3.1. Güneş Enerjisi Sistemi İçin Ekserji Analizi

Güneş enerjisi sistemlerinin ekserji analizi, güneş ışınımının elektrik enerjisine dönüştürülmesi sürecindeki enerji ve ekserji kayıplarını değerlendirmeyi amaçlar.

Güneş enerjisi sisteminin ekserji analizinde kullanılan temel materyaller şunlardır:

2.3.1.1. Güneş panelleri (fotovoltaik paneller)

Panel Türü: Güneş enerjisinin elektrik enerjisine dönüştürülmesinde kullanılan fotovoltaik (PV) paneller. Genellikle, monokristalin, polikristalin ve ince film güneş panelleri tercih edilir (Green ve Emery, 2014). Monokristalin paneller, daha yüksek verimliliğe sahip oldukları için analizde esas alınabilir (Fraunhofer, 2002).

Panel Yüzey Alanı: Güneş panellerinin boyutları ve yüzey alanı, güneşten ne kadar ışınımın toplanabileceğini belirler (Kalogirou, 2009).

Hücre Verimliliği: Güneş hücrelerinin güneş ışığını elektrik enerjisine dönüştürme verimliliğidir (Green vd., 2023).

Panel Sıcaklığı: Güneş panellerinin yüzey sıcaklığı, panel verimliliğini doğrudan etkiler. Sıcaklık arttıkça verim düşer (Duffie vd., Beckman, 2013).

2.3.1.2. İnvertör

AC-DC Dönüşüm Ünitesi: Güneş panellerinden üretilen doğru akım (DC) elektriğini alternatif akıma (AC) dönüştüren cihaz (Esram ve Chapman, 2007). İnvertörün verimliliğinde,

elektrik enerjisini şebeke için uygun hale getirirken yaşadığı kayıplar önemlidir. İdeal olarak, invertör verimliliği %95'in üzerindedir.

2.3.1.3. Güneş ışıınımı ve çevresel veriler

Güneş Işınımı (Güneş Enerjisi Yoğunluğu): Güneş panellerinin bulunduğu bölgeye ulaşan güneş enerjisi miktarı (W/m^2). Gün boyunca değişiklik gösterir ve analiz sırasında bu değişimler dikkate alınır (NASA SSE, 2020).

2.3.1.4. Atmosferik koşullar

Atmosfer basıncı, sıcaklık, nem ve rüzgâr hızı gibi çevresel faktörler, panel verimliliğini etkiler.

Eğer sistemde Batarya Depolama Sistemi Varsa; Güneş enerjisinden üretilen elektriğin depolanması için kullanılan lityum-iyon veya kurşun-asit bataryalardan faydalanılabilir (Linden ve Reddy, 2002).

Depolama Verimliliği: Bataryaların şarj ve deşarj süreçlerinde oluşan enerji kayıpları dikkate alınır.

2.3.1.5. Destekleyici yapılar

Panel Montajı: Güneş panellerinin açısı ve yönü, güneş ışığından maksimum fayda sağlamak için optimize edilmelidir. Panellerin eğim açısı, konuma göre belirlenir (Linden ve Reddy, 2002).

İzleme Sistemleri: Güneş ışıınımını takip eden sistemler (solar tracker) kullanılarak

2.3.1.6. Güneş ışıınımının hesaplanması

Güneş panellerine ulaşan güneş enerjisinin hesaplanması için kullanılan temel formül aşağıdaki gibidir (Çengel ve Boles, 2012):

$$E_{\text{gunes_C}} = I \cdot A \cdot \eta_{\text{optik}} \quad (2.8)$$

- $E_{\text{gunes_C}}$: Güneş panellerine ulaşan toplam enerji (W).
- I : Güneş ışıınımı (W/m^2).
- A : Güneş panelinin yüzey alanı (m^2).
- η_{optik} : Güneş panelinin optik verimliliği (güneş ışığının panelde kayba uğramadan kullanılabilme oranı).

Bu formül, güneş enerjisinin panellere ulaşan miktarını verir. Güneş ışıınımı, günün farklı saatlerinde değışiklik gösterebilir, bu nedenle analiz süresince farklı zaman aralıkları için hesaplama yapılır.

2.3.1.7. Fotovoltaik hücrelerin enerji üretimi

Fotovoltaik hücreler, güneşten gelen enerjiyi elektrik enerjisine dönüştürürken verimlilik kayıplarına sahiptir. Panelden üretilen elektrik enerjisi şu formülle hesaplanır (Çengel ve Boles, 2012):

$$E_{\text{elektrik}} = E_{\text{gunes_c}} \cdot \eta_{\text{PV}} \quad (2.9)$$

- E_{elektrik} Paneller tarafından üretilen elektrik enerjisi (W).
- η_{PV} : Güneş panelinin fotovoltaik verimliliğı (genellikle %15-%22 arası).

Bu hesaplama, hücrelerin ne kadar enerjiyi, elektrik enerjisine dönüştürdüğünü gösterir.

2.3.1.8. Ekserji verimliliğı

Fotovoltaik panellerin ekserji verimliliğı, güneş enerjisinin ne kadarının iş yapabilme kapasitesine sahip olduğunu belirler. Ekserji verimliliğı şu şekilde hesaplanır (Çengel ve Boles, 2012):

$$\eta_{\text{ekserji}} = \frac{E_{\text{elektrik}}}{E_{\text{ekserji giriş_c}}} \quad (2.10)$$

- $E_{\text{ekserji giriş_c}}$: Güneş ışıınımından gelen ekserji miktarı.
- E_{elektrik} : Fotovoltaik panellerin ürettiğı elektrik enerjisi.

Ekserji, termodinamik bir kavram olarak sistemin ne kadar iş yapabileceğini gösterir ve burada güneş enerjisinin termodinamik sınırlarına göre ne kadar iş yapabilme kapasitesinin, elektrik enerjisine dönüştürülebildiğı hesaplanır.

Güneş ışıınımı için ekserji, carnot verimliliğı (η_{Carnot}) kullanılarak hesaplanabilir (Çengel ve Boles, 2012):

$$Ex = 1 - \frac{T_{\text{cevre}}}{T_{\text{gunes}}} \cdot Q_{\text{gunes}} \quad (2.11)$$

- Ex : Güneş ışıınımının ekserjisi (W/m²),

- T_{cevre} : Çevre sıcaklığı (Kelvin cinsinden),
- T_{gunes} : Güneş yüzey sıcaklığı (Kelvin cinsinden),
- Q_{gunes} : Gelen güneş ışıını (W/m²).

Burada, $\eta_{Carnot} = 1 - \frac{T_{cevre}}{T_{gunes}}$ ifadesi, Carnot verimliliği olarak adlandırılır ve güneş ışıınının çevreye göre ekserji potansiyelini belirler.

2.3.1.9. Panel sıcaklığının etkisi

Güneş panellerinin verimliliği, yüzey sıcaklıklarına bağlı olarak değişir. Panel sıcaklığı arttıkça fotovoltaik hücrelerin verimliliği azalır. Bu durum şu formül ile ifade edilebilir (Çengel ve Boles, 2012):

$$\eta_{PV,sıcaklık} = \eta_{PV,nom} \cdot (1 - \beta \cdot (T_{panel} - T_{ref})) \quad (2.12)$$

- $\eta_{PV,sıcaklık}$: Panel sıcaklığına bağlı olarak değişen verimlilik.
- $\eta_{PV,nom}$: Panelin nominal verimliliği (belirli bir sıcaklıkta, genellikle 25°C'de belirtilir).
- β : Panelin sıcaklık katsayısı (%/°C).
- T_{panel} : Güneş panelinin sıcaklığı (°C).
- T_{ref} : Referans sıcaklık (genellikle 25°C).

Bu formül, sıcaklık arttıkça verimliliğin nasıl düştüğünü gösterir. Sıcaklık artışı, ekserji kayıplarına yol açarak sistem verimliliğini düşürür.

2.3.1.10. İnvvertör verimliliği ve elektriksel kayıplar

Fotovoltaik sistemlerde üretilen doğru akım (DC) elektrik enerjisi, alternatif akıma (AC) dönüştürülürken invertör tarafından kayıplar oluşur. İnvvertör kayıpları şu şekilde hesaplanır:

$$E_{inverter} = E_{elektrik} \cdot \eta_{inverter} \quad (2.13)$$

- $E_{inverter}$: İnvvertörden sonra elde edilen net elektrik enerjisi.
- $\eta_{inverter}$: İnvvertör verimliliği (genellikle %90 - %98 arası).

İnvvertör verimliliği düşükse, elektrik enerjisinin bir kısmı kaybolur ve bu durum sistemin ekserji kayıplarını artırır.

2.3.1.11. Elektrik depolama ve batarya kayıpları

Eğer sistemde batarya kullanılıyorsa, bataryaların şarj ve deşarj sırasında enerji kayıpları oluşur. Bu kayıpları şu şekilde hesaplanabilir:

$$E_{\text{batarya}} = E_{\text{inverter}} \cdot \eta_{\text{carj}} \cdot \eta_{\text{decarj}} \quad (2.14)$$

- E_{batarya} : Bataryadan elde edilen net elektrik enerjisi (W).
- η_{carj} : Bataryanın şarj verimliliği.
- η_{decarj} : Bataryanın deşarj verimliliği.

Şarj ve deşarj süreçlerinde her iki verimlilik faktörü de dikkate alınarak, bataryaların depolama esnasında enerji kayıplarını analiz edebilirsiniz. Bu kayıplar, depolanan enerjinin miktarını ve kullanım potansiyelini azaltır.

2.3.1.12. Toplam ekserji verimliliği

Güneş enerjisi sisteminin toplam ekserji verimliliği, fotovoltaik paneller, invertör ve batarya gibi tüm sistem bileşenlerindeki ekserji kayıplarını hesaba katarak şu şekilde hesaplanır (Çengel ve Boles, 2012):

$$\eta_{\text{ekserji,toplam}} = \frac{E_{\text{batarya}}}{E_{\text{ekserji,giris}_c}} \quad (2.15)$$

- E_{batarya} : Son aşamada, bataryadan çıkan net elektrik enerjisi (eğer batarya yoksa invertörden çıkan enerji kullanılır).
- $E_{\text{ekserji,giris}_c}$: Sisteme giren güneş enerjisinin ekserji miktarı.

Bu formül, güneş enerjisinin iş yapabilme kapasitesinden ne kadarının gerçekten kullanılabilir elektrik enerjisine dönüştürüldüğünü gösterir.

2.3.1.13. Enerji ve ekserji kayıplarının toplamı

Güneş enerjisi sisteminde meydana gelen toplam enerji ve ekserji kayıpları şu şekilde hesaplanabilir (Çengel ve Boles, 2012):

$$E_{\text{kayıp,toplam}} = E_{\text{gunes}_c} - E_{\text{batarya}} \quad (2.16)$$

$$E_{\text{kayıp,kayıp}} = \frac{E_{\text{ekserji,giris}_c}}{c} - E_{\text{batarya}} \quad (2.17)$$

Bu iki formül, sistemin toplam enerji ve ekserji kayıplarını gösterir. İlk formül, toplam enerji kaybını, ikincisi ise ekserji kaybını verir.

2.3.2. Rüzgâr Enerjisi Sistemi için Ekserji Analizi

2.3.2.1. Rüzgâr türbinleri

Türbin Türü: Sistemde kullanılan türbin tipi analiz açısından önemlidir. Yatay eksenli rüzgâr türbinleri (Horizontal Axis Wind Turbine- HAWT) veya dikey eksenli rüzgâr türbinleri (Vertical Axis Wind Turbine- VAWT) kullanılabilir. HAWT, ticari sistemlerde yaygın olarak kullanıldığından analizlerde daha sık rastlanır (Manwell, McGowan ve Rogers, 2010).

Rotor Çapı: Türbin rotorunun çapı, rüzgârın ne kadar kinetik enerjiye sahip olduğunu ve türbinin ne kadarını yakalayabileceğini belirler.

Kanatlar (Rotor Bıçakları): Rüzgârın kinetik enerjisini mekanik enerjiye dönüştürür.

Nacelle: Kanatları ve jeneratörü barındıran bölüm.

Jeneratör: Kanatların dönme hareketini elektrik enerjisine çeviren sistem.

Şaft: Rotor bıçaklarıyla jeneratör arasındaki bağlantıyı sağlar.

Dişli Kutusu (Gearbox): Türbin kanatlarının dönme hızını jeneratör için optimize eder.

2.3.2.2. Rüzgâr verileri

Rüzgâr Hızı: Türbinin bulunduğu bölgede rüzgâr hızına dair anlık ve ortalama değerlerdir. Rüzgâr hızı, sistemin performansını direkt olarak etkileyen en önemli parametrelerden biridir (Piga ve Ippolito, 2011).

Rüzgâr Yoğunluğu: Türbinin ne kadar enerji üretebileceğini belirleyen başka bir önemli parametredir. Bu değer genellikle rüzgâr hızına ve havanın sıcaklığına bağlıdır.

Rüzgâr Yönü: Türbinin en verimli şekilde çalışabilmesi için rüzgâr yönüne göre hizalanması gerekmektedir.

2.3.2.3. Elektrik üretim sistemi

Jeneratör: Türbin kanatlarının hareketinden elde edilen mekanik enerjiyi, elektrik enerjisine dönüştüren cihaz.

Invertör: Alternatif akımı (AC) düzenleyen ve elektrik şebekesine uygun hale getiren cihaz.

Kablolama ve Elektrik Altyapısı: Türbinin ürettiği elektriğin taşınmasını ve kullanılmasını sağlayan altyapı.

2.3.2.4. Hava durumu ve atmosferik veriler

Atmosfer Basıncı: Türbin performansını etkileyen atmosferik faktörlerden biridir. Yüksek basınç, rüzgâr yoğunluğunu etkileyerek üretilen enerji miktarını değiştirebilir.

Sıcaklık ve Nem: Hava yoğunluğu üzerindeki etkileri nedeniyle analizlerde dikkate alınır.

Rüzgâr enerjisi sisteminin ekserji analizi aşağıdaki adımları içerir:

a. Rüzgâr Enerjisinin Hesaplanması

Rüzgâr enerjisinin türbin kanatlarına ulaşan kinetik enerjisi, aşağıdaki formülle hesaplanır:

$$P_{\text{ruzgar}} = \frac{1}{2} \rho \cdot A \cdot v^3 \quad (2.18)$$

- P_{ruzgar} : Rüzgârın sahip olduğu güç (Watt).
- ρ : Havanın yoğunluğu (kg/m^3) (genellikle 1.225 kg/m^3 deniz seviyesinde ve 15°C 'de).
- A : Rotorun süpürdüğü alan (m^2) (yani rotor çapının karesi ile orantılıdır, $A=\pi \cdot (r^2)$)
- v : Rüzgar hızı (m/s).
- Bu formül rüzgârın türbin kanatlarına ulaşan toplam kinetik enerjisini ifade eder.

b. Betz Limiti ve Maksimum Teorik Verim

Betz limiti, bir rüzgâr türbininin maksimum teorik verimliliğini ifade eder ve bu değerin %59,3 olduğu bilinmektedir. Bu, rüzgârın kinetik enerjisinin en fazla %59,3'ünün mekanik enerjiye dönüştürülebileceği anlamına gelir. Betz limiti aşağıdaki şekilde ifade edilir (Betz, 1920):

$$P_{\text{maks}} = P_{\text{ruzgar}} \cdot 0.593 \quad (2.19)$$

Bu adımda, türbinin maksimum verimliliği Betz limitine göre belirlenir ve teorik en yüksek enerji miktarı hesaplanır.

c. Türbinin Ekserji Verimliliği

Türbinin ekserji verimliliği, rüzgârın kinetik enerjisinin türbin tarafından ne kadarının mekanik enerjiye ve daha sonra elektrik enerjisine dönüştürülebildiğini gösterir. Türbinin gerçek güç çıkışı ölçülerek ekserji kayıpları hesaplanabilir.

Ekserji verimliliği hesabı (Çengel ve Boles, 2012):

$$\eta_{\text{ekserji}} = \frac{E_{\text{elektrik}}}{E_{\text{ekserji,giris_c}}} \quad (2.20)$$

- E_{elektrik} : Türbinin ürettiği elektrik enerjisi (J veya Wh).
- $E_{\text{ekserji,giris_c}}$: Rüzgârın sahip olduğu teorik ekserji değeri (J veya Wh).

Rüzgârın ekserjisi, kinetik enerjisine göre belirlenir ve sistemde kaybedilen ekserji miktarı (örneğin sürtünme, türbin verimsizlikleri vb.) hesaplanır.

d. Ekserji Kaybının Hesaplanması

Rüzgâr enerjisi sisteminde ekserji kayıpları, rüzgârın kinetik enerjisinden elektrik enerjisine dönüşüm sürecinde ortaya çıkan enerji kayıplarını içerir. Bu kayıplar şunları içerir:

Kanat Sürtünme ve Direnç Kaybı: Türbin kanatlarının hava ile etkileşimi sırasında meydana gelen sürtünme ve direnç kayıpları (Spera, 2009). Rüzgâr türbinlerinde kanatların rüzgarla etkileşimi sırasında aerodinamik sürtünme ve direnç kayıpları meydana gelir. Bu kayıplar, rotorun kinetik enerjisinin bir kısmını harcar ve ekserji kaybına yol açar. Aerodinamik kayıplar aşağıdaki formülle hesaplanabilir (Çengel ve Boles, 2012):

$$P_{\text{aero kayıp}} = P_{\text{ruzgar}} - P_{\text{rotor}} \quad (2.21)$$

- P_{ruzgar} : Rüzgârın kinetik enerjisi ($\frac{1}{2} \rho \cdot A \cdot v^3$)
- P_{rotor} : Rotorun elde ettiği mekanik enerji.
- $P_{\text{aero kayıp}}$: Aerodinamik kayıplar (Watt).

Rotorun mekanik enerjisi, aerodinamik kayıplardan sonra kalan enerjidir. Bu kayıplar kanat tasarımından, rüzgâr hızından ve türbin verimliliğinden etkilenir.

Betz Limiti Kaybı: Betz limiti, rüzgarın kinetik enerjisinin %100'ünün mekanik enerjiye dönüştürülemeyeceğini gösterir (Betz, 1920). Betz limitine göre maksimum teorik verim %59,3'tür. Betz limitinden kaynaklanan kayıplar şu şekilde ifade edilebilir:

$$P_{\text{betz kayıp}} = P_{\text{ruzgar}} \cdot (1 - 0.593) \quad (2.22)$$

- $P_{\text{betz kayıp}}$: Betz limitinden kaynaklanan kayıplar.
- P_{ruzgar} : Rüzgârın kinetik enerjisi.

Bu formül, rüzgârın kinetik enerjisinin ne kadarının asla mekanik enerjiye dönüştürülemeyeceğini gösterir.

Dişli Kutusu (Gearbox) Kaybı: Türbinin mekanik enerjisinin jeneratöre aktarılmasında kullanılan dişli kutusundaki mekanik kayıplar. Dişli kutusu, rotorun mekanik enerjisini jeneratöre aktarmak için kullanılır ve bu süreçte enerji kayıpları oluşur. Dişli kutusu verimsizliklerini hesaplarken şu formül kullanılabilir:

$$P_{\text{gearbox kayıp}} = P_{\text{rotor}} \cdot (1 - \eta_{\text{gearbox}}) \quad (2.23)$$

- $P_{\text{gearbox kayıp}}$: Dişli kutusundan kaynaklanan enerji kaybı.
- P_{rotor} : Rotorun elde ettiği mekanik enerji.
- η_{gearbox} : Dişli kutusunun verimliliği (genellikle %90- %95 arası).

Dişli kutusundaki kayıplar, mekanik enerji jeneratöre aktarılırken oluşan sürtünme ve ısı kayıplarından kaynaklanır.

Jeneratör Verimsizlikleri: Jeneratörün mekanik enerjiyi elektrik enerjisine dönüştürürken oluşan kayıplar. Jeneratör, mekanik enerjiyi elektrik enerjisine dönüştürürken verimsizlikler ve enerji kayıpları oluşur. Jeneratör kayıpları şu şekilde formüle edilir:

$$P_{\text{jeneratör kayıp}} = \frac{P_{\text{giris}}}{c} \cdot (1 - \eta_{\text{jeneratör}}) \quad (2.24)$$

- $P_{\text{jeneratör kayıp}}$: Jeneratördeki enerji kaybı.
- P_{giris} : Dişli kutusundan çıkan mekanik enerji (yani $P_{\text{rotor}} - P_{\text{gearbox kayıp}}$)
- $\eta_{\text{jeneratör}}$: Jeneratör verimliliği (genellikle %90- %98 arası).

Jeneratördeki kayıplar elektrik enerjisinin üretimi sırasında ısı kayıpları olarak ortaya çıkar.

Elektriksel Kayıplar: Üretilen elektrik enerjisinin iletim ve dönüşüm sürecinde oluşan kayıplardır (örneğin inverter kayıpları). Rüzgâr türbininden elde edilen elektrik enerjisi,

kablolar ve invertörler üzerinden iletilirken enerji kayıpları meydana gelir. Elektriksel kayıplar genellikle Joule ısısı şeklinde açığa çıkar ve aşağıdaki formülle hesaplanabilir (Kreith, ve Bohn, 2001):

$$P_{\text{iletim kaybı}} = R \cdot I^2 \quad (2.25)$$

- $P_{\text{iletim kaybı}}$: İletim hattındaki enerji kaybı.
- I : Akım (Amper).
- R : İletim hattının direnç değeri (Ohm).

Bu kayıplar toplandıktan sonra, sistemin toplam ekserji kaybı ve verimliliği hesaplanır. Bu kayıplar, üretilen elektrik enerjisinin iletim ve dönüşüm sürecinde kaybolan miktarını ifade eder. Rüzgar enerjisi sisteminde toplam enerji kayıpları, yukarıdaki her bir bileşenin kayıplarının toplamıdır. Bu toplam aşağıdaki şekilde ifade edilebilir:

$$P_{\text{toplam kayıp}} = P_{\text{aero kayıp}} + P_{\text{betz kayıp}} + P_{\text{gearbox kayıp}} + P_{\text{jeneratör kayıp}} + P_{\text{iletim}} \quad (2.26)$$

- $P_{\text{toplam kayıp}}$: Sistemdeki toplam enerji kayıpları.

2.3.2.5. Toplam ekserji verimliliği

Son olarak, sistemin toplam ekserji verimliliği, sistemde üretilen net elektrik enerjisi ile rüzgârın sahip olduğu toplam ekserji arasındaki oranla hesaplanır (Acar ve Aydın, 2017):

$$\eta_{\text{ekserji}} = \frac{P_{\text{net elektrik}}}{P_{\text{rüzgar}}} \quad (2.27)$$

- $P_{\text{net elektrik}}$: Türbinden elde edilen net elektrik gücü (tüm kayıplar çıkarıldıktan sonra kalan enerji).
- $P_{\text{rüzgar}}$: Rüzgârın sahip olduğu toplam kinetik enerji.

Ekserji verimliliği, sistemin ne kadarının iş yapabilme potansiyeline sahip olduğunu gösterir.

2.3.3. Jeotermal Enerji Sistemi için Ekserji Analizi

Jeotermal enerji sistemlerinde, yer altındaki sıcak su veya buhar, enerji üretimi için kullanılır. Jeotermal enerji santrallerinde enerji ve ekserji kayıplarını hesaplamak, bu süreçte ortaya çıkan verimlilikleri belirlemek için oldukça önemlidir (Lund ve Boyd, 2016).

Jeotermal enerji sisteminin ekserji analizinde kullanılan temel materyaller şunlardır:

2.3.3.1. Jeotermal kaynak

Rezervuar Sıcaklığı: Yer altındaki jeotermal rezervuarın sıcaklığı, enerji üretiminin temel kaynağıdır. Bu sıcaklık genellikle 150°C ile 350°C arasında değişir.

Akışkan (Su/Buhar): Jeotermal kaynaklardan elde edilen su ya da buhar, enerji üretiminde kullanılır. Yüksek sıcaklıktaki buhar doğrudan türbinleri çalıştırırken, suyun kullanılabilmesi için ısı eşanjörleri gerekir (DiPippo, 2012).

2.3.3.2. Jeotermal kuyular

Üretim Kuyuları: Yer altındaki sıcak suyun veya buharın çıkarıldığı kuyular. Bu kuyuların derinliği ve çapı, akışkanın basıncı ve sıcaklığına bağlı olarak değişir.

Reenjeksiyon Kuyuları: Kullanılan jeotermal akışkanın yeniden yer altına enjekte edildiği kuyular. Reenjeksiyon, çevresel etkileri azaltmak ve sürdürülebilir enerji üretimi sağlamak için gereklidir.

2.3.3.3. Isı eşanjörü

Isı Değişim Ünitesi: Jeotermal akışkandan alınan ısıнын çalışma akışkanına (örneğin suya) aktarıldığı ısı eşanjörleridir. Bu sistem, jeotermal akışkanın direkt kullanılmadığı durumlarda (örneğin düşük sıcaklıkta) kullanılır (Bahrami ve Stefanakos, 2010).

Verimlilik: Isı eşanjörünün termodinamik verimliliği ile akışkanlar arasındaki ısı transferi verimi dikkate alınarak hesaplanır.

2.3.3.4. Organik rankine çevrimi (ORC) ekipmanları

ORC Türbini: Düşük sıcaklıklı jeotermal akışkanın enerjisini elektrik üretmek için kullanan organik Rankine çevrimi türbini. ORC sistemleri, jeotermal akışkanın direkt kullanılmadığı durumlarda kullanılır (Quoilin, 2013).

Çalışma Akışkanı: ORC’de kullanılan organik sıvılar (örneğin pentan, izobütan) jeotermal ısı ile buharlaşır ve türbinleri döndürür.

Kondansör: Buhar halindeki çalışma akışkanının tekrar sıvı hale dönüştüğü bölümdür. Kondansör bu işlemde genellikle çevresel havayı veya soğutma suyunu kullanır.

Buhar Türbini: Yüksek basınçlı buharın mekanik enerjiye dönüştüğü türbinlerdir. Buhar, türbini döndürerek jeneratöre bağlı mil aracılığıyla elektrik üretir.

Jeneratör: Mekanik enerjiyi elektrik enerjisine dönüştüren ekipman. Jeneratör verimliliği %95- %98 aralığında olabilir.

Soğutma Sistemi: Kullanılan jeotermal akışkanın veya ORC sisteminde kullanılan çalışma akışkanının soğutulduğu sistemdir. Burada ki sistemde bulunan Soğutma kuleleri, sıcaklığı düşürerek sistemin tekrar kullanılmasını sağlar.

2.3.3.5. Jeotermal kaynaktan enerji girişi

Jeotermal kaynaktan sağlanan enerji miktarı şu şekilde hesaplanabilir:

$$Q_{\text{jeotermal}} = m \cdot c_p \cdot \left(T_{\text{kaynak}} - \frac{T_{\text{çıkış}}}{c} \right) \quad (2.28)$$

- $Q_{\text{jeotermal}}$: Jeotermal kaynaktan alınan ısı enerjisi (W).
- m : Akışkanın debisi (kg/s).
- c_p : Akışkanın özgül ısısı (kJ/kg·K).
- T_{kaynak} : Rezervuardan çıkan akışkanın sıcaklığı (°C veya K).
- $T_{\text{çıkış}}$: Akışkanın çıkış sıcaklığı (kondansör veya ısı eşanjöründen sonra) (°C veya K).

Bu formül, jeotermal rezervuardan elde edilen ısı enerjisini hesaplar. Rezervuar sıcaklığı ve akışkanın debisi ile elde edilebilecek enerji miktarını belirler (Bejan ve Tsatsaronis, 1996).

2.3.3. Ekserji hesaplaması

Jeotermal kaynaktan elde edilen enerji ekserjisi, çevre ile sıcaklık farkına bağlıdır. Ekserji şu şekilde hesaplanır:

$$E_{\text{ekserji}} = Q_{\text{jeotermal}} \cdot (1 - (T_{\text{çevre}} \cdot T_{\text{kaynak}})) \quad (2.29)$$

- E_{ekserji} : Jeotermal kaynağın ekserji miktarı (W).
- $Q_{\text{jeotermal}}$: Jeotermal kaynaktan elde edilen ısı enerjisi.
- $T_{\text{çevre}}$: Çevre sıcaklığı (K).
- T_{kaynak} : Jeotermal kaynağın sıcaklığı (K).

Bu formül, jeotermal kaynağın iş yapabilme potansiyelini, yani ekserjisini gösterir. Yüksek sıcaklıklı jeotermal kaynaklar, daha yüksek ekserji sağlamaktadır (Dincer ve Rosen, 2007).

2.3.3.7. Isı eşanjörü verimliliği ve enerji kaybı

Isı eşanjörü, jeotermal akışkandan alınan ısıнын başka bir çalışma akışkanına aktarıldığı bölümdür. Isı eşanjöründeki enerji kayıpları şu şekilde hesaplanabilir:

$$Q_{\text{esanjor}} = (Q_{\text{jeotermal}} \cdot \eta_{\text{esanjor}}) \quad (2.30)$$

- Q_{esanjor} : Isı eşanjöründen geçen enerji miktarı.
- η_{esanjor} : Isı eşanjörünün verimliliği (genellikle %85- %95 arası).

Isı eşanjöründe oluşan enerji kayıpları, termodinamik limitler ve ısı transferi verimliliği ile ilişkilidir. Ekserji kayıpları ise aynı hesaplama üzerinden yapılır (Kutscher ve Ramey, 2006).

2.3.3.8. Türbin performansı ve ekserji kaybı

Jeotermal buhar veya ORC çalışma akışkanı türbini döndürdüğünde, termal enerji mekanik enerjiye dönüşmesi, türbinden elde edilen mekanik enerji şu formülle hesaplanır:

$$W_{\text{türbin}} = m \cdot (h_{\text{giris}_c} - \frac{h_{\text{cikis}_c}}{c}) \quad (2.31)$$

- $W_{\text{türbin}}$: Türbinin mekanik gücü (W).
- m : Akışkanın kütleli debisi (kg/s).
- h_{giris_c} : Akışkanın türbine giriş entalpisi (kJ/kg).
- h_{cikis_c} : Akışkanın türbinden çıkış entalpisi (kJ/kg).

Bu formül, türbinden elde edilen gücü belirler. Türbin verimliliği ise şu şekilde hesaplanır:

$$\eta_{\text{türbin}} = W_{\text{türbin}} \cdot Q_{\text{esanjor}} \quad (2.32)$$

Ekserji kaybı, türbin içindeki geri döndürülemezliklerden ve verimlilik kayıplarından kaynaklanır.

2.3.3.9. Jeneratör verimliliği

Türbinin döndürdüğü jeneratör, mekanik enerjiyi elektrik enerjisine çevirir. Jeneratör verimliliği şu formülle hesaplanır:

$$W_{\text{jeneratör}} = W_{\text{türbin}} \cdot \eta_{\text{jeneratör}} \quad (2.33)$$

- $W_{\text{jeneratör}}$: Jeneratör tarafından üretilen elektrik gücü (W).
- $\eta_{\text{jeneratör}}$: Jeneratör verimliliği.

Jeneratördeki ekserji kayıpları, jeneratörün içindeki elektriksel ve mekanik kayıplardan kaynaklanır. Bu kayıplar genellikle düşük olup, jeneratör verimliliği %95-%98 aralığında kabul edilir (Tummescheit ve Friedli, 2004).

2.3.3.10. Soğutma kulesi ve ekserji kayıpları

Soğutma kulesi, jeotermal akışkanın veya ORC çalışma akışkanının sıcaklığını düşürmek için kullanılır. Soğutma kulesindeki enerji kayıpları, çevre ile ısı alışverişi sırasında gerçekleşir. Bu süreçte ekserji kaybı da şu şekilde hesaplanabilir:

$$E_{\text{ekserji,soğutma}} = Q_{\text{soğutma}} \cdot (1 - (T_{\text{cevre}}/T_{\text{soğutma}})) \quad (2.34)$$

- $E_{\text{ekserji,soğutma}}$: Soğutma sürecinde oluşan ekserji kaybı (W).
- $Q_{\text{soğutma}}$: Soğutma kulesinden geçen ısı enerjisi (W).
- T_{cevre} : Çevre sıcaklığı (K).
- $T_{\text{soğutma}}$: Soğutma kulesine giren akışkanın sıcaklığı (K).

Soğutma kulelerinde meydana gelen ekserji kayıpları, özellikle yüksek sıcaklık farkları ve büyük akış hızlarında, sistemdeki toplam kayıpların önemli bir bölümünü oluşturabilir (Kotas, 2008).

2.3.3.11. Toplam ekserji verimliliği

Jeotermal enerji sisteminde tüm bileşenlerin enerji ve ekserji kayıpları dikkate alınarak, toplam ekserji verimliliği şu şekilde hesaplanabilir:

$$\eta_{\text{ekserji,toplam}} = \frac{W_{\text{jeneratör}}}{E_{\text{ekserji,giris}}} \quad (2.35)$$

$W_{\text{jeneratör}}$: Jeneratör tarafından üretilen net elektrik gücü (W).

- $E_{\text{ekserji,giris}}$: Jeotermal kaynaktan elde edilen toplam ekserji (W).

Bu formül, jeotermal kaynaktan elde edilen enerjinin ne kadarının kullanılabilir elektrik enerjisine dönüştürüldüğünü gösterir. Ekserji verimliliği ise sistemin iş yapabilme kapasitesine odaklanarak termodinamik verimliliği değerlendirir (Dincer ve Rosen, 2007)

2.3.3.12. Enerji ve ekserji kayıplarının toplamı

Jeotermal enerji sistemindeki toplam enerji ve ekserji kayıpları şu şekilde hesaplanabilir:

$$E_{\text{kayıp,toplam}} = E_{\text{jeotermal}} - W_{\text{jeneratör}} \quad (2.36)$$

$$E_{\text{ekserji,kayıp}} = E_{\text{ekserji,giris_c}} - W_{\text{jeneratör}} \quad (2.37)$$

- $E_{\text{kayıp,toplam}}$: Sistemde meydana gelen toplam enerji kaybı (W).
- $E_{\text{ekserji,kayıp}}$: Sistemde meydana gelen toplam ekserji kaybı (W).

Bu formüller, sistemin toplam enerji ve ekserji kayıplarını hesaplayarak sistemin genel verimliliğini değerlendirmeye yardımcı olur (Bhattacharyya, 2011).

2.3.4. Biyokütle Enerjisi Sistemi için Ekserji Analizi

Biyokütle enerji sisteminin analizinde kullanılan temel materyaller şunlardır (Harvey, 2007):

2.3.4.1. Biyokütle kaynağı

Hammaddeler: Enerji üretimi için kullanılan biyokütle kaynakları odun, tarımsal atıklar, hayvansal atıklar, kentsel atıklar veya enerji bitkileri olabilir. Her bir biyokütle kaynağının içerdiği kimyasal bileşim (karbon, hidrojen, oksijen, azot, kükürt gibi) verimliliği etkiler.

Nem Oranı: Biyokütle kaynaklarının içerdiği su miktarı, yakma verimliliğini ve toplam enerji çıktısını doğrudan etkiler. Düşük nem oranına sahip biyokütleler daha yüksek enerji verimliliği sağlar.

2.3.4.2. Yakma kazanı (termokimyasal dönüşüm)

Yakma Ünitesi: Biyokütlenin termal enerji üretmek için yakıldığı sistemdir. Biyokütlenin yanması sırasında oluşan ısı, buhar üretmek ve türbinleri çalıştırmak için kullanılır (Sadhukhan, 2016).

Yanma Odası Sıcaklığı: Yanma sıcaklığı biyokütlenin verimli bir şekilde yanmasını ve maksimum enerji üretimini sağlar (genellikle 800°C-1200°C arası).

2.3.4.3. Gazlaştırma sistemi

Gazlaştırıcı: Biyokütle, yüksek sıcaklıklarda (genellikle 700°C - 1000°C) kontrollü bir ortamda kısmi yanma ile sentez gazı (syngas) üretmek için gazlaştırılır. Bu gaz daha sonra enerji üretimi için kullanılabilir (Nanda ve Subrahmanyam, 2018).

Sentez Gazı: Karbon monoksit (CO), hidrojen (H₂) ve metan (CH₄) içeren bu gaz, yakıt olarak kullanılabilir ve türbinlerde elektrik üretimine katkı sağlar.

2.3.4.4. Biyokimyasal dönüşüm ekipmanları

Fermentör (Biyogaz Üretimi): Organik atıkların anaerobik ortamda bakteriler aracılığıyla biyogaza dönüştürüldüğü tanklardır. Biyogaz, genellikle metan (CH₄) ve karbondioksit (CO₂) içerir ve enerji üretiminde kullanılarak sisteme katkı sağlar.

Sindirim Ünitesi: Biyokütlenin fermentasyon süreçleri sonucunda sindirildiği bölüm. Burada organik madde biyokimyasal olarak parçalanır ve biyogaz üretilir.

2.3.4.5. Buhar türbini

Yakma veya gazlaştırma sonrası üretilen ısı, suyu buhara dönüştürerek türbini döndürür. Türbin, mekanik enerjiyi jeneratöre ileterek elektrik enerjisi üretir.

Verimlilik: Türbin verimliliği kullanılan yakma veya gazlaştırma sistemine bağlı olarak %30-40 aralığında değişir.

2.3.4.6. Jeneratör

Türbinin mekanik enerjisini elektrik enerjisine dönüştüren makinedir. Jeneratörün verimliliği genellikle %95-98 aralığındadır.

2.3.4.7. Atık ısı geri kazanım sistemi

Isı Eşanjörü: Yanma veya gazlaştırma sürecinde açığa çıkan atık ısınn geri kazanılmasını sağlar. Bu ısı, diğer süreçlerde kullanılabilir veya yeniden buhar üretiminde değerlendirilebilir.

Verimlilik: Atık ısınn geri kazanılmasıyla, sistemin genel enerji verimliliği artırılır.

Biyokütle enerji sisteminde kullanılan enerji dönüşüm süreçleri (yakma, gazlaştırma veya biyogaz üretimi) ve bu süreçlerde oluşan enerji kayıplarının analiz edilmesi, ekserji verimliliğini artırmak için önemli bir kaynaktır.

2.3.4.8. Yakma sistemi için enerji girişı

Biyokütlenin yakılması sonucu elde edilen enerji şu formülle hesaplanır:

$$Q_{\text{yakma}} = m_{\text{biokutle}} \cdot \text{LHV} \quad (2.38)$$

- Q_{yakma} : Yakma sürecinde elde edilen enerji miktarı (W).
- m_{biokutle} : Biyokütlenin kütlesi (kg/s).
- LHV: Biyokütlenin alt ısı değeri (kJ/kg).

Bu formülde, yakma sürecinde biyokütleden açığa çıkan toplam enerji, biyokütlenin alt ısı değeri ve kütlesine bağlı olduğu gözükür. Aynı zamanda nem oranı yüksek olan biyokütleler için enerji miktarı da düşmekte olduğu çıkartılabilir.

2.3.4.9. Ekserji hesaplaması

Yakma ya da gazlaştırma sonrası elde edilen enerji ekserjisi, biyokütlenin iş yapabilme kapasitesini gösterir. Bu ekserji şu şekilde hesaplanır:

$$E_{\text{ekserji}} = Q_{\text{yakma}} \cdot (1 - T_{\text{c_cevre}}/T_{\text{yakma}}) \quad (2.39)$$

- E_{ekserji} : Yakma sürecinin ekserji miktarı (W).
- Q_{yakma} : Yakma sürecinden elde edilen ısı enerjisi.
- $T_{\text{c_cevre}}$: Çevre sıcaklığı (K).
- T_{yakma} : Yakma odasındaki sıcaklık (K).

Bu formül, biyokütle yakma işlemi sırasında elde edilen enerjinin ne kadarının iş yapma potansiyeline sahip olduğunu gösterir. Yüksek sıcaklıkta yapılan yanma süreçlerinde ekserji verimliliği artmaktadır.

2.3.4.10. Gazlaştırma süreci ve enerji dönüşümü

Gazlaştırma, biyokütlenin kimyasal enerjisinin sentez gazına dönüştürüldüğü bir süreçtir. Gazlaştırmadan elde edilen sentez gazının enerjisi şu şekilde hesaplanabilir:

$$Q_{\text{syngas}} = m_{\text{biyokutle}} \cdot \text{LHV}_{\text{syngas}} \quad (2.40)$$

- Q_{syngas} : Üretilen sentez gazının enerji miktarı (W).
- $m_{\text{biyokutle}}$: Gazlaştırmada kullanılan biyokütle miktarı (kg/s).
- $\text{LHV}_{\text{syngas}}$: Sentez gazının alt ısı değeri (kJ/kg).

Gazlaştırma işlemi sırasında biyokütleden üretilen sentez gazı, türbinlerde yakıt olarak kullanılabilir veya doğrudan elektrik üretimi için kullanılabilir.

2.3.4.11. Biyogaz üretimi ve enerji verimliliği

Biyogaz üretiminde, biyokütlenin organik bileşenleri anaerobik ortamda biyogaz üretir. Biyogazın enerji verimliliği şu formülle hesaplanır:

$$Q_{\text{biyogaz}} = m_{\text{biyokutle}} \cdot \text{LHV}_{\text{biyogaz}} \quad (2.41)$$

- Q_{biyogaz} : Üretilen biyogazın enerji miktarı (W).
- $m_{\text{biyokutle}}$: Fermentasyona giren biyokütlenin miktarı (kg/s).
- $\text{LHV}_{\text{biyogaz}}$: Biyogazın alt ısı değeri (kJ/kg).

Biyogaz üretim verimliliği, biyokütlenin bileşimi ve fermentasyon koşullarına bağlıdır. Ekserji verimliliği biyogazın kalitesi ile doğrudan ilişkilidir.

2.3.4.12. Buhar türbini performansı

Yakma veya gazlaştırma işlemi sonrası üretilen ısı buhara dönüştürülür ve buhar türbini aracılığıyla elektrik üretimi yapılır. Türbinden elde edilen enerji şu formülle hesaplanabilir:

$$W_{\text{turbın}} = h_{\text{giris}_c} \cdot h_{\text{cikis}_c} \quad (2.42)$$

- $W_{\text{turbın}}$: Türbinin mekanik gücü (W).
- m' : Buhar akışının kütleel debisi (kg/s).
- h_{giris_c} : Türbine giren buharın entalpisi (kJ/kg).
- $h_{\text{çıkıs}_c}$: Türbinden çıkan buharın entalpisi (kJ/kg).

Bu formül, biyokütle yakma veya gazlaştırma işlemi sonrasında buhar türbininde elde edilen net mekanik gücü gösterir. Türbinin performansı, giriş ve çıkıştaki buharın sıcaklık ve basınç gibi termodinamik özelliklerine bağlıdır. Ekserji verimliliğini artırmak için buharın yüksek sıcaklık ve basınca sahip olması gerekmektedir.

2.3.4.13. Jeneratör verimliliği

Türbinden elde edilen mekanik güç, jeneratör yardımıyla elektrik enerjisine dönüştürülür. Jeneratörün enerji dönüşüm verimliliği şu formülle hesaplanır:

$$W_{\text{elektirik}} = \eta_{\text{jeneratör}} \cdot W_{\text{turbın}} \quad (2.43)$$

- $W_{\text{elektirik}}$: Jeneratör tarafından üretilen elektrik gücü (W).
- $\eta_{\text{jeneratör}}$: Jeneratörün verimliliği.
- $W_{\text{turbın}}$: Türbinden elde edilen mekanik güç (W).

Jeneratörün verimliliği genellikle %95 ile %98 arasında değişir ve türbinin mekanik enerjisi ne kadar verimli bir şekilde elektrik enerjisine dönüştürüldüğünü gösterir.

2.3.4.14. Isı geri kazanımı ve ekserji verimliliği

Biyokütle enerji sistemlerinde, atık ısının geri kazanımı enerji verimliliğini artırmak için önemli bir yöntemdir. Yanma veya gazlaştırma sürecinde açığa çıkan atık ısı, başka bir enerji sürecinde kullanılabilir. Atık ısının ekserji verimliliği şu formülle hesaplanır:

$$E_{\text{ekserji atık}} = Q_{\text{atık}} \cdot (1 - (T_{\text{c_ çevre}} \cdot T_{\text{atık}})) \quad (2.44)$$

- $E_{\text{ekserji atık}}$: Atık ısının ekserji miktarı (W).
- $Q_{\text{atık}}$: Atık ısının enerji miktarı (W).
- $T_{\text{c_ çevre}}$: Çevre sıcaklığı (K).
- $T_{\text{atık}}$: Atık ısının sıcaklığı (K).

Bu formül, atık ısının iş yapabilme potansiyelini gösterir. Atık ısının geri kazanılması, biyokütle enerji sistemlerinin genel ekserji verimliliğini artırır.

2.3.4.15. Toplam ekserji verimliliği

Biyokütle enerji sisteminin genel ekserji verimliliği, sistemin her bir bileşenindeki enerji dönüşümlerini dikkate alarak hesaplanır. Toplam ekserji verimliliği şu formülle ifade edilebilir:

$$\eta_{\text{ekserji, toplam}} = \frac{W_{\text{elekterik}}}{E_{\text{ekserji giriş}_c}} \quad (2.45)$$

- $W_{\text{elekterik}}$: Jeneratör tarafından üretilen net elektrik gücü (W).
- $E_{\text{ekserji giriş}_c}$:Biyokütleden elde edilen toplam ekserji (W).

Bu formül, biyokütleden elde edilen enerjinin ne kadarının kullanılabilir elektrik enerjisine dönüştürüldüğünü gösterir. Biyokütle enerji sistemlerinin ekserji verimliliği, kullanılan biyokütle türüne, sistem tasarımına ve enerji dönüşüm süreçlerine bağlı olarak değişir.

2.3.5. Hidroelektrik Enerji Sistemi İçin Ekserji Analizi

Hidroelektrik enerji sistemi, suyun potansiyel enerjisinin kinetik enerjiye dönüştürülerek türbinler aracılığıyla elektrik enerjisi üretildiği bir sistemdir. Suyun yüksekten alçağa hareketi sonucu elde edilen enerji, türbin ve jeneratörler sayesinde elektrik enerjisine çevrilir. Hidroelektrik enerji sistemleri genellikle barajlar, türbinler, jeneratörler ve su depolama alanlarından oluşur. Bu bölümde hidroelektrik enerji sistemi için kullanılan materyaller ve ekserji analizinde kullanılan metotlar ayrıntılı bir şekilde açıklanmıştır (Güner, 2020).

Hidroelektrik enerji sistemini oluşturan temel bileşenler ve materyaller şunlardır (Çelik, 2020):

2.3.5.1. Baraj ve su depolama alanı

Baraj: Suyun yüksek bir noktada biriktirilmesini sağlayan yapı. Baraj, suyun potansiyel enerjisinin depolandığı yerdir. Barajdaki suyun yüksekliği ve miktarı, üretilen enerjiyi doğrudan etkiler.

Su Deposu: Su kaynağı nehir veya gölden alınarak barajda biriktirilir. Su seviyesindeki değişimler enerji üretimini etkiler.

Su Akış Debisi: Barajdan türbinlere aktarılan su miktarı, enerji üretim kapasitesini belirler.

2.3.5.2. Penstock (basınç tüneli)

Penstock: Barajdaki suyu türbinlere yönlendiren basınçlı boru hattı. Su, bu boru boyunca akarak türbinlerin çalışması için gerekli kinetik enerjiyi sağlar. Penstock içindeki suyun basıncı ve hızına göre enerji üretimi değişir.

2.3.5.2. Türbin

Türbin Tipi: Hidroelektrik sistemlerde genellikle Francis, Kaplan veya Pelton türbinleri kullanılır. Türbin, akan suyun kinetik enerjisini mekanik enerjiye dönüştüren temel bileşendir.

Türbin Verimliliği: Türbinin verimliliği, suyun kinetik enerjisinin ne kadarının mekanik enerjiye dönüştürüldüğünü belirler. Türbin verimliliği %90-95 aralığında kabul edilir.

2.3.5.3. Jeneratör

Jeneratör: Türbinden elde edilen mekanik enerjiyi elektrik enerjisine dönüştüren cihazdır. Jeneratörün verimliliği genellikle %95-98 aralığında değişir. Bu verimlilik, türbinin döndürdüğü mekanik enerjinin ne kadarının elektrik enerjisine çevrildiğini gösterir.

2.3.5.4. Kontrol vanaları

Vanalar: Su akışını düzenleyen ve türbinlere gelen su miktarını kontrol eden mekanik bileşenlerdir. Bu vanalar, türbinin ihtiyaç duyduğu su miktarını ve basıncını düzenler.

2.3.5.5. Atık su çıkışı

Atık Su Kanalı: Türbinlerden geçtikten sonra enerji üretilmiş su, nehre veya göle geri salınır. Atık suyun sıcaklık ve hız gibi parametreleri çevre üzerindeki etkileri açısından izlenmelidir.

Hidroelektrik enerji sisteminin analizinde enerji ve ekserji verimliliği, sistemdeki potansiyel enerjinin suyun hareketiyle kinetik enerjiye, ardından mekanik ve elektrik enerjisine dönüştürülmesi süreçlerini kapsar.

2.3.5.6. Potansiyel enerji hesaplaması

Barajda biriken suyun potansiyel enerjisi şu formülle hesaplanabilir:

$$E_{potansiyel} = m \cdot g \cdot h \quad (2.46)$$

- $E_{potansiyel}$: Suyun potansiyel enerjisi (J).
- m : Suyun kütlesi (kg).
- g : Yerçekimi ivmesi (9.81 m/s²).
- h : Su seviyesinin yüksekliği (m).

Barajdaki suyun yüksekliği ve kütlesi arttıkça potansiyel enerji de artar. Bu enerji, hidroelektrik sistemde türbinleri çalıştırarak elektrik üretiminde kullanılır (Kaya ve Erdiñç, 2018).

2.3.5.7. Kinetik enerji hesaplaması

Suyun barajdan türbinlere doğru akarken kazandığı kinetik enerji şu formülle hesaplanır:

$$E_{kinetik} = \frac{1}{2} m v^2 \quad (2.47)$$

- $E_{kinetik}$: Suyun kinetik enerjisi (J).
- m : Suyun kütlesi (kg).
- v : Suyun hızı (m/s).

Geçen suyun hızı arttıkça kinetik enerji de artar. Bu enerji türbinlerde mekanik enerjiye dönüştürülür (Yılmaz, 2017).

2.3.5.8. Türbin enerji verimliliği

Suyun kinetik enerjisinin türbin tarafından mekanik enerjiye dönüştürülmesi şu formülle hesaplanabilir:

$$W_{turbin} = \eta_{turbin} \cdot E_{kinetik} \quad (2.48)$$

- W_{turbin} : Türbin tarafından üretilen mekanik güç (W).
- η_{turbin} : Türbinin verimliliği (%).
- $E_{kinetik}$: Suyun türbine girmeden önceki kinetik enerjisi (J).

Türbin verimliliği genellikle %90-95 aralığındadır ve suyun kinetik enerjisini mekanik enerjiye dönüştürme oranını gösterir.

2.3.5.9. Jeneratör enerji verimliliği

Türbinin ürettiği mekanik enerjinin jeneratör yardımıyla elektrik enerjisine dönüştürülmesi şu formülle hesaplanır:

$$W_{elektrik} = \eta_{jeneratör} \cdot W_{turbın} \quad (2.49)$$

- $W_{elektrik}$: Jeneratör tarafından üretilen elektrik gücü (W).
- $\eta_{jeneratör}$: Jeneratörün verimliliği (%).
- $W_{turbın}$: Türbin tarafından üretilen mekanik güç (W).

Jeneratör verimliliği, türbin tarafından üretilen mekanik enerjinin elektrik enerjisine ne kadar verimli dönüştüğünü belirler. Jeneratör verimliliği genellikle %95-98 aralığındadır (Aydın, 2019).

2.3.5.10. Ekserji hesaplamaları

Ekserji, sistemde iş yapma kapasitesini gösterir ve enerjinin kullanılabilir kısmını ifade eder. Hidroelektrik sistemdeki suyun ekserjisi şu formülle hesaplanır:

$$E_{ekserji} = E_{potansiyel} \cdot (1 - (T_{c_{cevre}} / T_{su})) \quad (2.50)$$

- $E_{ekserji}$: Suyun ekserji miktarı (W).
- $E_{potansiyel}$: Suyun potansiyel enerjisi (W).
- $T_{c_{cevre}}$: Çevre sıcaklığı (K).
- T_{su} : Suyun sıcaklığı (K).

Bu formül, suyun potansiyel enerjisinin çevreye göre iş yapabilme kapasitesini, yani ekserji miktarını gösterir. Suyun sıcaklığı ile çevre sıcaklığı arasındaki fark ne kadar büyükse, suyun ekserji değeri de o kadar yüksek olur (Can, 2020).

2.3.5.11. Hidroelektrik sistemde toplam ekserji verimliliği

Hidroelektrik sistemin genel ekserji verimliliği, suyun potansiyel enerjisinden üretilen elektrik enerjisine kadar olan süreçte meydana gelen kayıpları dikkate alarak hesaplanır. Toplam ekserji verimliliği şu formülle ifade edilir:

$$\eta_{ekserji\ toplam} = W_{elektrik} / E_{ekserji\ giriş} \quad (2.51)$$

- $\eta_{ekserji\ toplam}$: Hidroelektrik sistemin toplam ekserji verimliliği.

- $W_{elektrik}$: Jeneratör tarafından üretilen elektrik gücü (W).
- $E_{ekserji\ giriş_c}$: Su kaynağından elde edilen toplam ekserji (W).

Bu formül, hidroelektrik sistemin ne kadar verimli çalıştığını, yani suyun potansiyel enerjisinden ne kadarının elektrik enerjisine dönüştürüldüğünü gösterir (Çelik, 2020).

2.3.5.12. Enerji kayıplarının analizi

Hidroelektrik enerji sisteminde enerji ve ekserji kayıpları, sistemdeki çeşitli bileşenlerde meydana gelir. Enerji kayıplarının başlıca kaynakları şunlardır:

Penstock (Basınç Tüneli) Kayıpları: Suyun penstock boyunca akarken sürtünme ve basınç kayıpları oluşur. Bu kayıplar suyun kinetik enerjisini azaltır (Çelik, 2020).

Türbin Verimliliği Kayıpları: Türbinin suyun kinetik enerjisini mekanik enerjiye dönüştürme sürecindeki verim kayıplarıdır. Türbinin türüne ve tasarımına bağlı olarak farklılık gösterebilir.

Jeneratör Kayıpları: Jeneratör mekanik enerjiyi elektrik enerjisine dönüştürürken çeşitli elektriksel ve mekanik kayıplar meydana gelir. Bu kayıplar, jeneratörün tasarımına ve çalışma koşullarına göre değişir.

Atık Su Kayıpları: Türbinden çıkan suyun atık olarak tekrar doğaya bırakılması sırasında, suyun hâlâ bir miktar potansiyel veya kinetik enerjisi olabilir. Bu enerjinin geri kazanılması mümkün değildir.

Hidroelektrik enerji sistemlerinde enerji kayıpları, suyun potansiyel enerjisinin elektrik enerjisine dönüşüm sürecinde meydana gelen çeşitli kayıpları ifade eder. Bu kayıplar, sistemin genel verimliliğini etkileyen önemli unsurlardır. Aşağıda hidroelektrik enerji sistemlerinde karşılaşılan başlıca enerji kayıpları detaylandırılmıştır (Çelik, 2020):

- **Sürtünme Kaybı:** Suyun penstock boyunca akarken boru yüzeyleriyle sürtünmesi sonucu meydana gelen enerji kaybıdır. Bu kayıplar, borunun iç çapı, yüzey pürüzlülüğü ve suyun akış hızı gibi faktörlere bağlıdır.

Sürtünme kaybı formülü (Çelik, 2020):

$$h_{sürtünme} = f \frac{L}{D} \frac{v^2}{2g} \quad (2.52)$$

- $h_{sürtünme}$:Sürtünme kaybı yüksekliği (m).
- f : Sürtünme katsayısı.

- L: Penstock uzunluğu (m)
- D: Borunun çapı (m).
- v: Su akış hızı (m/s).
- g: Yerçekimi ivmesi (9.81 m/s²).

Yükseklik Kaybı: Su, penstock boyunca hareket ederken, eğim veya dönüşlerden dolayı yükseklik kaybı yaşayabilir. Bu da suyun potansiyel enerjisinin azalmasına neden olur.

• Türbin Kayıpları

Türbinler, suyun kinetik enerjisini mekanik enerjiye dönüştürürken bazı kayıplar yaşar:

- Verimlilik Kaybı: Türbinin suyun kinetik enerjisini ne kadar verimli bir şekilde mekanik enerjiye dönüştürdüğünü belirleyen bir faktördür. Türbin verimliliği genellikle %90-95 arasındadır, dolayısıyla %5-10 arasında kayıplar olabilir.

Türbin verimliliği formülü (Çelik, 2020):

$$\eta_{turbın} = \frac{W_{turbın}}{E_{kinetik}} \quad (2.53)$$

- Kaviteasyon: Su basıncı türbinin düşük basınçlı bölgelerinde düştüğünde oluşan buhar kabarcıklarının patlaması, türbinin verimliliğini düşürebilir. Kaviteasyon, türbinde hasara neden olabilir ve enerji kaybına yol açar.
- Dönme Kaybı: Türbinin dönme mekanizmasındaki kayıplar, türbinin iş yapma kabiliyetini azaltır. Bu kayıplar, türbinin tasarımına ve yapısına bağlı olarak değişir.
- Jeneratör Kayıpları: Türbinden gelen mekanik enerjinin elektrik enerjisine dönüştürülmesi sırasında enerji kayıpları meydana gelir:
- Verimlilik Kaybı: Jeneratörün mekanik enerjiyi elektrik enerjisine çevirme verimliliği %95-98 aralığındadır. Bu, jeneratörün enerji dönüşümünde %2-5 arasında kayıplar yaşandığı anlamına gelir.

Jeneratör verimliliği formülü (Çelik, 2020):

$$\eta_{jeneratör} = \frac{W_{elektrik}}{W_{turbın}} \quad (2.54)$$

- Isı Kaybı: Jeneratör çalışırken ısı üretir ve bu ısı kaybı, enerji verimliliğini azaltır. Elektriksel kayıplar ve mekanik sürtünme de ısı üretir.

- **Atık Su Kayıpları:** Türbinden çıkan su, enerji üretimi sırasında hâlâ bir miktar potansiyel ve kinetik enerji taşır. Bu enerji, atık su olarak doğaya geri dönerken kaybolur:
- **Kinetik Enerji Kaybı:** Türbinden çıkan suyun hız ve potansiyel enerjisi, geri salındığında kaybolur. Bu, suyun hâlâ enerji taşıyan bir bileşen olduğu anlamına gelir.
- **Potansiyel Enerji Kaybı:** Türbinden çıkan su, belirli bir yükseklikten aşağı doğru hareket ederken, hâlâ potansiyel enerji taşır. Ancak bu enerji doğrudan kullanılamaz ve çevreye geri verilir.
- **Çevresel Kayıplar**
- **Sıcaklık Kaybı:** Su, çevre ile temas ettiğinde sıcaklık değişimlerine maruz kalabilir. Bu da suyun potansiyel ve kinetik enerjisinin kaybına neden olabilir.
- **Buharlaşma:** Su yüzeyinden buharlaşma, özellikle açık su depolarında kayıplara yol açabilir. Bu kayıplar, özellikle sıcak iklimlerde daha belirgin hale gelir.

2.4. JEOTERMAL ENERJİ KAYNAKLARINDA ORGANİK RANKİNE ÇEVİRİMİ

Jeotermal enerji kaynaklarında Organik Rankine Çevrimi (ORC), düşük sıcaklık seviyelerindeki enerji kaynaklarını kullanarak elektrik üretmek için yaygın olarak tercih edilen bir teknolojidir. Bu çevrim, geleneksel Rankine çevriminden farklı olarak su yerine organik akışkanların (düşük kaynama noktasına sahip) kullanılması ile çalışır. Bu özellik, jeotermal enerji gibi düşük sıcaklık kaynaklarında enerji dönüşümünü optimize eder.

2.4.1. ORC'nin Jeotermal Enerjide Kullanımı

- **Düşük Sıcaklık Seviyeleri:** Jeotermal kaynaklar, çoğu zaman 150°C'nin altında sıcaklıklara sahiptir. ORC, düşük sıcaklıkta buharlaştırılabilen organik akışkanlar sayesinde bu kaynaklardan verimli bir şekilde enerji elde edebilir.
- **Akışkan Seçimi:** ORC'de kullanılan akışkanlar, jeotermal kaynağın sıcaklığına ve basıncına göre seçilir. Genellikle **R245fa**, **n-pentan** ve **isobütan** gibi akışkanlar yaygın olarak tercih edilir. Bu akışkanlar, jeotermal kaynaktan alınan düşük sıcaklıklı ısı ile kolayca buharlaşabilir ve çevrimi sürdürür.
- **Verimlilik Artışı:** Geleneksel Rankine çevrimi, düşük sıcaklıklarda verimsiz çalışırken, ORC organik akışkanlar sayesinde bu sıcaklık seviyelerinde yüksek verimlilik sağlayabilir.

- **Çevresel Etki:** ORC'nin jeotermal enerji ile kullanımı, çevreye daha az zarar verir, çünkü bu sistemler düşük sıcaklıkta çalışırken bile sera gazı salınımı yapmazlar. Ayrıca, düşük sıcaklıklı jeotermal enerji kaynaklarının daha geniş bir yelpazede kullanılabilmesine olanak sağlar (Çelik, 2020).

2.4.2. Orc Sistemi Bileşenleri

2.4.2.1. Buharlaştırıcı (Evaporatör)

Jeotermal kaynaktan elde edilen ısı enerjisi ile organik akışkan buharlaştırılır.

Enerji Dengesi (Çengel ve Boles, 2012):

$$Q_{in} = m (h_2 - h_1) \quad (2.55)$$

- Q_{in} = Buharlaştırıcıya giren ısı (kJ),
- m' = Kütle debisi (kg/s),
- h_2 = Buhar fazındaki entalpi (kJ/kg),
- h_1 = Sıvı fazındaki entalpi (kJ/kg).

Buharlaştırıcıda sıvı akışkan, sabit basınçta buharlaşarak doymuş buhar haline gelmektedir ve akışkanın kaynama noktası jeotermal kaynağın sıcaklığına göre seçilir (Çelik, 2020).

2.4.2.2. Türbin

Buharlaştırılan akışkan, türbin üzerinde genişleyerek mekanik enerjiye dönüşür ve türbin jeneratörü çalıştırarak elektrik üretir. Buharlaştırıcıdan çıkan organik akışkan buharı, türbinde izentropik genişleme gerçekleştirir ve mekanik enerjiye dönüşür. Türbinin verimi ise genellikle izentropik verim ile tanımlanır.

- İş Üretimi (Teorik) (Çengel ve Boles, 2012):

$$W_{turbın} = m (h_2 - h_3) \quad (2.56)$$

- h_2 = Türbine girişteki entalpi (kJ/kg),
- h_3 = Türbinden çıkıştaki entalpi (kJ/kg).
- **İzentropik Verim:** Türbinin gerçek performansı izentropik verime göre şu şekilde hesaplanır (Çengel ve Boles, 2012):

$$\eta_{izantropic} = \frac{h_2 - h_3}{h_2 - h_{3_s}} \quad (2.57)$$

Burada, h_{3_s} izentropik genleşme durumundaki entalpi değeridir.

2.4.2.3. Yoğuşturucu (Kondanser)

Türbinden çıkan düşük basınçlı buhar, yoğuşturucuda soğutulur ve tekrar sıvı faza geçer. Türbinden çıkan düşük basınçlı buhar, yoğuşturucuda soğutulur ve sıvı faza geçer. Yoğuşturma işlemi izobarik (sabit basınç) bir süreçtir.

- **Yoğuşturucu Enerji Dengesi:** Yoğuşturucuda ortam ya da bir soğutucu akışkana verilen ısı miktarı şu şekilde hesaplanır (Çengel ve Boles, 2012):

$$Q_{out} = m (h_3 - h_4) \quad (2.58)$$

- h_3 = Buhar halindeki entalpi (kJ/kg),
- h_4 = Yoğunlaşmış sıvı halindeki entalpi (kJ/kg).

2.4.2.4. Pompa

Yoğuşturulan akışkan, bir pompa ile tekrar buharlaştırıcıya basılır ve çevrim devam eder. Bu süreçte akışkan basıncı artırılır ancak işlem sırasında akışkanın fazı sıvı olarak kalır.

- **Pompa İş Gereksinimi (Teorik)** (Çengel ve Boles, 2012):

$$W_{pumpa} = m \cdot v_1 \cdot (P_2 - P_1) \cdot \eta_{pompa} \quad (2.59)$$

- v_1 = Sıvının özgül hacmi (m^3/kg),
- P_2 = Buharlaştırıcı basıncı (Pa),
- P_1 = Yoğuşturucu basıncı (Pa),
- η_{pompa} = Pompa verimi.

ORC'nin jeotermal enerji kaynaklarındaki uygulamaları, özellikle düşük sıcaklık jeotermal sahalarının daha verimli kullanılmasını sağlar. Ayrıca enerji depolama ve sürdürülebilir enerji üretimi konularında da büyük potansiyele sahiptir.

2.4.2.5. Termodinamik çevrim verimi

Organik Rankine Çevrimi'nin genel termodinamik verimi, alınan net iş ile sisteme eklenen ısı arasındaki oran olarak hesaplanır (Çengel ve Boles, 2012):

$$\eta_{ORC} = W_{net} \cdot W_{in} = (W_{turbine} - W_{pump}) \quad (2.60)$$

Burada, W_{net} , türbinden elde edilen işten pompaya harcanan iş çıkarıldıktan sonra kalan net iş miktarıdır.

2.4.2.6. Ekserji Verimi

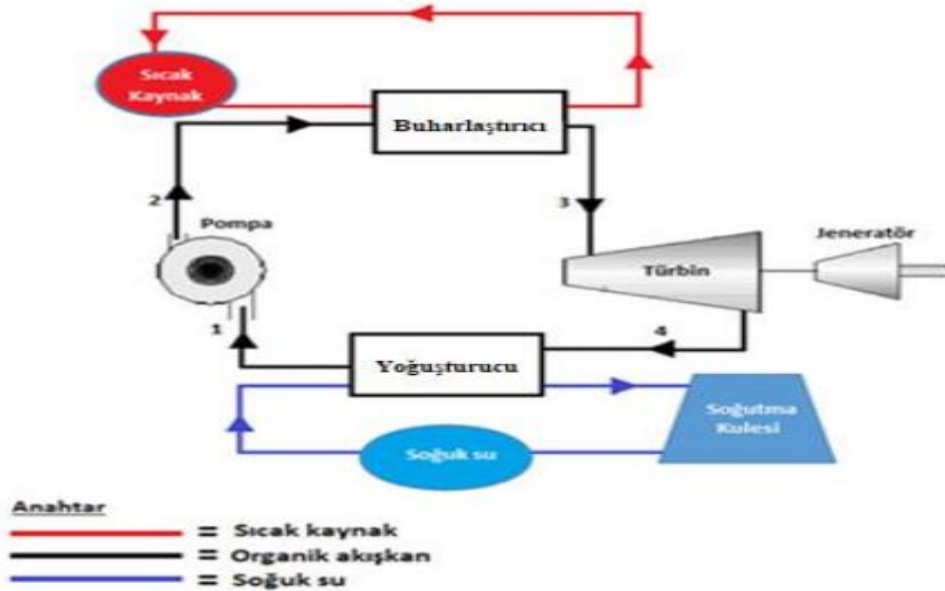
ORC'nin ekserji analizinde, ekserji verimi şöyle hesaplanır (Çengel ve Boles, 2012):

$$\eta_{exerji} = W_{net} \cdot Ex_{in} \quad (2.61)$$

Burada Ex_{in} , sistemin enerji girdisindeki faydalı iş potansiyelini ifade eder. Bu, genellikle jeotermal kaynaktan alınan ısının ekserjisi üzerinden hesaplanır.

2.5. ORGANİK RANKİNE ÇEVİRİMİ ÇALIŞMA PRENSİBİ

Organik Rankine Çevrimi (ORC), klasik Rankine Çevrimi'ne benzer, ancak su yerine düşük kaynama noktasına sahip organik bir çalışma akışkanı kullanır. Bu termodinamik çevrim, düşük sıcaklıklı ve düşük entalpili ısı kaynaklarından enerji üretmek için tasarlanmıştır. Jeotermal enerji, atık ısı geri kazanımı, biyokütle, güneş enerjisi ve deniz suyu ısı farkı gibi kaynaklardan verimli bir şekilde elektrik üretmek için kullanılabilir.



Şekil 7: Organik Rankine Çevrimi Çalışma Prensibi (Ata S. / GUFBD / GUJS 12(3) (2022) 726-743)

Organik Rankine Çevrimi dört temel aşamadan oluşur:

1. Isı Değiştirgeci (Evaporatör)- Buharlaştırma

- Düşük sıcaklıklı ısı kaynağından alınan enerji ile organik çalışma akışkanı buharlaşır.
- Kullanılan organik akışkan, suya kıyasla daha düşük sıcaklıklarda buharlaşabildiğinden, düşük sıcaklıklı ısı kaynaklarını değerlendirmek mümkündür.
- Bu süreçte akışkan, düşük basınçlı sıvıdan, yüksek basınçlı buhar fazına geçer.

2. Türbin- İş Üretimi

- Yüksek basınçlı organik buhar türbine gönderilir.
- Türbinde genişterek mekanik enerjiye dönüşür ve türbin jeneratörü döndürerek elektrik üretir.
- Organik Rankine Çevrim’inde kullanılan organik akışkanların genişleme özellikleri, türbin verimliliğini artırır.

3. Kondenser- Yoğuşma

- Türbinden çıkan düşük basınçlı buhar, kondenserde soğutularak tekrar sıvı hale getirilir.
- Soğutma işlemi için hava veya su soğutmalı kondenserler kullanılabilir.
- Yoğuşma sırasında, akışkan sistemden ısı atar.

4. Pompa- Basınç Artırma

- Yoğuşmuş sıvı pompa yardımıyla tekrar basınçlandırılarak çevrim başına döndürülür.
- Pompa, sıvıyı tekrar ısı değiştirgecine (evaporatör) göndererek çevrimin devamlılığını sağlar.

2.5.1. Çok Kademeli Çevrimler için Termodinamik Analiz

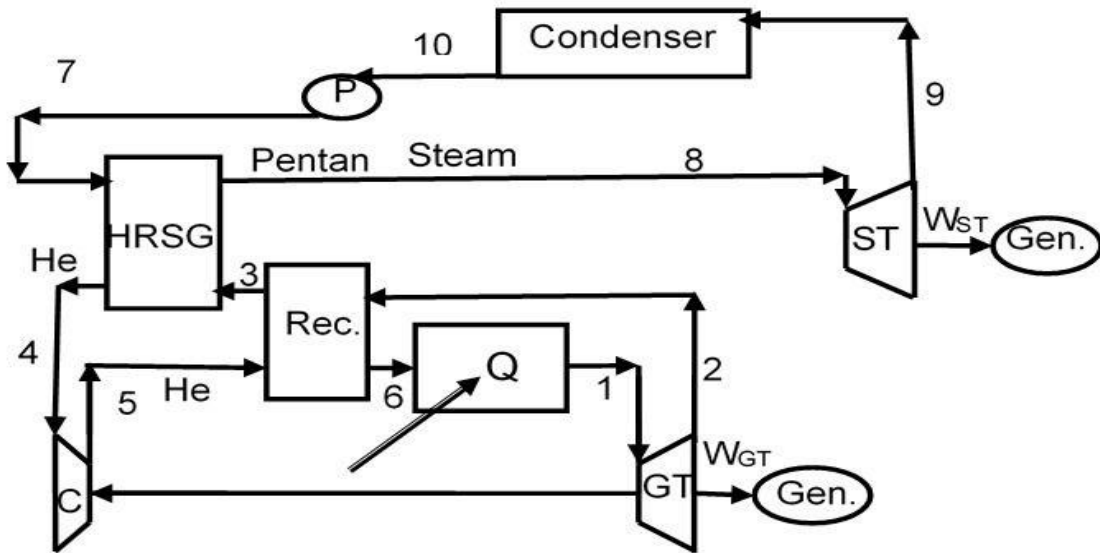
Kombine çevrimler, enerji üretiminde verimlilik, sürdürülebilirlik ve çevre dostu özellikleriyle geleceğin enerji sistemleri arasında kritik bir yere sahiptir. Artan küresel enerji talebi ve fosil yakıtların sınırlı olması, enerji kaynaklarının daha verimli kullanılmasını zorunlu kılmaktadır (Dincer ve Rosen, 2012).

Kombine çevrimler, geleneksel yöntemlere kıyasla çok daha yüksek verimlilik sunarak, aynı miktarda yakıtla daha fazla enerji üretmeyi mümkün kılar. Bu hem ekonomik açıdan maliyetleri düşürür hem de enerji üretim süreçlerini daha sürdürülebilir hale getirir. Ayrıca, karbon emisyonlarını azaltarak çevreye olan olumsuz etkileri en aza indirir ve küresel iklim değişikliğiyle mücadelede önemli bir rol oynar.

Bu çevrimler, yenilenebilir enerji kaynaklarıyla da kolayca entegre edilebildiği için, yalnızca fosil yakıtlar üzerinde değil, düşük sıcaklıklı jeotermal kaynaklar veya biyokütle gibi yenilenebilir kaynaklar üzerinde de çalışabilir. Tüm bu özellikler, kombine çevrimleri enerji güvenliği, ekonomik sürdürülebilirlik ve çevresel hassasiyet açısından geleceğin enerji sistemlerinin vazgeçilmez bir bileşeni haline getirmektedir (Dincer ve Rosen, 2012).

Bazı endüstriyel uygulamalar oldukça düşük sıcaklıklara ihtiyaç duyar ve bu sıcaklık aralığı, basit buhar sıkıştırımlı soğutma çevriminin etkin çalışması için çok geniş olabilir. Geniş bir sıcaklık aralığı, aynı zamanda çevrimde büyük bir basınç farkı oluşturur ve pistonlu kompresörler için düşük verimliliğe neden olabilir. Bu gibi durumlarda başvuru yöntemlerinden biri, soğutma işlemini çok kademeli olarak gerçekleştirmektir (Çengel ve Boles, 2008).

Çok kademeli çevrimler birçok şekilde gerçekleştirilebilir. Bunlar bir evaporatör iki kompresörlü, iki evaporatör bir kompresörlü, iki evaporatör iki kompresörlü veya kaskad bağlantılı sistemlerdir. Şekil 4.2’ de ki sistem, üç ana kademe (Gaz Türbini Çevrimi, Isı Geri Kazanım ve Organik Rankine Çevrimi) üzerine kurulmuş bir kombine çevrimdir. Her kademe, sistemin toplam enerji verimliliğini artırmayı hedefler. Böylece, tek kademeli bir enerji üretim sistemine kıyasla çok daha verimli ve sürdürülebilir bir çözüm sunar (Çengel ve Boles, 2012).



Şekil 8: Brayton ve Rankine Çevrimlerinden Oluşan Kombine Çevrim Sistem Kademeleri

Birinci Kademe: Gaz Türbini Çevrimi: Sistemin ilk kademesi, bir gaz türbini çevrimidir. Burada, gaz türbini yakıtı (örneğin doğalgaz) yakarak yüksek sıcaklık ve basınçta gaz üretir, ardından bu gazın enerjisi türbin kanatlarına aktarılır ve mekanik enerjiye dönüştürülür (Dincer ve Rosen, 2012). Bu kademedeki üretilen enerji doğrudan bir jeneratör vasıtasıyla elektrik enerjisine çevrilir.

İkinci Kademe: Atık Isı Geri Kazanımı (HRSG): Gaz türbininden çıkan egzoz gazları hala yüksek sıcaklıkta olduğundan, bu atık ısı bir Isı Geri Kazanım Buhar Kazanı (HRSG) içinde değerlendirilir. Bu kademede, gaz türbininden çıkan ısı enerjisi kullanılarak bir başka çevrim için buhar üretilir. Üretilen bu buhar, Organik Rankine Çevrimi (ORC) veya bir buhar türbini çevrimi için kullanılır (Çengel ve Boles, 2012).

Üçüncü Kademe: Organik Rankine Çevrimi (ORC): Atık ısı ile üretilen buhar veya organik bir akışkan (örneğin, pentan gibi düşük kaynama noktasına sahip bir sıvı), bir buhar türbini veya ORC türbinine gönderilir. Burada, buharın enerjisi elektrik üretimi için tekrar kullanılır (Çengel ve Boles, 2012).

Bu kademe, düşük sıcaklık kaynaklarından enerji üretmek için optimize edilmiştir ve geleneksel buhar türbinlerine kıyasla daha verimli çalışır.

Destekleyici Bileşenler

Sistemde ayrıca şunlar da yer alır:

Kondenser: ORC'de veya buhar türbininde kullanılan akışkan, yoğuşturularak sıvı fazına döner.

Pompa: Yoğunlaşan sıvıyı tekrar HRSG'ye göndererek sistemin sürekliliğini sağlar.

Rekuperator: Enerjiyi geri kazanarak çevrim verimliliğini artırır.

Literatürde kademeli soğutma sistemleriyle ilgili birçok çalışma mevcuttur. Ünlü (2011), R134a ve R1234yf soğutucu akışkanı kullanarak tek kademeli buhar sıkıştırımlı soğutma sisteminin enerji ve ekserji analizini yapmıştır. Ansari vd. (2018), çalışmasında alternatif soğutucu akışkanlar kullanarak bir hibrid kaskad soğutma sisteminin performans analizini yapmışlardır. Chen vd. (2017) çalışmasında mikro trijenerasyon sistemi için iki kademeli ejektörlü soğutma çevriminin performans analizini yapmışlardır. Mancuhan (2018) çalışmasında ara soğutmalı iki kademeli bir soğutma sisteminde kullanılan soğutucu akışkanları karşılaştırmalı olarak incelemiştir. Kademeli soğutma ile ilgili diğer makaleler literatürde bulunabilir.

Tablo 3: Kaskad Bir Çevrimde Cihazlarının Kütle ve Enerji Dengesi ve Entropi Üretimi.

Cihaz	Kütle Dengesi	Enerji Dengesi	Entropi Üretimi (S _{gen})
Gaz Türbini (GT)	$m_{He,in} = m_{He,out}$	$m_{He}(h_1 - h_2) = W_{GT}$	$m_{He}(s_1 - s_2) + S_{gen} \geq 0$
Isı Değiştirici (Rec)	$m_{He,in} = m_{He,out}$	$m_{He}(h_2 - h_3) = m_{He}(h_6 - h_5)$	$m_{He}(s_3 - s_2) + S_{gen} \geq 0$
HRSO (Isı Geri Kazanım Kazanı)	$m_{He,in} = m_{He,out}$	$m_{He}(h_3 - h_4) = m_{ORC}(h_7 - h_8)$	$m_{He}(s_3 - s_4) + m_{ORC}(s_8 - s_7) + S_{gen} \geq 0$
Buhar Türbini (ST)	$m_{ORC,in} = m_{ORC,out}$	$m_{ORC}(h_8 - h_9) = W_{ST}$	$m_{ORC}(s_9 - s_8) + S_{gen} \geq 0$
Kondenser	$m_{ORC,in} = m_{ORC,out}$	$m_{ORC}(h_9 - h_{10}) = Q_{out}$	$m_{ORC}(s_{10} - s_9) + S_{gen} \geq 0$
Pompa (P)	$m_{ORC,in} = m_{ORC,out}$	$m_{ORC}(h_{10} - h_7) = W_P$	$m_{ORC}(s_7 - s_{10}) + S_{gen} \geq 0$

Bu tablo, sistemin tüm cihazlarını ayrıntılı bir şekilde analiz etmek için temel sağlar. Bu analizler, sistemin termodinamik olarak nasıl çalıştığını detaylı bir şekilde anlamak için gereklidir. Elde edilen sonuçlar sayesinde:

- Verimlilik Artışı:** Sistemdeki enerji ve ekserji verimliliklerini artırmak için gerekli optimizasyonlar yapılabilir.
- Kaybın Azaltılması:** Enerji ve entropi kayıplarının minimize edilmesi sağlanır.
- Daha Yüksek Performans:** Çevrimin genel performansı artırılarak daha az yakıtla daha fazla enerji üretimi hedeflenir.
- Sürdürülebilirlik:** Atık ısının geri kazanımı ve düşük karbonlu enerji üretimi gibi sürdürülebilir enerji hedeflerine katkı sağlanır.

Bu analiz, sistemin her bir bileşeninde gerçekleşen termodinamik kayıpları ve performansı daha detaylı incelemek için kullanılabilir. Tablo 4 ile sistemin termodinamik performansını detaylı olarak incelemeyi ve her bir cihaz için enerji kalitesini değerlendirmeyi sağlar. Entropi dengesi, ekserji kaybı ve ekserji verimi analizleri şu sonuçları elde etmeye yöneliktir (Dincer ve Rosen, 2012):

- Kaynakların Daha Etkili Kullanımı:** Enerji ve ekserji kayıplarını azaltarak, mevcut kaynaklardan daha fazla iş ve enerji üretilmesini sağlar.
- Verimlilik Artışı:** Özellikle ekserji verimi yüksek cihazların daha verimli tasarım ve işletim süreçleri ile desteklenmesine olanak tanır.

- **İyileştirme Fırsatları:** Hangi cihazların daha fazla enerji kaybına ve geri döndürülemezliklere neden olduğunu tespit ederek, iyileştirme çalışmalarına rehberlik eder.
- **Sürdürülebilirlik ve Maliyet Azaltımı:** Atık ısının geri kazanımı ve enerji verimliliği sayesinde hem karbon ayak izi azalır hem de işletme maliyetleri düşer.

Tablo 4: Kombine Bir Çevrimde Cihazlarının Entropi Dengesi, Ekserji Kaybı ve Ekserji Verimi

Cihaz	Entropi Dengesi	Ekserji Kaybı	Ekserji Verimi
Gaz Türbini (GT)	$m_{He} s_1 - s_2 + S_{gen,GT} = 0$	$E_{Kaybı,GT} = E_{He,in} - E_{He,out} - W_{GT}$	$\eta_{ex,GT} = \frac{W_{GTE}}{E_{He,in} - E_{He,out}}$
Isı Değiştirici (Rec)	$m_{He}(s_3 - s_2) + m_{He}(s_6 - s_5) + S_{gen,Rec} = 0$	$E_{Kaybı,Rec} = E_{He,in} - E_{He,out}$	$\eta_{ex,REC} = \frac{E_{Transfer}}{E_{He,in} - E_{He,out}}$
HRSG (Isı Geri Kazanım)	$m_{He}(s_4 - s_3) + m_{orc}(s_8 - s_7) + S_{gen,HRSG} = 0$	$E_{Kaybı,HRSG} = E_{He,out} - E_{ORC,in} - E_{ORC,out}$	$\eta_{ex,HRSG} = \frac{E_{ORC,out}}{E_{He,in}}$
Buhar Türbini (ST)	$m_{orc}(s_9 - s_8) + S_{gen,ST} = 0$	$E_{Kaybı,ST} = E_{ORC,in} - E_{ORC,out} - W_{ST}$	$\eta_{ex,ST} = \frac{W_{ST}}{E_{ORC,in} - E_{ORC,out}}$
Kondenser	$m_{orc}(s_{10} - s_9) + S_{gen,COND} = 0$	$E_{Kaybı,Cond} = E_{ORC,in} - E_{ORC,out} - Q_{out}$	$\eta_{ex,cond} = \frac{E_{out}}{E_{ORC,in}}$
Pompa (P)	$m_{orc}(s_7 - s_{10}) + S_{gen,p} = 0$	$E_{Kaybı,P} = W_{ST} - (E_{ORC,out} - E_{ORC,in})$	$\eta_{ex,P} = \frac{E_{ORC,out} - E_{ORC,in}}{W_P}$

Bu analizler sonucunda sistemin genel performansını artırmak ve enerji dönüşümlerini optimize etmek mümkün hale gelir.

Bu kapsamda, termodinamiğin birinci ve ikinci kanunları kullanılarak kütle, enerji ve ekserji denklemleri çıkarılmıştır (Çengel ve Boles, 2019). Sistemi daha kolay analiz edebilmek için matematiksel analiz sırasında aşağıdaki kabuller yapılmıştır;

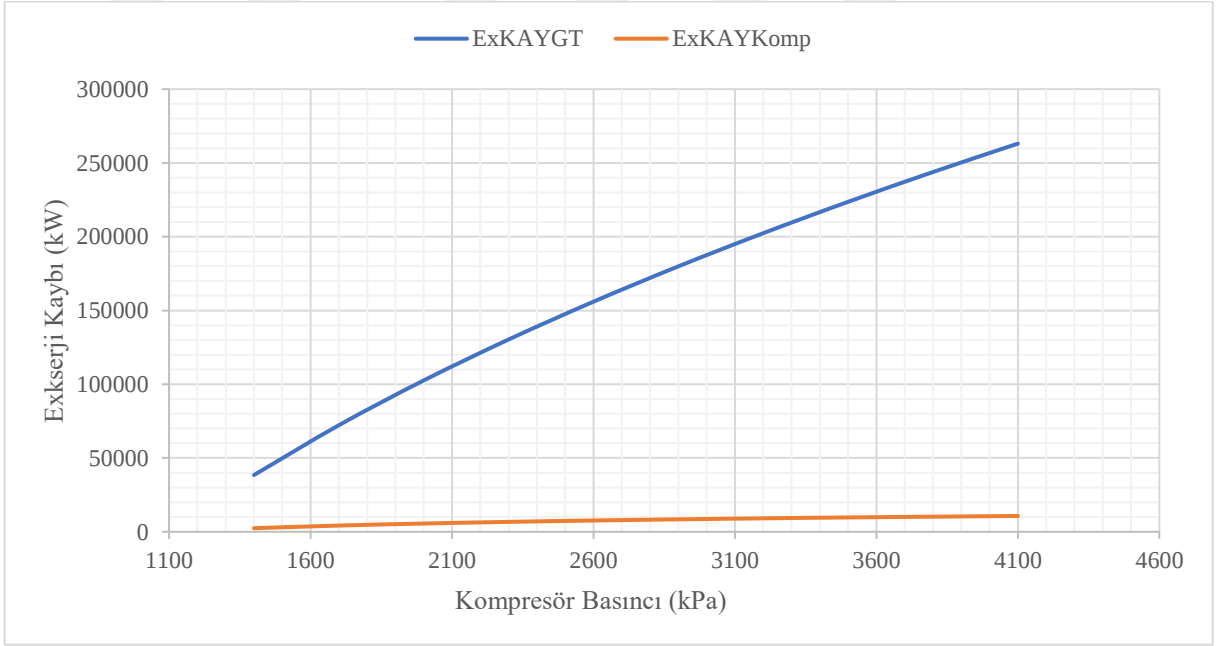
ÜÇÜNCÜ BÖLÜM

3. BULGULAR

3.1. BULGULAR

Bu çalışmada Şekil 8’de verilen ve Brayton ve Rankine çevrimlerinden oluşan ve atık ısı kullanan kombine çevrimin Tablo 3 ve Tablo 4’te verilmiş olan matematiksel formüllere göre enerji ve ekserji analizleri yapılmıştır. Sistemde kullanılan helyum ve pentan gazı kademeli sistemde çalışması sırasında oluşan hal değişimleri ve buna bağlı olarak etkilenen verimlilikler ve diğer değerlere aşağıda yer verilmiştir.

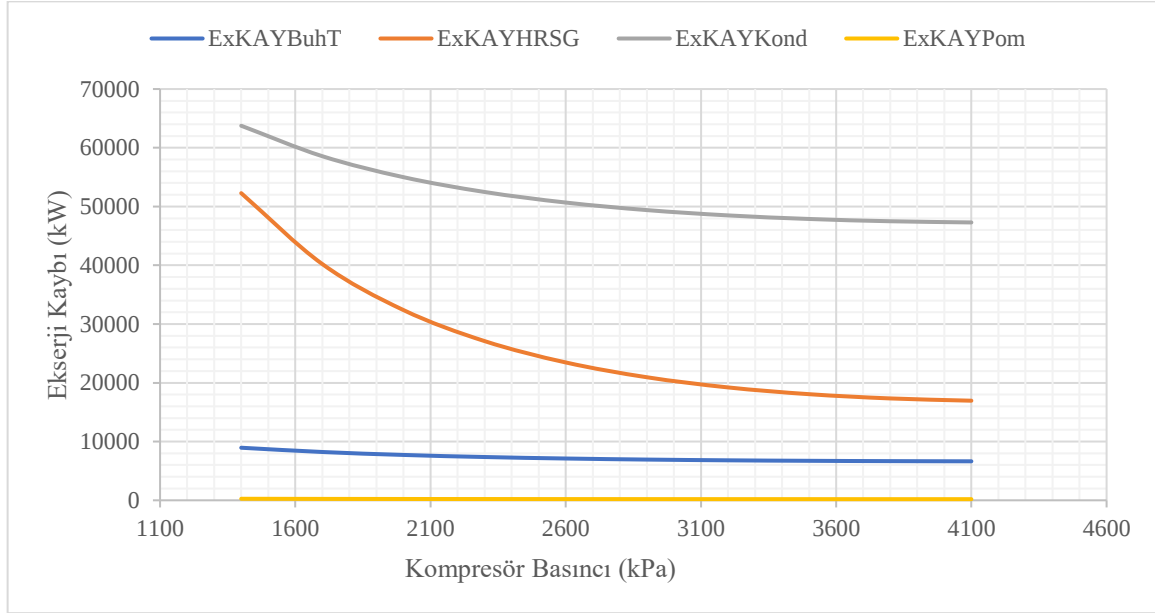
Bu, sistemin bu bileşenlerinde iyileştirme yapılması durumunda ekserji veriminin artırılabilceği gösterilmiştir. Aşağıdaki grafikler ile bu sistemin daha detaylı analizi yapılmıştır.



Şekil 9: Brayton Çevriminde Kompresör Basıncındaki Artışın Ekserji Kaybı Üzerindeki Etkisi

Şekil 9’da, gaz türbininde ve kompresörde meydana gelen ekserji kayıplarının karşılaştırmalı değişimi gösterilmektedir. Yatay ekseninde kompresör basıncı, düşey ekseninde ise ekserji kaybı yer almaktadır. Grafikte mavi çizgiyle temsil edilen ExKAYGT eğrisi, kompresör basıncı arttıkça gaz türbin kaybının da önemli ölçüde arttığını göstermektedir. Bu ilişki doğrusal olmayan bir artış trendi göstermektedir ve bu durum, kompresördeki verimsizliklerin sistemin en büyük kayıp noktası olan gaz türbinine doğrudan ve güçlü bir etkisi olduğunu ortaya koymaktadır. Turuncu çizgiyle gösterilen ExKAYKomp eğrisi ise daha yatay seyretmekte ve artışı oldukça sınırlı kalmaktadır. Bu, kompresördeki kayıpların mutlak anlamda düşük

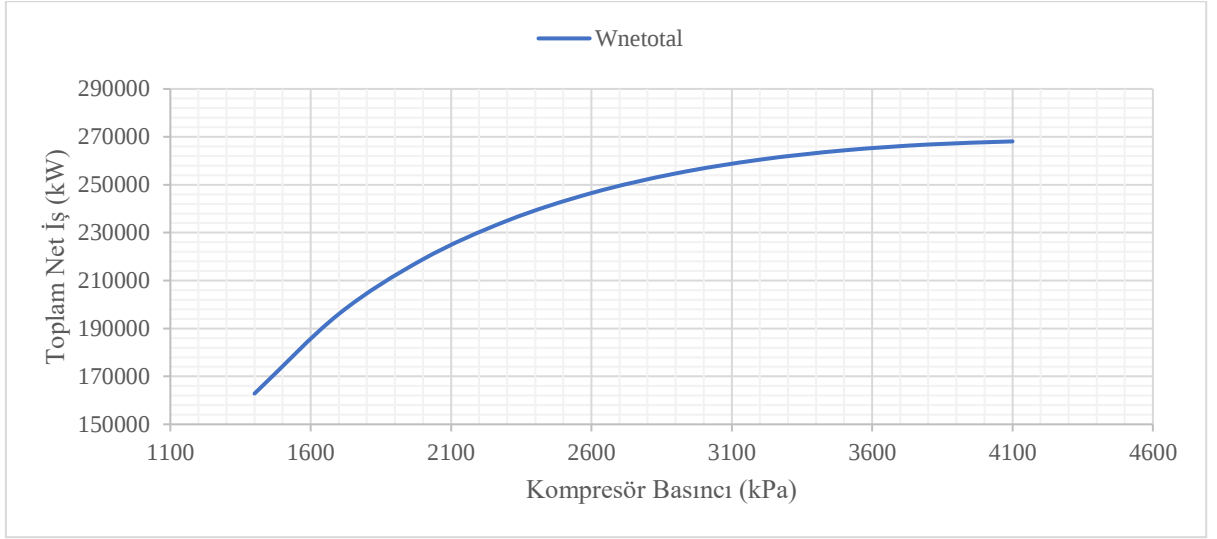
olduğunu, ancak sistem üzerindeki dolaylı etkilerinin daha kritik bileşenlerde (özellikle GT) hissedildiğini göstermektedir. Bu grafik, kompresörde yapılacak küçük iyileştirmelerin bile gaz türbini üzerindeki ekserji kayıplarını ciddi oranda azaltılabileceğini göstermektedir. Dolayısıyla, sistem optimizasyonu yalnızca en büyük kayıpların olduğu bileşene değil, bu kayıpları tetikleyen veya etkileyen yardımcı bileşenlere de odaklanmalıdır.



Şekil 10: Rankine Çevriminde Kompresör Basıncındaki Artışın Ekserji Kaybı Üzerine Etkisi

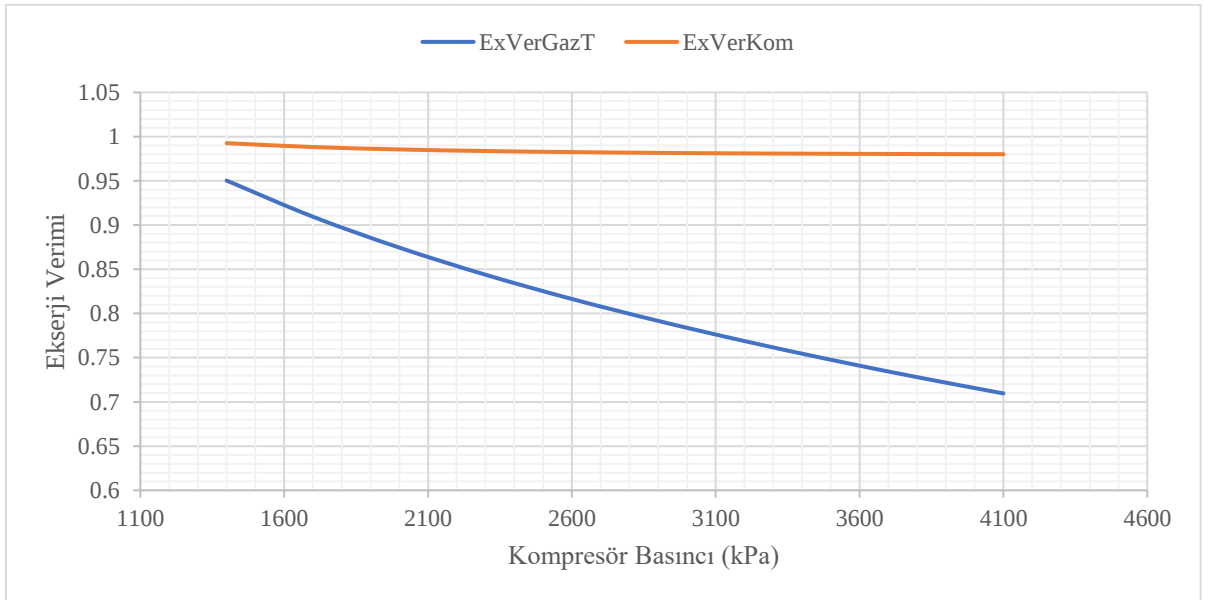
Şekil 10'da, sistemin dört temel bileşenine ait (Buhar Türbini, HRSG, Kondenser ve Pompa) ekserji kayıplarının farklı koşullara bağlı olarak nasıl değiştiği gösterilmektedir. Grafik, bileşenlerin ekserji kaybı açısından sisteme olan etkilerini karşılaştırmalı biçimde ortaya koymaktadır. Grafik incelendiğinde, HRSG ve kondenser birimlerinde ekserji kayıplarının artan koşullar doğrultusunda belirgin şekilde azaldığı görülmektedir. Bu durum, söz konusu bileşenlerin çalışma aralığına duyarlı olduğunu ve uygun işletme parametreleri seçildiğinde geri tersinmezliklerin azaltılabileceğini göstermektedir. Özellikle kondenserin yüksek başlangıç kaybı, düşük sıcaklıkta çevreye atılan ısıнын sistem açısından ciddi bir ekserji kaybı oluşturduğunu ortaya koymaktadır.

Sonuç olarak bu grafik, sistem optimizasyonu açısından hangi bileşenlerin iyileştirmeye daha açık olduğunu belirleme konusunda önemli bir yol gösterici olup, özellikle HRSG ve kondenser birimlerinde tasarımsal ve operasyonel iyileştirmelerin ekserji verimini artırabileceğini göstermektedir.



Şekil 11: Kompresör Basıncına Göre Tüm Sistemde Üretilen İş Miktarının Değişimi

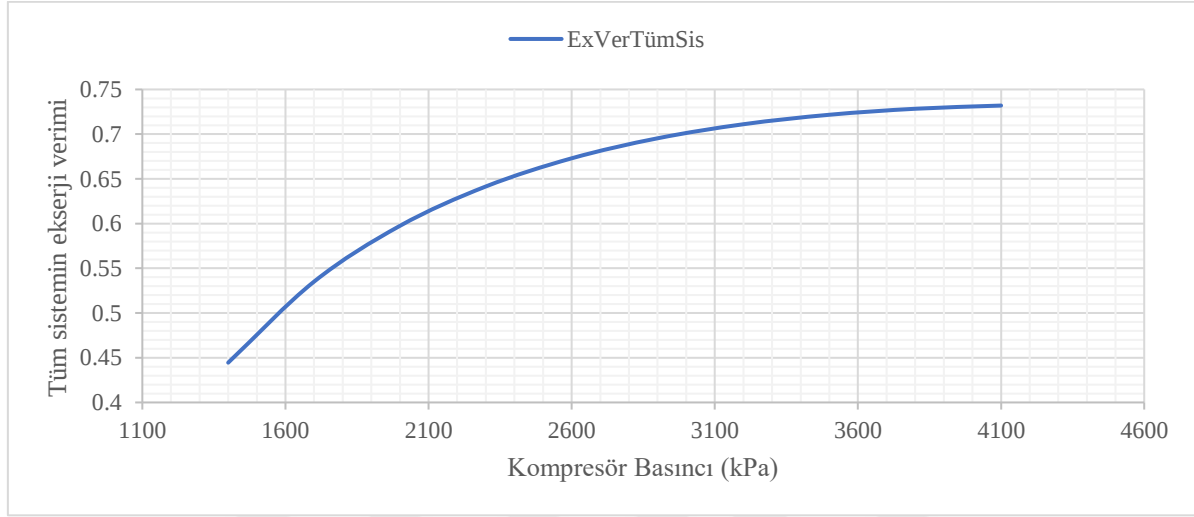
Şekil 11’de, kompresör basıncının artışına bağlı olarak sistemin toplam net iş üretimi ($W_{nettotal}$) değerinin değişimi gösterilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, kompresör basıncı yükseldikçe net iş üretimi de düzenli bir şekilde artmaktadır. Ancak eğrinin eğimi incelendiğinde, artışın giderek yavaşladığı ve grafik eğrisinin azalan marjinal kazanç eğilimi sergilediği görülmektedir. Bu durum, sistemin belirli bir noktadan sonra basınç artışına karşı daha düşük oranda net iş üretebildiğini ve optimum nokta sonrasında enerji verimliliğinin düşmeye başladığını göstermektedir.



Şekil 12: Kompresör Basıncının Brayton Çevriminde Gaz Türbini ve Kompresör Üzerine Etkisi

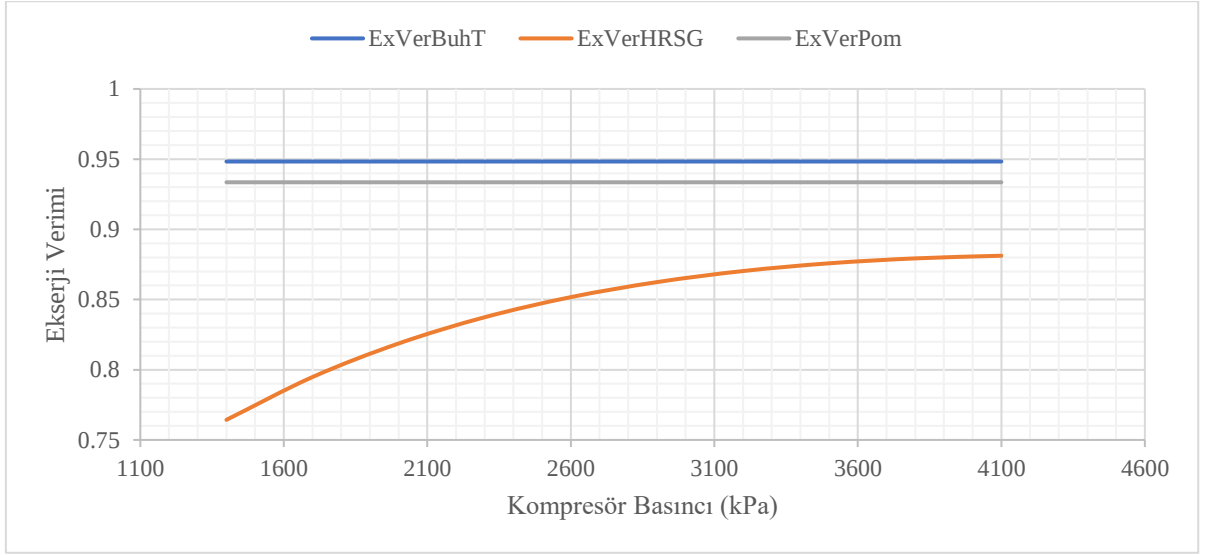
Şekil 12’de artan kompresör basıncının gaz türbini (ExVerGazT) ve kompresör (ExVerKom) ekserji verimine etkisi gösterilmektedir. Elde edilen sonuçlara göre, kompresör basıncı arttıkça gaz türbininin ekserji verimi düzenli bir şekilde azalmaktadır. Bu durum, daha

yüksek basınç seviyelerinde gaz türbininde meydana gelen geri dönüşümsüzlüklerin arttığını ve verimin düştüğünü göstermektedir. Öte yandan, kompresörün ekserji verimi (ExVerKom) yüksek seviyelerde seyretmekte olup, artan basınçla birlikte çok sınırlı bir düşüş göstermektedir. Bu da kompresörün genel olarak verimli çalışan bir bileşen olduğunu ve basınca karşı daha kararlı bir performans sergilediğini göstermektedir. Sonuç olarak, sistem optimizasyonu açısından gaz türbininin çalışma basıncına duyarlılığı dikkate alınmalı ve bu bileşenin optimum basınç aralığında çalışması sağlanmalıdır.



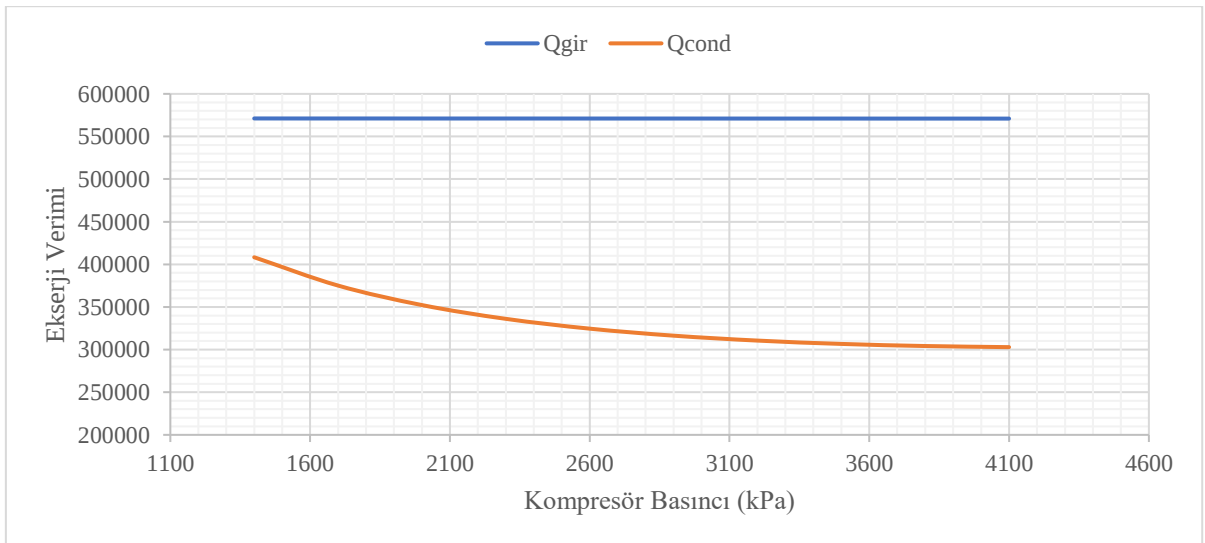
Şekil 13: Tüm Sistem Ekserji Verimi ile Kompresör Basıncı Arasındaki İlişki

Şekil 13'te Y ekseninde ekserji verimi, X ekseninde ise kompresör basıncı yer almaktadır. Görüldüğü üzere ekserji verimi arttıkça kompresör basıncı da artmakta, ancak bu artış giderek azalan bir hızla gerçekleşmektedir. Başlangıçta yaklaşık 0,44 olan ekserji verimi, artarak 0,73 seviyesine ulaşırken, kompresör basıncı da yükselmektedir. Eğrinin şekli, sistemin ilk başta verim artışıyla birlikte kompresör basıncında önemli bir artış yaşadığını, ancak verim arttıkça bu etkinin azaldığını göstermektedir. Bu durum, sistemin belirli bir verim seviyesinden sonra doygunluğa ulaştığını ve daha fazla verim artışı için daha yüksek basınçlara ihtiyaç duyulduğunu göstermektedir. Bu da hem tasarım hem de enerji maliyeti açısından dikkate alınması gereken bir durumdur. Sonuç olarak, ekserji veriminin artırılması kompresör basıncını da yükselttiğinden, sistem tasarımında verim–basınç dengesi dikkatle optimize edilmelidir. Yüksek verim hedeflenirken, sistemin mekanik sınırları ve enerji tüketimi de göz önünde bulundurulmalıdır.



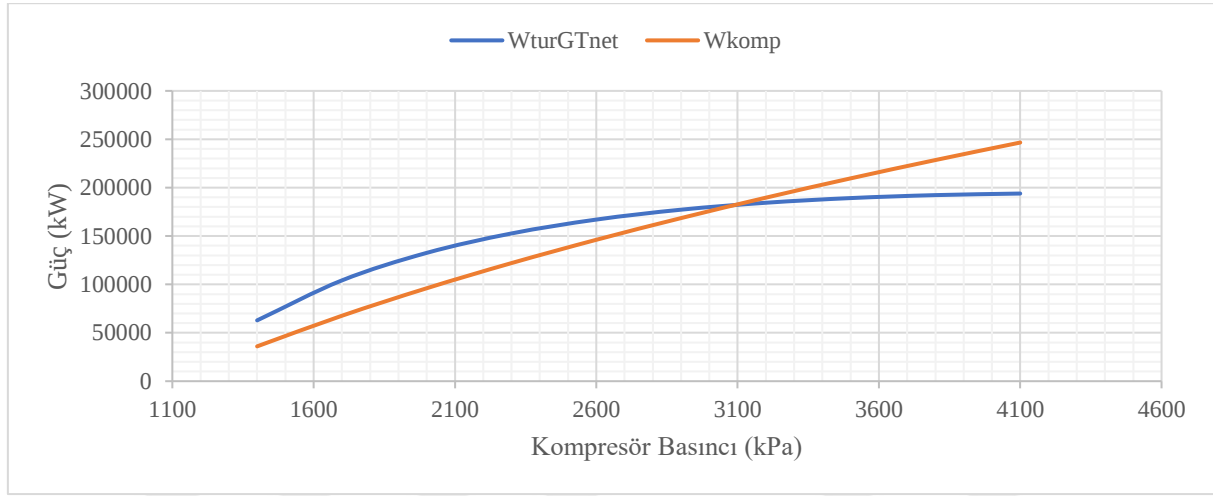
Şekil 14: Kompresör Basıncının, Buhar Türbini, Isı Geri Kazanım Buhar Jeneratörü, Isı Değiştiricisi ve Pompanın Ekserji Verime Olan Etkisi

Şekil 14'te, artan kompresör basıncının buhar türbini (ExVerBuhT), HRSG (ExVerHRSG) ve pompa (ExVerPom) ekserji verimi üzerindeki etkileri karşılaştırmalı olarak gösterilmiştir. Grafik incelendiğinde, buhar türbini ve pompa bileşenlerinin ekserji verimlerinin kompresör basıncından hemen hemen etkilenmediği, sabit ve yüksek seviyelerde kaldığı görülmektedir. Bu durum, bu bileşenlerin çalışma performanslarının kompresör basıncına duyarlı olmadığını ve sistem içinde kararlı çalıştığını göstermektedir. Buna karşılık, HRSG (Isı Geri Kazanım Ünitesi) bileşeninin ekserji verimi, kompresör basıncının artmasıyla birlikte düzenli bir şekilde yükselmektedir. Bu artış, HRSG sisteminin özellikle yüksek kompresör basınçlarında daha verimli çalıştığını ve ısı geri kazanım etkinliğinin bu koşullarda arttığını göstermektedir.



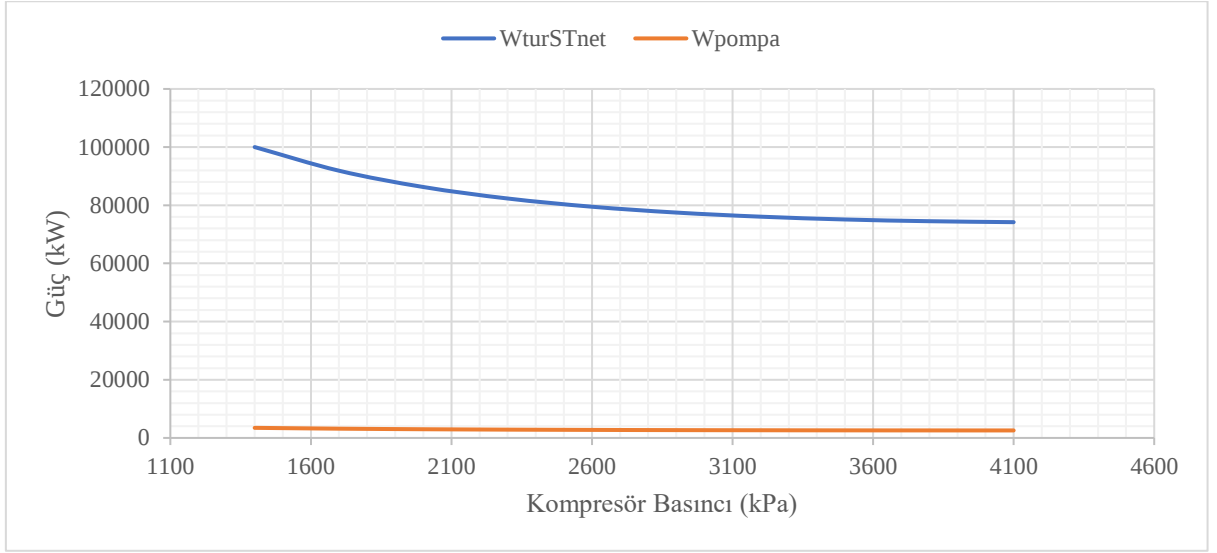
Şekil 15: Kompresör Basıncının Tüm Sistem Ekserji Verimine Olan Etkisi

Şekil 15'te, artan kompresör basıncının sisteme giren toplam ısı miktarı (Q_{gir}) ve yoğuşturucudan atılan ısı miktarı (Q_{cond}) üzerindeki etkisi gösterilmektedir. Grafik incelendiğinde, Q_{gir} değerinin (sisteme giren enerji) kompresör basıncıyla birlikte neredeyse sabit kaldığı gözlemlenmektedir. Bu durum, sistemin ısı alma kapasitesinin basınçtan fazla etkilenmediğini göstermekte ve enerji girişinde kararlı bir yapı olduğunu ifade etmektedir. Buna karşılık, Q_{cond} (yoğuşturucudan atılan ısı) değeri kompresör basıncı arttıkça azalmakta ve daha düşük seviyelerde sabitlenmektedir. Bu eğilim, sistemin kompresör basıncı arttıkça çevreye daha az ısı attığını, dolayısıyla enerjinin daha verimli kullanıldığını ve atık ısı oranının azaldığını göstermektedir.



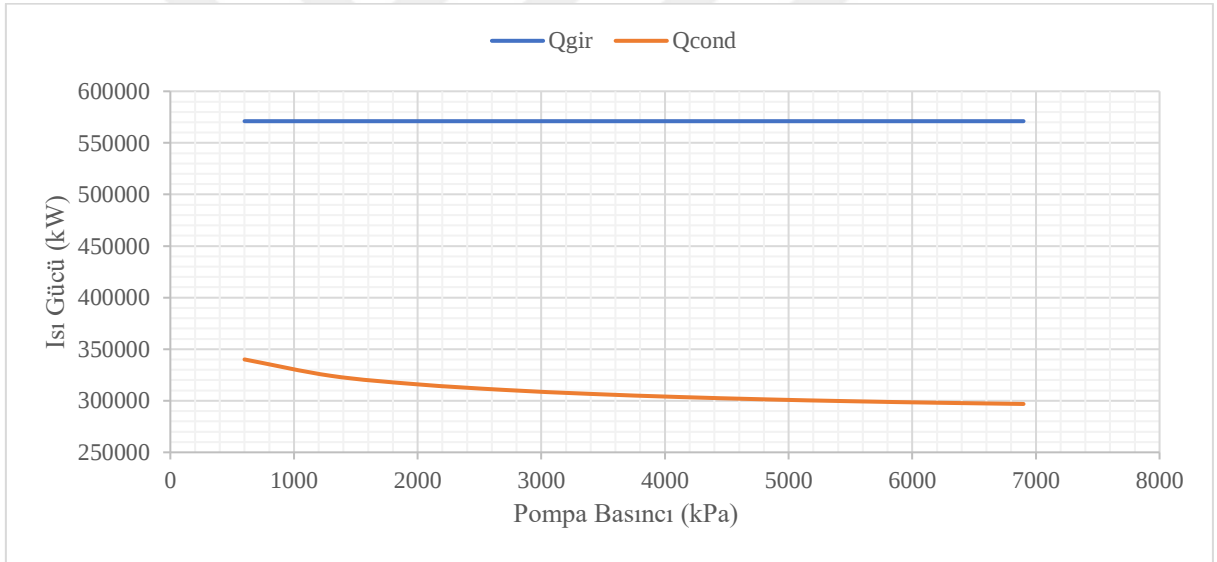
Şekil 16: Kompresör Basıncının Gaz Türbini, Reaktör ve Kompresör Enerji Üretimi Üzerine Etkisi

Şekil 16'da, kompresör basıncındaki artışın gaz türbininden elde edilen net iş ($W_{turGTnet}$) ile kompresörün iş gereksinimi (W_{komp}) üzerindeki etkisi gösterilmektedir. Yatay ekseninde kompresör basıncı, dikey ekseninde ise iş gücü yer almaktadır. $W_{turGTnet}$ eğrisi, basınç arttıkça türbinden elde edilen işin de yükseldiğini göstermektedir. Ancak bu artış belirli bir noktadan sonra yavaşlamakta, yani türbinin iş üretimindeki artış azalan verimle devam etmektedir. Bu durum, türbinin yüksek basınçlarda çalışma sınırlarına yaklaştığını işaret etmektedir. Buna karşılık, W_{komp} eğrisi daha dik ve kararlı bir şekilde yükselmektedir. Bu, kompresörün basınç yükseldikçe daha fazla enerjiye ihtiyaç duyduğunu açıkça göstermektedir. Grafik üzerinde iki eğrinin kesiştiği noktadan sonra, kompresör iş gereksinimi türbinden elde edilen net işi aşmaktadır.



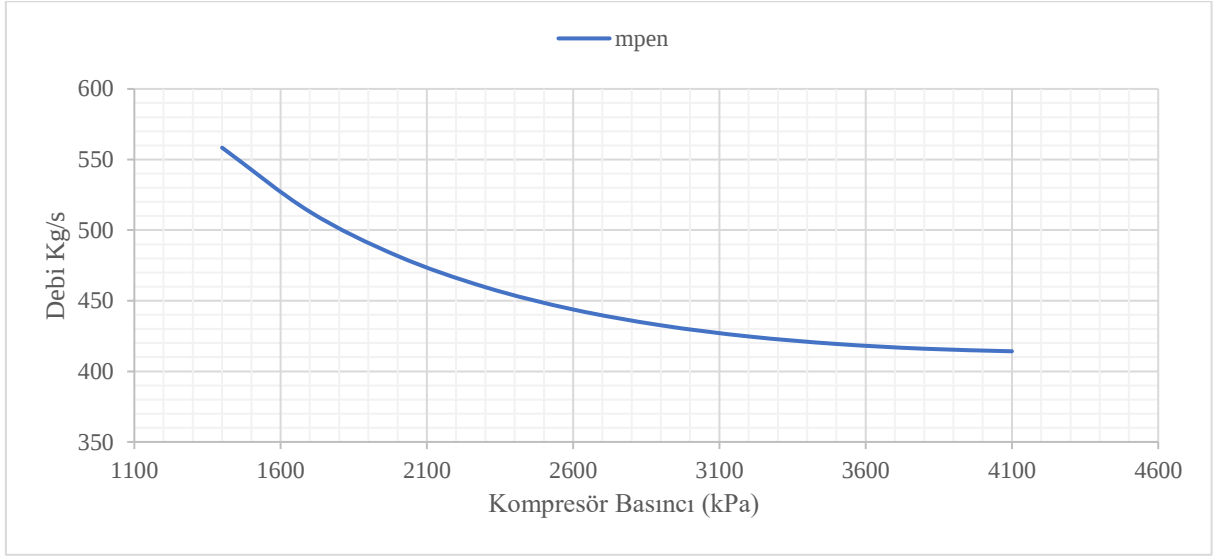
Şekil 17: Kompresör Basıncına Bağlı Olarak Net Türbin Gücü ve Pompa Gücünün Değişimi

Şekil 17’de, artan kompresör basıncı ile net türbin gücünün ($W_{turSTnet}$) azaldığı, pompa gücünün (W_{pompa}) ise sabit kaldığı görülmektedir.



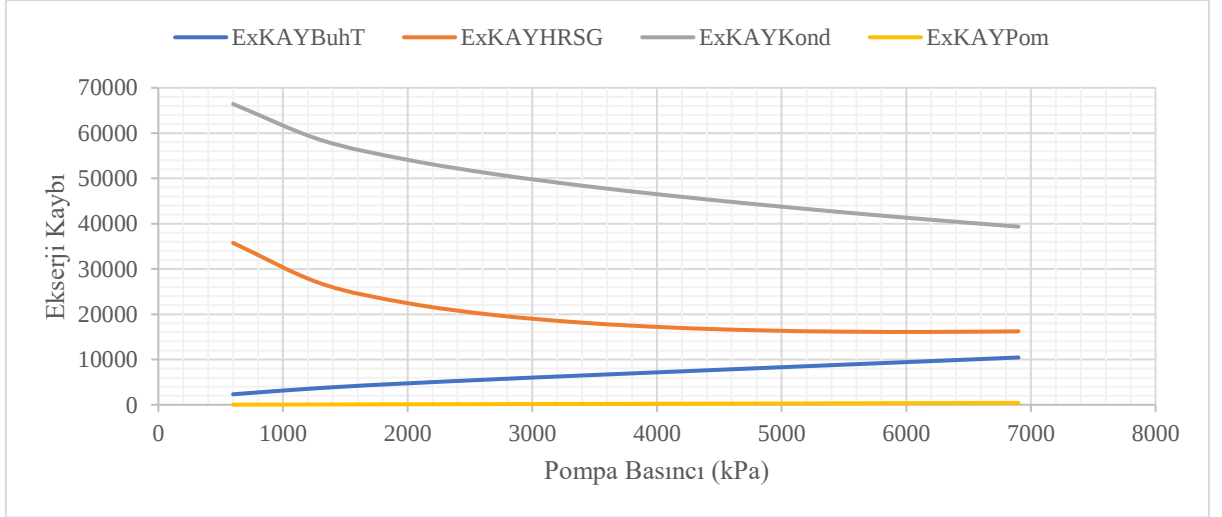
Şekil 18: Pompa Basıncının Isı Gücü Üzerindeki Etkisi

Şekil 18’de, pompa basıncının artışının sistemdeki toplam ısı girişi (Q_{gir}) ve yoğuşturucudan atılan ısı (Q_{cond}) değerleri üzerine değişimi gösterilmiştir. Düşey eksen ısı gücü, yatay eksen ise pompa basıncı temsil edilmektedir. Q_{gir} eğrisi, sistem parametresi değiştiğinde hemen hemen sabit kalmakta, sistemin enerji ihtiyacının bu değişimden önemli ölçüde etkilenmediğini ortaya koymaktadır. Bu durum, enerji girişinin kontrol edilebilir ve kararlı olduğunu göstermektedir. Buna karşın, Q_{cond} (yoğuşturucudan atılan ısı) değeri pompa basıncı arttıkça düzenli olarak azalmaktadır. Bu azalma, çevreye atılan atık ısı miktarının azaldığını ve dolayısıyla sistemin enerjiyi daha verimli kullandığını göstermektedir.



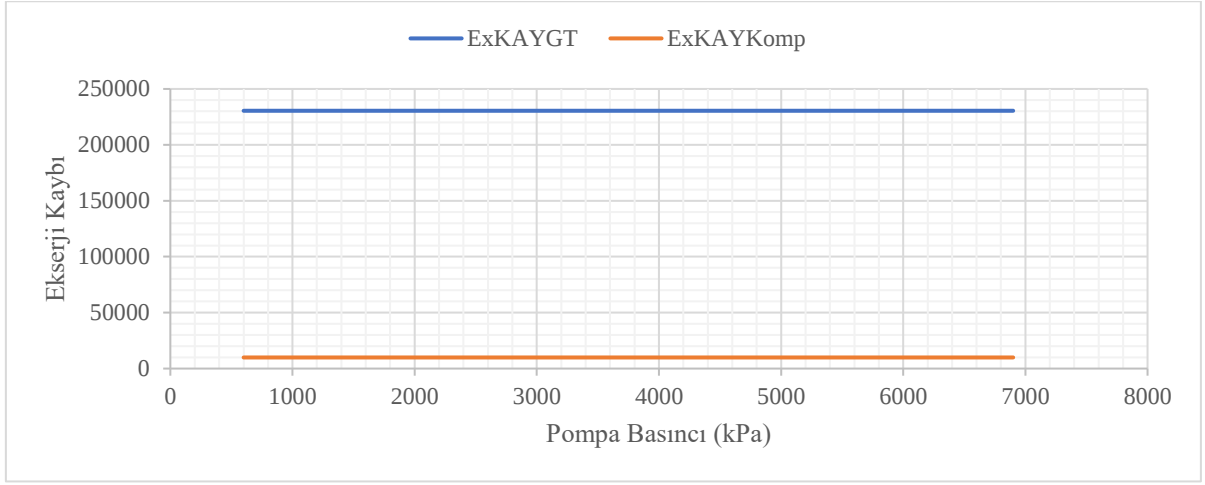
Şekil 19: Kompresör Basıncı ile Rankine Çevrimi Akışkanı Olan Pentan Arasındaki Etkileşimler

Şekil 19'da, kompresör basıncındaki artışa bağlı olarak sistemdeki mpen (pentan kütesel debisi) değerinin değişimi gösterilmektedir. Grafik incelendiğinde, kompresör basıncı arttıkça pentan kütesel debisi azaldığı, ancak bu azalmanın yavaşladığı ve eğrinin sabite yaklaştığı görülmektedir. Bu, çevrim verimliliği açısından olumlu bir durumdur çünkü daha düşük debiyle daha fazla iş üretilebilmesi mümkündür.



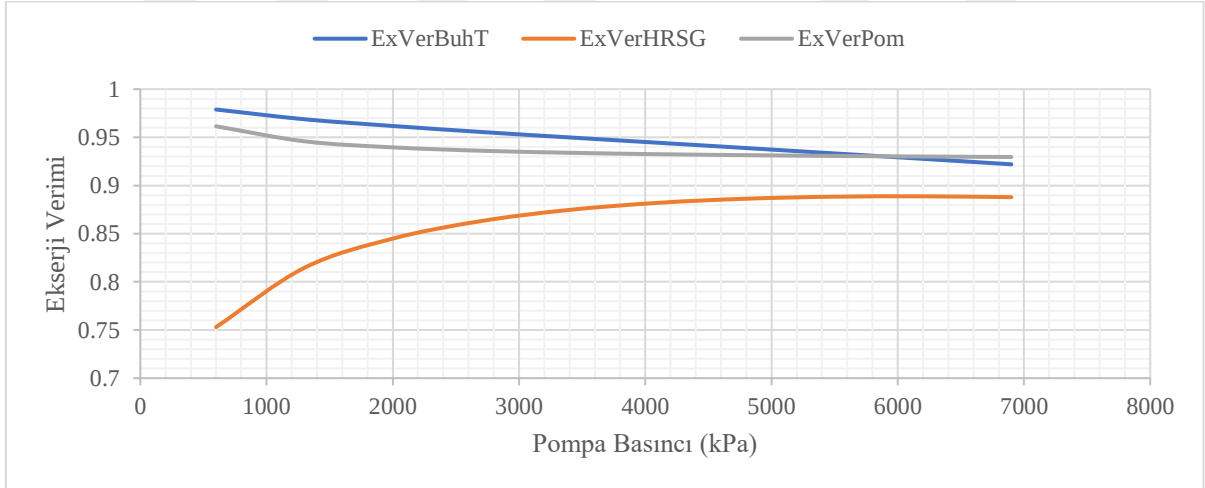
Şekil 20: Pompa Basıncının Ekserji Üzerindeki Etkisi

Şekil 20'de, sistemdeki iyileştirme potansiyelinin özellikle kondenser ve HRSG gibi bileşenlerde yoğunlaştığını; buhar türbininin ise belirli sınırların üzerinde çalıştırıldığında verim kaybına neden olabileceğini göstermektedir. Pompa ise yüksek verimlilikte ve düşük kayıpla çalıştığı için sistem açısından avantajlı bir bileşendir. Bileşen bazlı bu analizler, sistemin termodinamik performansını artırmaya yönelik hedefli optimizasyon çalışmaları için rehber niteliğindedir.



Şekil 21: Brayton Çevriminde Pompa Basıncının Gaz Türbini ve Kompresördeki Ekserji Kayıplarına Etkisi

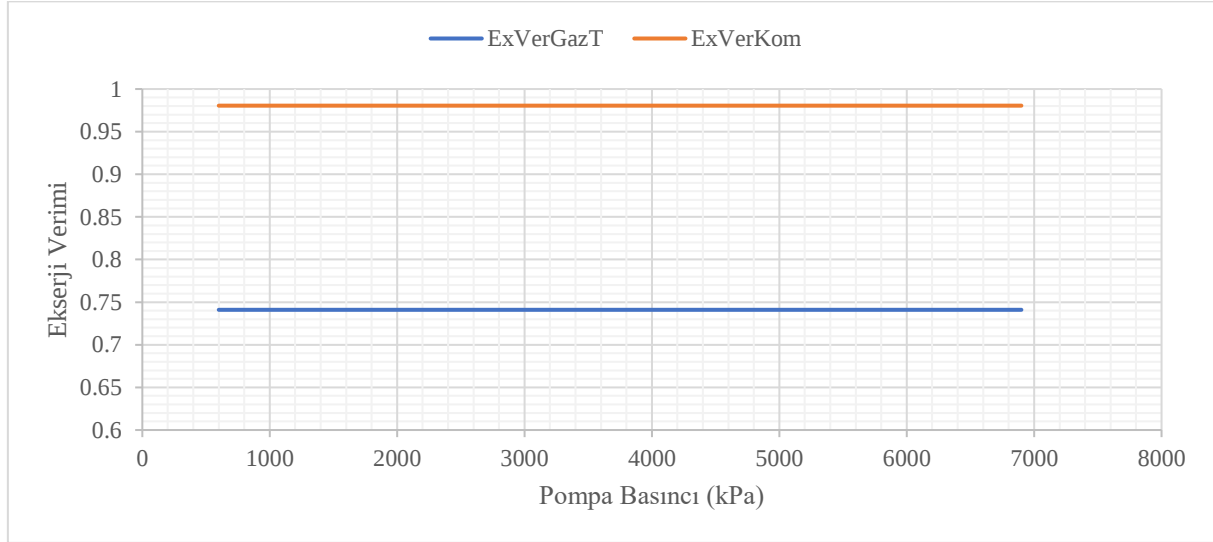
Şekil 21’de, pompa basıncının değişimine bağlı olarak gaz türbini (ExKAYGT) ve kompresör (ExKAYKomp) bileşenlerinde meydana gelen ekserji kayıplarının değişimi gösterilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre her iki eğri de yatay bir doğrultuda ilerlemekte, yani incelenen parametre değişimi boyunca ekserji kayıplarında herhangi bir değişim gözlenmemektedir. Bu durum, analiz edilen parametrenin bu iki bileşendeki geri dönüşümsüzlükler üzerinde önemli bir etkisinin olmadığını, diğer bir deyişle gaz türbini ve kompresörün sabit performans sergilediğini göstermektedir.



Şekil 22: Rankine Çevriminde Pompa Basıncının Çevrimdeki Bileşenlerin Ekserji Verimleri Üzerindeki Etkisi

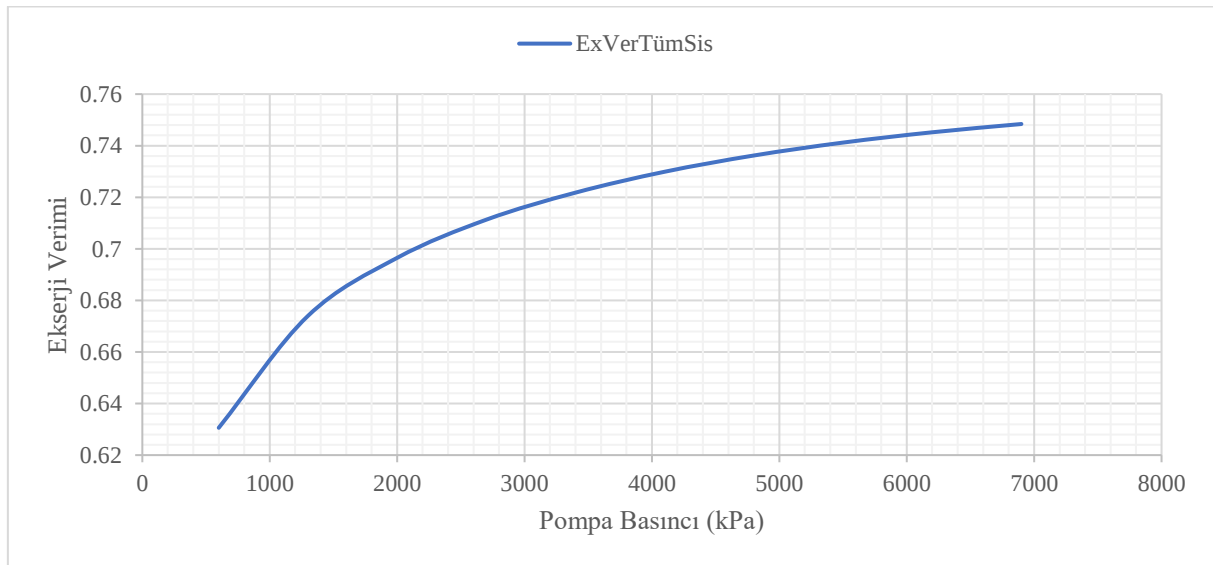
Şekil 22’de, pompa basıncının artışına bağlı olarak buhar türbini (ExVerBuhT), HRSG (ExVerHRSG) ve pompa (ExVerPom) bileşenlerinin ekserji verimlerindeki değişim gösterilmiştir. Buhar türbini yüksek başlangıç verimine sahip olup, pompa basıncı arttıkça veriminde kademeli bir azalma gözlenmektedir. Bu azalma, türbinde meydana gelen genişleme işlemlerinde geri dönüşümsüzlüklerin arttığını ve verim kaybı oluştuğunu göstermektedir. HRSG, düşük bir başlangıç verimi ile başlamakta, ancak sistem parametresi arttıkça verimi

istikrarlı şekilde yükselmekte ve daha sonra doyma noktasına ulaşmaktadır. Burada, HRSG'nin daha yüksek değerlerde daha etkin çalıştığını ve ısı geri kazanımının arttığını gösterir. Pompa ise genel olarak yüksek ve stabil bir verimle çalışmaktadır. Sisteme giren enerjiye kıyasla çok az ekserji kaybı oluşturduğundan, pompa sistemin en kararlı ve verimli çalışan birimi olarak değerlendirilebilir.



Şekil 23: Brayton Çevriminde Pompa Basıncının Gaz Türbini ve Kompresörün Ekserji Verimi Üzerindeki Etkisi

Grafik, sistemde net iş üretiminin sınırlı kaldığını ve analiz edilen parametrelere bağlı olarak bu değerlerin arttırılamadığını göstermektedir. Bu nedenle, toplam sistem performansının iyileştirilebilmesi için özellikle kompresör iş yükünün azaltılması veya türbin çıkış işinin artırılması yönünde tasarımsal müdahaleler yapılması gereklidir.

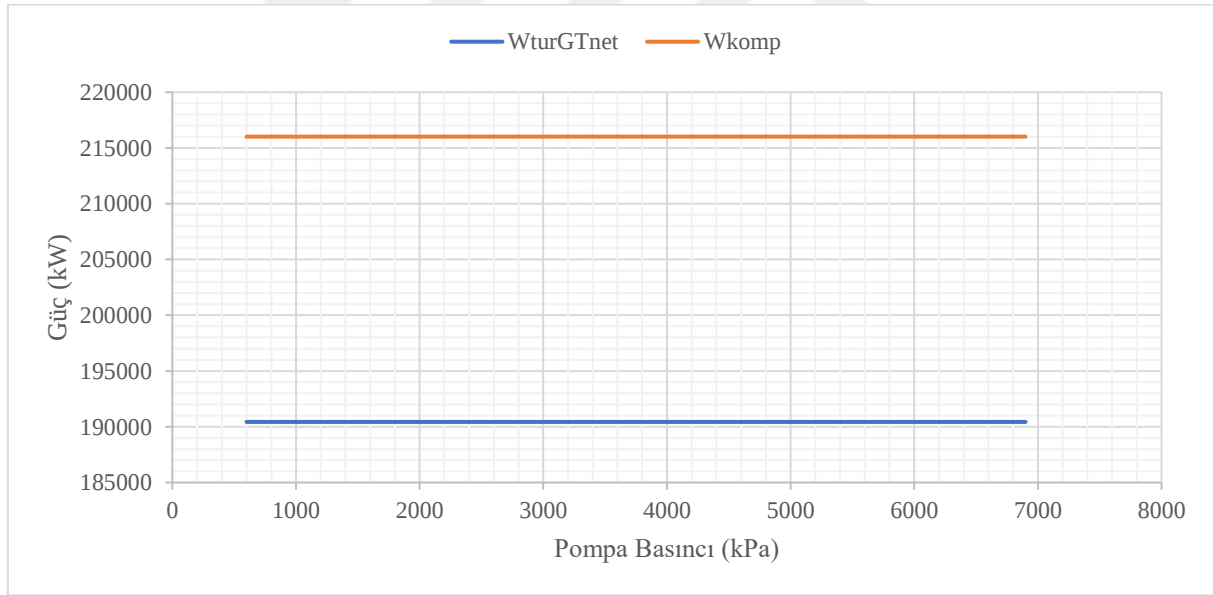


Şekil 24: Pompa Basıncının Tüm Sistemin Ekserji Verimi Üzerindeki Etkisi

Şekil 23'te, gaz türbini (ExVerGazT) ve kompresör (ExVerKom) bileşenlerinin ekserji verimlerinin pompa basıncına bağlı olarak nasıl değiştiği gösterilmiştir. Görüldüğü üzere her

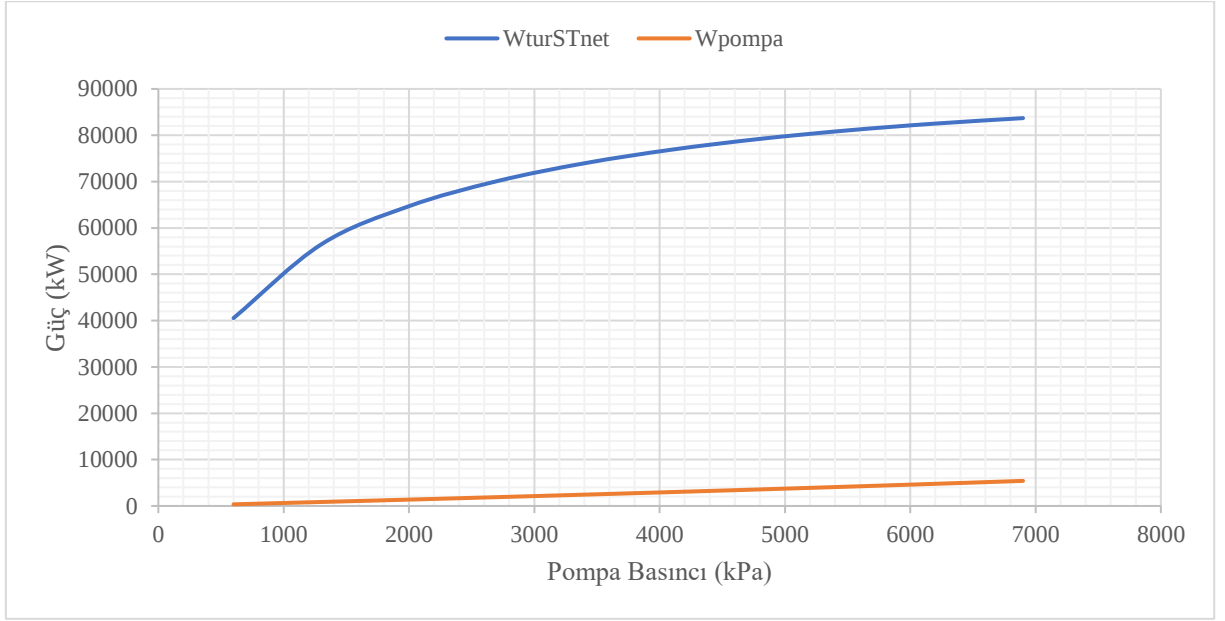
iki eğri de yataydır, yani incelenen parametre değişiminde bu bileşenlerin ekserji veriminde herhangi bir değişim gözlenmemektedir. Gaz türbini yaklaşık %74 seviyesinde sabit bir ekserji verimiyle çalışmakta ve sabit kalmaktadır. Kompresör ise oldukça yüksek (~%97) pompa basıncından bağımsız çalışmaktadır.

Şekil 24’te, ExVerTümSis yani sistemin genel ekserji verimi, değişen pompa basıncına bağlı olarak değişimi gösterilmiştir. Eğri, sistem parametresi arttıkça ekserji veriminin düzenli bir şekilde yükseldiğini ve eğimin gittikçe azaldığını ortaya koymaktadır. Bu artış, sistemin genel geri dönüşümsüzlüklerinin azaldığını ve enerjinin daha verimli şekilde işe dönüştürüldüğünü göstermektedir. Ancak eğrinin yukarı doğru yavaşlayan eğilimi, verim artışının belirli bir noktadan sonra doygunluğa ulaştığını, yani sistemin maksimum verimlilik sınırına yaklaştığını göstermektedir. Bu grafik, sistem genelinde ekserji veriminin artırılabilir olduğunu, ancak bu artışın belirli bir aralıkla sınırlı olduğunu göstermektedir. Verim artışıyla birlikte daha az atık, daha fazla faydalı iş üretimi sağlandığı için sistem optimizasyonu açısından oldukça olumlu bir sonuçtur. Bu bağlamda, optimum sistem parametresi belirlenerek maksimum ikinci yasa verimliliğine ulaşmak mümkündür.



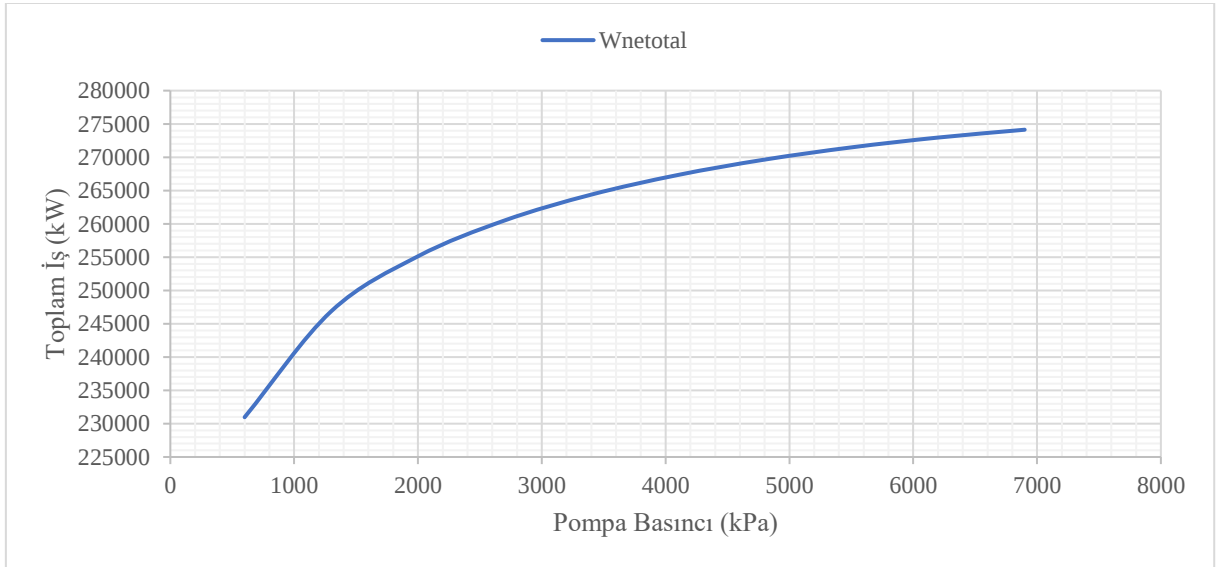
Şekil 25: Brayton Çevriminde Pompa Basıncının Çevrimin Farklı Enerji Bileşenleri Üzerindeki Etkisi

Grafikte, gaz türbininden elde edilen net iş ($W_{turGTnet}$) ve kompresör iş gereksinimi (W_{komp}), değişen pompa basıncı karşısında gösterilmiştir. Her iki eğrinin de yatay seyretmesi, analiz edilen parametre değişimi boyunca bu değerlerin sabit kaldığını ifade etmektedir.



Şekil 26: Rankine Çevriminde Pompa Basıncının Farklı Enerji Bileşenleri Üzerindeki Etkisi

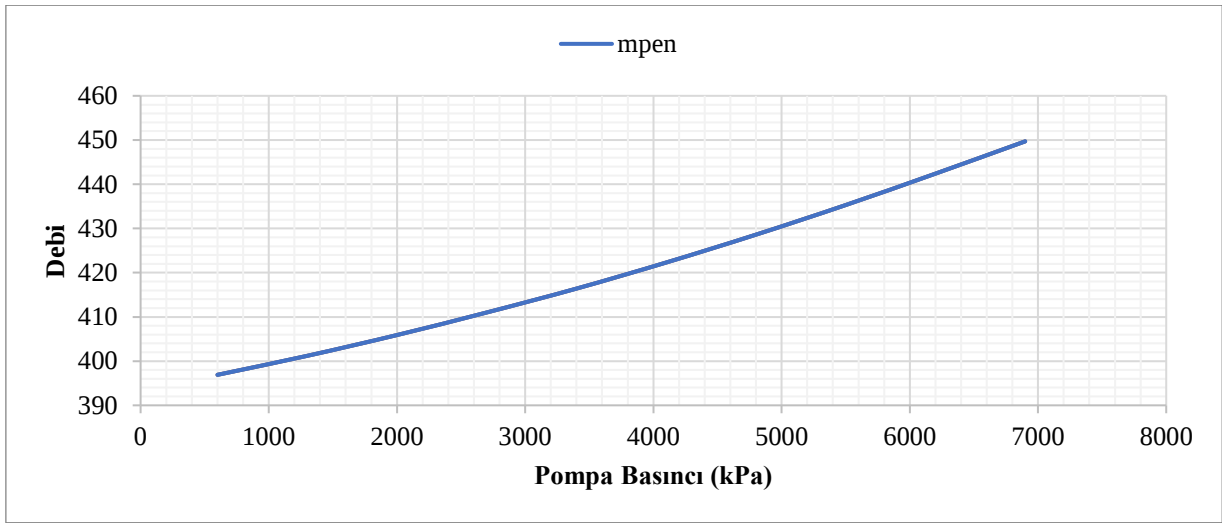
Şekil 26'da, pompa basıncına bağlı olarak buhar türbininden elde edilen net iş gücü ($W_{turSTnet}$) ve pompanın iş gereksinimi (W_{pompa}) değerlerinin değişimi gösterilmiştir. $W_{turSTnet}$, pompa basıncı arttıkça belirgin şekilde artmakta; ancak bu artış giderek yavaşlayan bir eğilim göstermektedir. Bu durum, buhar türbininin performansının belirli bir aralığa kadar iyileştirilebildiğini, ancak daha sonra doyuma ulaştığını göstermektedir. W_{pompa} ise daha düşük düzeyde seyretmekle birlikte parametre arttıkça doğrusal olarak yükselmektedir. Bu artış, pompanın çalışma koşullarının artan sistem yüküyle birlikte daha fazla enerji gerektirdiğini ortaya koymaktadır.



Şekil 27: Pompa Basıncının Tüm Sistemin Net İş Üretimi Üzerindeki Etkisi

Şekil 27'de, sistemden elde edilen toplam net iş gücü ($W_{netotal}$) ile pompa basıncı arasındaki ilişki gösterilmiştir. Grafik eğrisi incelendiğinde, pompa basıncı arttıkça toplam net

iş üretiminin de düzenli olarak yükseldiği, ancak artış hızının giderek azaldığı gözlemlenmektedir. Bu durum, başlangıçta yapılan parametre artışlarının sisteme önemli ölçüde net iş kazandırdığını, ancak belirli bir seviyeden sonra kazancın azaldığını ve sistemin doyum noktasına yaklaştığını ortaya koymaktadır. Toplam net iş gücündeki bu yükselme, sistemin daha verimli çalıştığını ve enerji dönüşüm performansının arttığını gösterse de grafikteki yavaşlayan eğilim, optimum parametre aralığı belirlenmesi gerektiğini vurgulamaktadır. Aksi halde yapılan ilave enerji girdileri, sistem verimini artırmak yerine sadece işletme maliyetini yükseltebilir. Bu nedenle sistem performansı açısından hem teknik hem ekonomik denge dikkate alınmalıdır.



Şekil 28: Pompa Basıncı ile Rankine Çevrimi Akışkanı Olan Pentanın Kütlesel Debisi Arasındaki Etkileşimler

3.2. GENEL SİSTEM OPTİMİZASYONU

Enerji sistemlerinde yalnızca mevcut performansın belirlenmesi yeterli değildir; aynı zamanda sistemin nasıl daha verimli, sürdürülebilir ve ekonomik hale getirilebileceği de analiz edilmelidir. Bu bağlamda sistemin genel optimizasyonu, tüm bileşenlerin bir bütün olarak değerlendirilmesiyle gerçekleştirilmelidir. Burada Brayton ve Rankine Çevrimleri basınç değerlerine göre optimizasyonları yapılmış daha sonra her iki çevrimin optimum çalıştığı çalışma şartları için kombine çevrimin optimizasyonu yapılmıştır. Aşağıdaki tablolarda sistemin optimizasyonu sonucu elde edilen çalışma şartları bertilmektedir. Son tabloda ise sistemin kompresör ve pompa basınçlarına göre optimum çalışma şartlarının toplu gösterimi verilmiştir.

Tablo 5: Sistemin Genel Verileri

Ölçüm noktası	Akış Hattı No	Madde	Kütleli debi Kg/s	Sıcaklık 0C	Basınç kPa	Entalpi kJ/kg	Entropi KJ/kgK	Enerji kW	Ekserji kW
0	0			20	101,3	1528	27,89		
						-13,61	-0,045		
1	1	He	200	850	4100	5850	27,18	864357	905974
10	10	Pentan	445,5	35	100	21,31	0,07107	15555	385,9
2	2	He	200	427,4	1100	3647	27,46	423808	448958
3	3	He				3455	27,18	385499	
4	4	He	200	403,1	1100	3520	27,28	398512	434434
5	5	He	200	40	1100	1635	23,28	21427	291737
6	6	He	200	275,6	4100	2868	23,46	268059	527642
7	7	Pentan				2769	23,28		
8	8	Pentan	200	300	4100	2995	23,69	293356	539717
9	9	Pentan	445,5	37,72	6900	33,34	0,07417	20916	5342

Tablo 5’de bulunan veriler, enerji ve ekserji analizlerinin temelini oluşturmakta ve çevrimdeki her bir akış hattı için sistemin durumunu ortaya koymaktadır. Ayrıca bu tablo, hesaplamaların doğruluğunu şeffaf şekilde destekler niteliktedir.

Tablo 6: Çevrimdeki Cihazlarının Entropi Dengesi, Ekserji Kaybı ve Ekserji Verimi

Ekipman	ExKayıp (kW)	ExVerim	ExGiris (kW)	ExÇıkış (kW)
Buhar Türbini (ST)	10346	0,922	132641,0256	122295,0256
Gaz Türbini (GT)	263099	0,7096	905988,292	642889,292
HRSG	15406	0,892	142648,1481	127242,1481
Kompresör	10727	0,9801	539045,2261	528318,2261
Kondenser	38974			
Pompa	404,7	0,9296	5748,579545	5343,879545

Tablo 6’da çevrimde yer alan temel ekipmanların ekserji kayıpları ve buna bağlı olarak hesaplanan ekserji verimleri sunulmuştur. Analiz sonuçlarına göre, en yüksek ekserji kaybı Gaz Türbini (GT) bileşeninde gerçekleşmiştir. Bu durum, sistemdeki en büyük geri dönüşümsüzlüğün GT’de yaşandığını ve iyileştirme çalışmalarının bu alana odaklanması gerektiğini göstermektedir. Diğer taraftan, pompa ve kompresör gibi ekipmanların ekserji kayıpları düşük olmasına rağmen, özellikle kompresördeki izentropik kayıplar sistem genelinde önemli etki yaratmaktadır. Buhar türbini ve HRSG gibi bileşenlerde ise orta seviyede kayıplar görülmüş, bu da bu bölgelerde verim artırıcı tasarım veya kontrol iyileştirmelerine ihtiyaç olduğunu ortaya koymuştur. Genel olarak tablo, sistemdeki termodinamik verimlilik

kayıplarının dağılımını net bir şekilde göstermekte ve bileşen bazlı optimizasyon fırsatlarına işaret etmektedir.

Tablo 7: Çevrimdeki Cihazlarının Kütle ve Enerji Dengesi ve Entropi Üretimi

Ekipman	Giriş Noktası	Çıkış Noktası	s_giriş [kJ/kgK]	s_çıkış [kJ/kgK]	Entropi Üretimi [kW/K]
Buhar Türbini (ST)	8	9	1,987	2,025	7,6
Gaz Türbini (GT)	1	2	27,18	27,46	56
HRSK (Isı Geri Kazanım)	3	4	27,28	23,28	-800
Kompresör (C)	5	6	23,46	23,69	46
Pompa (P)	7	8	0,07417	1,987	382,566
Isı Değiştirici (Rec)	9	10	2,025	0,07107	-390,786

Bu tablo, her cihazın giriş ve çıkış noktalarına göre entropi üretimini ve enerji dengesini göstermektedir. Entropi üretimi, sistemin geri dönüşsüzlüğünü ve 2. yasa kayıplarını değerlendirmek açısından oldukça önemlidir. Özellikle Gaz Türbini ve Kompresör gibi bileşenlerde pozitif entropi üretimi gözlenmektedir.

Tablo 8’de tüm sistemin kompresör ve pompa basınçlarına göre optimum çalışma şartlarının toplu gösterimi verilmiştir.

Tablo 8: Sistemin Kompresör ve Pompa Basınçlarına Göre Optimum Çalışma Şartlarının Toplu Gösterimi

ExVerBuhT=0,922	gGTurbincik=864357 kW	P3=1100 kPa
ExVerGazT=0,7096	gGTurbingiren=864357 kW	P4=1100 kPa
ExVerHRSG=0,892	gHRSGcik=419427 kW	P5=4100 kPa
ExVerKom=0,9801	gHRSGgiren=419427 kW	P6=4100 kPa
ExVerPom=0,9296	gKOMcik=248329 kW	P7=6900 kPa
ExVerTümSis=0,7559	gKOMgiren=248329 kW	P8=6900 kPa
En1=864357 kW	gPOMPcik=20916 kW	P9=100 kPa
En10=15555 kW	gPOMPgir=20916 kW	s0he=27,89 kJ/kgK
En2=423808 kW	gREKcik=691867 kW	s0pen=-0,0451kJ/kgK
En2s=385499 kW	gREKgiren=691867 kW	s1=27,18 kJ/kgK
En3=398512 kW	gTUMTESISCik=571002 kW	s10=0,07107 kJ/kgK
En4=21427 kW	gTUMTESISgir=571002 kW	s2=27,46 kJ/kgK
En5=268059 kW	gYoguscik=309712 kW	s2s=27,18 kJ/kgK
En6=293356 kW	gYogusgiren=309712 kW	s3=27,28 kJ/kgK
En7=20916 kW	Wkompresor=246632 kW	s4=23,28 kJ/kgK
En8=398000 kW	Wkompresoriz=226901 kW	s5=23,46 kJ/kgK
En9=309712 kW	Wnet_total=276845 kW	s5s=23,28 kJ/kgK
Ex1=905974 kW]	WturSTiznet=91034 kW	s6=23,69 kJ/kgK
Ex10=385,9 kW	WturGTiznet=251957 kW	s7=0,07417 kJ/kgK
Ex2=448958 kW	WturSTnet=82928 kW	s7s=0,07107 kJ/kgK
Ex3=434434 kW	WturGTnet=193917 kW	s8=1,987 kJ/kgK
Ex4=291737 kW	h0he=1528 kJ/kg	s9=2,025 kJ/kgK
Ex5=527642 kW	h0pen=-13,61 kJ/kg	s9s=1,987 kJ/kgK
Ex6=539717 kW	h1=5850 kJ/kg	T0=20 C
Ex7=5342 kW	h10=21,31 kJ/kg	T0K=293,2 K
Ex8=132634 kW	h2=3647 kJ/kg	T1=850 C
Ex9=39360 kW	h2s=3455 kJ/kg	T10=35 C
mhe=200 kg/s	h3=3520 kJ/kg	T2=427,4 C
mpen=445,5 kg/s	h4=1635 kJ/kg	T3=403,1 C
Wpompa=5360 kW	h5=2868 kJ/kg	T4=40 C
Wpompaiz=4932 kW	h5s=2769 kJ/kg	T5=275,6 C
ExKAYBuhT=10346 kW	h6=2995 kJ/kg	T6=300 C
ExKAYGT=263099 kW	h7=33,34 kJ/kg	T7=37,72 C
ExKAYHRSG=15406 kW	h7s=32,38 kJ/kg	T8=300 C
ExKAYKomp=10727 kW	h8=879,7 kJ/kg	T9=181,9 C
ExKAYKond=38974 kW	h9=681,6 kJ/kg	
ExKAYPom=404,7 kW	h9s=664,3 kJ/kg	
Qgir=571002 kW	P0=101,3 kPa	
Q_condenser=294157 kW	P1=4100 kPa	
gBuhTURcik=398000 kW	P10=100 kPa	
gBuhTURgir=398000 kW	P2=1100 kPa	

SONUÇ VE ÖNERİLER

Enerji sistemlerinde yalnızca mevcut performansın belirlenmesi yeterli değildir; aynı zamanda sistemin nasıl daha verimli, sürdürülebilir ve ekonomik hale getirilebileceği de analiz edilmelidir. Bu bağlamda sistemin genel optimizasyonu, tüm bileşenlerin bir bütün olarak değerlendirilmesiyle gerçekleştirilmelidir. Burada Brayton ve Rankine Çevrimleri basınç değerlerine göre optimizasyonları yapılmış daha sonra her iki çevrimin optimum çalıştığı çalışma şartları için kombine çevrimin optimizasyonu yapılmıştır. Sistemin optimizasyonu sonucu elde edilen çalışma şartları tablolarda ve eğriler halinde verilmiştir. Tüm sistemin kompresör ve pompa basınçlarına göre optimum çalışma şartlarının toplu gösterimi de ayrıca verilmiştir.

Bu analiz sistemin ekserji kaybının hangi cihazlarda ne kadar gerçekleştiğini göstermiştir. Sistem verimliliğini artırmaya yönelik çalışmalarda öncelikli iyileştirme hedefi cihazların performansının artırılması olmalıdır. Ayrıca özellikle ısı geçişi ve genleşme süreçlerinin optimize edilmesi, sistemin ikinci yasa verimliliğini önemli ölçüde iyileştirecektir.

KAYNAKÇA

- Acar, S., & Aydın, M. (2017). *Exergy Analysis of Wind Energy Systems: Principles and Applications*. Springer, 978-3-319-45447-2.
- Ansari, N. A., Arora, A., & Manjunath, K. 2018. Optimum Performance Analysis of a Hybrid Cascade Refrigeration System Using Alternative Refrigerants. *Materials Today:Proceedings*, 5(14), 28374-28383
- Aydın, İ. (2019). Hidroelektrik Türbinlerinin Verimlilik Analizi. *Enerji ve Çevre Teknolojileri Dergisi*, 18(4), 45-59.
- Bahrami, M., & Stefanakos, E. K. (2010). *Geothermal Energy: Renewable Energy and the Environment*. CRC Press, 978-1-4398-1133-9.
- Baria, R. (ed.). 1990. "Hot Dry Rock Geothermal Energy," Proc. Camborne School of Mines International HDR Conference, Robertson Scientific Publications, London, pp. 613.
- Bejan, A., Tsatsaronis, G., & Moran, M. (1996). *Thermal Design and Optimization*. Wiley., 978-0-471-58467-8.
- Betz, A. (1920). *Wind Energy and the Laws of the Wind*. Philosophical Transactions of the Royal Society of London 26(307), 307–309.
- Bhattacharyya, S. C. (2011). *Energy Economics: Concepts, Issues, Markets and Governance*. Springer, 978-0-85729-268-.
- Can, G. (2020). *Elektrik Üretiminde Jeneratör Verimliliği ve Performans Analizleri*. Elektrik ve Enerji Sistemleri Dergisi, 29(3), 112-127.
- Chen, G., Volovyk, O., Ierin, V. & Shestopalov, K. (2017). *Performance analysis of a two-stage mechanical compression–ejector cooling cycle intended for micro-trigeneration system*. International Journal of Refrigeration, 81, 33-40.
- Çamdalı, Ü., Erişen, A. ve Çelen, F. (2004.), "Energy and Exergy Analyses in a Rotary Burner with Pre-Calcinations in Cement Production", *Energy Conversion and Management*, 45, 3017- 3031
- Çelik, M. (2020). *Hidroelektrik Enerji Sistemlerinde Ekserji ve Verimlilik Hesaplamaları*. Mühendislik Bilimleri Dergisi, 14(2), 65-80.
- Çengel, A. Y., & Boles, M. A. (2012). *Mühendislik yaklaşımıyla termodinamik* (A. Pınarbaşı, Çev.). Literatür Yayıncılık, 9789758431419.
- Çengel, Y. A., & Boles, M. A. (2019). *Thermodynamics: An engineering approach* (9th ed.). McGraw-Hill Education, 978-1-260-22574-3.
- Çengel, Y. A., Byard, W., Dinçer, İ., (2002). *Is Bigger Thermodynamically Beter. Exergy*, An International Journal Vol. 2, pp 687-702
- David J. MOORHOUSE and Charles M. HOKE (2002). *Thermal Analysis of Hypersonic Inlet Flow with Exergy-Based Design Methods*. Int.J. Applied Thermodynamics, Vol.5 (No.4), pp.161-168.
- Demirbaş, A. (2008). *Biofuels: Securing the Planet's Future Energy Needs*. Springer
- Dincer, I., & Rosen, M. A. (2007). *Thermodynamics: An Engineering Approach*. McGraw-Hill.
- Dincer, I., & Rosen, M. A. (2012). *Exergy: Energy, Environment and Sustainable Development*. Elsevier.

- DiPippo, R. (2012). *Geothermal Power Plants: Principles, Applications, Case Studies and Environmental Impact*. Butterworth-Heinemann.
- Fraunhofer ISE. (2022). *Photovoltaics Report*.
- Gupta, R. (2006). *Hydroelectric Power Engineering*. CBS Publishers & Distributors.
- Güner, A. (2020). *Hidroelektrik Enerji Sistemleri: Temel Prensipler ve Uygulamalar*. Enerji ve Çevre Yayınları.
- Harvey, A. (2007). *Renewable Energy: A First Course*. Wiley.
- Haskök, A.Ş. (2005). *Türkiye' nin Mevcut Enerji Kaynaklarının Durum Değerlendirilmesi*, (Yüksek lisans tezi). Yüksek Öğrenim Kurumu Ulusal Tez Merkez'inden edinilmiştir (Tez No: 83 - 91, 01.10.2009).
- Hepbaşlı, A., (2003). *Güneş Enerjili Sistemlerde Ekserji Analizinin Gerekliliği ve uygulanması. TMMOB Makine Mühendisleri Odası Güneş Enerjisi Sistemleri Sempozyumu ve Sergisi, 2021 Haziran 2003, Mersin, Bildiriler Kitabı: 197-206*
- International Energy Agency (IEA). (2023). *World Energy Outlook*
- International Renewable Energy Agency (IRENA). (2023). *Renewable Energy Statistics*.
- IPCC. (2021). *Climate Change and Renewable Energy*.
- Ismail, I.M., (1989), *Upgrading of heat through AHT*, International Journal of Refrigeration, 18, 439-446.
- Karaali R. (2017) *Exergy Analysis of a Combined Power and Cooling Cycle*
- Karaali R. (2017) *Tek ve Çift Etkili Absorbsiyonlu Soğutma Çevrimlerinin Ekserji Karşılaştırılması*.
- Kaya, O., & Erdiñç, M. (2018). *Hidroelektrik Enerji ve Ekserji Verimliliği*. Elektrik Mühendisliği Dergisi, 42(2), 134-147.
- Kotas, T., et al. (2008). *Exergy: Energy, Environment and Sustainable Development*. Elsevier.
- Kreith, F., & Bohn, M. S. (2001). *Principles of Heat Transfer*. PWS Publishing Company.
- Kutscher, R., & Ramey, R. (2006). *Geothermal Power Generation*. Elsevier.
- Lund, J. W., & Boyd, T. L. (2016). *Geothermal Direct Use: Geothermal Energy for Direct Use Applications*. Geothermal Resources Council.
- Mancuhan, E. 2019. *A comprehensive comparison between low and medium temperature application refrigerants at a twostage refrigeration system with flash intercooling*. Thermal Science and Engineering Progress, 13, 100357.
- Manwell, J. F., McGowan, J. G., & Rogers, A. L. (2010). *Wind Energy Explained: Theory, Design and Application* (2nd ed.).
- Myles, L., B., Huang, J., David, W., R. & José, A., C. (2007). *Second-law methods for the analysis & design of hypersonic vehicles*. Collection of Technical Papers- 39th AIAA Thermophysics Conference, 10.2514/6.2007-4055.
- Nanda, S., & Subrahmanyam, S. (2018). *Biomass Gasification: A Comprehensive Guide*.
- Piga, D., & Ippolito, A. (2011). *Wind Energy Systems: Modeling and Control*. Springer.
- Quoilin, S., et al. (2013). *Performance and Design of Organic Rankine Cycle Systems*. Springer.
- REN21. (2022). *Renewables Global Status Report*.
- Sadhukhan, J., et al. (2016). *Biorefineries: Industrial Processes and Products*. Wiley.

- Spera, D. A. (2009). *Wind Turbine Technology: Fundamental Concepts of Wind Turbine Engineering*. ASME Press.
- TC. Serhat Kalkınma Ajansı, 2015, "*Güneş Enerjisi ve Kullanım Alanları*", s. 23.
- Tekel, E. (2006) *Termik Santrallerin Enerji Ve Ekserji Analizi*. (Yüksek lisans tezi). Yüksek Öğrenim Kurumu Ulusal Tez Merkez'inden edinilmiştir. (Tez No: 180602)
- Tummescheit, H., & Friedli, C. (2004). *Modelling and Performance of Electric Machines in Power Systems*. Springer.
- Turan, S. (2006). *Yenilenebilir Enerji Kaynakları, Konya*
- U.S. Department of Energy (DOE). (2020). *Energy Storage Grand Challenge*.
- United Nations Environment Programme (UNEP). (2020). *Renewable Energy and Society*
- Ünlü, A. (2011). *Alternatif Bir Soğutkanın (HFO-1234yf) Kullanıldığı Bir Soğutma Sisteminin Ekserji Analizi* ((Yüksek lisans tezi). Yüksek Öğrenim Kurumu Ulusal Tez Merkez'inden edinilmiştir.(Tez No: 295051)
- Wall ,G., (1993). *Exergetics, Exergy, Ecology and Democracy-Concepts of a vital society. Energy Systems and Ecology* July 5-9, 111-121
- Wiley. Soylu, B. N. (2019). *Yenilenebilir Enerji Kaynakları ve Konya İlinin Yenilenebilir Enerji Potansiyeli* (Yüksek lisans tezi). Yüksek Öğrenim Kurumu Ulusal Tez Merkez'inden edinilmiştir (Tez No: 567548).
- World Bank. (2022). *Transmission Infrastructure for Renewable Energy*.
- Yılmaz, R. (2017). Hidroelektrik Sistemlerinde Enerji Dönüşümü ve Ekserji Analizi. *Makine Mühendisliği Dergisi*, 39(1), 22-35.

ÖZ GEÇMİŞ

Ayşe Menteşe, [REDACTED] yılında [REDACTED] doğdu. 2013 yılında Erzurum Atatürk Üniversitesi Makine Mühendisliği bölümünden mezun oldu ve aynı yıl itibarıyla aktif çalışma hayatına başladı. İşletme Yönetimi ön lisans eğitimini tamamladıktan sonra, Bayburt Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Makine Mühendisliği bölümünde Doç. Dr. Rabi Karaali danışmanlığında yüksek lisans eğitimine başlamıştır. Şu an özel sektörde çalışmaktadır.

