

Orijinal Makale/Research Article

Doğalgaz kullanılan bir trijenerasyon sisteminin enerji ve ekserji analizi

Fatih YİĞİT¹, Ahmet KABUL¹

¹Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 32200, Isparta, Türkiye

Anahtar Kelimeler

Yerinde Enerji Üretimi
Trijenerasyon Sistemi
Termodinamik Analiz

Makale geçmişi:

Geliş Tarihi: 16.01.2019
Kabul Tarihi: 08.12.2020

Öz: Bu çalışmada, yerinde enerji üretimi yöntemlerinden olan trijenerasyon sisteminin EES (Engineering Equation Solve) yazılımı kullanılarak enerji ve ekserji analizi yapılmıştır. Tasarlanan trijenerasyon sisteminde aylık 1000 m³ doğal gaz kullanılması durumu için sistemin üretim kapasiteleri, ekserji yıkımları ve her bir elemanın ekserji verimleri hesap edilmiştir. Belirlenen çalışma şartlarında aylık 1000 m³ doğal gaz tüketen trijenerasyon sisteminin elektrik üretimi 3.018 kW, ısıtma kapasitesi 10.12 kW ve soğutma kapasitesi 6.574 kW olduğu hesap edilmiştir. Bu kapasitelerde üretim yapabilen trijenerasyon sisteminin ısı veriminin %24, COP'nin 0.68 ve toplam ekserji yokoluşunun 8.49 kW olduğu belirlenmiştir. Sistemin elemanlarının toplam yok olan ekserjideki payının sırasıyla kazanda %28, kondenser I'de %24, absorberde %14, generatörde %12, kondenser II'de %11 evaporatörde %9 ve türbinde %2 olduğu hesap edilmiştir. Elde edilen bu sonuçların literatürdeki benzer hesaplamalarda elde edilen bulgulara yakın olduğu belirlenmiştir.

Atıf için/To Cite:

Yiğit F. Kabul A. Doğalgaz kullanılan bir trijenerasyon sisteminin enerji ve ekserji analizi. Uluslararası Teknolojik Bilimler Dergisi, 12(3), 92-100, 2020.

Energy and exergy analysis of a trigeneration system using natural gas

Keywords

In Place Energy Generation
Tri-generation Systems
Thermodynamic Analysis

Article history:

Received: 16.01.2019
Accepted: 08.12.2020

Abstract: In this study, tri generation system which is one of the in place energy generation methods is analyzed thermodynamically by using EES (Engineering Equation Solve) software. The electricity capacity, exergy losses, and exergy efficiency was calculated which of the case study of consuming of 1000 m³ natural gas. In the pre-determined conditions, it is calculated that a trigeneration system which consumes 1000 m³ of natural gas per month has a capacity of generating the electrical energy of 3.018 kW, heating capacity of 10.12 kW and cooling capacity of 6.574 kW. It is calculated that such a trigeneration system which has such capacities of production has a thermal efficiency of 24%, COP of 0.68 and total exergy loss of 8.49 kW. The total loss of exergy at each system component has a percentage of; 28% at the boiler, 24% at the condenser I, 14% at the absorber, 12% at the generator 11% at the condenser II, 11% at the evaporator and 2% at the turbine respectively. These results that are obtained have shown resemblance with the results that have been published previously.

1. Giriş

Enerji, ülkelerin gelişmişlik düzeylerini, teknolojiye dayanarak faydalanma seviyelerini ve hatta ülkelerin ilerleyebilme potansiyelini gösteren temel bir parametre olarak, kitaplardaki tanımı olan iş yapabilme yeteneğinin çok ötesinde anlamları taşımaktadır. İnsanlar daha konforlu bir yaşam sürmek adına yaşam alanlarında daha fazla enerji tüketmeye başlamış ve bu durum

beraberinde çeşitli sorunları da getirmiştir [1]. Enerji konusundaki sorunların aşılabilmesi için yeni enerji kaynakları araştırılmalı ve mevcut kaynakların kullanım alanları genişletilmelidir. Bu açıdan Ülkemize bakıldığı zaman durum çok farklılık göstermemekle birlikte enerjiye duyulan ihtiyacın artması Ülkemizin enerji konusunda dış kaynaklara bağımlılığını artırmaktadır [2],[3].

Ülkemizde, konutlarda tüketilen elektrik, ısıtma ve soğutma amaçlı kullanılan enerji miktarının toplam tüketime oranı yaklaşık %45 civarındadır. Ülkemizde enerji tüketim kültürünün değişmesinin gerekliliğini gösteren çok çeşitli istatistikler (enerjinin dışa bağımlılığı yüzdeleri, konutlarda ve sanayide tüketilen enerji miktarları vb.) mevcuttur. Bu istatistik tablosu göz önüne alındığında en ufak tasarruf hamlelerinin bile büyük önem arz ettiği ortadadır. Konutlardaki enerji tüketiminin en aza indirilmesi enerji konusunda dışa bağımlı olan ülkemizin ekonomisine büyük katkılar sağlayabilir. Diğer bir bakış açısıyla bakıldığında, konutlardaki enerji tüketiminin toplam tüketime olan oranının azaltılması sanayide üretim için harcanacak enerjinin payını arttıracak ve böylelikle üretim miktarları artacaktır [4]-[6].

Ayrıca enerjinin üretildiği yerden kullanıldığı yere taşınması çeşitli kayıplara yol açmaktadır. En yaygın olarak kullanılan enerji türü olan elektrik enerjisidir. Elektrik enerjisi üretim santralleri genellikle şehir merkezlerinden uzakta bulunmaktadır ve bu durum elektriğin taşınması zorunluluğu ortaya çıkarmaktadır. Ancak elektrik enerjisi iletim ve dağıtımında büyük kayıplar meydana gelmektedir. Dağıtım sistemlerinde gerilim seviyesi düşük ve akım yüksek olduğu için meydana gelen kayıpların büyük oranı dağıtım sistemlerinde oluşur. Bundan dolayı dağıtım sistemlerindeki enerjinin verimini iyileştirmek enerji kaybını azaltmada daha etkili olacaktır. Ülkemizde 2007 yılında 125 618561 MWh enerji tüketilmiş olup, bu enerjinin %14.8'i kayıp - kaçak ve %28.6'sında konutlarda harcanmıştır. Kayıp- kaçak oranının bu seviyelerde olması kabul edilemez [7].

Tablo 1. Dağıtım sisteminde meydana gelen kayıp türleri ve miktarı örneği [8].

Kayıp Türleri	Kayıp (kWh)	Kayıp (%)
İletim Hattı Kayıpları	4077761.75	9.66
Güç Transformator Kayıpları	1966082.61	4.66
Dağıtım Hattı Kayıpları	2935771.32	6.96
Alçak Gerilim Transformator ve Dağıtım Hattı Kayıpları	3322200.00	78.72
Toplam	42201675.68	100

Enerjinin en yaygın kullanılan biçimi olan elektrik enerjisi, depolanması zor ve maliyetli bir enerji türüdür. Hiçbir depolama sisteminde enerji, elektrik enerjisi olarak depolanamaz. Elektrik enerjisi bir başka forma dönüştürülerek farklı sistemlerle depolanabilir ve kullanılmak istendiğinde tekrar elektrik formuna

dönüştürülmesi gereklidir. Bu form dönüşümleri sırasında büyük oranda enerji kayıpları meydana gelebilir [9].

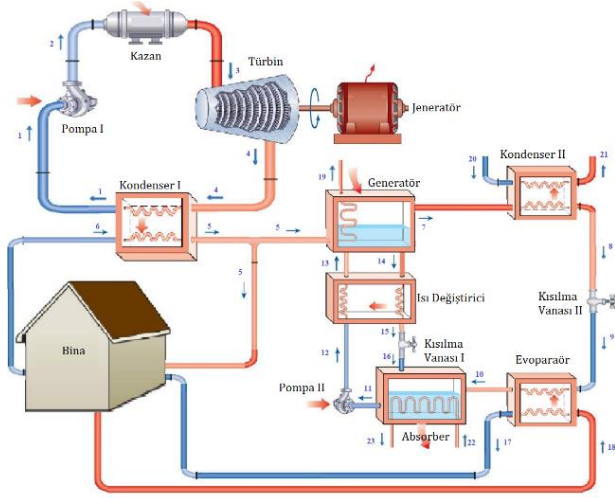
Elektrik enerjinin iletim ve dağıtımında yüksek oranlarda enerji kaybının olması bunun yanı sıra depolanmasının zor ve maliyetli oluşu enerjinin verimli kullanılmasının önünde duran büyük engellerdir. Bu engellerin aşılmasının en kolay yolu enerjinin tüketildiği yerde üretilmesidir.

Trijenerasyon sistemleri yerinde enerji üretimine imkân sağlarlar. Trijenerasyon sistemleri, eş zamanlı olarak elektrik enerjisi, ısıtma ve soğutma üretebilen sistemlerdir [10]. Trijenerasyon sistemlerinde elektrik enerjisi üretimi içten yanmalı motorlarla, gaz akışkanlı bir güç çevrimi olan Brayton çevrimi ya da buhar akışkanlı bir güç çevrimi olan Rankine çevrimi ile gerçekleştirilebilir. Termodinamik bir çevrim gerçekleştirilerek çalışan bir güç üretim sisteminde elektrik enerjisinin yanı sıra büyük miktarlarda ısı enerjisi ortaya çıkmaktadır. Ortaya çıkan ısı enerjisi doğrudan ısıtma amaçlı kullanılabilirdiği gibi ihtiyaç duyulduğu zamanlarda çeşitli soğutma makineleri aracılığı ile soğutma amaçlı kullanılabilir [10].

Özdemir (2011), doktora tez çalışmasında Çekmeköy ilçesinde bulunan beş sitenin ısı yalıtım projelerini ve enerji tüketim değerlerini inceleyerek ısı tasarrufu ile kojenerasyon sisteminin uygulanabilirliğinin fizibilite çalışmasını yapmıştır [11]. İlık (2012), doğal gaz yakıtı ile çalışan bir trijenerasyon sisteminin enerji ve ekserji analizi yapmıştır. Her bir ünite için tersinmezlik, entropi üretimi, kayıp kullanılabilir enerji ve ikinci kanun verimlerini hesaplamıştır. Kojenerasyon sisteminin termodinamik analizi sonucunda en fazla ekserji kaybının yaşandığı ünitelerin %32 yoğunlaştırıcı, %25 yanma odası, %23'ünde atık ısı kazanında olduğunu ortaya koymuştur. Absorbsiyon soğutma sisteminde ise en fazla ekserji kaybının yaşandığı ünitelerin %37 kondenser %31 generatör ve %18'inde evaporatörde olduğu tespit etmiştir [10]. Ekinci (2013), Erzurum Sağlık Kampüsü için trijenerasyon sisteminin uygulanabilirliğini araştırmak için bir simülasyon oluşturmuştur. Böylece hastanenin yıl boyunca talep edeceği enerji miktarını tahmin ederek trijenerasyon sisteminin etkin şekilde çalışmasını sağlamıştır [12]. Yazman (2015), çalışmasında geleneksel yöntemlerle ısıtma, soğutma ve elektrik ihtiyacı karşılanan bir üniversitenin hizmet binaları için, elektrik, ısıtma ve soğutma enerjisini tek bir sistemle üretebilecek bir trijenerasyon sisteminin modellenmesini üzerine çalışmıştır. Modellenen trijenerasyon sisteminin termodinamik ve ekonomik analizlerini yaparak sistemin amortisman süresini 3,22 yıl olarak hesap etmiştir. Sistemdeki ekserji kayıplarının çift etkili

absorpsiyonlu sistemin yüksek sıcaklık jeneratöründe (HTG) %32.12, yüksek sıcaklık eşanjöründe %21.36 ve absorpsiyonlu sistemin düşük sıcaklık jeneratörü (LTG) %14.60 olduğu ortaya koymuştur. Duymaz (2016), çalışmasında Kâğıt Sanayide hizmet veren bir fabrikada kojenerasyon Tesisi, ünite ekipmanlarının her birinin termodinamik analizini yapmıştır. Yaptığı hesaplamalar sonucunda; toplam enerji kaybının %42.92'si ile en yüksek enerji kaybı ve toplam yok olan ekserjinin %87.3'ü ile en yüksek ekserji kaybı oranına sahip olan ekipmanı kazan olarak tespit etmiştir [13].

Bu çalışmada, yerinde enerji üretiminde kullanılabilen trijenerasyon sistemlerinin enerji ve ekserji analizi yapılmıştır. Bu bağlamda ilk olarak Rankine çevrimi, ısıtma sistemi ve absorpsiyonlu soğutma sisteminden oluşan bir trijenerasyon sistemi tasarlanmış ve tasarlanan sistemde yakıt olarak doğalgaz kullanıldığı kabul edilmiştir (Şekil 1). Önceki çalışmalarda çoğunlukla daha büyük sistemler dikkate alınmıştır. Bu çalışmada ise kolay mukayese yapılabilmesi için örnek bir yaklaşım modeli oluşturmak amacıyla ayda 1000 m³ doğal gaz tüketen bir trijenerasyon sisteminin elektrik üretim, ısıtma ve soğutma kapasiteleri hesaplanmış ve sistem elemanlarının ekserji yıkımları ve ekserji verimleri ortaya koyulmuştur.



Şekil 1. Trijenerasyon sistemi

2. Materyal ve Yöntem

Kütle değişmeyen madde miktarını ifade eden bir terimdir. Sürekli akışlı açık sistemlerde birim kütleden ziyade kütsel debi tanımına ihtiyaç duyulur. Kütsel debi birim zamanda hareket eden kütle miktarını ifade eder. Bir sisteme giren ve çıkan kütsel debilerin sistemde meydana gelen kütle değişimine eşit olması

gerekmektedir [14]. Sürekli akışlı açık sistem için, $\Delta\dot{m}_{\text{sistem}} = 0$ olur.

$$\sum \dot{m}_{\text{giren}} - \sum \dot{m}_{\text{çıkan}} = \Delta\dot{m}_{\text{sistem}} \quad (1)$$

Termodinamiğin birinci kanunu olan enerjinin korunumu kanunu, var olan enerjinin yok edilemeyeceğini, olmayan bir enerjinin de var edilemeyeceğini ifade etmektedir [14],[15].

$$\sum \dot{E}_{\text{giren}} - \sum \dot{E}_{\text{çıkan}} = \frac{\Delta\dot{E}_{\text{sistem}}}{dt} = 0 \rightarrow \dot{E}_{\text{giren}} = \dot{E}_{\text{çıkan}} \quad (2)$$

Entropi bir sistem için düzensizliği ifade etmektedir. Gerçek olan her çevrim sistemin entropisi artacağı yönde ilerler. Sistemin bazı elemanları için entropi terimi azalan yönde olsada sistemin geneli dikkate alındığında entropi daima artmaktadır [14].

$$\sum \dot{S}_{\text{giren}} - \sum \dot{S}_{\text{çıkan}} + \dot{S}_{\text{üretim}} = \Delta\dot{S}_{\text{sistem}}/dt \quad (3)$$

\dot{Q} miktardaki ısı geçişi ile entropi geçiş miktarları yani ısının entropisi aşağıdaki denklemlerle hesap edilir,

$$\dot{S}_{\text{ısı}} = \dot{Q}/T \quad (3.a)$$

Ve \dot{m} miktarındaki kütle akışı ile entropi geçiş miktarları,

$$\dot{S}_{\text{kütle}} = \dot{m} \cdot s \quad (3.b)$$

eşitliği ile hesaplanır.

Entropi üretimin bir sonucu olarak, enerjinin kullanılabilirlik potansiyeli olan ekserji daima azalan yönde gerçekleşmektedir. Bazı sistem elemanlarında ekserji artan yönde ilerliyor olsa da sistemin tamamı göz önüne alındığında ekserji daima azalan yönde ilerlemektedir [14].

$$\dot{E}_{\text{XQ}} - \dot{E}_{\text{XW}} = \sum (\dot{m}\epsilon)_{\text{çıkan}} - \sum (\dot{m}\epsilon)_{\text{giren}} + \dot{E}_{\text{Xyokolan}} \quad (4)$$

şekindedir. Denklem (4)'te \dot{E}_{XQ} ve \dot{E}_{XW} sırasıyla ısı transferi ve mekanik enerjiye karşılık gelen birim zamandaki ekserjileri, ϵ özgül ekserjiyi ve \dot{m} akışkan debisini temsil etmektedir. Bu ifadeler aşağıdaki denklemlerle hesap edilir [14],[16].

$$\dot{E}_{\text{XQ}} = \dot{Q} \left(\frac{T - T_0}{T} \right) \quad (4.a)$$

$$\dot{E}x_W = \dot{W} \quad (4.b)$$

$$\dot{E}x_i = \dot{m}_i * \epsilon \quad (4.c)$$

$$COP = \frac{\dot{Q}_K}{\dot{W}_P} \quad (6)$$

Ekserji verimi Denklem (7) ile hesaplanır [15].

$$\eta_{II} = \frac{\text{Geri kazanılan ekserji}}{\text{Sağlanan ekserji}} \quad (7)$$

Rankine çevriminin ısı verimi, çevrimde elde edilen türbin işinin kazanda harcanan enerjiye oranı ile bulunabilir;

$$\eta_{th} = \frac{\dot{W}_t}{\dot{Q}_k} \quad (5)$$

Yukarıda verilen denge denklemlerinin sistemin her bir elemanı için uygulanması sonucu elde edilen formüller Tablo 2’de verilmiştir.

Tek etkili absorpsiyonlu soğutma sisteminin verimi, etkinlik katsayısı ile ifade edilir ve şu şekilde hesap edilir;

Tablo 2. Sistemin denge denklemleri

Sistem Elemanı	Kütle Dengesi	Enerji Dengesi	Entropi Dengesi	Ekserji Dengesi	II. Yasa Verimi
Pompa I	$\dot{m}_1 - \dot{m}_2 = 0$	$\dot{m}_1 \cdot h_1 + \dot{W}_{P,I} - \dot{m}_2 \cdot h_2 = 0$	$\dot{m}_1 \cdot s_1 - \dot{m}_2 \cdot s_2 + s_{ür,P,I} = 0$	$\dot{m}_1 \cdot \epsilon_1 + \dot{W}_{P,I} - \dot{m}_2 \cdot \epsilon_2 - Ex_{yok,P,I} = 0$	$\eta_{II,P,I} = \frac{\dot{m}_2 \cdot \epsilon_2 - \dot{m}_1 \cdot \epsilon_1}{\dot{W}_{P,I}}$
Kazan	$\dot{m}_2 - \dot{m}_3 = 0$	$\dot{m}_2 \cdot h_2 + \dot{Q}_{Kaz} - \dot{m}_3 \cdot h_3 = 0$	$\dot{m}_2 \cdot s_2 + \frac{\dot{Q}_{Kaz}}{T} - \dot{m}_3 \cdot s_3 + s_{ür,Kaz} = 0$	$\dot{m}_2 \cdot \epsilon_2 + \left(1 - \frac{T_0}{T}\right) \cdot \dot{Q}_{Kaz} - \dot{m}_3 \cdot \epsilon_3 - Ex_{yok,Kaz} = 0$	$\eta_{II,Kaz} = \frac{\dot{m}_3 \cdot \epsilon_3 - \dot{m}_4 \cdot \epsilon_4}{\dot{Q}_{Kaz} \cdot \left(1 - \frac{T_0}{T}\right)}$
Türbin	$\dot{m}_3 - \dot{m}_4 = 0$	$\dot{m}_3 \cdot h_3 - \dot{m}_4 \cdot h_4 - \dot{W}_T = 0$	$\dot{m}_3 \cdot s_3 - \dot{m}_4 \cdot s_4 + s_{ür,T} = 0$	$\dot{m}_3 \cdot \epsilon_3 - \dot{m}_4 \cdot \epsilon_4 - \dot{W}_T - Ex_{yok,T} = 0$	$\eta_{II,T} = \frac{\dot{W}_T}{\dot{m}_3 \cdot \epsilon_3 - \dot{m}_4 \cdot \epsilon_4}$
Kondenser I	$\dot{m}_4 - \dot{m}_1 = 0$ $\dot{m}_6 - \dot{m}_5 = 0$	$\dot{m}_4 \cdot h_4 - \dot{Q}_{K,I} - \dot{m}_1 \cdot h_1 = 0$ $\dot{m}_6 \cdot h_6 + \dot{Q}_{K,I} - \dot{m}_5 \cdot h_5 = 0$	$\dot{m}_4 \cdot s_4 - \dot{m}_1 \cdot s_1 + \dot{m}_6 \cdot s_6 - \dot{m}_5 \cdot s_5 + s_{ür,K,I} = 0$	$\dot{m}_4 \cdot \epsilon_4 + \dot{m}_6 \cdot \epsilon_6 - \dot{m}_5 \cdot \epsilon_5 - \dot{m}_1 \cdot \epsilon_1 - Ex_{yok,K,I} = 0$	$\eta_{II,K,I} = \frac{\dot{m}_5 \cdot \epsilon_5 - \dot{m}_6 \cdot \epsilon_6}{\dot{m}_4 \cdot \epsilon_4 - \dot{m}_1 \cdot \epsilon_1}$
Generatör	$\dot{m}_{13} - \dot{m}_7 = 0$ $\dot{m}_{14} = 0$ $\dot{m}_5 - \dot{m}_{19} = 0$	$\dot{m}_{13} \cdot h_{13} - \dot{m}_7 \cdot h_7 - \dot{Q}_{Gen} - \dot{m}_{14} \cdot h_{14} = 0$ $\dot{m}_5 \cdot h_5 + \dot{Q}_{Abs} - \dot{m}_{19} \cdot h_{19} = 0$	$\dot{m}_{13} \cdot s_{13} - \dot{m}_7 \cdot s_7 - \dot{m}_{14} \cdot s_{14} + \dot{m}_5 \cdot s_5 - \dot{m}_{19} \cdot s_{19} + s_{ür,Gen} = 0$	$\dot{m}_{13} \cdot \epsilon_{13} - \dot{m}_7 \cdot \epsilon_7 - \dot{m}_{14} \cdot \epsilon_{14} + \dot{m}_5 \cdot \epsilon_5 - \dot{m}_{19} \cdot \epsilon_{19} - Ex_{yok,Gen} = 0$	$\eta_{II,Gen} = \frac{\dot{m}_{13} \cdot \epsilon_{13} - \dot{m}_{14} \cdot \epsilon_{14} - \dot{m}_5 \cdot \epsilon_5 - \dot{m}_{19} \cdot \epsilon_{19}}{\dot{m}_5 \cdot \epsilon_5 - \dot{m}_{19} \cdot \epsilon_{19}}$
Kondenser II	$\dot{m}_7 - \dot{m}_8 = 0$ $\dot{m}_{20} - \dot{m}_{21} = 0$	$\dot{m}_7 \cdot h_7 - \dot{Q}_{K,II} - \dot{m}_8 \cdot h_8 = 0$ $\dot{m}_{20} \cdot h_{20} + \dot{Q}_{K,II} - \dot{m}_{21} \cdot h_{21} = 0$	$\dot{m}_7 \cdot s_7 - \dot{m}_8 \cdot s_8 + \dot{m}_{20} \cdot s_{20} - \dot{m}_{21} \cdot s_{21} + s_{ür,K,II} = 0$	$\dot{m}_7 \cdot \epsilon_7 + \dot{m}_{20} \cdot \epsilon_{20} - \dot{m}_{21} \cdot \epsilon_{21} - \dot{m}_8 \cdot \epsilon_8 - Ex_{yok,K,II} = 0$	$\eta_{II,K,II} = \frac{\dot{m}_{21} \cdot \epsilon_{21} - \dot{m}_{20} \cdot \epsilon_{20}}{\dot{m}_7 \cdot \epsilon_7 - \dot{m}_8 \cdot \epsilon_8}$
Kısılma Vanası I	$\dot{m}_{15} - \dot{m}_{16} = 0$	$\dot{m}_{15} \cdot h_{15} - \dot{m}_{16} \cdot h_{16} = 0$	$\dot{m}_{15} \cdot s_{15} - \dot{m}_{16} \cdot s_{16} + s_{ür,KV,I} = 0$	$\dot{m}_{15} \cdot \epsilon_{15} - \dot{m}_{16} \cdot \epsilon_{16} - Ex_{yok,KV,I} = 0$	$\eta_{II,KV,I} = \frac{\dot{m}_{16} \cdot \epsilon_{16}}{\dot{m}_{15} \cdot \epsilon_{15}}$
Evaporatör	$\dot{m}_9 - \dot{m}_{10} = 0$ $\dot{m}_{18} - \dot{m}_{19} = 0$	$\dot{m}_9 \cdot h_9 - \dot{Q}_{Ev} - \dot{m}_{10} \cdot h_{10} = 0$ $\dot{m}_{18} \cdot h_{18} + \dot{Q}_{Ev} - \dot{m}_{19} \cdot h_{19} = 0$	$\dot{m}_9 \cdot s_9 - \dot{m}_{10} \cdot s_{10} + \dot{m}_{18} \cdot s_{18} - \dot{m}_{19} \cdot s_{19} + s_{ür,Ev} = 0$	$\dot{m}_9 \cdot \epsilon_9 + \dot{m}_{18} \cdot \epsilon_{18} - \dot{m}_{19} \cdot \epsilon_{19} - \dot{m}_{10} \cdot \epsilon_{10} - Ex_{yok,Ev} = 0$	$\eta_{II,Ev} = \frac{\dot{m}_{10} \cdot \epsilon_{10} - \dot{m}_9 \cdot \epsilon_9}{\dot{m}_{18} \cdot \epsilon_{18} - \dot{m}_{19} \cdot \epsilon_{19}}$
Absorber	$\dot{m}_{10} + \dot{m}_{16} - \dot{m}_{11} = 0$ $\dot{m}_{22} - \dot{m}_{23} = 0$	$\dot{m}_{10} \cdot h_{10} + \dot{m}_{16} \cdot h_{16} - \dot{Q}_{Abs} - \dot{m}_{11} \cdot h_{11} = 0$ $\dot{m}_{22} \cdot h_{22} + \dot{Q}_{Abs} - \dot{m}_{23} \cdot h_{23} = 0$	$\dot{m}_{10} \cdot s_{10} + \dot{m}_{16} \cdot s_{16} - \dot{m}_{11} \cdot s_{11} + \dot{m}_{22} \cdot s_{22} - \dot{m}_{23} \cdot s_{23} + s_{ür,Abs} = 0$	$\dot{m}_{10} \cdot \epsilon_{10} + \dot{m}_{16} \cdot \epsilon_{16} - \dot{m}_{11} \cdot \epsilon_{11} + \dot{m}_{22} \cdot \epsilon_{22} - \dot{m}_{23} \cdot \epsilon_{23} - Ex_{yok,Abs} = 0$	$\eta_{II,Abs} = \frac{\dot{m}_{23} \cdot \epsilon_{23} - \dot{m}_{22} \cdot \epsilon_{22}}{\dot{m}_6 \cdot \epsilon_6 + \dot{m}_{10} \cdot \epsilon_{10} - \dot{m}_{11} \cdot \epsilon_{11}}$
Pompa II	$\dot{m}_{11} - \dot{m}_{12} = 0$	$\dot{m}_{11} \cdot h_{11} + \dot{W}_{P,II} - \dot{m}_{12} \cdot h_{12} = 0$	$\dot{m}_{11} \cdot s_{11} - \dot{m}_{12} \cdot s_{12} + s_{ür,P,II} = 0$	$\dot{m}_{11} \cdot \epsilon_{11} + \dot{W}_{P,II} - \dot{m}_{12} \cdot \epsilon_{12} - Ex_{yok,P,II} = 0$	$\eta_{II,P,II} = \frac{\dot{m}_{12} \cdot \epsilon_{12} - \dot{m}_1 \cdot \epsilon_1}{\dot{W}_{P,II}}$
Isı Değiştiricisi	$\dot{m}_{12} - \dot{m}_{13} = 0$ $\dot{m}_{14} - \dot{m}_{15} = 0$	$\dot{m}_{12} \cdot h_{12} - \dot{Q}_{ID} - \dot{m}_{13} \cdot h_{13} = 0$ $\dot{m}_{14} \cdot h_{14} + \dot{Q}_{ID} - \dot{m}_{15} \cdot h_{15} = 0$	$\dot{m}_{12} \cdot s_{12} - \dot{m}_{13} \cdot s_{13} + \dot{m}_{14} \cdot s_{14} - \dot{m}_{15} \cdot s_{15} + s_{ür,ID} = 0$	$\dot{m}_{12} \cdot \epsilon_{12} + \dot{m}_{14} \cdot \epsilon_{14} - \dot{m}_{15} \cdot \epsilon_{15} - \dot{m}_{13} \cdot \epsilon_{13} - Ex_{yok,ID} = 0$	$\eta_{II,ID} = \frac{\dot{m}_{13} \cdot \epsilon_{13} - \dot{m}_{12} \cdot \epsilon_{12}}{\dot{m}_{14} \cdot \epsilon_{14} - \dot{m}_{15} \cdot \epsilon_{15}}$
Kısılma Vanası II	$\dot{m}_8 - \dot{m}_9 = 0$	$\dot{m}_8 \cdot h_8 - \dot{m}_9 \cdot h_9 = 0$	$\dot{m}_8 \cdot s_8 - \dot{m}_9 \cdot s_9 + s_{ür,KV,II} = 0$	$\dot{m}_8 \cdot \epsilon_8 - \dot{m}_9 \cdot \epsilon_9 - Ex_{yok,KV,II} = 0$	$\eta_{II,KV,II} = \frac{\dot{m}_9 \cdot \epsilon_9}{\dot{m}_8 \cdot \epsilon_8}$

3. Bulgular

Tasarlanan trijenerasyon sistemi belirli kabuller yapılarak termodinamiksel olarak analiz edilmiş, enerji - ekserji verimleri ve ekserji yokoluşları her bir sistem elemanı için hesap edilmiştir. Bununla birlikte sistemin, kazan veriminin %85 türbin giriş basıncının 1000 kPa sıcaklığının 450 °C, kondenser I basıncının 90 kPa, ısı değiştiricisi etkinliğinin %70, evaporatör sıcaklığının 12 °C, kondenser II ve absorber sıcaklığının 42 °C olduğu çalışma şartlarında her bir noktanın basınç,

sıcaklık, entalpi, entropi, ekserji gibi termodinamiksel özellikler Tablo 3'te verilmiştir. Sistemin ikinci yasa verilerinin hesap edilebilmesi için ölü hal şartları 101.325 kPa basınç ve 25 °C sıcaklık olduğu kabul edilmiştir. Tasarlanan sistemde teorik değerler aralığında kabul edilen bazı parametreler (ısı değiştiricisi etkinliği, kazan çıkış sıcaklığı, evaporatör sıcaklığı vb.) değiştirilerek parametrik çalışmalar yapılmış ve sistemin en iyi çalışma şartları ortaya konulmuştur.

Tablo 3. Trijenerasyon sisteminin her bir noktasının termodinamiksel özellikleri

Akışkan	P (kPa)	T (°C)	h (kJ/kg)	s (kJ/kg.K)	m (kg/s)	E (kW)	Ex (kW)	x (%)
0 Ölü Hal	101	25.0	104.80	0.367				
1 Doymuş Sıvı su	90	57.0	405.20	1.270	0.004	1.509	0.116	
2 Sıkıştırılmış Sıvı su	1000	97.9	410.90	1.283	0.004	1.530	0.123	
3 Kızgın Buhar su	1000	450.0	3371.00	7.618	0.004	12.550	4.111	
4 Doymuş Buhar su	90	96.7	2670.00	7.394	0.004	9.946	1.752	
5 Sıkıştırılmış Sıvı su	200	79.7	333.90	1.071	0.255	85.080	4.850	
6 Sıkıştırılmış Sıvı su	200	40.0	167.90	0.572	0.255	42.770	0.465	
7 Soğutucu Akışkan Su	8.21	79.7	2643.00	7.615	0.002	6.370	0.908	1.000
8 Soğutucu Akışkan Su	8.21	42.0	175.90	0.599	0.002	0.424	0.004	1.000
9 Soğutucu Akışkan Su	1.40	12.0	175.90	0.621	0.002	0.424	0.011	1.000
10 Soğutucu Akışkan Su	1.40	12.0	2523.00	8.850	0.002	6.080	0.269	1.000
11 Zengin Karışım	1.40	42.0	97.63	0.260	0.083	8.070	2.038	0.548
12 Zengin Karışım	8.21	43.2	100.10	0.268	0.083	8.273	2.048	0.548
13 Zengin Karışım	8.21	68.8	152.90	0.428	0.083	12.640	2.458	0.548
14 Fakir Karışım	8.21	79.7	180.10	0.479	0.080	14.450	3.355	0.564
15 Fakir Karışım	8.21	54.2	128.00	0.326	0.080	10.270	2.837	0.564
16 Fakir Karışım	1.40	42.0	128.00	0.250	0.080	10.270	4.653	0.564
17 Sıkıştırılmış Sıvı su	200	22.0	92.39	0.325	0.193	17.850	0.031	
18 Sıkıştırılmış Sıvı su	200	15.0	63.11	0.224	0.193	12.190	0.158	
19 Sıkıştırılmış Sıvı su	200	72.0	301.80	0.980	0.255	76.900	3.658	
20 Sıkıştırılmış Sıvı su	200	22.0	92.39	0.325	0.035	3.252	0.006	
21 Sıkıştırılmış Sıvı su	200	62.4	261.30	0.861	0.035	9.198	0.322	
22 Sıkıştırılmış Sıvı su	200	22.0	92.39	0.325	0.144	13.330	0.023	
23 Sıkıştırılmış Sıvı su	200	35.4	148.40	0.510	0.144	21.410	0.121	

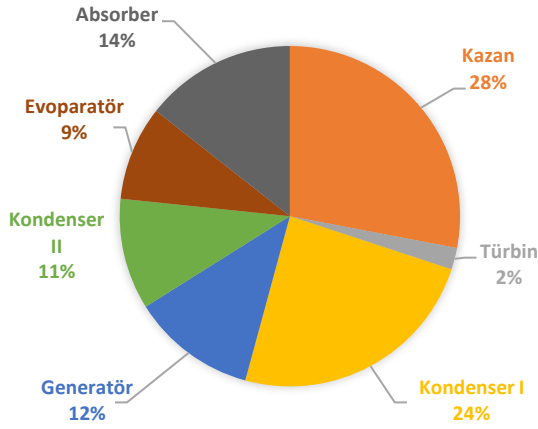
Sistemin her bir noktası için kabul edilen çalışma şartlarında termodinamiksel özellikler Tablo 3'te verilmiştir. Tablo 3'te verilen termodinamiksel özellikler Tablo 2'de verilen sistem elemanları formüllerinde yerlerine yazıldığında sistemin kapasite, entropi üretimi, ekserji yıkımı ve ekserji verimleri elde edilmiştir. $3.85 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$ debide (aylık 1000 m^3) doğal gaz tüketilmesi durumunda sistemde üretilebilecek elektrik enerjisi miktarı 3.018 kW, üretilebilecek ısı miktarı 10.12 kW ve soğutma kapasitesi ise 6.574 kW olarak hesaplanmıştır ve sistem elemanlarının kapasite değerleri Tablo 4'te verilmiştir [16].

Tablo 4. Sistemin her bir elemanı için elde edilen kapasite değerleri

Sistem Elemanı	Kapasite (kW)
Pompa I	0.178
Kazan	12.96
Türbin	3.018
Kondenser I	10.12

Generatör	9.471
Kondenser II	7.148
Kısılma Vanası I	-
Evaporatör	6.574
Absorber	9.037
Pompa II	0.14
Isı Değiştiricisi	-
Kısılma Vanası II	-

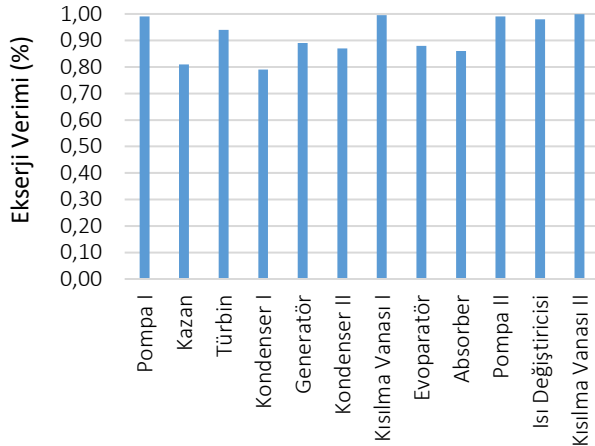
Sistemin toplam entropi üretimi ve ekserji yok oluşu sırasıyla 0.03235273 kW/K ve 8.499952 kW olarak hesap edilmiştir. Ekserji yokoluşu güç üretim sisteminde yer alan kazan (2.1252 kW) %28, kondenser I'de (2.1252 kW) %24 ve absorpsiyonlu soğutmanın elemanı olan generatör (1.04181 kW) %12 kondenser II (0.92924 kW) %11 olarak hesaplanmıştır. Isı değiştiricisi, kısılma vanası I ve II. Pompa I ve II elemanlarında ekserji yokoluşu çok az olduğu için yüzde oran içerisinde gösterilmemiştir.



Şekil 1. Trijenerasyon sisteminde oluşan ekserji kayıpları

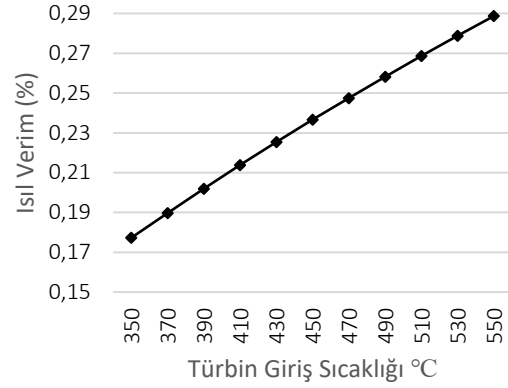
Her bir sistem elemanın toplam ekserji yok oluşu üzerindeki oransal dağılımı Şekil 2.'de görülmektedir. En fazla ekserji kaybı Kazan'da meydana gelirken en az ekserji kaybının Türbinde olduğu gözlemlenmiştir.

Ayrıca sistem elemanlarının ikinci yasa verimleri Şekil 3'te gösterilmiştir. İkinci yasa verimi en düşük olan sistem elemanının Kondenser I olduğu ortaya konulmuştur.



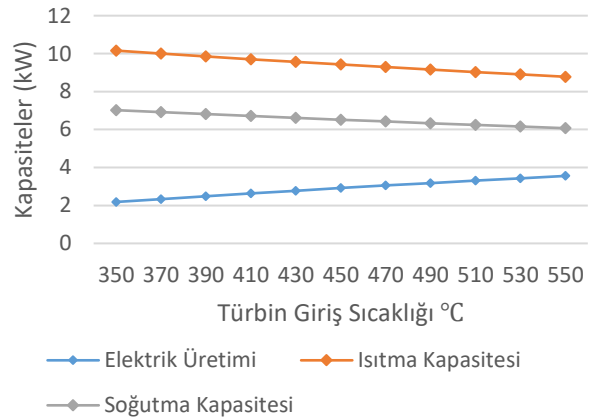
Şekil 2. Sistem Elemanlarının ekserji verimleri

Sistemde Türbin giriş sıcaklığı, Kondenser I basıncı, Evaporatör sıcaklığı, Kondenser II sıcaklığı ve ısı değiştiricisi etkinliği değerleri belirli aralıklarda değiştirilerek sistem performansı üzerindeki etkileri incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar grafikler halinde aşağıda verilmiştir.



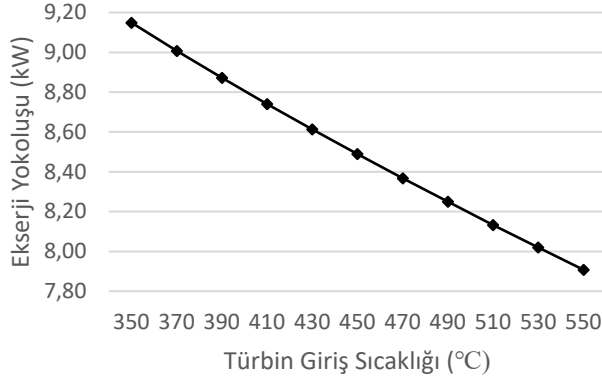
Şekil 3. Türbin giriş sıcaklığının değişiminin ısı verim üzerindeki etkisi

Şekil 4'te Türbin giriş sıcaklığının değişimi ile sistemin ısı veriminin nasıl değiştiği gösterilmektedir. Türbin giriş sıcaklığının artmasıyla ısı veriminde artış göstermiştir. Türbin giriş sıcaklığı malzeme dayanımlarının getirdiği sınırlardan ötürü belirli sıcaklıkların üzerine çıkartılamamaktadır.



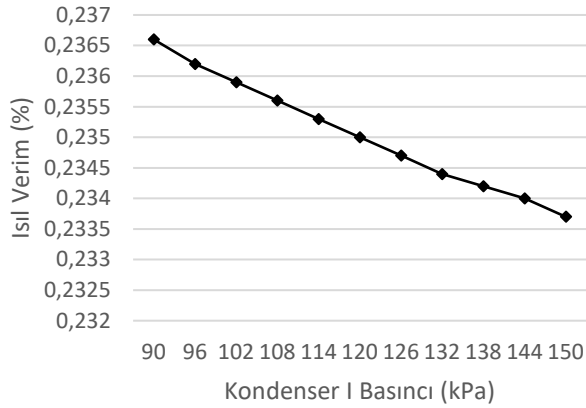
Şekil 4. Türbin giriş sıcaklığının değişiminin elektrik üretimi, ısıtma ve soğutma kapasiteleri üzerindeki etkisi

Şekil 5'te türbin giriş sıcaklığındaki artışın elektrik üretimi, ısıtma kapasitesi ve soğutma kapasitesi üzerindeki etkileri gösterilmektedir. Giriş sıcaklığın artması ısı verimi arttırdığı için daha fazla elektrik üretiminin gerçekleşmesi beklenen bir durumdur. Bununla birlikte kazanda sisteme giren toplam ısı miktarı değişmediği ve giren enerjinin daha fazla kısmı elektrik enerjisine dönüştürüldüğü için ısıtma ve soğutma kapasiteleri azalmaktadır.



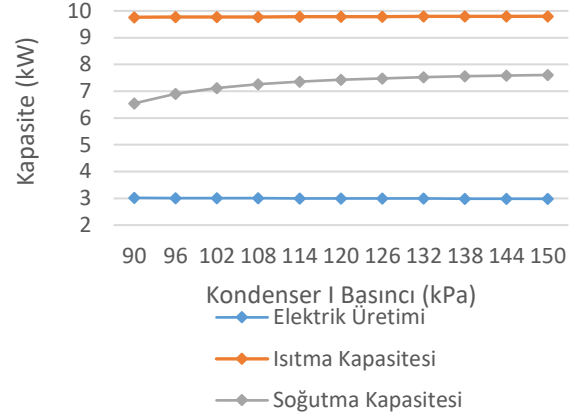
Şekil 5. Türbin çıkış sıcaklığının ekserji yokoluşu üzerindeki etkisi

Şekil 6’te görüldüğü gibi türbin giriş sıcaklığındaki artış ekserji yok oluşu azalmaktadır. Bu durumun sebebi olarak ısı verimi arttırması ifade edilebilir. Türbin giriş sıcaklığı ısı verimi arttırmaktadır.



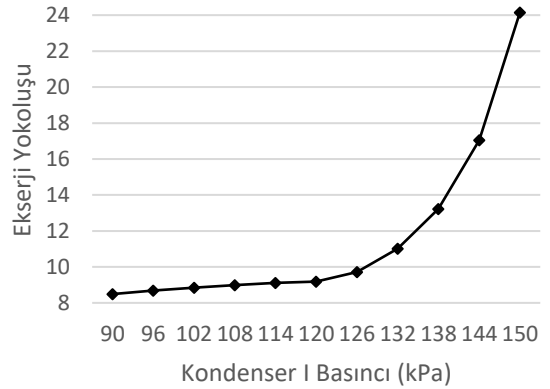
Şekil 6. Isıl verimin kondenser I basıncına göre değişimi

Şekil 7’de görüldüğü gibi kondenser basıncındaki artış yoğuşma sıcaklığını arttırdığı için ısı verimi azaltmaktadır.



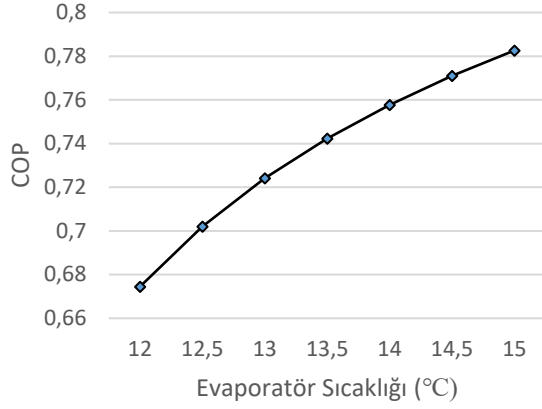
Şekil 7. Kapasitelerin kondenser basıncına göre değişimi

Şekil 8’de kondenser basıncındaki artış ile birlikte (ısı verimin düşmesine sebep olduğu için) elektrik üretim kapasitesini azalmasına sebep olurken ısıtma ve soğutma kapasitesini artmasına sebep olduğu görülmektedir.



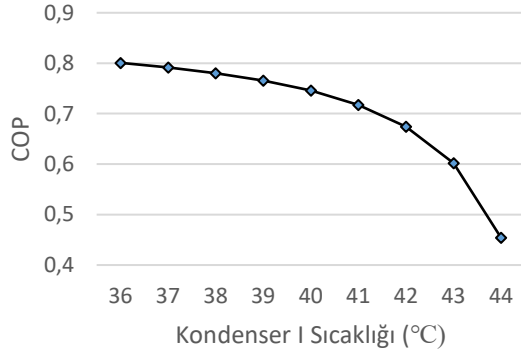
Şekil 8. Ekserji yokoluşunun kondenser basıncına göre değişimi

Şekil 9’da görüldüğü gibi kondenser basıncındaki artış ısı verimi azalttığı için daha fazla kullanılabilir iş potansiyeli yok olmuştur böylelikle ekserji yok oluşu artmıştır.

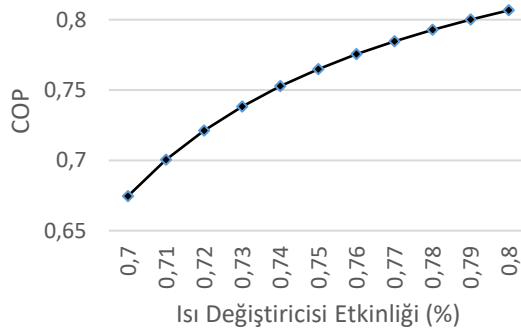


Şekil 9. Evaporatör sıcaklığındaki değişimin COP üzerindeki etkisi

Sistemde ortamdan ısı alan evaporatör sıcaklığı arttıkça soğutma performansının (COP) arttığı Şekil 10'da yer alan grafikte gözlemlenmektedir. Buna karşın Şekil 11'de görüldüğü üzere Kondenser I sıcaklığındaki artış sistemin soğutma performansını azaltmaktadır.



Şekil 10. Kondenser sıcaklığının atmosferin COP üzerindeki etkisi



Şekil 11. Isı değiştiricisi etkinliğinin COP üzerindeki etkisi

Absorpsiyonlu soğutma sisteminde yer alan ısı değiştiricisinin etkinliğinin artışı ile birlikte sistemin soğutma performansının arttığı gözlemlenmiştir.

4. Tartışma ve Sonuçlar

Yapılan çalışmada var olan kaynakları daha verimli kullanmak amacıyla yerinde enerji üretimi çalışmalarında yaygın olarak kullanılan trijenerasyon sistemi termodinamik olarak analiz edilmiş ve sistemin Isparta şartlarında bir binada kullanılması durumu modellenmiştir. Doğal gaz kullanarak binanın elektrik enerjisi, ısıtma ve soğutma ihtiyacının karşılanması incelenmiş ve bu ihtiyaçların karşılanması için öncelikle trijenerasyon sistemi tasarlanmış ve belirlenen çalışma şartları altında sistem performansı ortaya konulmuştur.

Belirlenen çalışma şartlarında aylık 1000 m³ doğal gaz tüketen trijenerasyon sisteminin elektrik üretimi 3.018 kW, ısıtma kapasitesi 10.12 kW ve soğutma kapasitesi 6.574 kW olduğu hesap edilmiştir. Bu kapasitelerde üretim yapabilen trijenerasyon sisteminin ısıl veriminin %24, COP'nin 0.68 ve toplam ekserji yokluğunun 8.49 kW olduğu belirlenmiştir.

Sistemin elemanlarının toplam yok olan ekserjideki payının en yüksek orandan düşüğe doğru sırasıyla kazanda %28, kondenser I'de %24, absorberde %14, generatörde %12, kondenser II'de %11 evaporatörde %9 ve türbinde %2 olduğu hesap edilmiştir. Elde edilen bu sonuçlar literatürde yer alan diğer çalışmalarla uyumlu olduğu görülmektedir. Benzer çalışmaları yapan Ilık (2012), Kojenerasyon sisteminin termodinamik analizi sonucunda en fazla ekserji kaybının yaşandığı ünitelerin %32 yoğuşturucu, %25 yanma odası, %23'ünde atık ısı kazanında olduğunu ortaya koymuştur [10]. Absorpsiyon soğutma sisteminde ise en fazla ekserji kaybının yaşandığı ünitelerin %37 kondenser %31 generatör ve %18'inde evaporatörde olduğu tespit etmiştir.

Ayrıca türbin giriş sıcaklığının yaklaşık %57 artırılması ile ısıl verimin ve elektrik üretimi kapasitesinin %62 arttığı bununla birlikte ekserji kayıplarının %14 azaldığı fark edilmiştir. Bunun yanı sıra kondenser I basıncının artırılmasının ısıl verimi düşürdüğü ve ekserji kaybını arttırdığı belirlenmiştir. Kondenser I basıncının %66 artması ile ısıl verim ve elektrik üretimi sadece %2 azalırken, ekserji kaybının yaklaşık iki katına çıktığı gözlemlenmiştir.

Sistemin soğutma kısmının elemanı olan evaporatör sıcaklığının yükselmesi ile COP artarken ekserji kayıplarının azaldığı ancak kondenser sıcaklığının yükselmesi ile COP'nin azaldığı buna karşılıklı ekserji

yokoluşunun arttığı ortaya koyulmuştur. Isı değiştiricisi etkinliğinin özellikle sistemin soğutma kısmında daha büyük değişikliklere sebep olduğu gözlemlenmiştir. Isı değiştiricisi etkinliğinin artışıyla COP'nin arttığı, ekserji kaybının ise azaldığı sonucuna ulaşılmıştır.

5. Kaynaklar

- [1] Köksal, B., (2006). *Türkiye'nin Enerji Politikası İçerisinde Bilesik Isı-Güç Üretiminin Yeri*. Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 140s, İstanbul.
- [2] Önal, E., Yarbay, Z., (2010). *Türkiye'de Yenilenebilir Enerji Kaynakları Potansiyeli ve Geleceği*. İstanbul Ticaret Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, 18, 77-96.
- [3] İskender, S., (2005). *Türkiye'de ve Dünyada Enerji & Nükleer Enerji Gerçeği*. 245s, Tütev Yayınları, Ankara.
- [4] Aydemir, M.O., (2010). *Dünyadaki Gelişmeler Işığında Türkiye'nin Enerji Kaynaklarının Güncel Bir Değerlendirmesi*. Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 138s, Ankara.
- [5] Doğan, M. (2001). *Sanayileşme ve Çevre Sorunları*. Yeni ve Yenilenebilir Enerji Kaynakları Sempozyumu, 12-13 Ekim 2001, TMMOB, Kayseri, 245-251.
- [6] Akpınar, A., Komurcu, M. I., Kankal, M., Ozolcer, I.H., & Kaygusuz, K., (2007). *Energy Situation and Renewables in Turkey and Environmental Effects of Energy Use*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 12, 2013-39.
- [7] Biçer, T., (2009). *Elektrik Güç Sistemleri ve Kayıpları*. Dumlupınar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 133s, Kütahya.
- [8] Küçüköner, C., (2016). *Elektrik Dağıtım Şebekelerinde Kayıp Tahmin Yöntemleri ve Kayıpların Hesabı*. Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 115s, Elazığ.
- [9] Alkan, A., (2016). *Yenilenebilir Hibrit Enerji Kaynakları ile Beslenen Akıllı Enerji Depolama ve Yönetim Sistemi*. Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 160s, Kocaeli.
- [10] İlk, A., (2012). *Trijenerasyon Sistemlerinin Enerji ve Ekserji Analizi*, Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 113s, Isparta.
- [11] Özdemir, N., 2011. *Çekmeköy İlçesi Toplu Konut Bölgeleri için Kojenerasyon Sistemlerinin Analizi*. Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 155s, Erzurum.
- [12] Ekinci, A., 2013. *Erzurum Kampüs Hastanesine Uygulanacak Trijenerasyon Sisteminin Fizibilitesi*. Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 156s, Erzurum.
- [13] Yazman, E., 2015. *0, 4 MW Trijenerasyon Sisteminin Modellenmesi, Motor Seçimi ve Verim Analizleri*. Akdeniz Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 99s, Antalya.
- [14] Çengel Y.A, Boles M.A. (2007). *Mühendislik Yaklaşımıyla Termodinamik*. Güven Bilimsel Yayınevi. 864s İzmir, Türkiye.
- [15] Bejan, A. (1997). *Advanced Engineering Thermodynamics*, John Wiley and Sons, New York.
- [16] Bejan, A. (2002). *Fundamentals of Exergy Analysis Entropy Generation Minimization and The Generation of Flow Architecture*, International Journal of Energy Research, 26(2002), 545-565.
- [17] Yiğit, F., (2018) *Ev tipi uygulamalarda kullanılacak birleşik güç, soğutma ve ısıtma sisteminin uygulanabilirliğinin araştırılması ve termodinamik analizi*. Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 95s, Isparta.

Bu çalışma 5-9 Eylül 2018 tarihinde, Prizren, Kosova'da ICONST 2018 (International Conference on Science and Technology) sempozyumunda özet olarak sunulmuştur.