

Araştırma Makalesi – Research Article

Çevre Sıcaklığının Dolaşımli Akışkan Yataklı Kazanın Ekserji Performansı Üzerindeki Etkisi

Mesut YAZICI^{1*}, Ramazan KÖSE²

Geliş / Received: 06/10/2019

Revize / Revised: 19/11/2019

Kabul / Accepted: 09/12/2019

ÖZ

Sunulan bu çalışmada, Eskişehir'in Seyitgazi ilçesinde yer alan bir endüstriyel tesisteki 75 t/h buhar kapasiteli dolaşımli akışkan yataklı kazanın konvansiyonel ekserji analizi yapılmıştır. Yapılan analizde; çevre sıcaklığındaki değişimin, kazan ve hava ısıtıcısının ekserji performansına olan etkisi irdelenmiştir. Bunun için standart ölü hal koşulu 25°C, 101,325 kPa ve ölçüm değerlerinin ortalaması olarak 17,27°C, 89,4 kPa'ın yanı sıra 30°C, 28°C, 20°C, 15°C ve 12°C için hesaplamalar yapılmıştır. Dolaşımli akışkan yataklı kazan bölümler halinde incelenmesinden ziyade bir bütün olarak kabul edilmiştir. Hava ısıtıcısı ise kazandan ayrı olarak değerlendirilmiştir. Yapılan hesaplamalar sonucunda kazan ve hava ısıtıcısında gerçekleşen ekserji kayıpları belirlenmiştir. Ayrıca kazan ve hava ısıtıcısının ekserji verimleri hesaplanarak ekserji performansı ortaya çıkarılmıştır. Bu çalışma, dolaşımli akışkan yataklı kazanın ve hava ısıtıcısının ekserji performans kriterlerinin çevre sıcaklığındaki değişimden önemli ölçüde etkilendiğini göstermiştir.

Anahtar Kelimeler- Akışkan Yataklı Kazanlar, Ekserji Analizi, Ekserji Yıkımı, Ekserji Performansı

^{1*}Sorumlu yazar iletişim: mesut.yazici@dpu.edu.tr (<https://orcid.org/0000-0001-6379-8396>)

Enerji Sistemleri Mühendisliği, Kütahya Dumlupınar Üniversitesi, Simav Teknoloji Fakültesi Muradınlar Kampüsü, Simav

²İletişim: ramazan.kose@dpu.edu.tr (<https://orcid.org/0000-0001-6041-6591>)

Makine Mühendisliği, Kütahya Dumlupınar Üniversitesi, Evliya Çelebi Yerleşkesi Tavşanlı Yolu 10.km KÜTAHYA

Effect Ambient Temperature on Exergy Performance of Circulating Fluidized Bed Boiler

ABSTRACT

In this study, conventional exergy analysis of circulating fluidized bed boiler with 75 t/h steam capacity in an industrial facility located in Seyitgazi district of Eskişehir, Turkey was carried out. In this analysis, it was aimed to see the effect of the change in ambient temperature on the exergy performance of the boiler and air heater. For this purpose, exergy values for the standard dead state 25°C 101.325 kPa and the average measurement values of 17.27°C 89.4 kPa as well as 30°C, 28°C, 20°C, 15°C and 12°C were calculated. The circulating fluidized bed boiler is considered to be a whole rather than being examined in sections. The air heater was evaluated separately from the boiler. As a result of the calculations, exergy losses realized in boiler and air heater were determined. In addition, exergy performances of boiler and air heater was determined by calculating exergy efficiency. This study showed that exergy performance criteria of circulating fluidized bed boiler and air heater were significantly affected by the change in ambient temperature.

Keywords- *Fluidized Bed Boiler, Exergy Analysis, Exergy Destruction, Exergy Performance*

I. GİRİŞ

Enerji üretim proseslerinin ve enerji tüketen makinaların verimliliği sürdürülebilir enerji politikaları için önemli bir faktördür. Performans tespit çalışmalarında genellikle maliyetlerin düşürülmesi, kullanım ömrünün artması ve çevreye olan olumsuz etkilerin azaltılması için verimlilik seviyesi araştırılmaktadır. Bu çerçevede en çok tercih edilen yöntem enerji analizidir. Ancak bu yöntem karmaşık sistemlerde yetersiz kalmaktadır. Bu noktada ekserji analizi daha derinlemesine analiz yapma imkânı tanımaktadır. Ekserji analizi tasarım, optimizasyon ve gelişim aşamaları için etkili bir araçtır [1,2]. Geçmişte yapılan birçok bilimsel çalışmada kullanılan ekserji analizinin; bir sistemde gerçekleşen tersinmezliklerin yerini, şiddetini ve sebebini doğru bir şekilde tespit etmesiyle güvenilirliği ispat edilmiştir [3].

Akışkan yataklı kazanlar ve pülverize kömür yakma sistemlerinin bulunduğu güç santrallerinin performanslarının ölçülmesinde ekserji analizi en çok başvurulan yöntemlerden biridir [4-9]. Erdem vd. [10] Türkiye'deki 9 adet termik santralin performansını karşılaştırmalı olarak, Koreneos vd. [11] 300 MW'lık linyit yakan termik santralin, Pattanyak ve Sahu [12] 460 MW'lık işletme yükündeki pülverize kömür yakan termik santralin, Bolatturk vd. [13] Ankara-Çayırhan termik santralının, Ahmadi ve Toghraie [14] 200 MW'lık termik santralin, Si vd. [15] 1000 MW çift tekrar kızdırmalı ultra süper kritik güç santralının performanslarını ekserji analizi uygulayarak ölçmüşlerdir. Yapılan bu çalışmalar en büyük ekserji yıkımının kazanlarda gerçekleştiğini ortaya çıkarmıştır.

Ekserji analizi uygulanma amacı açısından karar verme mekanizması olarak da kullanılmaktadır. Bu çerçevede, birçok çalışmada sistem performansının olumlu etkilendiği rapor edilmiştir [16-20]. Xiong vd. [21], oksi-yanma prosesinin termodinamik özelliklerini tespit etmek için 600 MW'lık pülverize kömür yakan termik santrale ekserji analizi uygulamışlardır. Bu çalışmada konvansiyonel yanma ve oksi-yanma prosesinin ekserji yıkım ve verimliliği değerleri karşılaştırılmıştır. Han vd. [22], linyitin baca gazı ön kurutma işleminin enerji tasarrufu potansiyelini araştırmışlardır. Burada konvansiyonel ve ön kurutmalı yakma prosesinin enerji ve ekserji verimlilikleri karşılaştırılmıştır. Ekserji analizi incelenen sistem üzerinde yapılan değişikliklerin etkisini görmede avantaj sağlamaktadır. Elhelw vd. [23], kondenser basıncını ve IPT (Orta Basınç Türbini) giriş basıncındaki düşüşün, IPT ve HPT (Yüksek Basınç Türbini) girişindeki buhar sıcaklığındaki artışın sistem performansındaki etkisini ekserji analizi uygulayarak incelemişlerdir.

Bir sistemin ekserjisi enerjinin aksine tersinmezliklerden dolayı korunmamaktadır [24-29]. Sistemde gerçekleşen tersinmezliklerden dolayı ekserji yıkımları gerçekleşmektedir. İncelenen bir sistemin potansiyelinin geliştirilmesi için ekserji yıkım miktarı ve yerinin tespit edilmesi büyük kolaylık sağlamaktadır. Bu sebeple son yıllarda birçok yakma sistemi içeren tesisler ekserji yıkımı tespiti için bilimsel çalışmalara vaka olmuştur [30-32]. Wang vd. [33], 600 MW'lık süper kritik kömür yakan termik santralin ekserji yıkımı ve kirlenici emisyon özelliklerini araştırmışlardır. Ekserji analizi ile bir sistemin bütünü değerlendirilebildiği gibi sistemde bulunan her bir alt bölüm ayrı ayrı analiz edilebilmektedir. Böylece sistem içerisindeki verimsiz noktalar kolaylıkla tespit edilebilmektedir. Hepbaslı [34], petrol şeyli yakan dolaşımli akışkan yataklı kazanlar için ekserjistik model oluşturmuştur ve bunu işletme halindeki 65 t/h buhar kapasiteli petrol şeyli yakan dolaşımli akışkan yataklı kazana uygulamıştır. Çallak vd. [35], İzmir'de bir tekstil tesisinde yer alan akışkan yataklı kazan ve ısı geri kazanım buhar üreticinin gerçek verileri üzerinden ilk önce konvansiyonel ekserji sonra da ileri ekserji analizini gerçekleştirmişlerdir. Behbahanina vd. [36], bir buhar kazanının performansını değerlendirmek için ASME ptc.4.1 prensibine dayanan ekserji tespit metodunu önermişlerdir. Zhang vd. [37], kömürle çalışan endüstriyel kazanların çalışmasını iyileştirmek için bir ekserji analiz modeli oluşturmuşlar. Sharma ve Singh [38], bir kombine çevrim termik santralindeki kazanın kızdırıcı, evaporator ve ekonomizerini farklı ölül koşullarındaki ekserji kayıp ve verimlerini araştırmışlardır.

Ekserji terimi sistem ve etkileşimde olduğu çevre koşullarıyla ilgili bir kavramdır. Bu noktadan hareketle sıcaklık, basınç gibi çevresel koşullardaki değişimin ekserji verimi üzerindeki etkisi araştırılan bir diğer konudur. Kopac ve Hilalci [39] ortam sıcaklığının, bir termik santralin bileşenlerinin verimlilik hataları ve rasyonel verimliliği üzerine etkisini araştırmak için ekserji analizi uygulamışlardır. Regulagadda vd. [40], 32 MW kapasiteli kömür yakan termik santralının farklı sıcaklık, basınç ve akış oranlarındaki çalışma koşulları için kazan ve türbinin enerji ve ekserji analizi çalışmasını yürütmüşlerdir. Eskin vd. [41], 7,7 MW kapasiteli bir akışkan yataklı yakma sistemine sahip termik santrale termodinamiğin birinci ve ikinci yasa analizini

uygulamışlardır. Ayrıca ortam sıcaklığının ve fazla hava miktarının ikinci yasa verimi üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Ozdil vd. [42], Adana'da bulunan 6,5 MW'lık kuvvet santrali için ortam sıcaklığındaki değişimin birinci ve ikinci yasa verimliliklerini incelemişlerdir. Buna göre ortam sıcaklığı arttıkça akışkan yataklı kazanın ikinci yasa veriminde artış gözlemlenmiştir. Arslan [43], Seyitömer termik santralinde meydana gelen enerji kayıpları ve yerlerinin tespit edilerek verimliliğin artırılması için enerji ve ekserji analizi uygulamıştır. Bu çalışmaların yanı sıra Aljundi [44] 396 MW'lık termik santralin tüm alt sistemlerinin farklı çevre sıcaklıklarındaki ekserji verimi ve ekserji yıkımı değişimini araştırmıştır.

Sunulan bu çalışmada, ölü hal koşullarındaki değişimin 75 t/h buhar kapasiteli akışkan yataklı kazan ve hava ısıtıcısının ekserji verimlerine etkisi incelenmiştir. Ayrıca ekserji yıkımı, nispi ekserji yıkımı, yakıt tüketim oranı, üretkenlik eksikliği oranı ve ekserjetik gelişme potansiyeli miktarı gibi ekserji performans parametreleri araştırılmıştır. Çalışmada kazan alt bölümlere ayrılmamış ve bir bütün olarak kabul edilmiştir. Kazan ve hava ısıtıcısına ait gerçek veriler ölçümler yapılarak elde edilmiştir. Elde edilen veriler oluşturulan termodinamik modelde uygulanarak kazan ve hava ısıtıcısının ekserji analizleri yapılmıştır.

II. DOLAŞIMLI AKIŞKAN YATAKLI KAZANIN GENEL ÖZELLİKLERİ

Dolaşimli akışkan yataklı buhar kazanı, 4500 kPa/455°C kızdırıcı çıkış basınç ve sıcaklık şartlarında buhar üreten, doğal dolaşimli buhar kazanıdır [45]. Kazanın orta kısmı refrakter kaplamalı siklon ayırıcıdan oluşmaktadır. Siklon sonrası ikinci geçişte ısı transfer yüzeyleri yerleştirilmiştir. Baca gazı, ikinci geçiş sonrasında hava ısıtıcılarından ve ESP'den geçer ve daha sonra bacadan atmosfere salınmaktadır. Dolaşimli akışkan yataklı kazana ait tasarım değerleri Tablo 1'de verilmiştir [45]. Buna göre 130°C sıcaklıkta kazana giren besleme suyu 455°C sıcaklık, 45 bar basınçta saatte 75 ton debiye sahip buhara dönüşmektedir. Yatak sıcaklığı 850°C'yi bulurken kazandan çıkan baca gazının sıcaklığı 130°C'dir [45].

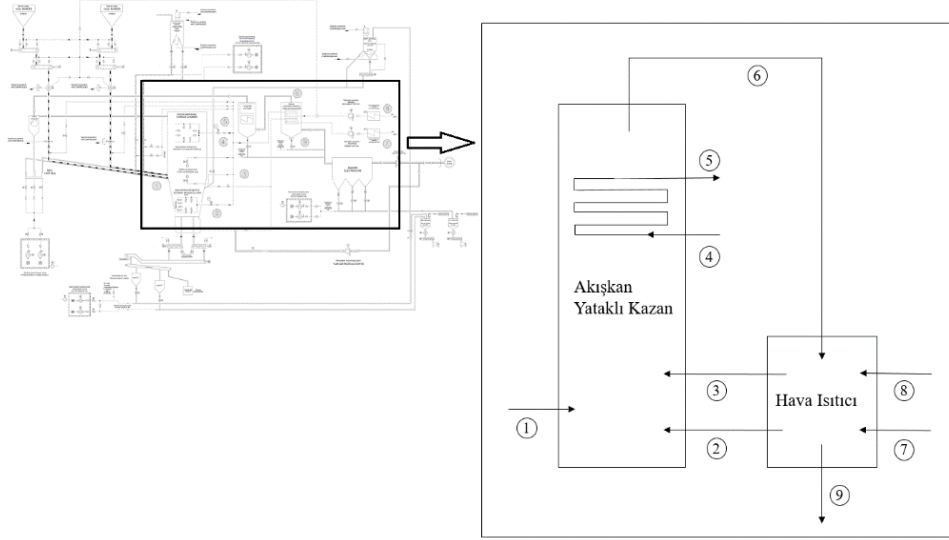
Tablo 1. Kazanın tasarım parametreleri

Ana Parametreler	Birim	Değer
Kazan Nominal Gücü	MWt	59,91
Buhar Çıkış Debisi	t/h	75
Buhar Basıncı	kPa	4500
Buhar Sıcaklığı	°C	455
Besleme Suyu Sıcaklığı	°C	130
Yatak Sıcaklığı	°C	850
Fan Çıkışı Hava Sıcaklığı	°C	35
Hava Isıtıcı Sonrası Sıcaklık	°C	200
Hava Fazlalık Katsayısı	-	1,2
Bacagazı Sıcaklığı	°C	130
Kazanın Verimliliği	%	91
Yük Değişim Meğili	%/dak	4
Kömür Tüketimi	kg/s	3,54
Kireçtaşı Tüketimi	kg/s	0,25

III. GERÇEK VERİLERİN ELDE EDİLMESİ

Bu çalışmada hesaplamalar gerçek veriler üzerinden yapılmıştır. Bunun için öncelikle performans değerlendirmesi için ölçüm alınacak noktalar tespit edilmiştir ve Şekil 1 de verilmiştir. Kazanın bütünü ve hava ısıtıcısı birbirlerinden ayrı kontrol hacimleri olarak kabul edilmiştir. Buna uygun olarak, kazana enerji girdisi sağlayacak olan yakıt (1), yanmaya katılan birincil (2) ve ikincil (3) yanma havası, ekonomizere giren besleme suyu (4) sisteme girenler olarak değerlendirmeye alınmıştır. Bunun yanı sıra kazandan çıkan baca gazı (6), kızdırıcıdan çıkan ana buhar (5) ise sistemden çıkanlar olarak belirlenmiştir. Hava ısıtıcısında ise ön ısıtmaya uğradıktan sonra hava ısıtıcısına gelen birincil (7) ve ikincil (8) yanma havası ve kazandan sonra hava ısıtıcısına giren baca gazı (6) sisteme girenler olarak değerlendirilmiştir. Sistemden çıkanlar ise ısıtılarak kazana gönderilen birincil (2) ve ikincil (3) yanma havası ve hava ısıtıcısından ESP'ye (Elektrostatik Filtre) gönderilen baca gazıdır (9). Performans test prosedürü ASME PTC-40 uyarınca gerçekleştirilmiştir [45]. Kazan 72 saatlik kararlı çalışma rejimini takiben, 4 saat boyunca tam yükte çalıştırılmıştır. Belirtilen zaman dilimi sürecinde performans testi için gerekli ölçümler gerçekleştirilmiştir. Besleme suyu giriş ve ana buhar çıkış debi, basınç ve sıcaklığı, birincil ve

ikincil yanma havasının kazana girişinde, hava ısıtıcı giriş ve çıkışındaki debi, basınç ve sıcaklık değerleri ölçülmüştür. Bu ölçümlerde debi ölçümü için Honeywell marka vortex 100 tipi dijital akış metre, basınç ölçümü için Autrol marka APT3200-G6M11E1191-M1 tipi ve APLISE marka APC-2000ALW tipi basınç ölçerler, sıcaklık ölçümü için ise Emko MARKA 1000/1EC/PT100 CLASS A tipi dijital sıcaklık ölçer kullanılmıştır. Ayrıca Testo 480 ölçüm cihazı ile hava emiş noktalarındaki ortam basıncı, sıcaklığı ve nemi ölçülmüştür. Test süresince kurum üfleme ve blöfler kapalı tutulmuş ve kazan işletme koşulları test esaslarını bozmayacak değerler arasında kalması sağlanmıştır. Kömür, kireçtaşı, cüruf ve külden analizler için ilgili standarda uygun olarak numuneler alınmıştır. Testo 350XL gaz analiz cihazı ile baca gazı emisyon ölçümleri yapılmıştır [45].



Şekil 1. Kazan ve hava ısıtıcısı basitleştirilmiş akış şeması

IV. EKSERJİ ANALİZİ

Termodinamiğin ikinci yasasına dayanan ekserji, enerjinin kullanılabilir kısmı olarak ifade edilmektedir. Bunun yanı sıra Rant [46], bir sistemin ekserjisini sistemi bir ısı rezervuarı ile dengeye getiren ve maksimum entropiye ulaşan bir işlem sırasında mümkün olan azami yararlı iş olarak tanımlamıştır. Bejan [47] ise, çevresiyle etkileşim halinde olan bir sistemde gerçekleşen ısı transferinin, sadece çevresiyle olması halinde elde edilebilecek maksimum teorik iş olarak belirtmiştir. Çengel [48], ekserjiyi belirli bir haldeki sistemden elde edilebilecek en fazla yararlı iş olarak tanımlamıştır.

Bir sistemin ekserji değeri ölü hal koşullarında sıfırdır. Bu çalışmada sistem ölü hal koşulu 25°C (T_0) ve 101,325 kPa (P_0) olarak kabul edilmiştir. Bunun yanı sıra hava ideal gaz olarak ve incelenen sistemin ise sürekli halde çalıştığı kabul edilmiştir. Bu çalışmada kazanın gerçek çalışma koşullarındaki performansını görmek için testlerden elde edilen sıcaklıkların ortalaması olan 17,27°C ve uzun yıllara dayalı sıcaklık ortalamalarına bağlı olarak 12°C, 15°C, 20°C, 28°C ve 30°C için hesaplamalar yapılmıştır. Nükleer, elektriksel, manyetik ve yüzey gerilmelerinin olmadığı termodinamik bir çevrimde fiziksel (\dot{e}_x^{PH}), kinetik (\dot{e}_x^{KN}), potansiyel (\dot{e}_x^{PT}) ve kimyasal ekserji (\dot{e}_x^{CH}) bileşenleri dikkate alındığında özgül ekserji (\dot{e}_x) Denklem 1'deki gibi ifade edilebilir,

$$\dot{e}_x = \dot{e}_x^{PH} + \dot{e}_x^{CH} + \dot{e}_x^{KN} + \dot{e}_x^{PT} \quad (1)$$

Kazan performansı incelemesinde sistemin hızında ve yüksekliğinde bir değişim olmadığı için bu çalışmada kinetik ve potansiyel ekserji hesaba katılmamıştır. Sonuç olarak her bir noktanın akış ekserjisi (\dot{E}_x) Denklem 2'deki gibi ifade edilir,

$$\dot{E}_x = \dot{m}(\dot{e}_x^{PH} + \dot{e}_x^{CH}) \quad (2)$$

\dot{m} kütleli akış debisini ifade etmektedir. Ele alınan sistemin veya düğüm noktasının özgül fiziksel ekserjisi Denklem 3'deki gibi tanımlanır. İncelenen düğüm noktalarında akışkanın ideal gaz olarak nitelendirildiği durumda ise o noktanın fiziksel ekserjisi hesabında Denklem 4 kullanılır,

$$\dot{e}_x^{PH} = (h - h_0) - T_0(s - s_0) \quad (3)$$

$$\dot{e}_x^{PH} = \bar{c}_p \left[(T - T_0) - T_0 \ln \frac{T}{T_0} \right] + R_g T_0 \ln \frac{P}{P_0} \quad (4)$$

h , s , T ve P sırasıyla entalpi, entropi, sıcaklık ve basıncı ifade etmektedir. \bar{c}_p molar özgül ısıyı, R_g üniversal gaz sabitini ifade etmektedir. 0 indisi ise ölü hal koşulundaki değerini ifade etmektedir. Yukarıda verilen \bar{c}_p değeri ise Denklem 5 kullanılarak hesaplanmıştır,

$$\bar{c}_{p,bg} = (x_{O_2} \times \bar{c}_{p,O_2}) + (x_{CO_2} \times \bar{c}_{p,CO_2}) + (x_{CO} \times \bar{c}_{p,CO}) + (x_{SO_2} \times \bar{c}_{p,SO_2}) + (x_{N_2} \times \bar{c}_{p,N_2}) \quad (5)$$

Kimyasal ekserji hesabında çevrenin ölü hal koşulları başlangıç durumu olarak ele alınmaktadır. Bu çalışmada ideal gazlar için molar kimyasal ekserji değeri Denklem 6 kullanılarak hesaplanır,

$$\bar{e}_x^{CH} = \sum_k x_k e_{x_k}^{CH} + RT_0 \sum_k x_k \ln x_k \quad (6)$$

Bu denklemde x_k terimi gaz karışımında bulunan bileşenin mol fraksiyonu ve $e_{x_k}^{CH}$ ise bileşenin standart molar kimyasal ekserjisini belirtmektedir. Bu çalışmada ayrıca suyun molar ekserjisi Denklem 7 kullanılarak hesaplanır,

$$\bar{e}_x^{CH} = RT_0 \ln \left(P_{doyma}(T_0) / P_\infty \right) \quad (7)$$

Literatürde kömürün kimyasal ekserjisini hesaplamak için bir çok ampirik formüller yer almaktadır. Bu ifadelerin kimi yanma denklemlerine kimileri ise kömürün içeriğindeki elementlerin molar fraksiyonlarına dayanmaktadır. İkinci yaklaşıma göre Szargut ve Strylska, kükürtün etkisini dikkate almayıp kömürün içerdiği su buharını hesaba kattıkları ifadeyi geliştirmişlerdir [26,49]. Bu ifadeye göre kömürün kimyasal ekserjisi Denklem 8 kullanılarak hesaplanır,

$$e_x^{CH} = \Phi_{kömür} (H_{u,kömür} + w h_{fg}) \quad (8)$$

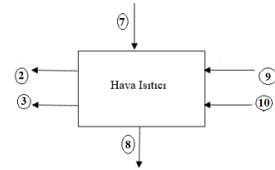
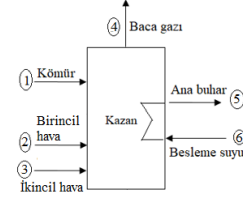
Verilen denklemde $H_{u,kömür}$ kazanda yakılan kömürün alt ısıl değerini, w kömürün içindeki nem oranını, h_{fg} ise su buharının entalpisini ve $\Phi_{kömür}$ ise yakıt ekserjisinin alt ısıl değere oranını vermektedir. Bu değer Denklem 9 kullanılarak hesaplanır [26],

$$\Phi_{kömür} = 1,0437 + 0,1812 \frac{h}{c} + 0,0610 \frac{o}{c} + 0,0404 \frac{n}{c} \quad (9)$$

Denklemde verilen c , h , o ve n ifadeleri kömürün içindeki bu elementlerin molar fraksiyonlarını ifade etmektedir. Belirlenen her bir düğüm noktasının ekserji değerleri belirlendikten sonra kazan ve hava ısıtıcısının ekserji dengeleri Tablo 2'de verildiği gibi oluşturulmuştur [45]. Enerjinin aksine ekserji korunmamaktadır. Sistemin çalışma koşullardan ölü hal koşullarına geline süreçte ekserji tersinmezliklerden dolayı yıkıma uğramaktadır. Yıkıma uğrayan ekserjinin miktarının ve yerinin bilinmesi incelenen sistemin gelişimi için yol gösterici olmaktadır. Bu sebeple incelenen her iki sistemdeki ekserji yıkım değerleri oluşturulan ekserji dengesinden çıkarılmıştır. Son olarak ise kazan için, Denklem 12 hava ısıtıcı için, Denklem 15 kullanılarak ekserji verimleri hesaplanmıştır.

Tablo 2. Kazan için ekserji dengesi, ekserji kaybı ve ekserji verimi denklemleri

Denklemler	No
Kazan	
Ekserji Dengesi $\dot{E}_{x_1} + \dot{E}_{x_2} + \dot{E}_{x_3} - \dot{E}_{x_y} = (\dot{E}_{x_5} - \dot{E}_{x_4}) + \dot{E}_{x_6}$	(10)
Ekserji Yıkımı $\dot{E}_{x_y} = (\dot{E}_{x_1} + \dot{E}_{x_2} + \dot{E}_{x_3}) - [(\dot{E}_{x_5} - \dot{E}_{x_4}) + \dot{E}_{x_6}]$	(11)
Ekserji Verimi $\psi_{kazan} = [(\dot{E}_{x_5} - \dot{E}_{x_4}) + \dot{E}_{x_6}] / [\dot{E}_{x_1} + \dot{E}_{x_2} + \dot{E}_{x_3}]$	(12)
Hava Isıtıcı	
Ekserji Dengesi $(\dot{E}_{x_6} - \dot{E}_{x_9}) - \dot{E}_{x_y} = (\dot{E}_{x_2} - \dot{E}_{x_7}) + (\dot{E}_{x_3} - \dot{E}_{x_8})$	(13)
Ekserji Yıkımı $\dot{E}_{x_y} = (\dot{E}_{x_6} - \dot{E}_{x_9}) - [(\dot{E}_{x_2} - \dot{E}_{x_7}) + (\dot{E}_{x_3} - \dot{E}_{x_8})]$	(14)
Ekserji Verimi $\psi_{h.ısıtıcı} = [(\dot{E}_{x_2} - \dot{E}_{x_7}) + (\dot{E}_{x_3} - \dot{E}_{x_8})] / (\dot{E}_{x_6} - \dot{E}_{x_9})$	(15)



Ekserji yıkımı ve ekserji veriminin yanı sıra incelenen sistemin performansını ortaya koymak için farklı parametreler incelenmiştir. Nispi ekserji yıkımı oranı (χ) ile bütün sistemde gerçekleşen toplam ekserji yıkımı içinde sistemi oluşturan alt bileşenlerin oranı belirlenebilir ve Denklem 16'daki gibi ifade edilir [29]. İncelenen alt sistemdeki ekserji yıkımının toplam giren ekserji değerine oranı yakıt tüketim oranını (δ) ifade etmektedir ve Denklem 17 kullanılarak hesaplanır [50]. Ayrıca incelenen alt sistemin üretkenlik eksikliği oranı (ζ), incelenen alt sistemde gerçekleşen ekserji yıkımının tüm sistemden çıkan ekserji miktarına oranıdır ve Denklem 18'deki gibi ifade edilir [51]. Son olarak, Van Gool [52] tarafından önerilen sistemin daha da geliştirilebileceği miktarı gösteren ekserjetik gelişme potansiyeli (IP_k) belirlenmiştir. Bunun için Denklem 19 kullanılmıştır [53-55].

$$\chi_k = \frac{\dot{E}_{x_{y,k}}}{\dot{E}_{x_{y,toplam}}} \quad (16)$$

$$\delta_k = \frac{\dot{E}_{x_{y,k}}}{\dot{E}_{x_{g,toplam}}} \quad (17)$$

$$\zeta_k = \frac{\dot{E}_{x_{y,k}}}{\dot{E}_{x_{\zeta,toplam}}} \quad (18)$$

$$IP_k = (1 - \psi_k)(\dot{E}_{x_g} - \dot{E}_{x_{\zeta}}) \quad (19)$$

Denklem 19'da yer alan ψ_k ekserji verimini ifade etmektedir. Bu değer kazan için Denklem 12 hava ısıtıcısı için Denklem 15 kullanılarak hesaplanır. y, g, ζ ve k indisleri sırasıyla yıkım, giren, çıkan ve incelenen her bir alt sistemi ifade etmektedir.

V. BULGULAR VE TARTIŞMA

Dolaşımli akışkan yataklı kazan ve hava ısıtıcısının ekserji analizi için gerçek veriler elde edilmiştir. Test sırasında yakılan kömürün analiz değerleri ile santralin tasarımında belirlenen kömür tasarım değerleri Tablo 3'de karşılaştırılmıştır [45]. Test sırasında yakılan kömür, tasarım değerlerine göre farklılık göstermektedir. Tasarım değerine göre alt ve üst ısıl değeri düşük, kükürt oranı yüksek, karbon oranı ise düşük çıkmıştır. Analizler sonucunda kömürün alt ısıl değeri 5149 kcal/kg, kül, nem ve kükürt oranları sırasıyla %13,65, %11,81 ve %1 olarak tespit edilmiştir. Ayrıca Tablo 4 yapılan ölçümler sonucunda elde edilen baca gazı bileşenlerinin kütle oranı (%), molar oranı (%), molar debi (kmol/s) ve standart molar kimyasal ekserji değerlerini göstermektedir [45].

Tablo 3. Kazanda yakılan kömürün tasarım ve analiz değerleri

Parametreler	Birim	Tasarım Değeri	Analiz Değeri
C	%	63,94	55,2
H ₂	%	3,33	3,94
O ₂	%	3,29	6,36
N ₂	%	2,51	2,08
S ₂	%	1	1,04
Nem	%	12,39	11,81
Alt Isıl Değer	kcal/kg	5655	5149
Üst Isıl Değer	kcal/kg	5901	5408

Tablo 4. Baca gazı ölçüm değerleri

Parametreler	Kütle Oranı (%)	Moleküler Kütle (kg/kmol)	Molar Oranı (%)	Molar debi (kmol/s)	Standart molar kimyasal ekserji (kJ/kmol) [36]
O ₂	3,330	32	3,25	0,02	3970
CO ₂	15,482	44,01	10,15	0,065	21.140
CO	0,015	28,01	1,7	1,07E-4	275.430
SO ₂	0,001	64,06	0,05	3,12E-6	303.500
N ₂	81,172	28,01	86,72	0,555	720

Belirlenen düğüm noktaları için yapılan sıcaklık, basınç ve debi ölçüm değerleri ve bu değerlerin termodinamik özellikleri Tablo 5’de verilmiştir [45]. Gerçek veriler üzerinden yapılan ekserji hesaplamalarında ölü hal koşulları değiştirilmiştir. Ekserji analizlerinde uygulanan standart ölü hal koşulu 25°C ve ortamda yapılan ölçümlerin ortalaması 17,27°C sıcaklıklarının yanı sıra santralin bulunduğu bölgenin iklimsel koşullarını da göz önünde bulundurarak 30°C, 28°C, 20°C, 15°C ve 12°C içinde hesaplamalar yapılmıştır. Farklı ölü hal sıcaklıklarına göre belirlenen düğüm noktalarının ekserji değerleri bir önceki bölümde oluşturulan metodoloji kullanılarak hesaplanmıştır. Bu noktalara ait ekserji değerleri Tablo 6’da verilmiştir. Ölü hal koşullarındaki değişimler kömürün ekserji değeri üzerinde herhangi bir değişime yol açmamıştır. Kömürün ekserji değerinin sahip olduğu kimyasal bileşim ve ısıl değeri ile ilişkili olduğu tespit edilmiştir. Referans çevre sıcaklık değerindeki değişimlerin baca gazı, ana buhar, besleme suyu ve yakma havası ekserji değerleri üzerinde ise değişimlere yol açmıştır. Sıcaklık değerindeki artış ana buhar ve besleme suyunun ekserji değerini artırmıştır. Ancak baca gazı, birincil yanma havası ve ikincil yanma havası akışlarının ekserji değerleri düşmüştür.

Tablo 5. Düğüm noktalarının termodinamik özellikleri

Nokta	Akışkan Tipi	Sıcaklık (°C)	Basınç (kPa)	Debi (kg/s)	Entalpi (kJ/kg)	Entropi (kJ/kg K)
0	-	25	101,325	-	104,83	0,3672
1	Kömür	11,12	101,325	2,92	-	-
2	Hava	180,41	101,325	12,1	455,43	-
3	Hava	171,47	101,325	3,97	446,32	-
4	Su	93,38	7232,5	18,74	391,27	1,2317
5	Buhar	450,34	4514,5	20,48	3325,007	6,8781
6	Baca gazı	229,84	101,325	19	215,08	-
7	Hava	35,75	101,325	12,1	309,3	-
8	Hava	30,58	101,325	3,97	303,95	-
9	Baca gazı	107,52	101,325	19	84,17	-

Tablo 6. Çevre sıcaklıklarındaki değişime göre düğüm noktalarının ekserji değerleri

No	Birim	12°C	15°C	17,27°C	20°C	25°C	28°C	30°C
1	kW	67.815,8	67.815,8	67.815,8	67.815,8	67.815,8	67.815,8	67.815,8
2	kW	524,5	501,8	485	465	429,1	408,1	394,3
3	kW	158,6	151,4	146	139,7	128,3	121,7	117,3
4	kW	1923,3	2326,9	2679,5	3047,2	3770,5	4228	4497,8
5	kW	29210,6	29.304,7	29.427,6	29.513,7	29.726	29879	29942,6
6	kW	5066,2	5025,3	4994,7	4957,7	4889,9	4851,5	4825,6
7	kW	86,9	78,7	72,7	65,8	53,9	47,3	43,1
8	kW	27,1	24,5	22,7	20,6	17,1	15,1	13,9
9	kW	4210,6	4186,6	4168,9	4147,3	4107,8	4086,4	4071,8

Tüm sıcaklık değerlerinde, kazanda kömürün yakılmasıyla 67.815,78 kW ekserji üretilmektedir. Hava ısıtıcısında ısınarak kazana giren birincil ve ikincil yanma havası 25°C sıcaklık değerinde sırasıyla 429,1 kW ve 128,3 kW ekserji girdisi sağlamaktadır. Kazana giren besleme suyu ve kazandan ısıyı alarak kızgın buhar haline gelen ana buharın aynı sıcaklık değerindeki ekserji değerleri sırasıyla 3770,5 kW ve 29.726 Kw olarak hesaplanmıştır. Kazanı terk ederek hava ısıtıcısına giren baca gazının ekserjisi ve hava ısıtıcısında ısısını birincil ve ikincil yanma havasına veren baca gazının ekserjisi sırasıyla 4889,9 kW ve 4107,8 kW'dır.

Kazan ve hava ısıtıcısına ait ekserji akış değerleri belirlendikten sonra ekserji performans parametreleri araştırılmıştır. Tablo 7 ve Şekil 2 kazan için farklı çevre sıcaklık değerlerindeki ekserji performans değerlerindeki değişimi göstermektedir. Görüleceği üzere çevre sıcaklığındaki artış ekserji verimini düşürmektedir. Bunun aksine ekserji yıkımı değeri, nispi ekserji yıkımı oranı, yakıt tüketim oranı, üretkenlik eksikliği oranı ve ekserjetik gelişme potansiyeli değerlerinde artışa yol açmaktadır. Standart ölü hal koşulunda (25°C, 101,325 kPa) ekserji verimliliği %45,11 olarak gerçekleşmiştir. Sıcaklık değeri 12°C'ye düştüğünde ekserji verimi %47,23'e kadar çıkmakta iken sıcaklık 30°C'ye çıktığında ise ekserji verimi %44,3'lere kadar düşmektedir. Bunun tersine standart ölü hal koşulunda ekserji yıkımı, nispi ekserji yıkımı oranı, yakıt tüketim oranı, üretkenlik eksikliği oranı ve ekserjetik gelişme potansiyeli değerleri sırasıyla 37.527,8 kW, %99,218, %54,27, %119,8 ve 20.597,8 kW olarak tespit edilmiştir.

Tablo 7. Kazan için farklı çevre sıcaklık değerlerindeki ekserji performans değerleri değişimi

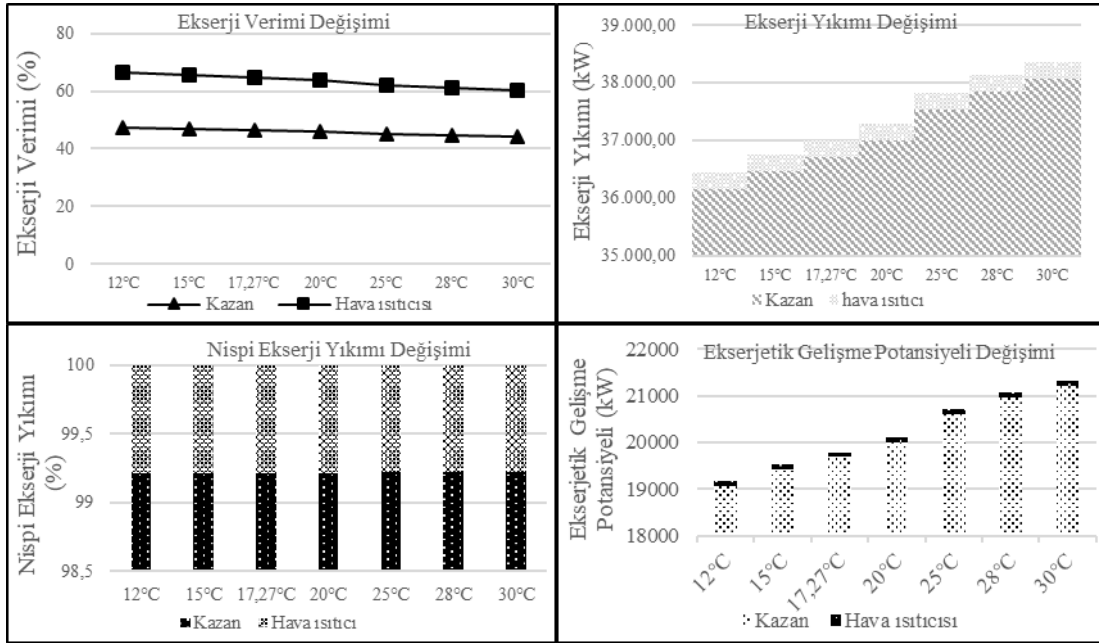
Parametreler	12°C	15°C	17,27°C	20°C	25°C	28°C	30°C
Ekserji Verimi (%)	47,23	46,74	46,38	45,93	45,11	44,63	44,3
Ekserji Yıkımı (kW)	36.145,4	36.465,9	36.704	36.996,3	37.527,8	37.843,1	38057
Nispi Ekserji Yıkım Oranı	0,99214	0,99215	0,99216	0,99217	0,99218	0,99219	0,9922
Yakıt Tüketim Oranı	0,521	0,526	0,53	0,534	0,54	0,55	0,551
Üretkenlik Eksikliği Oranı	1,09	1,12	1,13	1,15	1,19	1,22	1,24
Ekserjetik Gelişme Ptansiyeli (kW)	19073,1	19421,4	19682,2	20004,6	20597,8	20953,8	21197

Çevre sıcaklığı arttıkça hava ısıtıcısı ekserji verimi ve nispi ekserji yıkımı değerleri düşmüştür. Diğer yandan ekserji yıkımı, yakıt tüketim oranı, üretkenlik eksikliği ve ekserjetik gelişme potansiyeli miktarında artış görülmektedir. Standart ölü hal koşulunda hava ısıtıcısının ekserji verimi %62,19 ve ekserji yıkım miktarı ise 295,7 kW olarak hesaplanmıştır. Buna karşı bu koşullarda nispi ekserji yıkım oranı, yakıt tüketim oranı, üretkenlik eksikliği oranı ve ekserjetik gelişme potansiyeli miktarı ise sırasıyla %0,782, %0,428, %1,14 ve 115,8 kW olarak belirlenmiştir. Diğer sıcaklık değerlerindeki hava ısıtıcısının ekserji performans değerleri Tablo 8 ve Şekil 2'de verildiği gibidir.

Tablo 8. Hava ısıtıcısı için farklı çevre sıcaklık değerlerindeki ekserji performans değerleri değişimi

Parametreler	12 °C	15 °C	17,27°C	20°C	25°C	28°C	30°C
Ekserji Verimi (%)	66,51	65,58	64,86	63,96	62,19	61,09	60,31
Ekserji Yıkımı (kW)	286,5	288,7	290,2	292,1	295,7	297,7	299,2
Nispi Ekserji Yıkım Oranı	0,00786	0,00785	0,00784	0,00783	0,00782	0,00781	0,0078
Yakıt Tüketim Oranı	0,0041	0,0042	0,0042	0,0042	0,0043	0,0043	0,0043
Üretkenlik Eksikliği Oranı	0,0103	0,0105	0,0106	0,108	0,0112	0,0114	0,0115
Ekserjetik Gelişme Potansiyeli (kW)	95,9	99,4	102	105,3	111,8	115,8	118,8

Şekil 2'de görüleceği üzere, hava ısıtıcısının ekserji verimi kazanın bütünündeki ekserji veriminden daha yüksektir. Bu durumda kazanda yanma reaksiyonlarının gerçekleşmesiyle ortaya çıkan tersinmezliklerin, kazanın yüzeyinden kaybolan ısının yüzey alanıyla orantılı olarak daha büyük olmasının etkili olduğu değerlendirilmektedir. Nispi ekserji yıkımı oranları incelendiğinde, incelenen tüm sistemde kazanda yıkılan ekserji miktarı çok büyük bir üstünlük sağlamıştır. Bununla paralel olarak ekserjetik gelişme potansiyeli kazanda hava ısıtıcısına göre çok yüksek çıkmıştır. Bu durum, santralde yapılacak bakım ve verim artırma çalışmalarında önceliğin kazana verilmesi gerektiğini ortaya çıkarmıştır. Şekil 2'de görüleceği üzere ortam sıcaklığının standart referans çevre sıcaklığı 25°C'den aşağıya düştükçe ekserji verimi artırdığı ve ekserji yıkımını aşağıya çekmektedir.



Şekil 2. Kazan ve hava ısıtıcısının farklı çevre sıcaklığına göre ekserji performans değişimleri

SONUÇLAR

Bu çalışmada, Eskişehir'in Seyitgazi ilçesinde yer alan bir endüstriyel tesisteki 75 t/h buhar kapasiteli dolaşımli akışkan yataklı kazana konvansiyonel ekserji analizi uygulanmıştır. Kazan alt sistemlere ayrılmadan incelenmiştir. Sadece kazana verilen yanma havasını şartlandıran hava ısıtıcısı kazandan bağımsız olarak kabul edilmiştir. Kazan ve hava ısıtıcısının ekserji yıkım ve ekserji verimliliklerinin yanı sıra yakıt tüketim oranı, üretkenlik eksikliği, nispi ekserji yıkımı ve ekserjetik gelişme potansiyeli performans ölçüm parametreleri araştırılmıştır. Çalışmada ölü hal sıcaklık değerindeki değişimin (30°C, 28°C, 25°C, 20°C, 17,27°C, 15°C ve 12°C) ekserji performans parametreleri üzerindeki etkisi detaylı bir şekilde tartışılmıştır. Elde edilen sonuçlar aşağıda verildiği gibi özetlenmiştir.

Yapılan hesaplamalarda, ölü hal sıcaklığı arttıkça kazan ve hava ısıtıcısının ekserji verimi düşüş göstermiştir. Buna karşı olarak ise incelenen her iki sistemde ekserji yıkım değerinde artış yaşanmıştır. Elde edilen bu sonuç literatürle uyumludur [39-44]. Standart ölü hal koşulunda kazanın ekserji verimi %45,11 ekserji yıkım değeri ise 37,5 MW'tır. Bu sıcaklık değerinde kazanın ekserjetik gelişme potansiyeli, nispi ekserji yıkım değeri, yakıt tüketim oranı ve üretkenlik eksikliği değerleri sırasıyla 20,6 MW, %99,2, %54,2 ve %119,8'dir. Ölü hal sıcaklık değeri arttıkça kazan için bu dört parametre değerlerinde artış yaşanmaktadır. Hava ısıtıcısının ekserji verimi ve ekserji yıkım değerleri sırasıyla %62,19 ve 295,7 kW'dır. Ölü hal sıcaklık değerinde gerçekleşen artışa bağlı olarak hava ısıtıcısının nispi ekserji yıkım oranında azalma, diğer üç parametrede ise artış gerçekleşmektedir. Hava ısıtıcısının standart ölü hal sıcaklığında nispi ekserji yıkım oranı, yakıt tüketim oranı, üretkenlik eksikliği oranı ve ekserjetik gelişme potansiyeli değerleri sırasıyla %0,782, %0,428, %1,12 ve 111,8 kW'dır.

Yapılan bu çalışma, kazanın genel ekserji performansını ortaya çıkarması bakımından işletmecilere yol göstermiştir. Ancak kazanda gerçekleşen tersinmezliklerin kaynaklarının ve yerlerinin tespit edilmesi faydalı olacaktır. Bu bakımdan, sistem üzerinde gelecekte yapılacak çalışmalarda kazan, alt sistemlere ayrılarak ve ileri ekserji analizi uygulanarak incelenmelidir.

KAYNAKLAR

- [1] Kanoğlu, M., Çarpınlioğlu, M.Ö., Yıldırım, M. (2004) Energy and exergy analyses of an experimental open-cycle desiccant cooling system. *Applied Thermal Engineering*, 24, 919-932.
- [2] Rosen, M.A., Le, M.N., Dincer, I. (2005) Efficiency analysis of a cogeneration and district energy system. *Applied Thermal Engineering*, 25, 147-159.
- [3] Ozdemir, K., Hepbasli, A., Eskin, N. (2010) Exergoeconomic analysis of a fluidized-bed coal combustor (FBCC) steam power plant. *Applied Thermal Engineering*, 30, 1621-631.
- [4] Oktay, Z. (2009) Investigation of coal-fired power plants in Turkey and a case study: Can plant. *Applied Thermal Engineering*, 29, 550-557. doi:10.1016/j.applthermaleng.2008.03.025
- [5] Adibhatla, S., and Kaushik, S.C. (2014) Energy and exergy analysis of a super critical thermal power plant at various load conditions under constant and pure sliding pressure operation. *Applied Thermal Engineering*, 73, 51-65. <http://dx.doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2014.07.030>
- [6] Ganjehkaviri, A., Jaafar, M.N.M., Ahmadi, P., Barzegaravval, H. (2014) Modelling and optimization of combined cycle power plant based on exergoeconomic and environmental analyses. *Applied Thermal Engineering*, 67, 566-578. <http://dx.doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2014.03.018>
- [7] Zhang, C., Chen, S., Zheng, C., Lou, X. (2007). Thermo-economic diagnosis of a coal fired power plant. *Energy Conversion and Management*, 48, 405-419. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enconman.2006.07.001>
- [8] Ganapathy, T., Alagumurthi, Gakkhar, R.P., Murugesan, K. (2009). Exergy analysis of operating lignite fired thermal power plant. *Journal of Engineering Science and Technology Review*, 2 (1), 123-130
- [9] Gürtürk, M., and Oztop, H.F. (2016). Exergy analysis of a circulating fluidized bed boiler cogeneration power plant. *Energy Conversion and Management*, 120, 346-357. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enconman.2016.05.006>
- [10] Erdem, H.H., Akkaya, A.V., Cetin, B..., and Atas, S. (2009) Comparative energetic and exergetic performance analyses for coal-fired thermal power plants in Turkey. *International Journal of Thermal Sciences*, 48, 2179-2186. doi:10.1016/j.ijthermalsci.2009.03.007
- [11] Koroneos, C.J., Fokaides, P.A., Christoforou, E.A. (2014) Exergy analysis of a 300 MW lignite thermoelectric power plant. *Energy*:75, 304-311. <http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2014.07.079>
- [12] Pattanayak, L., and Sahu, J.N. (2015) Steady state modeling on energy and exergy analysis of a pulverized coal fired thermal power plant. *Asia-Pacific Journal Chemical Engineering*, 10, 876-884.
- [13] Bolatturk, A., Coskun, A., Geredelioglu, C. (2015) Thermodynamic and exergoeconomic analysis of Çayırhan thermal power plant. *Energy Conversion and Management*, 101, 371-378. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enconman.2015.05.072>
- [14] Ahmadi, G.R., and Toghraie, D. (2016) Energy and exergy analysis of Montazeri Steam Power Plant in Iran. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 56:454-463. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2015.11.074>
- [15] Si, N., Zhao, Z., Su, S..., and Xiang, J. (2017) Exergy analysis of a 1000 MW double reheat ultra-supercritical power plant. *Energy Conversion and Management*, 147, 155-165. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enconman.2017.05.045>
- [16] Vandani, A.M.K., Bidi, M., Ahmadi, F. (2015) Exergy analysis and evolutionary optimization of boiler blowdown heat recovery in steam power plants. *Energy Conversion and Management*, 106, 1-9 <http://dx.doi.org/10.1016/j.enconman.2015.09.018>

- [17] Kang, S., Li, H., Liu, L., Lei, J., Zhang, G. (2016) Exergy analysis of a novel CHP-GSHP coupling system. *Applied Thermal Engineering*, 93, 308-314. <http://dx.doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2015.09.039>
- [18] Zhou, L., Xu, G., Zhao, S., Xu, C., Yang, Y. (2016) Parametric analysis and process optimization of steam cycle in double reheat ultra-supercritical power plants. *Applied Thermal Engineering*, 90, 652-660. <http://dx.doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.01.047>
- [19] Fu, C., Anantharaman, R., Jordal, K., Gundersen, T. (2015). Thermal efficiency of coal-fired power plants: From theoretical to practical assessments. *Energy Conversion and Management*, 105, 530-544. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enconman.2015.08.019>
- [20] Topal, H., Taner, T. Naqvi, S.A.H., Altınsoy, Y., in, E., Ozkaymak, M. (2017). Exergy analysis of a circulating fluidized bed power plant co-firing with olive pits: A case study of power plant in Turkey. *Energy*, 140, 40-46. <http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2017.08.042>
- [21] Xiong, J., Zhao, H., Zheng, C. (2011) Exergy analysis of a 600 MWe oxy-combustion pulverized-coal-fired power plant. *Energy Fuels*, 25, 3854-3864.
- [22] Han, X., Liu, M., Wu, K., Chen, W., Xiao, F., Yan, J. (2016) Exergy analysis of the flue gas pre-dried lignite-fired power system based on the boiler with open pulverizing system. *Energy*, 106, 285-300. <http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2016.03.047>
- [23] Elhelw, M., Dahma, K.S., Attia, A. (2019) Utilizing exergy analysis in studying the performance of steam power plant at two different operation mode. *Applied Thermal Engineering*, 150, 285-293. <https://dx.doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.01.003>
- [24] Arslan, O., Kose, R. (2006) Thermoeconomic optimization of insulation thickness considering condensed vapor in buildings. *Energy and Building*, 38, 1400-1408. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2006.02.012>
- [25] Dincer, I., Rosen, M.A. (2007) Exergy, environment and sustainable development. *Exergy*. Amsterdam: Elsevier;36-59.
- [26] Szargut, J., Morris, D.R., Steward, F.R. (1988) *Exergy analysis of thermal chemical and metallurgical processes*. New York: Hemisphere;
- [27] Wall, G. (1977) *Exergy-a useful concept within resource accounting*. Göteborg, Sweden: Institute of Theoretical Physics. Report No:77-42.
- [28] Rosen M.A., Dincer, I., Kanoglu, M. (2008) Role of exergy in increasing efficiency and sustainability and reducing environmental impact. *Energy Policy*, 36(1), 128-37.
- [29] Turan, O. (2015) An exergy way to quantify sustainability metrics for a high bypass turbofan engine. *Energy*, 86, 722-736. <http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2015.04.026>
- [30] Zhu, Y., Zhai, R., Peng, H., Yang, Y. (2016) Exergy destruction analysis of solar tower aided coal-fired power generation system using exergy and advanced exergetic methods. *Applied Thermal Engineering*, 108, 339-346. <http://dx.doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.07.116>
- [31] Naterer, G.F., Regulagadda, P., Dincer, I. (2010) Exergy analysis of a thermal power plant with measured boiler and turbine losses. *Applied Thermal Engineering*, 30, 970-976
- [32] Oktay, Z. (2009) Investigation of coal-fired power plants in Turkey and a case study: can plant. *Applied Thermal Engineering*, 29, 550-557

- [33] Wang, N., Wu, W., Yang, Y., Yang, Z., Fu, P. (2014). Exergy evaluation of a 600 MWe supercritical coal-fired power plant considering pollution emissions. *Energy Procedia*, 61, 1860-1863. <http://dx.doi.org/10.1016/j.egypro.2014.12.229>
- [34] Hepbaslı, A. (2009). Exergetic modeling of oil shale-fired circulating fluidized bed systems. *Energy Sources, Part A*, 31, 325-337. <http://dx.doi.org/10.1080/15567030801901182>
- [35] Callak, M., Balkan, F., Hepbasli, A. (2015). Avoidable and unavoidable exergy destructions of a fluidized bed coal combustor and a heat recovery steam generator. *Energy Conversion and Management*, 98, 54-58. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enconman.2015.03.039>
- [36] Behbahnia, A., Ramezani, S., Hejrandoost, M.L. (2017) A loss method for exergy auditing of steam boilers. *Energy*, 140, 253-260. <http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2017.08.090>
- [37] Zhang, Q., Yi, H., Yu, Z.,..., Shen, B. (2018) Energy-exergy analysis and energy efficiency improvement of coal-fired industrial boilers based on thermal test data. *Applied Thermal Engineering*, 144, 614-627. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2018.08.069>
- [38] Sharma, M., and Singh, O. (2016) Exergy analysis of dual pressure HRSG for different dead states and varying steam generation states in gas/steam combined cycle power plant. *Applied Thermal Engineering*, 93, 614-622. <http://dx.doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2015.10.0132>
- [39] Kopac, M., and Hilalci, A. (2007) Effect of ambient temperature on the efficiency of the regenerative and reheat Çatalağzı power plant in Turkey. *Applied Thermal Engineering*, 27, 1377-1385
- [40] 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, 970-976. <http://dx.doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2010.01.008>
- [41] Eskin, N., Gungor, A., Özdemir, K. (2009). Thermodynamic analysis of a FBCC steam power plant. *Energy Conversion and Management*, 50, 2428-2438. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enconman.2009.05.035>
- [42] 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. <http://dx.doi.org/10.1016/j.fuel.2016.06.091>
- [43] Arslan, O. (2005) *Seyitömer termik santralı birinci ve ikinci yasa çözümlenmeleri*. Yüksek Lisans Tezi, Kütahya Dumlupınar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kütahya.
- [44] Aljundi, I.H. (2009) Energy and exergy analysis of a steam power plant in Jordan. *Applied Thermal Engineering*, 29, 324-328. doi:10.1016/j.applthermaleng.2008.02.029
- [45] Yazıcı, M. (2017) *Dolaşımli bir akışkan yataklı kazanın enerji ve ekserji analizi*. Yüksek Lisans Tezi, Kütahya Dumlupınar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kütahya.
- [46] Rant, Z. (1956). *Exergy, a new word for technical available work*. *Forsch. Ing. Wis*, 22(1), 36-37.
- [47] Bejan, A., Tsatsaronis, G., Moran, M.J. *Thermal Design and Optimization*; Wiley; New York, 1996.
- [48] Çengel, Y.A., and Boles, M.A. (2008) *Thermodynamics on Engineering Approach (6th edition)*. P.445. ISBN 978-0-07-125771-8
- [49] Çomaklı, K., Karlı, S., Çomaklı, Ö., Yılmaz, M. (2004) Termal sistemlerin ekserjetik analizi. *Termodinamik Dergisi*, 94-98.
- [50] Ballı, O. (2017) Advanced exergy analyses of an aircraft turboprop engine (TPE). *Energy*, 124, 599-612. <http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2017.02.121>

- [51] Yazici, H. (2016) Energy and exergy based evaluation of the renovated Afyon geothermal district heating system. *Energy and Buildings*, 127, 794-804. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.06.036>
- [52] Van Gool, W. (1992) Exergy analysis of industrial processes. *Energy*, 17, 791-803.
- [53] Şöhret, Y., Açıklalp, E., Hepbasli, A., Karakoc, T.H. (2015) Advanced exergy analysis of an aircraft gas turbine engine: Splitting exergy destructions into parts. *Energy*, 90, 1219-1228. <http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2015.06.071>
- [54] Coban, K., Colpan, C.O., Karakoc, T.H. (2017) Application of thermodynamic laws on a military helicopter engine. *Energy*, 140, 1427-1436. <http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2017.07.179>
- [55] Eboh, F.C., Ahlström, P., Richards, T. (2019) Evaluating improvements in waste-to-energy combined heat and power plant. *Case Studies in Thermal Engineering*, 14, 100476. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2019.100476>