



POLİTEKNİK DERGİSİ

*JOURNAL of POLYTECHNIC*

ISSN: 1302-0900 (PRINT), ISSN: 2147-9429 (ONLINE)

URL: <http://dergipark.gov.tr/politeknik>



## Kombine doğal gaz çevrim santralinin performans analizi

### *Performance analysis of natural gas combined cycle power plant*

*Yazar(lar) (Author(s)):* Mehmet Onur KARAAĞAÇ<sup>1</sup> , Ahmet KABUL<sup>2</sup> , Fatih YİĞİT<sup>3</sup>

ORCID<sup>1</sup>: 0000-0003-1783-9702

ORCID<sup>2</sup>: 0000-0002-9666-2660

ORCID<sup>3</sup>: 0000-0002-9504-5644

**Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article):** Karaağaç M.O., Kabul A., Yiğit F., “Kombine doğal gaz çevrim santralinin performans analizi”, *Politeknik Dergisi*, 22(2): 319-325, (2019).

**Erişim linki (To link to this article):** <http://dergipark.gov.tr/politeknik/archive>

**DOI:** 10.2339/politeknik.403996

# Kombine Doğalgaz Çevrim Santralinin Performans Analizi

*Araştırma Makalesi / Research Article*

**Mehmet Onur KARAAĞAÇ<sup>1</sup>, Ahmet KABUL<sup>2</sup>, Fatih YİĞİT<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Sinop Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, Enerji Sistemleri Mühendisliği Bölümü, Sinop, Türkiye

<sup>2</sup>Süleyman Demirel Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Enerji Sistemleri Mühendisliği Bölümü, Isparta, Türkiye

(Geliş/Received : 22.12.2017 ; Kabul/Accepted : 04.02.2018)

## ÖZ

Bu çalışmada, doğal gaz yakıtlı gerçek bir kombine çevrim santralının verileri kullanılarak termodinamiğin birinci yasa analizi uygulanmıştır. Sistemin 25 °C çevre sıcaklığı ve 101.325 kPa basınçta net güç çıktıları Brayton çevrimi ve Rankine çevrimi için sırasıyla 45 MW ve 12MW olarak hesaplanmış ve değişen çevre koşullarının sistem üzerindeki etkisi incelenmiştir. Gaz türbininin ortalama % 38 verime ve kombine çevrimin ise % 48 verime sahip olduğu hesaplanmıştır. Çevre sıcaklığının 45 °C'lik artışı sistemin net gücünde % 22'lik bir azalmaya neden olurken kompresör kısmında sıkıştırma işi için gereken güç de artmıştır. Çevre sıcaklığının artmasıyla kompresöre giren hava debisinin azaldığı bunun doğrultusunda özgül yakıt sarfiyatında da %20 azalma olduğu görülmüştür. Çevre sıcaklığının kombine çevrim santraline de doğrudan bir etkisinin olduğu ortaya konmuştur.

**Anahtar Kelimeler:** Kombine çevrim, performans analizi, brayton çevrimi, rankine çevrimi.

## Performance Analysis of Natural Gas Combined Cycle Power Plant

### ABSTRACT

In this study, the first law analysis of the thermodynamics was applied using the data of a real gas-fired combined cycle power plant. The net power outputs of the system are calculated for the Brayton cycle and Rankine cycle as 48 MW and 12 MW respectively and the effect of changing environmental conditions on the system was examined. It is calculated that the gas turbine has an average efficiency of 38% and the combined cycle has 48% efficiency. With an increase in ambient temperature of 45 °C, the system has 22% reduction in net power, while the power required for compression in the compressor section has also increased. As the ambient temperature increased, there was a 20% reduction in specific fuel consumption in the direction of the decrease in air flow entering to the compressor. It has also been revealed that, the environmental temperature has a direct effect on the combined cycle power plant.

**Keywords:** Combined cycle , performance analysis, brayton cycle , rankine cycle

### 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Enerji, sanayileşmenin alt yapısı ve günlük hayatın vazgeçilmez bir unsurudur. Bu nedenle, enerji ihtiyacı ulusal ve uluslararası gündemde oldukça önemli bir yer tutar. Enerji kaynaklarının tükenebilir oluşu ve çevresel etkiler sebebiyle; Günümüzde ülkeler için güvenli, yeterli miktarda, ucuz ve temiz enerji üretmek, ekonomik ve sosyal hayatın temel problemleri arasında yerini almaktadır. Enerji ihtiyacının her geçen gün artması ve sanayileşme hedefleri gerçekleştirilirken önemli çevre sorunlarının ortaya çıkmış olması gibi nedenlerle bütün dünyada birincil yakıt kaynaklarından mümkün olan en yüksek oranda yararlanma eğilimi önem kazanmıştır. Sanayisi, ekonomisi ve nüfusu ile hızla büyüyen ve ülkemizde de enerji ihtiyacı sürekli artmaktadır. Üretilen enerjinin yüksek verimle kullanılması, mevcut enerji kaynaklarının yanı sıra atık enerji kaynaklarına ait potansiyelin değerlendirilmesi büyük önem taşımaktadır [1-2-3].

İşletmelerde elektrik ve ısı enerjilerine aynı anda ihtiyaç duyuluyor olması ve özellikle elektrik enerji elde edilmesinden sonra atık gazların önemli miktarda ısı enerjisi içeriyor olmaları aynı tesis içerisinde ısı ve elektrik enerji ihtiyaçlarının birlikte karşılanması alternatifini ortaya çıkarmıştır. Bu uygulamanın ardında yatan temel düşünce, güç santrallerinde çevreye atılan ısının yararlı bir amaca yönlendirilmesidir. Böylece birincil enerji daha etkin kullanılır ve bunun yanı sıra çevreye atılan karbondioksitin ve diğer zararlı gazların azaltılması ile sera etkisini azaltır [4-5].

Kombine güç çevrimleri gaz ve buhar türbinlerinin birlikte kullanıldığı çevrimlerdir. Kombine güç çevrimi, temel olarak Brayton çevriminin yüksek sıcaklıklarda çalışmasının sağladığı kazançlardan yararlanmak ve egzoz gazlarıyla atılan ısı enerjisini geri kazanarak bu enerjiyi buharlı güç çevrimi gibi bir alt çevrimde ısı kaynağı olarak değerlendirmek fikrinden hareketle ortaya çıkmıştır. Kombine güç çevrimleri geçen yüzyılın başlarından beri tasarlanan sistemler olmasına rağmen ilk kombine çevrim santralının 1950'de kurulmuş, daha sonra hızla artan uygulamaları ile günden güne gelişim

\*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)  
e-posta : okaraagac@sinop.edu.tr

göstermektedir. Bu çevrimde egzoz gazlarının enerjisinden bir ısı değiştiricisi yardımıyla alt çevrimde buhar üretiminde faydalanılır. Alt çevrimde ara ısıtma ve ara buhar alma işlemleri de yapılabilir [6].

Kombine enerji üretimi, termik santral, jeotermal ve hidroelektrik gibi elektrik üretim yöntemleriyle karşılaştırıldığında düşük maliyetli yatırımı, daha kısa kuruluş süresi ve bunlarla birlikte çevre kirliliğinin yanı sıra giderek artan yakıt çeşitliliğine bağlı olarak dünya çapında tipik güç ve ısı üretim seçeneklerinin yerini alacak cazip bir alternatif olarak bilinmektedir [7]. Kombine çevrimli santraller yüksek verim ve güç sunmanın yanında esnek işletme koşullarına uygun, çabuk devreye alınabilen, tam yük ve değişken yük durumlarına kolay adapte olabilen, hatta değişken yük durumlarında da yüksek verimle çalışma özelliklerine sahiptirler [8].

Literatürde bu konu ile ilgili yapılan çeşitli çalışmalar mevcuttur. Ünver ve ark. (2005) tarafından doğal gaz yakıtlı bir kombine çevrim güç santralının performans parametrelerinin değişimi ve değişim miktarları yük durumuna ve çevre koşullarına bağlı olarak termodinamiğin birinci ve ikinci kanunları kullanılarak analiz edilmiştir. Çalışmalarında sistemi oluşturan her bir üniteye ait faydalı güç, tersinir güç, tersinmezlik değerleri ve sistemin genel verimlerini hesaplamışlardır. Karaali ve Öztürk (2007) tarafından kojenerasyon sistemleri için düşünülen iyileştirme yöntemlerinden, yakıt ve yanma havasının ön ısıtılması, sistemden üretilen buharın yanma odasına enjeksiyonu ve kompresör giriş havasının soğutulması yöntemlerini örnek alan kojenerasyon sistemine farklı durumlar için uygulamışlardır. Kojenerasyon tesisindeki net elektriksel güç karşılaştırıldığında; en iyi iyileştirme yönteminin yakıt ve havanın ön ısıtılması yönteminin olduğu ikinci metodun yanma odasına buhar püskürtme yöntemi olduğunu hesaplamışlardır. Rahim ve Gündüz (2013) tarafından "Gaz Türbinli Bir Isıl-Güç (Kojenerasyon) Çevrim Santralinin Enerji Ve Ekserji Analizi: Ankara Şartlarında Uygulama" adlı çalışmada tasarladıkları bir ısı-güç (kojenerasyon) çevrim sistemine termodinamiğin birinci ve ikinci yasası (ekserji analizi) uygulanarak, santraldeki kayıpları belirlemeye çalışmışlardır. Pusat vd. (2014) tarafından "Gaz Türbinlerinde Giriş Hava Debisinin Hesaplanması" adlı çalışmada gaz türbinlerinde kompresör giriş havası kütleli debisinin hesaplanmasında kullanılacak bir yöntem geliştirmişlerdir. Hesap yöntemi temel olarak, yanma odasındaki yanma denklemlerine ve baca gazı emisyon cihazları tarafından alınan ölçüm değerlerini kullanmışlardır. Bu yöntem kullanarak gaz türbinleri için kompresör giriş hava kütleli debisini pratik bir şekilde hesaplayabilmişlerdir. Boyaghchi ve Molaie (2015) tarafından ileri ekserji analizi ve kanal tipi brülörlü gerçek bir kombine çevrim santralının optimizasyonu yapılmıştır. Vandani vd. (2016) yılında yapılan çalışmada belirli bir kombine çevrim santralinde doğal gaz yerine dizel yakıtın kullanımının ekserji, ekonomik ve çevresel etkileri incelenmiştir. Noussan vd.

tarafından üç üniteli bir kombine çevrim santralinin birkaç yıllık saatlik verileri üzerinden detaylı bir analiz yapılmıştır. Gaz türbininin kısmi yüklerde verim eğrisi elde edilmiş, daha düşük yüklerde çevrim verimindeki azalış gösterilmiştir. Hosseini vd. (2017), tarafından kombine çevrimli bir elektrik üretimi tesisinde optimum performans koşulları sağlamak için gaz türbini sonrası ek ateşleme sistemi kullanılarak çeşitli parametreleri araştırmışlardır. Yapılan bu çalışmada bu modelin kombine çevrim enerji santralının verimliliğinin yaklaşık % 6 oranında arttığını ve CO<sub>2</sub> emisyonunun % 5.63'e kadar düştüğünü göstermiştir. Maliyet değerlerinin bu uygulama sayesinde % 1'den az olduğu ve maliyetteki çeşitliliklerin tasarım noktası maliyetine eşit veya daha düşük olduğu saptanmıştır.

Bu çalışmada, 60 MW kurulu güce sahip gerçek bir kombine çevrim santralinden alınan veriler doğrultusunda sistemin birinci (enerji) yasa analizi yapılmış, çevre koşullarındaki değişimin sistemin performansını hangi oranlarda etkilediği ortaya konulmuştur. Analiz ve hesaplamalar yapılırken Engineering Equation Solver (EES) isimli paket bilgisayar programı kullanılmıştır. Ayrıca değişen çevre koşullarının sistem verimlerine etkileri incelenmiştir.

## 2. KOMBİNE DOĞAL GAZ ÇEVİRİM SANTRALİ (NATURAL GAS COMBİNE CYCLE POWER PLANT)

Termodinamik olarak kombine çevrim Brayton üst çevrimi ile bir Rankine alt çevriminden oluşmaktadır. Brayton çevriminden açığa çıkan egzoz gazındaki atık ısı Rankine çevrimi için ısı kaynağıdır. Kombine çevrim, gaz türbininin yüksek giriş sıcaklığı ile buhar türbinin düşük çıkış sıcaklığı avantajını bir araya getirerek yüksek verimli güç üretimini sağlar. Bu sistemle ısı talepleri istenilen buharın termodinamik özelliklerine göre ya doğrudan atık ısı kazanından ya da buhar türbininden çekilen buhar ile karşılanabilir.

Atık ısıdan yararlanan bu sistemlerde elektrik üretimini arttırmak için bir buhar türbinine ısı ve güç talep durumuna göre kısmen veya tamamen gönderilebilir. Böyle bir tasarım gaz türbini sistemlerinde sıkça uygulanmaktadır. Kombine çevrimler yakıt enerjisinin % 40 ya da daha fazlasını elektriğe çevirebilmektedir. Eğer ilave yanma kullanılıyorsa kombine sistem değişen ısı ve elektrik talebini karşılama esnekliğine sahiptirler.

Doğal gaz yakıtlı kombine çevrim santralının seması şekil 1'de gösterilmiştir. Çevre koşullarındaki hava, kompresör tarafından emilerek sıkıştırılır. Sıkıştırılan havanın basıncı ve sıcaklığı artar. Basıncı ve sıcaklığı artmış olan havayla yakıt sabit basınçta yanmanın meydana geldiği yanma odasına yönlendirilir. Yanma sonunda oluşan yüksek sıcaklıktaki gaz genişletilerek gaz türbininde elektrik enerjisine dönüştürülür. Gaz türbininin egzozundan çıkan yüksek sıcaklıktaki gazlar atmosfere atılmadan önce atık ısı buhar kazanında buhar ve sıcak su üretmek için kullanılır. Burada üretilen kızgın su buharı, buhar türbinine gönderilerek türbinin

dönmesi sağlanır. Elde edilen bu mekanik enerji bir mil ile jeneratörü tahrik eder ve elektrik enerjisi elde edilir.

Sistem analizi sırasında yapılan kabuller:

- Tüm sistem elemanları kararlı rejim şartlarındadır.
- Hava ve egzoz gazları için ideal gaz kabul edilmiştir.
- Yanma reaksiyonları yanma odasında tamamlanmıştır.
- Kinetik ve potansiyel enerji değişimleri ihmal edilmiştir.
- Kompresöre havanın çevre şartlarında girdiği kabul edilmiştir.

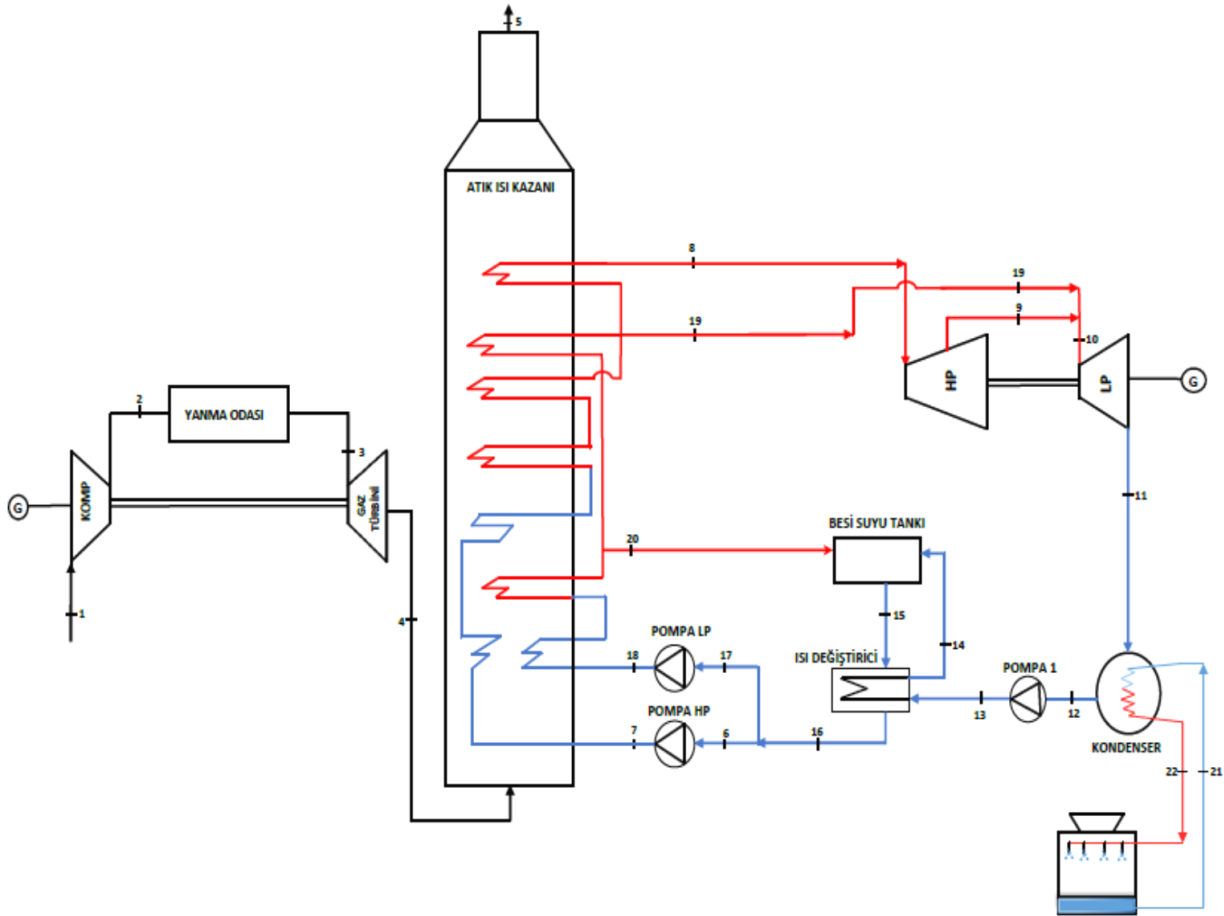
yazılabilir. Sürekli akışlı açık sistemler için kütle korunumu prensibi (1) aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$\sum \dot{m}_{giren} = \sum \dot{m}_{çıkan} \quad (1)$$

Burada  $\dot{m}$  akışkanın kütleli debisini ifade etmektedir. Enerji dengesi için, sistemin her bir elemanına termodinamiğin birinci kanunu uygulanır ve enerji dengesi (2) numaralı denklem ile ifade edilmektedir.

$$\dot{Q} + \sum(\dot{m}h)_{giren} = \dot{W} + \sum(\dot{m}h)_{çıkan} \quad (2)$$

Burada  $\dot{Q}$  ısı enerjisi,  $\dot{W}$  işi ve  $h$  entalpiyi ifade



Şekil 1. Atık Isı kazanlı kombine güç sistemi (Combined power system with waste heat boiler)

### 3.TERMODİNAMİK ANALİZ (THERMODYNAMIC ANALYSIS)

Termal sistemlerin değerlendirilmesi ve geliştirilmesi için termodinamik verimsizliklerin kaynağı ve sistem bileşenleri arasındaki etkileşimin anlaşılması gereklidir. Kapalı bir sistemin toplam enerjisi çevresiyle sadece ısı veya iş etkileşimi sonucunda değişebilir. Buna bağlı olarak kapalı bir sistemin hal değişimi sırasındaki toplam enerji değişimi, sistem sınırlarında gerçekleşen net ısı ve iş geçişine eşittir.

Yukarıdaki varsayımlarla herhangi bir kararlı rejim sistemi için kütle, enerji dengesi aşağıdaki gibi

etmektedir. Herhangi bir sistem için enerji verimliliği aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$\eta = \frac{\text{Çıkan Enerji}}{\text{Toplam Giren Enerji}} \quad (3)$$

Özgül yakıt sarfiyatını aşağıdaki denklemde verilmiş olup burada  $\dot{m}_y$  yakıtın debisini,  $\dot{W}_{net}$  ise kombine çevrim santralinde üretilen net gücü ifade etmektedir.

$$\text{ÖYS} = \frac{3600\dot{m}_y}{\dot{W}_{net}} \quad (4)$$

Yukarıda verilen denge denklemleri sistemin her elemanına uygulandığında aşağıda verilen eşitlikler elde edilir.

*Kompresör*

$$\dot{m}_1 = \dot{m}_2 \quad (5)$$

$$W_k = \dot{m}_1(h_2 - h_1) \quad (6)$$

*Yanma Odası*

$$\dot{m}_2 + \dot{m}_y = \dot{m}_3 \quad (7)$$

$$Q_g = \dot{m}_3 h_3 - (\dot{m}_2 h_2 + \dot{m}_y h_y) \quad (8)$$

*Gaz Türbini*

$$\dot{m}_3 = \dot{m}_4 \quad (9)$$

$$W_{GT} = \dot{m}_3(h_4 - h_3) \quad (10)$$

*Atık Isı Kazanı*

$$\dot{m}_4 = \dot{m}_5 \quad (11)$$

$$\dot{m}_7 = \dot{m}_8 \quad (12)$$

$$\dot{m}_{17} = \dot{m}_{19} + \dot{m}_{20} \quad (13)$$

$$\dot{m}_4 h_4 + \dot{m}_7 h_7 + \dot{m}_{18} h_{18} = \dot{m}_5 h_5 + \dot{m}_8 h_8 + \dot{m}_{19} h_{19} + \dot{m}_{20} h_{20} + Q_k \quad (14)$$

Burada  $Q_k$  kayıp olan ısıyı ifade etmektedir.

*Buhar Türbini*

$$\dot{m}_8 = \dot{m}_9 \quad (15)$$

$$\dot{m}_{10} = \dot{m}_{11} \quad (16)$$

$$W_{BT} = (\dot{m}_8 h_8 - \dot{m}_9 h_9) + (\dot{m}_{10} h_{10} - \dot{m}_{11} h_{11}) \quad (17)$$

*Kondenser*

$$\dot{m}_{11} = \dot{m}_{12} \quad (18)$$

$$\dot{m}_{21} = \dot{m}_{22} \quad (19)$$

$$Q_y = (\dot{m}_{11} h_{11} - \dot{m}_{12} h_{12}) + (\dot{m}_{21} h_{21} - \dot{m}_{22} h_{22}) \quad (20)$$

*Isı Değiştirici*

$$\dot{m}_{13} = \dot{m}_{14} \quad (21)$$

$$\dot{m}_{15} = \dot{m}_{16} \quad (22)$$

$$\dot{m}_{13} h_{13} + \dot{m}_{15} h_{15} = \dot{m}_{14} h_{14} + \dot{m}_{16} h_{16} + Q_k \quad (23)$$

*Besi Suyu Tankı*

$$\dot{m}_{14} h_{14} + \dot{m}_{20} h_{20} = \dot{m}_{15} h_{15} + Q_k \quad (24)$$

*Kondenser Pompası*

$$\dot{m}_{12} = \dot{m}_{13} \quad (25)$$

$$W_{p1} = \dot{m}_{12}(h_{13} - h_{12}) \quad (26)$$

*Yüksek Basınç Pompası*

$$\dot{m}_6 = \dot{m}_7 \quad (27)$$

$$W_{HP} = \dot{m}_6(h_7 - h_8) \quad (28)$$

*Alçak Basınç Pompası*

$$\dot{m}_{17} = \dot{m}_{18} \quad (29)$$

$$W_{LP} = \dot{m}_{17}(h_{18} - h_{17}) \quad (30)$$

#### 4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA (RESEARCH FINDINGS AND DISCUSSION)

Bu çalışmada 15 °C çevre sıcaklığı ve 101.325 kPa basınçta tasarımı yapılan doğal gazlı kombine çevrim santraline yanma odasında hava ile yanan yakıt 1200 °C'de türbine girmekte ve 460 °C türbinden çıkmaktadır. Gaz türbininden çıkan eksoz gazı atık ısı kazanında ısısını rankine çevrimini aktararak bacadan 101 °C'de havaya atılır. Çizelge 1'de verilen genel sistem verilerinden görüldüğü gibi rankine çevrimi yüksek ve alçak basınç olmak üzere iki farklı basınçta çalışmaktadır. Yüksek basınç hattındaki kızgın buhar türbine birinci kademedden girerek türbin kanatlarını döndürmeye başlar. Alçak basınç hattı ise 4. kademedden türbine girer. Yüksek basınç ve alçak basınç hattı burada birleşerek enerjisi türbin kanatlarına aktarır. Elde edilen mekanik enerji jeneratör milini tahrik ederek elektrik enerjisi üretilir.

Çizelge 1. Sistem verileri (System Data)

Parametre	Birim	Değer
Gaz türbini modeli	-	LM 6000
Yakıt türü	-	Doğal Gaz
Türbin giriş sıcaklığı	°C	1200
Türbin çıkış sıcaklığı	°C	460
Basınç oranı	-	1/29
HP, AIK çıkış basıncı	bar	57
LP, AIK çıkış basıncı	bar	4.2
Atık gaz AIK giriş basıncı	bar	1.013

Kombine çevrim Santralinin gerçek çalışma verileri kullanarak her nokta için EES (Engineering Equation Solver) paket programıyla bilgisayar ortamında çözümlemesi yapılmış olup kütle, sıcaklık, basınç, entalpi ve enerji değerleri Çizelge 2'de verilmiştir.

**Çizelge 2.** Kombine çevrim santralının noktasal olarak bulunan değerler (Point values of the combined cycle plant)

Noktalar	m (kg/s)	T (°C)	P (KPa)	h (kJ/kg)	E (KW)
1	133	25	99.28	293.4	39013
2	133	532.2	2920	829.4	110282
3	135.4	1200	2820	1607	217430
4	135.4	458.1	101.3	747.5	101169
5	135.4	100	101.3	374.1	50630
6	11.92	63.62	120	266.4	3175
7	11.92	65	5561	276.7	3298
8	11.92	421.2	5561	3238	38597
9	11.92	223.8	423	2909	34670
10	15.25	223.8	423	2909	44355
11	15.25	44.48	7.7	2334	35599
12	15.25	44.48	7.7	170.8	2605
13	15.25	46	420	193	2943
14	15.25	95.1	320	398.6	6078
15	19.5	107	140	448.6	8749
16	19.5	63.62	120	266.4	5194
17	7.58	63.62	120	266.4	2019
18	7.58	65	836	272.7	2067
19	3.33	223.8	423	2909	9685
20	4.25	155	600	654	2779
21	1053	27.6	400	116	122153
22	1053	35.3	300	148.1	155972

Bu veriler ve termodinamik denge denklemleri kullanılarak kombine çevrim sisteminin termodinamik analiz yapılmıştır. Yapılan analizler sonucunda 25 °C çevre sıcaklığı ve 101.325 kPa basınçta gaz türbini gücü, buhar türbini gücü, gaz türbini ve net elektriksel verimi çizelge 3'de verilmiştir.

**Çizelge 3.** Kombine çevrim santralının çıkış verileri (Output data of the combined cycle plant)

Sistem elemanı	Değer	Birim
GT	45	MW
ST	12	MW
Toplam Güç	57	MW
Net Elektrik verimi	48	%
GT Elektrik verimi	38	%
HRSB verimi	0.9	%

Çizelge 4'de -5 °C ile 40 °C arasındaki çevre sıcaklıklarında santral çalışırken alınan sistemin yakıt debisi, yoğunlaştırıcı basıncı, yüksek basınç hattı atık ısı kazanı çıkış sıcaklığı, alçak basınç atık ısı kazanı çıkış sıcaklığı, gaz türbini eksoz çıkış sıcaklığı, gaz türbini net gücü, buhar türbini net gücü, sistem toplam net gücü verilmiştir. Brayton çevrimi çevre sıcaklığının artmasından etkilenerek yakıt debisi, ürettiği güç ve egzoz çıkış sıcaklığı değişirken, Rankine çevrimi bu değişikliklerden büyük oranda etkilenmemiştir. 40°C'de giren yakıt miktarı -5 °C'ye göre % 20 daha az yakıt tüketilirken sistem net gücü % 21.3 civarında azaldığı görülmektedir. Ayrıca kombine çevrim santrali 10 °C sıcaklıkta gaz türbininden ve buhar türbininden en yüksek gücü elde etmiştir.

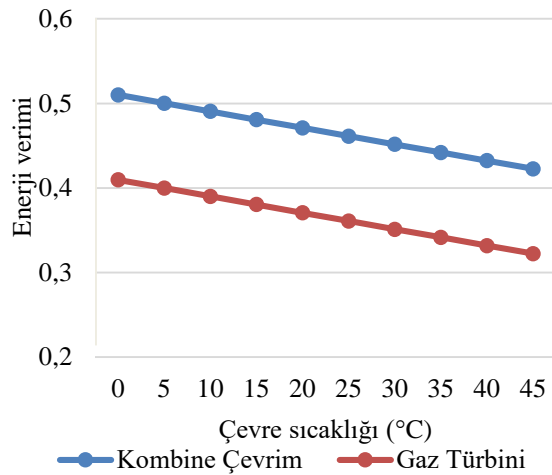
Çizelge 4'de çevre sıcaklığıyla üretilen gücün değişimi incelendiğinde çevre sıcaklığının artmasıyla birlikte gaz türbininde üretilen gücün düştüğü, buhar türbininde üretilen gücün çok fazla etkilenmediği görülmektedir. Gaz türbininde üretilen güçteki azalmanın sebepleri; kompresöre giren havanın sıcaklığıyla birlikte özgül hacminin de artması sonucu kompresörde harcanan enerjinin artmasıdır, ısınan havanın yoğunluğunun düşmesiyle birlikte debisindeki azalma ( $\dot{m} = \rho v$ ) azalan debiyle üretilen gücün düşmesidir. Bu durumda artan sıcaklık ile gaz türbini çevrimine giren havanın kütledebisi azalmakta dolayısıyla türbinden alınabilecek güç miktarı da azalmaktadır. Havanın kütledebisindeki azalma egzoz gazlarının kütledebisinde bir azalmaya neden olmakta ve bunun sonucu olarak buhar kazanına

**Çizelge 4.** Çevre sıcaklığına göre çıkış verileri (Output data according to ambient temperature)

Parametre	Çevre kuru termometre sıcaklığı (°C)						
	-5	0	10	20	25	30	40
Çevre yaş termometre sıcaklığı (°C)	-6.7	-2.2	6.5	15.1	17	23.8	32.5
Yakıt debisi (kg/s)	2.75	2.8	2.86	2.7	2.6	2.5	2.19
Yoğuşturucu basıncı (bar)	0.05	0.05	0.05	0.05	0.077	0.08	0.09
HP,AIK çıkış sıcaklığı (°C)	413.5	422.5	425	425	421	425	425
LP,AIK çıkış sıcaklığı (°C)	236.7	235.1	232	230	223	229.2	228.1
Gaz Türbini egzoz çıkışı (°C)	417.7	427.3	446	453	460	459.2	463.2
Buhar Türbini çıkış gücü (MW)	12	12.65	13.6	13.3	12	12.74	11.690
Gaz Türbini çıkış gücü (MW)	49	49.6	50	47	45	43.1	36.487
Sistem toplam çıkış gücü (MW)	61	62	63.6	60.3	57	55.84	48.177
ÖYS (kg/kWh)	0.162	0.162	0.161	0.161	0.164	0.161	0.163

daha az güç verildiğinden buhar türbininden alınan gücü de azalmaktadır.

Çevre sıcaklığının gaz türbini ve kombine çevrim santral verimine etkisi şekil 2’de verilmiştir. Gaz türbini ve



**Şekil 2.** Çevre sıcaklığının sistem verimine etkisi (Effect of ambient temperature on system efficiency)

kombine çevrim santral veriminin, çevre sıcaklığının artmasıyla birlikte azaldığı görünmektedir. Verimin çevre sıcaklığıyla azalmasının nedeni, çevre sıcaklığının

0°C’den 45°C’ye yükselmesiyle sisteme giren havanın özgül hacminin de artması ve bunun sonucunda kompresörde harcanan gücün artmasıdır. Bu azalma türbinden üretilen gücü etkilediği gibi gaz türbini verimini de doğrudan etkilemektedir. Değişen çevre sıcaklığının gaz türbini verimine etkisi grafikten görüldüğü gibi 45 °C artmasıyla % 21’lik azalma meydana gelmiştir.

## 5. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Elde edilen bulgular ve grafikler incelendiğinde sistem noktasal verileri ve termodinamik denge denklemleri kullanılarak Brayton çevrimi gücü, Rankine çevrimi gücü ve kombine çevrim gücü sırasıyla 45,12 ve 57 MW bulunmuş, Brayton çevrimi, Rankine çevrimi ve kombine çevrim verimleri sırasıyla %38, %24 ve %48 bulunmuştur. Çevre sıcaklığının artmasıyla türbinden alınabilecek güç miktarı azalmaktadır. Ayrıca, kompresör kısmında sıkıştırma işi için gereken güç de artmaktadır. Dolayısıyla gaz türbini çevriminden üretilen net elektrik gücü azalmaktadır. Havanın kütleli debisindeki azalmaya neden olmakta ve bunun sonucu olarak buhar kazanına daha az güç verildiğinden buhar türbininden alınan güç azalmaktadır. Aynı zamanda çevre sıcaklığının sistem verimine de doğrudan bir etkisinin olduğu ortaya konmuştur.

Çizelge 4’de Çalışmada elde edilen sonuçlarını literatürde yer alan benzeri çalışmalar ile kıyaslanması yapılarak varsa farklar ortaya koyulmaya çalışılmış ve yorumlanmıştır.

- [5] “Türkiye’de Enerji ve Geleceği”, İTÜ, İstanbul, (2007),  
 [6] Çengel, Y.A., Boles, M.A., “Mühendislik Yaklaşımıyla Termodinamik”, Çev. Pınarbaşı A. **Güven Kitabevi Yayıncılık**, 583s, İzmir, (2002).

**Çizelge 4.** Karşılaştırma (Comparison)

Sistem elmanı	Boyaghchi (2015)	Rahim (2013)	Ünver (2005)	Bu çalışmada	Fark 1. (%)	Fark 2. (%)	Fark 3. (%)
Toplam güç, $W_{net}$ (MW)	420	57	700	60	85,7	5	91,4
Gaz türbini verimi $\eta_{GT}$	33	31,7	37	38	13,1	16,5	2.63
Buhar türbini verimi $\eta_{BT}$	34	-	30	24	29	-	20
KÇ enerji verimi $\eta_1$	52	47,5	53	48	7,6	1	9,4

Kombine çevrim güç santrallerinde belirlenen bazı parametreler için Referans 1. Boyaghchi ve Molaie (2015), Referans 2. Rahim ve Gündüz (2013) ve Referans 3. Ünver ve Kılıç (2005) yaptıkları çalışmalarla karşılaştırmaları çizelge 4’de gösterilmiştir. Referans çalışmalar ile kıyaslanmanın daha iyi anlaşılabilmesi için referans çalışmalara ait toplam güç üretimi ( $W_{net}$ ), gaz türbini verimi ( $\eta_{GT}$ ), buhar türbini verimi ( $\eta_{BT}$ ) ve kombine çevrimin toplam verimi ( $\eta_1$ ) Çizelge 4’de verilerek yapılan çalışma ile arasındaki farklar ortaya koyulmuştur. 60 MW toplam güç kapasitesine sahip kombine güç çevrimi ile ilgili yapılan çalışma diğer çalışmalar ile kıyaslandığında en fazla verim farkının %29 ile 1. Referans ile kıyaslanması durumunda buhar türbini veriminde olduğu gözlemlenmiştir. Bu durumun 1. referans çalışmasındaki toplam güç üretimi kapasitesinin çok fazla olmasından kaynaklı olduğu düşünülmektedir. Yapılan kıyaslamada en az farkın ise %1 ile 2. Referans ile kıyaslanması durumunda kombine çevrimin toplam veriminde olduğu gözlemlenmiştir. Farkın bu denli az olması 2. Referans çalışmasının toplam güç üretimi kapasitesinin yapılan çalışmaya çok yakın olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.

#### KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Varınca, K.B., Gönüllü, M.T., “Kojenerasyon Sistemlerinin Çevresel Etkilerinin Değerlendirilmesi, (2002).  
 [2] Karakaş, K., “Doğal Gaz ile Elektrik Enerjisi Üretimi ve Ekonomik Analizi”, **Yüksek Lisans Tezi**, Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, (2002).  
 [3] Ünver Ü., Kılıç M., “Bir Kombine Çevrim Güç Santralinin Termodinamik Analizi” , **Mühendis ve Makina**, 46(545):47-56, (2005).  
 [4] N. Akdeniz, C.D. İlhan, İ. Üçgül, M. Acar, M. Bayhan, “Doğal Gazlı Kojenerasyon Sisteminin Termodinamik Analizi ve Süleyman Demirel Üniversitesi Örneği”, 8. Ulusal Tesilat Mühendisliği Kongresi, İzmir, 901-911, (2007).  
 [5] Dincer I, Rosen MA, “Thermodynamic aspects of renewables and sustainable development”, **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 9: 169-189, (2005)  
 [6] Rahim M.A., Gündüz D, “Gaz Türbinli Bir Isıl-Güç (Kojenerasyon) Çevrim Santralinin Enerji Ve Ekserji Analizi: Ankara Şartlarında Uygulama”, **Tübvav Bilim Dergisi**, 6(2): 19-27, (2013).  
 [7] Hosseini, S.E., Barzegaravval, H., Ganjehkaviri, A., Wahid, M.A., Mohd Jaafar, M.N., “Modelling and exergoeconomic-environmental analysis of combined cycle power generation system using flameless burner for steam generation”, **Energy Conversion and Management**, 135:362-372, (2017).  
 [8] Karaali R., Öztürk İ.T., “Gaz Türbinli Kojenerasyon Sistemlerinin Verimini İyileştirme Yöntemlerinin İncelenmesi”, **Mühendis ve Makina**, 49(577): 16-21, (2007).  
 [9] Erdem H.H., Sevilgen S.H., Akkaya A.V., Çetin B., “Gaz Türbinlerinin Kısmi Yüklerdeki Birim Elektrik Üretim Maliyetinin Analizi”, **Journal of Engineering and Natural Sciences Mühendislik ve Fen Bilimleri Dergisi**, 23(1): 123-132, (2005).  
 [10] Pusat Ş., Akkoyunlu M.T., Erdem H.H., “Gaz Türbinlerinde Giriş Hava Devisinin Hesaplanması”, **Journal of Engineering and Natural Sciences Mühendislik ve Fen Bilimleri Dergisi**, 32: 469-476, 2014.  
 [11] Boyaghchi, F.A., Molaie, H., “Advanced exergy and environmental analyses and multi objective optimization of a real combined cycle power plant with supplementary firing using evolutionary algorithm”, **Energy**, 93: 2267–2279, (2015).  
 [12] Amin M.K.V., Fatemeh J., Ramin B.B., “Exergic, economic and environmental impacts of natural gas and diesel in operation of combined cycle power plants” , **Energy Conversion and Management**, 109: 103–112, (2016).  
 [13] Matteo J., Michel N., Alberto P., “Operational analysis of natural gas combined cycle CHP plants:Energy performance and pollutant emissions”, **Applied Thermal Engineering**, 100: 304–314, (2016).