



Gaz Yakıtlı Bir Turbo Blower Santralinin Performans Analizi

Alper ERGÜN^{1,*}, Ümit ARSLAN², Mehmet ÖZKAYMAK¹

¹Karabük Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Enerji Sistemleri Mühendisliği Bölümü, 78050, 100.Yıl/KARABÜK

²Karabük Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Enerji Sistemleri Mühendisliği ABD, 78050, 100.Yıl/KARABÜK

Öz

Demir-çelik tesisleri bünyesinde birbirinden farklı birçok alt tesisi barındırmaktadır. Bu tesislerin en önemli ekipmanı demir cevherinin işlendiği yüksek fırınlardır. Bu tesise yüksek basınçta yakma havası sağlanması gerekir ve bu hava turbo blower ile sağlanmaktadır. Turbo blower temelde bir enerji santralidir ve türbin kısmına yüksek basınçta hava sağlayacak bir kompresör akuple edilmiştir. Bu çalışmada, entegre demir çelik fabrikalarında üretim sırasında atık gaz olarak ortaya çıkan yüksek fırın ve kok gazının yakıt olarak kullanıldığı bir santralin ekserji analizi yapılmıştır. Ekserji analizinde proses içindeki her bir ekipmanın ekserji yıkımları ve ekserji verimleri hesaplanmıştır. Çalışmanın sonunda sistemin toplam iyileştirme potansiyeli 54717.427 kW genel sistem verimi ise %27.6 olarak tespit edilmiştir.

Makale Bilgisi

Başvuru: 31/01/2017
Düzeltilme: 02/03/2017
Kabul: 03/03/2017

Anahtar Kelimeler

Demir çelik
Enerji santrali
Ekserji analizi
Turbo blower

Keywords

Iron and steel
Power plant
Exergy analysis
Turbo blower

Performance Analysis of Gas Fired Turbo Blower Power Plant

Abstract

Iron and steel production has huge importance in industrializing countries. Various sub-plants have been located in the iron and steel plants. The significant equipment of those plants is the blast furnaces where iron ore is melted and processed. The blast furnaces need high pressure combustion air to perform burning process and the turbo blower supplies this combustion air. Turbo blower is mainly a kind of power plant and a compressor is connected to the turbine section for providing high pressure air. In this study, an exergy analysis of a power plant that uses waste gasses, such as blast furnace gas and coke breeze gas, as a fuel during production process in integrated iron and steel plants was performed. Exergy destructions and efficiencies were calculated for all equipment. At the end of the study total improvement potential of system and general system efficiency were calculated as 54717.427 kW and 27.6 % respectively

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Enerji günümüz dünyasında en büyük ihtiyaçların başında gelmektedir. Dünya nüfusunun artması ve gelişen sanayi ile birlikte enerjiye olan talepte giderek artmış ve ülkeler için en büyük gelişmişlik göstergesi olmuştur. Birincil enerji kaynaklarının tükenebilir olmasından dolayı enerjinin verimli kullanılması giderek daha büyük önem kazanmış ve enerji politikaları tekrar gözden geçirilmeye başlanmıştır. Bilimsel yöntemlerle desteklenen ve analiz edilen enerji sistemleri hem daha verimli kullanılmaya başlanmış hem de enerji tüketimini minimuma indirmiştir. Enerji kullanımı sanayide birçok alanda karşımıza çıkmaktadır. Bu alanlardan bir tanesi de demir-çelik üretimidir. Günümüzde entegre demir-çelik üretim sistemleri ülkemiz için en önemli tesislerin başında gelmektedir. Türkiye demir-çelik üretiminde dünyada 8., Avrupa da ise 2. sırada yer almaktadır [1]. Demir çelik üretiminde en önemli ekipman yüksek fırındır. Yüksek fırında demir üretimi için yüksek basınçta yakma havası gerekmektedir. Bu hava genellikle bir türbin ve bu türbine akuple kompresör aracılığı ile temin edilmektedir. Blower olarak adlandırılan bu sistem, demir-çelik üretiminde oldukça yüksek enerji gereksinimine ihtiyaç duyan bir santraldir. Bu santralin enerji etüdünün doğru yapılması son derece önemlidir. Günümüzde enerji santrallerinde genellikle termodinamiğin I. kanunu kullanılarak enerji analizleri yapılmaktadır. Fakat birçok çalışmada, sadece I.

*İletişim yazarı, e-mail: alperergun@karabuk.edu.tr

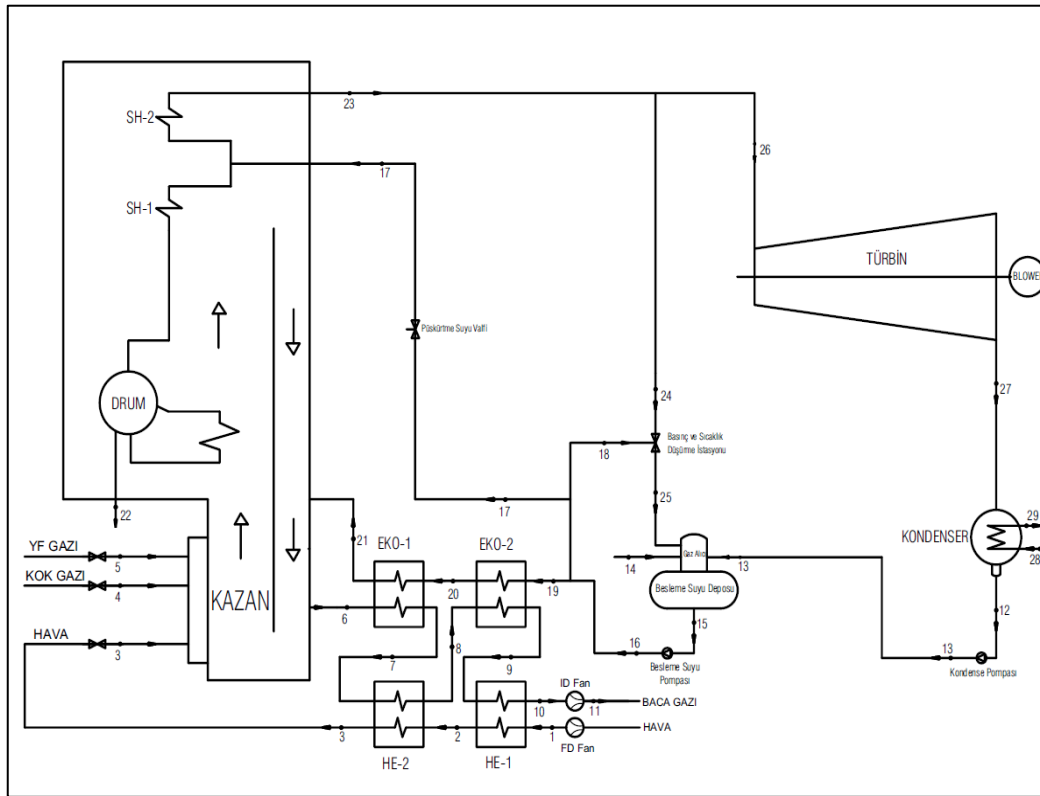
kanunun yeterli olmadığı ve II. kanuna dayalı ekserji analizlerinin de yapılması gerektiği vurgulanmaktadır [2]. Yazıcı ve Selbaş [3], çalışmasında bir buharlı güç santralının enerji ve ekserji analizini yapmıştır. 500 MW gücündeki buharlı güç santraline termodinamiğin birinci kanunu uygulanarak enerji denklemleri yazılmış, buhar türbininden gerekli gücün elde edilebilmesi için farklı kazan sıcaklıklarında kazana verilen ısı, güç akışkanının debisi, pompa gücü ve yoğunlaştırıcıdan soğutma suyuna aktarılan ısı miktarları ayrı ayrı hesaplanmıştır. Buharlı güç santralının ana elemanları olan kazan ve yoğunlaştırıcıya termodinamiğin ikinci kanunu uygulanmış, bu sistem elemanlarının ekserji analizleri yapılmıştır. Sistemin toplam tersinmezliği hesaplanmış ve en fazla tersinmezlik üreten sistem elemanını yoğunlaştırıcı olarak belirlemişlerdir. Rahim ve Gündüz [4] tasarladıkları bir ısı-güç (kojenerasyon) çevrim sistemine termodinamiğin birinci ve ikinci yasası (ekserji analizi) uygulayarak, santraldeki kayıpların belirlenmesi hedeflenmiştir. Çalışmanın kendi elektrik üretimini yapmak isteyen endüstriyel kuruluşlar için oldukça önemli ve verimli olduğunu belirterek, bu tarz sistemlerin giderek tükenen fosil yakıtlardan tasarruf edildiği ve küresel ısınma riskini azalttığını tespit etmişlerdir. Filiz, tarafından yapılan çalışmada [5], Kardemir A.Ş.'de bulunan, yakıt olarak demir çelik üretimi sırasında açığa çıkan atık gazlardan kok gazı, konverter gazı ve yüksek fırın gazının yakıldığı gaz yakıtlı bir buhar kazanında enerji, ekserji ve eksergoekonomik analizler gerçekleştirilerek kazanın performansı değerlendirilmiştir. Çalışmanın sonunda, enerji ve ekserji verimleri sırasıyla % 91 ve % 46 olarak tespit etmişlerdir. Eyidoğan vd. [6] bir sanayi kuruluşunun LNG (sıvılaştırılmış doğalgaz) yakıtlı haddehane tav fırınında enerji verimliliği çalışması yapmışlardır. Fırının işletme koşullarındaki sıcaklık, basınç, hız ve yanma gazı gibi parametreler ölçülerek elde edilen bu veriler ile kütle ve enerji dengesi çözümlerini yapmışlardır. Çalışmanın sonunda; fırın verimini %52.76 olarak tespit etmiş ve başlıca verim kayıplarının; fırının yüksek hava fazlalık katsayısıyla çalıştırılması, reküperatör ısı transfer yüzey alanının yetersiz kalması ve fırın yüzeyi ısı kayıplarından kaynaklandığını belirtmişlerdir. Uysal tarafından yapılan çalışmada [7], Zonguldak Çatalağzı'nda kurulu bulunan 160 MW kapasiteli termik santralin ekserji ve termoekonomik analizi yapılarak performansı değerlendirilmiştir. Ekserji analizinde, sistem ve bileşenleri için ekserji verimleri, ekserji yıkımları ve iyileştirme potansiyellerini hesaplanmıştır. Ekserji analizi sonucunda, sistemde en düşük ekserji verimine sahip ekipmanları sırasıyla % 29.95 ile kondenser ve % 33.24 ile kazan olduğunu tespit etmiş, sistemin toplam ekserji verimini ise %39.89 olarak hesaplamıştır. Sistemin toplam iyileştirme potansiyelini ise 130903.74 kW olarak tespit etmiştir. Filiz vd. [8], çalışmasında Kardemir'de bulunan, yakıt olarak demir çelik üretimi sırasında açığa çıkan atık gazlardan kok gazı, konverter gazı ve yüksek fırın gazının yakıldığı gaz yakıtlı bir buhar kazanının enerji ve ekserji analizi yardımıyla performansını değerlendirmiştir. Kazan açık sistem olarak tek bir ünite halinde ele alınmış ve buna göre enerji ve ekserji analizlerini yapmıştır. Kazanın enerji ve ekserji analizi sonucunda, enerji veriminin % 91, ekserji veriminin ise % 46 olduğu bulunmuştur. Enerji kaybının 6445.5 kW, ekserji yıkımının ise 21185.81 kW olduğu belirlenmiştir. Ünal ve Özkan [9] Türkiye'de çalışmakta olan Tunçbilek Termik Santrali, ünite ekipmanlarının her birinin termodinamik analizini yaparak değerlendirmişlerdir. Termik santral ünitesinde belirlenen yirmi yedi düğüm noktasının termodinamik özelliklerine bağlı olarak enerji ve ekserji değerleri hesaplanmıştır. Bulunan sonuçlar ile ekipmanların ayrı ayrı enerji ve ekserji dengeleri kurularak ortalama kayıp ve tahrip olan enerji ve ekserjiler hesaplanmış, kayıp enerji oranı ve yok olan ekserji oranı bulunmuştur. Çalışmanın sonuçları grafik olarak verilmiştir. Buna göre, en yüksek enerji kaybı oranı ve en yüksek ekserji kaybı oranı olan ekipman sırasıyla %71.1 ve %79.5 ile kazan olarak bulunmuştur. Elde edilen termodinamik özellikler yardımıyla Termik Santral'in ısı ve ikinci yasa verimleri sırasıyla %32.3 ve %75.1 olarak bulunmuştur. Özkaymak [10] Bursa ilindeki BOSEN enerji santralinde bulunan kojenerasyon tesisinden alınan işletme verileri aracılığıyla, enerji ve ekserji analizleri yapmış ve santralde her ünitenin giriş ve çıkışlarındaki enerji ve ekserji değerlerini hesaplamıştır. Bu değerlere bağlı olarak kayıp enerji ve ekserji değerlerini belirlemiştir. Her bir ünitenin enerji ve ekserji kayıpları birbirleriyle karşılaştırarak, tesisdeki toplam enerji kaybını 3974.34 kW ve toplam ekserji kaybını 18758.03 kW olarak tespit etmiştir. Tesis üzerinde yapılan enerji ve ekserji analizi sonucunda en büyük enerji kaybı buhar türbininde (2781.4 kW), ekserji kaybı ise yine buhar türbininde (9034.87 kW) olduğunu tespit etmiştir. Bu sonuçlara göre, verimliliğin artırılması için iyileştirme çalışmalarının türbinde yapılması gerektiğini belirtmiştir. Atif ve Al-Sulaiman [11] güneş kuleli sistem ile çalışan süper kritik bir CO₂ yeniden sıkıştırılmalı brayton çevriminin enerji ve ekserji analizini yapmışlardır. Yapılan çalışmada geliştirilen model Suudi Arabistan da ki 6 farklı şehir için uygulanmıştır. Kaushik vd. tarafından yapılan çalışmada [12], kömür ve gaz ile çalışan termik santraller üzerinde yapılan çalışmalar ayrıntılı bir şekilde incelenmiştir. Enerji ve ekserji analizleri karşılaştırılarak mevcut santrallerde daha fazla araştırma ve iyileştirme önerilerine ışık tutacağını belirtmişlerdir. İbrahim vd. [13] bir gaz türbini santralının enerji ve

ekserji analizi ile ilgili yaptıkları çalışmada, enerji analizinin niceliksel, ekserji analizinin ise daha niteliksel olduğunu belirtip, termodinamiğin I. ve II. kanunu kullanarak, gaz türbini güç santrali için bir model geliştirmişlerdir. Sistemdeki bütün ekipmanların ekserji yıkımlarını tespit ederek en yüksek yıkım değerini yanma odasında tespit etmişlerdir. Ayrıca sistemin enerji ve ekserji verimini sırasıyla % 34.3 ve % 32.4 olarak hesaplamışlardır. Yapılan literatür taramasında daha önce demir-çelik tesislerinde bulunan enerji santrallerinde çok fazla çalışma yapılmadığı ve yapılan çalışmaların hiç birinde turbo blower'ın olmadığı görülmüştür.

Yapılan bu çalışmada Karabük ilinde bulunan bir Demir-Çelik fabrikası bünyesindeki gaz yakıtlı, 100 t/h buhar kapasiteli buhar kazanı ve 24.071 MW güç üreten bir Turbo Blower içeren enerji santralinin ekserji analizi yapılmıştır. Çalışma sonunda bulunan sonuçlar birbirleri ile karşılaştırılmış ve gerekli öneriler verilmiştir.

2. SİSTEM TANIMI VE ÖZELLİKLERİ (SYSTEM DESCRIPTION AND PROPERTIES)

Bu çalışmada incelenen sistem, Karabük ilinin en büyük sanayi kuruluşu olan bir Demir-Çelik fabrikası bünyesinde bulunan, yakıt olarak demir üretim süreci sırasında ortaya çıkan yüksek fırın gazı ve kok gazını kullanan, ana ekipman olarak 100 t/h buhar kapasiteli buhar kazanı ve maksimum 24.071 MW güç üreten Turbo Blower içeren bir enerji santralidir. Santralin kuruluş amacı 2014 yılında yatırımı tamamlanan 5 Nolu Yüksek Fırın tesisindeki demir üretimi için gerekli olan yüksek debili ve basınçlı yakma havasını temin etmektir. Bu nedenle prosesin en sonundaki ekipman bir buhar türbinine akuple olan kompresör diğer adıyla "Blower" dır. Sistemin akış şeması Şekil 1 de görülmektedir.



Şekil 1. Sistemin Akış Şeması.

Sistemde bulunan buhar kazanı su borulu, gaz yakıtlı çalışan bir kazandır ve 505 °C sıcaklıkta 65 bar basınçta 100 t/h buhar kapasitesine sahiptir. Kazan yakma havası FD fan aracılığıyla temin edilerek, hava ekonomizeri ile baca gazı içinde bulunan yanma ürünlerinin sıcaklığı aracılığıyla ısıtılır. Kazandan açığa çıkan baca gazları ise ID fan ile emilerek dışarı atılır. Kazanda elde edilen buhar, termik enerjinin mekanik enerjiye dönüştürüldüğü buhar türbinine gönderilmektedir. 505 °C sıcaklık ve 65 bar basınçtaki buhar enerjisini, buhar türbinin ilk genişleme alanından rotor üzerindeki kanatlara verir ve yoğunlaşma basıncına kadar genişler. Çürük buhar türbin gövdesinden kondensere geçer. Ardından kondensere gönderilen

akışkan bu noktada soğutma suyu yardımı ile yoğuşturulup sıkıştırılmış sıvı fazına geçmektedir. Bu noktada kondenser pompası yoğuşan suyu emerek kazan besleme deposuna göndermektedir. Sistemde kullanılan besleme deposu ve degazör buhar kazanının ihtiyacı olan kazan besi suyunu depolayıp, bu suyu kazan ekonomizer girişi öncesi istenen giriş sıcaklığına getirerek su içerisinde istenmeyen ve çözünmemiş gazları uzaklaştırmaktadır. 15 noktasında besleme suyu pompası tarafından emilen su, kazanın buhar üretimi için ihtiyacı olan basınçlandırma görevini yapmaktadır. Sistemde kullanılan basınç ve sıcaklık düşürme istasyonu, kazan çıkış kollektöründeki yüksek sıcaklık ve yüksek basınçlı buharı, yardımcı ekipmanlar ve sistemlerin ihtiyacı olan sıcaklık ve basınca düşürmektedir. İstasyon çıkışındaki buharın büyük bir kısmı besleme deposundaki suyun ısıtılması için kullanılmaktadır. Ekonomizerler 19 noktasında besleme suyu deposundan alınan 150 °C ve 85 bar basınçtaki suyu yanma ürünü yardımı ile 280 °C'ye kadar ısıtıp doma göndermektedir. Sistemin her bir noktası, bu noktadaki akışkan ve termodinamik özellikleri Tablo 1'de görülmektedir.

Tablo 1. Santrale ait noktalar ve termodinamik özellikleri

Noktası	Akışkan Tipi	Sıcaklık	Basınç	Entalpi	Entropi	Debi	
		T (K)	P (kPa)	h (kJ/kg- kJ/Nm ³)	s (kJ/kgK)	\dot{V} (Nm ³ /s)	\dot{m} (kg/s)
1	Hava	298.15	104.325	424.17	3.8697	-	24.382
2	Hava	409.55	104.075	536.71	4.1911	-	17.697
3	Hava	569.05	103.825	700.79	4.5299	-	12.704
4	Kok Gazı	303.15	2.450	16555(kJ/Nm ³)	-	0.639	0.345
5	Y.F. Gazı	303.15	3.430	3111(kJ/Nm ³)	-	24.904	31.130
6	Yanma Ürünü	874.35	101.149	-	-	46.389	-
7	Yanma Ürünü	630.15	100.985	-	-	46.389	-
8	Yanma Ürünü	568.15	101.889	-	-	46.389	-
9	Yanma Ürünü	472.25	100.751	-	-	46.389	-
10	Yanma Ürünü	423.15	100.655	-	-	46.389	-
11	Yanma Ürünü	423.15	108.96	-	-	46.389	-
12	Su	313.15	40.0	167.88	0.57225	-	24.444
13	Su	313.15	920.0	167.56	0.57239	-	24.444
14	Su	293.15	300.0	84.14	0.29623	-	0.556
15	Su	423.15	500.0	632.19	1.84180	-	28.611
16	Su	423.15	8500.0	637.17	1.83300	-	28.611
17	Su	423.15	8500.0	637.17	1.83300	-	1.389
18	Su	423.15	8500.0	637.17	1.83300	-	0.278
19	Su	423.15	8500.0	637.17	1.83300	-	26.944
20	Su	463.15	7950.0	810.55	2.22580	-	26.944
21	Su	553.15	7400.0	1236.30	3.06510	-	26.944
22	Buhar	573.15	7400.0	2819.70	5.87860	-	0.556
23	Buhar	778.15	6500.0	3429.30	6.85540	-	27.778
24	Buhar	778.15	6500.0	3429.30	6.85540	-	3.333
25	Buhar	453.15	400.0	2818.60	7.08090	-	3.611
26	Buhar	778.15	6500.0	3429.30	6.85540	-	24.444
27	Buhar	315.65	8.315	2578.86	8.21734	-	24.444
28	Su	303.15	280.0	125.99	0.43667	1.369	1369.444
29	Su	310.55	250.0	156.88	0.53747	1.369	1369.444

3. SİSTEMİN TERMODİNAMİK ANALİZİ (THERMODYNAMIC ANALYSIS OF SYSTEM)

Termodinamiğin I. kanunu enerjinin korunumu ve sistemlerdeki enerji dengesiyle ilgili olup, termal sistemlerin gerçek enerji performans değerlendirilmesi için yeterli değildir [14]. Termodinamiğin II. Kanunu ise enerjinin kalitesini veya iş yapma potansiyelini sayısal olarak ifade edilmesini sağlar. Bu işlemler ise ekserji adı verilen bir özelliğin tanımlanmasını sağlamıştır. Ekserji, enerjinin işe çevrilebilme potansiyeli olarak tanımlanır ve bir kaynaktan elde edilebilecek maksimum işi ifade eder [15].

Akış halindeki bir madde, kinetik, potansiyel, fiziksel ve kimyasal olmak üzere, 4 ekserji bileşeninden oluşur. Buna göre toplam özgül ekserji aşağıdaki şekilde ifade edilebilir.

$$ex_{top} = ex_{potansiyel} + ex_{kinetik} + ex_{fiziksel} + ex_{kimyasal} \quad 3.1$$

Kinetik ve potansiyel ekserjiler ihmal edilebilir olduğundan toplam ekserji;

$$ex_{top} = ex_{fiziksel} + ex_{kimyasal} \quad 3.2$$

halini alır. Fiziksel ekserji, saf madde için Eşitlik 3.3, ideal gazlar için ise Eşitlik 3.4 ile hesaplanabilir.

$$ex_{fiz} = (h - h_0) - T_0(s - s_0) \quad 3.3$$

$$ex_{fiz} = Cp \left[(T - T_0) - T_0 \ln \left(\frac{T}{T_0} \right) \right] + RT_0 \ln \left(\frac{P}{P_0} \right) \quad 3.4$$

Sistemde kullanılan yüksek fırın ve kok gazı ideal gaz olarak kabul edilip fiziksel ekserjileri Eşitlik 3.4 ile bulunabilir. Burada yakıtın özgül ısısı sıcaklığa bağlı olarak değişmektedir ve aşağıdaki eşitlik ile bulunabilir [16].

$$Cp = a + b \times T + c \times T^2 + d \times T^3 \quad 3.5$$

Sistemin ekserji analizi yapılırken kimyasal ekserjilerde dikkate alınmıştır. Gaz yakıtlar için kimyasal ekserji Eşitlik 3.6 kullanılarak hesaplanmıştır. Bu eşitlikte Φ kimyasal ekserji faktörüdür, yüksek fırın gazı için 0.98 kok gazı için ise 1.05 olarak alınmıştır [17].

$$ex_{kim} = \varphi \times H_{alt} \quad 3.6$$

İdeal gaz ve suyun molar kimyasal ekserjileri ise Eşitlik 3.7 kullanılarak tespit edilmiştir.

$$\bar{e}_{x_{kim}} = \bar{R}T_0 \sum y_i \ln (y_i/y) = \sum_i y_i \bar{e}_{kim,i} + \bar{R}T_0 \sum_i y_i \ln y_i \quad 3.7$$

Sistemin en önemli ekipmanı olan kazanın ekserjisi hesaplanırken, kazana yakıt olarak giren yüksek fırın ve kok gazı, çıkan ürünlerden ise yanma ürünlerinin termodinamik özelliklerinin bilinmesi gerekir. Yüksek fırın ve kok gazından alınan numuneler sonucunda yakıtların alt ısı değerleri bulunmuştur. Numune analizleri sonucunda elde edilen veriler Tablo 2’de görülmektedir.

Tablo 2. Kok ve yüksek fırın gazı numunelerinin kimyasal bileşimi ve ısı değerleri

Kok Gazı Hacimsel (molar) Oranları (%)		Yüksek Fırın Gazı Hacimsel (molar) Oranları (%)	
CO	6.95	CO ₂	18.08
CO ₂	3.02	CO	23.12
H ₂	57.58	H ₂	1.74
CH ₄	22.18	N ₂	57.06
N ₂	7.14	---	---
O ₂	0.36	---	---
C ₂₊	2.77	---	---
Alt Isıl Değer (kcal/kg)	16555	Alt Isıl Değer (kcal/kg)	3111
Üst Isıl Değer (kcal/kg)	18711	Üst Isıl Değer (kcal/kg)	3144

Yanma ürünlerinin molar debisi ise Eşitlik 3.8 ile tespit edilmiştir.

$$\dot{n}_{yanma\ ürünleri} = \frac{P_{yanma\ ürün} \times \dot{V}_{yanma\ ürün}}{R \times T_{yanma\ ürün}} \quad 3.8$$

Yanma sonucu açığa çıkan yanma ürünleri, yanma tam olarak gerçekleştiği kabul edilerek O₂, CO₂, H₂O ve N₂ olarak belirlenmiş ve baca gazları içerisinde başka bir yanma ürünü olmadığı varsayılmıştır. Yanma ürünü bileşenleri ise yanma ürünü analizörü ile yüzdesel olarak tespit edilmiştir. Molar oranın hacimsel orana eşit olduğu varsayılarak bu yüzdesel değerler molar oran şeklinde yazılmıştır. Elde edilen bu değerler toplam yanma ürünü molar debisi ile oranlanarak, her bir bileşene ait molar debiler tespit edilmiştir. Elde edilen değerler Tablo 3'te görülmektedir.

Tablo 3. Yanma ürünleri bileşenlerinin molar oranları ve debileri.

Yanma ürünü bileşenleri	Hacimsel (molar) oranı, y _i	Molar debi, n _i (kmol/s)	Standart molar kimyasal ekserjisi e^{kim} (kJ/kmol)
O ₂	0.02	0.02872	3970
CO ₂	0.2513	0.3608	20140
H ₂ O	0.0178	0.0255	11710
N ₂	0.7108	1.0207	720
Toplam	1	1.436	

Yanma ürününün entalpi değeri, yanma ürününün özgül ısısına göre belirlenerek Eşitlik 3.9 ile hesaplanmıştır.

$$\bar{c}p_{yanma\ ürün} = (\bar{h} - \bar{h}_0)/(T - T_0) \quad 3.9$$

Burada yanma ürünü özgül ısısı, yanma ürünü bileşenlerine göre Eşitlik 3.10 kullanılarak hesaplanmıştır.

$$\bar{c}p_{yanma\ ürün} = y_{CO_2} \times \bar{c}p_{O_2} + y_{H_2O} \times \bar{c}p_{H_2O} + y_{N_2} \times \bar{c}p_{N_2} \quad 3.10$$

Sistem ekipmanlarının ve sistemin ekserji yıkımları kayıp noktalarının tespit edilip iyileştirme potansiyellerinin belirlenmesi için son derece önemlidir. Ekserji yıkımlarının genel ifadesi aşağıda verilmiştir.

$$\sum \dot{E}x_{yık} = \sum \dot{E}x_{giren} - \sum \dot{E}x_{çıkan} \quad 3.11$$

Sistem ekipmanların ekserji verimleri ise aşağıdaki eşitlikle hesaplanır;

$$\eta_{ex} = \frac{\sum \dot{E}x_{giren}}{\sum \dot{E}x_{çıkan}} \quad 3.12$$

Sistemin genel verimi elde edilen türbin işinin, giren yakıtların ekserjisine oranı ile hesaplanmıştır.

$$\eta_{sistem} = \frac{\dot{W}_{turbin}}{\dot{E}x_4 + \dot{E}x_5} \quad 3.13$$

Genel ifade ile sistem ekipmanlarının ekserji yıkımları ve verimleri Tablo 4'te verilen eşitlikler ile hesaplanmıştır.

Tablo 4. Ekserji yıkımları ve verimlere ait eşitlikler

Ekipman	Ekserji Yıkımı	Ekserji Verimi
Buhar kazanı	$\bar{E}_{y,kazan} = (\bar{E}x_3 + \bar{E}x_4 + \bar{E}x_5 + \bar{E}x_{17} + \bar{E}x_{21}) - (\bar{E}x_6 + \bar{E}x_{22} + \bar{E}x_{23})$	$\eta_{kazan} = \frac{\bar{E}x_6 + \bar{E}x_{22} + \bar{E}x_{23}}{\bar{E}x_3 + \bar{E}x_4 + \bar{E}x_5 + \bar{E}x_{17} + \bar{E}x_{21}}$
Türbin	$\bar{E}_{y,türbin} = \bar{E}x_{26} - (\bar{E}x_{27} + W_{türbin})$	$\eta_{türbin} = \frac{\bar{E}x_{27} + W_{türbin}}{\bar{E}x_{26}}$
Kondenser	$\bar{E}_{y,kondenser} = (\bar{E}x_{27} + \bar{E}x_{28}) - (\bar{E}x_{12} + \bar{E}x_{29})$	$\eta_{kondenser} = \frac{\bar{E}x_{12} + \bar{E}x_{29}}{\bar{E}x_{27} + \bar{E}x_{28}}$
Kondense pompası	$\bar{E}_{y,kp} = (\bar{E}x_{12} + W_{kp}) - (\bar{E}x_{13})$	$\eta_{kp} = \frac{\bar{E}x_{13}}{\bar{E}x_{12} + W_{kp}}$
Besleme Deposu (Degazör)	$\bar{E}_{y,bd} = (\bar{E}x_{13} + \bar{E}x_{14} + \bar{E}x_{25}) - (\bar{E}x_{15})$	$\eta_{bd} = \frac{\bar{E}x_{15}}{\bar{E}x_{13} + \bar{E}x_{14} + \bar{E}x_{25}}$
Besleme Suyu Pompası	$\bar{E}_{y,bsp} = (\bar{E}x_{15} + W_{bsp}) - (\bar{E}x_{16})$	$\eta_{bsp} = \frac{\bar{E}x_{16}}{\bar{E}x_{15} + W_{bsp}}$
Basınç ve Sıcaklık Düşürme İstasyonu	$\bar{E}_{y,düşürücü} = (\bar{E}x_{18} + \bar{E}x_{24}) - (\bar{E}x_{25})$	$\eta_{düşürücü} = \frac{\bar{E}x_{25}}{\bar{E}x_{18} + \bar{E}x_{24}}$
Ekonomizer-1 (EKO-1)	$\bar{E}_{y,eko1} = (\bar{E}x_6 + \bar{E}x_{20}) - (\bar{E}x_7 + \bar{E}x_{21})$	$\eta_{eko1} = \frac{\bar{E}x_7 + \bar{E}x_{21}}{\bar{E}x_6 + \bar{E}x_{20}}$
Ekonomizer-2 (EKO-2)	$\bar{E}_{y,eko2} = (\bar{E}x_8 + \bar{E}x_{19}) - (\bar{E}x_9 + \bar{E}x_{20})$	$\eta_{eko2} = \frac{\bar{E}x_9 + \bar{E}x_{20}}{\bar{E}x_8 + \bar{E}x_{19}}$
Hava Ekonomizeri-1 (HE-1)	$\bar{E}_{y,he1} = (\bar{E}x_1 + \bar{E}x_9) - (\bar{E}x_2 + \bar{E}x_{10})$	$\eta_{he1} = \frac{\bar{E}x_2 + \bar{E}x_{10}}{\bar{E}x_1 + \bar{E}x_9}$
Hava Ekonomizeri-2 (HE-2)	$\bar{E}_{y,he2} = (\bar{E}x_2 + \bar{E}x_7) - (\bar{E}x_3 + \bar{E}x_8)$	$\eta_{he2} = \frac{\bar{E}x_3 + \bar{E}x_8}{\bar{E}x_2 + \bar{E}x_7}$
Aspiratör (ID Fan)	$\bar{E}_{y,ID fan} = (\bar{E}x_{10} + W_{ID fan}) - (\bar{E}x_{11})$	$\eta_{ID fan} = \frac{\bar{E}x_{11}}{\bar{E}x_{10} + W_{ID fan}}$

4. SONUÇLAR VE TARTIŞMA (RESULTS AND DISCUSSIONS)

Yapılan çalışmanın sonucunda, gaz yakıtlı bir santralin detaylı bir ekserji analizi yapılmıştır. Akış şemasındaki, her bir noktaya ait ekserji değerleri 3. bölümdeki eşitlikler kullanılarak hesaplanmıştır. Hesaplanan değerler Tablo 5'te detaylı olarak görülmektedir.

Tablo 5. Noktasal ekserji değerleri

NOKTA	EKİPMAN	AKIŞKAN TİPİ	EKSERJİ E _x (kW)
1	Hava Isıtıcı-1 Primer Giriş	Hava	61.791
2	Hava Isıtıcı-1 Primer Çıkış (Hava Isıtıcı-2 Primer Giriş)	Hava	340.655
3	Hava Isıtıcı-2 Primer Çıkış	Hava	1045.738
4	Yakıcı-1 Giriş	Kok Gazı	11109.290
5	Yakıcı-2 Giriş	YF Gazı	76018.650
6	Ekonomizer-1 Primer Giriş	Yanma Ürünü	18157.543
7	Ekonomizer-1 Primer Çıkış (Hava Isıtıcı-2 Sekonder Giriş)	Yanma Ürünü	11328.831
8	Hava Isıtıcı-2 Sekonder Çıkış (Ekonomizer-2 Primer Giriş)	Yanma Ürünü	9911.695
9	Ekonomizer-2 Primer Çıkış (Hava Isıtıcı-1 Sekonder Giriş)	Yanma Ürünü	7973.155
10	Hava Isıtıcı-1 Sekonder Çıkış (FD fan giriş)	Yanma Ürünü	7207.685
11	FD Fan Çıkış	Yanma Ürünü	7489.896
12	Kondense Pompası Giriş (Kondenser Primer Çıkış)	Su	44.532
13	Kondense Pompası Çıkış (Besleme Suyu Deposu Giriş)	Su	35.689
14	Besleme Deposu Giriş (Su Takviye)	Su	0.210
15	Besleme Suyu Deposu Çıkış (Besleme Suyu Pompası Giriş)	Su	2506.774

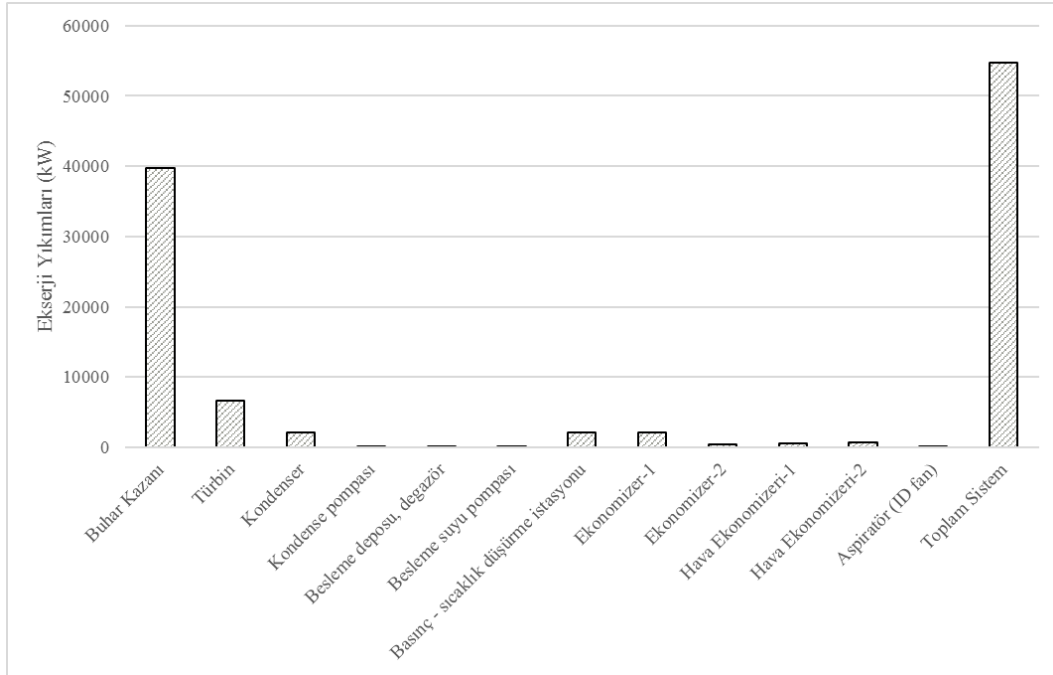
16	Besleme Suyu Pompası Çıkış	Su	2724.325
17	Püskürtme Suyu Giriş	Su	132.249
18	Püskürtme Suyu Çıkış	Su	26.450
19	Ekonomizer-2 Sekonder Giriş	Su	2565.627
20	Ekonomizer-2 Sekonder Çıkış (Ekonomizer 1-Sekonder Giriş)	Su	4081.701
21	Ekonomizer-2 Sekonder Çıkış (Kazan Su Giriş)	Su	8810.794
22	Kazan Blöf	Buhar	595.307
23	Kızgın Buhar Çıkış	Buhar	38608.905
24	Basınç Düşürme İstasyonu Giriş	Buhar	4633.069
25	Basınç Düşürme İstasyonu Çıkış	Buhar	2571.067
26	Buhar Türbini Giriş	Buhar	33975.836
27	Buhar Türbini Çıkış (Kondenser Primer Giriş)	Buhar	3261.357
28	Soğutma Suyu Giriş	Su	486.052
29	Soğutma Suyu Çıkış	Su	1631.564

Noktasal ekserji değerleri bulunduktan sonra sistemdeki her bir ekipmanın ekserji yıkımları ve ekserji verimleri belirlenmiştir. Bu değerler hesaplanırken Tablo 4'teki eşitlikler kullanılmıştır. Bu eşitlikler aracılığıyla elde edilen değer Tablo 6'da verilmiştir.

Tablo 6. Ekipmanların ekserji yıkımları ve ekserji verimleri

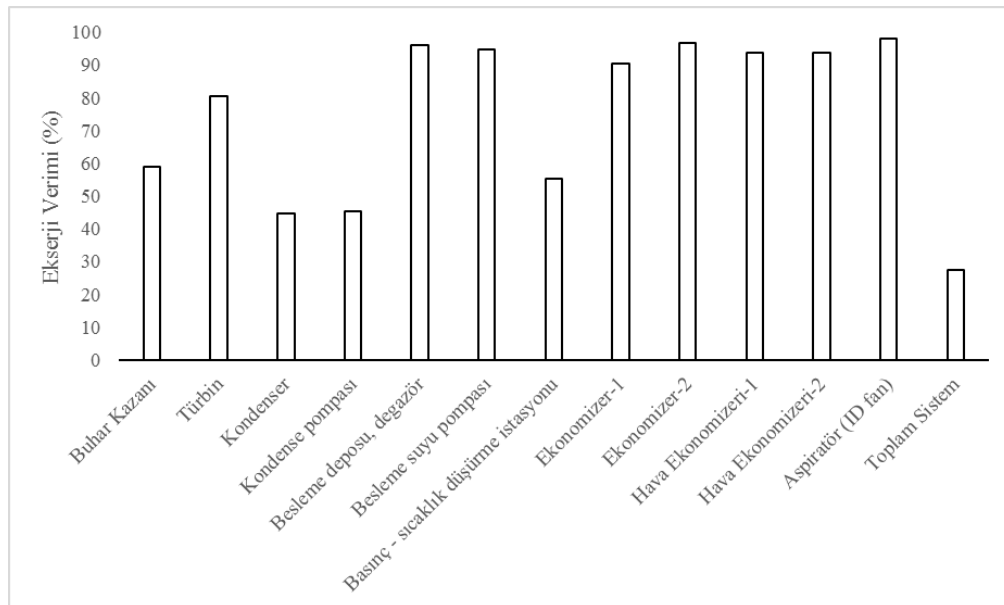
Ekipman	Ekserji Yıkımları (kW)	Ekserji Verimi (%)
Buhar Kazanı	39754.966	59.1
Türbin	6643.479	80.4
Kondenser	2071.613	44.7
Kondense pompası	42.843	45.3
Besleme deposu, degazör	100.192	96.2
Besleme suyu pompası	152.449	94.7
Basınç ve sıcaklık düşürme istasyonu	2088.452	55.2
Ekonomizer-1	2099.619	90.6
Ekonomizer-2	422.466	96.6
Hava Ekonomizeri-1	486.606	93.9
Hava Ekonomizeri-2	712.053	93.9
Aspiratör (ID fan)	137.789	98.2
Toplam Sistem	54717.427	27.6

Tablo 6'da elde edilen değerlerin daha iyi anlaşılabilmesi için, Şekil 2'de grafiksel olarak verilmiştir. Grafikten de anlaşılacağı üzere, sistemdeki en büyük ekserji yıkımı buhar kazanında gerçekleşmiştir.



Şekil 2. Sistemin ve Ekipmanları Ekserji Yıkımları

Sistem ve ekipmanlarının ekserji verimleri ise Şekil 3’te grafiksel olarak verilmiştir. Sistemde buhar kazanı en yüksek yıkım ile çalışan ekipmandır fakat bu ekipmanın yüksek verimle çalıştığı görülmektedir. Bunun sebebi olarak, buhar kazanı üzerinde birçok noktada ekserji akımları bulunmaktadır. Her bir ekserji akımdan doğan yıkım değerleri kazanın kayıp miktarını arttırmaktadır. Kazanın kayıp değeri artmasına rağmen bulunan verim değeri literatürle benzerlik göstermektedir. Ekserji akımlarının yıkımları azaltıldığında, kazan ve sistemin yıkımları da azalacaktır.



Şekil 3. Sistemin ve Ekipmanları Ekserji Verimleri

Sistemde en yüksek verime sahip ekipman aspiratör olarak görev yapan ID fanıdır. Ayrıca sistemdeki ekonomizerlerinde yüksek verimle çalıştığı tespit edilmiştir. Analiz yapılan sistemde ekonomizer olarak kullanılan ısı değiştiricilerinin sisteme uygun olarak seçildiği Şekil 3’te açıkça görülmektedir. Sistemin en düşük ekserji verimine sahip ekipmanı ise kondenserdur. Tıpkı ekonomizerlerde olduğu gibi, kondenserde de ısı geçişini arttırmak hem kondenserin hem de sistemin verimini arttıracaktır.

5. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Yapılan bu çalışmada, Karabük ilinde kurulu bulunan bir demir - çelik fabrikasında, yeni Yüksek Fırın yatırımı kapsamında kurulmuş olan; ana ekipman olarak 100 t/h kapasitede bir buhar kazanı ile 24.071 MW kapasitede bir Turboblower ve yardımcı ekipmanlarından oluşan santralin ekserji yoluyla performansı değerlendirilmiştir. Yapılan ekserji analizi sonucunda, en düşük ekserji verimi sırasıyla % 44.7 ile kondenserde, % 45.3 ile kondenser pompasında, %55.2 ile basınç ve sıcaklık düşürme istasyonunda, % 59.1 ile buhar kazanında meydana geldiği tespit edilmiştir. Maksimum ekserji yıkımı ise sırasıyla 39754.966 kW ile kazanda ardından 6643.479 kW ile türbinde meydana geldiği tespit edilmiştir. En yüksek iyileştirme potansiyeline ekipmanların sırasıyla 39754.966 kW ile buhar kazanı ve 6643.479 kW ile türbin olduğu tespit edilmiştir. Dolayısıyla sistemde iyileştirme çalışmaları yapılırken dikkate alınacak öncelikli ekipmanlar kazan ve türbindir. Sistemin toplam iyileştirme potansiyeli 54717.427 kW olarak bulunmuştur, genel sistem verimi ise %27.6 olarak tespit edilmiştir.

SEMBOLLER (NOMENCLATURE)

c_p	: Sabit basınçta özgül ısı
Ex	: Ekserji akımı (kW)
h	: Özgül entalpi (kJ/kgK)
kcal	: Kilo kalori
kg	: Kilogram
kW	: Kilo watt
\dot{m}	: Kütleli debi (kg/s)
Nm^3	: Normal metre küp
\dot{n}	: Molar debi (%)
P	: Basınç (bar)
s	: Özgül entropi (kJ/kgK)
T	: Sıcaklık (°C,K)
t	: Ton
W	: İş enerjisi (kW)
η	: Verim (%)
bd	: Besleme deposu
bsp	: Besleme suyu pompası
kokg	: Kok gazı
kp	: Kondense pompası
yfg	: Yüksek fırın gazı
AID	: Alt ısı değer
FD	: Forced draft (zorlamalı çekişli)
ID	: Induced draft (Cebri çekişli)

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] T.C. Doğu Akdeniz Kalkınma Ajansı, Demir Çelik Sektör Raporu (2014), http://www.dogaka.gov.tr/Icerik/Dosya/www.dogaka.gov.tr_523_TN1D55SP_Demir-celik-Sektor-Raporu-2014.pdf. (Son ziyaret 17.05.2017)
- [2] A. Ergün, T. Menlik, M.G. Özkaya, Energy and Exergy Analyses of the Heating System in a Multipurpose Building. Gazi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 1:1 (2015) 195-218.
- [3] H. Yazıcı, R. Selbaş, Bir Buharlı Güç Santralinin Enerji ve Ekserji Analizi, Selçuk Üniversitesi Selçuk-Teknik Dergisi, 10:1 (2011) 117-135.
- [4] M.A. Rahim, D. Gündüz, Gaz Türbinli Bir Isıl-Güç (Kojenerasyon) Çevrim Santralinin Enerji Ve Ekserji Analizi: Ankara Şartlarında Uygulama, Tübv Bilim Dergisi, 6:2 (2013) 19-27.

- [5] Ç. Filiz, Bir Buhar Kazanının Enerji ve Ekserji Analizi Yoluyla Performansının Değerlendirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Karabük, 2012.
- [6] M. Eyidoğan, D. Kaya, Ş. Dursun, O. Taylan, Endüstriyel Tav Fırınlarında Enerji Tasarrufu ve Emisyon Azaltım Fırsatları, Journal of The Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 29:4 (2014) 735-743.
- [7] C. Uysal, Bir Termik Santralin Termoekonomik Analizi, Yüksek Lisans Tezi, Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Karabük, 2012.
- [8] Ç. Filiz, C. Uysal, E. Kılıç, H. Kurt, Bir Buhar Kazanının Enerji ve Ekserji Analizi Yoluyla Performansının Değerlendirilmesi, 2nd International Symposium on Innovative Technologies in Engineering and Science, A1(2014) 551-562, 18-20 Haziran, Karabük, Türkiye.
- [9] F. Ünal, D.B. Özkan, Tunçbilek Termik Santralının Enerji ve Ekserji Analizi, Tesisat Mühendisliği, 143(2014) 5-13.
- [10] M. Özkaymak, Bir Termik Santralde Kojenerasyon Tesisinin Ekserji Analizi, Teknoloji, 10 (2007) 61-65.
- [11] M. Atif, F.A. Al-Sulaiman, Energy and exergy analyses of solar tower power plant driven supercritical carbon dioxide recompression cycles for six different locations, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 68 (2017) 153–167.
- [12] S.C. Kaushik, V.S. Reddy, S.K. Tyagi, Energy and exergy analyses of thermal power plants: A review, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 15 (2011) 1857–1872.
- [13] T.K. Ibrahim, F. Basrawi, O.I. Awad, A.N. Abdullah, G.N.R. Mamat, F.Y. Hagos, Thermal performance of gas turbine power plant based on exergy analysis, Applied Thermal Engineering, 115 (2017) 977–985.
- [14] R. Yumrutas, M. Kunduz, M. Kanoglu, Exergy Analysis of Vapor Compression Refrigeration Systems, Exergy An International Journal, 2 (2002) 266-272.
- [15] Z. Wei, R. Zmeureanu, Exergy Analysis of Variable Air Volume Systems For an Office Building, Energy Conversion and Management, 50 (2009) 387-392.
- [16] Y.A. Çengel, M.A. Boles, Mühendislik Yaklaşımıyla Termodinamik, Literatür Yayıncılık, İstanbul, 1996.
- [17] T. Kotas, The exergy method of thermal plant analysis, Krieger Publishing Company, Florida, 1995.