

Güneş enerjisi destekli çok fonksiyonlu trijenerasyon sisteminin termodinamik analizi

Thermodynamic analysis of solar assisted multi-functional trigeneration system

Önder KIZILKAN^{1*}, Çağatay AKBAŞ¹

¹Enerji Sistemleri Mühendisliği Bölümü, Teknoloji Fakültesi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Isparta, Türkiye.
onderkizilkan@sdu.edu.tr, cagatayakbas@hotmail.com

Geliş Tarihi/Received: 29.01.2015, Kabul Tarihi/Accepted: 18.11.2015
* Yazışılan yazar/Corresponding author

doi: 10.5505/pajes.2015.73644
Araştırma Makalesi/Research Article

Öz

Bu çalışmada güneş enerjisi destekli çok fonksiyonlu bir trijenerasyon sisteminin modellemesi ve termodinamik analizleri yapılmıştır. Sistemde, gaz türbinleri için yeni bir teknoloji olan güneş kulesi vasıtasıyla gaz çevrimi ve buhar çevrimi için gerekli termal enerji sağlanmaktadır. Ayrıca, sisteme absorpsiyonlu soğutma sistemi, buhar üretim prosesi, kurutma prosesi ve kullanım sıcak suyu ısıtma prosesi entegre edilmiştir. Trijenerasyon sisteminin birinci kanun ve ikinci kanun analizleri yapılarak enerji ve ekserji verimleri tespit edilmiştir. Analizler sonucunda gaz çevrimi verimi %32, buhar çevrimi verimi %28, soğutma sisteminin performans katsayısı (COP) değeri ise 0.77 olarak tespit edilmiştir. Ekserji kayıpları incelendiğinde ise en yüksek ekserji kaybının 3882 kW ile güneş kulesinde meydana geldiği tespit edilmiştir.

Anahtar kelimeler: Güneş kulesi, Trijenerasyon, Gaz çevrimi, Buhar çevrimi, Enerji, Ekserji

Abstract

In this study, modelling and thermodynamic analysis of solar assisted trigeneration system was carried out. The required thermal energy for gas and vapor cycles were supplied from solar tower which is a new concept for gas cycle applications. Additionally, an absorption refrigeration cycle, vapor production process, drying process and water heating process were integrated to the system. Energy and exergy efficiencies of the trigeneration system were determined by the application of first and second law analyses. The results showed that the gas cycle efficiency was found to be 32%, vapor cycle efficiency was found to be 28% and coefficient of performance (COP) values of the refrigeration system was found to be 0.77. Also the highest exergy destruction rate was found to be 3882 kW in solar tower.

Keywords: Solar tower, Trigeneration, Gas cycle, Vapor cycle, Energy, Exergy

1 Giriş

Gelişmekte olan ülkelerdeki hızlı nüfus artışı ve sanayileşme, enerjiye olan talebin hızla artmasına neden olmaktadır. Dünyadaki enerji talebi ve nüfus artış hızları değerlendirildiğinde, enerji tüketiminin nüfusa oranla daha hızlı arttığı sonucu ortaya çıkmaktadır [1]. Dünya enerji talebinin %65 gibi büyük bir kısmı ulaşılabirlik ve kullanıma uygunluk nedeniyle petrol, doğal gaz gibi fosil yakıtlardan karşılanmaktadır [2]. Fosil yakıtları esas alan enerji kullanımı; yakıt konusunda dışa bağımlılık, yüksek ithalat giderleri ve dünya fosil yakıt rezervlerinin hızla tükenmesinin yanında çevre sorunları gibi önemli olumsuzlukları vardır [3]. Bu olumsuzlukların başında gelen ekosistemin bozulmasında fosil yakıtların kullanılmasının sonucunda salınan sera gazlarının etkisi çok fazladır. Bu etkiyi azaltmak için Kyoto Protokolü'nde yer alan ülkeler, 2008-2012 Birinci Taahhüt Dönemi sonunda, toplam sera gazı salınımlarını ortalama olarak 1990 yılı seviyesinin %5 altına indirme yükümlülüğü getirilmiştir [4]. Bu yükümlülüğe bağlı olarak; fosil yakıtların tüketimini azaltacak, jeotermal, rüzgâr, hidrolik, güneş, biokütle ve dalga enerjisi gibi yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelecek enerji politikaları arayışına gidilmelidir [5].

Yenilenebilir enerji, tükenmeyen, sürdürülebilir ve çevre dostu bir enerji kaynağı olması nedeniyle büyük önem taşımakta ve 21. yüzyılda en önemli enerji kaynağı olacağı kabul edilmektedir [3]. Yenilenebilir enerji kaynaklarından güneş enerjisi gelecek için en önemli alternatif enerji kaynaklarının başında yer almaktadır ve kullanımı, gerek dünyada ve gerekse ülkemizde her geçen gün artmaktadır. Özellikle ülkemizde son

yıllarda yapılan teşviklerle ısı üretimi kullanımının yanında güç üretimi de hızla artış göstermektedir [6]. Ülkemizin güneş enerjisi potansiyeli oldukça yüksektir. Yenilenebilir Enerji Genel Müdürlüğü verilerine göre ülkemizin yıllık ortalama toplam global radyasyon değeri 1527.46 kWh/m²-yıl ve yıllık ortalama güneşlenme süresi 2741.07 saat/yıl'dır [7]. Bu değerler, güneş enerjisi kullanımı için oldukça iyi olup güneş enerjili var olan teknolojilerin geliştirilmesi ve yeni teknoloji üretilmesi konularında çalışmalara hız verilmelidir. Özellikle enerji üretimi konusunda büyük oranda fosil yakıtlara olan bağımlılığı azaltmanın bir yolu da enerji üretim santrallerinin güneş enerjisi ile desteklenmesidir.

Bir trijenerasyon sistemi, ısıtma, soğutma ve güç üretiminin aynı anda yapıldığı sistemdir. Bu uygulamanın ardında yatan temel düşünce, güç santralinden çevreye atılan ısının yararlı bir amaca yönlendirilerek enerji verimi artırmaktır. Bu amaçlar, proses ısısının sağlanması, kurutma, konut ısıtması, ek güç üretimi, soğutma olabilir. Böylece birincil enerji daha etkin kullanılır. Enerji verimliliğinin yanı sıra, çevreye atılan karbondioksitin ve diğer zararlı gazların azaltılması, sera etkisini de azaltır [8]. Sadece elektrik üretimi yapan termik santrallerde verim %30-40'ı geçmez iken kojenerasyonda ve trijenerasyon sistemlerde oldukça yüksek verim değerlerine ulaşılabilir. Trijenerasyon sistemleri, yakıtı, elektrik ve ısıya dönüştürmenin en verimli yoludur [9].

Güneş enerjisi destekli gaz çevrimleri ile ilgili çalışmalar oldukça yeni bir konudur. Literatürde, konu ile ilgili genel çalışmalara bakıldığında birçok çalışma ile karşılaşılmaktadır. Bu çalışmaların çoğu teorik olmakla beraber birçoğunda güç üretiminin buhar çevrimleri ile yapıldığı görülmüştür. Güneş

enerjisi destekli gaz çevrimleri hakkında oldukça sınırlı çalışma olmakla birlikte bunlardan sadece bir tanesi deneysel sistemi içermektedir. Yapılan mevcut çalışmada ise güneş enerjisi destekli bir gaz çevrimi sistemine, güç üretimi dışında ısıtma, soğutma ve kurutma gibi sistemler entegre edilerek sistem performansının değerlendirilmesi amaçlanmıştır. İncelenen çalışmalarda, birden çok çıktısı olan böyle bir trijenerasyon sisteminin enerji ve ekserji analizlerinin yapıldığı bir çalışmaya rastlanmamıştır.

Quero ve diğ. [10], megawat boyutlarındaki ilk hibrit güneş enerjisi gaz türbinini geliştirmişlerdir. Sistemde, 2012 yılında maksimum alıcı dış sıcaklığına erişmişlerdir. Bu sıcaklık yaklaşık 800 °C'dir. Çalışmalarında sistemi tanıtmışlar ve verim arttırıcı etkenlere değinmişlerdir. Hands ve diğ. [11] yaptıkları çalışmalarında, büyük ölçekli bir trijenerasyon sisteminin performans analizini yapmışlardır. İncelenen trijenerasyon sistemi soğutma, ısıtma ve sıcak su üretimini içermektedir. Sonuçlarında, güneş enerjisi kullanımının sistemdeki yakıt tüketimini %21 oranında azalttıklarını belirtmişlerdir. Al-Sulaiman ve diğ. [12] çalışmalarında, solar parabolik oluk tipi kollektörlerin kullanıldığı yeni bir trijenerasyon sistemi ve organik Rankine çevriminin ekserjetik performansını incelemişlerdir. Analizler, elektrik üretimi, soğutma-kojenerasyon, ısıtma-kojenerasyon ve trijenerasyon sistemleri üzerine yapılmıştır. Sonuçlarında, trijenerasyon sisteminin ekserji verimini güneş enerji kullanımı esnasında %20 olarak tespit etmişlerdir. Calise ve diğ. [13] yapmış oldukları çalışmalarında, yüksek sıcaklıklı solar ısıtma ve soğutma sisteminin simülasyonunu yapmışlardır. Sistem ayrıca fotovoltaiik/termal kollektörlere sahiptir. Sistem, elektrik üretimi, mahal ısıtması ve soğutması ile kullanım suyu ısıtması amacıyla tasarlanmıştır. Tora ve El-Halwagi [14] çalışmalarında, düşük emisyonlara sahip güneş enerjisinin kullanarak bir trijenerasyon sistemi geliştirmişler. Trijenerasyon sisteminde ayrıca atık ısıdan yararlanmak için bir absorpsiyonlu soğutma sistemi bulunmaktadır. Rahim ve Gündüz [15], bir ısı-güç (kojenerasyon) çevrim sistemi tasarlamışlar ve bu tasarıma termodinamiğin birinci ve ikinci yasası analizleri uygulayarak santraldeki kayıpları belirlemeye çalışmışlardır. Çalışmalarında GE 6541B tipi türbin kullanmışlardır ve gaz türbini 38 MW'lıktır. Ayrıca bu tip sistemlerin enerjinin dönüşümü ve kullanımında verimliliğini arttırdığını tespit etmişlerdir. Selbaş ve diğ. [16] çalışmalarında güneş enerjisinden elektrik elde etme yöntemlerini incelemişler ve güneş kulesi ile elektrik üretimi uygulamasının teknik ve maliyet analizlerini yapmışlardır. Analizlerde Isparta ili güneş verileri kullanılmış ve tasarlanan santralin Nisan, Mayıs, Haziran, Temmuz, Ağustos, Eylül aylarında sadece güneş enerjisi ile elektrik ihtiyacını karşılayacağı tespit edilmiştir. Ayrıca böyle bir güneş enerjisi elektrik santralının kendisini 15 yılda amorti edeceğini hesaplamışlardır.

Ozturk ve Dincer [17] çalışmalarında yenilenebilir enerji kaynaklı çoklu enerji üretim sisteminin termodinamik analizlerini yapmışlardır. Sistem, güç üretimi, ısıtma, soğutma, sıcak su üretimi, hidrojen ve oksijen üretimi gibi birçok çıktıya sahiptir. Sistemde güç üretimi Rankine ve organik Rankine çevrimlerinden elde edilmektedir. Çalışmalarında yapılan analizler sonucu sistemin toplam enerji verimi %57.35 olarak tespit edilmiştir. Ayrıca sistemdeki en büyük ekserji kaybının parabolik kollektörlerde meydana geldiğini belirtmişlerdir. Xu ve diğ. [18] makalelerinde, ısı transferi akışkanı olarak eriyik tuzlarının kullanıldığı bir güneş güç kulesi sisteminin teorik

olarak enerji ve ekserji analizlerini yapmışlardır. Sonuçlarında maksimum ekserji kaybının alıcı sisteminde olduğu tespit edilmiş ve bunu heliostat alan sisteminin takip ettiği belirtilmiştir. Bunun yanında, sistemin enerji ve ekserji veriminin direk radyasyonun arttırılması ile arttığı tespit edilmiştir. Benammar ve diğ. [19], güneş kulesi güç santrallerinin enerji analizi için bir matematiksel model geliştirmişlerdir. Bu amaçla sistemin ısı ve termodinamik modellenmesi yapılmıştır. Ratlamwala ve diğ. [20] çalışmalarında, bir heliostat alan, bir buhar çevrimi, bir organik Rankine çevrimi ve hidrojen üretiminden oluşan entegre bir sistem tasarlamışlardır. Güneş ışınımı gibi bazı değerleri değiştirerek sistemin güç üretimi, hidrojen üretimi, enerji ve ekserji verimi değerlerinin değişimini analiz etmişlerdir. Ayrıca sistemin optimizasyonunu da yapmışlar ve bunun için direk arama metodunu kullanmışlardır. Baghernejad ve Yaghoubi [21], güneş enerjili bir kombine sistemi incelemişler ve sistem performansının belirlenmesi için enerji ve ekserji analizi yapmışlardır.

Bu çalışmada güneş enerji destekli çok fonksiyonlu trijenerasyon sisteminin enerji ve ekserji analizi yapılmıştır. Tasarlanan sistem, odaklamalı güneş enerjisi sistemi, güneş enerjisi destekli bir gaz çevrimi, ideal ara ısıtma-ara buhar almalı bir buhar çevrimi, LiBr-H₂O çiftinin kullanıldığı absorpsiyonlu soğutma sistemi, endüstriyel buhar üretimi, endüstriyel kurutma sistemi ve sıcak kullanım suyu üretim sisteminden oluşmaktadır. Yapılan analizlerde, trijenerasyon sisteminin oluşturduğu her bir alt sistemin enerji ve ekserji verimleri hesaplanarak her bir sistem elemanının tersinmezlikleri tespit edilmiştir.

2 Sistem tanıtımı

Analizi yapılan çok amaçlı güneş enerjisi destekli trijenerasyon sistemi temel olarak, odaklamalı güneş kulesi sistemi, enerji üretimi amacıyla bir gaz çevrimi ve bir buhar çevrimi, soğutma işlemi için LiBr-H₂O akışkan çiftinin kullanıldığı absorpsiyonlu bir soğutma sistemi, endüstriyel kurutma işlemleri için bir hava ısıtıcısı, proses buhar üreticisi ve kullanım suyu ısıtıcısından oluşmaktadır. Tasarlanan sistemin şematik gösterimi Şekil 1'de genel özellikleri ise Tablo 1'de verilmiştir.

Güneş enerjisi destekli trijenerasyon sisteminde, güneş kulesi vasıtasıyla güneş ışınları kule tepesine monte edilmiş olan ısı değiştiricisine (toplayıcı) yoğunlaştırarak ısı değiştiricisindeki akışkan yüksek sıcaklıklara ısıtılır. Özellikle son yıllarda güneş enerjisi destekli gaz çevrimi üzerindeki araştırmalar artmakta olup, bu çalışmada Quero ve diğ.'nin İspanya'da kurmuş oldukları toplayıcı modeli kullanılmıştır. Sistemde dolaşan akışkan 800 °C'lere kadar çıkmakta olup bir gaz çevrimine entegre edilmiştir [10],[22]. Isıtılan akışkan gaz çevrimindeki havadır ve gaz çevrimi için gerekli enerjinin büyük bir kısmı güneşten sağlanmaktadır. Enerjinin geri kalan kısmı, yanma odasında yanma işlemi sonucu açığa çıkan ısı ile sağlanmaktadır.

Gaz çevriminde Solar®Turbines firmasının 1210 kW'lık elektrik enerjisi üretim kapasitesine sahip Saturn20 modelinin teknik verileri kullanılmıştır [23]. Gaz türbininden çıkan yanma sonu gazları, ara ısıtma - ara buhar almalı buhar güç sistemi, absorpsiyonlu soğutma sistemi, proses buhar üretim sistemi, kurutma sistemi ve kullanım suyu ısıtma işlemleri için gerekli olan ısı enerjisini sağladıktan yanma sonu gazları yaklaşık 81 °C atmosfere atılmaktadır.

Yukarıdaki eşitlik gaz ve buhar güç çevrimleri için aşağıdaki şekilde yazılabilir:

$$\eta_I = \frac{\dot{W}_{Net}}{\dot{Q}_{giren}} \quad (4)$$

Absorbsiyonlu soğutma sistemi için soğutma performans katsayısı ise aşağıdaki şekilde bulunur:

$$COP_I = \frac{\dot{Q}_G}{\dot{Q}_E} \quad (5)$$

Yukarıdaki denklemde, G ve E alt indisleri sırasıyla jeneratör ve evaporatörü temsil etmektedir.

Termodinamiğin ikinci kanunu analizi genel olarak ekserji analizi olarak da isimlendirilir. Ekserji tersinir bir süreç sonucunda çevre ile denge sağlandığı takdirde, teorik olarak elde edilen maksimum iş miktarıdır. Yani ekserji en basit anlamda, enerjinin kullanılabilen kısmıdır ve kullanılabilirlik olarak da ifade edilir [25]. Genel olarak ekserji denge denklemi aşağıdaki şekilde ifade edilir [26]:

$$\sum \dot{E}x_g = \sum \dot{E}x_\zeta + \sum \dot{E}x_{dest} \quad (6)$$

Burada $\dot{E}x$ ekserjiyi, $\dot{E}x_{dest}$ ise ekserji yıkımını ifade etmektedir. Sürekli akışlı bir kontrol hacmi için ekserji dengesi aşağıdaki şekilde yazılabilir:

$$\dot{E}x_Q - \dot{E}x_W = \sum \dot{m}_g e_g - \sum \dot{m}_\zeta e_\zeta + T_0 \dot{S}_{gen} \quad (7)$$

Yukarıdaki denklemde, $\dot{E}x_Q$ ve $\dot{E}x_W$ terimleri sırasıyla ısı ve işin ekserjisi, e özgül ekserji, T_0 referans noktası sıcaklığı ve \dot{S}_{gen} ise entropi üretimidir. Denklem 7'deki terimlerin açık ifadesi aşağıda verilmiştir. [26]:

$$\dot{E}x_{dest} = T_0 \dot{S}_{gen} \quad (8)$$

$$\dot{E}x_Q = \dot{Q} \left(\frac{T - T_0}{T} \right) \quad (9)$$

$$\dot{E}x_W = \dot{W} \quad (10)$$

Ekserji genellikle termomekaniksel ve kimyasal ekserjilerin toplamı olarak değerlendirilir. Termomekaniksel ekserji, herhangi bir durum (T, P) ile sadece çevrenin sıcaklığı (T_0) ve basıncı (P_0) ile dengede olan bir durum arasındaki ekserjidir. T_0 ve P_0 çevre şartlarındaki bir durumun, çevreyle kimyasal olarak dengede olduğu durum arasındaki ekserjiye kimyasal ekserji adı verilmektedir. Termomekaniksel ekserji, kinetik, potansiyel ve kimyasal ekserji terimleri ihmal edilerek aşağıdaki şekilde belirlenir [24],[27]:

$$e = (h - h_0) - T_0(s - s_0) \quad (11)$$

Güneş enerjisi ekserjisi referans ve güneş sıcaklığı ifadeleri kullanılarak Petela [28] tarafından aşağıdaki şekilde tanımlanmıştır:

$$\dot{E}x_{güneş} = S A_a \left(1 + \frac{1}{3} \left(\frac{T_0}{T_{güneş}} \right)^4 - \frac{4}{3} \left(\frac{T_0}{T_{güneş}} \right) \right) \quad (12)$$

Burada, $\dot{E}x_{güneş}$, güneş dış yüzey sıcaklığının ($T_{güneş} = 5739 \text{ K}$ [29]) bir fonksiyonudur.

Bir sistemin ekserji verimi aşağıdaki şekilde tanımlanabilir [26]:

$$\eta_{ex} = \frac{\text{elde edilmek istenen ekserji}}{\text{sağlanan ekserji}} \quad (13)$$

Daha açık bir ifadeyle ekserji verimi:

$$\eta_{ex} = \frac{\dot{E}x_\zeta}{\dot{E}x_g} = 1 - \frac{\dot{E}x_{dest}}{\dot{E}x_g} \quad (14)$$

şeklinde tanımlanabilir. Absorbsiyonlu sistemin ekserji verimi ise aşağıda tanımlanmıştır [24]:

$$\eta_{ex,ABS} = \frac{COP}{COP_{CARNOT}} \quad (15)$$

$$COP_{CARNOT} = \frac{T_E(T_G - T_A)}{T_G(T_K - T_E)} \quad (16)$$

Denklem 16'da alt indisler E evaporatörü, A , absorberi, G , jeneratörü ve K ise kondanseri temsil etmektedir.

4 Araştırma bulguları

Bir önceki bölümde verilen termodinamik eşitliklerin güneş enerjisi destekli trijenerasyon sistemine uygulanmasıyla sistemin enerji ve ekserji analizi yapılmıştır. Analizler, EES bilgisayar yazılımı [30] kullanılarak yapılmış ve akışkanların termodinamik özellikleri adı geçen yazılım sayesinde tespit edilmiştir. Sistem analiz edilirken aşağıdaki kabuller yapılmıştır:

- Tüm prosesler kararlı halde ve sürekli akışlı sistemdir,
- Kinetik, potansiyel ve kimyasal enerjiler ihmal edilmiştir,
- Sisteme veya sistemden olan ısı kayıpları ile basınç düşmeleri ihmal edilmiştir,
- Kompresör, pompa ve türbindeki işlemler adyabatiktir,
- Soğutma sisteminde LiBr ve H₂O termodinamik dengededir,
- Gaz türbininde aracı akışkan ideal havadır,
- Gaz türbininde yanma işlemi, ısı girişi şeklinde olup kimyasal işlemler ihmal edilmiştir,
- Referans sıcaklığı 22 °C ve basıncı 101.325 kPa'dır,
- Analizler güneş ışınımı değeri 800 W/m² için yapılmıştır.

Bu kabuller ışığında yapılan analizler sonucu tüm referans noktaları için hesaplanan sistemin termodinamik özellikleri Tablo 2'de verilmiştir. Ayrıca, Tablo 3'te de birinci kanun verimi, ekserji verimi ve ekserji kayıpları karşılaştırmalı olarak gösterilmiştir. Analizler sonucunda, sistemin ana çıktısı olan güç üretimi incelendiğinde, gaz çevriminin enerji verimi %32, buhar çevriminin enerji verimi ise %28 olarak tespit edilmiştir. Ayrıca absorbsiyonlu soğutma sisteminin COP değeri 0.77 olarak hesaplanmıştır. Bu değer, LiBr-H₂O kullanılan sistemlerde makul bir değerdir.

Trijenerasyon sistemindeki alt sistemlerin ekserji verimleri incelendiğinde, gaz çevriminin ekserji verimi %53, buhar çevriminin ekserji verimi ise %22 olarak bulunmuştur. Güneş kulesi sisteminin ekserji verimi ise %37 olarak hesaplanmıştır. Termodinamiğin ikinci kanununun bir göstergesi olan ekserji

kayıpları incelendiğinde ise en yüksek ekserji kaybı 3882 kW ile güneş kulesinde ortaya çıkmaktadır. Güneş kulesini gaz

çevrimi, buhar çevrimi, buhar üretim prosesi ve diğerleri takip etmektedir.

Tablo 2: Güneş enerjisi destekli trijenerasyon sisteminin hesaplanan değerleri.

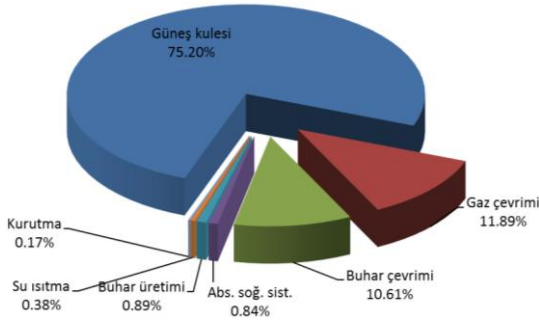
Nokta	Madde	$T, ^\circ\text{C}$	P, kPa	$h, \text{kJ/kg}$	$s, \text{kJ/kgK}$	$m, \text{kg/s}$	$e, \text{kJ/kg}$	$\dot{E}x, \text{kW}$	X
0''	LiBr-H ₂ O	22	101.3	58.27	0.1265				0.55
0'	Hava	22	101.3	295.4	6.85				
0	Su	22	101.3	92.29	0.3246				
1	hava	22	101.3	295.4	6.85	5.338	0	0	
2	hava	261.1	678.9	538.6	6.906	5.338	226.6	1210	
3	hava	808	678.9	1140	7.677	5.338	600.9	3207	
4	hava	1100	678.9	1484	7.958	5.338	861.9	4600	
5	hava	631.2	101.3	938.4	8.02	5.338	297.8	1590	
6	hava	591.4	101.3	894	7.969	5.338	268.2	1432	
7	hava	268.4	101.3	546.4	7.467	5.338	68.8	367.2	
8	hava	249.6	101.3	526.9	7.431	5.338	60.12	320.9	
9	hava	125.5	101.3	399.9	7.153	5.338	14.93	79.68	
10	hava	94.12	101.3	368.1	7.071	5.338	7.665	40.91	
11	hava	81.32	101.3	355.2	7.035	5.338	5.311	28.35	
12	su	88.02	65	368.6	1.17	0.7477	26.93	20.14	
13	su	88.06	450	369.1	1.17	0.7477	27.34	20.45	
14	su	147.9	450	623.4	1.821	0.843	89.45	75.41	
15	su	149	6800	631.8	1.825	0.843	96.8	81.61	
16	su	237.6	6800	1026	2.671	0.843	241.2	203.3	
17	su	237.7	3210	1026	2.68	0.2013	238.7	48.04	
18	su	238.7	6800	1032	2.682	0.2013	243.5	49	
19	su	237.8	6800	1027	2.673	1.044	241.6	252.3	
20	su	290	6800	2804	5.88	1.044	1072	1119	
21	su	237.7	3210	2678	5.913	0.2013	936	188.4	
22	su	237.7	3210	2678	5.913	0.843	936	789.1	
23	su	290	3210	2960	6.451	0.843	1059	892.8	
24	su	147.9	450	2619	6.561	0.09528	686.4	65.4	
25	su	88.02	65	2358	6.678	0.7477	390.6	292	
26	su	19.1	101.3	80.16	0.2833	10	0.05999	0.5999	
27	su	54.67	101.3	228.9	0.7636	10	7.045	70.45	
28	su	19	101.3	79.75	0.2819	10	0.06421	0.6421	
29	LiBr-H ₂ O	35	1.073	79.31	0.2224	0.3001	15.25	4.576	0.5346
30	LiBr-H ₂ O	35	5.627	79.32	0.2224	0.3001	15.25	4.577	0.5346
31	LiBr-H ₂ O	57.7	5.627	126.7	0.3709	0.3001	18.8	5.64	0.5346
32	LiBr-H ₂ O	80	5.627	195.8	0.4508	0.2661	64.31	17.11	0.6028
33	LiBr-H ₂ O	52.1	5.627	142.4	0.2931	0.2661	57.44	15.29	0.6028
34	LiBr-H ₂ O	52.1	1.073	142.4	0.2931	0.2661	57.44	15.29	0.6028
35	su	80	5.627	2650	8.609	0.03394	112.1	3.805	
36	su	35	5.627	146.6	0.505	0.03394	1.068	0.03624	
37	su	8	1.073	146.6	0.5231	0.03394	-4.291	-0.1456	
38	su	8	1.073	2515	8.948	0.03394	-122.2	-4.149	
39	su	20	101.3	83.93	0.2962	2	0.02847	0.05695	
40	su	30.16	101.3	126.4	0.4386	2	0.4628	0.9256	
41	su	24	101.3	100.7	0.3529	2.403	0.02822	0.06779	
42	su	16	101.3	67.2	0.2387	2.403	0.2586	0.6214	
43	su	20	101.3	83.93	0.2962	2	0.02847	0.05695	
44	su	31.89	101.3	133.7	0.4625	2	0.6779	1.356	
45	su	22	600	92.76	0.3245	0.25	0.4997	0.1249	
46	su	180	600	2805	6.87	0.25	781.2	195.3	
47	hava	32	101.3	305.5	6.884	3	0.1668	0.5003	
48	hava	88	101.3	362	7.054	3	6.492	19.48	
49	su	22	101.3	92.29	0.3246	0.5	0	0	
50	su	55	101.3	230.3	0.7679	0.5	7.184	3.592	

Ekserji kayıpları değerlerinin yüzdesel olarak gösterimi Şekil 2'de verilmiştir. Şekilden görüleceği üzere trijenerasyon sisteminin ekserji kayıplarının %75 gibi çok büyük bir oranı güneş kulesinden kaynaklanmaktadır. Bu sonuç, iyileştirme çalışmalarının özellikle güneş kulesi üzerinde yoğunlaşması gerektiği anlamına gelmektedir. Hâlihazırda, literatürde, güneş kulesi sistemleri konusunda deneysel ve teorik araştırma sürmektedir. İyi bir dizayn, yüksek bir enerji toplama kapasitesi gibi etmenlerin daha da geliştirilmesi sonucunda bu tip sistemler enerji üretimi konusunda oldukça fayda sağlayacaktır.

Tablo 3: Sistemin verim ve ekserji kayıpları.

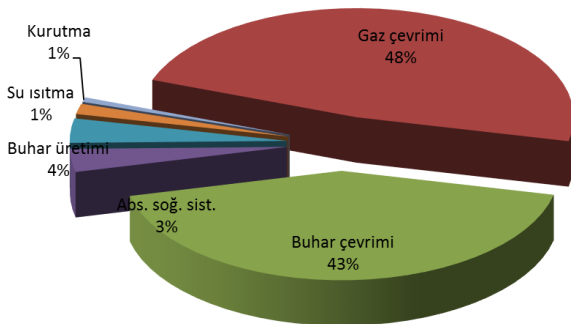
Sistem	$\dot{E}x_{dest}$, kW	η_I	η_{ex}
Güneş kulesi	3882	0.4808	0.3765
Gaz çevrimi	613.9	0.3201	0.5367
Buhar çevrimi	547.7	0.2891	0.225
Abs. soğ. sist.	43.6	0.7729*	0.5825
Buhar üretimi	46.04	0.5454	0.8091
Su ısıtma	8.97	0.1774	0.2857
Kurutma	19.79	0.3354	0.4895
Toplam	5162		

*COP değerini ifade etmektedir.



Şekil 2: Ekserji kayıplarının yüzdesel olarak gösterimi.

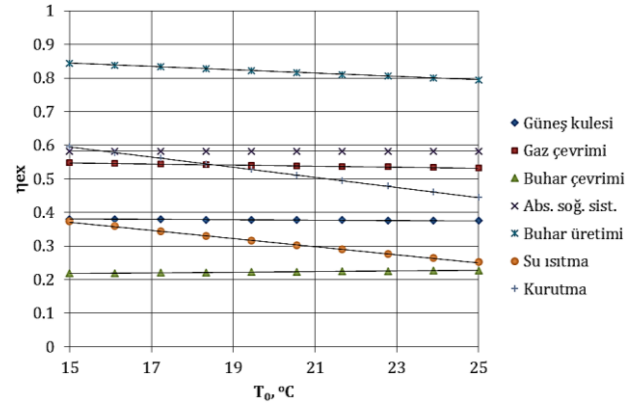
Ekserji kayıplarının yüzdesel olarak daha iyi anlaşılması için güneş kulesi ekserji kayıpları çıkartılarak diğer sistem elemanlarının ekserji kayıp oranları Şekil 3'teki grafikte yer almaktadır. Bu durumda toplam ekserji kayıplarının %48'i gaz çevriminde, %43'ü buharlı güç üretim sisteminde, %4'ü buhar üretim işleminde meydana geldiği görülmektedir. Buhar üretim işlemindeki ekserji kayıplarının diğer alt sistemlere oranla nispeten biraz fazla çıkmasının nedeni, gerekli ısı enerjisinin fazla ve proses buhar sıcaklığı ve basıncının yüksek olmasından kaynaklanmaktadır.



Şekil 3: Ekserji kayıplarının yüzdesel olarak gösterimi (Güneş kulesi hariç).

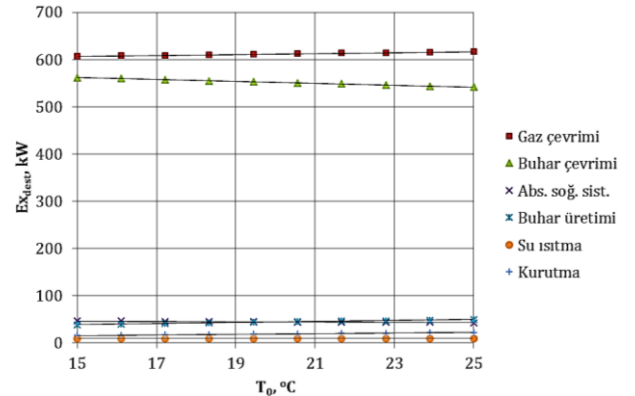
Ekserji değerleri, ekserji ifadesinin tanımdan da görüleceği üzere referans noktası şartlarına bağlıdır. Bu nedenle ekserji analizlerinin sonuçları, referans şartlarındaki değişimlere çok

fazla duyarlıdır. Mühendislik sistemlerine ekserji analizleri uygulanmasından önce, referans noktası şartları, titizlikle belirlenmelidir [31]. Referans şartlarının bu etkisi göz önüne alınarak, incelenen trijenerasyon sisteminin referans noktası sıcaklığı T_0 ile değişimi Şekil 4'te verilmiştir. Şekilden görüleceği üzere, alt sistemlerinin ekserji verimleri genel olarak referans sıcaklığının artması ile azalma eğilimi göstermiştir. Bu durum absorpsiyonlu soğutma sistemi için ihmal edilebilecek seviyede olmakla beraber sadece buhar çevriminde ekserji verimi artmıştır.



Şekil 4: Referans sıcaklığı ile ekserji verimlerinin değişimi.

Şekil 5'te ise referans noktası sıcaklığı T_0 ile ekserji kayıplarının değişimi verilmiştir. Güneş kulesi ve toplam ekserji kaybı, nispeten çok yüksek olduğu için, daha iyi anlaşılması adına T_0 ile değişimi Şekil 6'da gösterilmiştir. Beklendiği üzere, ekserji verimlerinin tersine, ekserji kayıpları referans noktası sıcaklığı ile beraber artmaktadır. Yine ekserji verimlerinde olduğu gibi absorpsiyonlu soğutma sistemindeki değişim ihmal edilebilecek seviyede olup buhar çevriminin ekserji kayıpları ise azalma eğilimi göstermiştir.

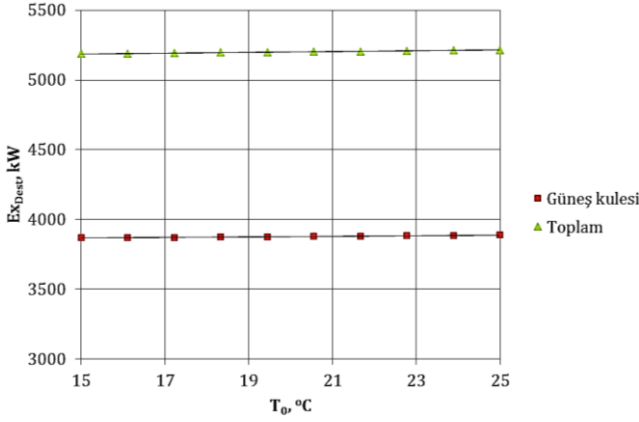


Şekil 5: Referans sıcaklığı ile ekserji kayıplarının değişimi.

5 Sonuçlar

Bu çalışmada, güneş enerjisi destekli çok fonksiyonlu trijenerasyon sisteminin enerji ve ekserji analizleri yapılmıştır. İncelenen sistemde gaz çevrimi verimi %32, buhar çevrimi verimi %28, soğutma sisteminin COP değeri ise 0.77 olarak tespit edilmiştir. Ekserji kayıpları incelendiğinde ise en yüksek ekserji kaybının 3882 kW ile güneş kulesinde meydana geldiği tespit edilmiştir. Ayrıca yapılan parametrik çalışmada referans noktası sıcaklığı ile sistemin ekserji verimleri ve kayıplarının değişimi incelenmiştir. Gaz çevrimleri için yüksek sıcaklıklara ihtiyaç duyulduğundan güneş enerjisi destekli bu tip sistemlerde yeni teknolojilerin geliştirilmesi büyük önem arz

etmektedir. Bu tip güneş toplayıcı sistemlerin güneş enerjisi potansiyeli yüksek olan ülkemizde de kurulması, enerji üretiminde dışa bağımlılık oranını düşürecektir.



Şekil 6: Referans sıcaklığı ile güneş kulesi ve toplam ekserji kayıplarının değişimi.

6 Kaynaklar

- [1] İskender S. "Nükleer Enerji Gerçeği". *Dünya Enerji Konseyi Türk Milli Komitesi Türkiye 10. Enerji Kongresi*, İstanbul, Türkiye, 27-30 Kasım 2006.
- [2] Önal E, Yarbay Z. "Türkiye'de Yenilenebilir Enerji Kaynakları Potansiyeli ve Geleceği". *İstanbul Ticaret Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 18, 77-96, 2010.
- [3] Kumbur H, Özer Z, Özsoy HD, Avcı ED. "Türkiye'de Geleneksel ve Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının Potansiyeli ve Çevresel Etkilerinin Karşılaştırılması". *Yeksem 2005, III. Yenilenebilir Enerji Kaynakları Sempozyumu ve Sergisi*, Mersin, Türkiye, 19-21 Ekim 2005.
- [4] Köksal B. Türkiye'nin Enerji Politikası İçerisinde Bileşik Isı-Güç Üretim Yeri. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye, 2006.
- [5] Arslan O, Köse R. "Kütahya Simav Jeotermal Sahasının Kalina Teknolojisiyle Elektrik Üretim Potansiyeli". *Dünya Enerji Konseyi Türk Milli Komitesi Türkiye 10. Enerji Kongresi*, İstanbul, Türkiye, 27-30 Kasım 2006.
- [6] Bulut H, Buyukalaca O. "Simple Model for the Generation of Daily Global Solar-Radiation Data in Turkey". *Applied Energy*, 84(5), 477-491, 2007.
- [7] Yenilenebilir Enerji Genel Müdürlüğü. "Güneş Enerjisi Potansiyel Atlası". <http://www.eie.gov.tr/> (10.11.2014).
- [8] Derbentli T. "Bileşik Isı-Güç Üretim Küçük Ölçeklerde Uygulanabilirliği". *Türkiye 12. Enerji Kongresi*, Ankara, Türkiye, 14-16 Kasım 2012.
- [9] Pravadaloğlu S. "Yerinde Enerji Üretimi - Kojenerasyon Sistemleri". *II. Elektrik Tesisat Ulusal Kongresi*, İzmir, Türkiye, 24-27 Kasım 2011.
- [10] Quero M, Korzynietz R, Ebert M, Jiménez AA, del Río A, Brioso JA. "Solugas-Operation Experience of the First Solar Hybrid Gas Turbine System at MW Scale". *Energy Procedia*, 49, 1820-1830, 2014.
- [11] Hands S, Sethuvenkatraman S, Peristy M, Rowe D, White S. "Performance Analysis & Energy Benefits of a Desiccant Based Solar Assisted Trigeneration System in a Building". *Renewable Energy*, 85, 865-879, 2016.
- [12] Al-Sulaiman FA, Dincer I, Hamdullahpur F. "Exergy Modeling of a New Solar Driven Trigeneration System". *Solar Energy*, 85(9), 2228-2243, 2011.
- [13] Calise F, d'Accadia MD, Palombo A, Vanoli L. "Dynamic Simulation of a Novel High-Temperature Solar Trigeneration System Based on Concentrating Photovoltaic/Thermal Collectors". *Energy*, 61, 72-86, 2013.
- [14] Tora EA, El-Halwagi MM. "Integrated Conceptual Design of Solar-Assisted Trigeneration Systems". *Computers & Chemical Engineering*, 35(9), 1807-1814, 2011.
- [15] Rahim MA, Gündüz D. "Gaz Türbinli Bir Isıl-Güç (Kojenerasyon) Çevrim Santralinin Enerji ve Ekserji Analizi: Ankara Şartlarında Uygulama". *TÜBAV Bilim Dergisi*, 6(2), 19-27, 2013.
- [16] Selbaş R, Yakut AK, Şencan A. "Güneş Kulesi Modeli ile Elektrik Enerjisi Üretimi İçin Bir Uygulama". *Pamukkale Üniversitesi, Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 9(2), 179-184, 2003.
- [17] Ozturk M, Dincer I. "Thermodynamic Analysis of A Solar-Based Multi-Generation System with Hydrogen Production". *Applied Thermal Engineering*, 51(1-2), 1235-1244, 2013.
- [18] Xu C, Wang Z, Li X, Sun F. "Energy and Exergy Analysis of Solar Power Tower Plants". *Applied Thermal Engineering*, 31(17-18), 3904-3913, 2011.
- [19] Benammar S, Khellaf A, Mohammedi K. "Contribution to the Modeling and Simulation of Solar Power Tower Plants Using Energy Analysis". *Energy Conversion and Management*, 78, 923-930, 2014.
- [20] Ratlamwala TAH, Dincer I, Aydın M. "Energy and Exergy Analyses and Optimization Study of an Integrated Solar Heliostat Field System for Hydrogen Production". *International Journal of Hydrogen Energy*, 37(24), 18704-18712, 2012.
- [21] Baghernejad A, Yaghoubi M. "Exergy Analysis of an Integrated Solar Combined Cycle System". *Renewable Energy*, 35(10), 2157-2164, 2010.
- [22] Solugas. "Solar Up-scale Gas Turbine System". <http://www.solugas.eu/index/> (11.01.2015).
- [23] Solar Turbines. "Saturn 20 PG-Generator Set". <https://mysolar.cat.com/> (11.01.2015).
- [24] Çengel YA, Boles MA. *Mühendislik Yaklaşımıyla Termodinamik*. İzmir, Türkiye, Güven Bilimsel Yayınevi, 2007.
- [25] Şahin HM, Acır A, Baysal E, Koçyiğit E. "Enerji ve Ekserji Analiz Metoduyla Kayseri Şeker Fabrikasında Enerji Verimliliğinin Değerlendirilmesi". *Gazi Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 22(1), 111-119, 2007.
- [26] Dincer I, Rosen MA. *Exergy: Energy, Environment and Sustainable Development*. 1st ed., Oxford, UK, Elsevier Science, 2007.
- [27] Bejan A. *Advanced Engineering Thermodynamics*. 2nd ed. New York, USA, John Wiley & Sons, 1997.
- [28] Petela R. "Exergy Analysis of the Solar Cylindrical-Parabolic Cooker". *Solar Energy*, 79(3), 221-233, 2005.
- [29] Tiwari GN. *Solar Energy: Fundamentals, Design, Modelling and Applications*. Pangbourne, UK, Alpha Science International Ltd, 2013.
- [30] F-Chart Software. "Engineering Equation Solver". <http://www.fchart.com/ees/> (10.09.2014).
- [31] Rosen MA, Dincer I. "Effect of Varying Dead-State Properties on Energy and Exergy Analyses of Thermal Systems". *International Journal of Thermal Sciences*, 43(2), 121-133, 2004.