



T.C.
TOKAT GAZİOSMANPAŞA ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ YÜKSEK LİSANS PROGRAMI

BUĞDAY ATIĞI KULLANAN BİR BİYOKÜTLE ENERJİ SANTRALİNİN
ENERJETİK VE EKSERJETİK PERFORMANSLARININ FARKLI ÇALIŞMA
KOŞULLARI ALTINDA DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Abdullah YAMAN

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Buket TURGUT

TOKAT- 2025

ETİK SÖZLEŞME

Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü tez yazım kılavuzuna göre, Dr. Öğr. Üyesi Buket TURGUT danışmanlığında hazırlamış olduğum “**Buğday Atığı Kullanan Bir Biyokütle Enerji Santralinin Enerjetik ve Ekserjetik Performanslarının Farklı Çalışma Koşulları Altında Deneysel Olarak İncelenmesi**” adlı Yüksek Lisans tezinin bilimsel etik değerlere ve kurallara uygun, özgün bir çalışma olduğunu, aksinin tespit edilmesi halinde her türlü yasal yaptırımını kabul edeceğimi beyan ederim.

29/12/2025

Abdullah Yaman

İmza

JÜRİ KABUL VE ONAY

Abdullah YAMAN tarafından hazırlanan “**Buğday Atığı Kullanan Bir Biyokütle Enerji Santralının Enerjetik ve Ekserjetik Performanslarının Farklı Çalışma Koşulları Altında Deneysel Olarak İncelenmesi**” adlı tez çalışmasının savunma sınavı 29/12/2025 tarihinde yapılmış olup aşağıda verilen Jüri tarafından Oy Birliği ile Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı’nda Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri	(Unvanı, Adı Soyadı)	İmzası
--------------	----------------------	--------

Üye (Danışman):	Dr. Öğr. Üyesi Buket TURGUT	
-----------------	-----------------------------	--

Üye:	Dr. Öğr. Üyesi Serhat BİLGİN	
------	------------------------------	--

Üye:	Dr. Öğr. Üyesi Saliha ÖZARSLAN	
------	--------------------------------	--

ONAY

...../...../.....

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürü

TEŞEKKÜR

Bu yüksek lisans tez çalışmasının her aşamasında bilgi ve tecrübesiyle yol gösteren, değerli danışmanım Dr. Öğr. Üyesi Buket TURGUT'a en içten teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca, deneysel verilerin toplanması aşamasında desteklerini esirgemeyen Cemak Enerji Şirketi'ne ve bu süreçte yanımda olan sevgili eşim Bedia Mihriban, oğullarım Hasan Sami ve Hamza Selim'e teşekkür ederim.

Abdullah YAMAN

29.12.2025



ÖZET

BUĞDAY ATIĞI KULLANAN BİR BİYOKÜTLE ENERJİ SANTRALİNİN ENERJETİK VE EKSERJETİK PERFORMANSLARININ FARKLI ÇALIŞMA KOŞULLARI ALTINDA DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ

Abdullah Yaman

Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Makine Mühendisliği
Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Tez Danışmanı: Dr. Öğr. Üyesi Buket TURGUT

29.12.2025, XII + 67 Sayfa

Bu tez çalışması, Tokat ilinde kurulu olan buğday atığı yakıtlı bir biyokütle enerji santralinin termodinamik performansını, iki farklı işletme koşulu altında deneysel verilerle incelemektedir. İncelenen durumlar, santralin revizyon öncesi (degazörün kazandan ısıtılması) ve revizyon sonrası (degazörün türbin ekstraksiyonundan ısıtılması) çalışma rejimlerini temsil etmektedir. Çalışmanın temel amacı, santralde uygulanan revizyonun sistem verimi üzerindeki etkisini enerji ve ekserji analizleri ile karşılaştırmalı olarak ortaya koymaktır.

Revizyon öncesi durumda, yakıt debisi 7.842 ton/saat olup, termal verim %21.45 ve ekserjetik verim %20.43 olarak hesaplanmıştır. Ekserjetik verimin termal verimden düşük olması, biyokütle yakıtının kimyasal ekserjisinin ısıl değerinden yüksek olmasından kaynaklanmaktadır ve termodinamik olarak beklenen bir sonuçtur.

Sistemin verimini artırmak amacıyla, degazör ısıtma yönteminde bir revizyon gerçekleştirilmiştir. Revizyon sonrasında, yakıt debisi 7.156 ton/saate düşmüş, net güç çıkışı ise 6500 kW'tan 6550 kW'a yükselmiştir. Termal verim %21.45'ten %23.68'e, ekserjetik verim ise %20.43'ten %22.56'ya yükselmiştir. Yakıt tüketimi %8.75 oranında azalmıştır.

Sonuç olarak, bu çalışma biyokütle enerji santrallerinde sistem entegrasyonunun ve ısı geri kazanım stratejilerinin verim artışıdaki önemini ortaya koymaktadır. Degazör ısıtma yöntemindeki basit bir değişiklik ile elde edilen performans iyileştirmesi, benzer santrallerde uygulanabilir pratik bir çözüm sunmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Biyokütle, Enerji Analizi, Ekserji Analizi, Rankine Çevrimi, Verim İyileştirmesi, Degazör

ABSTRACT

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF ENERGETIC AND EXERGETIC PERFORMANCES OF A BIOMASS POWER PLANT USING WHEAT RESIDUE UNDER DIFFERENT OPERATING CONDITIONS

Abdullah YAMAN

Tokat Gaziosmanpasa University Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Mechanical Engineering

Master's Thesis

Thesis Supervisor: Assist. Prof. Dr. Buket Turgut

29.12.2025, XII + 67 pages

This thesis investigates the thermodynamic performance of a wheat straw-fired biomass power plant located in Tokat province under two different operating conditions using experimental data. The examined conditions represent the plant's pre-revision (deaerator heated from the boiler) and post-revision (deaerator heated from turbine extraction) operating regimes. The main objective of the study is to comparatively reveal the effect of the revision implemented at the plant on system efficiency through energy and exergy analyses.

In the pre-revision condition, the fuel consumption rate was 7.842 tons/hour, with thermal efficiency calculated as 21.45% and exergetic efficiency as 20.43%. The fact that exergetic efficiency is lower than thermal efficiency stems from the chemical exergy of biomass fuel being higher than its heating value, which is a thermodynamically expected result.

A revision was implemented in the deaerator heating method to improve system efficiency. Following the revision, fuel consumption decreased to 7.156 tons/hour, while net power output increased from 6500 kW to 6550 kW. Thermal efficiency increased from 21.45% to 23.68%, and exergetic efficiency increased from 20.43% to 22.56%. Fuel consumption was reduced by 8.75%.

In conclusion, this study demonstrates the importance of system integration and heat recovery strategies in improving efficiency in biomass power plants. The performance improvement achieved through a simple modification in the deaerator heating method presents a practical solution applicable to similar power plants.

Keywords: Biomass, Energy Analysis, Exergy Analysis, Rankine Cycle, Efficiency Improvement, Deaerator

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ETİK SÖZLEŞME SAYFASI	i
JÜRİ KABUL VE ONAY	ii
TEŞEKKÜR	iii
ÖZET (TÜRKÇE).....	iv
ABSTRACT (İNGİLİZCE)	v
İÇİNDEKİLER	vi
TABLolar LİSTESİ.....	viii
ŞEKİLLER LİSTESİ	ix
GRAFİKLER LİSTESİ.....	x
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ	xi
1. GİRİŞ	1
2. GENEL BİLGİLER VE LİTERATÜR ÖZETLERİ	3
2.1. Enerji.....	3
2.1.1. Enerji tanımı ve kapsamı	3
2.1.2. Enerji ve çevre	4
2.2. Enerji kaynakları.....	5
2.2.1. Yenilenemez enerji kaynakları	5
2.2.2. Yenilenebilir enerji kaynakları	6
2.3. Dünyada ve Türkiye’de Enerji.....	10
2.4. Biyokütle.....	12
2.5. Biyokütle Enerjisi Dönüşüm Yöntemleri	15
2.5.1. Termokimyasal dönüşüm yöntemleri	16
2.5.2. Biyokimyasal dönüşüm yöntemleri	16
2.6. Biyokütle Enerjisinin Depolanabilirlik Özelliği	17
2.7. Türkiye’de ve Dünyada Biyokütle Enerjisinin Mevcut Durumu.....	17
2.7.1. Küresel durum.....	17
2.7.2. Türkiye’de durum	19
2.8. Biyokütlenin Avantajları ve Dezavantajları	20
2.9. Biyokütle Kaynakları.....	22
2.9.1. Bitkisel biyokütle kaynakları	23
2.9.2. Hayvansal biyokütle kaynakları.....	24
2.9.3. Ormansal biyokütle kaynakları	24
2.9.4. Sulu biyokütle kaynakları	25
2.9.5. Atık biyokütle kaynakları	25
2.10. Literatür Taraması.....	26
2.10.1. Biyokütle enerji santrallerinde enerji analizi çalışmaları	26
2.10.2. Biyokütle enerji santrallerinde ekserji analizi çalışmaları	27
2.10.3. Termal sistemlerde iyileştirme ve karşılaştırmalı analizler	27
2.11. Literatüre Katkı ve Yenilik	28
2.12. Buğday Atığının Yakıt Olarak Kullanımının Termodinamik ve Çevresel Boyutları	28
3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	30
3.1. Çalışma Alanı ve Materyal	30
3.1.1. Biyokütle enerji santrali (BES).....	30

3.1.2. Yakıt materyali	37
3.2. Deneysel Yöntem.....	38
3.2.1. Veri toplama ve ölçüm parametreleri	39
3.2.2. Termodinamik analiz yöntemleri.....	40
3.2.3. Karşılaştırmalı analiz	44
4. BULGULAR VE TARTIŞMA	45
4.1. Revizyon Öncesi Durumu Analiz Sonuçları.....	45
4.2. Revizyon Sonrası Durumu Analiz Sonuçları.....	48
4.3. Revizyon Öncesi ve Revizyon Sonrası Durumlarının Karşılaştırılması ..	51
4.4. Bulguların Literatürle Karşılaştırılması ve Değerlendirilmesi	54
4.5. Kazandaki Yüksek Ekserji Yıkımının Analizi.....	55
4.6. Belirsizlik Analizi	57
5. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	59
5.1. Sonuçlar.....	59
5.2. Öneriler.....	60
KAYNAKLAR	62
ÖZGEÇMİŞ	67

TABLÖLAR LİSTESİ

	Sayfa
Tablo 1. Dünya biyokütle potansiyeli.....	19
Tablo 2. Buğday atığı analiz değerleri.....	38
Tablo 3. Ölçülen temel parametreler	40
Tablo 4. Numaralandırılmış noktalara ait termodinamik özellik verileri	45
Tablo 5. Santralin revizyon öncesi termodinamik performansı.....	45
Tablo 6. Numaralandırılmış noktalara ait termodinamik özellik verileri	48
Tablo 7. Santralin revizyon sonrası termodinamik performansı.....	48
Tablo 8. Karşılaştırmalı sonuçlar.....	51
Tablo 9. Farklı Biyokütle Enerji Santrallerinin Verim Değerlerinin Karşılaştırılması ..	54
Tablo 10. Ölçüm Cihazları ve Belirsizlikleri	56

ŞEKİLLER LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 1. En önemli 5 yenilenebilir enerji kaynağı.....	9
Şekil 2. Fosil yakıt ve biyokütle döngüsü karşılaştırması	13
Şekil 3. Biyokütle enerjisi dönüşüm yolları gösterimi	15
Şekil 4. CEMAK biyokütle enerji santrali.....	30
Şekil 5. Biyokütle kazanı yakıt besleme sistemi.....	31
Şekil 6. Biyokütle kazanı yakıt hazırlama bölümü	32
Şekil 7. Buhar kazanı	32
Şekil 8. Buhar türbini ve jeneratör	33
Şekil 9. Buhar türbini yardımcı sistemleri	33
Şekil 10. Yoğuşturucu sistemi yandan görünümü	34
Şekil 11. Yoğuşturucu sistemi önden görünümü	34
Şekil 12. Kazan besleme pompası	35
Şekil 13. Degazör besleme pompası.....	35
Şekil 14. Degazör sistemi	36
Şekil 15. Revizyon sonrası degazör ısıtma hattı	36
Şekil 16. Buğday atığı görüntüsü.....	37
Şekil 17. Biyokütle enerji santralinde gerçek zamanlı revizyon öncesi enerji ve ekserji analizinde kullanılan ölçüm noktaları, ölçer yerleşimleri ve veri toplama sistemi akış diyagramı.....	38
Şekil 18. Biyokütle enerji santralinde gerçek zamanlı revizyon sonrası enerji ve ekserji analizinde kullanılan ölçüm noktaları, ölçer yerleşimleri ve veri toplama sistemi akış diyagramı.....	39

GRAFİKLER LİSTESİ

	Sayfa
Grafik 1. Santralin Revizyon Öncesi Enerji Dağılımı	46
Grafik 2. Santralin Revizyon Öncesi Ekserji Yıkım Dağılımı	47
Grafik 3. Santralin Revizyon Sonrası Enerji Dağılımı	49
Grafik 4. Santralin Revizyon Sonrası Ekserji Yıkım Dağılımı	50
Grafik 5. Santralin Revizyon Öncesi ve Sonrası Enerji Akışı Karşılaştırması.....	52
Grafik 6. Santralin Revizyon Öncesi ve Sonrası Verim Karşılaştırması	53
Grafik 7. Santralin Revizyon Öncesi ve Sonrası Bileşen Bazlı Ekserji Yıkım Karşılaştırması.....	53

SİMGELER ve KISALTMALAR LİSTESİ

Simgeler ve Kısaltmalar	Açıklama
E_{enerji}	Enerji Akış Hızı (kW)
Ex_e	Ekserji Akış Hızı (kW)
$Ex_{ekserji}$	Ekserji Yıkımı (kW)
M	Kütle Debisi (kg/s)
$\dot{Q}$	Isı Transfer Hızı (kW)
$\dot{W}$	İş Transfer Hızı (kW)
T	Sıcaklık (°C)
P	Basınç (bar veya kPa)
h	Özgül Entalpi (kJ/kg)
s	Özgül Entropi (kJ/kg·K)
η_{th}	Termal Verim (%)
$\eta_{ekserji}$	Ekserjetik Verim (%)
T_0	Referans Ortam Sıcaklığı (K)
P_0	Referans Ortam Basıncı (kPa)

Simgeler ve Kısaltmalar	Açıklama
ETKB	Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı
ORC	Organik Rankine Çevrimi
SCADA	Supervisory Control and Data Acquisition
4E	Enerji, Ekserji, Ekonomik ve Çevresel Analiz
APA	American Psychological Association
MTEP	Milyon Ton Eşdeğer Petrol
BES	Biyokütle Enerji Santrali
CHP	Kombine Isı ve Güç
vd.	ve diğerleri (et al.)

1. GİRİŞ

Yaşamın temel gereksinimlerinden biri olan enerjiye olan talep, hızla artan nüfus, gelişen sanayileşme, yoğunlaşan kentleşme ve teknolojik ilerlemelerle birlikte sürekli yükselmektedir. Bu küresel eğilim, devletleri enerji politikalarını gözden geçirmeye ve enerji arz güvenliğini temin edecek sürdürülebilir çözümler geliştirmeye yöneltmektedir. Günümüzde, yeni enerji kaynakları arayışının yanı sıra, mevcut enerjinin en düşük kayıpla kullanılması da büyük önem taşımaktadır.

Enerji sistemlerinin verimliliğini artırmak, enerjinin dönüşüm süreçlerini optimize etmek ve alternatif enerji kaynaklarına yönelmekle mümkündür. Termodinamik bilimi, enerji dönüşümlerini hem nicel hem de nitel açıdan inceleyerek sistem performansını değerlendiren temel bir bilim dalıdır. Termodinamik analizlerde, enerjinin miktarını ele alan enerji analizi ve enerjinin iş yapabilme potansiyelini, yani kalitesini inceleyen ekserji analizi olmak üzere iki ana yaklaşım kullanılır. Enerji analizi, enerjinin korunumunu gösterse de sistem içindeki geri tersinmezlikleri belirlemede yetersiz kalır. Buna karşın ekserji analizi, sistem bileşenlerinde meydana gelen ve geri kazanılması mümkün olmayan enerji kayıplarını hesaplayarak, hangi bileşenlerin iyileştirilmesi gerektiği konusunda somut ve etkili bilgiler sunar. Sistemlerin gerçek termodinamik performansını daha doğru bir şekilde yansıtmaları nedeniyle, ekserji analizi son dönemde yoğun bir araştırma konusu haline gelmiştir.

Dünya genelindeki enerji gereksiniminin büyük bir kısmı halen petrol, kömür ve doğal gaz gibi fosil yakıtlarla karşılanmaktadır. Ancak, bu kaynakların sınırlı oluşu ve çevreye verdikleri zararlar, yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelimi hızlandırmıştır. Bu alternatif kaynaklar arasında güneş, rüzgar, hidroelektrik, jeotermal, dalga ve biyokütle gibi sürdürülebilir seçenekler bulunmaktadır. Biyokütle, bu kaynaklar içinde özel bir yere sahiptir; zira fotosentez süreciyle güneş enerjisini kimyasal enerjiye dönüştürerek depolama yeteneğine sahiptir. Diğer yenilenebilir enerji türlerinden farklı olarak depolanabilir olması ve yüksek miktarda ısı enerjisi sağlayabilmesi, biyokütleyi önemli bir alternatif enerji kaynağı yapmaktadır.

Bu tez çalışması, Tokat'ta faaliyet gösteren ve buğday atığı ile çalışan bir biyokütle enerji santralinin termodinamik performansını, iki farklı işletim koşulu altında deneysel verilerle incelemektedir. İncelenen bu iki koşul, santralin revizyon öncesi (orijinal konfigürasyon) ve revizyon sonrası (geliştirilmiş konfigürasyon) çalışma rejimlerini temsil etmektedir. Çalışmada, gerçekleştirilen revizyonun sistem performansı üzerindeki etkileri, enerji ve ekserji analizleri kullanılarak karşılaştırmalı bir yaklaşımla değerlendirilecektir. Bu analizler sayesinde, santralin kazan, türbin, yoğusturucu ve degazör gibi kritik bileşenlerinde hangi iyileştirmelerin yapılması gerektiği bilimsel temellere dayandırılarak belirlenecektir. Tesis iyileştirme çalışmalarının termodinamik sonuçlarını net bir şekilde ortaya koyması açısından bu tür karşılaştırmalı değerlendirmeler büyük önem taşımaktadır.

Bu çalışmanın temel hedefi, buğday atığı yakıtlı bir biyokütle enerji santralinin operasyonel performansını enerji ve ekserji analizleri aracılığıyla değerlendirmek ve sistem verimliliğini yükseltmek amacıyla somut öneriler sunmaktır. Çalışma, teorik modellemeler yerine sahada toplanan gerçek ölçüm verilerine dayanmaktadır. Bu yaklaşım sayesinde, santralin revizyon öncesi ve sonrası performans farklılıkları nicel olarak belirlenmiştir. Bu bağlamda araştırmanın hedefleri şunlardır: Santralin revizyon öncesi ve sonrası enerji ve ekserji verimlerini deneysel olarak tespit etmek ve karşılaştırmak; sistem bileşenlerinde oluşan enerji ve ekserji kayıplarını hesaplayarak, bu kayıpların en yoğun olduğu ekipmanları belirlemek; ve elde edilen bulgular ışığında, benzer biyokütle enerji santrallerinin tasarım, optimizasyon ve işletme süreçlerine yönelik teknik tavsiyelerde bulunmaktır. Bu araştırma, hem yerel bir biyokütle kaynağı olan buğday atığının enerji potansiyelini değerlendirmesi hem de gerçek bir tesisin revizyon öncesi ve sonrası performansını karşılaştırmalı olarak incelemesi yönüyle literatürdeki önemli bir eksikliği gidermektedir. Ayrıca, elde edilen sonuçlar Türkiye'deki biyokütle enerji santrallerinin verim artışına yönelik gelecekteki projelere bilimsel bir zemin hazırlayacaktır.

2. GENEL BİLGİLER VE LİTERATÜR ÖZETLERİ

2.1. Enerji

2.1.1. Enerji tanımı ve kapsamı

Enerji kavramının bir üretim faktörü olarak kabul görmesi, İktisat bilimi ile birlikte kullanılmaya başlanmasıyla 1970’li yıllardan sonra yaygınlaşmıştır (Bayramoğlu, 2013). Bu dönemde yaşanan enerji krizleri ve küreselleşmenin etkisiyle ortaya çıkan ekonomik büyümedeki yavaşlama, ülkelerin gelişmişlik seviyeleri arasındaki farklılıkların artmasına neden olmuştur. Gelişmiş ve gelişmekte olan ülkeler arasındaki bu ayrım, büyük ölçüde gelir seviyeleri ve enerjiye olan bağımlılık gibi faktörlerden kaynaklanmıştır. Bu gelişmeler neticesinde enerji, son derece kritik bir unsur haline gelmiştir (Bayramoğlu, 2013).

Bir sistemin iş yapma yeteneği, temel olarak enerji kavramıyla ifade edilir. Enerji, nükleer, manyetik, mekanik, ısı, kimyasal, fiziksel, potansiyel ve kinetik gibi çeşitli formlarda bulunabilir. Termodinamiğin Birinci Kanunu’nun belirttiği gibi, enerji ne yoktan var edilebilir ne de yok edilebilir; ancak bir formdan diğerine dönüştürülebilir. Kinetik, potansiyel ve iç enerji, termodinamik analizlerde sıklıkla kullanılan enerji türleridir. Belirli bir kütle ve hızla hareket eden nesnelerin sahip olduğu enerjiye kinetik enerji denir (Burulday, 2019). Potansiyel enerji ise, bir sistemin yerçekimi etkisiyle yüksekliğine bağlı olarak depoladığı enerjidir. Kinetik ve potansiyel enerjiler, makroskobik enerji türleri olup; bir sistemin analizinde dış bir referans noktasına göre sahip olduğu enerjiyi ifade eder. Mikroskobik enerjiler ise, sistem içindeki moleküllerin hareketi ve moleküler yapısıyla ilişkilidir. İç enerji, bu mikroskobik enerji formlarının toplamı olarak tanımlanır. Termodinamik bir sistemin incelenmesinde, genellikle belirli bir kütle veya hacim temel alınır.

Bu bağlamda, kütle transferinin gerçekleşmediği kapalı sistemlerde enerji, yalnızca ısı veya iş transferi yoluyla aktarılır. Öte yandan, kontrol hacmi olarak da adlandırılan açık sistemlerde ise enerji transferi, kütle geçişi, ısı veya iş şeklinde meydana gelir (Yılmaz,

2019).

2.1.2. Enerji ve çevre

Dünya nüfusundaki sürekli artışa paralel olarak, ekonominin gelişimi ve enerji talebinin önümüzdeki on yıl içinde önemli ölçüde yükselmesi öngörülmektedir. Enerji üretimi ve tüketimi sırasında ortaya çıkan sorunların temel nedenleri arasında, fosil yakıtların kullanımı ve yakıtın enerjiye dönüştürüldüğü sistemlerin verimsizliği bulunmaktadır (Gümülügil, 2016).

Fosil yakıtlar, düşük maliyetleri ve üretim teknolojilerindeki ilerlemeler sayesinde yenilenebilir enerji teknolojilerine kıyasla daha avantajlı bir konumda olduklarından, son iki yüz yıldır yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Ancak, 1973 petrol krizi sonrasında petrol ve kömüre dayalı enerji çağına olan güven azalmaya başlamıştır. Bu durum, tüm dünyanın yenilenebilir enerji kaynaklarına olan ilgisini artırmıştır. Sonuç olarak, enerji politikalarında enerji güvenliği ve enerji çeşitlendirilmesi kavramları öncelikli hale gelmiştir.

Enerji tüketiminin artmasıyla birlikte, asit yağmurları ve küresel ısınma gibi çevreyi olumsuz etkileyen sorunlarda belirgin bir artış yaşanacağı açıktır. Bu nedenle, fosil yakıtlar yerine yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanılması, bu olumsuz etkileri hafifletmeye yardımcı olacağı için hayati bir öneme sahiptir. Küresel ısınmanın başlıca nedenlerinden biri, atmosferde yoğunlaşan karbondioksit gazıdır. Küresel ısınmanın tetiklediği sıcaklık artışı; iklim değişikliklerine, buzulların erimesine, deniz seviyelerinin yükselmesine ve dolayısıyla birçok verimli tarım arazisinin sular altında kalmasına yol açacaktır. Bu olumsuz gidişatı durdurmanın en gerçekçi yolu, fosil yakıt kullanımından yenilenebilir enerji kaynaklarına geçiş yapmaktır.

2.2. Enerji Kaynakları

2.2.1. Yenilenemez enerji kaynakları

Fosil yakıtların yanmasıyla ortaya çıkan yenilenemez enerji kaynakları, doğada sınırlı miktarlarda mevcuttur. Fosil yakıtların tüketimi çevre için ciddi sorunlar yaratmasına rağmen, ekonomik faktörler nedeniyle bu yenilenemez kaynaklara olan talepte bir düşüş gözlenmemektedir. Sonuç olarak, yenilenemez enerji kaynakları tüketilmeye devam etmektedir (Bayramoğlu, 2013).

Fosil kaynaklı enerji, fosil yakıtların yakılmasıyla elde edilen ve ısı, elektrik veya yakıt enerjisine dönüştürülen enerji türüdür. Petrol, kömür ve doğal gaz, fosil enerji kaynaklarının ana bileşenlerini oluşturur. Bu kaynaklar, çevreye yönelik tehditler oluşturmalarına rağmen, sundukları yüksek verimlilik nedeniyle dünya genelinde en çok tüketilen enerji kaynakları olma özelliğini korumaktadır (Shafiee & Topal, 2009).

Birincil enerji kaynakları arasında kritik bir öneme sahip olan petrol, Türkiye'nin enerji ithalatında uzun yıllardır önemli bir yer tutan ve bu durumun uzun süre devam etmesi beklenen bir fosil enerji kaynağıdır (Ediger & Berk, 2011). Hem küresel hem de ulusal düzeyde birincil enerji kaynakları kullanım oranları incelendiğinde, petrolün ilk sırada yer aldığı görülmektedir. Bu nedenle petrol, ülkelerin refahı ve ekonomileri için vazgeçilmez bir kaynak niteliğindedir (Acaravcı & Yıldız, 2018). Petrolün yaygın kullanımı, dünya çapında yeni gelişmelere yol açmış ve petrolü uluslararası politikadaki en belirleyici faktörlerden biri haline getirmiştir (Yergin, 2011).

Kömür, ağırlıklı olarak karbon, hidrojen ve oksijen elementlerini içeren, az miktarda kükürt ve azot barındıran, kendine özgü kimyasal ve fiziksel özelliklere sahip tortul bir kayadır (Speight, 2013; World Coal Association, 2022). Kömürün enerji kaynağı olarak yaygın kullanımı, sanayileşmenin hız kazanmasıyla birlikte Orta Çağ'ın sonları ve Sanayi Devrimi sonrası dönemde artış göstermiştir (EIA, 2023). Dünya genelindeki kömür rezervleri, petrol ve doğal gaz gibi diğer fosil yakıtlara kıyasla daha yüksek miktarlarda bulunmaktadır (EIA, 2023).

Temel enerji kaynaklarından bir diğeri olan doğalgaz, yanıcı gaz özelliğine sahip bir petrol türevidir. Petrolün oluşumunu sağlayan bileşenler, aynı zamanda doğalgazın da meydana gelmesine katkıda bulunur. Doğalgaz, çeşitli kimyasal ürünlerin ana hammaddesi olmasının yanı sıra, dünya enerji tüketiminin önemli bir bölümünü de karşılamaktadır (Elinç, 2019).

Fosil yakıt kullanımının neden olduğu küresel iklim değışiklikleri dünya genelinde yoğun bir şekilde tartışılmaktadır (IPCC, 2023). Aşırı fosil yakıt tüketimi sonucunda buzulların hızla eridiğı, küresel sıcaklık artışının devam ettiğı ve bu durumun gezegenin ekolojik dengesini ciddi ölçüde etkilediğı yapılan bilimsel çalışmalarla ortaya konmuştur (NASA, 2022; UNEP, 2023).

Ortalama küresel sıcaklık değeri, 19. yüzyılın ikinci yarısından itibaren yükselişe geçmiştir. Buna bağılı olarak, ortalama sıcaklıkların her geçen yıl daha da arttığı gözlemlenmektedir. 1950’li yıllardan sonra yeryüzüne düşen yağış miktarında azalmalar, büyük fırtınalar ve tsunamiler kaydedilmiştir. Araştırmalar, bu iklim değışikliklerinin temel sebebinin sanayi ve günlük yaşam faaliyetleri sırasında ortaya çıkan emisyonlar olduğunu ortaya koymuştur (Bayrakçeken, 2019).

2.2.2. Yenilenebilir enerji kaynakları

Tükenmez enerji kaynakları olarak tanımlanan yenilenebilir enerji kaynakları; güneş, jeotermal, rüzgâr, dalga, hidroelektrik, hidrojen ve biyokütle şeklinde sınıflandırılabilir. Bu kaynakların çevre dostu ve sınırsız olmaları, önemlerini her geçen gün artırmaktadır. Yenilenebilir enerji kaynaklarının önündeki yüksek başlangıç yatırım maliyetleri, teşvik eksiklikleri ve teknik zorluklar giderildiğı takdirde, bu kaynakların küresel kullanımı artacak, ülkelerin enerji bağımlılığı azalacak ve yeni istihdam olanakları yaratılacaktır. Ancak, yenilenebilir enerji alanındaki teknik ve ekonomik yetersizlikler ile yenilenemez enerji kaynaklarının günümüzde hala yoğun olarak kullanılması, yenilenebilir enerji kullanımının beklenen hızda artmasını engellemektedir (Çepelioğullar, 2011).

Güneş enerjisi, sınırsız potansiyeli ve çevreye zarar vermeyen yapısı nedeniyle büyük bir

öneme sahiptir. Dünya yüzeyine bir yıl içinde ulaşan güneş enerjisi miktarı (86284 MTEP) oldukça büyüktür. Bu miktar, bilinen kömür rezervlerinin 50 katına ve petrol rezervlerinin ise 800 katına karşılık gelmektedir. Güneş enerjisinden elektrik üretimi doğrudan veya dolaylı yollarla yapılabilir. Doğrudan elektrik üretimi, güneş pillerinin fotovoltaik dönüşümü ile sağlanırken; dolaylı üretimde ise güneş enerjisi farklı teknolojilerle yoğunlaştırılarak elde edilen ısı enerjisi, geleneksel yöntemlerle elektrik enerjisine çevrilir (Çepeliogullar, 2011).

Çok küçük basınç farklılıkları sonucunda hareket eden hava kütleleri, rüzgar enerjisini oluşturur. Rüzgar enerjisinin potansiyeli, hava koşullarına ve coğrafi özelliklere bağlı olarak değişiklik gösterir. Rüzgardan enerji elde etmek için, hava akımı yatay veya düşey eksenli rüzgar türbinleri aracılığıyla mekanik enerjiye dönüştürülür. Bu mekanik enerji daha sonra su pompalamak veya elektrik üretmek amacıyla kullanılır. Rüzgar enerjisi, doğayla tamamen uyumlu ve tükenme riski olmayan bir kaynaktır. Günümüzde, teknolojinin ilerlemesiyle rüzgar santrallerinin maliyetlerinin sürekli düşmesi, bu santrallerin ekonomik açıdan geleneksel santrallerle rekabet edebilmesini sağlamaktadır (Çepeliogullar, 2011).

Yerkabuğunun derinliklerinde bulunan ısı ile yeraltı sularının ısıtılması sonucu ortaya çıkan enerji, jeotermal enerji olarak adlandırılır. Türkiye, jeotermal enerji potansiyeli açısından oldukça zengin olup, dünya genelindeki önemli rezervlere sahip ülkeler arasında yer almaktadır. Yüksek verimliliğinin yanı sıra; jeotermal enerji çevre dostu olması ve düşük işletme maliyetleri gibi önemli avantajlar sunmaktadır (Kanmaz, 2011).

Denizler ve okyanuslar üzerinde esen rüzgarların oluşturduğu enerji türüne dalga enerjisi denir. Dalgalar, rüzgarların deniz yüzeyine doğru esmesiyle oluşur ve hem potansiyel hem de kinetik enerjiye sahiptirler. Bu enerji türü de diğer yenilenebilir kaynaklar gibi çevre dostu ve tükenmez bir enerji kaynağıdır (Kar, 2018).

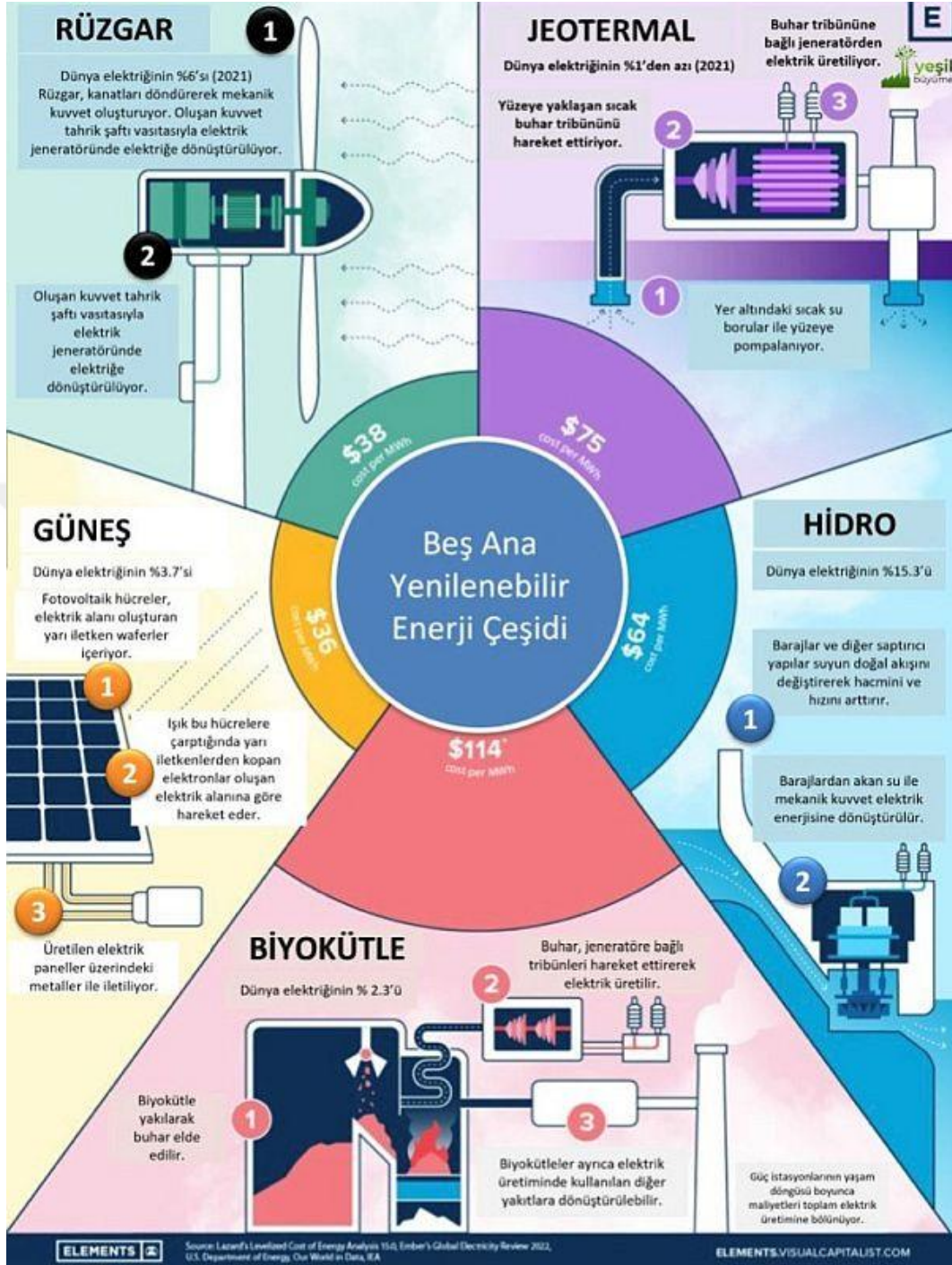
Hidroelektrik enerji, düşük risk profili ve fosil yakıtlar gibi çevreye zarar vermemesi nedeniyle tercih edilen ve ihtiyaç duyulan bir kaynaktır. Hidroelektrik santrallerde üretilen bu enerji, temiz, yenilenebilir, uzun ömürlü ve yüksek verimli olmasının yanı

sıra, düşük işletme maliyetleri sayesinde dışa bağımlılığı azaltan en önemli yerli kaynaklar arasında yer almaktadır (Kar, 2018).

Hidrojen, doğada doğrudan bulunan bir yakıt türü olmayıp, fosil yakıtlar, biyokütle ve su gibi çeşitli hammaddelerden üretilen sentetik bir yakıttır. Hidrojen üretimi için buhar reformasyonu, elektroliz, atık gazların saflaştırılması, radyoliz ve foto süreçler gibi birçok alternatif üretim teknolojisi kullanılmaktadır. Hidrojen enerjisinin kullanımındaki en büyük zorluk, üretilen hidrojenin uzun mesafelere taşınmasıdır. Bu nakil için gerekli olan boru hatları ve tankerler, maliyet açısından olumsuz bir etki yaratmaktadır (Yeşilkaya, 2017).

Biyokütle, karbon içeren her türlü bitkisel ve hayvansal atıklardan oluşan organik maddeler bütünüdür. Ayrıca, kentsel ve endüstriyel atıklar da biyokütle kapsamında değerlendirilir. Biyokütle, fotosentez süreci sonucunda oluşur ve yakılmasıyla bünyesinde depoladığı güneş enerjisini serbest bırakır. Bu nedenle, türü ne olursa olsun tüm biyoküteller enerji üretimi için kullanılabilir. Biyokütleden elde edilen enerjiye biyokütle enerjisi denir. Çevresel açıdan bakıldığında, biyokütle bazlı yakıtlar, fosil yakıtlara kıyasla önemli avantajlar sunmaktadır ve enerji tüketiminde onların yerini alabilecek potansiyele sahiptir (Alayont, 2019).

Şekil 1’de, günümüzde küresel ölçekte elektrik üretiminde öne çıkan beş ana yenilenebilir enerji kaynağı olan rüzgâr, güneş, hidroelektrik, biyokütle ve jeotermal enerji sistemleri şematik olarak gösterilmektedir. Bu enerji kaynakları, fosil yakıtlara kıyasla düşük çevresel etki, yerli kaynak potansiyeli ve sürdürülebilirlik avantajları nedeniyle enerji dönüşümünün temel bileşenleri hâline gelmiştir.



Şekil 1. En önemli 5 yenilenebilir enerji kaynağı (Bhutada, 2022)

2.3. Dünyada ve Türkiye’de Enerji

Yirminci yüzyılın sonlarına doğru küresel enerji talebinde kayda değer bir artış gözlemlenmiştir. Dünya nüfusunun ve buna bağlı ihtiyaçların artmasıyla birlikte teknolojinin gelişimi de enerji ihtiyacındaki bu yükselişi tetiklemiştir. Bu durum, son otuz yıl içinde enerji talebinin iki katına çıkmasıyla açıkça ortaya konmaktadır.

Gelecek yıllarda, yenilenebilir enerji kaynakları dünya enerji politikalarında kilit bir rol üstlenecektir. Çevre dostu ve güvenilir olmaları sayesinde, yenilenebilir enerji kaynakları fosil yakıtlara kıyasla önemli avantajlara ve üstünlüklere sahiptir. Bu avantajlara rağmen, önümüzdeki on yıl içinde gelişmiş ülkelerdeki enerji tüketiminin %55’inin hala fosil yakıtlardan karşılanacağı tahmin edilmektedir. Fosil yakıtlara olan bu aşırı bağımlılığı azaltmanın en etkili yolu yenilenebilir enerji kaynaklarına geçiş olarak görülmektedir. Önümüzdeki on yıl içinde, yenilenebilir enerji kaynaklarının enerji piyasasındaki payının %14’ten %40 seviyesine yükseleceği, nükleer enerjinin payının ise %7’den %5’e gerileyeceği öngörülmektedir. Fosil yakıt rezervlerinin (kömür, doğal gaz ve petrol) sırasıyla 120, 60 ve 50 yıl içinde tükeneceği tahmin edilmektedir. Alternatif enerji kaynakları olan yenilenebilir enerji kaynaklarının doğal ve teknik potansiyelleri, küresel enerji ihtiyacının tamamını karşılayabilecek düzeydedir (Elinç, 2019).

Konut, sanayi, ulaşım ve ticaret gibi yaşamın her alanında kullanılan enerji, bir ülkenin sosyal ve ekonomik gelişimi için en temel gereksinimlerden biridir. Ulaşım sektörünün ana enerji kaynağı olan petrol, küresel enerji tüketiminde ilk sırada yer almaktadır. Kömür ve doğal gaz ise elektrik üretiminde yaygın olarak kullanılmaktadır ve petrolden sonra en çok tüketilen enerji kaynaklarıdır. Yapılan araştırmalar, uzun vadede petrol ve doğalgazın enerji tüketimindeki bu payını koruyacağını göstermektedir (Bayrakçeken, 2019).

Yapılan araştırmalar sonucunda, enerji kaynaklarındaki artış miktarının yenilenebilir enerji kaynakları için %410, nükleer enerji için %50, doğal gaz için %48, hidroelektrik için %38 ve petrol için %11 olacağı öngörülmektedir. Fosil enerji kaynakları arasında en büyük artışın doğalgazda gerçekleşeceği tahmin edilirken; kömürde herhangi bir artış beklenmemektedir. Bölgesel tahminlere göre, Asya Pasifik Bölgesi’nde enerji talebinin

2040 yılına kadar önemli ölçüde artarak dünya enerji talebinin yaklaşık yarısını oluşturacağı öngörülmektedir. Afrika, Ortadoğu, Orta ve Güney Amerika'da ise bu artışın oransal olarak gerçekleşeceği tahmin edilmektedir. Dünya nüfusunun hızla artması, enerji tüketimindeki artışın en önemli nedenidir. Araştırmacı kurumlar, nüfus artışına paralel olarak sanayileşme, kentleşme ve dijitalleşmenin de artmasıyla enerji tüketiminin daha da yükseleceğini düşünmektedir (Bayrakçeken, 2019).

Küresel enerji tüketimindeki artış, enerji sektörüne yönelik yatırımların da yükselmesine neden olmaktadır. Uluslararası Enerji Ajansı (IEA) tarafından yayımlanan raporlara göre, 2040 yılına kadar enerji sektörüne toplamda yaklaşık 66,5 trilyon ABD doları tutarında yatırım yapılması öngörülmektedir (IEA, 2016). Bu yatırımların yaklaşık %35'inin enerji verimliliği alanında gerçekleşeceği dikkate alındığında, bu tez çalışmasından elde edilecek bulguların önemi daha net bir şekilde ortaya çıkmaktadır (IEA, 2018).

Türkiye, dünya genelinde enerji konusunda en fazla zorluk yaşayan ülkelerden biridir. Bunun nedeni, Türkiye'nin hızla artan nüfusuyla birlikte yeni istihdam alanlarına yönelmesi, sanayileşme çabaları ve tarımı modern sistemlerle geliştirme gayretidir. Tüm bu faaliyetler, enerji talebinin hızla artmasına zemin hazırlamaktadır. Ancak, Türkiye bu hızla artan enerji talebini karşılamak için öz kaynaklarını yeterince kullanamamaktadır. Bu durum, dışarıdan enerji satın alma eğilimini artırarak enerjide dışa bağımlılığı yükseltmektedir. Avrupa Birliği ülkeleriyle karşılaştırıldığında, Türkiye'nin enerjideki dışa bağımlılık oranı daha yüksek seviyededir. Türkiye'nin ekonomik koşulları göz önüne alındığında, enerjideki bu dışa bağımlılığı azaltmak için yerli kaynaklara yönelme gerekliliği konusundaki düşünceler giderek güçlenmektedir (Çepelioğullar, 2011).

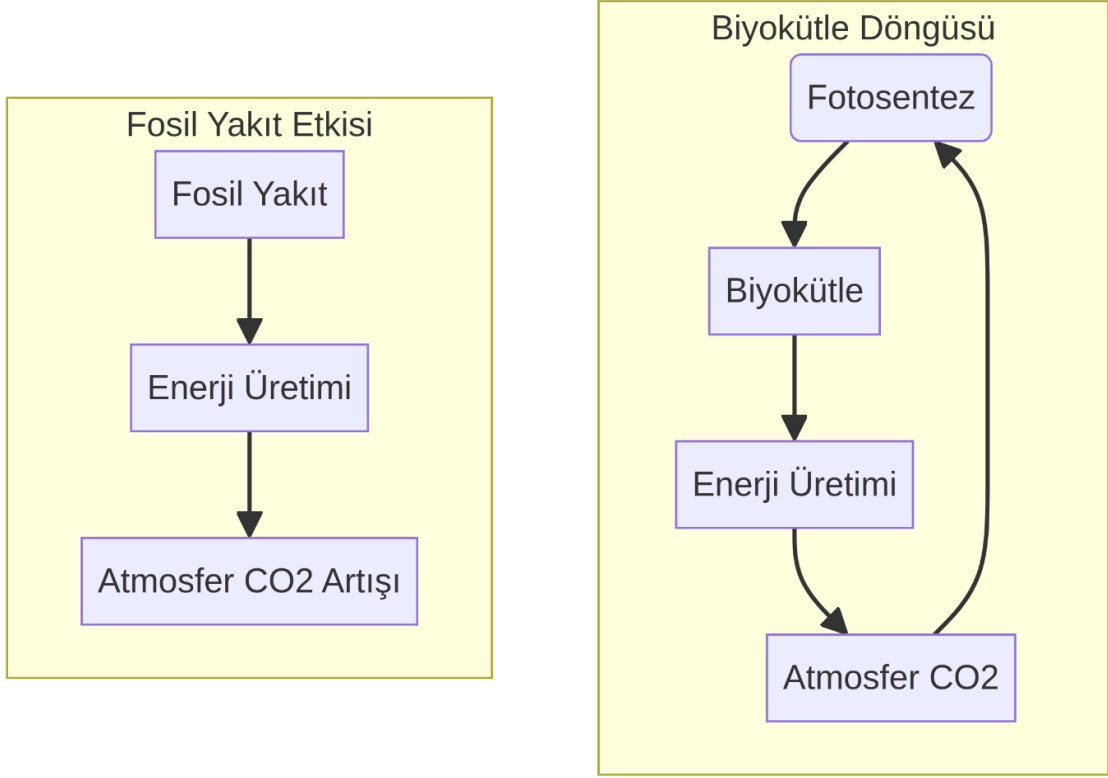
Enerji arz güvenliği, tüm ülkeler için olduğu gibi Türkiye için de büyük önem taşımaktadır. Son yıllarda Türkiye, bu konuya yönelik olarak enerji piyasasının yeniden yapılandırılması, temiz ve yenilenebilir enerji kaynak potansiyelinin belirlenmesi, elektrik üretiminde nükleer enerjiden faydalanılması, enerjinin verimli kullanılması ve yeni enerji teknolojilerinden yararlanılması gibi yasal ve teknik çalışmalarda önemli ilerlemeler kaydetmiştir (Çepelioğullar, 2011).

Türkiye'nin enerji politikalarının temel prensipleri; enerjinin maliyet, zaman ve miktar açısından tüketiciler için erişilebilirliğini sağlamak, serbest piyasa mekanizmalarıyla kamu ve özel sektör kurumlarını harekete geçirmek, enerjide dışa bağımlılığı azaltmak, ülkenin bölgesel ve küresel etkisini artırmak, kaynak, güzergâh ve teknoloji çeşitliliğini yükseltmek, yenilenebilir enerji kaynaklarının en yüksek oranda kullanımı için gerekli teşvikleri sağlamak, enerjiden yüksek verim elde etmek ve enerji kaynaklarının üretim ve tüketim süreçlerinde çevreye verilebilecek zararları en aza indirmek şeklinde özetlenebilir (Çepelioğullar, 2011).

Son yıllarda Türkiye'deki toplam enerji tüketimi, nüfus artışına paralel bir seyir izleyerek yükselmiştir. Türkiye'nin dünya nüfusundaki payı %1.2 iken, dünya enerji tüketimindeki payı %0.8'dir. Bu veriler, Türkiye'nin kişi başına düşen enerji tüketiminin dünya ortalamasının dörtte üçü seviyesinde olduğunu göstermektedir. Türkiye'nin enerjide dışa bağımlı bir ülke olmasının başlıca nedenleri; coğrafi konumu, ülke içinde yeterli bilinçlendirme çalışmalarının yapılmaması ve enerjinin verimli kullanılmaması olarak özetlenebilir. Türkiye, en çok tükettiği enerji kaynağı olan petrolün yalnızca %2.9'unu kendi imkanlarıyla üretebilmektedir (Gümülügil, 2016).

2.4. Biyokütle

Biyokütle, güneş enerjisinin fotosentez süreci aracılığıyla organik maddelerde kimyasal enerji formunda depolanmış halidir. Başka bir deyişle, canlı organizmalar tarafından üretilen ve karbonhidrat bileşenleri içeren her türlü organik madde biyokütle olarak adlandırılır. Karada ve suda büyüyen bitkiler, hayvansal atıklar, orman kalıntıları, gıda ve kentsel kaynaklı organik materyaller biyokütle kapsamına girmektedir (Açıkalın, 2010; Çepelioğulları, 2011).



Şekil 2. Fosil yakıt ve biyokütle döngüsü karşılaştırması

Biyokütle, temel olarak karbon, hidrojen ve oksijen elementlerinden meydana gelir. Lignoselülozik bir yapıya sahip olan bu maddeler, yüksek oksijen içeriği nedeniyle fosil yakıtlara göre daha düşük ısı değere sahiptir. Ancak, kolay erişilebilirliği ve yenilenebilir özelliği, biyokütleyi enerji üretimi açısından sürdürülebilir bir kaynak yapmaktadır (Küçük, 2019).

1970’li yıllarda yaşanan enerji krizlerinin ardından biyokütleyle olan ilgi önemli ölçüde artmış; 1980’li yıllardan itibaren biyodizel, bioetanol ve odun peleti gibi biyokütle türevleri uluslararası enerji pazarında yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır (IEA, 2019; Demirbas, 2009). Günümüzde biyokütle enerjisi, küresel enerji arzının önemli bir bileşenini oluşturmaktadır (FAO, 2017).

Dünya üzerinde fotosentez yoluyla üretilen tüm organik maddeler biyokütle olarak tanımlanır. Biyokütlenin ana elementleri karbon, hidrojen ve oksijendir (Açıkalın, 2010). İnsanlar biyokütleyi doğrudan yakarak veya çeşitli işlemlerden geçirerek farklı formlarda kullanmaktadırlar. Kolayca ulaşılabilen bir kaynak olması, biyokütlenin bulunduğu

bölgelerde endüstriyel gelişime katkı sağlamıştır (Küçük, 2019).

Yüz yıldan daha kısa bir sürede kendini yenileyebilen karasal ve sucul bitkiler, hayvansal atıklar, gıda ve orman ürünleri ile kentsel atıklar dahil olmak üzere tüm bu maddeler biyokütle olarak tanımlanır. Biyokütleyi yapay maddelerden ayıran en önemli özellik, yenilenebilir niteliğidir. Biyokütlenin biyolojik ve kimyasal özellikleri, yetiştirme süreçleri ve değişken iklim koşulları gibi dış etkenlere bağlı olarak farklılıklar gösterir (Çepeliogullar, 2011).

Biyokütle enerjisinin tarihi çok eskilere dayanmasına rağmen, ekonomik açıdan önem kazanması 1970'li yıllardaki enerji krizleri, artan enerji talebi ve fosil kaynakların azalmaya başlaması gibi faktörler sayesinde gerçekleşmiştir.

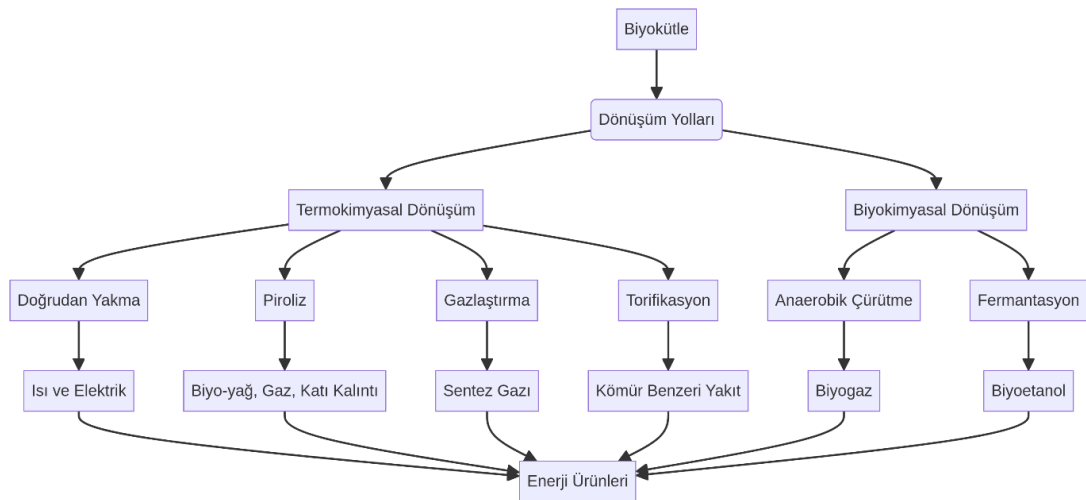
1980'li yıllardan itibaren etanol, biyodizel, odun yongaları ve ahşap pelet gibi biyokütle türevleri uluslararası enerji piyasalarında yaygın olarak işlem gören ürünler hâline gelmiştir (IEA, 2019). Günümüzde biyokütle enerjisinin uluslararası ticaret içerisindeki payı yaklaşık %2 seviyesinde olup, gelecekte bu oranın önemli ölçüde artacağı öngörülmektedir (FAO, 2017). Biyokütle kaynaklı enerjiyi daha cazip hâle getirebilmek için fosil yakıt kullanımını azaltıcı politikaların (örneğin CO₂ vergileri) ve biyokütle kullanımını teşvik edici mekanizmaların (yatırım ve üretim destekleri gibi) hayata geçirilmesi gerekmektedir (OECD, 2021; IPCC, 2023).

Günümüz ekonomik koşullarında enerji talebinin karşılanabilmesi, arz ve talep arasında bir denge kurulmasıyla mümkündür. Bu dengenin sağlanması; enerji güvenliğinin artırılması, ekonomik faaliyetlerin çeşitlenmesi ve kırsal kalkınmanın desteklenmesi açısından kritik öneme sahiptir. Tüm bu hedeflere ulaşılması, uygun politikaların geliştirilmesi ve gerekli tedbirlerin alınmasıyla gerçekleştirilebilir. 1990'lı yıllardan itibaren biyokütle enerjisine olan arz ve talep, dünya genelinde en çok tartışılan konular arasına girmiştir. Fosil yakıtların çevresel etkileri ve fiyatlarındaki artış, yenilenebilir bir kaynak olan biyokütleyi daha önemli bir konuma taşımıştır (Bayramoğlu, 2013).

2000’li yıllardan sonra enerji sektöründe serbestleşme eğilimleri belirginleşmiş ve yenilenebilir enerji kaynakları devletler tarafından daha fazla desteklenmeye başlanmıştır. Bu süreçte biyokütle, fosil enerji kaynaklarından sonraki en önemli enerji kaynaklarından biri haline gelmiştir. Diğer enerji kaynaklarına kıyasla daha düşük maliyetli olan biyokütle enerjisi, küresel enerji talebini karşılamada önemli bir potansiyele sahiptir. Küresel ölçekte biyokütle enerjisi potansiyelinin sadece beşte ikisinin kullanıldığı göz önüne alındığında, gelecekte bu kaynağın çok daha etkili olacağı düşünülmektedir. Uluslararası Enerji Ajansı’nın (IEA) 2050 yılı tahminlerine göre, biyokütle kaynaklı enerjinin küresel birincil enerji arzına katkısının yaklaşık %30 olacağı öngörülmektedir (Bayramoğlu, 2013).

2.5. Biyokütle Enerjisi Dönüşüm Yöntemleri

Biyokütleden katı, sıvı veya gaz formunda yakıt elde etmek amacıyla çeşitli teknolojilerden yararlanılmaktadır (Işıtan, 2016). Biyokütle dönüşüm teknikleri, hidrojen, biyodizel, biyogaz, biyoetanol ve gübre gibi ürünlerin elde edilmesini sağlar. Kullanılan biyokütle türüne göre farklılık gösteren bu dönüşüm tekniklerini iki ana başlık altında toplamak mümkündür. Birincisi, anaerobik çürütme ve fermantasyon gibi biyokimyasal dönüşüm yöntemleri; ikincisi ise yakma, sıvılaştırma, piroliz, gazlaştırma ve torifikasyon gibi termokimyasal dönüşüm yöntemleridir (Donar, 2013).



Şekil 3. Biyokütle enerjisi dönüşüm yolları gösterimi

Biyokütle enerji santralleri, organik materyalleri enerjiye çevirmek amacıyla termokimyasal veya biyokimyasal dönüşüm süreçlerinden faydalanmaktadır (Chattopadhyay & Ghosh, 2018).

2.5.1. Termokimyasal dönüşüm yöntemleri

Doğrudan Yakma: Katı biyokütlenin kazan içinde yakılarak ısı enerjisine dönüştürülmesi esasına dayanır. Bu yöntemle üretilen buhar, türbini çalıştırarak elektrik üretir. (McKendry, 2002).

Gazlaştırma: Biyokütle, kontrollü bir ortamda yüksek sıcaklıkta singaz (CO , H_2 , CH_4 karışımı) haline dönüştürülür ve gaz motorlarında yakılarak enerji üretilir. (Basu, 2010).

Piroliz: Oksijensiz ortamda yüksek sıcaklıkta biyokütlenin parçalanmasıyla biyoyağ, biyokömür ve gaz ürünleri elde edilir (Bridgwater, 2012).

Torifikasyon: Biyokütlenin oksijensiz veya sınırlı oksijen ortamında yaklaşık 200–300 °C sıcaklık aralığında ısı işleme tabi tutularak nem içeriğinin azaltılması, enerji yoğunluğunun artırılması ve kömür benzeri yakıt özelliklerinin iyileştirilmesini amaçlayan bir termokimyasal ön arıtma yöntemidir (Bergman vd. 2005).

2.5.2. Biyokimyasal dönüşüm yöntemleri

Anaerobik çürütme (biyometanizasyon), mikroorganizmalar yardımıyla organik atıkların biyogaza dönüştürülmesini sağlayan biyokimyasal bir süreçtir. Fermantasyon yöntemiyle ise şeker veya nişasta içeren bitkisel kaynaklardan biyoetanol üretilebilmektedir (Demirbas, 2009).

Küresel enerji tüketiminin yaklaşık %15'i biyokütle kaynaklarından sağlanmakta olup, bu oran gelişmekte olan ülkelerde %40'ın üzerine çıkmaktadır (IEA, 2022; FAO, 2018). Türkiye'de 2025 yılı itibarıyla biyokütleyle dayalı kurulu güç 2213 MW'a ulaşmış ve toplam elektrik üretimindeki payı %1,8 seviyesine yükselmiştir (ETKB, 2025). Bu

gelişmeler, biyokütlenin enerji bağımsızlığı, karbon nötr üretim ve sürdürülebilir atık yönetimi açısından stratejik önemini açıkça ortaya koymaktadır (UNEP, 2021).

Biyokütle enerjisi, fosil yakıtların aksine tükenme riski taşımayan, yenilenebilir ve sürdürülebilir bir enerji kaynağıdır (IEA, 2022). Yaşam döngüsü yaklaşımı dikkate alındığında karbon döngüsünü bozmadığı için CO₂ emisyonları açısından büyük ölçüde nötr kabul edilmektedir (IPCC, 2023). Ayrıca tarımsal ve hayvansal atıkların enerjiye dönüştürülmesi sayesinde çevre kirliliğinin azaltılmasına katkı sağlamakta ve etkin bir atık yönetim aracı olarak öne çıkmaktadır (UNEP, 2021). Yerli kaynak kullanımını teşvik etmesi ise kırsal kalkınmayı desteklemekte ve yeni istihdam olanakları oluşturmaktadır (FAO, 2018).

2.6. Biyokütle Enerjisinin Depolanabilirlik Özelliği

Biyokütle, diğer yenilenebilir enerji kaynaklarından farklı olarak enerjiyi kimyasal formda depolayabilme özelliğine sahiptir. Güneş ve rüzgar enerjisinin aksine, biyokütle üretimi mevsimsel veya zamana bağlı değildir; stoklanabilir, kolayca taşınabilir ve ihtiyaç duyulduğu anda yakılarak enerji üretimi gerçekleştirilebilir.

Bu benzersiz özellik, biyokütleyi enerji üretimi için ideal bir kaynak haline getirmektedir. Elektrik şebekesinin kesintisiz enerji arzına ihtiyaç duyduğu durumlarda, biyokütle santralleri güneş ve rüzgâr gibi kesintili yenilenebilir enerji kaynaklarını destekleyici bir rol üstlenmektedir (IEA, 2020; IRENA, 2019). Bu yönüyle biyokütle enerjisi, enerji sistemlerine esneklik kazandırmakta ve arz güvenliğini önemli ölçüde artırmaktadır (IEA, 2023).

2.7. Dünyada ve Türkiye’de Biyokütle Enerjisinin Mevcut Durumu

2.7.1. Küresel durum

Küresel çapta biyokütle ve atık kökenli enerji kullanım potansiyeli oldukça yüksektir. 2021 yılı itibarıyla küresel biyokütle arzı yaklaşık 54 EJ olarak gerçekleşmiş olup, bunun

yaklaşık %85'i katı biyokütle kaynaklıdır (IEA, 2022). Biyokütleyle dayalı elektrik üretim kapasitesi 2014 yılında yaklaşık 88 GW seviyesindeyken, 2023 yılı itibarıyla yaklaşık 150,3 GW'a yükselmiştir (IRENA, 2024). Aynı dönemde biyokütleden elektrik üretimi yaklaşık 439 TWh'den 697 TWh'ye çıkmış; üretimin %51'i Asya'da, %28'i Avrupa'da ve %19'u Amerika kıtasında yoğunlaşmıştır (IEA, 2023). Küresel piyasa değeri açısından bakıldığında ise biyokütle elektrik üretiminin 2024 yılında yaklaşık 55,4 milyar ABD doları seviyesinde olduğu ve 2029 yılına kadar yaklaşık 72,8 milyar ABD dolarına ulaşmasının beklendiği bildirilmektedir (IMARC Group, 2024).

Bu veriler, biyokütle enerji sistemlerinin istikrarlı bir büyüme sergilediğini; ancak özellikle güneş ve rüzgar gibi diğer yenilenebilir kaynaklarla karşılaştırıldığında pazar payının henüz daha büyük olmadığını göstermektedir. Bu durum, biyokütlenin teknik, tedarik zinciri, lojistik ve çevresel sürdürülebilirlik gibi alanlarda hala önemli iyileştirme potansiyeline sahip olduğunu işaret etmektedir.

Dünya nüfusundaki artış ve teknolojinin ilerlemesiyle birlikte enerji ihtiyacı sürekli bir yükseliş eğilimi göstermektedir. Sınırlı olan fosil enerji kaynaklarının yakın gelecekte tükenecek olması, enerji politikalarını alternatif enerji kaynaklarına yönelmeye zorunlu kılmaktadır.

Biyokütle, birçok ülke için en değerli enerji kaynaklarından biri olarak kabul edilmektedir. Her yerde yetiştirilebilmesi, çevre korumasına katkı sağlaması, elektrik üretiminde ve taşıt yakıtı elde etmede kullanılabilmesi gibi özellikleri sayesinde biyokütle, hem gelişmiş hem de gelişmekte olan ülkeler için önemli ve stratejik bir enerji kaynağıdır. Özellikle gelişmekte olan ülkelerde, enerji ihtiyacının yaklaşık üçte biri biyokütle kaynaklarından karşılanmaktadır (Baykan, 2011).

Tablo 1'de sunulan dünya biyokütle potansiyeli incelendiğinde, okyanuslar %70'lik pay ile en geniş alana sahip olmasına rağmen; bu alandan yeterince fayda sağlanamamaktadır. Biyokütle üretiminin sadece %38'i okyanuslardan karşılanırken, yalnızca %11'lik alana sahip olan ormanların biyokütle üretimine katkısı ise %44'tür (Ertaş, 2010).

Uluslararası Enerji Ajansı'nın (IEA) tahminlerine göre, dördüncü büyük enerji kaynağı olan biyokütle ve atıkların yıllık büyüme hızı %1.4 olarak gerçekleşecek ve bu artışla birlikte 2030 yılında değeri 1662 MTEP'e ulaşacaktır. Ancak, toplam enerji tüketimindeki yıllık büyüme hızının %1.6 olacağı öngörüldüğünden, 2030 yılındaki toplam tüketim içinde biyokütle ve atık maddelerinin payının %9.8'e gerileyeceği tahmin edilmektedir (Açıklan, 2010).

Tablo 1. Dünya biyokütle potansiyeli (Ertaş, 2010)

	Alan (%)	Biyokütle üretimi (%)
Ormanlar	11	44
Koruluklar	5	1
Otlak-Çayır	5	9
Tarımsal Alanlar	3	5
Çöl	5	0
Göl ve nehirler	1	3
Okyanuslar	70	38

2.7.2. Türkiye'de durum

T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı verilerine göre, Türkiye'deki biyokütle kaynaklarının toplam ekonomik enerji eşdeğeri yaklaşık 3.9 MTEP/yıl seviyesindedir. 2023 Nisan sonu itibarıyla, biyokütle ve atık ısı enerjisine dayalı elektrik kurulu gücü Türkiye'de yaklaşık 2380 MW (2.38 GW) seviyesine ulaşmıştır. Bu da toplam kurulu güç içindeki payının %2.93 olduğunu göstermektedir. Literatürde, örneğin Tekirdağ ilinde yapılan bir çalışmada, tarla ürünleri hasat artıklarından kaynaklanan biyokütle enerjisi potansiyelinin yaklaşık 3049.88 GWh olduğu hesaplanmıştır.

Türkiye, Orta Doğu ve Orta Asya arasında bir köprü görevi görmesi nedeniyle coğrafi konumu itibarıyla enerji açısından önemli bir potansiyele sahiptir. Enerji, Türkiye'nin kalkınma planlarında kritik bir yer tutmaktadır. Türkiye'nin ekonomisi hızla büyümekle birlikte, elektrik tüketim talebi daha hızlı bir artış göstermektedir. Türkiye'nin yurt içi enerji talebindeki bu hızlı yükseliş, yabancı enerji kaynaklarına olan ihtiyacı da paralel olarak artırmaktadır (Çöp, 2018).

Biyokütle, Türkiye'nin kırsal bölgelerinde en önemli enerji kaynağıdır. Elektrik üretimi, konut ısıtması, araç yakıtı ve endüstriyel tesisler için proses ısısı sağlama gibi çeşitli enerji ihtiyaçlarını karşılamak için kullanılmaktadır. Odun, hayvan ve bitki atıkları potansiyel biyokütle kaynaklarıdır ve bu kaynaklar içinde odunun özel bir önemi vardır. Gelişmekte olan bir ülke olarak Türkiye, tarımsal açıdan zengin bir potansiyele sahip olduğu için tarımsal atıklar bakımından da zengin bir ülkedir. Ayrıca, Türkiye'de her yıl yüksek miktarda hayvansal atık da üretilmektedir (Çöp, 2018).

2.8. Biyokütlenin Avantajları ve Dezavantajları

Enerji kaynağı olarak biyokütle, yenilenebilir, güçlendirilebilir ve çevreye zarar vermeyen niteliklere sahiptir. Fosil yakıtların neden olduğu sera etkisi, biyokütle için geçerli değildir. Bünyesinde çok az miktarda kükürt barındırdığı için, çevreye zararlı olan kükürt dioksit emisyonunu artırmaz ve dolayısıyla asit yağmurlarına neden olmaz. Birçok biyokütle türünün atıkları enerji kaynağı olarak kullanıldığından, atık maddelerin bertaraf edilmesi sağlanarak çevresel olumsuz etkiler de önlenmiş olur. Biyokütle kaynaklarının geniş bir coğrafyada yetiştirilebilmesi ve depolanabilmesi, en önemli avantajları arasındadır. Ayrıca, dönüşüm teknolojilerinin biliniyor olması ve yüksek enerji verimi için uygun olması da biyokütlenin avantajları arasında sayılabilir. Tüm bunlara ek olarak, biyokütlenin sosyal ve ekonomik gelişme üzerindeki etkisi oldukça fazladır (Özyurt, 2006). Biyokütlenin enerji kaynağı olarak kullanılması, yenilenebilir veya yenilenemez diğer enerji kaynaklarına kıyasla pek çok üstünlüğe sahiptir:

- **Bol Miktarda Bulunabilirlik ve Stratejik Önem:** Dünyanın dördüncü büyük enerji kaynağı olan biyokütle, neredeyse her yerde doğal olarak yetiştiği için bol miktarda mevcuttur. Bu avantajı, ülkelere kendi enerjilerini üretme imkanı sunarak uluslararası çatışmaların azaltılmasına katkıda bulunabilir.
- **Ekonomik ve Çevresel Temizlik:** Biyokütle, en ucuz yenilenebilir ve temiz enerji kaynaklarından biridir. Fosil yakıtlardaki tükenme tehlikesi biyokütle için söz konusu değildir.
- **Kimyasal Enerji Depolama:** Biyokütle, güneş enerjisini fotosentez yoluyla atmosferdeki karbondioksiti organik ürünlere dönüştürerek kimyasal enerji

şeklinde depolar. Bu durum, diğer yenilenebilir enerji kaynaklarında bulunmayan bir özelliktir.

- Çok Yönlü Dönüşüm: Biyokütle, katı, sıvı ve gaz yakıtlara dönüştürülebilen ve birçok amaç için kullanılabilen bir enerji kaynağıdır. Bu çok yönlü dönüşüm yeteneği, yenilenebilir enerji kaynakları içinde sadece biyokütleyle özgüdür.
- Kolay Dönüşüm: Biyokütle ve kömürün kimyasal yapıları karşılaştırıldığında, biyokütlenin dönüşümünün kömürden daha kolay olduğu görülmektedir.
- Çevresel Etki: Biyokütle, fotosentez sayesinde atmosferdeki karbondioksit miktarını dengelediği için bu gazdan kaynaklanan çevresel sorunlara yol açmaz.
- Atık Yönetimi: Birçok biyokütle atığının enerji kaynağı olarak kullanılması, bu atık maddelerden kaynaklanabilecek çevresel sorunları ortadan kaldırır.
- Düşük Emisyon: Biyokütlenin azot ve kükürt içeriği kömürden daha düşüktür. Bu nedenle, yakılması sonucunda ortaya çıkan NOx ve SOx emisyonları kömürden daha azdır. Bu düşük emisyonlar sayesinde, hava kirliliği, asit yağmurları ve sera etkisi biyokütlerde oldukça düşüktür (Açıkalın, 2010).

Biyokütlenin taşınması sırasında ortaya çıkan lojistik sorunlar maliyeti artırmaktadır. Bu durumu önlemek için enerji dönüşüm tesislerinin biyokütle kaynaklarına yakın konumlandırılması veya biyokütlenin boyutunun çeşitli fiziksel işlemlerle küçültülmesi gerekmektedir. Biyokütlenin dönüşüm verimi düşüktür ve ısı değeri fosil yakıtlara göre daha düşüktür. Yüksek miktarda su içermeleri nedeniyle, doğrudan yakıldıklarında açığa çıkan enerjinin bir kısmı suyun buharlaşmasına harcanır. Bu nedenle, biyokütle kullanılmadan önce içerdiği su miktarını azaltmak için kurutma işlemi yapılmalıdır (Özyurt, 2006). Biyokütlenin enerji kaynağı olarak kullanımını kısıtlayan özellikleri ve dezavantajları aşağıda sıralanmıştır:

- Düşük Enerji İçeriği: Biyokütlelerin çoğunun enerji içeriği, kuru ve külsüz bazda bile fosil yakıtlardan daha düşüktür. Bunun temel sebebi, biyokütlenin yapısındaki yüksek oksijen miktarıdır. Yüksek oksijen oranı, karbon ve hidrojen içeriğini azaltarak ısı değerini düşürmektedir.
- Yüksek Nem İçeriği ve Depolama Zorluğu: Biyokütlenin nem içeriği genellikle

yüksek olduğundan, yakma işlemlerinden önce kurutulmaları gerekir. Ayrıca, bünyelerindeki yüksek nem oranı çürümeye yol açabileceği için depolanmaları da kolay değildir.

- **Düşük Yoğunluk ve Toplama Sorunları:** Biyokütlelerin yoğunlukları genellikle düşüktür. Bu durum, depolama, yakma ve işleme süreçleri için büyük ölçekli ekipman ve alan gereksinimine neden olur. Ek olarak, biyokütlelerin geniş alanlara yayılmış olması, toplanmalarında lojistik sorunlar yaratmaktadır.
- **Homojen Olmama ve İşlem Zorluğu:** Biyokütleler genellikle homojen bir yapıya sahip değildir ve akışkan halde bulunmazlar. Bu nedenle, işlenecekleri tesislerde doğrudan kullanılmaları genellikle mümkün olmamaktadır.
- **Gıda ile Rekabet:** Biyokütle, gıda olarak da kullanılabilir ve biyokütle kaynaklı yakıtlar ile gıda üretimi için su, arazi ve enerji gibi ortak kaynaklar gereklidir. Bu durum, biyokütle sektörünü gıda sektörü ile ilişkili ve potansiyel olarak rekabet halinde olan bir konuma getirmektedir (Açıkalın, 2010).

2.9. Biyokütle Kaynakları

Biyokütle kaynaklarının yenilenebilir ve düşük maliyetli olması, onları fosil yakıtlara kıyasla daha avantajlı bir konuma getirmektedir. Her ülkede yetiştirilebilme potansiyeli sayesinde, ülkelerin kendi enerjilerini sağlamaları ve enerjide dışa bağımlılıklarını azaltmaları açısından büyük önem taşımaktadır. Ayrıca biyokütle, yeni istihdam alanları yaratarak sosyal katkı sağlar, çölleşmeyi önler ve sera gazı etkisini düşürerek küresel ısınmanın yavaşlamasına yardımcı olur (Özyurt, 2006).

Biyokütle, çok çeşitli alanlarda kullanılabilir. Enerji kaynağı olarak kullanımı sırasında katı, sıvı ve gaz yakıtlara dönüştürülebilmesi, biyokütlenin en önemli avantajıdır. Bu özellik, yenilenebilir enerji kaynakları arasında sadece biyokütleyle özgüdür (Küçük, 2019). Enerji üretiminde biyokütle kaynaklarının kullanımı, modern biyokütle kullanımı ve geleneksel biyokütle kullanımı olmak üzere iki ana kategoriye ayrılabilir. Geniş bir

alana yayılmış olan modern biyokütle kullanımının, geleneksel fosil enerji kaynaklarının yerini alabileceği düşünülmektedir. Geleneksel biyokütle ise genellikle gelişmekte olan ülkelerde ve küçük ölçekli uygulamalarda kullanılmaktadır (Çepelioğulları, 2011).

Ağaç ve ağaç atıkları, kentsel katı atıklar, tarımsal atıklar ve depolama alanlarında oluşan gazlar, biyokütle enerjisi üretiminde en sık kullanılan kaynaklardır. Gelişmiş ülkeler, enerjilerinin yaklaşık %4'ünü çok eski bir enerji kaynağı olan biyokütleden karşılayabilmektedir. Organik maddelerin yakılmasıyla elde edilen biyokütle enerjisi, elektrik üretmek amacıyla özel enerji santrallerinde belirli tekniklerle yakılır. Bu enerji kaynağının tarım atıklarından elde edilmesi, tarımda biriken atık miktarının büyük ölçüde azalmasına katkı sağlamaktadır (Işıkdag, 2007).

Biyokütle kaynakları; bitkisel biyokütle kaynakları, hayvansal biyokütle kaynakları, ormansal biyokütle kaynakları, sulu biyokütle kaynakları ve atık biyokütle kaynakları olmak üzere beş ana kategoriye ayrılabilir (Çepelioğulları, 2011).

2.9.1. Bitkisel biyokütle kaynakları

Gıda üretimi amacıyla tarımsal faaliyetlerle yetiştirilen bitkilerin hasatları sonrasında ekim alanlarında veya işleme tesislerinde kalan kabuk, kök, sap ve yapraklar, başlıca bitki atıklarını oluşturur. Endüstriyel değere sahip olan bu atıklar, aynı zamanda sert kabuklu yemişler ve meyve çekirdekleri gibi yüksek atık potansiyeline sahip materyalleri de içermektedir ve bitki atıkları sınıfında yer alır.

Türkiye’de tahıllar, yağlı tohumlar ve yumrulu ürünlerin üretimi yaygın olarak yapılmaktadır. Tahıllar genellikle Orta, Doğu ve Güney Bölgeleri’nde yetiştirilirken, Trakya Bölgesi’nde ayçiçeği, Güney, Güneydoğu, Güneybatı Anadolu ve Ege Bölgeleri’nde ise pamuk ve mısır üretimi yaygındır. Yumrulu bitkilerden patates Marmara Bölgesi’nde, şeker pancarı ise ağırlıklı olarak İç Anadolu Bölgesi’nde üretilmektedir. Başta buğday ve arpa olmak üzere, mısır ve pamuk yetiştiriciliğinden de önemli miktarda tarla atığı ortaya çıkmaktadır. Tarımsal üretim sonrasında, bu atıklar tarlada bırakılabileceği gibi, tahıl samanı, hayvan yemi ve hayvan altlığı gibi farklı

amaçlarla da kullanılabilir. Tarımsal ürünlerin endüstriyel işlenmesinden kalan çeltik sapı, mısır sapı, ayçiçeği, saman ve tütün sapı gibi temel atıklar da genellikle tarlada kalmaktadır (Yeşilkaya, 2017).

2.9.2. Hayvansal biyokütle kaynakları

Üretimi sınırlı olan hayvansal atıklar, toplam biyokütle enerji potansiyelinde düşük bir paya sahiptir ve genellikle üretildikleri yerde küçük ölçekli işlemlerle kullanılırlar. Hayvan atıklarının katı yakıt olarak doğrudan kullanılması, az gelişmiş ülkelerde yaygın bir yöntemdir. Hayvan atıklarının en verimsiz kullanım şekli, özellikle kırsal bölgelerde samanla karıştırılıp kurutularak katı yakıt (tezek) elde edilmesidir. Bununla birlikte, biyokütle dönüşüm teknolojileri, hayvansal atıklar ve gübrenin en verimli kullanım alanıdır. Türkiye’de üretilen hayvan gübresinin yaklaşık %25-30’u toprağa verilirken, %20-25’i tezek olarak yakılmakta ve geri kalan yaklaşık %50’lik kısım ise kaybolmaktadır (Çepelioğulları, 2011).

Küresel düzeyde hayvansal atıklardan sağlanan enerji potansiyelinin 20 EJ olduğu tahmin edilmektedir. Hayvansal biyokütle kaynaklarından elde edilen enerji, özellikle Çin ve Hindistan’ın kırsal bölgelerinde yoğun olarak kullanılmaktadır. Hayvansal biyokütle kaynaklarından enerji üretimi, tesis kurulumu, atıkların taşınması, depolanması ve nakliyesi gibi ilgili sektörlerin gelişimine katkıda bulunarak istihdam ve gelir artışına pozitif etki sağlayabilir. Biyokütleden enerji üretim tesislerinin tarımsal üretime entegre edilmesi, hem yakıt tasarrufu sağlayacak hem de organik gübreleme yoluyla toprak verimliliğini koruyarak verimi artırmak gibi ekonomik faydaları beraberinde getirecektir (Bayramoğlu, 2013).

2.9.3. Ormansal biyokütle kaynakları

Orman atığı üretiminde, ağaçların inceltilmesi ve budanması işlemleri önemli bir paya sahiptir. Bu atıkların büyük bir kısmı kesildikleri yerde bırakılmaktadır. Gövdelerinin kalınlığı ve yüksek nem içeriği nedeniyle, bu atıkların yaygın kullanım için nakliyesi maliyetli olmaktadır. Bu sebeple, genellikle yakın çevredeki kırsal sanayide ve evlerde

yakıt olarak tüketilmektedirler. Odun artıklarının bir diğer kaynağı da kereste işleme tesisleridir. Kuru bıçkı tozu ve talaşlar, yüksek kaliteli yakıt elde etmek için kullanılabilir (Yeşilkaya, 2017).

Ormansal biyokütle kaynaklarının tercih edilmesindeki en önemli nedenler; hızlı büyümeleri, uzun ömürlü olmaları ve yüksek enerji içeriğine sahip olmalarıdır. Ayrıca, kalitesi düşük ormansal biyokütle kaynaklarının yongalama makineleriyle parçalanarak elektrik enerjisi elde edilmesi, yaygın bir kullanım şeklidir.

2.9.4. Sulu biyokütle kaynakları

Denizlerde ve göllerde bulunan makro ve mikro algler, yosunlar, otlar, su sümbülleri, sazlar ve bazı mikroorganizmalar sulu biyokütle kaynaklarını teşkil eder. Günümüzde, bazı alg türleri hem gübre yapımında hem de gıda ve yem endüstrisinde kullanılmak üzere ticari olarak yetiştirilmektedir. Ayrıca, kendiliğinden yetişen alglerin toplanmasına yönelik çalışmalar da mevcuttur. Su sümbülü gibi bol miktarda bulunan, hızla üreyen ve varlığı istenmeyen biyokütlelerin enerji kaynağı olarak kullanılması, daha temiz bir çevre için uygun bir çözüm olarak görülmektedir (Açıkalın, 2010).

Kıyı bölgelerde kayalara veya taşlı zeminlere tutunarak yaşayan algler, hızlı büyüme özellikleri sayesinde önemli bir biyokütle kaynağıdır. Algler; sakkarit, yağ, protein ve lignin benzeri bileşenler içermekte olup, bu özellikleri sayesinde termokimyasal ve biyokimyasal dönüşüm süreçleriyle biyogaz, biyoyağ, biyoetanol, biyodizel ve biyohidrojen gibi ürünlere dönüştürülebilmektedir (Demirbas, 2010; Brennan & Owende, 2010; Mata et al., 2010). Yapılan çalışmalar, alglerden ton başına yaklaşık 500 m³ biyogaz üretilbildiğini ve biyogazın yaklaşık %63 oranında metan içerdiğini göstermektedir (Yen & Brune, 2007).

2.9.5. Atık biyokütle kaynakları

Atıklar, temel olarak kentsel atıklar ve endüstriyel atıklar olmak üzere iki ana kategoriye ayrılabilir. Kentsel atıklar; çöpleri, kullanılmış giysi ve gıda atıklarını ve kanalizasyon

atıklarını içerirken, endüstriyel atıklar; seramik, kauçuk, kâğıt, metal ve plastik gibi endüstriyel işlemler sonucu oluşan atıkları kapsar. Katı atıkların enerji değerlerini belirlemek amacıyla birçok çalışma yapılmıştır. Bu çalışmalardan elde edilen kentsel ve endüstriyel atıkların enerji değerlerinden faydalanılarak; hem atıkların bertarafını hem de enerji geri kazanımını sağlayan çok sayıda uygulama mevcuttur. Piroliz, yakma, arıtma çamurlarının anaerobik çürütülmesi veya depolama alanlarında oluşan depo gazının geri kazanılıp tekrar kullanılması bu uygulamalara örnek olarak gösterilebilir (Ertaş, 2010).

Atık biyokütle kaynaklarından enerji üretimi, çevresel sorunların azaltılmasına katkıda bulunmanın yanı sıra ekonomik faydalar da sağlamaktadır. Arıtma çamurları, çöp depolama alanlarında ve evsel atık su arıtma tesislerinde oluşur. Eğer bu arıtma çamurları önceden stabilize edilmemiş ve biyokimyasal aktiviteleri durdurulmamışsa, aerobik organizmalar tarafından ayrıştırılarak metan gazına dönüşecektir. Oluşan bu metan gazını verimli bir şekilde kullanabilmek için, çöp toplama alanlarında gazları toplayacak sondaj borularının inşa edilmesi gerekmektedir. Bu alanlarda biyokütle enerjisi üretebilmek amacıyla gazları toplamak için sondaj borularının belirli bir düzene göre yerleştirilmesi zorunludur (Bayramoğlu, 2013).

2.10. Literatür Taraması

Biyokütle enerji sistemleri üzerine yapılan akademik araştırmalar, potansiyel değerlendirmelerinden termodinamik performans analizlerine kadar geniş bir alana yayılmaktadır. Bu bölümde, tezin temel konularını oluşturan enerji, ekserji ve sistem iyileştirme analizlerine odaklanılacaktır.

2.10.1. Biyokütle enerji santrallerinde enerji analizi çalışmaları

Termodinamiğin Birinci Yasası'na dayanan enerji analizi, bir sistemdeki enerji giriş ve çıkışlarını dengeleyerek sistemin termal verimini hesaplar. Biyokütle santralleri özelinde enerji analizi, yakıtın kimyasal enerjisinin ne kadarının elektrik enerjisine dönüştürüldüğünü gösterir. Literatürde, farklı biyokütle türlerini kullanan buhar çevrimli santrallerin (Yazıcı, 2011) ve organik Rankine çevrimli (ORC) tesislerin (Ercan, 2019)

enerji analizlerine rastlanmaktadır. Bu çalışmalar, genellikle kazan ve türbin gibi temel bileşenlerdeki ısı kayıplarını ve verim değerlerini ortaya koyar. Ancak, enerji analizi enerjinin kalitesini (iş yapabilme potansiyelini) göz ardı ettiği için, sistemdeki tersinmezliklerin ve kayıpların gerçek nedenlerini tam olarak açıklamakta yetersiz kalır.

2.10.2. Biyokütle enerji santrallerinde ekserji analizi çalışmaları

Ekserji analizi, Termodinamiğin İkinci Yasası'nı temel alarak enerjinin kalitesini ve sistemdeki tersinmezlikler sonucu kaybolan iş yapabilme potansiyelini (ekserji yıkımı) incelemektedir (Rosen, 2021; Ozsari, 2023). Biyokütle santrallerinde uygulanan ekserji analizi, enerji kayıplarının hangi bileşenlerde yoğunlaştığını ve bu kayıpların altında yatan nedenleri daha kesin bir şekilde belirler. Örneğin, Braimakis ve Karellas (2020), ultra-süperkritik biyokütle santrallerinin enerji-ekserji analizini gerçekleştirerek, en büyük ekserji yıkımının yakma kazanı ve buhar jeneratöründe meydana geldiğini ortaya koymuştur. Ayrıca, biyokütle kaynaklarının kimyasal ekserji değerlerinin hesaplanması (Ayyıldız, 2022) ve yakıtların termodinamik özelliklerinin incelenmesi (Küçük, 2019) gibi çalışmalarla, yakıt kalitesinin sistem performansı üzerindeki etkisi de ekserji analizleri ile araştırılmaktadır (Kermani & Dincer, 2024). Ekserji analizi, hibrit sistemlerin (Şeker, 2022) ve entegre güç sistemlerinin optimizasyonunda da temel bir araç olarak kullanılmaktadır.

2.10.3. Termal sistemlerde iyileştirme ve karşılaştırmalı analizler

Mevcut enerji santrallerinin verimini yükseltmeyi amaçlayan iyileştirme çalışmaları, enerji mühendisliği alanında önemli bir araştırma konusunu teşkil etmektedir. Bu çalışmalar genellikle tesisin yakıt türünü değiştirmeyi (örneğin, kömürden biyokütleyle geçiş) veya kritik bileşenleri yenilemeyi kapsamaktadır. De Meulenaere ve arkadaşları (2021), büyük ölçekli bir kömür santralinin biyokütle yakıtlı kombine ısı ve güç (CHP) tesisine dönüştürülmesinin enerjetik ve ekserjetik performansını incelemiştir. Bu tür karşılaştırmalı analizler, iyileştirme öncesi ve sonrası durumlar arasındaki verim farkını nicel olarak ortaya koymaktadır. Bu tez çalışması da; gerçek bir biyokütle santralinin

revizyon öncesi ve sonrası durumlarını deneysel verilerle karşılaştırmalı olarak analiz etmesi yönüyle bu literatüre doğrudan katkı sağlamaktadır.

2.11. Literatüre Katkı ve Yenilik

Bu tezin literatüre sağladığı temel yenilik, teorik simülasyonların ötesine geçerek; gerçek işletme koşullarında çalışan bir biyokütle santralinin revizyon öncesi ve sonrası termodinamik performansını karşılaştırmalı olarak analiz etmesidir.

- **Nicel Kayıp Analizi:** Gerçek tesis verileri kullanılarak yapılan enerji ve ekserji analizleri, santral bileşenlerindeki kayıpları nicel olarak belirlemiştir.
- **Revizyon Etkisinin Ölçümü:** Revizyonun sistem verimine olan etkisi doğrudan ölçülmüş ve türbin, kazan ile yoğunlaştırıcı düzeyinde iyileştirme potansiyelleri tespit edilmiştir.
- **Yerel Kaynak Modeli:** Buğday atığı gibi yerel bir biyokütle türünün enerji performansı değerlendirilerek; Türkiye'nin tarımsal atık potansiyelinin enerjiye dönüştürülmesi için örnek teşkil eden bir model oluşturulmuştur.

Bu nedenle, bu çalışma hem deneysel verilere dayanması hem de sistem revizyonunun termodinamik etkilerini incelemesi açısından literatürdeki önemli bir boşluğu doldurmaktadır.

2.12. Buğday Atığının Yakıt Olarak Kullanımının Termodinamik ve Çevresel Boyutları

Buğday sapı ve anız gibi tarımsal atıklar, Türkiye gibi tarım ekonomisi güçlü ülkeler için önemli bir biyokütle kaynağıdır. Ancak, bu tür lignoselülozik biyokütlelerin enerjiye dönüştürülmesi, fosil yakıtlara kıyasla bazı termodinamik ve operasyonel zorlukları beraberinde getirmektedir (Tanger vd., 2013).

Termodinamik ve Operasyonel Zorluklar

Düşük Yığın Yoğunluğu: Buğday sapının düşük yığın yoğunluğu, depolama ve taşıma maliyetlerini yükseltmekte ve santralin yakıt besleme sisteminde operasyonel zorluklara neden olmaktadır.

Yüksek Nem ve Uçucu Madde İçeriği: Yüksek nem içeriği, yakıtın alt ısı değerini düşürerek kazan verimini olumsuz etkiler. Yüksek uçucu madde içeriği ise yanma sürecinin kontrolünü zorlaştırmaktadır.

Kül İçeriği ve Erime Noktası: Buğday atıklarının kül içeriği, özellikle alkali metaller (Potasyum, Sodyum) açısından zengin olduğu için, kül erime sıcaklığı düşüktür. Bu durum, kazan borularında cüruf (slagging) ve kirlenme (fouling) sorunlarına yol açarak santralin sürekli ve verimli çalışmasını engeller (Lebendig vd., 2022). Bu operasyonel zorluklar, santralin ekserji yıkımını artıran tersinmezliklere neden olmaktadır.

Çevresel Boyutlar

Buğday atıklarının tarlada yakılması yerine enerjiye dönüştürülmesi, sera gazı emisyonlarını azaltma ve atık yönetimi sorununa çözüm sunma açısından çevresel faydalar sağlamaktadır. Ancak, biyokütlenin termokimyasal dönüşümü sırasında ortaya çıkan emisyonların (özellikle NO_x ve partikül madde) kontrolü, çevresel sürdürülebilirlik açısından kritik öneme sahiptir (Torres & Dincer, 2020). Bu nedenle, bu tür santrallerin 4E (Enerji, Ekserji, Ekonomik, Çevresel) analizleri ile değerlendirilmesi, sürdürülebilir enerji üretimi için bütüncül bir yaklaşım sunmaktadır (Mishamandani & Dincer, 2025).

3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1. Çalışma Alanı ve Materyal

3.1.1. Biyokütle Enerji Santrali (BES)

Bu araştırmada kullanılan deneysel veriler, Tokat Belediyesi Atık Su Arıtma Tesisi yanında faaliyet gösteren tam ölçekli biyokütle tesisinden toplanmıştır. Söz konusu tesis, buğday sapı yakıtıyla çalışan ve buhar enerjisini elektriğe dönüştüren konvansiyonel rankine çevrimi prensibine dayalı olarak işletilmektedir. Şekil 4’te tesisin genel görünüşü veirlmiştir.



Şekil 4. CEMAK biyokütle enerji santrali

Çalışmada sistemin enerji ve ekserji analizi santralde bulunan rankine çevrimi üzerinden değerlendirilmiştir. Çalışma için kullanılan sistem elemanları şematik olarak Şekil 17 ve Şekil 18’de gösterilmiştir.

Şekil 17 ve Şekil 18’de sunulan deneysel düzenek; kazan, türbin, yoğuşturucu, degazör, veri toplama ünitesi, bilgisayar, pompalar ile birlikte akışkan debisini, sıcaklığı ve basıncı ölçmeye yönelik ölçüm ekipmanlarından oluşmaktadır. İncelenen biyokütle enerji santralinde, yakma ünitesi olarak ileri itişli ızgara tipine sahip bir biyokütle kazanı

kullanılmaktadır. Sistemde, türbin girişinde yaklaşık 450 °C sıcaklık ve 46 bar basınç koşullarında çalışan, çıkış basıncı 0,09 bar olan impulse tip bir buhar türbini ile revizyon öncesinde yaklaşık 6500 kW elektrik enerjisi üretilmiştir. Degazörün ısıtılması, başlangıçta kazandan çekilen doymuş buhar hattı aracılığıyla gerçekleştirilmiş olup, tesis kapalı çevrim prensibine göre işletilmiştir. Yapılan revizyon sonrasında ise türbinin ara kademesinden yaklaşık 3 bar basınç ve 180 °C sıcaklıkta kızgın buhar alınarak degazör ısıtması bu hat üzerinden sağlanmıştır.

Santralin Ana Bileşenleri:

- Biyokütle besleme sistemi: Buğday sapı, depolama alanından alınarak otomatik konveyör sistemiyle kazana taşınır.



Şekil 5. Biyokütle kazanı yakıt besleme sistemi



Şekil 6. Biyokütle kazanı yakıt hazırlama bölümü

- Yakma kazanı: Biyokütle burada yakılarak suyun buhara dönüştüğü ısı enerjisi üretim ünitesidir. Kazan içerisinde gerçekleşen yanma sonucu açığa çıkan ısı, ısı değişim yüzeyleri aracılığıyla kazan besli suyuna aktarılır ve yüksek basınçlı buhar elde edilir. Kazan verimi, yakıtın alt ısı değeri, yanma koşulları ve ısı kayıpları ile doğrudan ilişkilidir.



Şekil 7. Buhar kazanı

- Buhar türbini: Kazanda üretilen yüksek basınçlı ve sıcak buhar, türbinde genişleyerek mekanik enerjiye dönüşür.



Şekil 8. Buhar türbini ve jeneratör



Şekil 9. Buhar türbini yardımcı sistemleri

- Jeneratör: Türbin miline bağlı olup mekanik enerjiyi elektrik enerjisine dönüştürür.
- Yoğuşturucu: Türbinden çıkan buharın yoğuşturulduğu ve çevrime yeniden kazandırıldığı elemandır.



Şekil 10. Yoğuşturucu sistemi yandan görünümü



Şekil 11. Yoğuşturucu sistemi önden görünümü

- Besleme suyu pompaları: Sistemde suyun sirkülasyonunu sağlar.



Şekil 12. Kazan besleme pompası



Şekil 13. Degazör besleme pompası

- Degazör: Çözülmüş gazları uzaklaştırır. Su 102 °C'ye ulaştığında içeriğindeki oksijen ve karbondioksit ayrılarak sudan ayrılır.



Şekil 14. Degazör sistemi

- Degazör ısıtma hattı: Revizyon sonrası degazör ısıtması için hazırlanmış boru ve enstrüman hattıdır.



Şekil 15. Revizyon sonrası degazör ısıtma hattı

Sistemde ölçüm noktaları sıcaklık (T), basınç (P) ve debi ($\dot{m}$) parametreleriyle tanımlanmış olup, her bir ekipmanın enerji ve ekserji kayıpları bu verilere dayanarak analiz edilmiştir.

3.1.2. Yakıt materyali

Çalışmada kullanılan biyokütle yakıtı, Tokat bölgesinde yoğun olarak yetiştirilen buğdayın hasat sonrası atıkları (sap ve anız) olup; bu atıklar santralin yakıt besleme sistemine uygun hale getirilerek kullanılmıştır. Biyokütle yakıtının termodinamik analizler için gerekli olan temel özellikleri (alt ısı değeri, nem içeriği, elementel bileşimi vb.) laboratuvar analizleri ile belirlenmiştir. Şekil 16'ta buğday atığı görüntüsü verilmiştir.



Şekil 16. Buğday atığı görüntüsü

Bu çalışmada kullanılan buğday atığı yakıtının termokimyasal özellikleri, akredite bir laboratuvar da ilgili uluslararası standartlara göre analiz edilmiştir. Yakıtın "Orijinal Değer (As Received)" bazında özellikleri Tablo 2'de verilmiştir.

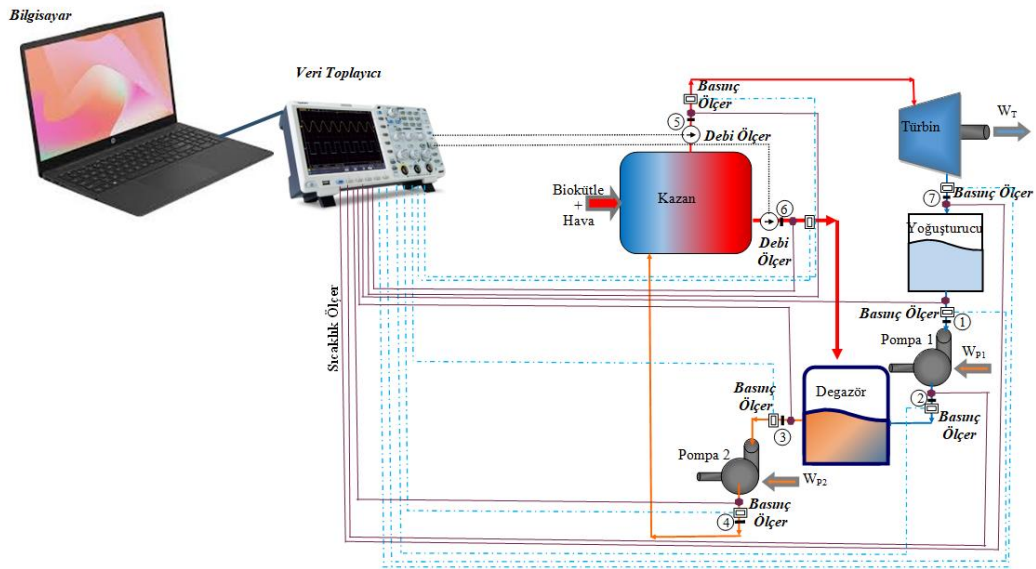
Tablo 2. Buğday atığı analiz değerleri

Numunenin Durumu State of Sample	Birim Unit	Havada Kuru Değer Air Dry	Kuru Değer Dry	Külsüz ve Rutubetsiz MAF Value	Orijinal Değer As Received	Deney Metodu Method of Test
* Toplam Rutubet / Total Moisture	%	-	-	-	10,76	TS EN ISO 18134-1
* Bünye Rutubeti / Inherent Moisture	%	4,70	-	-	-	TS EN ISO 18134-3
* Kül / Ash	%	9,10	9,55	-	8,52	TS EN ISO 18122
* Uçucu Madde / Volatile Matter	%	69,24	72,65	80,32	64,83	TS EN ISO 18123
* Üst Kalori Değeri / Gross Cal.Value	kcal/kg	3861	4051	4479	3615	TS EN ISO 18125
* Alt Kalori Değeri / Net Cal.Value	kcal/kg	3612	3790	4190	3323	TS EN ISO 18125
* Toplam Kükürt / Total Sulphur	%	0,11	0,12	-	0,11	TS EN ISO 16994 TS EN ISO 10304-1
H seyler	%	-	5,31	-	-	ISO 1928
Sabit Karbon / Fixed Carbon	%	16,96	17,80	-	15,88	ASTM D 3172

3.2. Deneysel Yöntem

Çalışma, santralin iki farklı operasyonel durumu altında gerçekleştirilen deneysel ölçümlere dayanmaktadır:

Revizyon Öncesi Durum (İlk Durum): Santralin orijinal tasarım ve işletme koşulları altında elde edilen verilerin bulunduğu sistemdir.



Şekil 17. Biyokütle enerji santralinde gerçek zamanlı revizyon öncesi enerji ve ekserji analizinde kullanılan ölçüm noktaları, ölçer yerleşimleri ve veri toplama sistemi akış diyagramı

Tablo 3. Ölçülen temel parametreler

Parametre	Sembol	Ölçüm Birimi	Ölçüm Noktaları
Sıcaklık	T	°C	Kazan çıkışı, türbin giriş/çıkışı, yoğuşturucu giriş/çıkışı, degazör
Basınç	P	Bar	Kazan çıkışı, türbin giriş/çıkışı, pompa giriş/çıkışı
Kütle Debisi	m	kg/s	Buhar ve su hatları (besleme suyu, buhar)
Elektrik Gücü	W	kW	Jeneratör çıkışı

3.2.2. Termodinamik analiz yöntemleri

Santralin performansını değerlendirmek amacıyla enerji ve ekserji analizleri uygulanmıştır. Analizler, çevrimin her bir bileşeni (kazan, türbin, yoğuşturucu, pompa vb.) için ayrı ayrı ve tüm sistem için genel olarak yapılmıştır.

Termodinamik değerlendirme kapsamında, sistemin performansını ortaya koymak amacıyla enerji ve ekserji analizleri gerçekleştirilmiştir. Bu analizler aracılığıyla sistemin enerji ve ekserji verimleri nicel olarak belirlenmiştir. Hesaplama sürecinin daha yönetilebilir hâle getirilmesi için analizler sırasında bazı varsayımlar yapılmıştır. Söz konusu varsayımlar mutlak verim değerlerinde sınırlı artışlara neden olabilmekle birlikte, sistem bileşenleri arasındaki bağıl karşılaştırmaları ve genel eğilimleri anlamlı düzeyde etkilememektedir. Analizlerde dikkate alınan varsayımlar aşağıda maddeler hâlinde sunulmuştur.

- Akışkanların termofiziksel özellikleri sabit olarak alınmıştır.
- Akışkanlar sürtünmesizdir pompa güçleri ihmal edilmiştir.
- Kazandan çevreye olan ısı kayıpları ihmal edilmiştir.
- Çevre sıcaklığı 25 °C olarak alınmıştır.
- Referans koşulları $T_0 = 25^\circ\text{C} = 298.15\text{ K}$, ve $P_0 = 101.325\text{ kPa}$ olarak alınmıştır.

3.2.2.1. Enerji Analizi

Enerji analizi, termodinamiğin birinci kanunu olan enerjinin korunumu ilkesine dayanır. Her bir kontrol hacmi (sistem bileşeni) için enerji dengesi denklemi aşağıdaki genel formda ifade edilir:

Sistemde bulunan elemanlar için enerji dengeleri ayrı ayrı denklem (1) gibi yazılmıştır.

$$\text{Giren Enerji} - \text{Çıkan Enerji} = \text{Enerji Değişimi} \quad (1)$$

Bu ifade revizyon öncesi türbin için;

$$\dot{W}_T = \dot{E}_5 - \dot{E}_7 \quad (2)$$

$\dot{E}_5$: Türbin girişindeki enerji akısı (kW),

$\dot{E}_7$: Türbin çıkışındaki enerji akısı (kW),

$\dot{W}_T$: Türbinin ürettiği güç (kW).

Denklem (2) düzenlenirse;

$$\dot{W}_T = \dot{m}_5(h_5 - h_7) \quad (3)$$

$\dot{m}_5$: Türbin girişindeki kütle debisi (kg/s),

h_5 : Türbin girişindeki özgül entalpi (kJ/kg),

h_7 : Türbin çıkışındaki özgül entalpi (kJ/kg).

Bu ifade revizyon sonrası türbin için;

$$\dot{W}_T = \dot{E}_5 - \dot{E}_8 - \dot{E}_7 \quad (4)$$

$\dot{E}_5$: Türbin girişindeki enerji akısı (kW),

$\dot{E}_7$: Türbin çıkışındaki enerji akısı (kW),

$\dot{E}_8$: Türbin ara çekişindeki enerji akısı (kW),

$\dot{W}_T$: Türbinin ürettiği güç (kW).

Denklem (4) düzenlenirse;

$$\dot{W}_T = (\dot{m}_5 h_5) - (\dot{m}_7 h_7) - (\dot{m}_8 h_8) \quad (5)$$

$\dot{m}_5$: Türbin girişindeki kütle debisi (kg/s),

h_5 : Türbin girişindeki özgül entalpi (kJ/kg),

h_7 : Türbin çıkışındaki özgül entalpi (kJ/kg).

h_8 : Degazör girişindeki özgül entalpi (kJ/kg).

Revizyon öncesi Kazan için;

$$\dot{Q}_K = \dot{E}_4 - (\dot{E}_5 + \dot{E}_6) \quad (6)$$

Denklem (6) düzenlenirse;

$$\dot{Q}_K = \dot{m}_4 (h_5 + h_6) - h_4 \quad (7)$$

$\dot{Q}_K$: Kazana verilen ısı (kW),

$\dot{m}_4$ Kazan besli suyunun kütle debisi (kg/s),

h_4, h_5, h_6 : İlgili noktalardaki özgül entalpi değerleri (kJ/kg).

Revizyon sonrası Kazan için;

$$\dot{Q}_K = \dot{E}_4 - \dot{E}_5 \quad (8)$$

Denklem (8) düzenlenirse;

$$\dot{Q}_K = \dot{m}_4 (h_5) - h_4 \quad (9)$$

$\dot{Q}_K$: Kazana verilen ısı (kW),

$\dot{m}_4$: Kazan besli suyunun kütle debisi (kg/s),

h_4, h_5 : İlgili noktalardaki özgül entalpi değerleri (kJ/kg).

Pompa 1 için;

$$\dot{W}_{P_1} = \dot{E}_1 - \dot{E}_2 \quad (10)$$

Denklem (10) düzenlenirse;

$$\dot{W}_{P_1} = \dot{m}_1 (h_2 - h_1) \quad (11)$$

$\dot{W}_{P_1}$ 1. pompanın tükettiği güç (kW),

$\dot{m}_1$: Pompa girişindeki kütle debisi (kg/s),

h_2, h_1 : Pompa giriş-çıkış özgül entalpi değerleri (kJ/kg).

Pompa 2 için;

$$\dot{E}_3 - \dot{E}_4 = \dot{W}_{P_2} \quad (12)$$

Denklem (12) düzenlenirse;

$$\dot{W}_{P_2} = \dot{m}_3(h_4 - h_3) \quad (13)$$

$\dot{W}_{P_2}$: 2. pompanın tükettiği güç (kW),

$\dot{m}_3$: Pompa girişindeki kütle debisi (kg/s),

h_4, h_3 : Pompa giriş-çıkış özgül entalpi değerleri (kJ/kg).

Yakıt enerjisi;

$$\dot{Q}_{yakıt} = \frac{\dot{Q}_K}{\eta_K} \quad , \quad \eta_K = 0.85 \quad (14)$$

3.2.2.2. Ekserji analizi

Biyokütle yakıtının kimyasal ekserjisi, Song vd. (2011) tarafından önerilen yöntemle hesaplanmıştır:

$$(e_{yakıt} = \phi \times \text{LHV}) \quad (15)$$

Burada $\phi = 1.05$ (ekserji faktörü) ve $\text{LHV} = 13.91 \text{ MJ/kg}$ 'dır.

Ekserji analizi, termodinamiğin ikinci yasasına dayanarak enerjinin kalitesini ve sistemdeki tersinmezlikler sonucu kaybolan iş yapabilme potansiyelini (ekserji yıkımı) inceler (Ozsari, 2023). Bir sistemdeki ekserji dengesi denklemi aşağıdaki genel formda ifade edilir:

En genel anlamda ekserji ifadesi denklem (16) gibi yazılabilir.

$$Ex = (h - h^0) - T^0 \times (s - s^0) \quad (16)$$

h : Sistem halindeki özgül entalpi (kJ/kg),

h^0 : Çevre (referans) halindeki özgül entalpi (kJ/kg),

s : Sistem halindeki özgül entropi (kJ/kg·K),

s^0 : Çevre halindeki özgül entropi (kJ/kg·K),

T^0 : Çevre sıcaklığı (K).

Genel anlamda ekserji dengesi denklem (17) gibi yazılabilir.

$$Giren\ Ekserji - Çıkan\ Ekserji - Ekserji\ Yokoluşu = Ekserji\ Değişimi \quad (17)$$

Bu ifade yoğuşturucu için denklem (18) ifadesi ile elde edilir.

$$e_7 - e_1 - e_D = \Delta e \quad (18)$$

e_7, e_1 : İlgili noktaların özgül ekserji değerleri (kJ/kg),

e_D : Yoğuşturucudaki ekserji kaybı (yok oluşu) (kJ/kg),

Δe : Ekserji değişimi (kJ/kg).

Yakıt enerjisi;

$$\dot{Q}_{yakıt} = \frac{\dot{Q}_K}{\eta_K}, \quad \eta_K = 0.85 \quad (19)$$

Türbin verimi;

$$\eta_T = \frac{\dot{W}_{gerçek}}{\dot{W}_T}, \quad \dot{W}_{gerçek} = 6500 \text{ kW} \quad (20)$$

Sistem verimi;

$$\eta = \frac{\dot{W}_{gerçek}}{\dot{Q}_{yakıt}} \quad (21)$$

3.2.3. Karşılaştırmalı analiz

Elde edilen deneysel veriler ve hesaplanan termodinamik parametreler, revizyon öncesi ve sonrası durumlar için karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir. Bu karşılaştırma, revizyonun sistemin genel termal ve ekserji verimi üzerindeki etkisini, ayrıca her bir bileşendeki enerji ve ekserji kayıplarını ne ölçüde azalttığını nicel olarak ortaya koymayı amaçlamaktadır.

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

4.1. Revizyon Öncesi Durumu Analiz Sonuçları

Cemak biyokütle enerji santralinin ekserji ve enerji analizi sistemin çalışma koşulları altında gerçekleştirilmiştir. Sistem elemanlarının giriş ve çıkış şartlarına göre gerekli termodinamik özellikler EES programı aracılığıyla elde edilmiştir. Şekil 17’de verilmiş olan şematik gösterimdeki numaralandırılmış noktalara ait termodinamik özellik verileri Tablo 4’te verilmiştir.

Tablo 4. Numaralandırılmış noktalara ait termodinamik özellik verileri

	T (°C)	P (kPa)	h (kJ/kg)	s (kJ/kgK)	Debi (kg/s)
1	55.7	16.33	233.50	0.7800	8.26
2	56.0	601.3	251.67	0.8310	8.26
3	99.0	231.3	308.09	0.9981	8.81
4	100.0	6401	423.90	1.3023	8.81
5	460.0	4600	3346.25	6.8976	8.81
6	263.0	5000	1149.91	2.9122	0.55
7	60.0	19.94	2608.84	7.9083	8.26

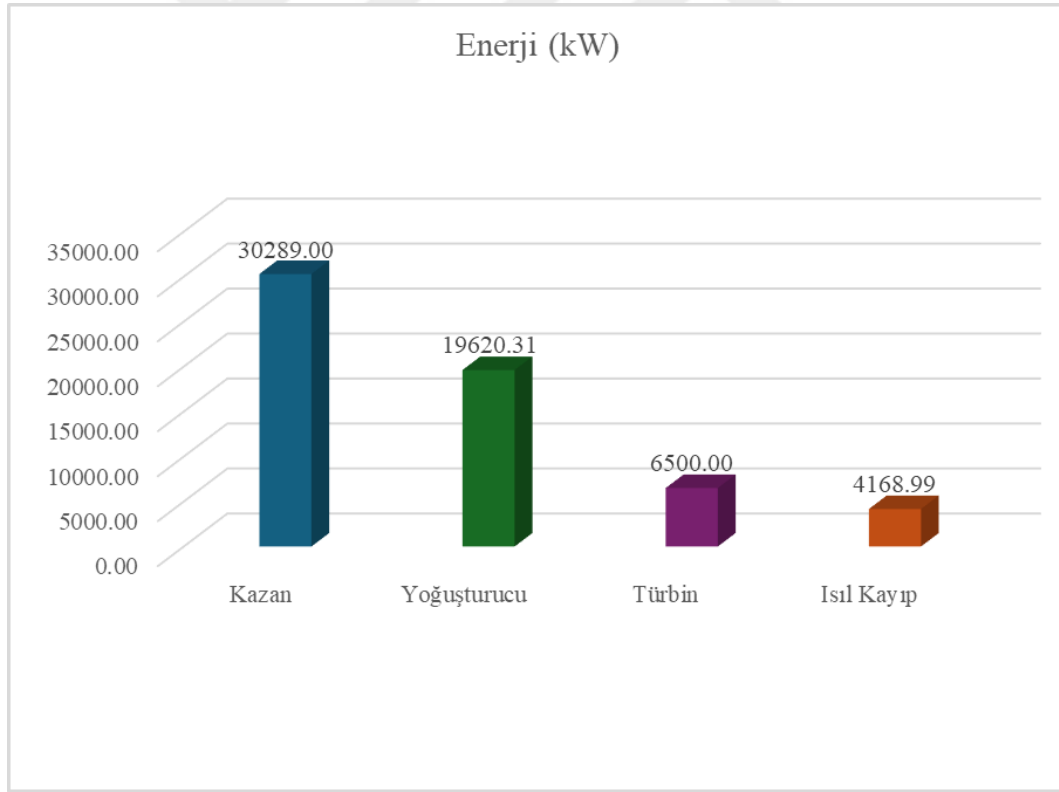
Santralin orijinal tasarım ve işletme koşulları altında elde edilen veriler ele alındığında aşağıdaki bulgular bulunmuştur. Revizyon öncesi durumunda, santralin termodinamik performansı Tablo 5’de özetlenmiştir.

Tablo 5. Santralin revizyon öncesi termodinamik performansı

Parametre	Değer	Birim
Net Güç Çıkışı ($\dot{W}_{Net}$)	6500	kW
Kazan Isı Girişi ($\dot{Q}_{yakıt}$)	30289.30	kW
Yoğusturucu Isı Atımı ($\dot{Q}_{atım}$)	19620.31	kW
Termal Verim (η_{th})	21.45	%
Ekserjetik Verim ($\eta_{ekserji}$)	20.43	%

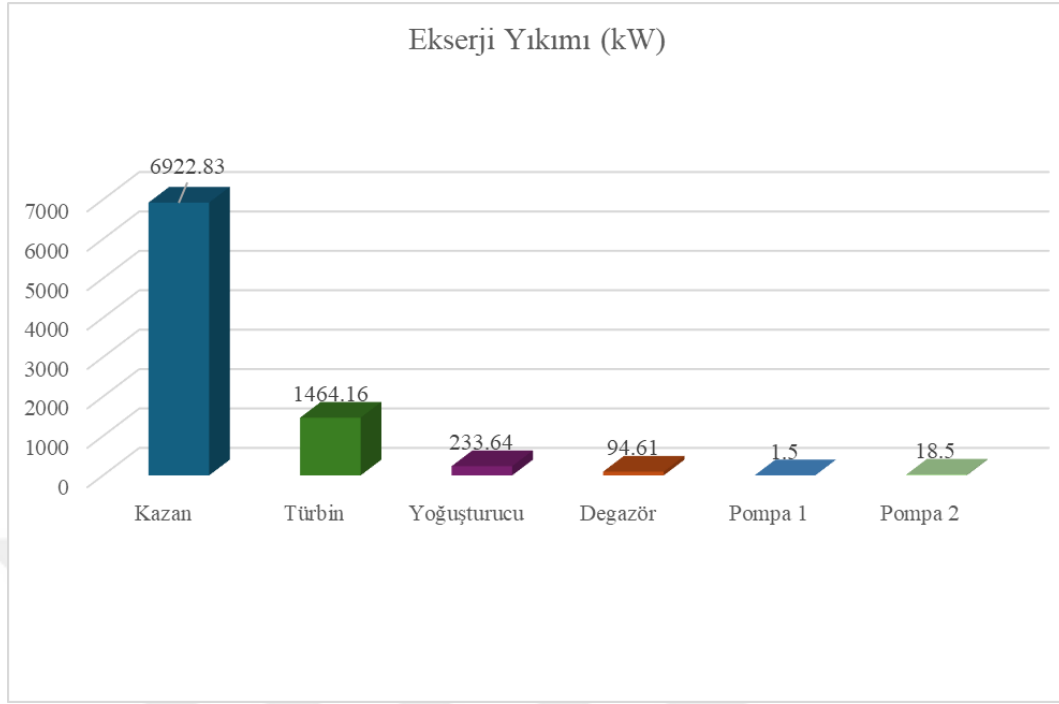
Kazan Ekserji Yıkımı (Ex_{kazan})	6922.83	kW
Türbin Ekserji Yıkımı ($Ex_{türbin}$)	1464.16	kW
Yoğuşturucu Ekserji Yıkımı ($Ex_{kondenser}$)	233.64	kW
Besi Pompaları Ekserji Yıkımı ($Ex_{pompalar}$)	20	kW
Yakıt Debisi	7.842	ton/h

İncelenen sistem konfigürasyonu için yapılan hesaplamalar sonucunda, çevrimin termal verimi %21,45, ekserjetik verimi ise %20,43 olarak belirlenmiştir. Ekserji analizi bulguları, toplam ekserji yıkımının baskın bölümünün 6922,83 kW değeri ile kazan ünitesinde gerçekleştiğini ortaya koymaktadır. Bu sonuç, kazanda gerçekleşen yüksek sıcaklık gradyanlarına bağlı tersinmezliklerin, sistemin genel ekserjetik performansını belirgin biçimde sınırlayan temel etkenlerden biri olduğunu göstermektedir.



Grafik 1. Santralin Revizyon Öncesi Enerji Dağılımı

Grafik 1’de sunulan sonuçlar, yakıt kaynaklı enerjinin tamamının net elektrik üretimine dönüştürülemediğini, önemli bir bölümünün ise yoğuşturucu üzerinden ve çeşitli termal kayıplar aracılığıyla çevreye yayıldığını açık biçimde ortaya koymaktadır.



Grafik 2. Santralin Revizyon Öncesi Ekserji Yıkım Dağılımı

Grafik 2’de, sistem bileşenlerine ait ekserji yıkımı dağılımı ayrıntılı olarak sunulmaktadır. Elde edilen sonuçlar, kazanın toplam ekserji yıkımı içerisinde en büyük paya sahip olduğunu ve bu nedenle sistemin ekserjetik açıdan en kritik bileşeni konumunda bulunduğunu doğrulamaktadır. Yoğuşturucu ünitesinde 233.64 kW düzeyinde ekserji yıkımı meydana gelmiş olup, bu değer aynı bileşendeki enerji kaybına kıyasla oldukça düşüktür. Bunun temel nedeni, ekserjinin yalnızca enerji miktarını değil, aynı zamanda enerjinin kullanım kalitesindeki azalmayı temsil etmesidir.

Pompa 1’de hesaplanan 1.50 kW’lık ekserji yıkımı, bu ekipmanın yüksek verimle çalıştığını göstermektedir. Pompa 2 için belirlenen 18.50 kW’lık ekserji yıkımı ise Pompa 1’e göre daha yüksek olmakla birlikte, toplam enerji tüketimi dikkate alındığında ihmal edilebilir seviyede olup pompanın verimli bir işletme performansına sahip olduğunu ortaya koymaktadır. Kazanda gerçekleşen 6922.83 kW’lık ekserji yıkımı, enerji kaybına oranla daha düşük bir kalite kaybına işaret etse de, kazanın sistemdeki en yoğun enerji dönüşüm süreçlerinin gerçekleştiği ana bileşen olması nedeniyle bu yıkım değeri sistem performansı açısından büyük önem taşımaktadır. Türbin ünitesinde ise 1464.16 kW ekserji yıkımı meydana gelmiştir.

4.2. Revizyon Sonrası Durumu Analiz Sonuçları

Cemak biyokütle enerji santraline ait enerji ve ekserji analizleri, sistem veriminin artırılmasına yönelik olarak kritik bileşenlerde gerçekleştirilen iyileştirmeler sonrasında elde edilen işletme verileri esas alınarak yapılmıştır. Sistem bileşenlerinin giriş ve çıkış koşullarına karşılık gelen termodinamik özellikler, EES yazılımı kullanılarak hesaplanmıştır. Şekil 18’de sunulan akış şemasında numaralandırılmış durum noktalarına ait termodinamik özellikler ise Tablo 6’da özetlenmiştir.

Tablo 6. Numaralandırılmış noktalara ait termodinamik özellik verileri

	T (°C)	P (kPa)	h (kJ/kg)	s (kJ/kg·K)	Debi (kg/s)
1	50.1	12.33	209.90	0.7055	7.51
2	50.4	601.3	230.80	0.7677	7.51
3	99.0	231.3	408.6	1.2770	8.06
4	100.0	6401	423.90	1.3020	8.06
5	460.0	4600	3340.00	6.8800	8.06
7	55	12.33	2594.80	8.1690	7.51
8	175	301.3	2830.60	6.8390	0.55

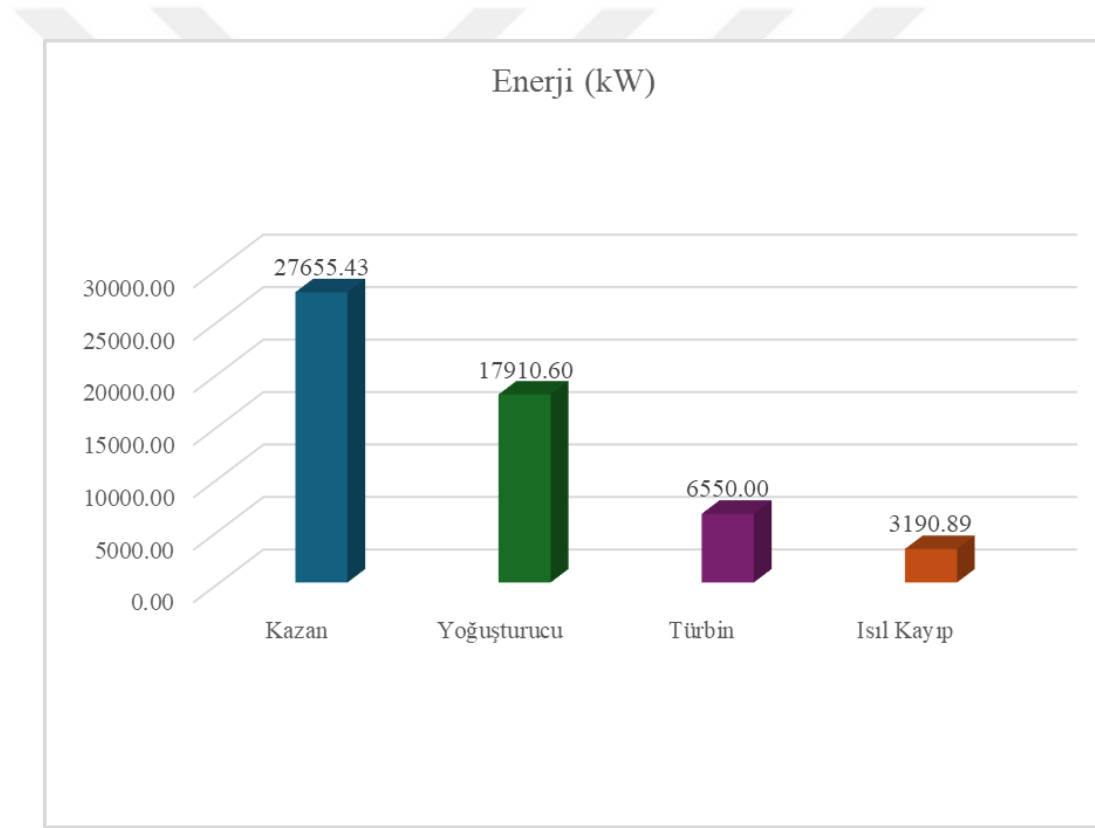
Revizyon sonrası durumunda, degazör ısıtması türbinden alınan buhar ekstraksiyonu ile sağlanmıştır. Bu konfigürasyonun temel amacı, kazan tamburundan alınan yüksek ekserjili buhar yerine, türbinin orta kademesinden alınan buharı kullanarak sistemin termodinamik verimini artırmaktır. Analiz sonuçları Tablo 7’de özetlenmiştir.

Tablo 7. Santralin revizyon sonrası termodinamik performansı

Parametre	Değer	Birim
Net Güç Çıkışı ($\dot{W}_{Net}$)	6550	kW
Kazan Isı Girişi ($\dot{Q}_{yakıt}$)	27655.43	kW
Yoğuşturucu Isı Atımı ($\dot{Q}_{atım}$)	17910.60	kW
Termal Verim (η_{th})	23.68	%
Ekserjetik Verim ($\eta_{ekserji}$)	22.56	%
Kazan Ekserji Yıkımı (Ex_{kazan})	6307.13	kW

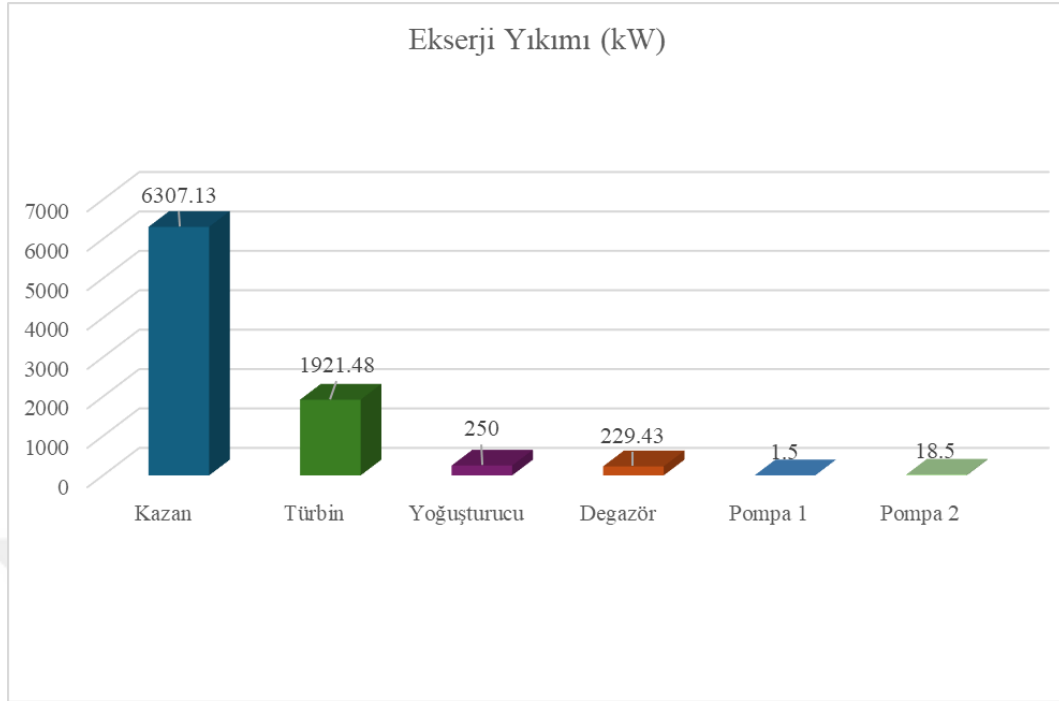
Türbin Ekserji Yıkımı ($Ex_{türbin}$)	1921.48	kW
Yoğuşturucu Ekserji Yıkımı ($Ex_{kondenser}$)	250	kW
Besi Pompaları Ekserji Yıkımı ($Ex_{pompalar}$)	20	kW
Yakıt Debisi	7.156	ton/h

Revizyon sonrası durumunda, Net Güç Çıkışı 6500 kW'tan 6550 kW'a yükselirken, yakıt enerjisi girişi 31632.90 kW'tan 27632.43 kW'a düşmüştür. Bu iyileşmeler sonucunda termal verim %21.45 seviyelerinden %23.68'e ve ekserjetik verim %20.43 seviyelerinden %22.56'ya yükselmiştir.



Grafik 3. Santralin Revizyon Sonrası Enerji Dağılımı

Grafik 3'te yer alan bulgular, yakıttan elde edilen enerjinin tamamının net elektrik üretimine aktarılamadığını, dikkate değer bir kısmının ise yoğuşturucu üzerinden ve çeşitli termal kayıp mekanizmaları aracılığıyla çevreye bırakıldığını net biçimde ortaya koymaktadır.



Grafik 4. Santralin Revizyon Sonrası Ekserji Yıkım Dağılımı

Grafik 4’te, sistem bileşenlerine ait ekserji yıkımının dağılımı sunulmaktadır. Sonuçlar, kazanın toplam ekserji yıkımı içerisinde en yüksek paya sahip olduğunu ve bu nedenle sistemin ekserjetik açıdan en kritik bileşeni olduğunu göstermektedir. Yoğuşturucu ünitesinde yaklaşık 250 kW seviyesinde ekserji yıkımı gerçekleşmiş olup, bu değer aynı bileşendeki enerji kaybına kıyasla oldukça düşüktür. Bunun temel nedeni, ekserji kavramının enerjinin yalnızca miktarını değil, aynı zamanda kullanılabilirlik düzeyindeki azalmayı ifade etmesidir.

Pompa 1’de hesaplanan 1.50 kW’lık ekserji yıkımı, söz konusu ekipmanın yüksek verimle çalıştığını ortaya koymaktadır. Pompa 2 için belirlenen 18.50 kW’lık ekserji yıkımı ise Pompa 1’e göre daha yüksek olmakla birlikte, toplam enerji tüketimi dikkate alındığında düşük seviyede kalmakta ve pompanın verimli bir işletme performansına sahip olduğunu göstermektedir. Kazanda meydana gelen 6307.13 kW’lık ekserji yıkımı, enerji kaybına göre daha sınırlı bir kalite kaybına işaret etse de, sistemdeki en yoğun enerji dönüşüm süreçlerinin bu bileşende gerçekleşmesi ve kazanın çevrimin temel elemanlarından biri olması nedeniyle bu yıkım değeri sistem performansı açısından önem

arz etmektedir. Türbin ünitesinde ise 1921.48 kW düzeyinde ekserji yıkımı hesaplanmıştır.

4.3. Revizyon Öncesi ve Revizyon Sonrası Durumlarının Karşılaştırılması

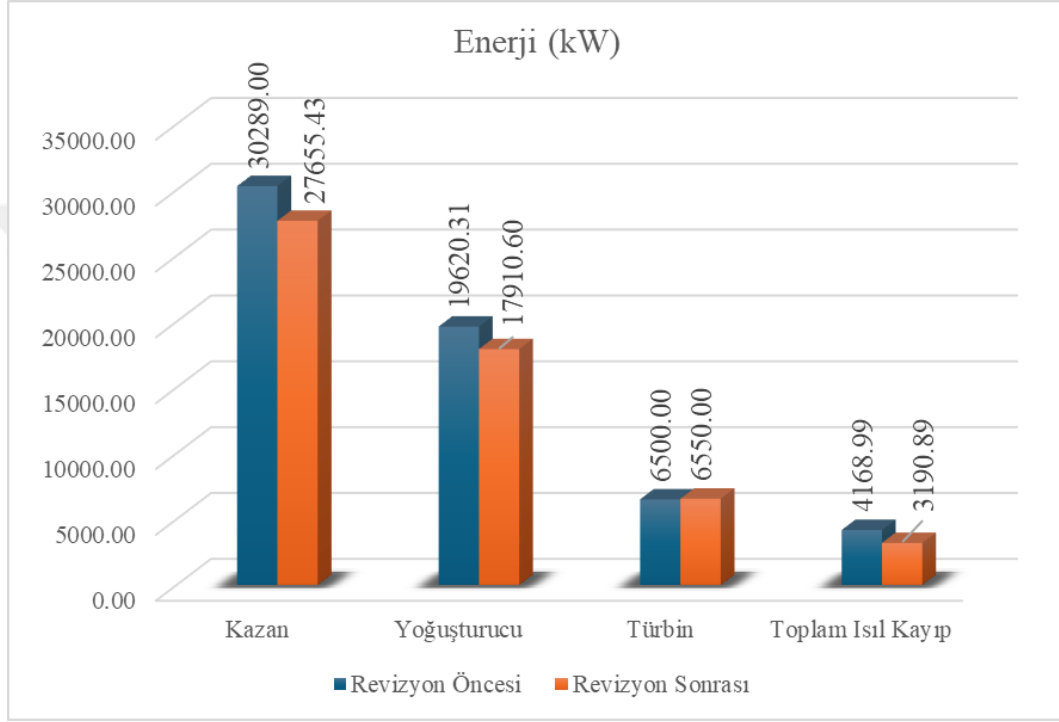
İki farklı operasyonel konfigürasyonun karşılaştırmalı olarak incelenmesi, gerçekleştirilen revizyonun santral performansı üzerindeki etkilerini açık biçimde ortaya koymaktadır. Elde edilen karşılaştırmalı değerlendirme sonuçları Tablo 8’de sunulmuştur.

Tablo 8. Karşılaştırmalı sonuçlar

Parametre	Revizyon Öncesi	Revizyon Sonrası	Birim
Net Güç Çıkışı ($\dot{W}_{net}$)	6500.00	6550.00	kW
Kazan Isı Girişi ($\dot{Q}_{yakıt}$)	30289.30	27655.43	kW
Yoğuşturucu Isı Atımı ($\dot{Q}_{atım}$)	19620.31	17910.60	kW
Termal Verim (η_{th})	21.45	23.68	%
Ekserji Girişi ($E_{yakıt}$)	17971.55	16406.46	kW
Ekserjetik Verim ($\eta_{ekserji}$)	20.43	22.56	%
Ekserji Yıkımları			
Kazan (Ex_{kazan})	6922.83	6307.13	kW
Türbin ($Ex_{türbin}$)	1464.16	1921.48	kW
Yoğuşturucu ($Ex_{kondenser}$)	233.64	250.00	kW
Pompa 2 ($Ex_{pompa 2}$)	18.50	18.50	kW
Pompa 1 ($Ex_{pompa 1}$)	1.50	1.50	kW

Analiz bulguları, revizyon sonrası işletme koşullarında sistemin, revizyon öncesi duruma kıyasla %8.75 oranında daha düşük yakıt enerjisi ihtiyacıyla çalıştığını göstermektedir.

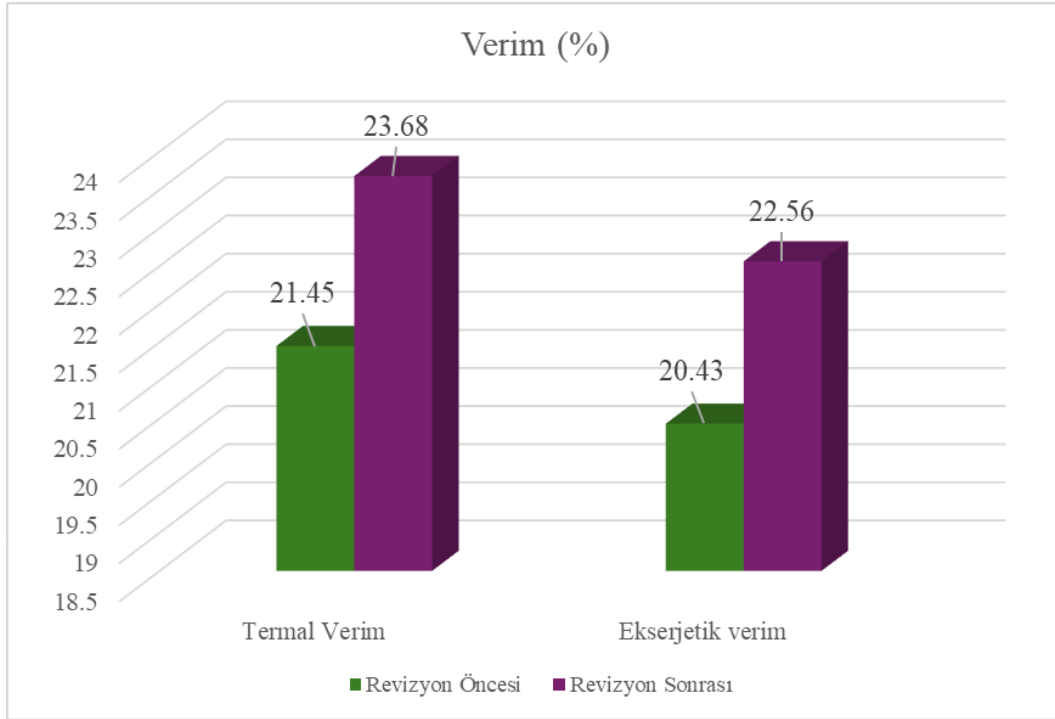
Bu teorik sonuç, işletme tarafından raporlanan yaklaşık %10 seviyesindeki yakıt tüketimi azalması gözlemi ile yüksek düzeyde uyum içerisindedir. Söz konusu iyileşmenin temel nedeni, degazör ısıtmasında kullanılan buharın besleme kaynağının değiştirilmesi sonucu kazana giren suyun sıcaklığının yükselmesi ve buna bağlı olarak kazanda sisteme ilave edilmesi gereken ısı yükünün azalmasıdır.



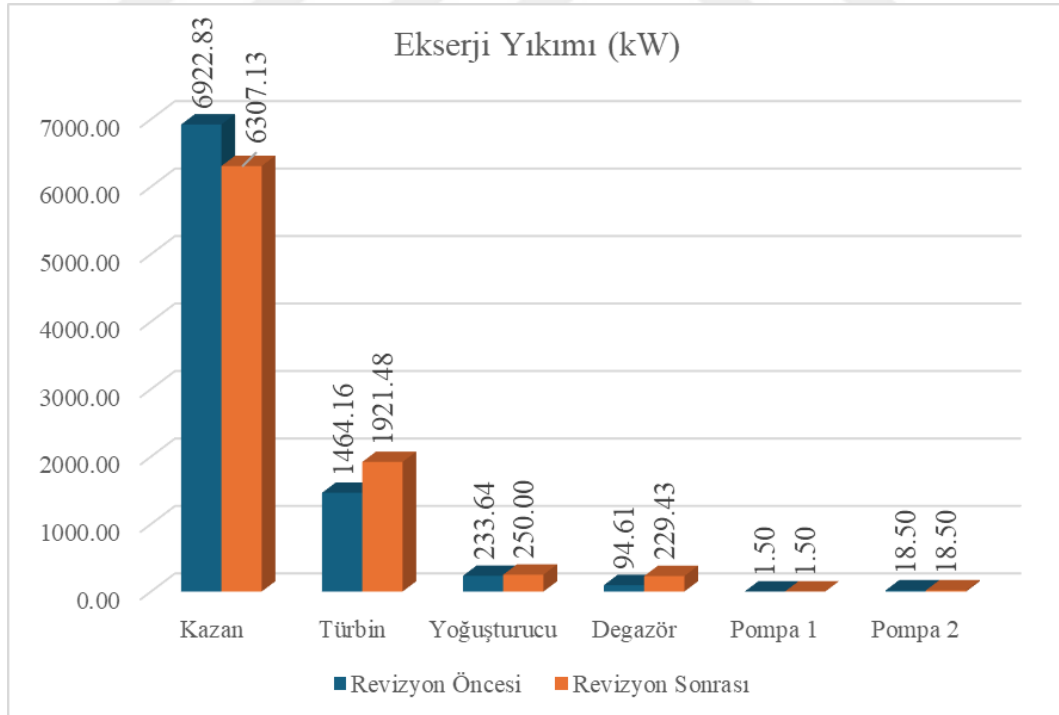
Grafik 5. Santralin Revizyon Öncesi ve Sonrası Enerji Akışı Karşılaştırması

Grafik 5, iki farklı işletme durumu arasındaki yakıt enerjisi girişindeki azalmayı görsel olarak ortaya koymaktadır. Revizyon sonrasında elde edilen %10.43'lük termal verim artışı ile %10.42'lik ekserjetik verim artışı, sistemin genel termodinamik performansında kayda değer bir iyileşme sağlandığını göstermektedir. Bu iyileşme, türbin ekstraksiyon buharı kullanılarak rejeneratif ısıtmanın çevrime dâhil edilmesiyle ilişkilidir. Rejeneratif ısıtma uygulaması, kazana giren besi suyunun sıcaklığını yükselterek ortalama ısı ekleme sıcaklığını artırmakta; bu durum ise çevrimin Carnot verimine daha fazla yaklaşmasına olanak tanıyarak genel çevrim verimini iyileştirmektedir.

Grafik 6'da, söz konusu termal ve ekserjetik verim artışları nicel olarak sunulmaktadır.



Grafik 6. Santralin Revizyon Öncesi ve Sonrası Verim Karşılaştırması



Grafik 7. Santralin Revizyon Öncesi ve Sonrası Bileşen Bazlı Ekserji Yıkım Karşılaştırması

Grafik 7’de, santralin temel bileşenlerine ait ekserji yıkımı değerleri revizyon öncesi (mavi) ve revizyon sonrası (turuncu) işletme koşulları için karşılaştırmalı olarak sunulmaktadır. Ekserji yıkımı, sistemde meydana gelen termodinamik tersinmezliklerin ve buna bağlı verimsizliklerin nicel bir göstergesi olarak değerlendirilmektedir.

Grafik incelendiğinde, her iki işletme durumunda da en yüksek ekserji yıkımının kazan ünitesinde gerçekleştiği görülmektedir. Bununla birlikte, gerçekleştirilen revizyon sonucunda kazandaki ekserji yıkımı 6922.83 kW seviyesinden 6307.13 kW düzeyine düşmüş ve bu durum kazan kaynaklı tersinmezliklerin azaltılması yönünde kayda değer bir iyileşme sağlandığını ortaya koymuştur.

4.4. Bulguların Literatürle Karşılaştırılması ve Değerlendirilmesi

Bu çalışmada hesaplanan enerji ve ekserji verimi değerlerinin, literatürde yer alan benzer biyokütle enerji santrali çalışmalarının sonuçlarıyla karşılaştırılması, elde edilen bulguların hem geçerliliğini hem de bilimsel katkısını ortaya koymak açısından önem arz etmektedir. Tablo 9’da bu çalışmaya ait sonuçlar ilgili literatür verileriyle karşılaştırmalı olarak sunulmuştur.

Tablo 9. Farklı Biyokütle Enerji Santrallerinin Verim Değerlerinin Karşılaştırılması

Çalışma	Yakıt Türü	Nem İçeriği (%)	Termal Verim (%)	Ekserjetik Verim (%)	Sistem Tipi
Bu Çalışma (Rev. Sonrası)	Buğday Atığı	~10	%23.68	%22.56	Rankine Çevrimi
Silva vd. (2016)	Orman Atıkları	%35	~26	~22	Rankine Çevrimi
Wijesekara vd. (2025)	Biyokütle	-	%47.45 - %56.07	-	Kojenerasyon (CHP)
Marito vd. (2024)	Biyokütle	-	%55.9	%19.26	Biyokütle Destekli Sistem

Termal Verim Analizi

Bu çalışmada revizyon sonrası elde edilen %23.68'lik termal verim, sadece elektrik üretimi yapan Rankine çevrimli biyokütle santralleri için literatürde rapor edilen genel aralıkla (%20-30) uyumludur. Örneğin, Silva vd. (2016) tarafından orman atıkları kullanan bir santral için rapor edilen ~%26'lık termal verim, bu çalışmanın sonucuna oldukça yakındır. Aradaki farkın, kullanılan yakıtların (buğday atığı vs. orman atığı) farklı ısı değerleri, nem içerikleri ve santralin işletme koşullarından kaynaklandığı düşünülmektedir. Kojenerasyon (CHP) sistemlerinin incelendiği Wijesekara vd. (2025) çalışmasında ise termal verimin %50'leri aşması, atık ısının da faydalı enerjiye dönüştürülmesinin getirdiği büyük avantajı göstermektedir.

Ekserjetik Verim Analizi

Bu çalışmanın en dikkat çekici bulgularından biri, revizyon sonrası elde edilen %22.56'lık ekserjetik verim değeridir. Bu değer, literatürdeki benzer Rankine çevrimli santraller için rapor edilen değerlerle (örn: Silva vd. için ~%22, Marito vd. (2024) için %19.26) yakındır. Bu durum, incelenen tesiste uygulanan revizyonun (degazör ısıtma yönteminin değiştirilmesi) sistemin termodinamik mükemmelliğini artırmada ne kadar başarılı olduğunu göstermektedir.

4.5. Kazandaki Yüksek Ekserji Yıkımının Analizi

Bu çalışmada, sistemdeki toplam ekserji yıkımının en büyük kısmının kazanda meydana geldiği tespit edilmiştir. Bu bulgu, biyokütle santralleri üzerine yapılan diğer termodinamik analizlerle tutarlıdır (Compton, 2017; Elwardany,2024).

Kazandaki yüksek tersinmezliklerin altında yatan temel nedenler, yanma sürecinin doğası ve biyokütle yakıtların karakteristik özellikleridir.

1.Yanma Sürecindeki Tersinmezlikler: Yanma, doğası gereği yüksek derecede tersinmez bir kimyasal reaksiyondur. Bu tersinmezliğin ana kaynakları şunlardır:

Kimyasal Reaksiyon: Yakıt ve oksitleyicinin hızla reaksiyona girerek denge durumundan uzak ürünler oluşturmaları, en büyük ekserji kaybı kaynağıdır (Dunbar, 1991).

Isı Transferi: Yanma odasındaki çok yüksek alev sıcaklığı (genellikle $>1200^{\circ}\text{C}$) ile kazanın su-buhar devreleri arasındaki büyük sıcaklık farkı, ısı transferi sırasında önemli ölçüde ekserji yıkımına neden olur.

Karışım Süreçleri: Yakıt, hava ve yanma ürünlerinin homojen olmayan karışımı da ek entropi üretimine yol açar.

2.Biyokütle Yakıtının Özellikleri: Buğday atığı gibi tarımsal atıkların yakıt olarak kullanılması, fosil yakıtlara kıyasla bazı zorluklar içerir:

Yüksek Nem İçeriği: Yakıttaki nemin buharlaşması için önemli miktarda enerji harcanır. Bu durum, yanma sıcaklığını düşürerek hem enerji hem de ekserji verimini olumsuz etkiler.

Heterojen Yapı ve Düşük Isıl Değer: Biyokütlenin homojen olmayan yapısı ve düşük enerji yoğunluğu, tam ve verimli bir yanmayı zorlaştırır, bu da daha fazla ekserji kaybına yol açar.

Bu çalışmada elde edilen sonuçlar, kazanın bir biyokütle enerji santralinin termodinamik performansını iyileştirmek için odaklanması gereken en kritik bileşen olduğunu bir kez daha doğrulamaktadır. Hava fazlalık katsayısının optimizasyonu, atık ısı geri kazanım sistemlerinin (ekonomizer, hava ön ısıtıcı) entegrasyonu ve yakıt ön işleme (kurutma, peletleme) gibi stratejiler, kazandaki ekserji yıkımını azaltmak için potansiyel iyileştirme alanları olarak öne çıkmaktadır.

4.6. Belirsizlik Analizi

Deneysel ölçümlerde kullanılan cihazların hassasiyetleri ve ölçüm belirsizlikleri, hesaplanan termodinamik parametrelerin güvenilirliğini doğrudan etkiler. Bu çalışmada, ölçüm belirsizliklerinin hesaplanan büyüklükler üzerindeki etkisi, Kline ve McClintock (1953) tarafından geliştirilen belirsizlik yayılımı yöntemi kullanılarak belirlenmiştir.

Bir R sonucunun, n adet bağımsız değişkenin ($x_1, x_2, \dots, x_n$) fonksiyonu olduğu durumda:

$$R = R(x_1, x_2, \dots, x_n)$$

R'nin belirsizliği (ΔR), her bir bağımsız değişkenin belirsizliği ($\Delta x_1, \Delta x_2, \dots, \Delta x_n$) cinsinden şu şekilde hesaplanır. Bu yöntem, her bir ölçüm parametresinin belirsizliğinin, hesaplanan sonuç üzerindeki etkisini belirlemek için kullanılır.

Çalışmada kullanılan ölçüm cihazlarının teknik özellikleri ve belirsizlikleri Tablo 10'da verilmiştir.

Tablo 10. Ölçüm Cihazları ve Belirsizlikleri

Ölçme Aleti	Ölçüm Sahası	Belirsizlik
Sıcaklık ölçer (K tipi)	0 ~ 600 °C	±0.5 °C
Basınç ölçer	0 ~ 100 Bar	±0.1 bar
Elektromanyetik debimetre	0 ~ 50 ton/h	±1%
Elektrik sayacı	0 ~ 10000 kW	±0.5%
Tartım sistemi	0 ~80 ton	±0.15%

Not: Belirsizlik değerleri, cihaz üreticilerinin teknik dokümanlarından alınmıştır ve %95 güven aralığını temsil etmektedir.

Belirsizlik analizi sonuçları, ölçüm ve hesaplama hatalarının kabul edilebilir sınırlar içinde olduğunu göstermektedir. Termal ve ekserjetik verimlerin belirsizlikleri (%0.11-0.12), bu parametrelerin güvenilir bir şekilde ölçüldüğünü ve hesaplandığını göstermektedir.

Bu sonuçlar, revizyonun etkisinin istatistiksel olarak anlamlı olduğunu ve ölçüm belirsizliklerinden kaynaklanmadığını kanıtlamaktadır. Genel olarak, fark/belirsizlik oranının 2’den büyük olması, sonuçların %95 güven düzeyinde anlamlı olduğunu gösterir (Ege, 2014).



5. SONUÇ VE ÖNERİLER

5.1. Sonuçlar

Elde edilen sonuçlar, biyokütle enerji santralinde degazör ısıtma yönteminin değiştirilmesinin, santralin hem enerji hem de ekserji bazında performansını önemli ölçüde iyileştirdiğini kanıtlamaktadır. Revizyon sonrasında, termal verim %21.45'ten %23.68'e, ekserjetik verim ise %20.43'ten %22.56'ya yükselmiştir. Bu, %8.75 yakıt tasarrufu ve %10.43 verim artışı anlamına gelmektedir. Türbin ekstraksiyonu ile yapılan rejeneratif ısıtma uygulaması, daha az yakıt tüketimiyle daha fazla net güç üretimine olanak tanımış, bu da santralin ekonomik ve çevresel sürdürülebilirliğine doğrudan katkı sağlamıştır. Bu analizler, santralin mevcut operasyonel verilerinin teorik termodinamik modellerle uyumlu olduğunu ve revizyonun beklenen faydaları sağladığını göstermektedir.

Bu yüksek lisans tez çalışmasında, buğday atığı kullanan bir biyokütle enerji santralinin revizyon öncesi ve sonrası durumları, enerji ve ekserji analizleri kullanılarak karşılaştırmalı olarak incelenmiştir.

Elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir:

1. Termodinamik Performans İyileşmesi: Degazör ısıtmasının kazandan türbin ekstraksiyonuna kaydırılmasıyla uygulanan revizyon, santralin genel termodinamik performansını önemli ölçüde artırmıştır.
2. Yakıt Tüketiminde Azalma: Revizyon sonrası durumu, revizyon öncesi durumuna göre %8.75 daha az yakıt enerjisi girişi gerektirmiştir. Bu teorik sonuç, santral operatörlerinin gözlemlediği yaklaşık %10'luk yakıt tasarrufu ile uyumludur.
3. Verim Artışı: Termal verim %21.45'ten %23.68'e, ekserjetik verim ise %20.43'ten %22.56'ya yükselmiştir. Bu, %10.36'lık bir artışa karşılık gelmektedir.

4. Ekserji Yıkımında İyileşme: Toplam ekserji yıkımı azalmıştır. Bu azalma, rejeneratif ısıtmanın döngüye entegrasyonu sayesinde sistemdeki tersinmezliklerin azaldığını göstermektedir.

5. Kritik Bileşen: Her iki durumda da en büyük ekserji yıkımı kaynağı kazan olarak belirlenmiştir. Bu durum, santralin gelecekteki iyileştirme çalışmalarının öncelikli olarak kazan verimine odaklanması gerektiğini göstermektedir.

Ekserji analizinde, yakıtın kimyasal ekserjisi Song vd. (2011) tarafından önerilen yöntemle, ekserji faktörü $\phi = 1.05$ kullanılarak hesaplanmıştır. Ekserjetik verimin termal verimden düşük olması, biyokütle yakıtının kimyasal ekserjisinin ısı değerinden yüksek olmasından kaynaklanmaktadır ve termodinamik olarak beklenen bir sonuçtur.

Sonuç olarak, bu çalışma biyokütle enerji santrallerinde sistem entegrasyonunun ve ısı geri kazanım stratejilerinin verim artışıdaki önemini ortaya koymaktadır.

5.2. Öneriler

Bu tez çalışmasının bulguları temel alınarak, biyokütle enerji santralinin performansını daha da ileriye taşımak ve gelecekteki araştırmalara rehberlik etmek amacıyla aşağıdaki öneriler sunulmuştur:

1.Kazan Verimine Odaklanma: En yüksek ekserji yıkımının kazanda gerçekleşmesi nedeniyle, kazan tasarımı veya işletmesinde (örneğin, hava fazlalık katsayısının optimizasyonu, atık ısı geri kazanım sistemlerinin entegrasyonu) yapılacak iyileştirmeler, santralin genel ekserjetik verimini önemli ölçüde artıracaktır.

2.Daha Fazla Rejeneratif Isıtma Kademesi: Mevcut tek kademeli rejeneratif ısıtma yerine, çok kademeli besleme suyu ısıtıcılarının (açık veya kapalı) sisteme dahil edilmesi, döngünün ortalama ısı ekleme sıcaklığını daha da yükselterek teorik termodinamik verimliliği artırma potansiyeline sahiptir.

3.Ekonomik Analiz: Termodinamik analizlere ek olarak, revizyonun yatırım maliyeti ile yakıt tasarrufundan elde edilen gelir arasındaki ilişkiyi inceleyen detaylı bir ekonomik (eksergoekonomik) analiz yapılması, revizyonun finansal fizibilitesini daha net ortaya koyacaktır.

4.Farklı Biyokütle Yakıtlarının İncelenmesi: Buğday atığı yerine veya buğday atığı ile karışım halinde kullanılabilecek diğer yerel biyokütle yakıtlarının (örneğin, ayçiçeği sapı, mısır koçanı) termodinamik ve çevresel etkilerinin incelenmesi, santralin yakıt esnekliğini ve sürdürülebilirliğini artıracaktır.



KAYNAKLAR

- Acaravcı, A., & Yıldız, T. (2018). Türkiye'nin enerji bağımlılığı. *Uluslararası Ekonomi ve Yenilik Dergisi*, 4(1), 37-54.
- Açıklım, S. (2010). Biyokütle Enerjisi. *Türkiye Enerji Bülteni*, 15(2), 45-60.
- Açıklım, K. (2010). Çeşitli Biyokütle Atık Maddelerin Pirolizi ve Elde Edilen Ürünlerin Analizi, Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2010.
- Alayont, Ş. (2019). Biyokütle Uygulanan Ön İşlemlerin Piroliz Ürünleri Üzerine Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, Aksaray Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Aksaray, 2019.
- Ayyıldız, L. M. (2014). Hızlı Piroliz Yöntemi ile Biyokütleden Elde Edilen Sıvı Ürünlerin Kimyasal Ekserjilerinin Hesaplanması, Yüksek Lisans Tezi, K.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, 2014.
- Ayyıldız, L. M. (2022). Biyokütle Kaynaklarının Kimyasal Ekserji Değerlerinin Hesaplanması, Doktora Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon
- Basu, P. (2010). Biomass gasification and pyrolysis: practical design and theory. Academic press.
- Baykan, A. (2011). Düşey Boru Fırında Biyokütlenin Termal Davranışlarının İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, İ.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2011.
- Bayrakçeken, H. B. (2019). Doğal Gazlı Kombine Çevrimli Bir Santralin Ekserji Analizi ile İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Bülent Ecevit Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Zonguldak, 2019.
- Bayramoğlu, T. (2013). Biyokütle Enerjisi ve Yerel Ekonomik Kalkınma: TRA1 Bölgesi'nde (Erzurum-Erzincan-Bayburt) Biyokütle Potansiyeli ve Ekonomik Etkileri Üzerine Bir Saha Araştırması, Doktora Tezi, Atatürk Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, Erzurum, 2013.
- Bergman, P. C. A., Boersma, A. R., Zwart, R. W. R., & Kiel, J. H. A. (2005). Torrefaction for biomass co-firing in existing coal-fired power stations. Energy Research Centre of the Netherlands (ECN), ECN-C--05-013.
- Biyotek Biyokütle Enerji Üretim A.Ş. (2018). Biyotek Biyokütle Enerji Santrali (BES) Proje Tanıtım Dosyası, Adana, Haziran 2018.
- Braimakis, K., & Karellas, S. (2020). Energy-exergy analysis of ultra-supercritical biomass power plants. *Energy Conversion and Management*, 212, 112790. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.112790>
- Brennan, L., & Owende, P. (2010). Biofuels from microalgae—A review of technologies for production, processing, and extractions. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(2), 557–577. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2009.10.009>
- Bridgwater, A. V. (2012). Review of fast pyrolysis of biomass and product upgrading. *Biomass and Bioenergy*, 38, 68–94. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2011.01.048>
- Burulday, M., E. (2019). Biyokütle Kaynaklı Sentez Gazından Hidrojen Üretiminin ve Entegre Bir Güç Üretim Sisteminin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Yalova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yalova, 2019.
- Chattopadhyay, S., & Ghosh, S. (2018). Combined energetic and exergetic assessment of a biomass-based integrated power and refrigeration plant. *Journal of the Brazilian*

- Society of Mechanical Sciences and Engineering, 40(10), 453.
<https://doi.org/10.1007/s40430-018-1372-8>
- Compton, M., & Rezaie, B. (2017). Sustainability Enhancement of a Biomass Boiler through Exergy Analysis. In Proceedings (Vol. 2, No. 4, p. 159). MDPI.
- Çepelioğullar, Ö. (2011). Farklı Biyokütle-Plastik Atık Karışımlarının Termogravimetrik Analiz Yöntemi İle Birlikte Pirolozi ve Elde Edilen Ürünlerin Karakterizasyonu, Yüksek Lisans Tezi, Anadolu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir, 2011.
- Çepelioğulları, A. (2011). Biyokütle Enerji Kaynakları ve Türkiye Potansiyeli. Yenilenebilir Enerji Dergisi, 5(1), 10-25.
- Çöp, Ö., H. (2018). Lignoselülozik Biyokütlenin İnorganik Bileşenlerinin Uzaklaştırılmasının Kül Özellikleri Üzerine Etkisinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, İ.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2018.
- Demirbas, A. (2009). Biofuels securing the planet's future energy needs. Energy Conversion and Management, 50(9), 2239–2249.
<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2009.05.010>
- Demirbas, A. (2010). Use of algae as biofuel sources. Energy Conversion and Management, 51(12), 2738–2749.
<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2010.06.010>
- De Meulenaere, R., Van den Broeck, M., & Van der Veken, P. (2021). Energetic and Exergetic Performances of a Retrofitted, Large-Scale Biomass-Fired CHP Coupled to a Steam-Explosion Biomass Upgrading Plant. Energies, 14(22), 7720.
<https://doi.org/10.3390/en14227720>
- Dunbar, W. R., & Lior, N. (1991). Understanding Combustion Irreversibility. AES-Vol. 25/HTD-Vol. 191, Second Law Analysis- Industrial and Environmental Applications, ASME.
- Donar, E. (2013). Termokimyasal Dönüşüm Yöntemlerinin Karşılaştırmalı Verimlilik Analizi. Mühendislik ve Doğa Bilimleri Dergisi, 10(3), 150-165.
- Donar, Y., O. (2013). Hidrotermal Yöntemle Sentezlenen Nano Metal Oksitlerin Model Biyokütle Olarak Selüloz Pirolozindeki Katalitik Etkisinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Ankara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2013.
- Ediger, V. Ş., & Berk, I. (2011). Crude oil import policy of Turkey: Historical analysis of determinants and implications since 1968. Energy Policy, 39(4), 2132-2142.
- Ege, A. (2014). Ölçme Tekniği ve Belirsizlik Analizi. Ankara: Nobel Yayınevi.
- Elinç, N. (2019). Kayseri Belediyesi Molu Çöp Toplama Tesisinde Çöp Gazından Elektrik Üreten Tesisin Enerji ve Ekserji Analizleri, Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ, 2019.
- Elwardany, M. (2024). Enhancing steam boiler efficiency through comprehensive energy and exergy analysis: A review. Process Safety and Environmental Protection, 184, 1222-1250.
- Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı. (2025). Türkiye elektrik kurulu gücü istatistikleri.
<https://enerji.gov.tr/bilgi-merkezi-enerji-elektrik>, Erişim tarihi: 01.12.2025
- Ercan, B. (2019). Organik Rankine Çevrimli Biyokütle Tesisinin Enerji ve Ekserji Analizi. Isı Bilimi ve Tekniği Dergisi, 39(2), 1-12.
- Ertaş, M. (2010). Bazı Artık Biyokütlelerin Yavaş Pirolozi ve Piroloz Ürünlerinin Karakterizasyonu, Doktora Tezi, Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kahramanmaraş, 2010.

- Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2017). The future of food and agriculture – Trends and challenges. FAO. <https://www.fao.org/3/i6583e/i6583e.pdf>, Erişim tarihi: 01.12.2025
- Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2018). Bioenergy and food security. FAO. <https://www.fao.org/energy/bioenergy/en/>, Erişim tarihi: 01.12.2025
- Gümülügil, E., A. (2016). Taş Kömürü ve Biyokütlenin Katalitik Birlikte Piroлиз, Yüksek Lisans Tezi, Anadolu Üniversitesi Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir, 2016.
- IMARC Group. (2024). Biomass power generation market: Global industry trends, share, size, growth forecast 2024–2029. <https://www.imarcgroup.com/biomass-power-generation-market>, Erişim tarihi: 01.12.2025
- Intergovernmental Panel on Climate Change. (2023). Climate change 2023: Synthesis report. <https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/>, Erişim tarihi: 01.12.2025
- International Energy Agency. (2016). World energy outlook 2016. OECD Publishing. <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2016>, Erişim tarihi: 01.12.2025
- International Energy Agency. (2018). Energy efficiency 2018: Analysis and outlooks to 2040. OECD Publishing. <https://www.iea.org/reports/energy-efficiency-2018>, Erişim tarihi: 01.12.2025
- International Energy Agency. (2019). Renewables 2019: Market analysis and forecast. OECD Publishing. <https://www.iea.org/reports/renewables-2019>, Erişim tarihi: 01.12.2025
- International Energy Agency. (2020). Renewable power generation costs in 2019. OECD Publishing. <https://www.iea.org/reports/renewable-power-generation-costs-in-2019>, Erişim tarihi: 01.12.2025
- International Energy Agency. (2022). World energy outlook 2022. OECD Publishing. <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2022>, Erişim tarihi: 01.12.2025
- International Energy Agency. (2023). Renewables 2023: Analysis and forecast to 2028. OECD Publishing. <https://www.iea.org/reports/renewables-2023>, Erişim tarihi: 01.12.2025
- International Renewable Energy Agency. (2019). Innovation landscape brief: Dispatchable renewable power. <https://www.irena.org/publications/2019/Feb/Innovation-landscape-brief-Dispatchable-renewable-power>, Erişim tarihi: 01.12.2025
- International Renewable Energy Agency. (2024). Renewable capacity statistics 2024. <https://www.irena.org/Publications/2024/Mar/Renewable-Capacity-Statistics-2024>, Erişim tarihi: 01.12.2025
- Işıkdag, M., A. (2007). Değişik Biyokütle Kaynaklarından Piroлиз Yöntemiyle Sentetik Yakıt Eldesi ve Elde Edilen Ürünlerin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Anadolu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir, 2007.
- Işıtan, F. (2016). Piroлиз ve Gazlaştırmanın Enerji Dönüşüm Potansiyeli Üzerine Deneysel Bir Çalışma. Enerji Teknolojileri Dergisi, 12(4), 200-215.
- Işıtan, S. (2016). Endüstriyel Biyokütle Atıklarının Piroлиз ve Ürünlerin Karakterizasyonu, Yüksek Lisans Tezi, Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Samsun, 2016.

- Kanmaz, G. (2011). Biyokütlenin Katalitik Pirolizi, Yüksek Lisans Tezi, Anadolu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir, 2011.
- Kar, T. (2018). Doğu Karadeniz Bölgesindeki Bazı Atık Biyokütle Karışımlarının Katalizörsüz ve Katalizörlü Pirolizi ve Sıvı Ürünlerin Karakterizasyonu, Doktora Tezi, K.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, 2018.
- Kermani, A. A., & Dincer, I. (2024). Design and energy, exergy, and exergoeconomic analyses of a novel integrated system for power and hydrogen production using biomass. *Energy*, 286, 129590. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.129590>
- Kline, S. J., & McClintock, F. A. (1953). Describing uncertainties in single-sample experiments. *Mechanical Engineering*, 75(1), 3-8.
- Kurtaran, A. (2019). İsdemir Kuvvet Santrali Enerji ve Ekserji Analizi, Yüksek Lisans Tezi, Batman Üniversitesi, Fen Bilimleri Üniversitesi, Batman, 2019.
- Küçük, İ. (2019). Farklı Biyokütlelerden Karbondioksit Kullanılarak Karbon Moleküler Elek Özelliğinde Aktif Karbon Üretimi ve Uygulamaları, Doktora Tezi, İnönü Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Malatya, 2019.
- Küçük, M. (2019). Biyokütle Yakıtlarının Termodinamik Özellikleri ve Enerji Santrallerindeki Kullanımı. *Termodinamik Araştırmalar Dergisi*, 25(1), 70-85.
- Lebendig, F., Mollenhauer, S., & Zobel, M. (2022). Investigations on the Effect of Pre-Treatment of Wheat Straw on Ash-Related Challenges during Chemical Looping Gasification. *Energies*, 15(9), 3422. <https://doi.org/10.3390/en15093422>
- Marito, M.V., Wibowo, A.S., Yuliansyah, A.T., Cahyono, R.B., (2024) Energy and exergy analysis of the impact of biomass moisture content on performance of an integrated pulp and paper mill – Power plant, AIP Publishing, <https://doi.org/10.1063/5.0235720>
- Mata, T. M., Martins, A. A., & Caetano, N. S. (2010). Microalgae for biodiesel production and other applications: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(1), 217–232. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2009.07.020>
- McKendry, P. (2002). Energy production from biomass (Part 1): Overview of biomass. *Bioresource Technology*, 83(1), 37–46. [https://doi.org/10.1016/S0960-8524\(01\)00118-3](https://doi.org/10.1016/S0960-8524(01)00118-3)
- Mishamandani, A. S., & Dincer, I. (2025). Energetic, Exergetic, Economic and Environmental (4E) analysis of an agricultural waste-to-energy integrated multigeneration thermal power plant. *Energy*, 320, 129876. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2024.129876>
- NASA. (2022). Climate change: Evidence. <https://climate.nasa.gov/evidence/>, Erişim tarihi: 01.12.2025
- Organisation for Economic Co-operation and Development. (2021). Carbon pricing and energy policy. OECD Publishing. <https://www.oecd.org/climate-change/carbon-pricing/>, Erişim tarihi: 01.12.2025
- Ozsari, I. (2023). Historical research trends and overview about exergy: a comprehensive analysis. *International Journal of Exergy*, 42(1), 1-20. <https://doi.org/10.1504/IJEX.2023.128522>
- Özdemir, E. (2019). Elazığ İli Atıksu Tesisi Enerji ve Ekserji Potansiyelinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimler Enstitüsü, Elazığ, 2019.
- Özyurt, İ. (2006). Biyokütle Atık Madde Olarak Ayçiçeği Çekirdeği Kabuklarının Sıvılaştırılması ve Elde Edilen Ürünlerin Analizi, Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul, 2006.

- Rosen, M. A. (2021). Exergy analysis. In *Thermodynamics and performance optimization of renewable energy systems* (pp. 115-145). Elsevier.
- Shafiee, S., & Topal, E. (2009). When will fossil fuel reserves be diminished? *Energy Policy*, 37(1), 181-189.
- Song, G., Shen, L., & Xiao, J. (2011). Estimating Specific Chemical Exergy of Biomass from Basic Analysis Data. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 50(16), 9758–9766. <https://doi.org/10.1021/ie200534n>
- Silva, J., Teixeira, S. F., Preziati, S., & Teixeira, J. C. (2016). Energy and Exergy Analysis of a Biomass Power Plant. *Proceedings of the ASME 2016 International Mechanical Engineering Congress and Exposition, Volume 6B: Energy*. ASME.
- Speight, J. G. (2013). *The chemistry and technology of coal* (3rd ed.). CRC Press.
- Şeker, D. (2022). Biyokütle–Jeotermal Hibrit Sistemlerin Enerji, Ekserji ve Çevresel Analizi. *Termal Bilimler ve Teknoloji Dergisi*, 45(3), 88-105.
- Tanger, P., Field, J. L., Jahn, C. E., & DeFoort, M. W. (2013). Biomass for thermochemical conversion: targets and challenges. *Frontiers in Plant Science*, 4, 218. <https://doi.org/10.3390/fpls.2013.00218>
- Torres, E., & Dincer, I. (2020). 4-E (environmental, economic, energetic and exergetic) analysis of a bio-waste slow pyrolysis process. *Energy Conversion and Management*, 224, 113370. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.113370>
- United Nations Environment Programme. (2021). *Waste-to-energy: Considerations for informed decision-making*. <https://www.unep.org/resources/report/waste-energy>
- United Nations Environment Programme. (2023). *Emissions gap report 2023*. <https://www.unep.org/resources/emissions-gap-report-2023>, Erişim tarihi: 01.12.2025
- U.S. Energy Information Administration. (2023). *Coal explained: History and use of coal*. <https://www.eia.gov/energyexplained/coal/history-and-uses-of-coal.php>
- U.S. Energy Information Administration. (2023). *International energy statistics: Coal reserves*. <https://www.eia.gov/international/data/world/coal-and-coke/reserves>, Erişim tarihi: 01.12.2025
- Wijesekara, D., Amarasinghe, P., Induranga, A., Vithanage, V., Koswattage, K. R. (2025). Energy, Exergy, and Environmental Impact Analysis and Optimization of Coal–Biomass Combustion Combined Cycle CHP Systems. *Sustainability*, 17(6), 2363.
- World Coal Association. (2022). *What is coal* <https://www.worldcoal.org/coal/what-coal>
- Yazıcı, H. (2011). BİR BUHARLI GÜÇ SANTRALİNİN ENERJİ ve EKSERJİ ANALİZİ. *Selçuk Üniversitesi Mühendislik, Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 26(1), 1-12.
- Yen, H. W., & Brune, D. E. (2007). Anaerobic co-digestion of algal sludge and waste paper to produce methane. *Bioresource Technology*, 98(1), 130–134. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2005.11.010>
- Yergin, D. (2011). *The quest: Energy, security, and the remaking of the modern world*. Penguin Press.
- Yeşilkaya, B. (2017). Niğde İlinde Tarla Bitkileri Üretiminden Kaynaklanan Biyokütle Enerji Potansiyelinin Belirlenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Niğde, 2017.
- Yılmaz, C. (2019). HCCI Bir Motor İçin Ekserji Analizi, Yüksek Lisans Tezi, Şeyh Edebalı Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Bilecik, 2019.