

Kangal Termik Santralının 3. Ünitesinin Enerji ve Ekserji Analizi

Hasan Can ADEM¹ ORCID 0000-0003-3546-7332
Cahit GÜRLEK^{*2} ORCID 0000-0002-0273-2999

¹Kangal Termik Santral Elektrik Üretim A.Ş., Kangal, Sivas

²Cumhuriyet Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Sivas

Geliş tarihi: 23.02.2023

Kabul tarihi: 28.03.2023

Atıf şekli/ How to cite: ADEM, H.C., GÜRLEK, C., (2023). Kangal Termik Santralının 3. Ünitesinin Enerji ve Ekserji Analizi. Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Dergisi, 38(1), 233-242.

Öz

Fosil yakıtlı güç üretim sistemlerinin verimliliğinin artırılması; enerji üretiminin artması, yakıt kaynaklarının, çevre, ekosistem ve insan sağlığının korunması açısından önemlidir. Verim artırma uğraşları için enerji ve ekserji analizleri enerji sistemlerindeki enerji kayıplarının ve kullanılabilir iş potansiyelinin belirlenmesinde önemli araçlardır. Bu çalışmada 157 MW Kurulu gücündeki Kangal Termik Santrali 3. ünitesinin enerji ve ekserji analizi yapılmıştır. Hesaplamalar 34 farklı noktadan elde edilen veriler kullanılarak termik santral ünitesinin her bir elemanı için gerçekleştirilmiştir. En yüksek ekserji kayıp oranı kazanda elde edilirken (84,768%) en düşük ekserji kaybı kondenser tahliye pompasında elde edilmiştir (0,0089%). İkinci yasa verimi en fazla yüksek basınçlı besleme suyu ısıtıcısında (%97,73) ve en az kazanda (%52,43) gerçekleşmiştir. Termik santral ünitesinin ısıl ve ikinci yasa verimleri sırasıyla %32,92 ve %53,53 olarak bulunmuştur. Elde edilen sonuçların termik santralin optimize edilmesinde faydalı olacağı düşünülmektedir.

Anahtar Kelimeler: Ekserji analizi, Enerji analizi, Kangal, Termik güç santrali

Energy and Exergy Analysis of the 3rd Unit of Kangal Thermal Power Plant

Abstract

Improving the efficiency of fossil-fueled thermal power plants is important in terms of increasing energy production and protecting fuel resources, environment, ecosystem and human health. Energy and exergy analyses are effective tools for determining energy losses and the available work potential of energy systems when dealing with efficiency improvements. In this study, energy and exergy analysis of the 3rd unit of Kangal Thermal Power Plant with an installed capacity of 157 MW were performed. Calculations for each component of the thermal power plant unit were carried out using data obtained from 34 different nodes. The highest exergy loss rate was obtained for the boiler (84.768%) while the least exergy loss rate

*Sorumlu yazar (Corresponding author): Cahit GÜRLEK, cgurlek@cumhuriyet.edu.tr

was obtained for the condenser drain pump (0.0089%). The second law efficiency was highest for the high pressure feed water heater (97.73%) and was lowest for the boiler (52.43%). The thermal and second law efficiencies of the thermal power plant unit were found to be 32.92% and 53.53%, respectively. It is thought that the obtained results will be useful in optimizing the power plant.

Keywords: Energy analysis, Exergy analysis, Kangal, Thermal power plant

1. GİRİŞ

Çevresel faktörler, artan enerji talebi ve fiyatları nedeniyle son yıllarda alternatif enerji kaynaklarına olan yönelim artmaktadır. Buna rağmen küresel kömür yakıtlı elektrik üretimi 2021'de tüm zamanların en yüksek seviyesine ulaşarak CO₂ salınım miktarını rekor seviyelere çıkarmıştır [1]. Yine 2021 yılı verilerine göre Türkiye'de elektrik üretiminin yaklaşık olarak %31'i (104,2 TWh) kömür kullanılarak gerçekleştirilmiştir [2]. Ek olarak Türkiye'deki kurulu gücün yaklaşık %20,5'ini katı yakıtlı santraller oluşturmaktadır ve verimleri %30-35 civarındadır [3-5]. Bu nedenle mevcut kurulu kömür yakıtlı termik santrallerin veriminin iyileştirilmesi; enerji üretiminin artması ve karbon salınım miktarlarının azaltılması gibi hem ekonomik hem de çevresel faktörler açısından önemlidir. Ekserji analizi kurulu santrallerin verimlerinin iyileştirilmesi için kullanılabilir iş kayıplarının ne oranda hangi bileşende gerçekleştiğinin belirlenmesinde önemli bir araçtır ve literatürde yaygın olarak kullanılmaktadır [6]. Arslan, Seyitömer Termik Santrali için yaptığı enerji ve ekserji analizinde en fazla ekserji kaybının kazanda olduğunu tespit etmiştir [7]. Kaya, basit bir Rankine çevrimi için ekserji analizi yaparak net güç çıktısına etki eden parametreleri belirlemiştir. Kazan basıncının artırılarak türbin çıkış basıncının düşürülmesinin türbinin ekserjik verimini artırdığını gözlemiştir [8]. Erdem ve arkadaşları, Türkiye'de bulunan dokuz farklı kömür yakıtlı termik santralin için yaptıkları çalışmada en yüksek ekserji verimine (%37,88) Çan Termik Santrali'nin, en düşük ekserji

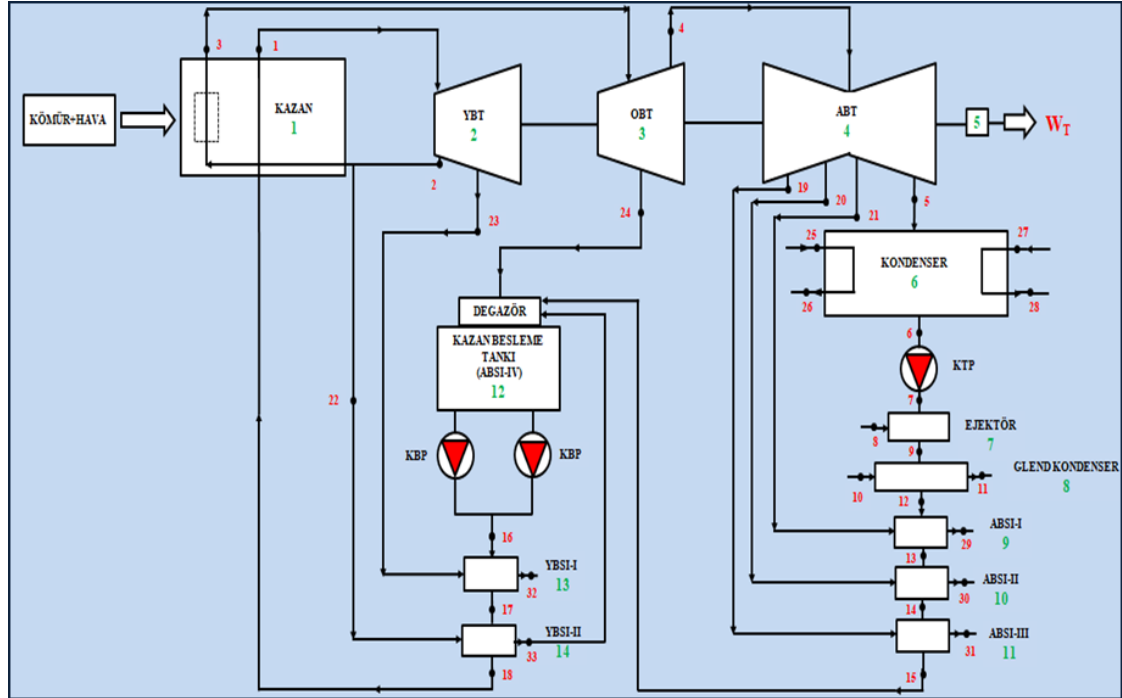
verimine ise (%28,55) Kangal Termik Santralinin, sahip olduğunu belirtmişlerdir [9]. Regulağadda ve arkadaşları, 32 MW gücünde bir kömür yakıtlı enerji santrali için yaptıkları ekserji ve enerji analizinde ekserji kaybının en fazla kazana olduğunu belirtmişler ve santralin enerji verimini %30,12, ekserji verimini ise %25,38 olarak hesaplamışlardır [10]. Coşkun ve arkadaşları, Çayırhan Termik Santrali için yaptıkları enerji ve ekserji analizleri aracılığıyla santralin ısı ve ikinci yasa verimlerini sırasıyla %38 ve %53 olarak bulmuşlardır. Santralde en fazla ekserji kayıplarının sırasıyla; kazan, türbin grupları, kondenser, ısıtıcı grup ve pompa gruplarında meydana geldiği belirtilmiştir [11]. Ünal ve Özkan, Tunçbilek Termik Santral için yirmi yedi farklı düğüm noktasına ait verileri kullanarak enerji ve ekserji hesaplamaları yapmışlardır. En yüksek enerji (%79,5) ve ekserji (%71,1) kayıp oranları kazan için elde edilmiştir. Santrale ait ısı ve ikinci yasa verimleri sırasıyla %32,3 ve %75,1 olarak hesaplanmıştır [12]. Ozdil ve arkadaşları, bir elektrik santralindeki Organik Rankine Çevriminin (ORC) evaporatör girişindeki su fazının etkisini gözlemlemek amacıyla farklı su fazları için ekserji yıkımı ve ekserji verimlerini hesaplamışlardır. Ekserji verimi; kalitesi 0,3 ve 0,7 olan su karışım formları için sırasıyla %41,04 ve %40,29 olarak hesaplanmıştır [13]. Ozdil ve Pekdur, Türkiye'de bulunan 14,25 MW'lık bir kojenerasyon sistemi için yaptıkları analizlerde en büyük tersinmezliğin, toplam sistem tersinmezliğinin %36'sı olan kazanda meydana geldiğini ve ayrıca, ekonomizör ve bacanın, sırasıyla %34 ve %25 gibi önemli miktarlarda tersinmezliklere sahip olduğunu bulmuşlardır [14]. Ozdil ve arkadaşları, sistem

bileşenleri; akışkan yataklı kömür yakıcı, ısı geri kazanımlı buhar jeneratörü, ekonomizör, fanlar, pompalar, siklon ve baca olarak ele alınan 6,5 MW'lık bir elektrik santrali için enerji ve ekserji analizleri yapmışlardır. En yüksek tersinmezliği akışkan yataklı kömür yakıcıda gözlemlemişlerdir [15]. Bayrakçeken, bir doğalgazlı kombine çevrim santrali için yaptığı enerji ve ekserji analizinde santralin ısı verimini %47,2, gaz türbininin verimini %31, buhar türbinin verimini %30,5 ve santralin ekserji verimini ise %45,7 olarak hesaplamıştır. En fazla enerji kaybının kondenser ve bacada en fazla ekserji kaybının ise %27,8 ile yanma odasında gerçekleştiği belirtilmiştir [16]. Altunbaş, Afşin-Elbistan bölgesinde bulunan linyit yakıtlı bir termik santralindeki toplam ekserji kaybını 436,7 MW, kazandaki ekserji kaybını ise 350,1 MW olarak hesaplamıştır. Santralin ısı verimi %35,7, ikinci yasa verimi ise %58,29 olarak bulunmuştur. Santraldeki ekserji kaybının azaltılması için kazan ve kondenserde ısı transferine engel olabilecek tortu oluşumunun azaltılması öneri olarak sunulmuştur [17]. Dikili ve arkadaşları, İstanbul'da faaliyet gösteren 410,8 MW gücündeki doğalgaz yakıtlı kombine çevrim güç santralinde enerji ve ekserji analizi yapmışlardır. En fazla enerji kaybının sırasıyla kondenser ve bacada, en fazla tersinmezliğin ise yanma odasında ve gaz türbininde olduğu tespit edilmiştir [18]. Kopaç ve arkadaşları, Çatalağzı Termik santrali için yaptıkları enerji ve ekserji analizi aracılığıyla en yüksek enerji kaybının kondenserde, en yüksek ekserji kaybının ise kazanda olduğunu bulmuşlardır [19]. Topal ve arkadaşları Zonguldak ilinde bulunan bir kömür yakıtlı süper kritik termik santrali için enerji ve ekserji analizi yapmışlardır. Kömürün enerjisinin %48,5'inin kondenserde soğutma suyuna aktarıldığı, ekserjisinin %49,2'sinin ise kazanda yok edildiği hesaplanmıştır. Santralin enerji verimi %33,65, ekserji verimi ise %31,42 olarak bulunmuştur [20].

Bu çalışmada Sivas'ta Kurulu olan 157 MW gücündeki Kangal Termik Santrali'nin 3. Ünitesi için ekserji ve enerji analizi yapılmıştır. Ünite 16 adet ana sistem elemanı bulunmaktadır. Her bir eleman için kayıp kullanılabilir ekserji ve ikinci yasa verimleri hesaplanmıştır.

2. YÖNTEM

Sivas Kangal Termik Santralinin 3. ünitesinin kurulu gücü 157 MW'dır. Bu ünite; 1 adet türbin grubu, 1 adet buhar kazanı, 1 adet kondenser, pompa grupları, ısıtıcı grupları ve yardımcı grup olarak adlandırılan glend kondenser ve ejektör yer almaktadır. Türbin grubu, alçak basınç türbini (ABT), orta basınç türbini (OBT) ve yüksek basınç türbininden (YBT) oluşmaktadır. Isıtıcı grupları ise 4 adet alçak basınç besleme suyu ısıtıcısı ve 2 adet yüksek basınç besleme suyu ısıtıcısından oluşmaktadır. Santral ünitesinde kondenser tahliye pompa (KTP) grubu ve kazan besleme pompa (KBP) grubu bulunmaktadır. Ünite alçak, yüksek ve orta basınç türbinlerinden alınan ara buharlar aracılığıyla besleme suyu ısıtılarak sistemin genel veriminin artırılması sağlanmaktadır. Alçak basınç türbininin belirli kademelerinden alınan ara buhar, alçak basınç besleme suyu ısıtıcılarına (ABSI-1, ABSI-2 ve ABSI-3) gönderilerek kademeli olarak besleme suyu ısıtılmaktadır. Orta basınç türbininden 4 nolu alçak basınç ısıtıcısı (ABSI-4) diye de adlandırılan kazan besleme tankına ara buhar verilmektedir. Yüksek basınç türbininden 1 nolu yüksek basınç besleme suyu ısıtıcısına (YBSI-1) ara buhar verilmektedir. 2 nolu yüksek basınç besleme suyu ısıtıcısına (YBSI-2) ise yüksek basınç türbininde iş görmüş ve tekrar kızdırılmak üzere kazana gönderilen buhar hattından ara buhar verilmektedir. Şekil 1'de ünitenin akış diyagramı sunulmuştur. Hesaplamalar için Şekil 1'deki 34 adet düğüm noktasına ait sıcaklık, basınç ve kütleli debi verileri kullanılmıştır.



Şekil 1. Kangal Termik Santralini 3. Ünitesinin akış diyagramı

Enerji ve ekserji analizleri için aşağıdaki kabuller ve denklemler kullanılmıştır. Potansiyel ve kinetik enerji değişimleri ihmal edilmiştir. Kazana giren havanın ve yanma sonucu ürünlerinin mükemmel gaz olduğu kabul edilmiştir. Referans çevre koşulları 25 °C ve 1 bar olarak alınmıştır.

Enerjinin korunumu ilkesi sürekli akışlı açık sistemler için aşağıdaki şekildedir:

$$\dot{Q} - \dot{W} = \sum \dot{m}_c \left(h + \frac{V^2}{2} + gz \right) - \sum \dot{m}_g \left(h + \frac{V^2}{2} + gz \right) \quad (1)$$

Burada \dot{Q} ve \dot{W} sırasıyla kontrol hacmin sınırlarından geçen ısı ve işi, \dot{m} , h , $\frac{V^2}{2}$, gz ise sırasıyla kütleli debi, birim kütle başına entalpi ve kinetik ve potansiyel enerji değişimlerini temsil etmektedir. Potansiyel ve kinetik enerjiler ihmal edilirse enerjinin korunumu aşağıdaki gibi yazılır:

$$\dot{Q} - \dot{W} = \sum (\dot{m}h)_c - \sum (\dot{m}h)_g \quad (2)$$

Tersinir iş aşağıdaki eşitlikle hesaplanır:

$$\dot{W}_{tr} = \sum \dot{m}_g \left(h - T_0 s + \frac{V^2}{2} + gz \right) - \sum \dot{m}_c \left(h - T_0 s + \frac{V^2}{2} + gz \right) \quad (3)$$

Burada \dot{W}_{tr} tersinir işi, T_0 ve s ise sırasıyla referans çevrenin mutlak sıcaklığını ve birim kütle başına entropiyi temsil etmektedir. Potansiyel ve kinetik enerjiler ihmal edilirse tersinir iş aşağıdaki şekilde yazılır:

$$\dot{W}_{tr} = \sum \dot{m}_g (h - T_0 s) - \sum \dot{m}_c (h - T_0 s) \quad (4)$$

Termodinamiğin ikinci kanunu aşağıda sunulmuştur:

$$\Delta S_{net} = \Delta S_{üretim} = \sum \dot{m} (s_c - s_g) - \frac{\dot{Q}_A}{T_k} \quad (5)$$

Burada ΔS_{net} ($S_{üretim}$) entropi üretimini, \dot{Q}_A ve T_k ise sırasıyla çevreden yapılan ısı ve çevre sıcaklığını temsil etmektedir.

Termodinamiğin ikinci kanunu sistem ve çevre ile ısı alışverişi olmadığında aşağıdaki şekilde yazılır:

$$\Delta S_{net} = \Delta S_{üretim} = \sum \dot{m} (s_{\dot{c}} - s_{\dot{g}}) \quad (6)$$

Tersinmezlik ve kayıp kullanılabilir ekserji birbirine eşit olup aşağıdaki şekilde ifade edilir:

$$\dot{I} = T_0 \Delta S_{üretim} \quad (7)$$

Akış kullanılabilirliği herhangi bir x noktası için aşağıdaki eşitlikle ifade edilir:

$$\psi_x = (h_x - h_0) - T_0 (s_x - s_0) \quad (8)$$

Burada ψ_x , h_x ve s_x sırasıyla herhangi bir x noktası için akış kullanılabilirliği, entalpi ve entropiyi temsil etmektedir. Kayıp kullanılabilir ekserji ayrıca aşağıdaki şekilde de ifade edilir:

$$\dot{W}_{fay} = \sum m_g \psi_g - \sum m_c \psi_c - X_{yokolan(ky)} \quad (9)$$

Burada \dot{W}_{fay} ve $X_{yokolan(ky)}$ sırasıyla sistem elemanında üretilen işi ve kaybolan ekserjiyi temsil etmektedir.

İkinci kanun verimi, η_{II} aşağıdaki şekilde ifade edilir:

$$\eta_{II} = 1 - \frac{X_{yokolan(ky)}}{\dot{W}_{tr}} \quad (10)$$

Üretilen net güç, \dot{W}_{net} aşağıdaki şekilde ifade edilir:

$$\dot{W}_{net} = \dot{W}_{Türbin} - \dot{W}_{Pompa} \quad (11)$$

Burada $\dot{W}_{Türbin}$ ve \dot{W}_{Pompa} sırasıyla türbinde üretilen iş ve pompa da üretilen işi temsil etmektedir.

Santralin ısı verimi, η_{th} aşağıdaki şekilde hesaplanır:

$$\eta_{th} = \frac{\dot{W}_{net}}{\dot{Q}_{giren}} \quad (12)$$

Bir Carnot makinesinin veya herhangi tersinir makine için ısı verim η_{tr} , aşağıdaki şekilde ifade edilir:

$$\eta_{tr} = 1 - \frac{T_L}{T_H} \quad (13)$$

Burada T_L ve T_H sırasıyla düşük ve yüksek ısı depoların sıcaklıklarını temsil etmektedir.

Santralin ikinci yasa verimi η_{II} , aşağıdaki şekilde hesaplanır:

$$\eta_{II} = \frac{\eta_{th}}{\eta_{tr}} \quad (14)$$

Yakıtın fiziksel ekserjisi $(\bar{e}x^{fiz})_{yakıt}$, aşağıdaki şekilde ifade edilir:

$$\left(\bar{e}x^{fiz}\right)_{yakıt} = \bar{c}_{p,yakıt} \left[(T - T_0) - T_0 \ln \frac{T}{T_0} \right] + (\bar{R}T_0 \ln \frac{P}{P_0}) \quad (15)$$

Burada $\bar{c}_{p,yakıt}$, T ve P sırasıyla yakıtın özgül ısısını, yakıtın giriş sıcaklığını ve yakıtın giriş basıncını temsil etmektedir.

Baca gazı fiziksel ekserjisi $(\bar{e}x^{fiz})_{bg}$, aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$\left(\bar{e}x^{fiz}\right)_{bg} = \bar{c}_{p,bg} \left[(T - T_0) - T_0 \ln \frac{T}{T_0} \right] + (\bar{R}T_0 \ln \frac{P}{P_0}) \quad (16)$$

Burada $\bar{c}_{p,bg}$, T ve P sırasıyla baca gazı özgül ısısını, baca gazı çıkış sıcaklığını ve baca gazı çıkış basıncını temsil etmektedir.

Havanın fiziksel ekserjisi $(\bar{e}x^{fiz})_h$, aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$\left(\bar{e}x^{fiz}\right)_h = \bar{c}_{p,h} \left[(T - T_0) - T_0 \ln \frac{T}{T_0} \right] + (\bar{R}T_0 \ln \frac{P}{P_0}) \quad (17)$$

Burada $\bar{c}_{p,h}$, T ve P sırasıyla havanın özgül ısısını, havanın giriş sıcaklığını ve havanın giriş basıncını temsil etmektedir. Yakıtın kimyasal ekserjisi $\dot{E}_{xyakıt}$, aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$\dot{E}_{x_{yakıt}} = \dot{m}_{yakıt} h_{yakıt} \quad (18) \quad \text{Ünite elemanlarının her biri için enerji ve ekserji dengesi Çizelge 1'de sunulmuştur.}$$

Burada $\dot{m}_{yakıt}$, $h_{yakıt}$ sırasıyla yakıtın kazana giriş kütleli debisini ve kömürün kalorisini temsil etmektedir.

Çizelge 1. Ünitenin enerji ve ekserji dengesi

Ünite elemanları	Enerji dengesi	Ekserji dengesi
Kazan	$\dot{E}_{yakıt} + \dot{E}_{18} + \dot{E}_2 = \dot{E}_{bg} + \dot{E}_1 + \dot{E}_3 + \dot{Q}_{k,kazan}$	$\dot{I}_k = \dot{E}_{x_{yakıt}} + \dot{E}_{x_{18}} + \dot{E}_{x_2} - \dot{E}_{x_{bg}} - \dot{E}_{x_1} - \dot{E}_{x_3}$
YBT	$\dot{E}_1 = \dot{E}_{23} + \dot{E}_2 + \dot{W}_{YBT} + \dot{Q}_{K,YBT}$	$\dot{I}_{YBT} = \dot{E}_{x_1} - \dot{E}_{x_{23}} - \dot{E}_{x_2} - \dot{W}_{YBT}$
ABT	$\dot{E}_4 = \dot{E}_{19} + \dot{E}_{20} + \dot{E}_{21} + \dot{E}_5 + \dot{W}_{ABT} + \dot{Q}_{K,ABT}$	$\dot{I}_{ABT} = \dot{E}_{x_4} - \dot{E}_{x_{19}} - \dot{E}_{x_{20}} - \dot{E}_{x_{21}} - \dot{E}_{x_5} - \dot{W}_{ABT}$
OBT	$\dot{E}_3 = \dot{E}_4 + \dot{E}_{24} + \dot{W}_{OBT} + \dot{Q}_{K,OBT}$	$\dot{I}_{OBT} = \dot{E}_{x_3} - \dot{E}_{x_{24}} - \dot{E}_{x_4} - \dot{W}_{OBT}$
Kondenser	$\dot{E}_5 + \dot{E}_{27} + \dot{E}_{25} = \dot{E}_{28} + \dot{E}_{26} + \dot{E}_6 + \dot{Q}_{K,KON}$	$\dot{I}_{KON} = \dot{E}_{x_5} + \dot{E}_{x_{27}} + \dot{E}_{x_{25}} - \dot{E}_{x_{26}} - \dot{E}_{x_{28}} - \dot{E}_{x_6}$
KTP	$\dot{E}_6 + \dot{W}_{KTP} = \dot{E}_7 + \dot{Q}_{K,KTP}$	$\dot{I}_{KTP} = \dot{E}_{x_6} - \dot{E}_{x_7}$
Ejektör	$\dot{E}_8 + \dot{E}_7 = \dot{E}_9 + \dot{Q}_{K,EJEKTÖR}$	$\dot{I}_{EJEKTÖR} = \dot{E}_{x_8} + \dot{E}_{x_7} - \dot{E}_{x_9}$
Glend Kondenser	$\dot{E}_{10} + \dot{E}_9 = \dot{E}_{11} + \dot{E}_{12} + \dot{Q}_{K,GLEND KON}$	$\dot{I}_{GLEND KON} = \dot{E}_{x_{10}} + \dot{E}_{x_9} - \dot{E}_{x_{11}} - \dot{E}_{x_{12}}$
ABSI-1	$\dot{E}_{12} + \dot{E}_{21} = \dot{E}_{29} + \dot{E}_{13} + \dot{Q}_{K,ABSI-1}$	$\dot{I}_{ABSI-1} = \dot{E}_{x_{12}} + \dot{E}_{x_{21}} - \dot{E}_{x_{29}} - \dot{E}_{x_{13}}$
ABSI-2	$\dot{E}_{20} + \dot{E}_{13} = \dot{E}_{30} + \dot{E}_{14} + \dot{Q}_{K,ABSI-2}$	$\dot{I}_{ABSI-2} = \dot{E}_{x_{20}} + \dot{E}_{x_{13}} - \dot{E}_{x_{30}} - \dot{E}_{x_{14}}$
ABSI-3	$\dot{E}_{19} + \dot{E}_{14} = \dot{E}_{31} + \dot{E}_{15} + \dot{Q}_{K,ABSI-3}$	$\dot{I}_{ABSI-3} = \dot{E}_{x_{19}} + \dot{E}_{x_{14}} - \dot{E}_{x_{31}} - \dot{E}_{x_{15}}$
ABSI-4	$\dot{E}_{24} + \dot{E}_{15} + \dot{E}_{33} = \dot{E}_{16} + \dot{Q}_{K,ABSI-4}$	$\dot{I}_{ABSI-4} = \dot{E}_{x_{24}} + \dot{E}_{x_{15}} + \dot{E}_{x_{33}} - \dot{E}_{x_{16}}$
KBP	$\dot{E}_{34} + \dot{W}_{KBP} = \dot{E}_{16} + \dot{Q}_{K,KBP}$	$\dot{I}_{KBP} = \dot{E}_{x_{34}} - \dot{E}_{x_{16}}$
YBSI-1	$\dot{E}_{16} + \dot{E}_{23} = \dot{E}_{32} + \dot{E}_{17} + \dot{Q}_{K,YBSI-1}$	$\dot{I}_{YBSI-1} = \dot{E}_{x_{16}} + \dot{E}_{x_{23}} - \dot{E}_{x_{32}} - \dot{E}_{x_{17}}$
YBSI-2	$\dot{E}_{22} + \dot{E}_{17} = \dot{E}_{33} + \dot{E}_{18} + \dot{Q}_{K,YBSI-2}$	$\dot{I}_{YBSI-2} = \dot{E}_{x_{22}} + \dot{E}_{x_{17}} - \dot{E}_{x_{33}} - \dot{E}_{x_{18}}$

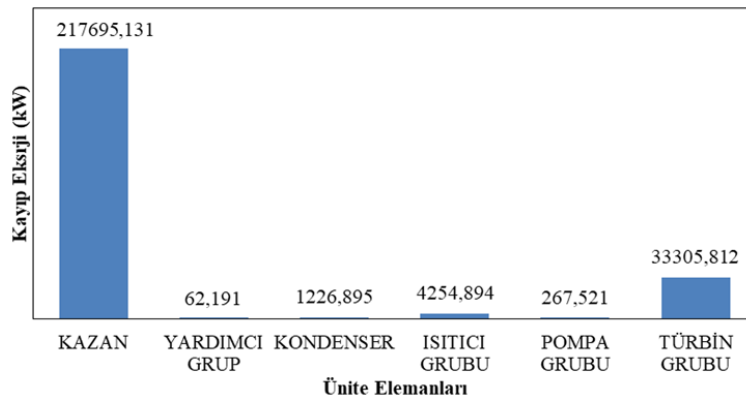
3. BULGULAR VE TARTIŞMA

Kangal Termik Santralinin 3. ünitesinin 34 ayrı düğüm noktası için ölçülen basınç, kütleli debi ve sıcaklık değerleri ile bunlara ait faz durumu, entalpi ve entropi değerleri Çizelge 2'de sunulmuştur. Ünitenin eleman grupları için hesaplanan kayıp kullanılabilir ekserji değerleri Şekil 2'de görülmektedir. En fazla ekserji kaybının 217695,131 kW ile kazanda olduğu görülmektedir. Türbin grubu için bu değer 33305,812 kW olarak hesaplanmıştır. Türbin grubundan sonra en fazla ekserji kaybının 4254,894 kW ile ısıtıcı grubunda olduğu görülmektedir. Bunu takip eden en yüksek

kayıp ekserji 1226.895 kW ile kondenserde meydana gelmiştir. Pompa grubu için ekserji kaybı 267,521 kW tır. En az kaybın ise 62,191 kW ile yardımcı gruplarda meydana geldiği görülmektedir. Üniteyi oluşturan her bir sistem elemanı için kayıp kullanılabilir ekserji değerleri Çizelge 3'te sunulmuştur. En fazla ekserji kaybının kazanda en az ekserji kaybının ise pompa grubunda bulunan kondenser tahliye pompasında meydana geldiği görülmektedir. Kazandan sonra en yüksek ekserji kaybı ise 26534,464 kW ile alçak basınç türbininde meydana gelmiştir. Bunun en büyük sebebi sistemin diğer elemanları için gerçekleştirilen ara buhar alma işlemidir.

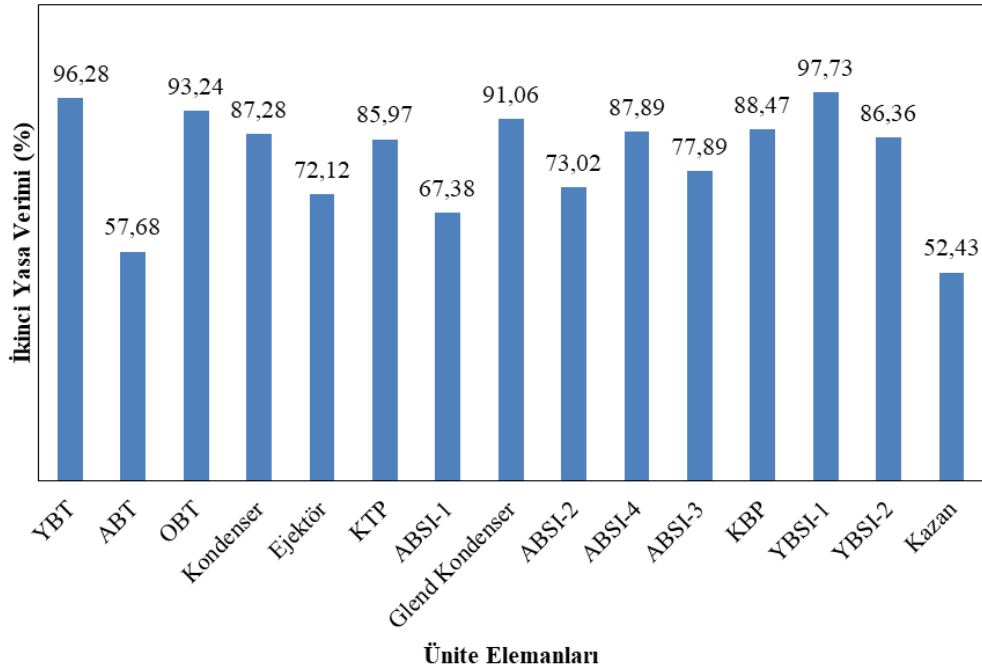
Çizelge 2. Ünitenin düğüm noktalarına ait veriler ve ilgili termodinamik özellikler

Düğüm no	Faz durumu	Sıcaklık T (°C)	Basınç P (Bar)	Debi m (kg/s)	Entalpi h (kJ/kg)	Entropi s (kJ/kgK)
0	-	25	1	-	104,9	0,3672
1	Buhar	535	135	133,33	3426	6,538
2	Buhar	336	40,5	122,64	3057	6,519
3	Buhar	535	37,3	115,28	3529	7,228
4	Buhar	230	3,42	109,44	2926	7,376
5	Buhar	38,1	0,0666	95,3	2570	8,292
6	Sıvı	38	0,92	95,3	159,2	0,5456
7	Sıvı	38,1	15	95,3	160,9	0,5464
8	Buhar	89,11	111	3,8	381,9	1,127
9	Sıvı	40	14,3	99,1	168,8	0,5718
10	Buhar	190	1,5	3,45	2853	7,602
11	Buhar	108	1,2	3,45	2690	7,315
12	Sıvı	40,81	14	99,1	172,1	0,5826
13	Sıvı	70,45	13,5	99,1	315,1	0,9521
14	Sıvı	100,6	12,4	99,1	422,05	1,313
15	Sıvı	124,4	12	99,1	523,2	1,574
16	Sıvı	166,9	145	117,29	713,4	1,994
17	Sıvı	217,6	145	117,29	936,4	2,474
18	Sıvı	268,2	145	117,29	1174	2,934
19	Buhar	231,2	3,43	4,07	2928	7,379
20	Buhar	148	1,46	5	2769	7,424
21	Buhar	76,7	0,41	5,07	2638	7,662
22	Buhar	365,8	39,72	12,35	3133	6,65
23	Buhar	420	16,67	11,2	3297	7,283
24	Buhar	306,1	7,14	5,84	3072	7,312
25	Sıvı	25	1,7	2986,11	105	0,3672
26	Sıvı	34	1,3	2986,11	142,6	0,4915
27	Sıvı	25	1,7	2986,11	105	0,3672
28	Sıvı	34	1,3	2986,11	142,6	0,4915
29	Sıvı	48	0,41	5,07	201	0,6768
30	Sıvı	66	1,46	5	276,4	0,9059
31	Sıvı	120	3,43	4,07	503,9	1,528
32	Sıvı	200	16,67	11,2	852,3	2,33
33	Sıvı	240	39,72	12,35	1038	2,701
34	Sıvı	164,5	12	117,29	695,3	1,987

**Şekil 2.** Üniteye bulunan eleman gruplarına ait kayıp kullanılabilir ekserji değerleri

Çizelge 3. Ünitenin her bir elemanına ait kayıp kullanılabilir ekserji değerleri

Ünite elemanları	Ekserji kayıpları (kW)
Kazan	217695,131
Yüksek basınç türbini (YBT)	1795,915
Alçak basınç türbini (ABT)	26534,464
Orta basınç türbini (OBT)	4975,432
Kondenser	1226,895
Kondenser tahliye pompası (KTP)	22,731
Ejektör	38,300
Glend kondenser	23,891
Alçak basınç ısıtıcısı-1(ABSI-1)	586,031
Alçak basınç ısıtıcısı-2(ABSI-2)	719,025
Alçak basınç ısıtıcısı-3(ABSI-3)	611,664
Kazan besleme tankı (ABSI-4)	546,637
Kazan besleme pompası (KBP)	244,790
Yüksek basınç ısıtıcısı-1(YBSI-1)	246,153
Yüksek basınç ısıtıcısı-2(ABSI-2)	1545,386



Şekil 3. Ünitenin her bir elemanına ait ikinci yasa verimleri

Şekil 3'te her bir ünite elemanı için ikinci yasa verimleri görülmektedir. İkinci yasa veriminin en düşük değeri %52,43 ile kazan için elde edilmiştir. En yüksek ikinci yasa verimine sahip ünite elemanın ise %97,73 ile 1 nolu yüksek basınç besleme suyu ısıtıcısı olduğu görülmektedir. Bunu

takip eden en yüksek verime sahip ünite elemanı %96,28 ile yüksek basınç türbinidir. Diğer ünite elemanlarının ikinci yasa verimleri büyükten küçüğe; orta basınç türbini (%93,24), glend kondenser (%91,06), kazan besleme pompası (%88,47), 4 nolu alçak basınç ısıtıcısı (%87,89),

kondenser (%87,28), 3 nolu yüksek basınç ısıtıcısı (%86,36), kondenser tahliye pompası (%85,97), 3 nolu alçak basınç ısıtıcısı (%77,89), 2 nolu alçak basınç ısıtıcısı (%73,82), ejektör (%72,12), 1 nolu alçak basınç ısıtıcısı (%67,38) ve alçak basınç türbini (%57,68) şeklinde sıralanmaktadır.

Çizelge 4'te bir ünite elemanına ait kayıp ekserji miktarının toplam ekserji kaybına oranı sunulmuştur. Ünitenin toplam ekserji kaybı 256812.444 kW olarak hesaplanmıştır. Ekserji kayıp oranı en fazla olan ünite elemanı %84,7681

ile kazandır. Türbin grubu için bu değer %12,9689 olduğu görülmektedir. Türbin grubundan sonra en fazla ekserji kayıp oranı %1,6568 ile ısıtıcı grubundadır. Bunu takip eden en yüksek kayıp oranı ise %0,477 ile kondenser için elde edilmiştir. Pompa grubunda ekserji kayıp oranı %0,1042'dir. En düşük ekserji kayıp oranı ise % 0,0242 ile yardımcı grupta meydana gelmiştir. Sistemin her bir elemanı teker teker ele aldığımızda ise en düşük ekserji kayıp oranının %0,0089 ile kondenser tahliye pompasında gerçekleştiği görülmektedir.

Çizelge 4. Ünitenin her bir elemanına ait ekserji kayıp oranları

Ünite elemanları	Ekserji kayıp oranı (%)
Kazan	84,7681
Yüksek basınç türbini (YBT)	0,6993
Alçak basınç türbini (ABT)	10,3322
Orta basınç türbini (OBT)	1,9374
Kondenser	0,4777
Kondenser tahliye pompası (KTP)	0,0089
Ejektör	0,0149
Glend kondenser	0,0093
Alçak basınç ısıtıcısı-1 (ABSI-1)	0,2282
Alçak basınç ısıtıcısı-2 (ABSI-2)	0,2800
Alçak basınç ısıtıcısı-3 (ABSI-3)	0,2382
Kazan besleme tankı (ABSI-4)	0,2129
Kazan besleme pompası (KBP)	0,0953
Yüksek basınç ısıtıcısı-1 (YBSI-1)	0,0958
Yüksek basınç ısıtıcısı-2 (ABSI-2)	0,6018
Toplam ekserji kaybı (KW)	256812,444

4. SONUÇLAR

Bu çalışmada Sivas Kangal Termik Santralinin 3. ünitesi için ekserji ve enerji analizi yapılmıştır. Ünite de bulunan 16 adet ana ünite elemanı için 34 adet düğüm noktasına ait ölçüm verileri kullanılarak ekserji kayıpları ve ikinci yasa verimleri hesaplanmıştır.

En fazla ekserji kaybının kazanda gerçekleştiği görülmektedir. Kazan içerisinde bulunan kızdırıcı boru yüzeylerinin kurum üfleme sistemi ile sürekli olarak temizlenmesi, kömür neminin azaltılması, kazana kömür değirmenleri aracılığıyla düzenli bir oranda kömür beslemesinin sağlanması ve hava yakıt oranının iyi ayarlanması gibi kazanda yapılacak iyileştirmelerin ekserji kaybını azaltacağı düşünülmektedir. Kazandan sonra en

fazla ekserji kaybının türbin grubunda meydana geldiği görülmüştür.

Kondenserde oluşan kayıpları azaltmak için kondenser içindeki boruların belli aralıklarla temizlenmesi gerektiği düşünülmektedir. En az ekserji kaybı yardımcı grup ve pompalarda meydana gelmiştir.

Elde edilen enerji ve ekserji analiz sonuçlarının santralin verimini artıracak çalışmalara katkı sağlayacağı düşünülmektedir.

5. TEŞEKKÜR

İlgili verileri sağlayan Kangal Termik Santral Elektrik Üretim A.Ş.'ye teşekkür ederiz.

6. KAYNAKLAR

1. IEA, Coal-Fired Electricity, <https://www.iea.org/reports/coal-fired-electricity>, Erişim Tarihi: 23.03.2023.
2. BP, 2022. Statistical Review of World Energy 2022, 57.
3. TEİAŞ, Kurulu Güç Raporu-Aralık 2022, <https://www.teias.gov.tr/kurulu-guc-raporlari>, Erişim Tarihi: 10.01.2023.
4. Altinkaynak, M., Güneş, S., Yakut, A.K., 2018. Bir Termik Santralin Enerji Analizi. Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi Uluslararası Teknolojik Bilimler Dergisi, 10 (3), 20-26.
5. Oktay, Z., 2009. Investigation of Coal-Fired Power Plants in Turkey and A Case Study: Can Plant. Applied Thermal Engineering, 29 (2-3), 550-557.
6. Khaieel, O.J., Ismail, F.B., Ibrahim, T.K., Hassan, S.H., 2022. Energy and Exergy Analysis of the Steam Power Plants: A Comprehensive Review on the Classification, Development, Improvements, and Configurations. Ain Shams Engineering Journal, (13), 3, 101640.
7. Arslan, O., 2005. Seyitömer Termik Santrali Birinci ve İkinci Yasa Çözümlenmeleri. Yüksek Lisans Tezi, Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 129.
8. Kaya, M., 2008. Buharlı Güç Çevrim Veriminin Ekserji Analiziyle Belirlenmesi. CBÜ Soma Meslek Yüksekokulu Teknik Bilimler Dergisi, 1, 9.
9. Erdem, H.H., Akkaya, A.V., Cetin, B., Dagdas, A., Sevilgen, S.H., Sahin, B., Teke, I., Gungor, C., Atas, S., 2009. Comparative Energetic and Exergetic Performance Analyses for Coal-Fired Thermal Power Plants in Turkey. International Journal of Thermal Science, 48 (11), 2179–2186.
10. Regulagadda, P., Dincer I., Naterer, G.F., 2010. Exergy Analysis of a Thermal Power Plant With Measured Boiler and Turbine Losses. Applied Thermal Engineering, 30 (8-9), 970–976.
11. Coşkun, A., Geredelioğlu, Ç., Bolattürk, A., Gökaslan, M. Y., 2013. Çayırhan Termik Santralinin Enerji ve Ekserji Analizi. 11. Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi, İzmir.
12. Ünal, F., Özkan, D. B., 2014. Tunçbilek Termik Santralinin Enerji ve Ekserji Analizi. Tesisat Mühendisliği, 143, 5–13.
13. Ozdil, N.F.T., Segmen, M.R., Tantekin, A., 2015. Thermodynamic Analysis of an Organic Rankine Cycle (Orc) Based on Industrial Data. Applied Thermal Engineering, 91, 43-52.
14. Ozdil, N.F.T., Pekdur, A., 2016. Energy and Exergy Assessment of a Cogeneration System in Food Industry: A Case Study. Int. J. Exergy, 20 (2), 254-268.
15. Ozdil, N.F.T., Tantekin, A., Erbay, Z., 2016. Energy and Exergy Analyses of a Fluidized Bed Coal Combustor Steam Plant in Textile Industry. Fuel, 183, 441–448.
16. Bayrakçeken, H.B., 2019. Doğal Gazlı Kombine Çevrimli Bir Santralin Ekserji Analizi ile İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Bülent Ecevit Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 176.
17. Altunbaş, F., 2020. Afşin Elbistan Termik Santralinin Enerji ve Ekserji Analizi. Yüksek Lisans Tezi, İnönü Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 97.
18. Dikili, K., Kopaç, M., Erdoğan, B., Topuz, A., 2021. Doğalgaz Yakıtlı Kombine Çevrim Santralinde Enerji ve Ekserji Analizi. Iğdır Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 11(3), 2268-2277.
19. Kopac, M., Hilalci, A., 2007. Effect of Ambient Temperature on the Efficiency of the Regenerative and Reheat Çatalağzı Power Plant in Turkey. Applied Thermal Engineering, 27, (8–9), 1377–1385.
20. Topal H.İ., Bayram B., Bayram, K., Erdoğan B., Kopaç, M., 2022. Kömür Yakıtlı Süper Kritik Termik Santralin Enerji ve Ekserji Analizi. Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi, 10, 788-801.