



POLİTEKNİK DERGİSİ

JOURNAL of POLYTECHNIC

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

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



Isı-güç kombine sistemlerinde kullanılan kalina çevriminin enerji ve ekserji analizi

Energy and exergy analysis of a kalina cycle used for combined heat-power systems

Yazar(lar) (Author(s)): Yıldız KOÇ¹, Hüseyin YAĞLI²

ORCID¹: 0000-0002-9777-0698

ORCID²: 0000-0002-2219-645X

Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article): Koç Y. ve Yağlı H., “Isı-güç kombine sistemlerinde kullanılan kalina çevriminin enerji ve ekserji analizi”, *Politeknik Dergisi*, 23(1): 181-188, (2020).

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

DOI: 10.2339/politeknik.528793

Isı-Güç Kombine Sistemlerinde Kullanılan Kalina Çevriminin Enerji ve Ekserji Analizi

Araştırma Makalesi / Research Article

Yıldız KOÇ*, Hüseyin YAĞLI

Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, İskenderun Teknik Üniversitesi, Türkiye

(Geliş/Received : 19.02.2019 ; Kabul/Accepted : 18.07.2019)

ÖZ

Küresel ısınmanın giderek arttığı ve hava kirliliğinin insan sağlığını hissedilebilir şekilde tehdit ettiği bugünlerde, enerjiye olan ihtiyaç da giderek artmaktadır. Bu nedenle sadece insanların enerji ihtiyacını karşılamak değil bunun yanında çevreyi tehdit eden unsurların da minimum seviyelere indirilmesi hedeflenmektedir. Enerji ihtiyacını karşılamak için araştırmacılar farklı enerji üretim sistemleri üzerinde çalışmalar yapmakta ya da var olan tesislerin kapasitesini arttırmaktadır. Ancak, küresel ısınma ve hava kirliliğinin en önemli sebeplerinden biri olan endüstriyel atık ısı ve baca gazları atmosfere bırakılarak büyük bir enerji israfına sebep olmaktadır. Bu nedenle, kullanılmakta olan tesislerin iyileştirilmesi ve atık ısıların geri kazanımı hayati derecede önem arz etmektedir. Bu çalışmada kombine ısı-güç çevrimindeki orta derece sıcaklıktaki atık ısının geri dönüşümünü sağlamak için yeni bir metot olan Kalina çevrimi tasarlanmıştır. Sonrasında tasarlanmış olan Kalina çevriminin birinci ve ikinci kanun yönünden termodinamik analizi yapılmıştır. Çalışma sonucunda, maksimum ekserji yıkımı buharlaştırıcıda görülürken, Kalina çevriminin enerji verimi ve ekserji verimi sırasıyla yaklaşık %12 ve %27 olarak hesaplanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Kalina çevrimi, ısı-güç kombine sistemi, enerji, ekserji, atık ısı geri kazanımı.

Energy and Exergy Analysis of a Kalina Cycle Used for Combined Heat-Power Systems

ABSTRACT

Nowadays, when global warming is increasing and air pollution threatens human health in a sensible way, the need for energy is increasing. Therefore, it is aimed not only to meet the people's energy needs but also to minimize the factors that threaten the environment. To meet the energy needs, researchers are working on different power generation systems or trying to increase the capacity of existing plants. However, industrial waste heat and flue gases, one of the most important reasons of global warming and air pollution, are released to the atmosphere and cause a great waste of energy. Therefore, the improvement of the facilities in use and the recovery of waste heat are of vital importance. In this study, the Kalina cycle, which is a new method for recovering the waste heat has been designed for a medium temperature waste heat source released from a combined heat-power system. Afterwards, the thermodynamic analysis of the designed Kalina cycle was carried out in terms of the first and second law of the thermodynamics. As a result of the study, maximum exergy destruction was observed in evaporator, while energy efficiency and exergy efficiency of Kalina cycle were calculated as 12% and 27%, respectively.

Keywords: Kalina cycle, combined heat-power system, energy, exergy, waste heat recovery

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Enerji ihtiyacının büyük bir bölümü fosil yakıtlardan (%87) karşılanmaktadır [1,2]. Enerji ihtiyacını karşılamak için kullanılan fosil yakıtların %28'i Kömür, %21'i Doğal gaz ve %38'i petrolden oluşmaktadır [3]. Hava kirliliği ve küresel ısınma gibi çevresel sorunların en önemli sebeplerinden biri fosil yakıtlı enerji üretim tesisleri olmasına rağmen, temiz alternatif enerji kaynaklarının kullanımı %13'lerde kalmaktadır [1]. Dünya nüfus yoğunluğundaki artış ve teknolojik gelişmelerdeki ilerlemelerden dolayı enerji ihtiyacının ciddi oranda artması bilim insanlarını farklı enerji üretim araçlarına yönlendirmektedir [4-6]. Ancak, enerji üretimini arttırmanın tek yolu bu değildir. Kullanılmakta

olan tesisler iyileştirilmeli, yeni nesil entegre sistemler kullanılarak üretilen ısıdan maksimum seviyede faydalanılmalı ve enerji israfı en aza indirilmelidir. Böylece hem enerjiye olan talep azalacak hem de fosil yakıtların sebep olduğu küresel ısınma ve hava kirliliği gibi sağlığı tehdit eden çevresel sorunlar ciddi oranda düşürülecektir [7-9]. Fosil yakıtların yaklaşık %30'u egzoz gazları yoluyla atmosfere atılmaktadır [10]. Bu nedenle endüstriyel atık ısı kaynağından faydalanılmasıyla oldukça fazla enerji tasarrufu sağlanacaktır

Baca gazı ve endüstriyel atık ısılar genel olarak düşük sıcaklıklı atık ısı olarak enerji geri dönüşümü olmadan atmosfere bırakılmaktadır. Bu nedenle atık ısıdan tasarruf sağlamak ve atık ısıyı elektrik enerjisine çevirmek için geleneksel çevrimleri kullanmak uygun değildir. Geleneksel çevrimler yerine yeni yardımcı

*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)
e-posta : yildiz.koc@iste.edu.tr

çevrimlere ihtiyaç olmaktadır. 1980'li yıllarda Alexander I. Kalina tarafından düşük sıcaklıklı atık ısıya sahip kurulu bir sistemden maksimum verim sağlamak için yeni bir yardımcı çevrim ileri sürmüştür [4]. Çalışma akışkanı olarak amonyak-su karışımı kullanan Kalina çevrimi, organik Rankine çevrimine karşı ciddi bir rakip olarak öne çıkmaktadır [11-14]. Kalina çevriminin hem çevreye olan etkisi hem de çalışma akışkanının ucuz olmasından dolayı araştırmacıların gün geçtikçe ilgisini çekmeye devam etmektedir. Zhang ve ark. (2012) Kalina çevrimi üzerine kapsamlı bir araştırmaya çalışmasında yer vermektedir. Kalina çevriminin jeotermal güç çevrimi, dizel yakıtlı kombine çevriminin yanı sıra kömür yakıtlı termik santraller ve nükleer santrallerde kullanıma uygun olduğunu açıklamışlardır. Ayrıca, Kalina çevriminin avantaj ve dezavantajlarından ve çevreye olan etkilerinden bahsetmişlerdir [4]. Ogriseck (2009) tarafından yapılan çalışmada ısı ve güç üretiminin olduğu kombine tesiste atık ısıdan faydalanmak için kullanımı yaygın olmayan Kalina çevrimini entegre etmiş ve termodinamik analizini gerçekleştirmiştir. Analiz sonucunda Kalina çevriminin soğutma suyu sıcaklığı ve amonyak-su karışımı oranına bağlı olarak %12,3-%17,1 arasında olduğu ve sisteme 2,3 MW'lık bir ısı girişi için 320 kW-440 kW arasında elektrik üretimi sağlandığını ileri sürmüştür [15]. Zare ve ark. (2015) bu çalışmada Gaz Türbini-Modüler Helyum Reaktör (GT-MHR)'den atmosfere atılan baca gazı enerji geri dönüşümü için Kalina ve Organik Rankine Çevrimi (ORC) ayrı ayrı entegre edilmiştir. Termodinamik analizler sonucunda Kalina ve ORC sisteminin verimi GT-MHR sistemine göre sırasıyla %11,3 ve %10,3 daha fazla olduğunu ortaya çıkarmışlardır [16]. İbrahim ve ark. (1993) gaz türbininden dışarı atılan atık ısının geri dönüşümü için amonyak-su karışımı çalışma akışkanına sahip kalina çevrimini kullanmışlardır. Çalışma sonucunda aynı şartlar altında Kalina çevriminin veriminden %10-%20 arasında daha fazla olduğunu ortaya çıkarmışlardır [17]. Kalina çevrimi birçok farklı enerji üretim sistemlerine entegre edilebilmekte ve sistemin toplam enerjisine kayda değer bir katkı sağlamaktadır. Kalina sisteminin Nükleer enerji çevrimine uygulanabilirliği üzerine çalışan Ganesh ve ark. (2019), çevrime düşük ve yüksek sıcaklıklı Kalina çevrim sistemini entegre etmiştir. Düşük sıcaklıklı Kalina çevrimi kaynak olarak güneş enerjisi kullanılırken 129 kW elektrik enerjisi elde ederken yüksek sıcaklıklı Kalina çevrimi yüksek basınçlı suyun sıcaklığından faydalanarak 675 kW elektrik enerjisi elde etmiştir [18]. Rodriguez ve ark. (2013) ise Kalina ve organik Rankine çevrimi yenilenebilir enerji kaynaklarından biri olan jeotermal enerji sistemine dahil etmişlerdir. Bu çevrimler termodinamiğin birinci ve ikinci kanunu yönünden uygunlukları karşılaştırılmıştır. Hem organik Rankine hem de Kalina için sırasıyla en iyi performansı veren çalışma akışkanı (R-290) ve amonyak-su (%84 amonyak) karışım oranı seçilmiştir. Bu çalışma şartları altında Kalina sistemi organik Rankine çevriminden yaklaşık %18 daha fazla güç ürettiği görülmüştür [19].

Düşük kaynama noktasına sahip organik kimyasal akışkan kullanan ORC sistemi atık ısıdan faydalanarak enerji geri kazanımı için alternatif yöntemlerden biri olmasına rağmen hem organik akışkanın pahalı olması hem de bazı organik akışkanların ozon tabakasına zarar vermesi Kalina çevrimini ön plana çıkarmaktadır [12]. Kalina çevrimi ve ORC üzerine yapılan çalışmalara baktığımızda, Bombardo ve ark. (2010) tarafından kaleme alınan dizel motorlu kombine çevriminin atık ısı geri dönüşümü için Kalina ve ORC sisteminin karşılaştırmalı termodinamiksel analizi yapılmıştır. Ayrıca bu sistemlerin avantaj ve dezavantajları hakkında önemli bilgiler verilmiştir. Çalışma sonucunda Kalina sistemi, tek ve çift basınçlı alt kritik ORC sisteminden sırasıyla yaklaşık %45 ve %25 daha fazla güç elde edildiğini ortaya çıkarmışlardır [20]. Diğer bir çalışmada ise Kalina çevriminde kullanılan türbin ölçü parametrelerinin ORC sisteminde kullanılan türbin parametrelerinden daha küçük olduğunu, ancak ORC'nin Kalina çevriminden daha düşük basınçlarda çalışabildiği söylenmektedir [21].

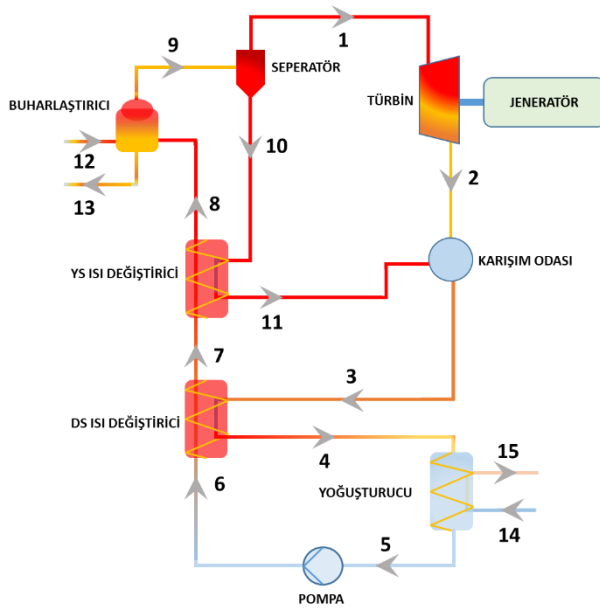
Yapılmış olan literatür çalışmaları detaylı olarak incelendiğinde atık ısı kaynaklarının enerji geri kazanımı için daha çok organik Rankine çevrimlerinin tercih edildiği görülmektedir. Fakat her ne kadar Kalina çevrimler daha az uygulama alanına sahip olsa da birçok konuda ORC çevrimlerinden daha üstün özelliklere sahip olduğu şüphesizdir. Dahası, Literatür çalışmalarında ısı-güç kombine çevrimlerinin atık enerjisinin geri kazanımı üzerine neredeyse hiç çalışma bulunmamaktadır ve yapılmış olan çalışmaların çoğunluğu sadece parametrik optimizasyon içermekte olup çevrimin ve çevrim elemanlarının detaylı ekserji analizleri üzerine detaylı bir analiz neredeyse hiç yoktur.

Bu çalışmada, gerçek bir ısı-güç kombine çevriminde mevcut durumda atmosfere salınmakta olan 400 °C sıcaklıktaki ve 1,63 kg/s debideki egzoz gazı atık ısının geri kazanımı üzerine çalışılmıştır. Çalışma kapsamında öncelikle Steag GbmH firması tarafından geliştirilen EBSILON®Professional programı kullanılarak tasarlanmış olan Kalina çevrimi için optimum amonyak-su oranı belirlenmiştir. Belirlenen bu karışım oranı baz alınarak çevrimin ve çevrim elemanlarının enerji ve ekserji temelli analizleri yapılarak sistemden elde edilebilecek maksimum güç miktarı belirlenmiştir.

2. KALINA SİSTEMİNİN TANITILMASI (DESCRIPTION OF THE KALINA SYSTEM)

Kalina çevrimlerinin ilk tasarımları 1980 yıllarına dayanmaktadır. Tıpkı organik Rankine çevrimleri gibi, Kalina çevrimleride düşük ve orta sıcaklıklı atık ısı kaynaklarından enerjinin geri kazanımı için kullanılmaktadır [11, 22,23]. Organik Rankine çevrimlerinde (ORC) çevrim akışkanı olarak düşük sıcaklıklarda kızgın buhar fazına geçebilen organik kökenli akışkanlar kullanılırken, Kalina çevrimlerinde çevrim akışkanı olarak amonyak-su karışımı

kullanılmaktadır. Kalina çevriminin şematik gösterimi Şekil 1'de verilmektedir.



Şekil 1. Egzoz gazının geri dönüşümünde kullanılan Kalina çevrimi (Kalina cycle for recovering of exhaust gas)

Kalina çevrimlerinde kullanılan amonyak-su karışımının en önemli özelliği, değişken kaynama noktasına sahip olması, çevre dostu olması ve ucuz olmasıdır [15,24,25]. Çalışma kapsamında ele alınan çevrimde çevrim akışkanın kütleli olarak %86'sı amonyaktan oluşmaktadır. Oluşturulan bu karışım çevrimde öncelikle buharlaştırıcı üniteye gönderilmekte ve buhar fazına getirilmektedir (8→9). Bu esnada kombine ısı-güç sisteminden gelen 400 °C'deki egzoz gazı soğutulularak bacaya gönderilmekte ve atmosfere salınmaktadır (12→13). Buhar fazına gelen su-amonyak karışımı içerisindeki buharlaşmamış su damlacıkları seperatör vasıtası ile alınmaktadır (9→1-10). Buhar fazındaki karışım türbinden geçirilerek karışım odasına gönderilir (1→2). Bu esnada seperatörde buhar fazındaki karışımın ayrılan sıvı akışkan yüksek sıcaklıktaki ısı değiştiriciden geçirilerek fazla ısını buharlaştırıcıya giren amonyak-su karışımına vermekte ve karışım odasına gönderilmektedir (10→11). Karışım odasında bir araya gelen karışım düşük sıcaklıklı ısı değiştiriciden geçirilerek yoğuşturucuya gönderilmektedir (3→4). Yoğuşturucuda soğutma suyu tarafından yoğuşan (14→15) amonyak-su karışımı (4→5), sıkıştırılarak yüksek basınçlara çıkartılmak için pompaya gönderilmektedir (5→6).

Kombine güç sistemlerinde egzoz gazı atık ısısının geri kazanımı için tasarlanmış olan Kalina çevriminin tasarım ve analiz aşamalarında sistem ekipmanlarının birtakım termodinamik özellikleri sabit kabul edilmiştir. Kalina çevriminin tasarımında sabit kabul edilen tasarım parametreleri Çizelge 1'de verilmektedir.

Çizelge 1. Kalina çevriminin tasarımında sabit kabul edilen tasarım parametreleri (Design parameters considered constant in the design of Kalina cycle)

Giriş parametreleri	Değer	Birim
Türbin izentropik verim	87	%
Pompa izentropik verim	80	%
Amonyak-su oranı	86	%
Atmosfer sıcaklığı (T_0)	18	°C
Atmosfer basıncı (P_0)	1	bar
Ölü nokta entalpisi (h_0)*	1333,2347	kJ/kg
Ölü nokta entropisi (s_0)*	5,7370	kJ/kg-K
Soğutma suyu sıcaklığı	5	°C

2.1. Kalina çevriminde çalışma akışkanı olarak amonyak-su karışımı kullanımı (Use of ammonia-water mixture as working fluid in Kalina cycle)

Amonyak-su karışımı Kalina çevrimini diğer çevrimlerden ayıran en önemli özelliklerden biridir. Amonyakın kaynama noktasının suyun kaynama noktasından düşük olmasından dolayı, amonyak-su karışımı değişken bir kaynama noktasına sahip olmaktadır [26]. Geleneksel Rankine çevrimlerinde iş akışkanı olarak kullanılmakta olan saf suyun yüksek kaynama noktasına sahip olmasından dolayı ortaya çıkan bu dezavantaj amonyak-su karışımı ile elimine edilmektedir. Böylece amonyak-su karışımlarının çevrim akışkanı olarak kullanıldığı Kalina çevrimlerinin düşük ve orta sıcaklıklı atık ısı kaynaklarına entegre edilmesi ve bu atık ısının geri kazanılması mümkün hale gelmektedir. Buda yüksek ısı kaynağına ihtiyaç duyan saf su kullanılan geleneksel Rankine çevrimlerinin yüksek sıcaklık gereksinimlerini elimine etmekte ve Kalina çevrimlerini düşük ve orta sıcaklıklı ısı kaynaklarının enerji geri kazanımı için en uygun çevrimlerden birisi yapmaktadır. Geleneksel Rankine çevrimlerinin yanı sıra organik Rankine çevrimleri ile de kıyaslandığında Kalina çevrimlerinin birçok avantajı mevcuttur. Çünkü amonyak-su karışımının organik akışkanlara göre birçok avantajı bulunmaktadır. Bu avantajlar;

- ❖ Doğaya ciddi zararlar verebilen organik akışkanlar ile kıyaslandığında doğanın bir yan ürünü olan amonyağın çevreye kayda değer bir zarar vermemesi,
- ❖ Amonyakın asidik kirlilikleri nötrleştirerek çevre tehditlerini azalması,
- ❖ Amonyakın yanma ve patlama tehlikesinin oldukça düşük olması ve güvenli bir akışkan olması,
- ❖ Çok pahalı olabilen Organik akışkanlar ile kıyaslandığında amonyağın daha ulaşılabilir ve ucuz olması,
- ❖ Amonyakın sabit kaynama ve yoğuşma sıcaklığı olmasına rağmen su ile karışığında

termodinamik özelliklerinin değişmesi ve farklı bir akışkan olarak davranması,

olarak sıralanabilir. Amonyak-su karışımındaki amonyak oranının ayarlanması sistemin güç üretim kapasitesini belirli bir değere kadar orantılı olarak arttırmaktadır. Optimum amonyak-su karışımı oranı tasarlanan sisteme ve kullanılan atık ısı kaynağına göre değişiklikler gösterebilmektedir. Bu nedenle optimum amonyak yüzdesinin bulunabilmesi için birçok optimizasyon çalışması yapılmıştır [27-30]. Optimizasyon çalışmalarında optimum amonyak yüzdesi, çevrimin maksimum verime ulaştığı anda karışım içinde bulunan amonyak miktarı ile bulunmaktadır. Mevcut çalışmada optimum amonyak-su karışımı oranı (%86) simülasyon programı tarafından hesaplanmış olup, çevrimin analizi bu oran için yapılmıştır.

3. MATEMATİKSEL METOT (MATHEMATICAL METHOD)

Kalina sistemini yalnızca termodinamiğin birinci kanunu ile analiz etmek yeterli olmayacaktır. Bu nedenle ikinci kanun analizinin de yapılması gerekmektedir [31-35]. Kalina çevriminin enerji ve ekserji analizi anlık olarak

şeklinde yazılabilmektedir. Burada \dot{Q} , \dot{W} ve \dot{E}_x sırasıyla ısı, iş ve ekserji akışını ifade etmektedir. İkinci kanun analizi için kullanılmakta olan ekserji akışı (\dot{E}_x);

$$\dot{E}_x = \dot{m}\psi \quad (4)$$

eşitliği kullanılarak hesaplanmaktadır. Burada ψ özgül ekserjiyi ifade etmektedir. Özgül ekserji;

$$\psi = (h - h_0) - T_0(s - s_0) \quad (5)$$

denkleminde yararlanılarak bulunmaktadır. Burada T_0 çevre sıcaklığını, s entropiyi, h ise entalpiyi temsil etmektedir. Tüm çevrimin enerji ve ekserji verimleri;

$$\eta_k = \frac{\dot{W}_{net}}{\dot{Q}_g} \quad (6)$$

$$\varepsilon_k = \frac{\dot{W}_{net}}{\dot{E}_{x,g}} \quad (7)$$

formülleri ile bulunmaktadır. Kalina çevrimi için yapılan termodinamik analizler boyunca tüm hesaplamalar daimi akış şartları kabul edilerek yapılmıştır. Ayrıca, kinetik ve potansiyel enerjiler ihmal edilmiştir.

4. SONUÇLAR VE TARTIŞMA (RESULTS AND DISCUSSION)

Çizelge 2. Kalina çevriminin hal nokta özellikleri (State point properties of Kalina cycle)

Boru	P	T	h	\dot{m}	\dot{Q}	ρ	s	ψ
	bar	°C	kJ/kg	kg/s	kW	kg/m ³	kJ/kgK	kJ/kg
1	33,30	90,00	1710,543	0,36	613,13	23,268	5,552	463,633
2	6,60	14,66	1529,187	0,36	548,13	5,541	5,646	254,831
3	6,60	23,39	897,384	0,66	591,75	9,940	3,625	177,626
4	6,60	23,26	892,380	0,66	588,45	10,018	3,608	177,536
5	6,60	16,59	265,641	0,66	175,17	677,322	1,462	175,519
6	35,30	17,31	270,931	0,66	178,66	678,519	1,466	179,748
7	34,30	18,39	275,935	0,66	181,96	677,064	1,484	179,598
8	33,30	49,93	428,002	0,66	282,23	633,624	1,979	187,374
9	33,30	90,00	1148,033	0,66	757,04	41,572	4,027	311,164
10	33,30	90,00	478,117	0,30	143,90	658,007	2,212	129,479
11	32,30	22,39	144,949	0,30	43,63	745,311	1,198	91,338
12	1,00	400,00	424,643	1,63	692,17	0,534	7,612	149,212
13	1,00	130,00	133,353	1,63	217,37	0,892	7,060	18,464
14	2,00	5,00	21,218	18,74	397,58	1000,015	0,076	1,354
15	1,80	10,26	43,273	18,74	810,86	999,716	0,155	0,518

elde edilen veriler göz önünde bulundurularak yapılacaktır. Hesaplamalarda genel termodinamik denklemlerinden yararlanılmıştır [36-43]. Sürekli akışlı bir sistem için kütle, enerji ve ekserji denklemleri;

$$\sum \dot{m}_g = \sum \dot{m}_ç \quad (1)$$

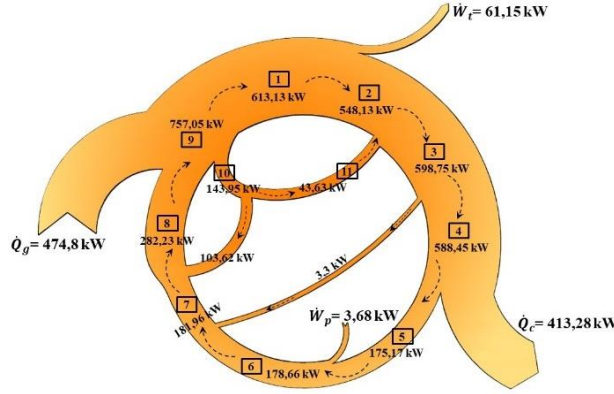
$$\dot{Q} + \dot{W} = \sum \dot{m}_ç h_ç - \sum \dot{m}_g h_g \quad (2)$$

$$\dot{E}_{x,g} = \dot{E}_{x,ç} + \dot{E}_{x,y} \quad (3)$$

Çalışma kapsamında ısı-güç kombine çevriminde mevcut durumda 400 °C sıcaklıkta atmosfere atılmakta olan 1,63 kg/s kütleli debideki egzoz gazının atık enerjisinin geri kazanımı için bir Kalina çevrimi tasarlanmıştır. Tasarlanmış olan bu Kalina çevrimi Steag GbmH tarafından geliştirilen EBSILON®Professional programı kullanılarak optimize edilmiş ve optimum amonyak-su karışımı belirlenmiştir. Belirlenen optimum karışım oranı ve çevrim analizi boyunca sabit kabul edilen tüm tasarım parametreleri bir arada ele alınarak çevrimin

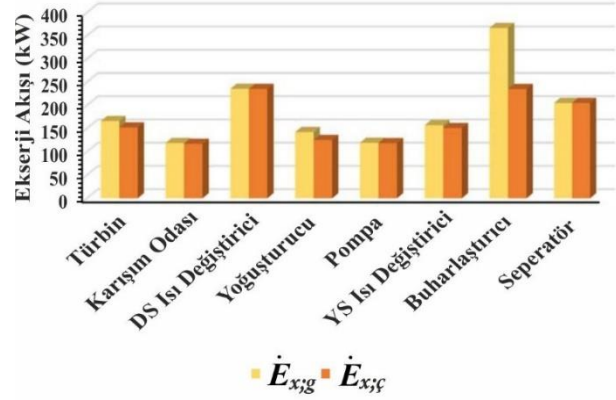
termodinamiksel analizi yapılmıştır. Programdan alınan ve çevrim üzerindeki her bir noktadan ölçülen akışkanın anlık termodinamik özellikleri Çizelge 2’de verilmektedir.

Bu çizelgede, Kalina çevrimi üzerinde termodinamik analiz için gerekli olan birçok önemli değerler verilmektedir. Kalina çevrimin optimizasyonu sonucu elde edilen bu termodinamik özellikler ışığında her bir ekipmandaki enerji akışı hesaplanarak Şekil 2’de verilmiştir.



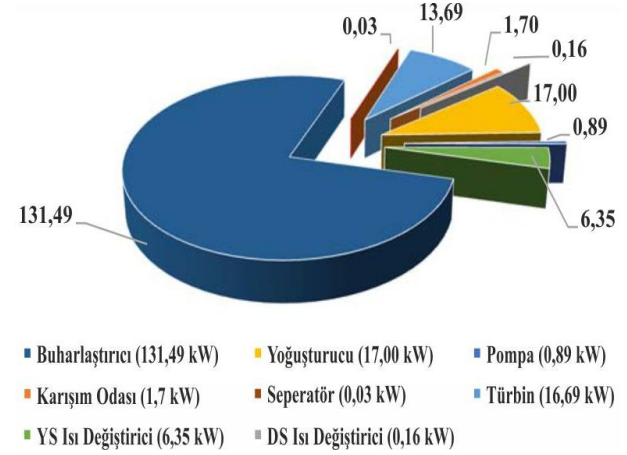
Şekil 2. Kalina çevrimindeki her bir ekipmandaki enerji akışı (Energy flow in each equipment in the Kalina cycle)

Kalina çevrimindeki her bir ekipmandaki enerji akışı güç üreten ve tüketen çevrim elemanları için (pompa ve türbin) üretilen ya da tüketilen işi ifade etmektedir. Isı değişiminin gerçekleştiği buharlaştırıcı ve ısı değiştirici gibi ekipmanlarda ise enerji akışı ekipman içerisinde bir akışkandan diğerine transfer edilen ısı miktarını ifade etmektedir. Ekipmanların her birindeki enerji akışı analiz edildiğinde, enerji akışının en büyük olduğu ekipmanın buharlaştırıcı olduğu görülmektedir. Çünkü, sisteme giren ve türbinde bir kısmı mekanik işe çevrilen ısı girişinin tamamı buharlaştırıcı üniteden çevrime girmektedir. En düşük enerji akışı ise sıcaklık farkının en düşük olduğu DS ısı değiştiricisinde ve pompada gerçekleşmektedir. Kalina çevrimi ekipmanlarındaki enerji akışının yanı sıra her bir ekipmandaki ekserji girişi ve ekserji çıkışı da hesaplanmış ve Şekil 3’de verilmiştir. Şekilde ekserji girişi sarı ve ekserji çıkışı turuncu sütunlar ile ifade edilmiştir. Karışım odası, seperatör, pompa ve DS ısı değiştiricisinde meydana gelen ekserji girişi ve çıkışları birbirine yakın iken buharlaştırıcıda giriş ve çıkış arasında kayda değer bir fark olduğu görülmektedir. Maksimum ekserji girişi 366,77 kW ile buharlaştırıcıda hesaplanırken minimum ekserji girişi 118,83 kW ile karışım odasında hesaplanmıştır. Sistemde maksimum ve minimum ekserji çıkışı ise sırasıyla 235,50 kW ile DS ısı değiştiricisinde ve 117,13 kW ile karışım odasındadır.



Şekil 3. Kalina çevrimindeki her bir ekipmandaki enerji akışı (Energy flow in each equipment in the Kalina cycle)

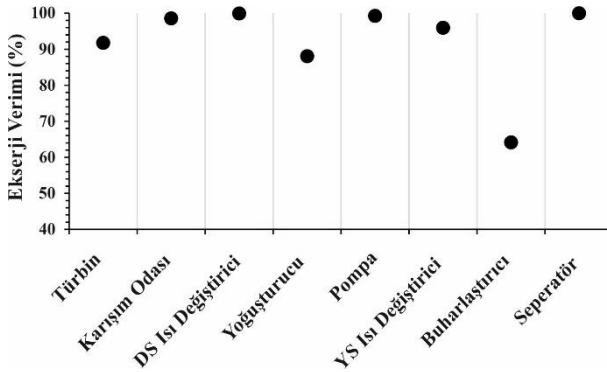
Ekserji dengesi denklemi ele alındığında, giren ve çıkan ekserji arasındaki farkın ekserji yıkımına eşit olduğu görülmektedir. Kalina çevrimi ekipmanlarının her biri için hesaplanan ekserji yıkımları Şekil 4’de verilmektedir.



Şekil 4. Kalina çevrimindeki her bir ekipmanın ekserji yıkımları (Exergy destruction of each equipment in the Kalina cycle)

Kalina çevrimi elemanlarındaki ekserji yıkımları detaylı olarak incelendiğinde maksimum ekserji yıkımının, giriş-çıkış sıcaklık farkının en yüksek olduğu buharlaştırıcı ekipmanında meydana geldiği görülmektedir. En düşük ekserji yıkımı ise seperatör ekipmanında meydana gelmiştir. Güneş enerji kaynağı destekli Kalina çevriminin ekserji analizi üzerine çalışan Mehrpooya ve ark. (2018), maksimum ekserji yıkımını buharlaştırıcıda hesaplamışlardır [44]. Aynı şekilde Fallah ve ark. (2016), tarafından yapılan jeotermal enerji kaynağı destekli Kalina çevriminin ileri ekserji analizi hesaplamaları sonucunda en büyük ekserji yıkımını yine buharlaştırıcıda bulmuşlardır [45]. Sistemdeki ekserji akışı ve ekserji yıkımlarının hesaplanması sistemin performansının incelenmesi için her ne kadar önemli parametrelerden olsa da tek başına yeterli değildir. Bu nedenle sistem ekipmanları üzerinde daha net bir kanıya varabilmek için ekipmanların ekserji verimlerinin

hesaplanması da büyük önem arz etmektedir. Kalina çevrimi sistem elemanları için hesaplanan ekserji verimleri Şekil 5'te verilmektedir.



Şekil 5. Kalina çevrimindeki ekipmanların ekserji verimleri (Exergy efficiency of equipment in Kalina cycle)

Özellikle seperatör, DS ısı değiştiricisi, karışım odası ve pompa gibi ekipmanlarda ekserji verimi oldukça yüksek çıkmaktadır. Çünkü bu ekipmanların giriş ve çıkış sıcaklık değişimleri oldukça düşüktür. Analizlere göre en düşük ekserji verimi %64,4 ile buharlaştırıcıda ve en yüksek ekserji verimi %99,93 ile DS ısı değiştiricisinde hesaplanmıştır. Kalina çevrimi üzerine yapılan analiz çalışmalarını incelendiğinde, mevcut çalışmada elde edilen sonuçlar ile örtüşen birçok çalışma bulunmaktadır. Mansoury ve ark. (2018) tarafından yapılan bir çalışmada, Kalina çevrimi ve ORC'nin kullanıldığı kombine bir sistemin enerji ve ekserji analizi yapılmıştır. Bu çalışmada buharlaştırıcının ekserji veriminin yaklaşık %42 ile %47 aralığında olduğunu belirlemişlerdir [10]. Mehrpooya ve ark. (2018) düşük sıcaklıklı ısı geri kazanımı için tasarlanmış olan bir Kalina çevriminin ekserji analizi üzerine çalışmışlardır. Çalışma sonucunda, Seperatör ve türbinin ekserji verimlerini sırasıyla %99,67 ve %89,81 olarak bulmuşlardır [44]. Çevrim elemanları ve çevrim performans parametreleri bir arada ele alındığında, tüm sistemin genel durumu üzerine bir öngörüye sahip olabilmek için çevrimin genel enerji ve ekserji hesaplamalarının yapılması gerekli ve önemli bir adımdır. Bu nedenle bu çalışma kapsamında tasarlanmış olan Kalina çevriminin performans parametreleri, enerji ve ekserji verimleri de hesaplanmış ve Çizelge 3'de verilmiştir.

Çizelge 3. Kalina çevriminin performans verileri (Kalina cycle performance data)

\dot{W}_t	\dot{Q}_g	\dot{W}_p	$E_{x,g}$	\dot{W}_{net}	η_k	ε_k
kW	kW	kW	kW	kW	%	%
61,1	474,8	3,677	213,1	57,4	12,1	26,9

Kalina çevriminin performans analizi yapılırken jeneratörden çıkan güç brüt güç olarak alınmış ve net gücün hesaplanmasında bu brüt güçten çevrim içerisinde karışımın basınçlandırılmasında kullanılan pompanın

tükettiği güç çıkarılmıştır. Kalina çevriminin performans verileri incelendiğinde egzoz gazının atık ısısının geri kazanımından yaklaşık 58 kW net güç üretimi elde edilmektedir. Çevrimin enerji ve ekserji verimleri sırasıyla yaklaşık %12 ve %27 olarak hesaplanmıştır. ORC ve Kalina çevrimlerinin termodinamik analizlerinin yapılarak karşılaştırıldığı birçok çalışma mevcuttur. Bu iki çevrimin analizlerinin yapılarak kıyaslandığı bir çalışmada çevrim akışkanı olarak %90 amonyak-su karışımının kullanıldığı ve 43,48 bar türbin giriş basıncının olduğu Kalina çevrimi için maksimum enerji ve ekserji verimleri sırasıyla yaklaşık %9,5 ve %21 olarak hesaplanmıştır [46]. Diğer bir çalışmada ise Kalina çevriminin termodinamiğin birinci ve ikinci kanunu yönünden optimizasyon çalışması yapılmış ve sistemin enerji verimi yaklaşık %12,95 olarak bulunmuştur [22]. Dahası bu çalışmalar ve literatürdeki diğer çalışmalardan elde edilen sonuçlar mevcut çalışma sonuçları ile kıyaslandığında elde edilen sonuçların birbirileri ile aynı doğrultuda olduğu görülmüştür.

5. SONUÇ (CONCLUSION)

Düşük sıcaklıklı enerji kaynaklarından geleneksel enerji üretim yöntemlerini kullanarak enerji geri dönüşümü oldukça güç ve oldukça maliyetli olmaktadır. Bu nedenle bu atık ısılardan geri kazanımı için çoğunlukla bu sistemlere ORC çevrimleri entegre edilmektedir. Fakat, bazı organik akışkanların doğaya zararlı olması, bu akışkanların elde edilebilmesinin zorluğu ve ozon tabakasına olan zararı enerjinin geri kazanımı için, yeni bir sistem olan Kalina çevrimlerine yönelimi arttırmıştır.

Kalina çevrimlerini ORC'den ayıran en önemli özelliği çalışma akışkanı olarak amonyak-su karışımı kullanılmasıdır. Küresel ısınma ve hava kirliliği gibi bir yan etkisi bulunmayan ve ayrıca kolay ulaşılabilir olmasından dolayı oldukça dikkat çekmektedir. Asidik kirlilikleri nötrleştirerek çevre tehditleri azaltması diğer dikkat çekici bir özelliğidir. Kalina çevriminin verimi birçok ORC sisteminden daha iyi olduğu araştırmalar sonucunda ortaya çıkmıştır.

Kalina çevrimi üzerine yapılmış olan mevcut çalışmada, ekserji yıkımının giriş-çıkış sıcaklık farkının en yüksek olduğu buharlaştırıcı ekipmanında en büyük olduğu görülmüştür. Buharlaştırıcı ekipmanında ekserji yıkımı 131,49 kW olarak hesaplanırken, çevrimin diğer ekipmanlarında kayda değer bir yıkımın olmadığı görülmüştür. Ayrıca, ekipmanların ekserji verimleri incelendiğinde, minimum ekserji verimi %64,4 ile buharlaştırıcıda hesaplanmıştır. Çevrimin diğer ekipmanlarında ise oldukça düşük giriş-çıkış sıcaklık değişimi olduğundan yüksek ekserji verimine sahip oldukları anlaşılmıştır. Mevcut durumda kullanılmadan atmosfere salınan egzoz gazının atık enerjisinin Kalina çevrimi kullanılarak geri kazanılması durumunda yaklaşık 58 kW net güç elde edilebileceği görülmüştür. Dahası, Kalina sisteminin enerji ve ekserji verimleri sırasıyla %12,1 ve %26,97 olarak hesaplanmıştır.

Kısaltmalar

c_p	= özgül ısı (kJ/kgK)
\dot{E}_x	= ekserji akışı (kW)
h	= entalpi (kJ/kg)
\dot{m}	= kütleli debi (kg/s)
P	= basınç (bar)
\dot{Q}	= ısı akışı (kW)
s	= entropi (kJ/kgK)
T	= sıcaklık (K)
T_0	= çevre sıcaklığı (K)
\dot{W}	= güç (kW)
v	= özgül hacim (m^3/kg)

Simgeler

ρ	= yoğunluk (kg/m^3)
ψ	= özgül ekserji (kJ/kg)
ε	= ekserji verimi (%)
η	= enerji verimi (%)

Alt İndisler

c	= kondenser
t	= türbin
p	= pompa
g	= giriş
ζ	= çıkış
k	= kalina
y	= yıkım

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Bose, B.K., "Global warming: Energy, environmental pollution, and the impact of power electronics". *IEEE Industrial Electronics Magazine*, 4(1): 6-17, (2010).
- [2] Tanç, B., Arat, H.T., Baltacıoğlu, E. and Aydın, K., "Overview of the next quarter century vision of hydrogen fuel cell electric vehicles". *International Journal of Hydrogen Energy*, 44(20): 10120-10128, (2019).
- [3] Koç, A., Yağlı, H., Koç, Y. and Uğurlu, İ., "Dünyada ve Türkiye'de Enerji Görünümünün Genel Değerlendirilmesi". *Engineer & the Machinery Magazine*, 59(692): 86-114, (2018).
- [4] Zhang, X., He, M., and Zhang, Y., "A review of research on the Kalina cycle". *Renewable and sustainable energy reviews*, 16(7): 5309-5318, (2012).
- [5] Sözen, A., Alp, I. and İskender, Ü., "An evaluation of Turkey's energy dependency". *Energy Sources, Part B: Economics, Planning, and Policy*, 9(4): 398-412, (2014).
- [6] Kuyumcu, M.E., Tutumlu, H. and Yumrutaş, R., "Performance of a swimming pool heating system by utilizing waste energy rejected from an ice rink with an energy storage tank". *Energy conversion and management*, 121: 349-357, (2016).
- [7] Sözen, A., Cakir, M. T. and Cıvil, F., "Sectoral CO2 emission reductions in Turkey: Preparing for DOHA 2020". *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 38(7): 905-913, (2016).
- [8] Tutumlu, H., Yumrutaş, R. and Yildirim, M., "Investigating thermal performance of an ice rink cooling system with an underground thermal storage tank". *Energy Exploration & Exploitation*, 36(2): 314-334, (2018).
- [9] Hames, Y., Kaya, K., Baltacıoğlu, E. and Turksoy, A., "Analysis of the control strategies for fuel saving in the hydrogen fuel cell vehicles". *International Journal of Hydrogen Energy*, 43(23): 10810-10821, (2018).
- [10] Mansoury, M., Jafarmadar, S. and Khalilarya, S., "Energy and exergy analyses of a combined cycle Kalina and organic Rankine cycles using waste heat". *International Journal of Exergy*, 27(2): 251-286, (2018).
- [11] Júnior, E.P.B., Arrieta, M.D.P., Arrieta, F.R.P. and Silva, C.H.F., "Assessment of a Kalina cycle for waste heat recovery in the cement industry". *Applied Thermal Engineering*, 147: 421-437, (2019).
- [12] Chen, Y., Guo, Z., Wu, J., Zhang, Z. and Hua, J., "Energy and exergy analysis of integrated system of ammonia-water Kalina-Rankine cycle". *Energy*, 90: 2028-2037, (2015).
- [13] Rostamzadeh, H., Ebadollahi, M., Ghaebi, H. and Shokri, A., "Comparative study of two novel micro-CCHP systems based on organic Rankine cycle and Kalina cycle". *Energy Conversion and Management*, 183: 210-229, (2019).
- [14] Prananto, L. A., Zaini, I.N., Mahendranata, B.I., Juangsa, F.B., Aziz, M. and Soelaiman, T.A.F., "Use of the Kalina cycle as a bottoming cycle in a geothermal power plant: Case study of the Wayang Windu geothermal power plant". *Applied Thermal Engineering*, 132: 686-696, (2018).
- [15] Ogriseck, S., "Integration of Kalina cycle in a combined heat and power plant, a case study". *Applied Thermal Engineering*, 29(14-15): 2843-2848, (2009).
- [16] Zare, V. and Mahmoudi, S.M.S., "A thermodynamic comparison between organic Rankine and Kalina cycles for waste heat recovery from the Gas Turbine-Modular Helium Reactor". *Energy*, 79: 398-406, (2015).
- [17] Ibrahim, M.B. and Kovach, R.M., "A Kalina cycle application for power generation". *Energy*, 18(9): 961-969, (1993).
- [18] Ganesh, N.S. and Srinivas, T., "Nuclear energy-driven Kalina cycle system suitable for Indian climatic conditions". *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 41(3): 298-308, (2019).
- [19] Rodríguez, C.E.C., Palacio, J.C.E., Venturini, O.J., Lora, E.E.S., Cobas, V.M., dos Santos, D.M. and Gialluca, V., "Exergetic and economic comparison of ORC and Kalina cycle for low temperature enhanced geothermal system in Brazil". *Applied Thermal Engineering*, 52(1): 109-119, (2013).
- [20] Bombarda, P., Invernizzi, C.M. and Pietra, C., "Heat recovery from Diesel engines: A thermodynamic comparison between Kalina and ORC cycles". *Applied thermal engineering*, 30(2-3): 212-219, (2010).
- [21] Nemati, A., Nami, H., Ranjbar, F. and Yari, M., "A comparative thermodynamic analysis of ORC and Kalina cycles for waste heat recovery: a case study for CGAM cogeneration system". *Case Studies in Thermal Engineering*, 9: 1-13, (2017).
- [22] Singh, O.K. and Kaushik, S.C., "Energy and exergy analysis and optimization of Kalina cycle coupled with a coal fired steam power plant". *Applied thermal engineering*, 51(1-2): 787-800, (2013).
- [23] Bilgiç, H.H., Yağlı, H., Ali, K. and Yapıcı, A., "Deneysel

- bir organik Rankine çevriminde yapay sinir ağları (YSA) yardımıyla güç tahmini”. *Selçuk Üniversitesi Mühendislik, Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 4(1): 7-17, (2016).
- [24] Mirolli, M.D. “The Kalina cycle for cement kiln waste heat recovery power plants”. *In Conference Record Cement Industry Technical Conference*, Kansas City, 330-336, (2005).
- [25] Mirolli, M.D. “Ammonia-water based thermal conversion technology: Applications in waste heat recovery for the cement industry”. *In Conference Record Cement Industry Technical Conference*, Charleston, 234-241, (2007).
- [26] Koc, A., Bulgan, A.T. and Öztürk, N.A., “Design and analysis of a water-ammonia absorption refrigeration system”. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy*, 214(5): 449-454, (2000).
- [27] Kalina, A.I., “Combined-cycle system with novel bottoming cycle”. *Journal of engineering for gas turbines and power*, 106(4): 737-742, (1984).
- [28] Usvika, R., Rifaldi, M. and Noor, A., “Energy and exergy analysis of kalina cycle system (KCS) 34 with mass fraction ammonia-water mixture variation”. *Journal of mechanical science and technology*, 23(7): 1871-1876, (2009).
- [29] El-Sayed, Y.M. and Tribus, M., “A theoretical comparison of the Rankine and Kalina cycles”. *In Proceedings of analysis of energy systems, design and operation, presented at the winter annual meeting of the American Society of Mechanical Engineers*, Miami Beach, 97-105, (1985).
- [30] Kurt, Ö.F. and Abuşoğlu, A., “Biyogaz Motorlu bir Birleşik Isı ve Güç Üretim Sisteminin Genetik Algoritma Yöntemi ile Optimizasyonu”. *Harran Üniversitesi Mühendislik Dergisi*, 4(1): 109-116, (2019).
- [31] Yağlı, H., Karakuş, C., Koç, Y., Çevik, M., Uğurlu, İ. and Koç, A., “Designing and exergetic analysis of a solar power tower system for Iskenderun region”. *International Journal of Exergy*, 28(1): 96-112, (2019).
- [32] Koç, Y., Yağlı, H. and Koç, A., “Exergy Analysis and Performance Improvement of a Subcritical/Supercritical Organic Rankine Cycle (ORC) for Exhaust Gas Waste Heat Recovery in a Biogas Fuelled Combined Heat and Power (CHP) Engine Through the Use of Regeneration”. *Energies*, 12(4): 575-596, (2019).
- [33] Yağlı, H., “Basit ve rejeneratif organik rankine çevrimi (ORC) tasarımları kullanılarak biyogaz yakıtlı ısı-güç kombine (CHP) motorunun atık ısısının geri dönüştürülebilirliği, enerji ve ekserji analizi”. *Doktora Tezi*, İskenderun Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü, (2018).
- [34] Koc, Y., Kose, O., and Yagli, H., “Exergy Analysis of a Natural Gas Fuelled Gas Turbine Based Cogeneration Cycle”. *International Journal of Exergy, In Print*.
- [35] Bademlioglu, A.H., Yamankaradeniz, R. and Kaynakli, O., “Exergy Analysis of the Organic Rankine Cycle Based on the Pinch Point Temperature Difference”. *Journal of Thermal Engineering*, 5(3): 157-165, (2019).
- [36] Özdemir, M.B. and Özkaya, M.G., “Ankara İli Şartlarında Düşey Tip Toprak Kaynaklı Isı Pompası Sisteminin Enerji ve Ekserji Analizi”. *Politeknik Dergisi*, 18(4): 269-280, (2015).
- [37] Abusoglu, A. and Kanoglu, M., “First and second law analysis of diesel engine powered cogeneration systems”, *Energy Conversion and Management*, 49(8): 2026–2031, (2008).
- [38] Abusoglu, A. and Kanoglu, M., “Exergetic and thermoeconomic analyses of diesel engine powered cogeneration: Part 1 – Formulations”, *Applied Thermal Engineering*, 29(2–3): 234–241, (2009).
- [39] Kanoglu, M. and Dincer, I., “Performance assessment of cogeneration plants”. *Energy Conversion and Management*, 50(1): 6–81, (2009).
- [40] Yagli, H., Koc, A., Karakus, C. and Koc, Y., “Comparison of toluene and cyclohexane as a working fluid of an organic Rankine cycle used for reheat furnace waste heat recovery”. *International Journal of Exergy*, 19(3): 420–438, (2016).
- [41] Yilmaz, C., Kanoglu, M. and Abusoglu, A., “Exergetic cost evaluation of hydrogen production powered by combined flash-binary geothermal power plant”. *International Journal of Hydrogen Energy*, 40(40): 14021–14030, (2015).
- [42] Yağlı, H., Koç, Y., Koç, A., Görgülü, A. and Tandiroğlu, A., “Parametric optimization and exergetic analysis comparison of subcritical and supercritical organic Rankine cycle (ORC) for biogas fuelled combined heat and power (CHP) engine exhaust gas waste heat”. *Energy*, 111: 923–932, (2016).
- [43] Kahraman, N., Cengel, Y.A., Wood, B. and Cerci, Y., “Exergy analysis of a combined RO, NF, and EDR desalination plant”. *Desalination*, 171(3): 217-232, (2005).
- [44] Mehroooya, M. and Mousavi, S.A., “Advanced exergoeconomic assessment of a solar-driven Kalina cycle”. *Energy Conversion and Management*, 178: 78-91, (2018).
- [45] Fallah, M., Mahmoudi, S.M.S., Yari, M. and Ghiasi, R.A. “Advanced exergy analysis of the Kalina cycle applied for low temperature enhanced geothermal system”. *Energy conversion and management*, 108: 190-201, (2016).
- [46] Yari, M., Mehr, A.S., Zare, V., Mahmoudi, S.M.S. and Rosen, M.A. “Exergoeconomic comparison of TLC (trilateral Rankine cycle), ORC (organic Rankine cycle) and Kalina cycle using a low grade heat source”. *Energy*, 83: 712-722, (2015).