

Bir Biyokütle Enerji Santralinde Ön Isıtma İyileştirmesinin Sistem Üzerindeki Enerjetik ve Ekserjetik Performanslara Etkisinin Deneysel Olarak İncelenmesi

Araştırma Makalesi
10.65520/erciyesfen.1845189


Künye:

Sayı: 42(1)

Yıl: 2026

Sayfa: 239-257

 Buket TURGUT^{a*}

 Abdullah YAMAN^b

^a Dr. Öğr. Üyesi, Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi, buket.turgut@gop.edu.tr

^b Enerji Sistemleri Mühendisi, Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi, 60abdullahyaman@gmail.com

* Sorumlu Yazar

Geliş Tarihi: 19.12.2025

Kabul Tarihi: 09.02.2026

Atıf:

Buket TURGUT, Abdullah YAMAN, (2026). Bir Biyokütle Enerji Santralinde Ön Isıtma İyileştirmesinin Sistem Üzerindeki Enerjetik ve Ekserjetik Performanslara Etkisinin Deneysel Olarak İncelenmesi . *Erciyes University Journal of Institute Of Science and Technology*, 42(1), 239-257.

<https://doi.org/10.65520/erciyesfen.1845189>

Screened by

 iThenticate[®]
for Authors & Researchers



Except where otherwise noted, content in this article is licensed under a Creative Commons 4.0 International license. Icons by Font Awesome.

Öz

Dünya genelinde 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 çalışma, Tokat ilinde kurulu olan buğday atığı(sapı) yakıtlı bir biyokütle enerji santralinin termodinamik performansını, iki farklı işletme koşulu altında deneysel verilerle incelemektedir. İlk durumda ön ısıtma kazan çıkışından alınan doymuş buhar ile yapılmıştır, iyileştirme sonrasında ön ısıtma türbin ekstraksiyonundan gerçekleştirilmiştir. Çalışmanın temel amacı, santralde uygulanan iyileştirmenin sistem verimi üzerindeki etkisini enerji ve ekserji analizleri ile karşılaştırmalı olarak ortaya koymaktır. İyileştirme öncesi durumda, yakıt debisi 7.842 t/s olup, termal verim %21.45 ve ekserjetik verim %20.43 olarak hesaplanmıştır. Ekserjetik verimin termal verimden düşük olması termodinamik olarak beklenen bir sonuçtur. İyileştirme sonrasında, yakıt debisi 7.156 t/s 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.

Anahtar kelimeler: Biyokütle, Biyokütle santrali, Enerji analizi, Ekserji analizi, Rankine çevrimi



Experimental Investigation of the Effect of Preheating Improvement in a Biomass Power Plant on the Energetic and Exergetic Performance of the System

Abstract

A significant portion of the world's energy needs is still met by fossil fuels such as oil, coal, and natural gas. However, the limited nature of these resources and the damage they cause to the environment have accelerated the shift towards renewable energy sources. This study experimentally examines the thermodynamic performance of a wheat waste(stalk) fueled biomass power plant located in Tokat province under two different operating conditions. In the first case, preheating was performed from boiler output by saturated steam, while after the improvement, preheating was performed in the turbine extraction. The main objective of the study is to reveal the effect of the improvement applied in the plant on system efficiency through comparative energy and exergy analyses. Before the improvement, the fuel flow rate was 7,842 t/h, and the thermal efficiency was calculated as 21.45% and the exergy efficiency as 20.43%. The fact that the exergy efficiency is lower than the thermal efficiency is a thermodynamically expected result.

After the improvement, the fuel flow rate decreased to 7,156 t/h, while the net power output increased from 6,500 kW to 6,550 kW. Thermal efficiency increased from 21.45% to 23.68%, while exergy efficiency increased from 20.43% to 22.56%. Fuel consumption decreased by 8.75%.

Keywords: Biomass, Biomass power plant, Energy analysis, Exergy analysis, Rankine cycle



1.Giriş

Rankine çevrimi, enerji dönüşüm süreçlerindeki merkezi konumuyla, buğday samanı gibi tarımsal atıkların değerlendirilmesi için bir platform sunarak yenilenebilir enerji gelişimine olanak tanır. Dünya çapında yıllık yaklaşık 529 milyon tonluk üretimiyle buğday samanı, bu bağlamda dikkate değer bir biyokütle potansiyeli sergilemektedir [1]. Bu tarımsal atığın, Rankine çevriminin kalbi olan buhar üretiminde kullanılması için yanma gibi termokimyasal prosesler verimli bir yol olarak öne çıkmaktadır. Araştırmalar, buğday samanının diğer biyokütle atıklarına oranla düşük nem oranı ve yüksek alt ısıl değeri gibi avantajlı niteliklere sahip olduğunu ve bu özelliklerin onu biyokütle enerjisi üretimi için çekici bir hammadde yaptığını doğrulamıştır [2]. Genel olarak biyokütle, buğday kabukları da dahil olmak üzere, yanma işlemiyle ısıya dönüştürülebilir ve bu ısı, Rankine çevrimini harekete geçiren türbinlerde mekanik enerjiye çevrilir [3]. Ek olarak, buğday samanının Rankine çevrimi ile bütünleşik kullanımı, yalnızca enerji arzına katkıda bulunmakla kalmaz, aynı zamanda fosil yakıtlara olan ihtiyacı azaltıp tarımsal atık sorununu hafifleterek çevresel sürdürülebilirliği de destekler [4]. Dolayısıyla bu entegrasyon, karbon salınımını azaltma ve yenilenebilir enerji kullanımını artırma yönündeki küresel çabalarla örtüşen, daha verimli ve sürdürülebilir enerji sistemlerinin kurulmasına katkıda bulunur [5].

Literatürdeki çalışmalar, termik enerji üretiminde geleneksel olarak kullanılan Rankine çevriminin, yenilenebilir bir kaynak olan biyokütlenin sisteme entegre edilmesiyle optimize edilebileceğini göstermektedir. Bu doğrultuda, biyokütle ile yapılandırılmış Rankine çevrimleri üzerine yapılan ekserji analizleri, enerji verimliliği ve sürdürülebilirlik açısından önemli bulgular sunmuştur. Biyokütle ile beslenen Rankine çevrimlerinin performansını farklı konfigürasyonlar altında değerlendirmek için ekserji analizi temel bir yaklaşım olarak kabul edilmektedir. Bu bağlamda; Gonca [6], tek ve çift yeniden ısıtmalı Rankine çevrimlerinin ekserji performansını incelemiş ve bu sistemlerdeki önemli termodinamik verimsizliklere dikkat çekmiştir. Bu tür bir analiz, genel ekserji verimliliğini artırmak amacıyla çevrim konfigürasyonlarının optimize edilmesinin ne kadar önemli olduğunu ortaya koymaktadır. Aynı şekilde, biyokütle entegre gazlaştırma kombine çevrimlerini konu alan çalışmalar da termodinamik performansı iyileştirme potansiyelini göstermektedir [7]. Bu entegrasyon, biyokütlenin termal özelliklerinden daha verimli bir şekilde yararlanılmasına olanak tanıyarak geleneksel metodolojilere kıyasla daha yüksek ekserji verimliliği vaat etmektedir.

Ekserji analizinin uygulama alanları da literatürde geniş yer bulmaktadır. Rosen ve Dincer, farklı ölü hal koşulları tanımlayarak kömür yakıtlı bir güç santraline hem enerji hem de ekserji analizi uygulamış ve sonuçları hem sistem bütününde hem de bileşen bazında değerlendirmişlerdir [8]. Termodinamik analizin maliyetle ilişkisini inceleyen Tsatsaronis ve Park ise, bir kojenerasyon sisteminde önlenemez ve önlenemez ekserji kayıplarının etkisini araştırmıştır [9]. Yaptıkları çalışmada, önlenemez ekserji tüketiminin azaltılması sayesinde yatırım maliyetlerinin düşürülebileceğini ve bu tüketimin azaltılabileceği kısımların belirlenmesinin önemini belirtmişlerdir. Bu yaklaşımı daha da ileri taşıyan Kwak ve arkadaşları, 500 MW'lık bir kombine çevrim santralinin ekserji ve termoeconomik analizi üzerine bir çalışma yapmışlardır [10]. Santralin tüm elemanları için enerji ve kütle korunumu kanunlarını uygulayan araştırmacılar, geliştirdikleri bir bilgisayar programı aracılığıyla sisteme ait üretim maliyetlerini ve termodinamik performansı incelemişlerdir. Daha temel bir düzeyde ise Kaya, basit bir Rankine buhar çevrimi üzerine çalışmıştır [11]. Bu çalışmada, çevrimin verimli çalışmasını etkileyen faktörler göz önünde bulundurularak bir ekserji analizi yapılmış ve bu yolla sistemin ekserji verimliliği saptanmaya çalışılmıştır. Ayrıca, kapalı ve adyabatik olarak varsayılan sistemin termal ve ekserjetik verimleri karşılaştırılarak, net güç çıkışını belirleyen temel parametreler ortaya konmuştur.

Literatürde Rankine çevriminin termik santrallerde uygulamasına ek olarak biyokütle bazlı sistemlerin, özellikle Organik Rankine Çevrimlerinin (ORÇ) termodinamik performansı konusunda da birçok çalışma mevcuttur. Örneğin, Çetinkaya ve diğerleri tarafından yapılan bir çalışma, geleneksel Rankine döngüsünün %23,91 enerji verimliliği sağlayabildiğini, ORÇ varyantının ise ekserji verimliliğini %68,87 civarına önemli ölçüde yükselttiğini göstermiştir [12]. Bu dikkat çekici fark, ORÇ'lerin düşük kaliteli biyokütle girdisini yararlı işe dönüştürmek için özellikle uygun olduğunu göstermektedir. Ayrıca, parametrik çalışmalar, yanma sıcaklıklarının yükseltilmesinin sistem verimliliğini doğrusal olarak artırabileceğini ve bunun biyokütle yanma koşullarını optimize etmek için çok önemli olduğunu göstermektedir [12]. Rankine çevrimlerinde enerji üretimi için biyokütlenin kullanılması, yenilikçi tasarımlarla ele alınan bazı zorluklar ortaya çıkarmaktadır. Preibinger ve ark. biyokütle ile çalışan mikro kojenerasyon uygulamaları için özel olarak tasarlanmış çift aşamalı bir ORÇ sistemini değerlendirmiş ve termal verimliliği artırmak için çalışma sıvılarının ve basınç seviyelerinin seçimini çok önemli olarak vurgulamıştır [13]. Bu çalışma, operasyonel parametrelerin dikkatli bir şekilde optimize edilmesinin, biyokütle uygulamalarını ekonomik olarak uygulanabilir hale getirmek için kritik öneme sahip olan önemli performans artışlarına yol açabileceğini göstermektedir. Biyokütleden enerji üretimini iyileştirmenin yanı sıra, ORÇ sistemleri çevresel ayak izini azaltmadaki rolleri açısından da araştırılmıştır. Oyekale ve Cau'nun güneş-biyokütle hibrit sistemleri üzerine yaptıkları araştırma, biyokütlenin diğer yenilenebilir enerji kaynaklarıyla entegre edilmesinin, yenilenebilir kaynakların doğasında bulunan değişkenlik ve güvenilirlik sorunlarını çözebileceğini ortaya koymuş ve sürdürülebilir enerji çerçevelerinde ORÇ'lerin kullanımını destekleyen argümanları güçlendirmiştir [14]. Ayrıca, çalışma akışkanı seçimindeki gelişmelerin biyokütle ile çalışan ORÇ'lerin verimliliğini büyük ölçüde etkilediği gösterilmiştir. Moharamian ve arkadaşlarının araştırması, HFE700 ve izopentan gibi akışkanların seçilmesinin enerji çıkışı ve verimlilik ölçütlerini önemli ölçüde artırabileceğini ortaya koymuştur. Bu, biyokütle enerji dönüşüm süreçleri ile sistem çıktıları arasındaki etkileşimleri optimize etmek için gereklidir [15]. Rankine çevrimi ekserji analizleri ve enerji verimliliği çalışmalarına ek olarak literatürde Biyokütle gazlaştırma ile Rankine çevrimlerinin, özellikle Organik Rankine Çevrimi (ORÇ) ve varyasyonlarının entegrasyonu, sürdürülebilir enerji dönüşümü ve verimlilik iyileştirmeleri açısından önemini vurgulamaktadır.

Biyokütle bazlı sistemlerin termodinamik performansı, bu yenilenebilir kaynaklardan elde edilen enerji çıkışını artırmada çok önemlidir. Çetinkaya ve ark. [12], biyokütle entegre enerji sistemlerinin, gazlaştırma ve Rankine çevrimlerinin bir kombinasyonunu kullanarak zeytin kabuğu gibi hammaddeleri elektrik ve termal enerjiye verimli bir şekilde dönüştürebildiğini göstermektedir. Gazlaştırma işlemi, bir gaz türbinini besleyen sentetik gaz üretir ve Rankine çevrimini çalıştıran yüksek sıcaklıkta egzoz gazı üretir, böylece genel enerji verimliliğini artırır. Bu, Ren ve ark. [16] ile uyumludur. Ren ve ark., buhar Rankine çevrimi (SRC) ve Organik Rankine Çevrimi (ORÇ) gibi sistemlerin entegre edilmesinin atık ısıyı geri kazanabileceğini ve bunun da biyokütle gazlaştırma süreçlerinde enerji verimliliğini artırabileceğini belirtmektedir.

Bu çevrimlerin verimliliğini inceleyen çeşitli çalışmalar, düşük ila orta dereceli ısı kaynaklarının kullanılmasının etkinliğini ortaya koymaktadır. ORÇ teknolojisi, düşük sıcaklıklarda bile biyokütle yanmasından elde edilen termal enerjiyi elektrik enerjisine dönüştürme kabiliyetiyle tanınmaktadır [17]. Udo ve ark. [3], ORÇ'nin düşük kaynama noktalı organik sıvıları sayesinde çeşitli termal koşullarda verimli çalışma imkanı sağladığından biyokütle uygulamaları için çok uygun olduğunu belirtmektedir. Performans analizi, hibrit sistemler gibi alternatiflerin araştırılmasıyla daha da zenginleştirilmiştir. Mutlu ve ark. [18], süperkritik CO₂ ve buhar Rankine çevrimlerini birleştiren kademeli bir yaklaşımı vurgulamaktadır. Bu konfigürasyon, geleneksel kurulumlara kıyasla potansiyel olarak daha yüksek termal verimlilik sunabilir ve biyokütle kullanımının optimizasyonunda yenilikçi sistem tasarımlarının rolünü güçlendirebilir. Benzer şekilde, Hosseinpour ve ark. [19], ORÇ'yi biyokütle gazlaştırma ile birleştiren bir kojenerasyon çevrimini tanıtarak, performansı ve sürdürülebilirliği iyileştirmek için birden fazla enerji dönüşüm ilkesini aynı anda kullanabilen entegre tasarımları savunmaktadır. Ekonomik faktörler de bu enerji sistemlerinin uygulanmasında hayati bir rol oynamaktadır. Rentizelas ve ark. Rentizelas ve ark. [20], ORÇ'de çalışma akışkanının ve çalışma parametrelerinin seçimini biyokütle enerji sistemlerinin sermaye ve işletme giderlerini önemli ölçüde etkilediğini vurgulamaktadır. Bu döngülerin ekserji-ekonomik analizi üzerine yapılan

çalışmalar, biyokütle enerji operasyonlarının ekonomik uygulanabilirliği için hayati önem taşıyan verimli çalışma akışkanlarının seçimi ve çalışma koşullarının optimizasyonu hakkında bilgi vermektedir [21].

Silva ve diğerleri [22] Portekizde orman atıklarından elde edilen biyokütleyi kullanarak enerji üretimi yapan tesiste enerji dönüşümü için analiz gerçekleştirmişlerdir. Tesis farklı yük koşulları altında çalıştırmışlardır. Termal verimin yaklaşık %26 olarak belirtmişlerdir. Ayrıca, tesisin ikinci yasa analizini gerçekleştirerek ekserji kaybının hesaplanmasını sağlamışlardır. Yanma odasının genel verimlilik kaybına en büyük katkıyı sağlayan unsur olduğu bildirmişlerdir. Ekserji verimliliğinin yaklaşık %22 olduğunu vurgulamışlardır. Wijesekara ve diğerleri [23] biyokütle kullanan kombine ısı ve güç çevrimlerinde enerji verimliliğini artırmak ve emisyonları düşürmek için çalışma yapmışlardır. Yaptıkları çalışmada biyokütle nem içeriğinin artmasının baca gazı enerjisini artırdığını ve Rankine çevrimi performansını iyileştirdiğini vurgulamışlardır. Marito ve diğerleri [24] kağıt fabrikası atıklarından elde edilen yüksek nem içeriğine sahip 6 farklı biyokütle (kömür, ağaç kabuğu, palmye kabuğu, kahverengi lif ve atık çamur) kullanarak enerji üretmek için ortak yakma sistemi kullanmışlardır. Yaptıkları çalışmada enerji santralının mevcut gerçek performansını incelemek ve atık çamurun nem içeriğini %60, %50, %40, %30, %20 ve %10 oranlarında azaltarak elde edilebilecek iyileşmeyi görmeyi amaçlamışlardır. Analize göre, enerji santralının mevcut toplam enerji ve ekserji verimliliğinin %55,9 ve %19,26 olduğunu bulmuşlardır. Yaptıkları çalışmada atık çamurun nem içeriği %60'tan %10'a düşürülerek toplam ekserji verimliliği %1 artırılmıştır.

Sonuç olarak literatür, biyokütle entegreli Rankine çevrimlerinin verimliliğini artırmada ekserji analizinin merkezi bir rol oynadığını açıkça ortaya koymaktadır. Çift aşamalı sistemler gibi gelişmiş konfigürasyonların ve yenilikçi çalışma akışkanlarının tercih edilmesi gibi operasyonel stratejilerin benimsenmesiyle, biyokütle dönüşüm süreçlerinin hem enerji çıktısı hem de ekserji verimliliği kayda değer ölçüde iyileştirilebilir. Ayrıca, gazlaştırma ve kojenerasyon sistemlerinin entegrasyonu, sürdürülebilirlik hedeflerine hizmet ederken aynı zamanda termodinamik verimliliği ve ekonomik fizibiliteyi de artırmaktadır. Araştırmalar ilerledikçe, çevrim konfigürasyonları ve operasyonel stratejilerdeki sürekli iyileştirmeler, yenilenebilir enerji portföyünün kritik bir unsuru olarak biyokütlenin gelişimini desteklemeye devam edecektir. Bu nedenle, biyokütlenin bir yenilenebilir enerji kaynağı olarak tam potansiyelini ortaya çıkarmak için bu araştırma alanlarının sürekli olarak incelenmesi büyük önem taşımaktadır.

Rankine çevriminde ön ısıtma; verim artışı sağlayabilmek için kullanılan klasik ve iyi bilinen bir yaklaşımdır. Ancak literatürde bu konuda yapılan çalışmaların büyük çoğunluğu teorik modelleme, simülasyon ve laboratuvar ölçeğindeki deneysel çalışmalardan oluşmaktadır. Gerçek santral ölçeğinde, fiilen uygulanmış iyileştirmelerin performans etkilerini inceleyen saha verilerine dayalı çalışmalar oldukça sınırlıdır. Bu çalışma, bu literatür boşluğunu doldurmayı amaçlamaktadır. Bu çalışmanın temel hedefi, buğday atığı yakıtlı bir biyokütle enerji santralının operasyonel performansını enerji ve ekserji analizleri aracılığıyla değerlendirmek ve ön ısıtma sistemi iyileştirmesi yoluyla sistem verimliliğini artırmaktır. Çalışma, endüstriyel ölçekli bir biyokütle enerji santralinde yürütülmüş, yakıt olarak Türkiye'nin en yaygın tarımsal atıklarından biri olan buğday sapı kullanılmıştır. Ön ısıtma sisteminde yapılan iyileştirme öncesi ve sonrası dönemlerde deneysel saha verileri elde edilmiş, önerilen iyileştirme santral işletmesinde fiilen uygulanmış ve performans artışı gerçek işletme koşullarında doğrulanmıştır. Yapılan çalışma büyük kapasiteli gerçek bir santralin enerji ve ekserji analizini içerdiği için literatüre katkı sağlayacaktır. Bu araştırma, hem yerel bir biyokütle kaynağı olan buğday atığının enerji potansiyelini değerlendirmesi hem de gerçek bir tesisin iyileştirme 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. Materyal ve Metot

2.1. Deneysel Düzenek

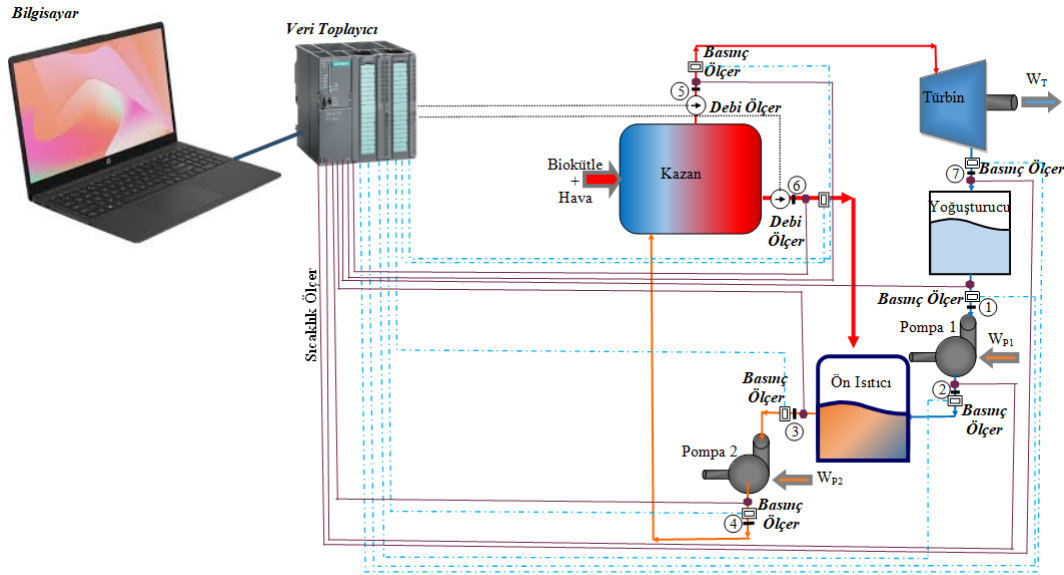
Bu araştırma, Tokat'ın Merkez ilçesinde faaliyet gösteren CEMAK Biyokütle Enerji Santrali'nde gerçekleştirilmiştir. Şekil 1'de resmi görülen bu tesiste, ormansal ve tarımsal atıklar ile arıtma çamuru

gibi çeşitli biyokütle kaynakları bertaraf edilerek elektrik enerjisi üretilmektedir. Yapmış olduğumuz çalışmada tesiste buğday atığı(sap) yakılarak enerji üretimi gerçekleştirilmiştir. Yakılan buğday atığına ait özellik verileri Tablo 1' de verilmiştir.

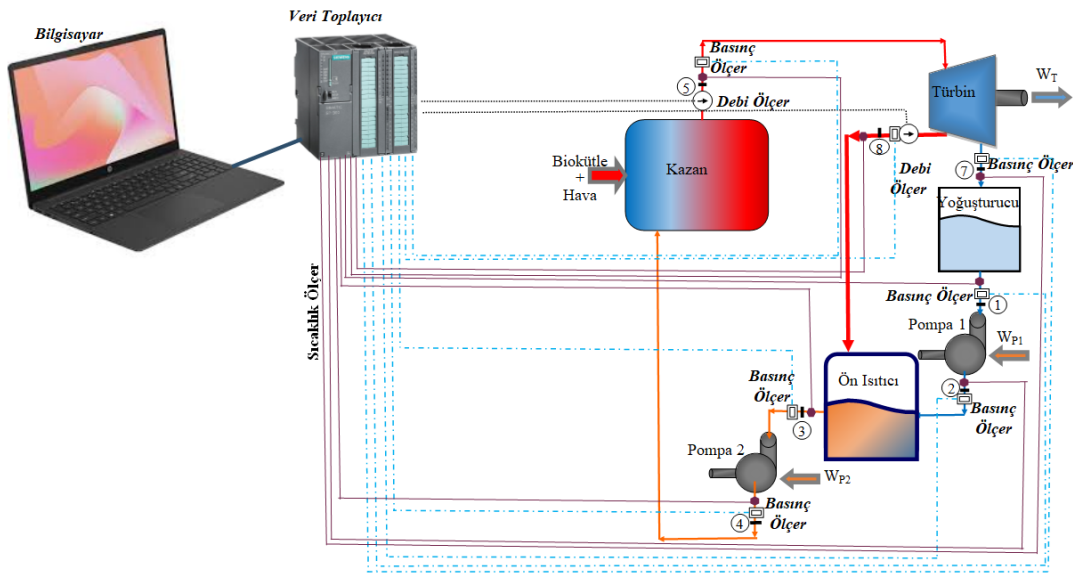


Şekil 1. CEMAK biyokütle enerji santrali

Bu çalışmada, bir biyokütle enerji santralindeki Rankine çevriminin enerji ve ekserji analizi gerçekleştirilmiştir. Sistemin iyileştirme öncesi ve sonrası durumlarını gösteren şematik diyagramlar sırasıyla Şekil 2 ve Şekil 3'te sunulmuştur. Deney düzeneği; ileri itimli ızgara tipindeki bir biyokütle kazanı, bir impuls tipi türbin, yoğuşturucu, ön ısıtıcı, pompalar ve çeşitli ölçüm sensörleri (sıcaklık, basınç, debi) gibi temel bileşenlerden meydana gelmektedir. 40-50 bar basınç ve 425-475 °C sıcaklık aralığında %85 verimle çalışan kazan tarafından üretilen buhar, 450 °C sıcaklık ve 46 bar basınçla türbine girmekte ve 0.09 bar basınçla çıkarak 6500 kW elektrik enerjisi üretmektedir. İyileştirme öncesi sistemde ön ısıtma işlemi kazandan alınan buharla yapılırken, iyileştirme sonrasında bu işlem için türbinden alınan buhar kullanılmış ve sistem tamamen kapalı bir çevrime dönüştürülmüştür. - Çalışmada kullanılan biyokütle yakıtı, Tokat bölgesinde yoğun olarak yetiştirilen buğdayın hasat sonrası atıkları (sap) olup; bu atıklar santralin yakıt besleme sistemine uygun hale getirilerek kullanılmıştır. Biyokütle yakıtının termodinamik analizler için gerekli olan temel özellikleri (alt ısıl değeri, nem içeriği, elementel bileşimi vb.) laboratuvar analizleri ile belirlenmiş olup Tablo 1' de verilmiştir.



Şekil 2. Santralin şematik gösterimi iyileştirme öncesi



Şekil 3. Santralin şematik gösterimi iyileştirme sonrası

Tablo 1. Buğday sapının özellikleri

Numunenin Durumu	Birim	Değer	Deney Metodu
Toplam Rutubet	%	10.76	TS EN ISO 18134-1
Bünye Rutubeti	%	-	TS EN ISO 18134-3
Kül	%	8.52	TS EN ISO 18122
Uçucu madde	%	64.83	TS EN ISO 18123
Üst ısıl değer	kcal/kg	3615	TS EN ISO 18125
Alt ısıl değer	kcal/kg	3323	TS EN ISO 18125
Toplam kükürt	%	0.11	TS EN ISO 16994
Sabit Karbon	%	15.88	TS EN ISO 10304-1 ASTM D 3172

Termodinamik analizler için gereken temel parametreler, çevrimin kritik noktalarına yerleştirilmiş yüksek hassasiyetli sensörler kullanılarak ölçülmüş ve tüm bu deneysel veriler, santralin Sürekli İzleme ve Veri Toplama Sistemi (SCADA) aracılığıyla toplanmıştır.

2.2. Termodinamik Analizler

Bu çalışma kapsamında sistemin termodinamik performansı, enerji ve ekserji analizleri yapılarak değerlendirilmiştir. Bu analizlerin temel amacı, sistemin hem enerji hem de ekserji verimliliklerini tespit etmektir. Hesaplama sürecindeki karmaşıklığı basitleştirmek amacıyla termodinamik analizler sırasında bir dizi varsayımda bulunulmuştur. Bu kabullerin, verimlilik değerlerini bir miktar artırıcı etkisi olsa da, sistemin bağıl performans değişimini anlamlı düzeyde değiştirmedeği öngörülmektedir. Analizlerde temel alınan varsayımlar aşağıda listelenmiştir.

- Termofiziksel akışkan özellikleri analiz boyunca sabit kabul edilmiştir.
- Sürtünme etkileri ve dolayısıyla pompa güçleri ihmal edilmiştir.
- Çevre koşulları için sıcaklık değeri 25 °C olarak alınmıştır.

Enerji Analizi

Her bir kontrol hacmi (sistem bileşeni) için enerji dengesi denklemi aşağıdaki genel formda ifade edilir. Sistemdeki her bir bileşen için enerji denge denklemleri, Denklem (1)'de gösterildiği formda ayrı ayrı oluşturulmuştur.

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

Bu ifade iyileştirme 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 değeri (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 değeri (kJ/kg),

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

Bu ifade iyileştirme 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 değeri (kJ/kg),

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

h_8 : Ön ısıtma girişindeki özgül entalpi değeri (kJ/kg).

İyileştirme 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 besleme suyunun kütle debisi (kg/s),

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

İyileştirme 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 besleme 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;

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

Ekserji Analizi

Bu çalışmada ekserjetik verim, net elektrik gücünün biyokütle yakıtının kimyasal ekserjisine oranı olarak tanımlanmıştır. Bu tanım, literatürde yaygın olarak kullanılan ikinci yasa verimliliği tanımına karşılık gelmektedir. Sistemin birincil amacı elektrik üretimi olduğundan, ekserjetik verim yakıtın kimyasal ekserjisinin ne kadarının faydalı işe (net elektrik enerjisi) dönüştürüldüğünü göstermektedir. Bu yaklaşım, sistemin termodinamik mükemmelliğinin değerlendirilmesinde daha gerçekçi bir ölçüt sunmaktadır.

Biyokütle yakıtının kimyasal ekserjisi, Song vd. [25] tarafından önerilen yöntemle hesaplanmıştır:

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

Burada $\varphi = 1.05$ (ekserji faktörü) ve $LHV = 13.91$ MJ/kg'dır.

Bir sistemdeki ekserji dengesi denklemi aşağıdaki genel formda denklem (16) gibi yazılabilir.

$$Giren Ekserji - Çıkan Ekserji - Ekserji Yokoluşu = Ekserji Değişimi \quad (16)$$

$$Ex = (h - h_0) - T_0 \times (s - s_0) \quad (17)$$

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

h_0 : Çevre (referans) halindeki özgül entalpi değeri (kJ/kg),

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

s_0 : Çevre halindeki özgül entropi değeri (kJ/kg·K),

T_0 : Çevre sıcaklığı (K).

Bu ifade yoğunlaştırıcı 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 : yoğunlaştırıcıdaki ekserji kaybı (yok oluşu) (kJ/kg),

Δe : Ekserji değişimi (kJ/kg).

Türbin verimi;

$$\eta_T = \frac{W_{gerçek}}{W_T} , \quad W_{gerçek} = 6500 \text{ kW} \quad (19)$$

Sistem verimi;

$$\eta = \frac{W_{gerçek}}{Q_{yakıt}} \quad (20)$$

Çalışmada kullanılan ölçüm cihazlarının teknik özellikleri ve belirsizlikleri Tablo 2’de verilmiştir.

Tablo 2. 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%

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. Veriler sistem üzerinden sürekli izleme yapılarak bir saat aralıklarla düzenli olarak kaydedilmiş olup her durum için 100 saatlik çalışma sürecinde anlık olarak alınmıştır.

3. Bulgular

Bu çalışmada, CEMAK biyokütle enerji santralinin enerji ve ekserji analizi, tesisin mevcut operasyonel koşulları altında yapılmıştır. Sistemdeki bileşenlerin giriş ve çıkış noktalarındaki gerekli termodinamik özellikler, EES (Engineering Equation Solver) programı kullanılarak hesaplanmıştır. Elde edilen deneysel veriler ile hesaplanan bu termodinamik parametreler, sistemin iyileştirme öncesi ve sonrası durumları için karşılaştırmalı bir analize tabi tutulmuştur. Bu karşılaştırmanın amacı, yapılan iyileştirmenin sistemin genel termal ve ekserji verimliliği üzerindeki etkisini ve her bir bileşendeki enerji ve ekserji kayıplarını ne ölçüde azalttığını sayısal olarak göstermektir. İyileştirme öncesi duruma ait termodinamik özellik verileri, Şekil 2’deki şematik gösterimde numaralandırılan noktalara karşılık gelecek şekilde Tablo 3’de sunulmuştur.

Tablo 3. İyileştirme öncesi için numaralandırılmış noktalara ait termodinamik özellik verileri

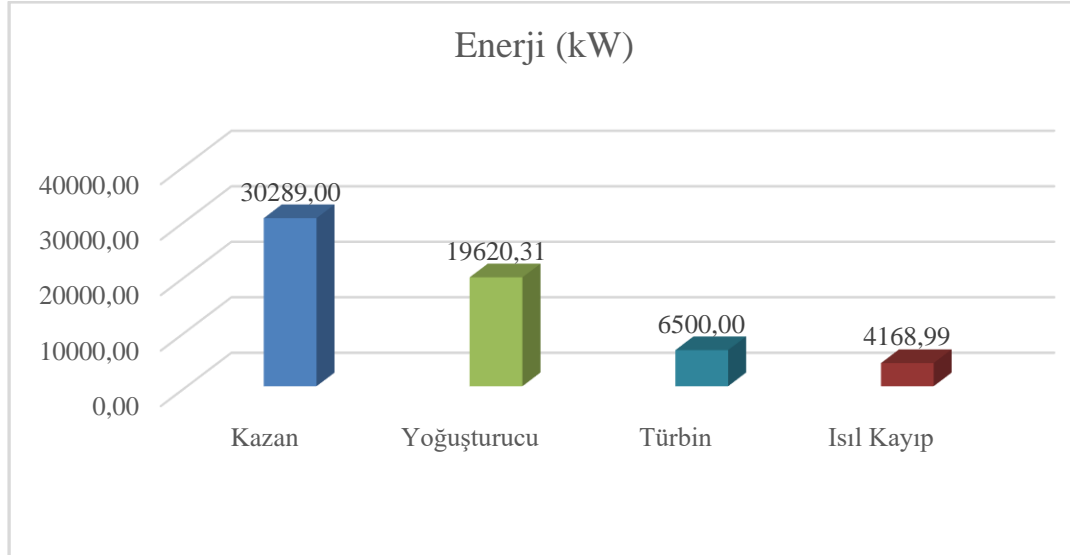
	T (°C)	P (kPa)	h (kJ/kg)	s (kJ/kgK)	Debi (kg/s)
1	55.7	16.33	233.50	0.7800	8.26
2	56.0	601.3	251.67	0.8310	8.26
3	99.0	231.3	308.09	0.9981	8.81
4	100.0	6401	423.90	1.3023	8.81
5	460.0	4600	3346.25	6.8976	8.81
6	263.0	5000	1149.91	2.9122	0.55
7	60.0	19.94	2608.84	7.9083	8.26

Santralin iyileştirme yapılmadan önceki elde edilen veriler ele alındığında aşağıdaki bulgular bölüm 2.2. de verilmiş olan denklemler yardımıyla hesaplanmıştır. İyileştirme öncesi durumunda, santralin termodinamik performansı Tablo 4’de özetlenmiştir.

Tablo 4. Santralin iyileştirme öncesi termodinamik performansı

Parametre	Değer	Birim
Net Güç Çıkışı (\dot{W}_{Net})	6500	kW
Kazan Isı Girişi ($\dot{Q}_{yakıt}$)	30289.30	kW
Yoğuşturucu 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

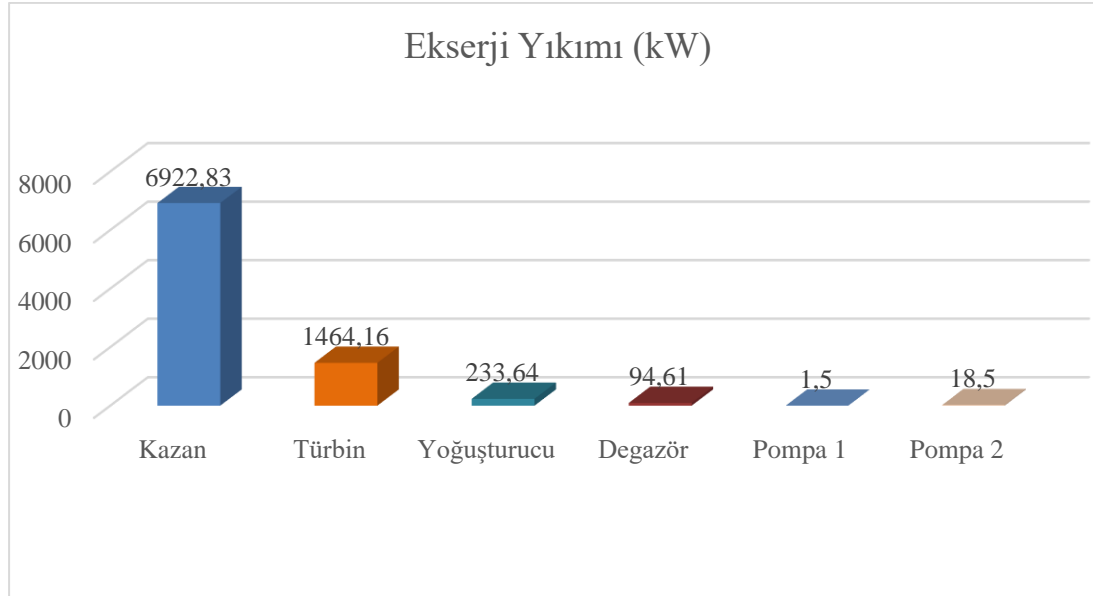
Bu konfigürasyonda elde edilen termal verim %21.45 ve Ekserjetik Verim %20.43 olarak hesaplanmıştır. Ekserji analizine göre, toplam ekserji yıkımının büyük bir kısmı Kazan'da 6922.83 kW meydana gelmektedir. Bu durum, kazan içerisindeki yüksek sıcaklık farklarından kaynaklanan tersinmezliklerin sistemin genel ekserjetik performansını önemli ölçüde düşürdüğünü göstermektedir.



Şekil 4. Santralin iyileştirme öncesi enerji dağılımı

Şekil 4'teki enerji dağılımı, yakıt enerjisinin önemli bir bölümünün yoğuşturucu ve termal kayıplar olarak sisteme geri kazandırılmadığını ve net güce dönüşmediğini göstermektedir. Ekserji yıkımının bileşenlere göre dağılımı ise Şekil 5'te detaylandırılmıştır. Bu şekilden de anlaşılacağı üzere, toplam ekserji yıkımının büyük bir kısmından sorumlu olan kazan, sistemin en verimsiz bileşeni olarak öne çıkmaktadır.

Bileşenlerdeki spesifik ekserji kayıpları şu şekildedir: Kazanda 6922.83 kW'lık bir ekserji yıkımı gerçekleşmektedir. Bu kayıp, kazandaki en yüksek enerji dönüşümü nedeniyle kritik bir öneme sahiptir. Türbinde ise 1464.16 kW'lık bir ekserji kaybı hesaplanmıştır. Yoğuşturucuda oluşan 233.64 kW'lık ekserji kaybı, aynı bileşendeki büyük enerji kaybına tezat oluşturur; bu durum, ekserjinin enerji kalitesindeki düşüşü ölçmesinden ileri gelir. Pompalarda ise durum daha verimlidir: Pompa 1'de sadece 1.50 kW'lık bir kayıp olması yüksek verimini gösterirken, Pompa 2'de gözlemlenen 18.50 kW'lık kayıp, Pompa 1'e göre daha yüksek olsa da, pompanın genel enerji tüketimine kıyasla düşük olduğu için verimli bir çalışma olarak değerlendirilir.



Şekil 5. Santralin iyileştirme öncesi ekserji yıkım dağılımı

İyileştirme sonrası için Şekil 3' de verilmiş olan şematik gösterimdeki numaralandırılmış noktalara ait termodinamik özellik verileri Tablo 5' de verilmiştir.

Tablo 5. 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

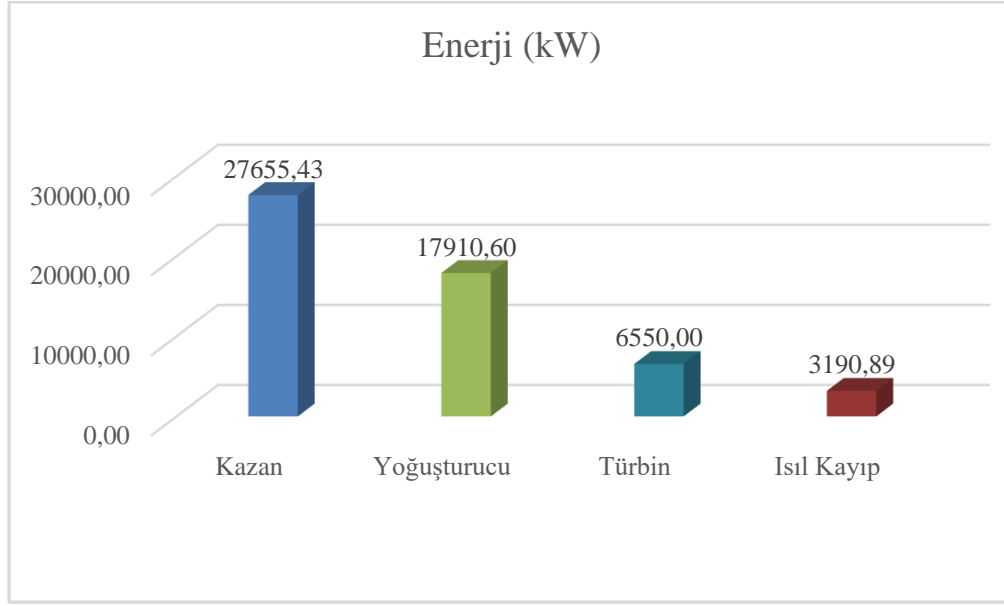
İyileştirme sonrası durumunda, ön ısıtma türbinden alınan buhar ekstraksiyonu ile sağlanmıştır. Bu konfigürasyonun temel amacı, kazan tamburundan alınan yüksek ekserjili buhar yerine, türbinin orta kademesinden alınan buharı kullanarak sistemin termodinamik verimini artırmaktır. Analiz sonuçları Tablo 6' da özetlenmiştir.

Tablo 6. Santralin iyileştirme sonrası termodinamik performansı

Parametre	Değer	Birim
Net Güç Çıkışı (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_{pompa})	20	kW
Yakıt Debi	7.156	ton/h

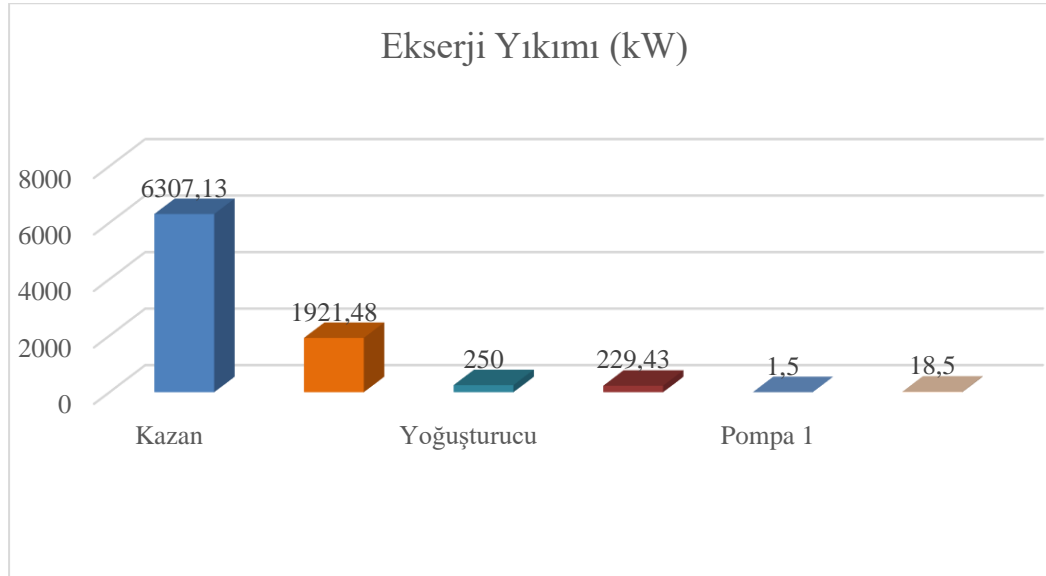
İyileştirme sonrası durumunda, net güç çıkışı 6550 kW'tan 6550 kW'a yükselirken, yakıt enerjisi girişi 31632.90 kW'tan 27632.43 kW'a düşmüştür. Bu iyileşmeler sonucunda termal verim %21.45

seviyelerinden %23.68'e ve ekserjetik verim %20.43 seviyelerinden %22.56'a yükselmiştir.



Şekil 6. Santralin iyileştirme sonrası enerji dağılımı

Şekil 6, yakıt enerjisinin büyük bir kısmının net güce dönüşmediğini ve önemli bir bölümünün yoğuşturucu ve termal kayıplar olarak çevreye atıldığını açıkça göstermektedir.



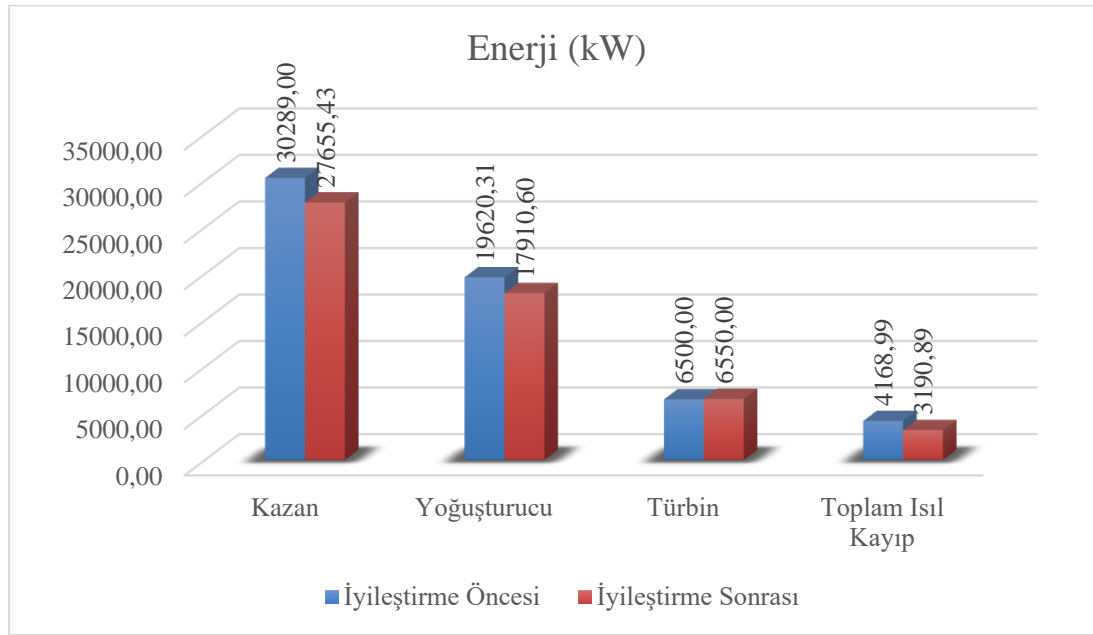
Şekil 7. Santralin iyileştirme sonrası ekserji yıkım dağılımı

Şekil 7, sistemdeki ekserji yıkımının bileşenlere göre dağılımını göstermektedir. Görüldüğü üzere, toplam ekserji yıkımının büyük bir bölümünden sorumlu olan kazan, sistemin termodinamik açıdan en verimsiz bileşeni olarak öne çıkmaktadır.

Bileşenlerdeki ekserji kayıpları sayısal olarak şu şekildedir: Kazanda 6307.13 kW'lık bir ekserji yıkımı gerçekleşmektedir. Bu kayıp, kazandaki yüksek enerji dönüşüm oranı nedeniyle kritik bir öneme sahiptir. Türbinde ise 1921.48 kW'lık bir ekserji kaybı hesaplanmıştır. Yoğuşturucuda oluşan 250 kW'lık ekserji kaybı, aynı bileşendeki büyük enerji kaybına tezat oluşturur; bu durum, ekserjinin enerji kalitesindeki düşüşü ölçmesinden ileri gelir. Pompalarda ise durum daha verimlidir: Pompa 1'de sadece 1.50 kW'lık bir kayıp olması yüksek verimini gösterirken, Pompa 2'de gözlemlenen 18.50

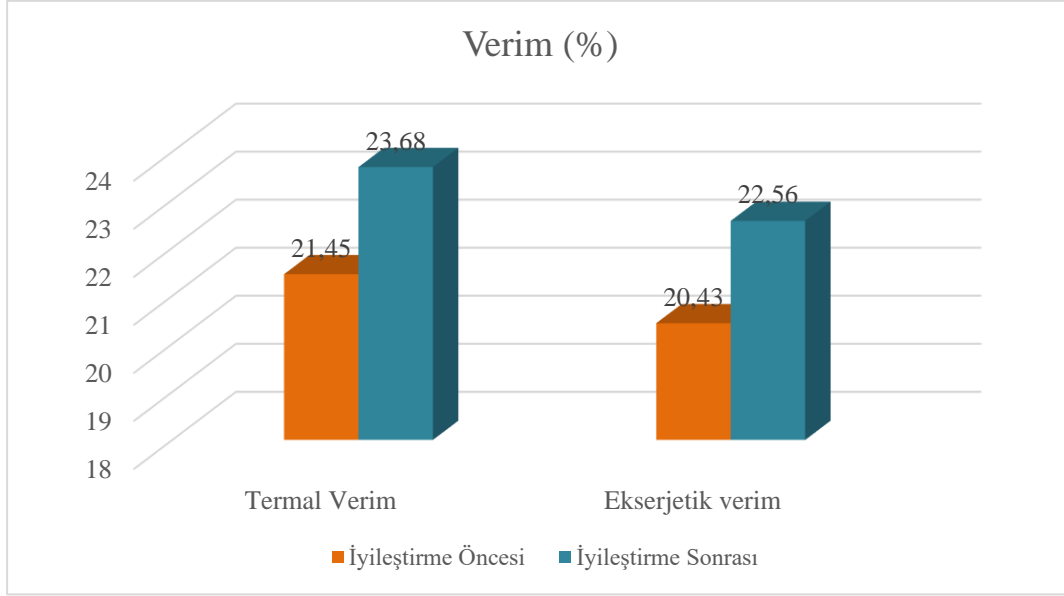
kW'lık kayıp, Pompa 1'e göre daha yüksek olsa da, pompanın genel enerji tüketimine kıyasla düşük olduğu için verimli bir çalışma olarak değerlendirilir.

İki operasyonel konfigürasyonun karşılaştırmalı analizi, iyileştirmenin santral performansı üzerindeki etkisini net bir şekilde göstermektedir. Analiz sonuçları, iyileştirme sonrası durumunun iyileştirme öncesi durumuna göre %8.75 daha az yakıt enerjisi gerektirdiğini göstermektedir. Bu teorik bulgu, kullanıcı tarafından belirtilen ~%10 yakıt azaltma gözlemi ile güçlü bir tutarlılık içindedir. Bu azalmanın temel nedeni, ön ısıtma için kullanılan buharın kaynağının değiştirilmesiyle, kazana giren suyun sıcaklığının artırılması ve dolayısıyla kazanda sisteme eklenmesi gereken ısı miktarının azalmasıdır. Bu azalmayla beraber yoğunlaştırıcı çalışma sıcaklığı düşürülmüş olup soğutma yükü azalmıştır. Bu sebeple entropi düşüşü meydana gelmiştir. Bu entropi azalması türbin ekserjetik verimini olumlu yönde etkilemiştir.

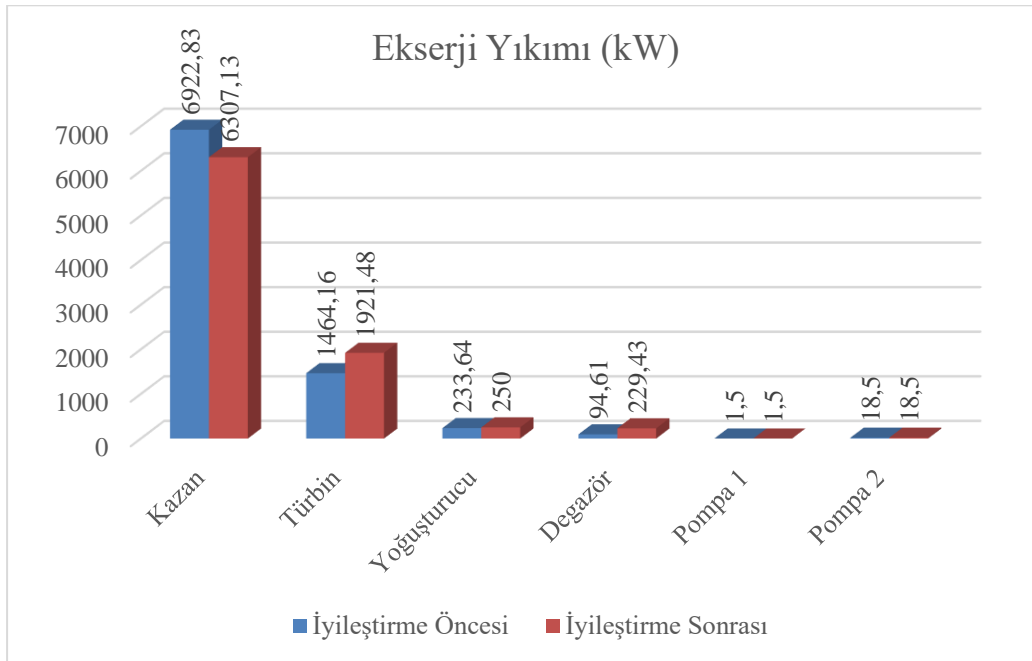


Şekil 8. Santralin iyileştirme öncesi ve sonrası enerji akışı karşılaştırması

Şekil 8, iki durum arasındaki yakıt enerjisi girişindeki azalmayı görselleştirmektedir. İyileştirme sonrası elde edilen %10.43'lük termal verim artışı ve %10.42'lik ekserjetik verim artışı, sistemin termodinamik performansında önemli bir iyileşme olduğunu kanıtlamaktadır. Bu artış, türbin ekstraksiyonu kullanılarak rejeneratif ısıtmanın döngüye entegre edilmesinin bir sonucudur. Rejeneratif ısıtma, kazana giren suyun sıcaklığını artırarak ortalama ısı ekleme sıcaklığını yükseltir ve bu da Carnot verimine yaklaşarak döngü verimliliğini artırır. Şekil 9, verim değerlerindeki bu artışı göstermektedir.



Şekil 9. Santralin iyileştirme öncesi ve sonrası verim karşılaştırması



Şekil 10. Santralin iyileştirme öncesi ve sonrası bileşen bazlı ekserji yıkım karşılaştırması

Şekil 10, santralin ana bileşenlerindeki ekserji yıkımını iyileştirme öncesi ve iyileştirme sonrası durumlar için karşılaştırmalı olarak sunmaktadır. Ekserji yıkımı, sistemdeki termodinamik kayıpların ve verimsizliklerin bir ölçüsüdür. En büyük ekserji yıkımının her iki durumda da kazan'da meydana geldiği görülmektedir. Ancak iyileştirme, Kazan'daki yıkımı 6922.83 kW'tan 6307.13 kW'a düşürerek önemli bir iyileşme sağlamıştır.

4. Tartışma ve Sonuç

Elde edilen sonuçlar, biyokütle enerji santralinde ön ısıtma yönteminin değiştirilmesinin santralin performansını önemli ölçüde iyileştirdiğini kanıtlamaktadır. İyileştirme sonrasında, termal verim %21.45'ten %23.68'e, ekserjetik verim %20.43'ten %22.56'ya yükselmiş, bu da %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, santralin ekonomik ve çevresel sürdürülebilirliğine doğrudan katkı sağlamıştır.

Bu çalışmada elde edilen enerji ve ekserji verimi değerleri, literatürdeki benzer biyokütle enerji santrali çalışmalarıyla Tablo 7' de karşılaştırılmıştır. Silva vd. [22], %35 nem oranına sahip orman atığı kullanarak termal verim %26, ekserjetik verim %22 elde etmişlerdir. Wijesekara vd. [23], termal verimi %47.45-%56.07 aralığında, Marito vd. ise termal verim %55.9, ekserjetik verim %19.26 olarak rapor etmişlerdir. Bu çalışmada elde edilen değerler (%21.45-%23.68 termal, %20.43-%22.56 ekserjetik), Silva vd. [22] ile uyumludur. Wijesekara vd. [23] ve

Marito vd.[24] tarafından rapor edilen yüksek termal verimler, bu çalışmaların kombine ısı ve güç (CHP) sistemleri kullanması veya optimize edilmiş teorik modellere dayanmasından kaynaklanmaktadır. Bu çalışma, gerçek santral ölçeğinde fiilen uygulanmış bir iyileştirmenin performans etkilerini saha verileriyle ortaya koyması açısından literatürdeki benzer çalışmalardan ayrılmaktadır. Gerçek işletme koşullarında yakıt kalitesi değişimleri, kısmi yük çalışma ve ısı kayıpları verimliliği olumsuz etkilemektedir. Bu çalışmada basit bir rejeneratif çevrim kullanılırken, literatürde gelişmiş sistem konfigürasyonları kullanılmaktadır.

Tablo 7. Literatürdeki Benzer Çalışmalarla Karşılaştırma

Çalışma	Yakıt	Termal Verim(%)	Ekserjetik Verim(%)
Bu Çalışma (Sonrası)	Buğday Sapı	23.68	22.56
Silva vd. [22]	Orman Atığı	26	22
Wijesekara vd. [23]	Biyokütle	47-56	-
Marito vd. [24]	Biyokütle	55.90	19.26

Sonuç olarak, bu çalışma buğday atığı kullanan bir biyokütle enerji santralinin iyileştirme öncesi ve sonrası durumlarını enerji ve ekserji analizleri kullanılarak karşılaştırmalı olarak incelemiş ve santralin mevcut operasyonel verilerinin teorik termodinamik modellerle uyumlu olduğunu göstermiştir. Bu çalışma, biyokütle enerji santrallerinde sistem entegrasyonunun ve ısı geri kazanım stratejilerinin verim artışındaki önemini ortaya koymaktadır.



Hakem: Dış, Bağımsız.

Teşekkür:

Bu çalışma CEMAK Enerji bünyesindeki Tokat Santralinde yapılmıştır. CEMAK Enerji Tokat Santraline teşekkürlerimizi sunarız. Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsüne teşekkürlerimizi sunarız.

Beyanname:

1. Özgünlük Beyanı:

Bu çalışma özgündür.

2. Yazar Katkıları:

Fikir: BT,AY; **Kavramsallaştırma:** BT,AY; **Literatür Taraması:** BT,AY; **Veri Toplama:** BT,AY; **Veri İşleme:** BT,AY; **Analiz:** BT,AY; **Yazma - orijinal taslak:** BT,AY; **Yazma - inceleme ve düzenleme:** BT,AY.

3. Etik Kurul İzni:

Etik Kurul İzni gerekmemektedir.

4. Finansman/Destek:

Bu çalışma, herhangi bir finansman ya da destek almamıştır.

5. Çıkar Çatışması:

Yazarlar, herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedirler.

6. Üretken Yapay Zeka Beyanı:

Çalışmanın hiçbir safhasında yapay zeka araçlarından faydalanılmamıştır.

7. Sürdürülebilir Kalkınma Amaçları:



KAYNAKÇA

- [1] Cui, J., Cui, L., Cheng, F., Liu, L., Sun, H., Li, S., Wen, Z., Sun, J. (2015). A green route for preparation of low surface area sio₂ microspheres from wheat straw ash with activated carbon and npk compound fertilizer as by-products. *RSC Advances*, 5(98), 80238-80244. <https://doi.org/10.1039/c5ra14622d>
- [2] Coronado, M. A., García, C., Montero, G., Ayala, J. R., Cervantes, L. K., Montes, D. G., Leon, J.A., Torres, R., Sagaste, C. A. (2020). Assessment and potential-site determination of a wheat straw power plant by aspen plus and multi-criteria gis model. *Waste Management & Research: The Journal for a Sustainable Circular Economy*, 39(7), 985-994. <https://doi.org/10.1177/0734242x20978288>
- [3] Udo, A., Diemuodeke, E., Ojapah, M., Abam, F., & Ofodu, J. (2023). Thermodynamics and structural optimization of organic rankine cycle plant for clean energy access using artificial bee colony and multi-criteria decision-making algorithms. *Journal of Energy and Power Technology*, 05(02), 1-23. <https://doi.org/10.21926/jept.2302015>
- [4] Nair, R. B., Kabir, M. M., Lennartsson, P. R., Taherzadeh, M. J., Horváth, I. S. (2017). Integrated process for ethanol, biogas, and edible filamentous fungi-based animal feed production from dilute phosphoric acid-pretreated wheat straw. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 184(1), 48-62. <https://doi.org/10.1007/s12010-017-2525-1>
- [5] Said, N., Alrowais, R., & Abdel-Daiem, M. M. (2024). Effect of physical and chemical treatment on the characteristics of wheat straw as fuel for energy applications. *BioResources*, 19(4), 9531-9543. <https://doi.org/10.15376/biores.19.4.9531-9543>
- [6] Gonca, G. (2015). Energy and exergy analyses of single and double reheat irreversible rankine cycle. *International Journal of Exergy*, 18(4), 402. <https://doi.org/10.1504/ijex.2015.072907>
- [7] Behzadi, A., Houshfar, E., Habibollahzade, A., Gholamian, E., Ashjaee, M. (2018). Exergy and exergoeconomic assessment of tehran's waste to energy power plant.. <https://doi.org/10.29007/nlzn>
- [8] Rosen, M.A., Dincer, I., "Effect Of Varying Dead-State Properties On Energy And Exergy Analyses Of Thermal Systems", *International Journal Of Thermal Sciences*, 43, 121-133, 2004. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2003.05.004>
- [9] Tsatsaronis, G., Park, M., "On Avoidable And Unavoidable Exergy Destructions And Investment Costs In Thermal Systems", *Energy Conversion And Management*, 43, 1259-1270, 2002. [https://doi.org/10.1016/S0196-8904\(02\)00012-2](https://doi.org/10.1016/S0196-8904(02)00012-2)
- [10] Kwak, H. Y., Kim, D. J., Jeon, J. S., "Exergetic And Thermoeconomic Analysis Of Power Plants", Department Of Mechanical Engineering, Chungang University, Seoul 156-756, South Korea,

- 2003.
- [11] Kaya, M., "Buharlı Güç Çevrim Veriminin Ekserji Analiziyle Belirlenmesi", Cbü Soma Meslek Yüksekokulu Teknik Bilimler Dergisi, Cilt:1, Sayı:9, Soma, 2008.
- [12] Çetinkaya, A., Yılmaz, F., & Bilgili, L. (2024). Life cycle assessment and thermodynamic performance of biomass-based combined cogeneration. *Engineering Research Express*, 6(4), 045009. <https://doi.org/10.1088/2631-8695/ad9982>
- [13] Preibinger, M., Heberle, F., Brüggemann, D. (2012). Thermodynamic analysis of double-stage biomass fired organic rankine cycle for micro-cogeneration. *International Journal of Energy Research*, 36(8), 944-952. <https://doi.org/10.1002/er.1952>
- [14] Oyekale, J. and Cau, G. (2020). Enhanced exergoeconomic analysis of a hybrid solar-biomass organic rankine cycle cogeneration plant.. <https://doi.org/10.46855/energy-proceedings-3980>
- [15] Moharamian, A., Soltani, S., Ranjbar, F., Yari, M., Rosen, M. (2017). Thermodynamic analysis of a wall mounted gas boiler with an organic rankine cycle and hydrogen production unit. *Energy & Environment*, 28(7), 725-743. <https://doi.org/10.1177/0958305x17724211>
- [16] Ren, J., Xu, C., Qian, Z., Huang, W., Wang, B. (2024). Exergoeconomic analysis and optimization of a biomass integrated gasification combined cycle based on externally fired gas turbine, steam rankine cycle, organic rankine cycle, and absorption refrigeration cycle. *Entropy*, 26(6), 511. <https://doi.org/10.3390/e26060511>
- [17] Hijriawan, M., Aries, H., Agung, P., Arifin, Z. (2022). Organic rankine cycle (ORC) system in renewable and sustainable energy development: a review of the utilization and current conditions for small-scale application. *Istrazivanja I Projektovanja Za Privredu*, 20(3), 957-970. <https://doi.org/10.5937/jaes0-36319>
- [18] Mutlu, B., Baker, D., Kazanç, F. (2021). Development and analysis of the novel hybridization of a single-flash geothermal power plant with biomass driven sco2-steam rankine combined cycle. *Entropy*, 23(6), 766. <https://doi.org/10.3390/e23060766>
- [19] Hosseinpour, M., Ozgoli, H., Mirzahosseini, S., Hemmasi, A., Mehdipour, R. (2022). Evaluation of performance improvement of the combined biomass gasifier power cycle using low-temperature bottoming cycles: organic rankine cycle, kalina and goswami. *Environmental Progress & Sustainable Energy*, 41(5). <https://doi.org/10.1002/ep.13855>
- [20] Rentizelas, A., Karellas, S., Kakaras, E., Tatsiopoulos, I. (2009). Comparative techno-economic analysis of ORÇ and gasification for bioenergy applications. *Energy Conversion and Management*, 50(3), 674-681. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2008.10.008>
- [21] Darvish, K., Ehyaei, M., Atabi, F., Rosen, M. (2015). Selection of optimum working fluid for organic rankine cycles by exergy and exergy-economic analyses. *Sustainability*, 7(11), 15362-15383. <https://doi.org/10.3390/su71115362>
- [22] 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.
- [23] 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.
- [24] 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>

- [25] 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>

