



Thermodynamic analysis of the coal-fired power plants under various load conditions

Burhanettin Çetin* , Erman Özen 

Department of Mechanical Engineering, Yıldız Technical University, İstanbul, 34349, Turkey

Highlights:

- Energy and exergy efficiencies of the thermal power plant
- The effects of steam parameters on the performance
- The maximum exergy loss occurs in the thermal power plant

Keywords:

- Energy efficiency
- Exergy efficiency
- Thermodynamic analysis
- Load condition

Article Info:

Research Article

Received: 30.11.2018

Accepted: 11.07.2020

DOI:

10.17341/gazimmfd.490516

Correspondence:

Author: Burhanettin Çetin
e-mail: cetin@yildiz.edu.tr
phone: +90 212 383 2784

Graphical/Tabular Abstract

In this study, the thermodynamic analysis of the sub-critical and super-critical coal-fired power plants under various load conditions have been investigated.

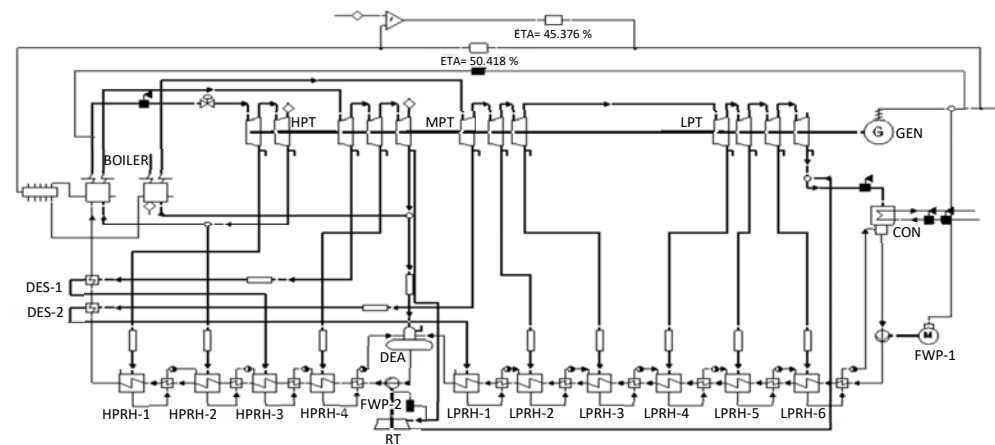


Figure A. Schematic diagram of the optimized coal-fired power plant

Purpose: The aim of this study is to show the effect of live steam parameters on thermal and exergy efficiencies of thermal power plants under various load condition.

Theory and Methods:

Soma Power Plant was taken as a Base Case for this study. Steam parameters were increased from sub-critical level to super-critical level to investigate the effects of the steam parameters on the thermal and exergy efficiencies. Second reheat section, four regenerative heaters, two desuperheaters and regenerative turbine were added to optimize the power plant. Furthermore, the effects of the load condition on the plant's energy and exergy efficiencies are investigated by operating power plants under 50%, 75% and 100% load conditions.

Results:

It has been found that live steam parameters have a huge impact at the efficiencies under various load conditions.

Conclusion:

It is concluded that live steam parameters and load conditions are the most critical parameters to determine the power plants efficiencies. On the other hand, this study only includes performance analysis of the power plant. Thermoeconomic analysis of this study has to be investigated to achieve meaningful results.



Farklı yük şartlarında kömür yakıtlı termik güç santrallerinin termodinamik analizi

Burhanettin Çetin*^{ID}, Erman Özen^{ID}

Yıldız Teknik Üniversitesi, Makine Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 34349, Beşiktaş, İstanbul, Türkiye

Ö N E Ç I K A N L A R

- Termik santrallerde enerji ve ekserji analizi
- Buhar şartlarının performans üzerine etkisi
- Termik santrallerdeki maksimum ekserji bozunumu

Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi

Geliş: 30.11.2018

Kabul: 11.07.2020

DOI:

10.17341/gazimmfd.490516

Anahtar Kelimeler:

Enerji verimi,
ekserji verimi,
termodinamik analiz,
yükleme şartları

ÖZET

Bu çalışmada, beş farklı termik güç santrali için buhar parametrelerinin (basınç, sıcaklık) farklı yük şartlarında santralin enerji ve ekserji verimine etkileri araştırılmıştır. Kritik-altı şartlarda çalışan tek ara kızdırmalı ve altı adet besleme suyu ön ısıtıcısına sahip olan Soma Termik Santrali referans santral olarak alınmıştır. Referans Santralin buhar basınç ve sıcaklığı sırasıyla 139,2 bar, 540°C ve ara kızdırma sıcaklığı 540°C'dir. Performans açısından en iyi sistem konfigürasyonu Uygulama 4 olarak bulunmuştur. Optimize edilmiş ultra-süperkritik termik güç santralinde (Uygulama 4) çift ara kızdırma kademesi, on adet besleme suyu ön ısıtıcısı, iki adet kızgınlık giderici ve bir adet de rejeneratif türbin bulunmaktadır. Uygulama 4'ün taze buhar şartları sırasıyla 300 bar, 600°C ve ara kızdırma sıcaklığı 620°C alınmıştır. Simülasyonlar Epsilon Professional Programı kullanılarak yapılmıştır ve bulunan analiz sonuçları Referans Santral ile karşılaştırılmıştır. Uygulama 4 ile Referans Santralin enerji ve ekserji verimleri karşılaştırıldığında, %100 yüklem şartları altında enerji verimi %9,24 ve ekserji verimi %8,06 artmıştır. Ayrıca, %100 yüklem şartları altında CO₂ emisyonunda yılda 3.384.916 ton azalma olacaktır. Bu çalışmanın sonucunda, farklı yüklemeler altında taze buhar şartlarının sistemlerin enerji ve ekserji verimleri üzerinde önemli bir etkisinin olduğu gösterilmiştir.

Thermodynamic analysis of the coal-fired power plants under various load conditions

H I G H L I G H T S

- Energy and exergy efficiencies of the thermal power plant
- The effects of steam parameters on the performance
- The maximum exergy loss occurs in the thermal power plant

Article Info

Research Article

Received: 30.11.2018

Accepted: 11.07.2020

DOI:

10.17341/gazimmfd.490516

Keywords:

Energy efficiency,
exergy efficiency,
thermodynamic analysis,
load condition

ABSTRACT

The aim of this study is to show the effect of live steam parameters on thermal and exergy efficiencies of thermal power plants under various load condition. Soma Thermal Power Plant (Base Case) is operated under sub-critical conditions has single reheat stage and six regenerative heaters. Live steam conditions of Base Case are 139,2 bar and 540°C, and the temperature of reheat steam is 540°C. Case 4 is found the best system configuration in terms of performance. Optimized ultra-supercritical thermal power plant (Case 4) consists of double reheat, ten regenerative heaters, two dehsuperheaters and a regenerative turbine. Live steam conditions of this system are taken as 300 bar, 600°C and its reheat steams are heated to 620°C. Simulations are carried out by the Epsilon Professional software. Finally, the results of analysis are compared to that of Base Case. Thermal efficiency and exergy efficiency of ultra-supercritical power plant (Case 4) are increased 9,24% and 8,06% under 100% load condition, respectively. Furthermore, CO₂ emission drops 3.384.916 tonnes/year under 100% load condition. The results of this study show that live steam parameters have a huge impact at efficiencies under various load conditions.

*Sorumlu Yazar/Corresponding Author: cetin@yildiz.edu.tr, ermanytu@gmail.com / Tel: +90 212 383 2784

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Enerji tüketimi, ülkelerin gelişmişlik seviyelerini gösteren en önemli göstergelerden biridir. Sanayileşme, teknolojik gelişmeler, nüfus artışı ve şehirleşmeden dolayı enerji tüketimi son yıllarda artmaktadır [1]. Enerji tüketiminin artmasıyla birlikte sera etkisi gibi önemli çevre problemleri meydana gelmektedir. Atmosferde bulunan sera gazı miktarı ile küresel ısınma arasında doğrudan ilişki bulunmaktadır. Bundan dolayı, ülkeler enerji üretim verimlerini arttırmalı ve enerji sektöründe yeniliklere açık olmalıdır [2]. Türkiye 2004 senesinde Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi'ne taraf olmuş ve 2009 yılında Kyoto Protokolünü imzalamıştır. 2015 senesinde düzenlenen Taraflar Konferansı'nda ise, Türkiye 2021-2030 yılları arasında tahmini olağan emisyon senaryosunun %21'ine kadar sera gazı emisyonlarını azaltmayı öngördüğünü belirtmiştir [3].

Türkiye'de 2018 sene sonu itibarı ile termik güç santrallerinin toplam kurulu kapasitedeki oranı %52,3 olmasına rağmen [4], anlık elektrik üretimdeki oranı yaklaşık %57,96'dır. (%18,6 doğal gaz, %37,1 kömür, %2,26 diğer) [5]. Günümüzde, termik santrallerde üretilen elektrik enerjisinin yaklaşık %50'si ithal edilen yakıtlardan karşılanmaktadır. Bu sorunun en iyi çözümlerinden birisi yerli kaynakları verimli bir şekilde kullanmaktır. Kömür, (özellikle linyit) Türkiye'de genellikle elektrik üretiminde kullanılmaktadır. Türkiye'deki linyit kaynakları 17,3 milyar tonu bulmaktadır ve bu linyitlerin ısı değeri oldukça düşüktür. Toplam linyit kaynaklarının %71'i 1500 kcal/kg'ın altında ısı değere, tüm linyit kaynaklarının %90'ı ise 3000 kcal/kg'ın altında bir ısı değere sahiptir. Ayrıca ülkemiz linyitlerinin yarısından fazlası %20'nin üzerinde nem içermektedir. Bu nedenle linyitler, büyük oranda termik santrallerde yakıt olarak kullanılmaktadır. ısı değeri yüksek olan linyitler ise daha çok konutların ısıtılması ve sanayi için değerlendirilmektedir [3]. Türkiye birçok termik yakıtlı güç santrallerine sahip olmasına rağmen, bu santraller çok düşük enerji (termik) ve ekserji verimlerine sahiptir. Türkiye'deki termik santrallerinin taze buhar şartları 130 bar ve 550°C ve enerji verimleri ise %30-35 civarındadır [6, 7]. Bu sebepten dolayı, Türkiye'deki kömür yakıtlı termik santrallerin enerji ve ekserji verimlerini arttırmak için yenilikçi çözümler uygulanmalıdır.

Ultra-süperkritik veya gelişmiş kömür yakıtlı güç teknolojileri günümüzde işleyen modern kömür yakıtlı termik santrallere göre birçok avantaja sahiptir. Örneğin; ultra-süperkritik termik santrallerin buhar şartları (yaklaşık 30 MPa ve 600°C mertebelerindedir) ve enerji verimleri (yaklaşık %43 ila %47 arasında) daha yüksektir. Ayrıca bu santraller büyük kapasitelerde daha da verimli hale gelir, çünkü birim güç (1 kW) başına olan özgül yatırım maliyetleri önemli ölçüde düşmektedir [8]. Sistemlere ikinci ara kızdırma basamağı eklenerek endotermik prosesin ortalama sıcaklığı artırılabilir ve ikinci ara kızdırma bölgesi sistemin veriminin %1 ila %2 arasında artmasını sağlar [9]. Bu

sistemlerde güncel kazan verimleri %93 ila %95 arasındadır ve buhar türbinlerinin izentropik verimleri ortalama %90'ın üzerine çıkmaktadır. Yeni tarihli bir çalışmaya göre; Çin'deki Shanghai Waigaoqiao ultra-süperkritik termik santrali enerji verimi %46,5'e ulaşmıştır [10]. Ultra-süperkritik termik santrallerin diğer önemli avantajı ise çevresel yararlarıdır. Birim güç başına daha düşük CO₂, NO_x, SO_x, ağır metal ve eser element emisyonuna sahiptir. Ultra-süperkritik termik santrallerde CO₂ emisyonu ve yakıt tüketimi en iyi ulaşılabilir teknoloji ile karşılaştırıldığında %15 düşer. Bu emisyon düşüşü sadece verimin artırılmasından değil ayrıca emisyon kaynaklarının merkezileştirilmesinden dolayı oluşur. Çünkü, tek bir üniteye emisyon kontrolü daha ileri seviyede ve kolayca yapılabilmektedir. Ultra-süperkritik kömür yakıtlı güç santralleri ayrıca kömür yakıtlı termik santraller için daha düşük yakıt maliyeti sunar. Giderek artan yakıt fiyatları güç üretiminin en önemli parametresi haline gelmiştir. Yakıt tüketimindeki azalış, güç üreticileri için birim güç başına üretilen elektrik fiyatının düşmesini sağlar. Fakat, günümüzde ultra-süperkritik termik santraller yüksek yatırım maliyeti, yüksek basınç ve sıcaklıkta çalışmasından dolayı güvenilirlikleri ve santral ekipmanları için gerekli olan gelişmiş malzeme ihtiyacından dolayı da bazı dezavantajlara sahiptir [8]. Literatürde, kömür yakıtlı termik santrallerinin enerji ve ekserji analizlerinin yapıldığı bir çok çalışma bulunmaktadır. Örnek olarak, Adibhatla S. ve Kaushik S.C. [11], 660 MWe gücündeki kömür yakıtlı süperkritik termik santralinin %100, %80 ve %60 yüklem şartlarında enerji ve ekserji analizlerini yapmıştır. Xu G. vd. [9] 1000 MWe gücündeki çift ara kızdırmalı güç santrali kazanının kısmi olarak yer altında olması durumunda santral verimlerini incelemiştir. Çalışmalarında, bu tür kazan uygulamasının santral verimini arttırmasına rağmen, yatırım masraflarını da yükselttiğini göstermiştir. Espatolero S. vd. [12] kömür yakıtlı süper kritik termik santrallerdeki beslemeye suyu ısıtıcılarının tasarımının santral verimi üzerindeki etkilerini incelemiş ve optimum dizayn şartlarında santral veriminin %0,7 arttığını göstermiştir. Naterer G.F. vd. [13] kritik altı santrallerde ekserji performansını incelemiştir. Kaşka Ö. vd. [14] ekserji yıkımının termik santrallerde çoktan aza sıralanmasının; kazan, türbin, yoğunlaştırıcı ve pompa olarak belirlemiştir. Gonzalez-Salazar M.A. vd. [15] gaz yakıtlı ve kömür yakıtlı güç santrallerinin işletme esnekliği ve emisyon değerleri açısından karşılaştırmasını yapmıştır. Uysal C. vd. [16] Türkiye'de bulunan 160 MW gücündeki kömür yakıtlı bir termik santralin enerji ve ekserji verimlerini hesaplayarak termodinamik analizlerini gerçekleştirmiştir. Erdem H.H. vd. [1] Türkiye'deki kömür yakıtlı termik santrallerin karşılaştırmalı enerji ve ekserji performans analizlerini yapmışlardır. Liu Y. vd. [17] 1000 MW gücündeki tek ara kızdırmalı ultra-süper kritik santralin performans analizini yapmışlar ve kazandan çıkan duman gazının santral verimini arttırmada etkili olduğunu göstermişlerdir.

Bu çalışmada, farklı yük şartlarında kömür yakıtlı güç santrallerinin enerji ve ekserji analizleri yapılmıştır. Bu

çalışmanın amacı, termodinamik olarak en verimli ve en az yakıt tüketimine sahip sistemi belirlemektir. Bu yüzden, beş farklı termik güç santrali konfigürasyonu %100, %75 ve %50 yükler altında analiz edilmiştir: (1) tek ara kızdırmalı, altı besleme suyu ön ısıtıcılı kritik altı termik santral uygulaması (Soma Termik Santrali); (2) tek ara kızdırmalı, altı besleme suyu ön ısıtıcılı süper kritik termik santral uygulaması (Uygulama 1) ; (3) çift ara kızdırmalı, yedi besleme suyu ön ısıtıcılı ultra-süper kritik termik santral uygulaması (Uygulama 2); (4) çift ara kızdırmalı, on besleme suyu ön ısıtıcılı ultra-süper kritik termik santral uygulaması (Uygulama 3); (5) çift ara kızdırmalı, on besleme suyu ön ısıtıcılı ve rejeneratif türbinli (besleme suyu pompası türbini) ultra-süper kritik termik santral uygulaması (Uygulama 4). Sonuç olarak her bir konfigürasyondan elde edilen sonuçlar, referans alınan Soma Termik Santrali ile karşılaştırılmış ve termodinamik açıdan en yüksek enerji ve ekserji verimine sahip olan Uygulama 4 en iyi sistem olarak belirlenmiştir.

2. METOT (METHOD)

Termik santrallerin performansını değerlendirmek için genellikle sistemlerin, enerji ve ekserji verimleri ya da özgül ısı sarfiyatı değerlerine bakılır [18]. Kömür yakıtlı termik santrallerin enerji verimi (η_1), sistemden çıkan net gücün, sisteme verilen toplam enerjiye bölünmesiyle elde edilir. Özgül ısı sarfiyatı (q) ise Eş. 1'deki gibi tanımlanabilir;

$$q = (E_{\text{toplam}} \times 3600) / (P_{\text{top}}) = 3600 / \frac{P_{\text{top}}}{E_{\text{toplam}}} = 3600 / \eta_1 \quad (1)$$

E_{toplam} sisteme verilen toplam enerjiyi temsil eder. Teorik olarak, E_{toplam} kömürün kimyasal enerjisini, havanın enerjisini ve kazan besleme suyunun enerjisini içermektedir. Hesaplamayı basitleştirmek için, E_{toplam} değeri sadece kömürün kimyasal enerjisi olarak düşünülebilir ve bu kömürün alt ısı değerine eşittir. P_{top} net güç çıkışını gösterir. Yakıtın kimyasal ekserjisi, yakıtın bileşenlerine bağlı olarak değişir. Szargut ve Strylska; yakıt ekserjisinin yakıtın ısı değerine oranını ifade eden (φ) değerini geliştirmişlerdir. Yakıtın ekserji oranı (φ) [19]: (Eş. 2)

$$\varphi = Ex_0 / H_u \quad (2)$$

Burada Ex_0 ve H_u sırasıyla yakıtın ekserjisini ve yakıtın alt ısı değerini temsil eder. “ φ ” değeri Eş. 3'deki gibi hesaplanabilir [19]:

$$\varphi = 1,0437 + 0,1882(h/c) + 0,0610(o/c) + 0,0404(n/c) \quad (3)$$

Formül içerisinde bulunan c, h, o ve n sembolleri sırasıyla; kömür içerisindeki karbon, hidrojen, oksijen ve nitrojenin yüzdeleri temsil eder. Katı yakıtların ekserjisi ($Ex_{0,\text{katı}}$) Eş. 4, Eş. 5'deki gibi tanımlanır [19]:

$$Ex_{0,\text{katı}} = \varphi(H_u + w \cdot h_{fg}) \quad (4)$$

$$Ex_g = Ex_{0,\text{katı}} \times m_{\text{kömür}} \quad (5)$$

Termik güç santralinin ekserji verimi (η_{II}): (Eş. 6)

$$\eta_{II} = P_{\text{top}} / Ex_g \quad (6)$$

Buradaki w, h_{fg} , $m_{\text{kömür}}$ ve Ex_g sembolleri sırasıyla yakıt içerisindeki nem oranını, çevre sıcaklığındaki suyun buharlaşma entalpisini, yakıtın kütleli debisini ve katı yakıt tarafından sisteme verilen toplam ekserji miktarını temsil eder. Tablo 1, bu çalışmada kullanılan kömürün element analizini göstermektedir. Kömürün alt ısı değeri bu çalışmada 8350 kJ/kg alınmıştır [20].

Tablo 1. Kömürün element analizi (Elemental analysis of coal)

Tanımlama	Sembol	Değer
Karbon (%)	c	42,75
Hidrojen (%)	h	1,60
Azot (%)	n	0,50
Oksijen (%)	o	22,45
Kül (%)	-	45,00
Nem (%)	w	20,00

Termik santrallerde yakıt tüketimi, santrallerin sera gazı emisyonunu (CO_2) belirlemek amacıyla kullanılacak en önemli göstergelerden bir tanesidir. Santrallerin yıllık olarak yakılan karbon miktarı değişimi (ΔB_y) Eş. 7'deki gibi hesaplanabilir;

$$\Delta B_y = L_f \times H \times \Delta b_y \times \frac{3600}{1000} \text{ ton/yıl} \quad (7)$$

Denklemdaki b_y , L_f ve H sırasıyla yakıt tüketimini (kg/s), santralin yük faktörünü ve santralin yıllık çalışma saatini temsil etmektedir. Yıllık olarak yakılan karbon miktarındaki değişim ($\Delta B_{y,c}$) ise;

$$\Delta B_{y,c} = \Delta B_y \times c \text{ ton/yıl} \quad (8)$$

Eş. 8'deki formül kullanılarak bulunabilir. Buradaki “c” simgesi, kömür içerisindeki karbon yüzdesini göstermektedir. Yıllık tüketilen karbon miktarı bilinirse, aşağıdaki denklem kullanılarak yıllık CO_2 emisyonu miktarı bulunabilir; (Eş. 9)



1 kg karbon tam yandığı zaman, 3,66 kg CO_2 gazı açığa çıkar. Tablo 4, farklı yüklemeler altında ve farklı yıllık çalışma saatlerinde, sistemlerin ürettiği yıllık CO_2 miktarlarını gösterir.

3. SİSTEMLERİN TANIMI (SYSTEMS DESCRIPTION)

3.1. Referans Uygulama: Soma Termik Santrali (Base Case: Soma Power Plant)

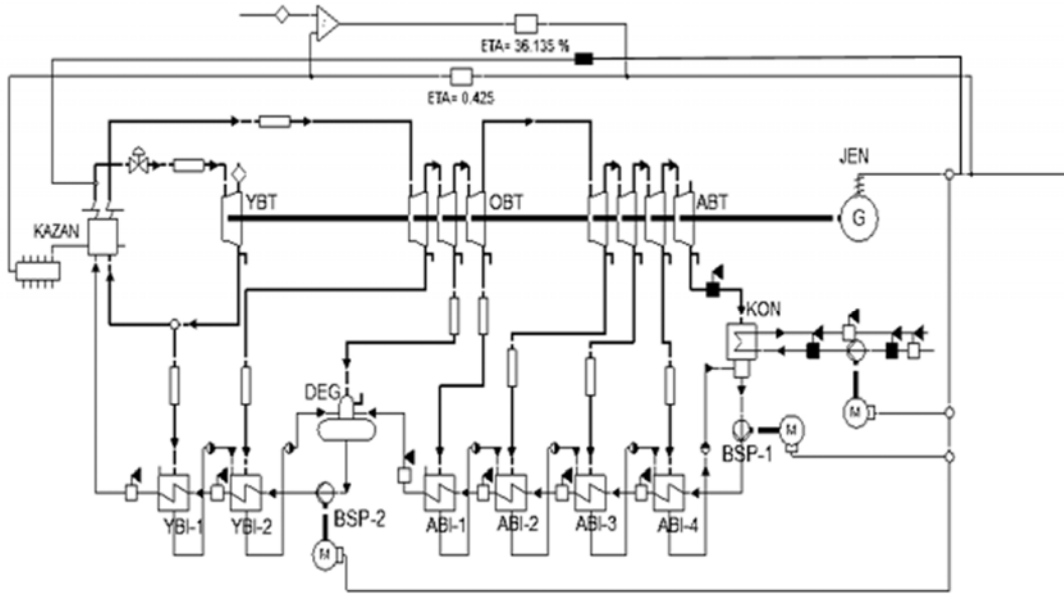
Soma Termik Santrali kritik-altı şartlarda çalışmaktadır ve bu çalışmada referans santral olarak ele alınmıştır. Şekil 1'de sistemin basitleştirilmiş akış şeması gösterilmiştir. Sistemin

net güç çıktısı 165 MW'tır. Sistem; tek ara kızdırma, 2 adet yüksek basınç ısıtıcı (YBI), 4 adet alçak basınç ısıtıcı (ABI) ve bir adet degazöre (DEG) sahiptir. Sistemin taze buhar basınç ve sıcaklığı 139,26 bar ve 540°C'dir. Ara kızdırma basıncı ve sıcaklığı 31,88 bar ve 540°C'dir. Alçak basınç türbini (ABT) egzoz çıkış basıncı ise 7,50 kPa seçilmiştir. Yüksek basınç türbininden (YBT) çıkan buharın bir kısmı yüksek basınç ısıtıcı-1'e (YBI-1), geri kalan kısmı ise ara kızdırma için tekrar kazana gönderilir. Yüksek basınç ısıtıcı-2 (YBI-2), degazör (DEG) ve alçak basınç ısıtıcı-1 (ABI-1) için orta basınç türbininden (OBT), ABI-2, ABI-3 ve ABI-4 için ise alçak basınç türbininden (ABT) ara buhar çekilerek kazan besleme suyunun ön ısıtması yapılmaktadır. Alçak basınç türbininden çıkan buhar kondensere (KON) dökülür. Ayrıca sistemde 2 adet besleme suyu pompası (BSP) bulunmaktadır.

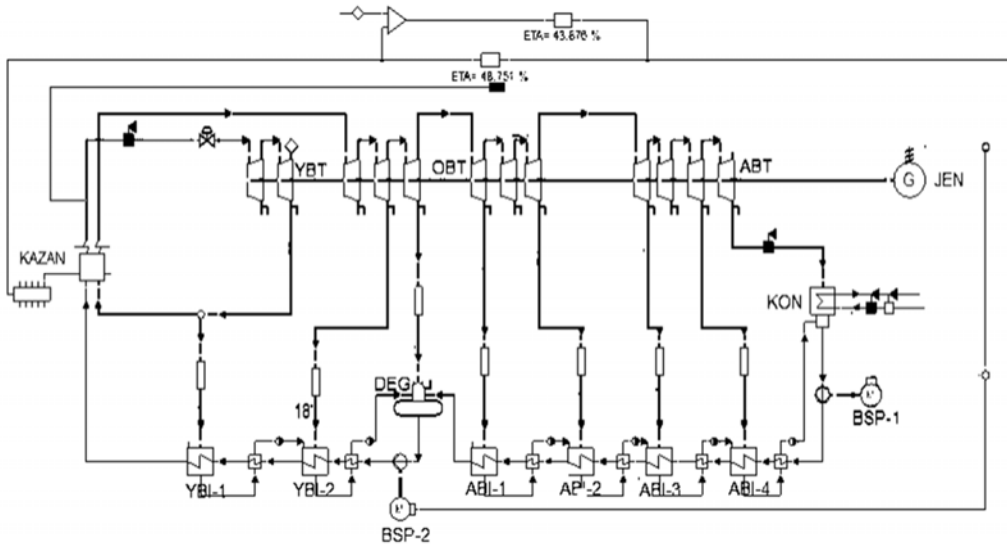
3.2. Uygulama 1: Tek Ara Kızdırmalı Altı Ara Buhar Almalı Süperkritik Termik Santrali (Case 1: Single Reheat System with Six-Stage Extraction Steam)

Bu uygulamada, taze buhar şartları kritik-altı değerlerden kritik-üstü değerlere çıkartılmıştır. Taze buhar basıncı ve sıcaklığı 262,5 bar ve 600°C alınmış olup, santralin net güç çıktısı 1000 MW'tır. Ara kızdırma buhar sıcaklığı 610°C ve basıncı ise taze buhar basıncının %30'u olan 78,60 bar olarak alınmıştır. Ayrıca santraldeki kondenser basıncı 5,75 kPa'a düşürülmüştür. Sistemin basitleştirilmiş akış şeması Şekil 2'de gösterilmiştir.

YBT'nin egzozundan çıkan buharın bir kısmı ara kızdırma için kazana, kalan kısmı ise YBI-1'e gönderilir. Kazanda 610°C'ye kızdırılan buhar güç üretimi için OBT'ne girer.



Şekil 1. Soma Termik Santralinin basitleştirilmiş akış diyagramı (The simplified flow diagram of Soma Power Plant)



Şekil 2. Uygulama 1'in basitleştirilmiş akış diyagramı (The simplified flow diagram of Case 1)

YBI-2, DEG, ABI-1 ve ABI-2 için ara buharlar OBT türbininden, ABI-3 ve ABI-4 için ise ABT'nden çekilmektedir.

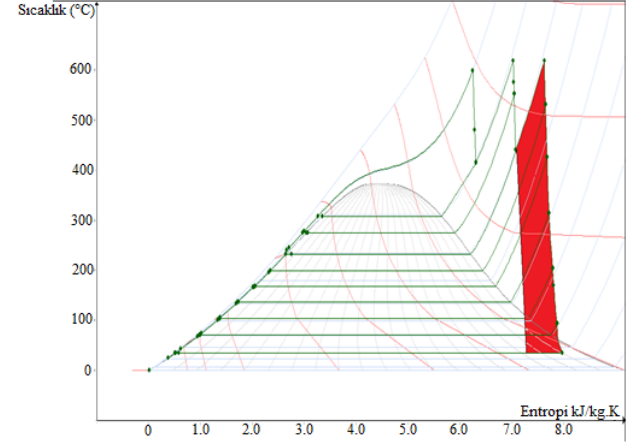
3.3. Uygulama 2: Çift Ara Kızdırmalı Yedi Ara Buhar Almalı Ultra-Süperkritik Termik Santrali
(Case 2: Double Reheat System with Seven-Stage Extraction Steam)

Bu sistem oluşturulurken, buhar şartları ultra-süper kritik buhar şartlarına çıkarılmış ve sisteme bir tane daha ara kızdırma eklenmiştir. Ara kızdırmanın eklenmesiyle prosesin endotermik sıcaklığı yükseltilmiş ve santralin enerji veriminin artırılması hedeflenmiştir. Ayrıca sisteme bir adet ABI eklenerek kazan besleme suyunun besleme suyu ısıtıcılarında daha verimli bir şekilde ısıtılması amaçlanmıştır. Kazandan 600°C ve 300 barda çıkan buhar yüksek basınç türbininde genişler. YBT'nden çıkan buharın bir kısmı YBI-1'e, geri kalan kısmı ise ve birinci ara kızdırma için kazana gönderilir. Buhar kazanda 620°C'ye kadar tekrar ısıtılarak OBT-1'e girer. OBT-1'in orta kademelerinden YBI-2 için ara buhar çekilmektedir. OBT-1'in egzoz çıkışındaki buharın bir kısmı degazöre ve kalan kısmı da ikinci ara kızdırma için kazana gönderilir. Kazanda tekrar 620°C'ye kadar ısıtılan buhar, OBT-2'ye gönderilir. Daha sonra buhar OBT-2 ve ABT'nde 5,75 kPa basıncı genişleyerek kondensere dökülür. ABI'ları, OBT-2 ve ABT kademelerine yerleştirilmiştir. Sistemin T-s diyagramı Şekil 3'te ve sistemin basitleştirilmiş akış şeması da Şekil 4'de gösterilmiştir. Şekil 3'te gösterilen kırmızı ile boyanmış alan sisteme ikinci ara kızdırma bölgesi eklenmesiyle birlikte sistemden alınan iş çıktısının Uygulama 1'e göre artışı göstermektedir.

3.4. Uygulama 3: Çift Ara Kızdırmalı On Ara Buhar Almalı Ultra-Süperkritik Termik Santrali
(Case 3: Double reheat system with ten-stage extraction steam)

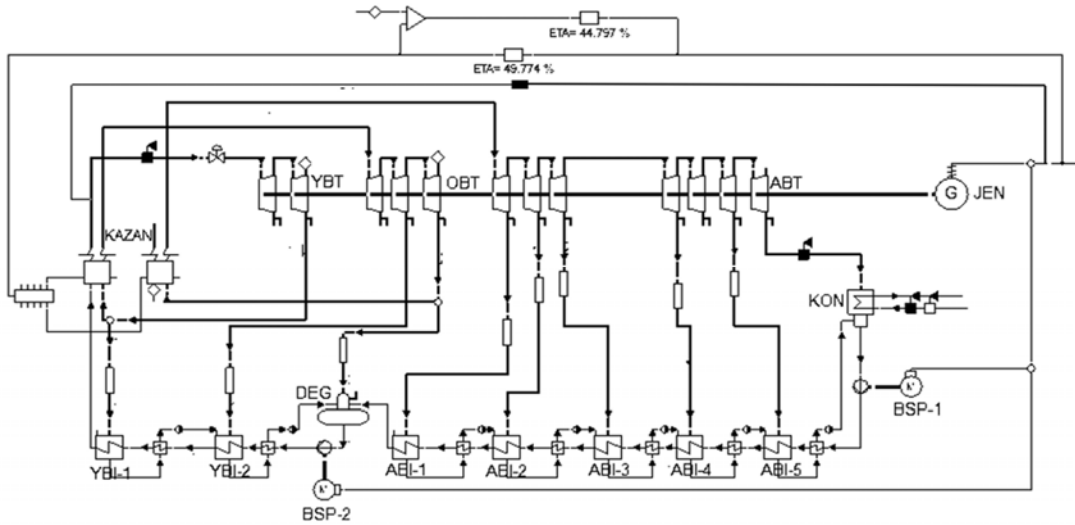
Termik santrallerin verimleri, aynı şartlardaki Carnot verimi referans alınarak iyileştirmeye çalışılmaktadır. Sistemlere

sonsuz sayıda besleme suyu ön ısıtıcısı eklemek, sistemi Carnot verimine yaklaştırır ve bu şekilde yakıt tüketimi azaltılır. Bu sistem oluşturulurken bir önceki sistemden farklı olarak ilave iki adet YBI ve bir adet ABI eklenmiş ve kazana giren besleme suyu sıcaklığının artırılması hedeflenmiştir. Taze buhar ve ara kızdırma şartları ise Uygulama 2'deki ile aynı alınmıştır.



Şekil 3. Uygulama 2'nin T-s diyagramı (T-s diagram of Case 2)

Kazandan 600°C ve 300 barda çıkan buhar YBT'ne gelir. Buharın bir kısmı YBI-1 için çekilir ve geri kalan buhar genişlemeye devam eder. YBT çıkışından alınan buharın bir kısmı YBI-2'e, geri kalan kısmı ise 1. ara kızdırma için kazana gönderilir. Kazanda 620°C'ye kadar ısıtılan buhar OBT-1'e girer. Burada genişleyen buhardan YBI-3 ve YBI-4 için ara buharlar çekilir. OBT-1 çıkışındaki buharın bir kısmı degazöre ve kalan kısmı da 2. ara kızdırma için kazana gönderilir. Kazanda tekrardan 620°C'ye kadar ısıtılan buhar, OBT-2'ye gelir. Buhar OBT-2 ve ABT kademelerinde genişleyerek kondensere akar. Şekil 5'de Uygulama 3'ün basitleştirilmiş akış şeması verilmiştir.

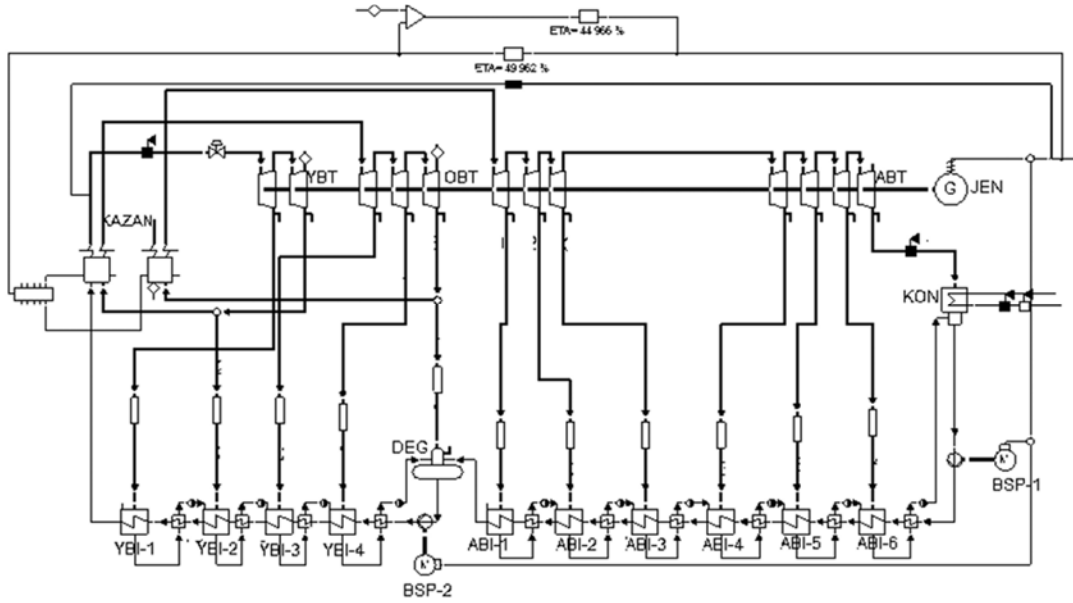


Şekil 4. Uygulama 2'nin basitleştirilmiş akış diyagramı (The simplified flow diagram of Case 2)

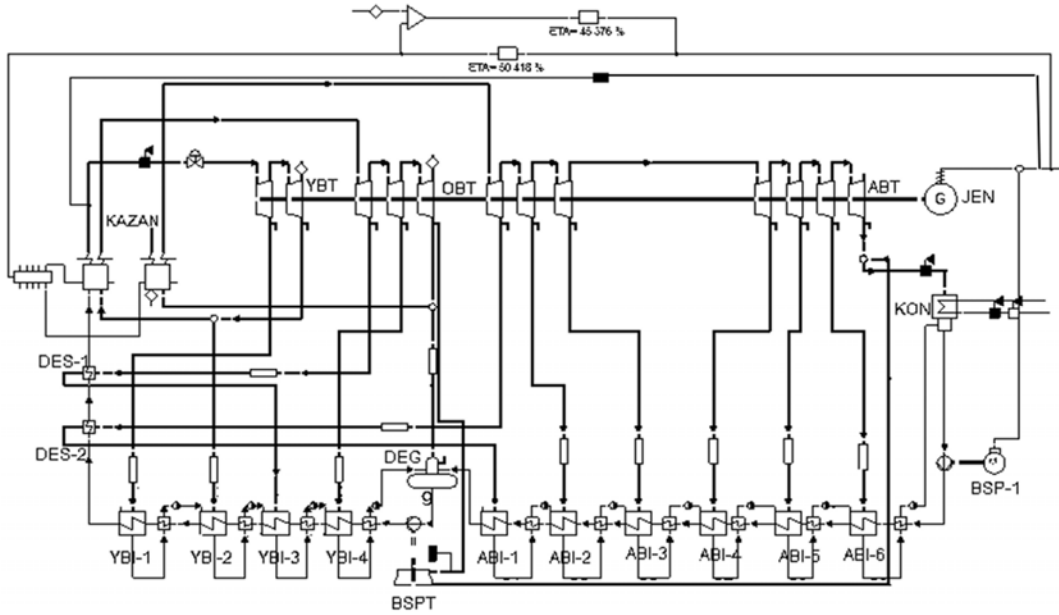
3.5. Uygulama 4: Çift Ara Kızdırmalı On Buhar Çekiş ve Regeneratif Türbinli Ultra-Süperkritik Termik Santrali
(Case 4: Double reheat system with regenerative turbine and two desuperheaters)

Bu sistem oluşturulurken, besleme suyu pompasının (BSP) yüksek enerji harcaması ve birinci ve ikinci ara kızdırma bölgesinden sonra çekilen buhar sıcaklıklarının yüksek olmasından dolayı, BSP-2 için bir adet besleme suyu pompası türbini (BSPT) eklenmiştir. Ayrıca yüksek sıcaklıkları değerlendirmek için YBI-3 ve ABI-1'den hemen önce 2 adet kızgınlık giderici (DES) kazan giriş borularına yerleştirilmiştir. Kazandan 600°C ve 300 barda çıkan buhar YBT'ne gelir ve YBI-1 için buhar çekildikten sonra, 1. Ara

kızdırma bölgesine kadar genişler. YBT'nin egzoz çıkışından buhar, 1. Ara kızdırma ve YBI-2 için çekilir. Kazanda 620°C'ye kadar ısıtılarak OBT-1'ne akar. OBT-1 orta kademelerinde YBI-3 ve YBI-4 için çekilen buhar, YBI-3'e gitmeden önce DES-1'den geçer. OBT-1 egzoz çıkışındaki buharın bir kısmı degazöre, bir kısmı besleme suyu pompası türbinine ve kalan kısmı ise 2. ara kızdırma için kazana tekrar gönderilir. Kazanda 620°C'ye kadar ısıtılan buhar OBT-2 ve ABT'ninden geçerek kondensere akar. Buhar ABI-1'e girmeden önce DES-2'ye girerek yüksek ısısının bir kısmını kazan besleme suyuna aktarır. Diğer alçak besleme suyu ısıtıcıları için de OBT ve ABT'nden ara buharlar çekilir. Uygulama 4'ün basitleştirilmiş akış şeması Şekil 6'da gösterilmiştir.



Şekil 5. Uygulama 3'ün basitleştirilmiş akış diyagramı (The simplified flow diagram of Case 3)



Şekil 6. Uygulama 4'ün basitleştirilmiş akış şeması (The simplified flow diagram of Case 4)

3.6. Sistemlerin Analizi (Analysis of systems)

Bu çalışmada, sistemlerin enerji ve ekserji hesaplamaları için Ebsilon Professional Software kullanılmıştır [18]. Yapılan analizlerin gerçek şartlara en iyi şekilde uyuşması için aşağıdaki varsayımlar kullanılmıştır.

- Sistemlerin kararlı koşullar altında çalıştığı düşünülmüştür;
- Kritik-altı şartlarına sahip sistem için türbinlerin izentropik verimi ve kazan verimi %85 alınmıştır;
- Süperkritik ve ultra-süperkritik sistemler için yüksek basınç (YB), orta basınç (OB) ve alçak basınç (AB) türbin izentropik verimleri ve kazan verimi sırasıyla %88, %91, %87 ve %90 alınmıştır [22];
- Bütün sistemlerin jeneratör ve pompa verimleri sırasıyla %98 ve %80 alınmıştır;
- Kazan besleme suyu ön ısıtması için besleme suyu ısıtıcılarına çekilen buharın basınç kaybı %2 alınmıştır [12];
- Süperkritik ve ultra-süperkritik sistemler için besleme suyu ısıtıcılarındaki sıcaklık artışı, hem alçak basınç ve hem de yüksek basınç ısıtıcılarında eşit alınmıştır [22];
- Ara kızdırma basamaklarındaki basınç düşüşü %10 alınmıştır [23];
- Optimum verim şartlarını sağlamak için 1. ara kızdırma basıncı taze buhar basıncının %30'u, 2. Ara kızdırma

basıncı ise 1. ara kızdırma basıncının %30'u alınmıştır [24-26].

4. SONUÇLAR VE TARTIŞMALAR (RESULTS AND DISCUSSIONS)

Farklı yük şartlarında bütün sistemlerin enerji analizleri Tablo 2'de verilmiştir. Tablo 3 ise sistemlerin ekserji analizinin sonuçlarını göstermektedir.

Sistemlerin enerji verimleri değerlendirildiğinde, santralin buhar parametrelerini kritik-altı değerlerinden, kritik-üstü değerlerine çıkartmak santralin enerji verimini %100 yükleme altında %21,41, %50 yükleme altında %17,4 arttırmıştır. Buna paralel olarak, sistemin ekserji verimi %100 yükleme altında %21,45, %50 yükleme altında ise %17,41 artmıştır. Bu verim artışlarında, kondenser basıncının 7,50 kPa'dan 5,75 kPa'a düşürülmesinin de etkisi vardır. Ayrıca kazan besleme suyu giriş sıcaklığı, referans santralde 235°C iken, uygulama 1'de kazan besleme suyu sıcaklığı 299,05°C'ye çıkarılmıştır.

Sisteme 2. Ara kızdırma bölgesinin, bir adet ABI'sının eklenmesi ve buhar parametrelerinin ultra-süperkritik değerlere çıkarılmasıyla Uygulama 2 oluşturulmuş ve sistemin enerji ve ekserji verimi sırasıyla Uygulama 1'e göre %100 yükleme altında %0,921 ve %0,803, %50 yükleme altında ise %1,17 ve %1,02 artmıştır.

Tablo 2. Farklı yük şartlarında bütün sistemlerin enerji analiz sonuçları (Energy analysis results of all Cases under various load condition)

Performans ölçütü	Referans			Uygulama 1			Uygulama 2			Uygulama 3			Uygulama 4		
	%100	%75	%50	%100	75%	50%	100%	75%	50%	100%	75%	50%	100%	75%	50%
Yükleme Şartı															
Taze buhar debisi (kg/s)	136	99,4	65,86	792	586	388	696	513	338	729	533	349	741	556	362
Taze buhar basıncı (Bar)	139,3	104	69,26	263	195	129	300	221	147	300	220	145	300	216	142
Taze buhar sıcaklığı (°C)	540	536	528	600	578	554	600	575	547	600	574	547	600	573	545
1.Ara kızdırma Basıncı (Bar)	31,38	23,4	15,79	78,6	59,5	40,5	90	67,9	46	90	68	46,1	90	75	50,7
1.Ara kızdırma sıcaklığı (°C)	540	540	540	610	610	610	620	620	620	620	620	620	620	620	620
2.Ara kızdırma basıncı (Bar)	-	-	-	-	-	-	27	20,5	14,1	27	20,6	14,1	27	21,8	14,8
2.Ara kızdırma Sıcaklığı (°C)	-	-	-	-	-	-	620	620	620	620	620	620	620	620	620
Güç çıkışı (MW)	165	124	83	1000	750	500	1000	750	500	1000	750	500	1000	750	500
Besleme suyu sıcaklığı (°C)	235	223	204,7	299	283	261	309	291	267	329	309	283	338	323	297
Enerji verimi (%)	36,14	36,1	35,16	43,9	42,9	41,3	44,8	43,9	42,5	45	44	42,5	45,4	44,3	42,8
Özgül ısı sarfiyatı (kJ/kWh)	9963	9978	10238	8205	8394	8720	8036	8198	8480	8006	8179	8474	7934	8127	8405

Tablo 3. Farklı yük şartlarında bütün sistemlerin ekserji analiz sonuçları
(Exergy analysis results of all Cases under various load condition)

Performans ölçütü	Referans			Uygulama 1			Uygulama 2			Uygulama 3			Uygulama 4		
	%100	%75	%50	%100	%75	%50	%100	%75	%50	%100	%75	%50	%100	%75	%50
Yükleme Şartı	%100	%75	%50	%100	%75	%50	%100	%75	%50	%100	%75	%50	%100	%75	%50
Ekserji girdisi (MW)	523	393	269	2613	2005	1388	2559	1958	1350	2549	1953	1349	2526	1941	1338
Kömür tüketimi (kg/s)	54,7	41,1	28,1	273	209	145	267	204	141	266	204	140	262,9	202,8	139
Güç çıkışı (MW)	165	124	83	1000	750	500	1000	750	500	1000	750	500	1000	750	500
Ekserji verimi (%)	31,52	31,4	30,6	38,2	37,4	36,0	39,1	38,3	37	39,2	38,4	37,0	39,58	38,64	37,4
Ekserji bozunumu (MW)	358,4	269	186	1612	1254	888	1559	1207	850	1549	1203	849	1526	1191	838
	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
Kazan	91	92	93	92	92,6	93,1	92	92,8	93,2	91,9	92,5	93	91,9	92,3	92,9
Türbinler	5,19	5,12	4,92	4,80	4,65	4,41	4,59	4,44	4,21	4,71	4,55	4,30	4,75	4,58	4,34
Kondenser	1,93	1,50	1,09	1,16	0,94	0,69	1,15	0,92	0,68	1,15	0,92	0,68	1,15	0,92	0,68
Besleme suyu ısıtıcıları	1,16	0,93	0,82	1,78	1,58	1,34	1,94	1,66	1,52	1,94	1,74	1,51	1,87	1,96	1,64
Diğer parçalar	0,71	0,39	0,26	0,29	0,26	0,42	0,29	0,26	0,42	0,31	0,28	0,45	0,32	0,29	0,48
Toplam	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100

Tablo 4. Farklı yüklemeler ve çalışma saatlerinde Uygulama 4 ile Referans uygulamasının CO₂ emisyonu karşılaştırılması
(CO₂ emission differences between Case 4 and Base case under various load condition and annual operation hour)

Yükleme Şartı (Lf) (%)	%100	%75	%50
Yakıt tüketimi farkı (Δb_y) kg/s	68,6	46,1	30,4
Çalışma saati (H) h/yr	8760	6000	8760
Yıllık yakıt tüketimi farkı (ΔB_y) t/yıl	2163370	1481760	1453810
Yıllık yakılan karbon farkı (ΔB_{yc}) t/yıl	924841	633452	621504
Yıllık CO ₂ emisyonundaki azalma t/yıl	3384916	2318436	2274703

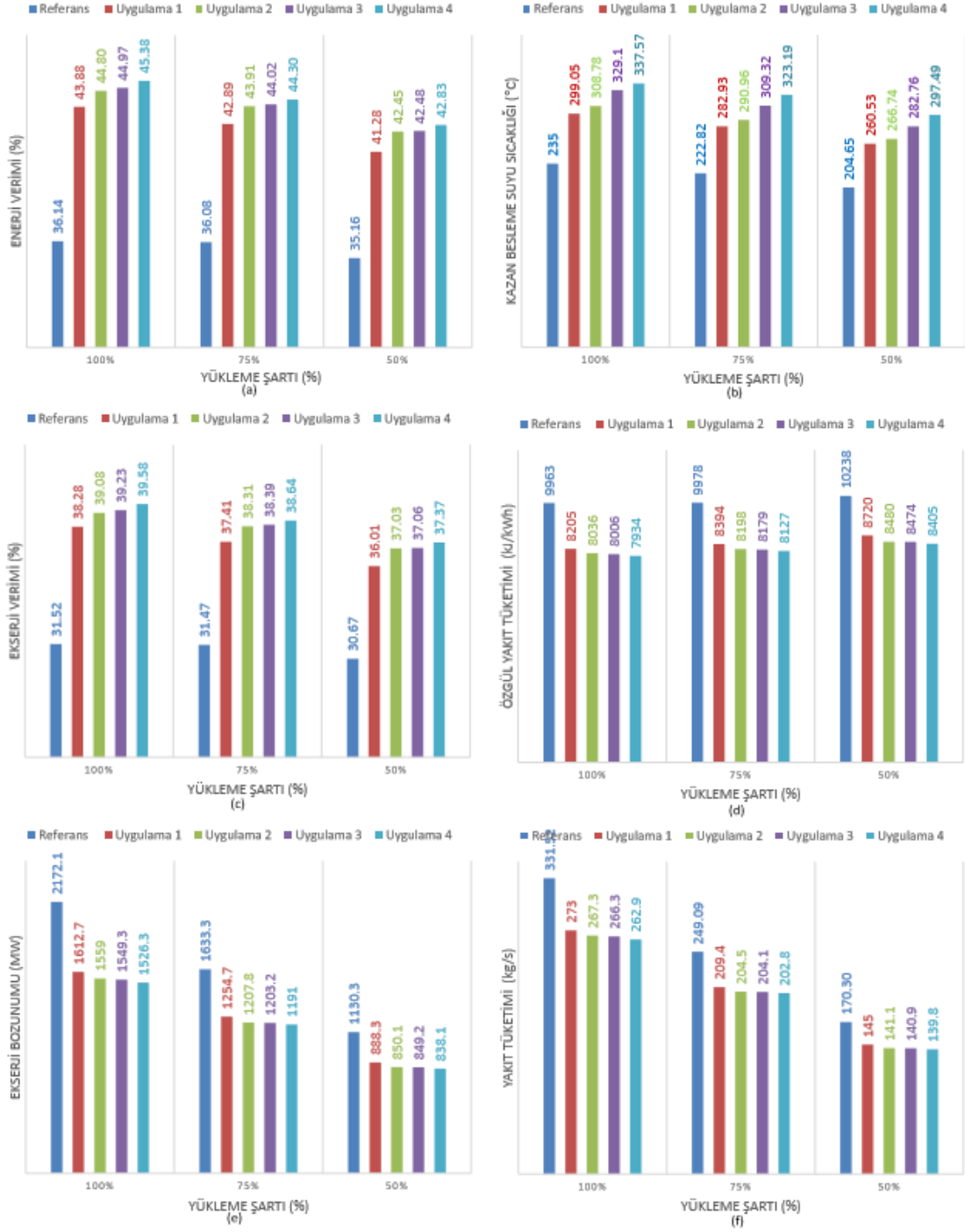
Bu sonuçlara bakılarak 2. ara kızdırma bölgesinin düşük yüklemelerde santralin enerji ve ekserji verimine pozitif etkisinin olduğu görülmüştür.

Uygulama 2 santraline, iki adet YBI'sı ve bir adet ABI'sı eklenmesiyle Uygulama 3 elde edilmiştir. Bu ara ısıtıcılarının eklenmesiyle, kazan besleme suyu giriş sıcaklığının yükseltilmesi amaçlanmıştır ve uygulama 2 ile uygulama 3'ün kazan besleme suyu sıcaklıkları karşılaştırıldığında, kazan besleme suyu sıcaklığının %100 yükleme altında 20,32°C, %50 yükleme altında ise 16,02°C arttığı gözlemlenmiştir. Uygulama 3 santraline bir adet BSPT ve iki adet DES eklenerek uygulama 4 oluşturulmuştur. %100 yükleme altında uygulama 4 ile uygulama 3'ün enerji ve ekserji verimleri karşılaştırıldığında, enerji veriminin %0,9, ekserji veriminin ise %0,89 arttığı görülmüştür.

Bütün sistemlerin ekserji analizleri incelendiğinde kimyasal reaksiyondan dolayı en fazla ekserji bozunumu kazanda gerçekleşmiştir. Ayrıca, sistemlerin yükleme değerleri düşürüldüğünde kazandaki ekserji bozunumu oranı artmıştır. Kazandan sonra en fazla ekserji bozunumu türbinlerde ve kondenserde oluşmuştur.

Farklı yüklemeler altında bütün sistemlerin karşılaştırılmalı enerji ve ekserji analizleri Şekil 7'de gösterilmiştir. Bu grafiklerden, enerji ve ekserji verimlerinin sistemlerin yükleme değerleri yükseldiğinde arttığı görülmektedir.

Şekil 7(f), sistemlerin farklı yüklemeler altında yakıt tüketimlerini göstermektedir. %100 yükleme altında uygulama 4'ün yakıt tüketimi ile referans santralin yakıt tüketimi karşılaştırıldığında, yakıt tüketiminin %20,69 azaldığı görülmüştür.



Şekil 7. Farklı yükler altındaki bütün uygulamaların analiz sonuçları (a) enerji verimi (b) kazan besleme suyu sıcaklığı (c) özgül yakıt sarfiyatı (d) ekserji verimi (e) ekserji bozunumu (f) yakıt tüketimi (Analysis results of all Cases under various load condition (a) thermal efficiency (b) final feed water temperature (c) heat rate (d) exergy efficiency (e) exergy loss (f) fuel consumption)

5. SİMGELER (SYMBOLS)

q : Özgül Isı Sarfiyatı(kJ/kWh)
 E_{toplam} : Toplam Enerji Girişi(MW)
 P_{top} : Net Güç Çıkışı(MW)
 η_1 : Enerji Verimi(%)

φ : Yakıt Ekserji Oranı
 Ex_0 : Yakıtın Ekserjisi(MW)
 H_u : Yakıtın Alt Isıl Değeri(kJ/kg)
 c : Yakıt İçerisindeki Karbon
 h : Yakıt İçerisindeki Hidrojen
 o : Yakıt İçerisindeki Oksijen

n	: Yakıt İçerisindeki Azot
$EX_{0,katı}$: Katı Yakıtın Ekserjisi(kj/kg)
w	: Nem(%)
h_{fg}	: Çevre Sıc. Suyun Buharlaştırma Entalpisi(kj/kg)
EX_g	: Katı Yakıt Tarafından Sisteme Verilen Ekserji(MW)
$m_{kömür}$: Yakıtın Kütleli Debisi(kg/s)
η_{II}	: Ekserji Verimi(%)
B_y	: Yıllık Yakılan Karbon Miktarı(kg/yıl)
L_f	: Santral Yük Faktörü(%)
H	: Santral Yıllık Çalışma Saati(h/yıl)
b_y	: Yakıt Tüketimi(kg/s)
B_{yc}	: Yıllık Yakılan Karbon Miktarındaki Değişim(kg/yıl)
CO_2	: Karbondioksit
C	: Karbon
O	: Oksijen

6. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu çalışmada, 5 farklı termik güç santrali için buhar parametrelerinin farklı yük şartlarında santralin performansı (enerji ve ekserji verimine), ekserji bozunumu, yakıt tüketimi ve CO_2 emisyonu üzerine etkileri araştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibi özetlenebilir; Taze buhar parametrelerinin (basınç ve sıcaklık) ve yükleme şartlarının, termik santrallerin enerji ve ekserji verimleri üzerinde önemli etkiye sahip olduğu görülmüştür. Fakat enerji ve ekserji verimlerindeki artış yükleme şartlarının düşmesiyle azalmaktadır. Bu çalışmada, en yüksek enerji verimi ve ekserji verimi uygulama 4 için bulunmuştur. Örneğin, %100 yük şartlarında uygulama 4 için enerji verimi ve ekserji verimi sırasıyla %45,37 ve %39,58 hesaplanmıştır. Dolayısıyla, uygulama 4 termodinamik olarak en iyi sistem seçilmiştir.

%100 yük şartlarında, uygulama 4 ile referans santralin enerji ve ekserji verimleri karşılaştırıldığında, uygulama 4'ün enerji veriminin %9,24 ve ekserji veriminin de %8,06 arttığı görülmüştür. Fakat yükleme durumu düştüğünde verimlerdeki bu artışın azaldığı belirlenmiştir. Örneğin, %50 yük şartlarında enerji ve ekserji verimlerindeki artış %7,67 ve %6,70 olmaktadır.

Bütün sistemler için en büyük ekserji bozunumu kazanda gerçekleşmektedir. %100 yükleme şartlarındaki uygulama 4'ün kazandaki ekserji bozunumu 1402,66 MW'tır (%91,90). Sistemlerin yükleme şartları düşürüldükçe kazandaki ekserji bozunumu da artmaktadır.

Kazan besleme suyu sıcaklığı, santralin yükleme miktarının düşürülmesi ile olumsuz etkilenmektedir. Uygulama 4'ün %100 yükleme şartında kazan besleme suyu sıcaklığı 337,57°C iken, %50 yükleme şartında kazan besleme suyu sıcaklığı 297,49°C'dir. %100 yük şartlarında, referans uygulama ile karşılaştırıldığında uygulama 4 için atmosfere atılan CO_2 miktarının 3.384.916 t_{CO_2} /yıl azaldığı görülmüştür.

Bu çalışma sadece performans açısından bir değerlendirme içerir. Çalışmaya ekonomik analizler de dâhil edilerek daha anlamlı sonuçlar elde edilebilir.

Liu vd. [17] yaptığı çalışmada 9 ara ısıtmasına ve 1 degazöre sahip USC termik santralde, ekonomizlerdeki baca gazının kullanılması ve taze havanın ısıtılmasıyla termik santral veriminin %48,35'e ulaşabileceği görülmüştür. Yang vd. [25] 660MW gücündeki ultra-süperkritik termik santrale sirkülasyonlu akışkan yatak kazan dizaynı kullanarak ve kazan verimini yerel olarak etkileyen faktörleri matematiksel olarak hesaplayarak 20 senaryo oluşturmuş ve santral verimini %45,46'a çıkarmayı başarmışlardır. Kaşka'nın [14] yaptığı çalışmaya paralel olarak en fazla ekserji bozunumu sırasıyla kazan, türbin ve kondenserde gözlemlenmiştir. Tontu vd. [26] farklı şartlar altında çalışan 3 santralin enerji ve ekserji analizini yapmış ve USC termik santralin enerji ve ekserji verimini sırasıyla %46 ve %40,8 olarak bulmuşlardır. Bu sonuçlar, taze buhar parametrelerinin ve yük şartlarının termik santrallerin performans değerlendirmesi için önemli parametreler olduğunu göstermiştir.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Erdem H.H., Akkaya A.V., Çetin B., Dağdaş A., Sevilgen S.H., Şahin B., Teke İ., Güngör C., Atas S., Comparative energetic and exergetic performance analyses for coal-fired thermal power plants in Turkey, International Journal of Thermal Sciences, 48 (11), 2179-2186, 2009.
2. International Energy Agency, World Energy Outlook, 2014.
3. Çetin B., Avcı H., Technical and economic analysis of the conversion on an existing coal-fired thermal power plant to solar-aided hybrid power plant, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 35 (2), 1027-1046, 2020.
4. Elektrik Üretim Anonim Şirketi, EUAŞ Yıllık rapor 2019. <https://www.euas.gov.tr/tr-TR/yillik-raporlar>. Yayın tarihi Haziran, 2020. Erişim tarihi 15 Haziran, 2020.
5. Türkiye Elektrik İletim A.Ş., 2019 Yılı Elektrik Üretim-Tüketim Raporları, <https://www.teias.gov.tr/tr-TR/aylik-elektrik-uretim-tuketim-raporlari>. Yayın tarihi Haziran, 2020. Erişim tarihi 15 Haziran, 2020.
6. Oktay Z., Investigation of coal-fired power plants in Turkey and a case study: Can plant, Applied Thermal Engineering, 29 (2-3), 550-557, 2009.
7. Altınkaynak M., Güneş S., Yakut A.K., Bir termik santralin enerji analizi, Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi Uluslararası Teknolojik Bilimler Dergisi, 10(3), 20-26, 2018.
8. Zhang D., Ultra-supercritical Coal Power Plants, Woodhead Publishing: Philadelphia, 2013.
9. Xu G., Xu C., Yang Y., Fang Y., Zhou L., Yang Z., Thermodynamic and economic analysis of a partially-underground tower-type boiler design for advanced double reheat power plants, Applied Thermal Engineering, 78, 565-575, 2015.

10. Xu G., Zhou L., Zhao S., Liang F., Xu C., Yang Y., Optimum superheat utilization of extraction steam in double reheat ultra-supercritical power plants, *Applied Energy*, 160, 863-872, 2015.
11. Adibhatla S., Kaushik S.C., 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, 2014.
12. Espatolero S., Romeo L.M., Cortes C., Efficiency improvement strategies for the feedwater heaters network designing in supercritical coal-fired power plants, *Applied Thermal Engineering* 73, 449-460, 2014.
13. Regulagadda P., Dinçer İ., Naterer G.F., Exergy analysis of a thermal power plant with measure boiler and turbine losses, *Applied Thermal Engineering*, 30, 970-976, 2010.
14. Kaşka Ö., Bor O., Tokgöz N., Energy and exergy analysis of an organic Rankine-Brayton combined cycle, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 33 (4), 1201-1213, 2018.
15. Gonzalez-Salazar M.A., Kirsten T., Prchlik L., Review of the operational flexibility and emissions of gas- and coal-fired power plants in a future with growing renewables, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 82, 1497-1513, 2018.
16. Uysal C., Kurt H., Kwak H.Y., Exergetic and thermoeconomic analyses of a coal-fired power plant, *International Journal of Thermal Sciences*, 117, 106-120, 2017.
17. Liu Y., Li Q., Duan X., Zhang Y., Yang Z., Che D., Thermodynamic analysis of a modified system for a 1000 MW single reheat ultra-supercritical thermal power plant, *Energy*, 145, 25-37, 2018.
18. Çengel Y.A., Boles M.A., *Thermodynamics an Engineering Approach*, 8th ed. McGraw-Hill: New York, 2015.
19. Tekel E., *Termik santrallerin enerji ve ekserji analizi*, Pamukkale Üniversitesi Yüksek Lisans Tezi, 2006.
20. Vardar N., Yumurtacı Z., Emissions estimation for lignite-fired power plants in Turkey, *Energy Policy*, 38, 243-252, 2010.
21. STEAG Energy Services GmbH. Epsilon Professional. <https://www.steag-systemtechnologies.com/en/products/epsilon-professional>, 2017.
22. Li Y., Zhou L., Xu G., Fang Y., Zhao S., Yang Y., Thermodynamic analysis and optimization of a double reheat system in an ultra-supercritical power plant, *Energy*, 1-13, 2014.
23. Drbal L.F., Boston P.G., Westra K.L., Erickson R.B., *Power Plant Engineering by Black&Veatch*, 6th ed. Kluwer Academic Publishers: Massachusetts, 2003.
24. Zhou L., Xu G., Zhao S., Xu C., Yang Y., Parametric analysis and process optimization of steam cycle in double reheat ultra-supercritical power plants, *Applied Thermal Engineering*, 99, 652-660, 2016.
25. Zhu S., Zhang M., Huang Y., Wu Y., Yang H., Lyu J., Gao X., Wang F., Yue G., Thermodynamic analysis of a 660 MW ultra-supercritical CFB boiler unit, *Energy*, 173, 352-363, 2019.
26. Tontu M., Şahin B., Bilgili M., Using energy and exergy analysis to compare different coal-fired power plants, *Energy Sources*, 2019.