

DÜŞÜK SICAKLIKTA JEOTERMAL ENERJİ KAYNAKLI ORGANİK RANKİNE ÇEVİRİMİ SİSTEMİNİN ENERJİ VE EKSERJİ ANALİZİ

FATİH AKKURT*^{ID}

Alınma: 25.09.2019; düzeltme: 11.05.2020; kabul: 18.06.2020

Öz: Bu çalışmada 50-100°C sıcak aralığında jeotermal kaynaklar için Organik Rankine Çevrimi (ORÇ) sisteminin performansı araştırılmıştır. Dört farklı akışkan (R141b,R123,R245fa R134a) için değişen jeotermal kaynak sıcaklığına bağlı olarak ORÇ sisteminin birinci ve ikinci yasa verimleri, birim jeotermal akışkan debisi için üretilebilecek net iş değerleri belirlenmiştir. En yüksek birinci ve ikinci yasa verimleri R141b akışkanı için elde edilmiştir. En fazla net iş çevrim akışkanı yüksek debi değeri nedeni ile R134a için hesaplanmıştır. R141b için her bir sistem elemanının ekserji yıkım miktarları ve yüzde değerleri belirlenmiştir. Sistemi oluşturan her bir eleman için ekserji yıkımı artan sıcaklıkla artmıştır. Sistem elemanları arasında 50-85°C' jeotermal kaynak sıcaklığı aralığında en fazla ekserji yıkımı jeneratörde görülmüştür. Bunu sırasıyla yoğuşturucu, türbin ve pompa izlemiştir. 85°C'nin üstü sıcaklıklarda türbindeki ekserji yıkımı sıralamada yoğuşturucunun önüne geçmiştir.

Anahtar Kelimeler: ORÇ, Jeotermal Kaynak, Enerji Analizi, Ekserji Analizi

Energy and Exergy Analysis of an Organic Rankine Cycle System with Low Temperature Geothermal Energy Source

Abstract: In this study, the performance of ORC system for geothermal resources at a temperature range of 50-100°C was investigated. Depending on the increase of geothermal source temperature, first and second law efficiencies, the network for the unit geothermal flow rate were investigated for four different fluids (R141b, R123, R245fa R134a). The highest first and second law efficiency was obtained for R141b. The maximum work was calculated for the R134a depending on the fluid flow rate. Exergy destruction amounts and percentages were determined for each system element for the R141b. Exergy destruction increased for each system element with the increase of geothermal source temperature. The maximum exergy destruction was observed in the generator at a geothermal source temperature range of 50-85°C. This was followed by the condenser, turbine and pump. At the temperatures above 85°C, exergy destruction was higher at condenser than turbine.

Keywords: ORC, Geothermal Source, Energy Analysis, Exergy Analysis

1. GİRİŞ

Tüm dünyada giderek artan elektrik enerji talebine ve konvansiyonel elektrik üretim yöntemlerinin çevreye zararlı etkilerine bağlı olarak yenilenebilir enerji kaynaklarını kullanarak elektrik üretimi giderek önem kazanmaktadır. Jeotermal enerji kaynakları da elektrik üretimi yapılan yenilenebilir enerji kaynakları arasında önemli bir yere sahiptir. Elektrik üretimi için

* Necmettin Erbakan Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, Meram, 42140 Konya
İletişim Yazarı: Fatih Akkurt (fakkurt@erbakan.edu.tr)

kullanılan jeotermal santraller temelde flanşlı ve ikili olmak üzere iki farklı tiptedir. Jeotermal enerji kaynakları arasında yüksek sıcaklıktaki kaynaklar ($> 220^{\circ}\text{C}$) flanşlı sistemler için, orta ve düşük sıcaklıklı jeotermal enerji kaynakları için ikili sistemler uygundur (Shengjun ve diğ., 2011).

Türkiye dünya ülkeleri arasında, jeotermal enerji kapasitesi olarak yapılan sıralamada on ikinci sırada yer almaktadır (Kılıç, 2016). MTA 1996, MTA 2005 raporlarına göre Türkiye'de 1000 adet sıcak su ve mineralli su kaynağı ve buna ilaveten jeotermal kaynak kuyusu mevcuttur. Bunlardan 170 adedinin sıcaklığı 40°C 'nin üzerindeki sıcaklıklardadır. En kıymetli sayılabilecek 11 adedi ise çok yüksek sıcaklıklardaki kaynaklar olup, elektrik enerjisi üretimi için elverişli olmaları sektör açısından cazip bulunmaktadır. Diğerleri orta ve düşük sıcaklıklı olup, ısıtma, endüstriyel proses ve kaplıca amaçlı kullanıma uygundur (Kılıç, 2016).

ORÇ, güneş enerjisi, atık ısı, biyokütle ve jeotermal enerji gibi orta ve düşük sıcaklıkta enerji kaynakları kullanılarak elektrik üretimi yapılabilen bir çevrimdir. Bu dört ana enerji kaynak kullanılarak kurulan dünya üzerinde kurulu 918 ORÇ santrali bulunmaktadır. Bu santrallerden 163 tanesini jeotermal kaynaklıdır. Türkiye'de ise toplam 32 adet kurulu jeotermal kaynaklı ORÇ tesisi bulunmaktadır (<https://ORÇ-world-map.org>). ORÇ'nin jeotermal enerji kaynakları ile kullanılabilirliği $50-350^{\circ}\text{C}$ kaynak sıcaklığı aralığında değişmektedir. Bununla birlikte, düşük sıcaklıktaki jeotermal kaynaklar için ($<100^{\circ}\text{C}$) sistem verimliliğinin çok düşüktür (Tchanche ve diğ., 2010).

Ekserji analizi termodinamiğin birinci ve ikinci yasalarının birleşimi olarak sistem performansının belirlenmesinde çevresel koşulları dikkate alan etkili bir analiz metodudur. Ekserji, bir sistemi çevresiyle dengeye getirerek elde edilebilecek maksimum iş potansiyeli olarak tanımlanmaktadır. Ekserji analizinde sistemlerdeki entropi üretimi dikkate alınır ve sistem elemanlarında meydana gelen ekserji yıkımlarının belirlenmesine bağlı olarak sistemin daha yüksek verim açısından daha kapsamlı bir şekilde analiz edilmesini sağlar (Tchanche ve diğ., 2010). Ekserji analiz yöntemi ile sistemlerin mükemmelle ne kadar yaklaştığının bir ölçüsü olan ikinci yasa verimi hesaplanır.

ORÇ ile ilgili yapılan araştırmaların pek çoğunda kullanılacak enerji kaynağına bağlı olarak, sistem için en uygun ve en verimli çevrim akışkanının belirlenmesi ana hedef olmuştur. Çevrimde kullanılan akışkanlar, türbin çıkışındaki akışkanın kuruluk derecesinin türbine etkisi dikkate alınarak, sıcaklık entropi diyagramlarındaki doymuş buhar eğrilerine göre pozitif eğimli kuru akışkanlar, negatif eğimli ıslak akışkanlar, dikey olan izentropik akışkanlar olarak üç grupta incelenmiştir. Ayrıca çevrim akışkanlarının kritik sıcaklığının altında veya üstünde yapılan uygulamalar incelenerek sonuçlar değerlendirilmiştir. Farklı enerji kaynakları ve farklı akışkanlar için deneysel ve teorik çalışmaların birinci ve ikinci yasa verimleri belirlenerek en fazla verimin hangi akışkanla elde edileceği ve ekserji yıkımlarının çevrim elemanlarına göre nasıl değiştiği pek çok araştırmacı tarafından incelenmiştir.

Etemoğlu ve diğ.(2006) giriş şartları 161 kPa basınç, $102,2^{\circ}\text{C}$ sıcaklık ve 60,1 kg/s kütleli debideki bir jeotermal kaynak için ORÇ'ni incelemişlerdir. Çevrim akışkanı olarak isopentanın kullanıldığı bu sistemde, en büyük tersinmezlik oranının %43 ile jeneratörde olduğunu belirlenmiştir.

Hettiarachchi ve diğ. (2007) jeotermal kaynaklar için düşük sıcaklıkta ($70-100^{\circ}\text{C}$ arasında) çalışan, çevrim akışkanları olarak amonyak, R123, n-Pentane ve PF5050 akışkanları kullanılan, ORÇ'nin düşük maliyetli tasarım optimizasyonunu incelemişlerdir. Optimizasyon kriterleri için ekserji analizi yapmışlardır. Çevrim akışkanları arasında amonyağın en iyisi olduğunu belirlemişlerdir.

Heberle ve Brüggemann (2010) bir ORÇ'nin 450 K'nin altındaki jeotermal kaynaklar için seri ve paralel bağlantılı kombine ısı ve enerji üretim sistemi olarak çalışmasını araştırmışlardır. Çevrim akışkanı olarak R227ea ve izopentanın kullanılması durumunda gücü çıkışının en yüksek değerde olduğunu belirlemişlerdir.

Shengjun ve diğ. (2011) ORÇ sistemini; kritik altı ve transkritik çalışma durumunda; ısı verim, ekserji verimi, geri kazanım verimi, birim güç çıktısı başına ısı eşanjörü alanı ve enerji

maliyeti açısından incelemişlerdir". Jeotermal kaynaklar için uygun olan 80-100°C sıcaklık aralığında, 16 farklı akışkanı araştırmışlardır. Sistemin kritik altı çalışma şartlarında en yüksek ısıl ve ekserji verim değerlerini R123 akışkanın için, sırasıyla % 11,1 ve %54,1 olarak belirlemişlerdir.

Li ve diğ. (2012) R123 çalışma akışkanı için 70-100°C sıcaklık aralığında güncellenmiş bir ORÇ sisteminin enerji ve ekserji verimini araştırmışlardır. En büyük ekserji yıkımının yüksek sıcaklık farkına bağlı ısı transferinden dolayı jeneratörde meydana geldiğini belirlemişlerdir. Bunu yoğunlaştırıcı, türbin, pompa ve ayırıcının takip ettiğini ve sistemin toplam ekserji veriminin yaklaşık % 40 olduğunu belirtmişlerdir.

Kaşka (2014) çelik endüstrisinde atık ısı geri kazanımı amaçlı, çevrim akışkanı olarak R245fa kullanılan, iki farklı gerçek ORÇ sisteminin ekserji analizini çalışmıştır. Isı kaynağı sıcaklıkları 122,4 ve 132 °C iken, sistemin enerji ve ekserji verimleri sırasıyla % 10,2; % 48,5 ve % 8,8; % 42,2 olarak belirlemiştir. Sistem elemanlarındaki en yüksek ekserji yıkımının evaporatörde meydana geldiğini; bunu sırasıyla türbin, kondansatör ve pompanın takip ettiğini ortaya koymuştur.

Baral ve diğ. (2015) küçük ölçekli (1 kW prototip) bir ORÇ'nin enerji ve ekserji analizini araştırmışlardır. Çevrim akışkanı olarak R245fa kullanılan sistem için 90-130°C sıcaklık aralığında ısı kaynağı olarak güneş kolektörlerinin uygulanabileceğini öne sürmüşlerdir. Sistemdeki 0,95 kW'lık net güç çıkışı için jeneratör, türbin, yoğunlaştırıcı ve pompanın ekserji verimliliklerini sırasıyla %75, %80, %43,2 ve %80,7 olarak belirlemişlerdir.

Algieri ve Sebo (2017) jeotermal enerji kaynaklı, jeneratör sıcaklığının 70-130°C arasında değiştiği küçük ölçekli ORÇ sisteminin çevrim akışkanı olarak izobutan, izopentan ve R245ca kullanılması durumunda enerji verimini araştırmışlardır. Ayrıca, dahili rejeneratörün sistem performansı üzerindeki etkisini de incelemişlerdir. En yüksek ısıl verimi izopentan, en düşük ısıl verimi R245ca için belirlemişlerdir. Dahili rejeneratörün ısıl verim üzerindeki etkisinin jeneratör sıcaklığının azalmasıyla azaldığını ifade etmişlerdir.

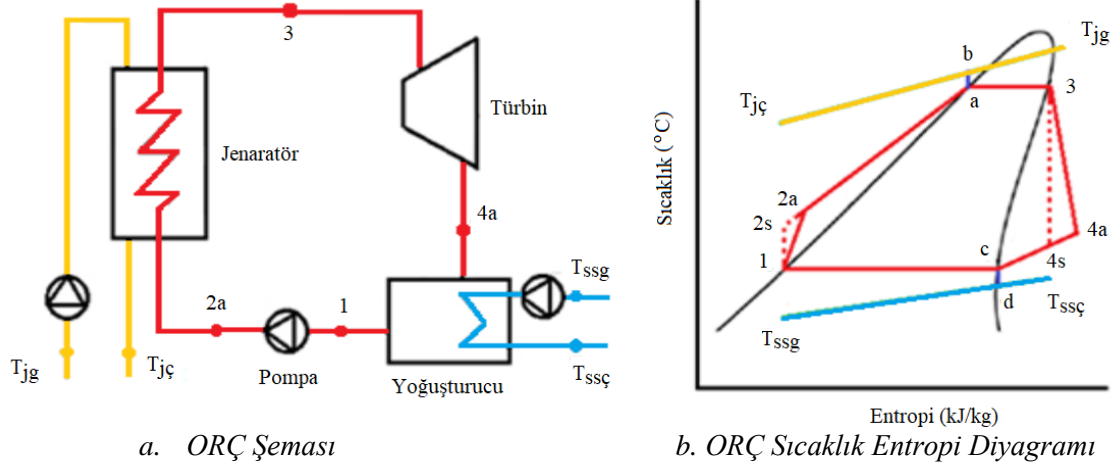
Bianchi ve diğ. (2018) ısı kaynağı olarak 60°C'den düşük bir jeotermal kaynağın , ısı kuyusu olarak da bir yüzme havuzunun kullanıldığı gerçek bir mikro ORÇ güç sisteminin vaka çalışmasının sonuçlarını sunmuşlardır. Çalışma sıvısı olarak R134a seçilen ORÇ sisteminin ısıl verimini % 4,4 olarak belirlemişlerdir.

Ülkemizde düşük sıcaklık aralığındaki jeotermal kaynaklar yoğun olarak ısıtma ve kaplıca amaçlı kullanılmaktadır. Düşük sıcaklıktaki jeotermal kaynaklarda sistem verimini düşük olacağı endişesiyle elektrik üretiminden kaçınılmaktadır. Bu çalışmada ülkemizde yaygın olan düşük sıcaklıkta jeotermal kaynakların yakın çevresinde bulunan binaların veya tesislerin elektrik ihtiyacını karşılayabilecek düşük kapasiteli ORC sisteminin kurulması durumunu değerlendirmek amaçlanmıştır. Böylelikle sıcaklığı 50-100°C jeotermal kaynaklar için ORÇ sisteminin performansı dört farklı akışkan (R141b, R123, R245fa ve R134a) için jeotermal kaynak sıcaklığına bağlı olarak araştırılmıştır. ORÇ sisteminin birinci ve ikinci yasa verimleri, birim jeotermal akışkan debisi için üretilebilecek net iş ve sistemi oluşturan her bir cihaz için ekserji yıkım miktarları ve yüzdeleri belirlenmiştir.

2. METODOLOJİ

Jeotermal kaynaklı ORÇ sisteminin şeması ve çevrimin sıcaklık entropi diyagramı Şekil 1' de görülmektedir Sistem jeneratör, türbin, yoğunlaştırıcı ve pompadan oluşmaktadır. Jeotermal kaynaklı ORÇ'nin çalışma prensibi kısaca şu şekildedir: Jeotermal kaynak sıcaklığında (T_{jg}) jeneratöre pompalanan jeotermal su, ısını jeneratörde ORÇ akışkanına aktararak (T_{jg}) sıcaklığında jeneratörden çıkmaktadır. ORÇ sisteminde dolaşan çevrim akışkanı (2a) noktasında jeneratöre girmekte ve (3) noktasında türbine girmek üzere doymuş buhar olarak çıkmaktadır. Türbine doymuş buhar olarak giren akışkan türbinde iş üretildikten sonra, (4a) noktasında (T_{a4}) sıcaklığında türbinden çıkmaktadır. Yoğunlaştırıcıda soğutma suyu ile yoğuşan çevrim akışkanı (1) noktasından (T_1) sıcaklığında doymuş sıvı olarak çıkmakta ve pompa ile jeneratöre

gönderilmektedir. Soğutma suyu yoğuşturucuya (T_{ssg}) sıcaklığında girmekte ve ($T_{ssç}$) sıcaklığında çıkmaktadır.



a. ORÇ Şeması

b. ORÇ Sıcaklık Entropi Diyagramı

Şekil 1:

Jeotermal Kaynaklı ORÇ Sisteminin Şeması ve Çevrimin Sıcaklık Entropi Diyagramı

Yapılan araştırmada jeotermal kaynak sıcaklığı (T_{jg}) 50-100°C arasında değişirken, soğutma suyu giriş sıcaklığı (T_{ssg}) 20°C olarak sabit, pompa basınç değerleri ise her üç pompa için 300kPa kabul edilmiştir. Çevrim akışkanın türbin giriş sıcaklığı (T_3), jeotermal kaynak sıcaklığından (T_{jg}) 10°C düşük ve doymuş buhar olarak, yoğuşturucu çıkış sıcaklığı (T_1), soğutma suyu giriş sıcaklığından (T_{ssg}) 10°C yüksek ve doymuş sıvı olarak kabul edilmiştir. Jeneratörde jeotermal su ile çevrim akışkanı arasında (a ve b noktaları arasında) ve yoğuşturucuda soğutma suyu ve çevrim akışkanı arasında (c ve d noktaları arasında) ‘pinch point’ sıcaklık farkları 5°C olarak kabul edilmiştir. Ekserji analizi için ölü hal değerleri tüm akışkanlar için $T_0=20^\circ\text{C}$ $P_0=100$ kPa olarak kabul edilmiştir. Tüm sistem elemanları adiabatik kabul edilmiştir. Jeneratörde ve yoğuşturucuda ısının tamamının aktarıldığı varsayılmıştır. Çevrimdeki sistem elemanları sürekli akışlı kabul edilmiş, borulardaki ve sistem elemanlarındaki basınç kayıpları ihmal edilmiştir. Türbin ve pompa verimleri sırasıyla %80 ve %90 alınmıştır (Shengjun ve diğ., 2011, Astolfi ve diğ., 2014). Hesaplamalar için EES programı kullanılmıştır.

Sistemi oluşturan her bir cihaz için termodinamiğin birinci kanunu genel denklemi uygulanmıştır.

$$\dot{Q} - \dot{W} = \dot{m} * (h_c - h_g) \quad (1)$$

Birim jeotermal akışkan debisine (\dot{m}_j) karşılık ORÇ de dolaşan soğutucu akışkan debisi (\dot{m}_{sa}) ve gerekli soğutma suyu (\dot{m}_{ss}) debisi aşağıdaki denklemler ile belirlenmiştir.

$$\dot{m}_j * (h_{jg} - h_{jç}) = \dot{m}_{sa} * (h_3 - h_{2a}) \quad (2)$$

$$\dot{m}_{ss} * (h_{ssç} - h_{ssg}) = \dot{m}_{sa} * (h_{4a} - h_1) \quad (3)$$

Türbinden elde edilen ve pompada harcanan iş miktarları W_t ve W_p denklemleri ile hesaplanmıştır.

$$\dot{W}_t = \dot{m}_{sa} * (h_3 - h_{4a}) \quad (4)$$

$$\dot{W}_p = \dot{m}_{sa}(h_{2a} - h_1) \quad (5)$$

ORÇ' nin birinci yasa verimi aşağıdaki denklemle elde edilmiştir.

$$\eta_I = \frac{W_t - W_p}{\dot{m}_j * (h_{jg} - h_{jç})} \quad (6)$$

Yapılan çalışmada R141b, R123, R245fa ve R134a, olmak üzere dört farklı soğutucu akışkanın sistem performansına etkisi incelenmiştir. Araştırılan kaynak sıcaklıkları aralığı ile akışkanların kritik nokta sıcaklıkları karşılaştırılarak sistemin daima kritik altı sıcaklık şartlarında çalışması istenmiştir. Akışkanlara ait termodinamik özellikler Tablo 1'de sunulmuştur.

Tablo 1. Soğutucu Akışkanların Termodinamik Özellikleri (Cihan ve Kvasoğulları, 2016, Karimi ve Mansouri, 2018)

Soğutucu Akışkan	T _{cr} (°C)	T _{bp} (°C)	P _{cr} (MPa)	Kütle (g/mol)	Tip
R141b	204,70	32	4,21	116,9	İzentropik
R123	183,68	27,82	3,60	152,93	İzentropik
R245fa	154,05	14,90	3,66	134,05	İzentropik
R134a	101,06	-26,07	4,06	102,03	Islak

Sistem elemanlarındaki ekserji dengesi , sistem üzerindeki her bir noktanın ekserjisi (\dot{E}), sistemin toplam ekserji yıkımı (I_{top}) ve her bir sistem elemanının toplam ekserji yıkımındaki yüzde etkisi aşağıdaki denklemler kullanılarak belirlenmiştir. Ayrıca sistem elemanlarına ait ekserji denklemleri Tablo 2' de ayrıntılı olarak sunulmuştur.

$$\sum (1 - \frac{T_0}{T}) * Q - W + \sum \dot{E}_g - \sum \dot{E}_g - I = 0 \quad (7)$$

$$\dot{E} = \dot{m} * [(h - h_0) - T_0(s - s_0)] \quad (8)$$

$$I_{top} = I_{jen} + I_{türb} + I_{yoğ} + I_{pompa} \quad (9)$$

$$I_{cihaz}(\%) = I_{cihaz}/I_{toplama} \quad (10)$$

Tablo 2. Sistem Elemanlarının Ekserji Denklemleri

Jeneratör	
Ekserji girişi	$\dot{E}_{jg} = \dot{m}_j * [(h_{jg} - h_0) - T_0(s_{jg} - s_0)]$ (11)
	$\dot{E}_{2a} = \dot{m}_{sa} * [(h_{2a} - h_{01}) - T_0(s_{2a} - s_{01})]$ (12)
Ekserji çıkışı	$\dot{E}_{jç} = \dot{m}_j * [(h_{jç} - h_0) - T_0(s_{jç} - s_0)]$ (13)
	$\dot{E}_3 = \dot{m}_{sa} * [(h_3 - h_{01}) - T_0(s_3 - s_{01})]$ (14)
Ekserji yıkımı	$I_{jen} = (\dot{E}_{jg} - \dot{E}_{jç}) + (\dot{E}_{2a} - \dot{E}_3)$ (15)
Türbin	
Ekserji girişi	$\dot{E}_3 = \dot{m}_{sa} * [(h_3 - h_{01}) - T_0(s_3 - s_{01})]$ (16)
Ekserji çıkışı	$\dot{E}_{4a} = \dot{m}_{sa} * [(h_{4a} - h_{01}) - T_0(s_{4a} - s_{01})]$ (17)
Ekserji yıkımı	$I_{türb} = \dot{E}_3 - \dot{E}_{4a} - \dot{W}_t$ (18)
Yoğuşturucu	
Ekserji girişi	$\dot{E}_{ssg} = \dot{m}_{ss} * [(h_{ssg} - h_0) - T_0(s_{ssg} - s_0)]$ (19)
	$\dot{E}_{4a} = \dot{m}_{sa} * [(h_{4a} - h_{01}) - T_0(s_{4a} - s_{01})]$ (20)
Ekserji çıkışı	$\dot{E}_{ssç} = \dot{m}_{ss} * [(h_{ssç} - h_0) - T_0(s_{ssç} - s_0)]$ (21)
	$\dot{E}_1 = \dot{m}_{sa} * [(h_1 - h_{01}) - T_0(s_1 - s_{01})]$ (22)
Ekserji yıkımı	$I_{yoğ} = (\dot{E}_{4a} - \dot{E}_1) + (\dot{E}_{ssg} - \dot{E}_{ssç})$ (23)
Pompa	
Ekserji girişi	$\dot{E}_1 = \dot{m}_{sa} * [(h_1 - h_{01}) - T_0(s_1 - s_{01})]$ (24)
Ekserji çıkışı	$\dot{E}_{2a} = \dot{m}_{sa} * [(h_{2a} - h_{01}) - T_0(s_{2a} - s_{01})]$ (25)
Ekserji yıkımı	$I_{pompa} = \dot{E}_1 - \dot{E}_{2a} - \dot{W}_p$ (26)

Son olarak ikinci yasa verimi şu şekilde hesaplanmıştır:

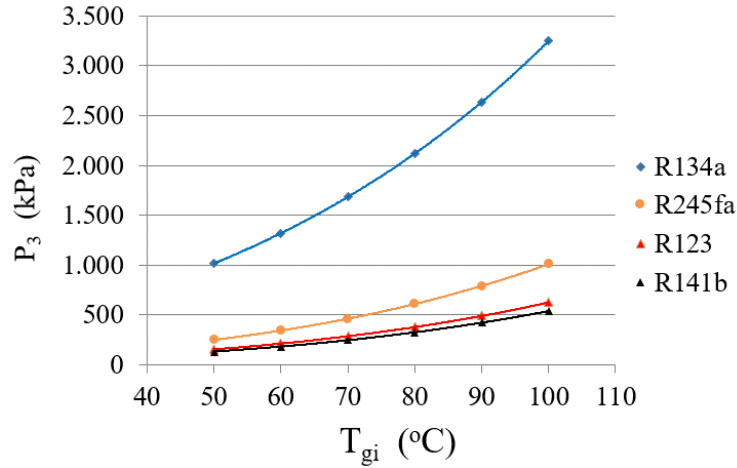
$$\eta_{II} = 1 - \frac{I_{top}}{(\dot{E}_{jg} - \dot{E}_{jç})} \quad (27)$$

3. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

3.1 Birinci Yasa Analiz Sonuçları

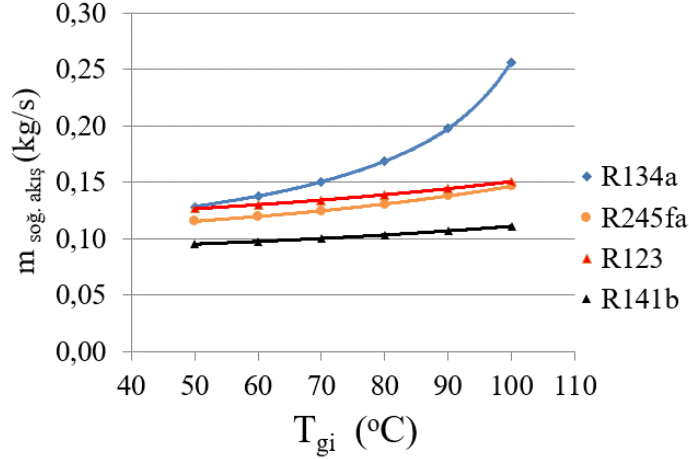
Jeotermal kaynak sıcaklığının 50-100°C arasında değişimine bağlı olarak akışkanların jeneratör giriş basınç değerlerinin değişimi Şekil 2’de görülmektedir. Her bir akışkan için jeotermal kaynak sıcaklığının artışıyla türbin giriş basınç değerleri artmaktadır. Artan kaynak sıcaklığı ile türbin giriş basınç değerlerinin sırasıyla R141b için 133-538 kPa, R123 için 155-625 kPa, R245fa için 249-1040 kPa basınç değerleri aralığında yaklaşık doğrusal, R134a için ise 1017-3247 kPa basınç aralığında üstel olarak arttığı görülmektedir. Soğutucu akışkanların kritik nokta sıcaklıklarına yaklaşıldıkça doyma basınçları da artmaktadır. İncelenen akışkanlar içerisinde kritik nokta sıcaklığı en düşük, dolayısıyla çalışma sıcaklık değerleri kritik noktaya en yakın akışkan R134a’dır. Bu yüzden çalışma basınç değerleri en yüksek akışkanın R134a olduğu belirlenmiştir. Bunun tam tersi durum R141b için geçerlidir. Sistem güvenliği, türbin ve pompa boyutlarının daha küçük tasarlanması, konstrüksiyon ve işletim kolaylığı açısından sistemin düşük basınç aralıklarında çalışmasını sağlayan akışkanın R141b olduğu tespit edilmiştir. Akışkan olarak R134a kullanılması durumunda sistemin oldukça yüksek basınç değerlerinde çalışacağı buna bağlı olarak gerekli pompa büyüklüğünün daha fazla olacağı anlaşılmaktadır.

Birim jeotermal akışkan debisine karşılık farklı akışkanlar için sistemde dolaşan çevrim akışkanı değerlerini artan jeotermal kaynak sıcaklığıyla değişimi Şekil 3’de sunulmuştur. Çevrim akışkanı debi değerleri de jeotermal kaynak sıcaklığının artışıyla artmaktadır. En düşük akışkan debi değerleri R141b için bulunmuştur. R141b için akışkan debisi kaynak sıcaklığının değişimine bağlı olarak 0,095–0,111 kg/s değerleri arasında yaklaşık doğrusal olarak artmıştır. Benzer durum debi değişimi sırasıyla 0,126–0,156 kg/s ve 0,115–0,146 kg/s değerleri arasında R123 ve R245fa için de görülmüştür. R134a için ise, 0,128–0,255 kg/s aralığında üstel olarak artmıştır. En az çevrim akışkanı ihtiyacı R141b, en fazla ise R134a kullanılması durumunda karşımıza çıkmaktadır. Akışkanların çevresel etkileri ve sistem maliyeti dikkate alındığında R141b kullanımının daha avantajlı olacağı düşünülebilir.



Şekil 2:

Jeotermal Kaynak Sıcaklığının Değişimine Bağlı Jeneratör Giriş Basınç Değerleri



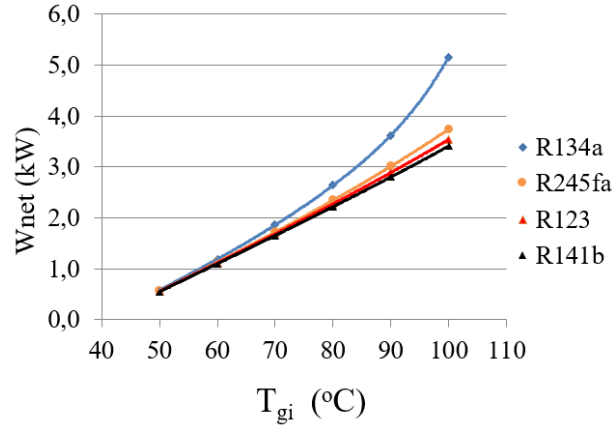
Şekil 3:

Jeotermal Kaynak Sıcaklığının Değişimine Bağlı Çevrim Akışkanı Debi Değerleri

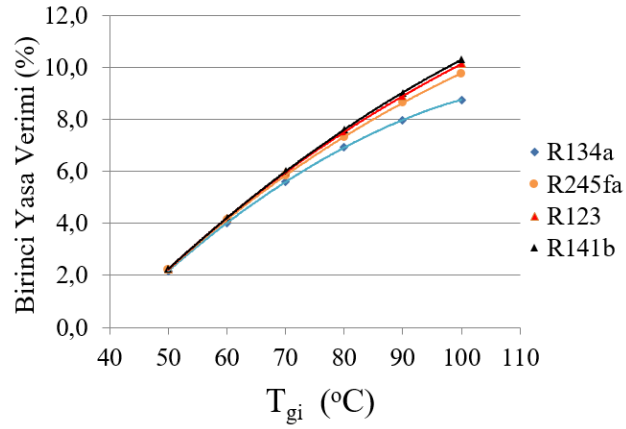
Birim kaynak jeotermal akışkan debisi için kaynak sıcaklığının artışına bağlı olarak farklı akışkanlar için sistemden elde edilen net iş değerleri hesaplanmıştır ve Şekil 4’de sunulmuştur. Tüm akışkanlar için net iş değeri kaynak sıcaklığının artışıyla artmıştır. R141b için net iş değerleri kaynak sıcaklığının artışına bağlı olarak 0,55-3,41 kW, R123 için 0,55-3,53 kW, R245fa için 0,55-3,74 kW aralıklarında yaklaşık doğrusal olarak artmıştır. R134a için ise, 0,57-5,16 kW aralığında üstel olarak artmıştır. R141b, R123 ve R245fa akışkanları için türbin giriş ve çıkış entalpi farklarının daha yüksek olmasına rağmen debi değerlerinin düşük, R134a için ise entalpi farkının düşük, bununla birlikte debi değerlerinin yüksek olması sonucu ortaya çıkmıştır. Bu da örneğin 100°C kaynak sıcaklığında tasarlanan bir sistemde R141b yerine R134a akışkanının kullanılması durumunda sistemin daha yüksek basınçlarda çalışması ve yüksek soğutma suyu debisi ihtiyacı durumunun dezavantajı göz ardı edilirse birim kaynak suyu debisi için yaklaşık sistemden %50 daha fazla net iş elde edilebileceği anlamına gelmektedir.

ORÇ’nin birinci yasa verim değerlerinin artan jeotermal kaynak sıcaklığına göre değişimi Şekil 5’de sunulmuştur. Her bir akışkan için birinci yasa verimi jeotermal kaynak sıcaklığının artışıyla artmıştır. Birinci yasa verimi, sistem içinde dolaşan çevrim akışkanı debisinden bağımsızdır ve iş akışkanının türbin ve jeneratör giriş ve çıkış şartları arasındaki entalpi farklarının oranı ile değişmektedir. Farklı akışkanlar için söz konusu cihazlarda giriş ve çıkış entalpi farkları jeotermal akışkan sıcaklığının azalması ile birbirine yaklaşmaktadır. Dolayısıyla birinci yasa verimi 50°C jeotermal kaynak sıcaklığında bütün akışkanlar için % 2,5 olarak başlamıştır. Jeotermal sıcaklık artışı ile entalpi farkları da farklı oranlarda artmıştır. ve birinci yasa verimi 100°C kaynak sıcaklığında R141b, R123 R245fa ve R134a için sırasıyla maksimum % 10,3, % 10,1, % 9,7 ve % 8,7 değerlerine ulaşmıştır. Birinci yasa veriminin sıcaklığa bağlı artış seyri en yüksek R141b, en az R134a akışkanı için gözlenmiştir.

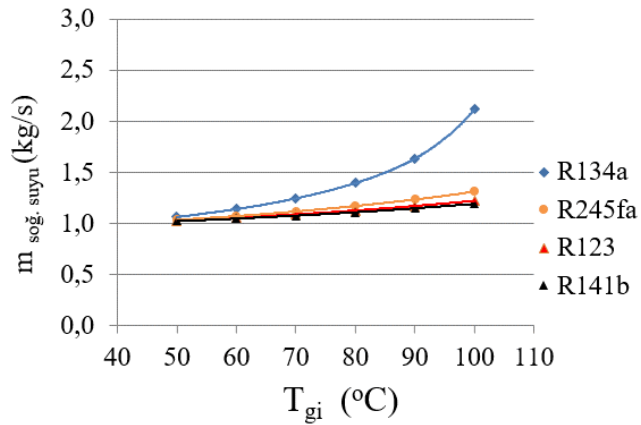
ORÇ için göz ardı edilmeyecek en önemli parametrelerden birisi de sistemin ihtiyacı olan soğutma suyu debisidir. Birim jeotermal akışkan için sistemin ihtiyacı olan soğutma suyu debi değerleri artan kaynak sıcaklığına bağlı olarak farklı akışkanlar için Şekil 6’da sunulmuştur. Soğutma suyu debi değerleri R141b, R123 ve R245fa akışkanları için artan sıcaklıkla doğrusal artarken, R134a için bu artış üstel olarak ortaya çıkmaktadır. Bunun sebebi çevrimde dolaşan çevrim akışkanının debi değerinin R134a için diğer akışkanlara göre sıcaklıkla üstel artması, yoğunlaştırıcada çevreye atılması gereken ısı değerinin daha fazla olması ve dolayısıyla daha fazla soğutma suyuna ihtiyaç duyulmasıdır. Çevrim akışkanının debi değerlerinin R141b, R123 ve R245fa için artan jeotermal kaynak sıcaklığına bağlı olarak sırasıyla 1,02–1,19 kg/s, 1,02–1,22 kg/s ve 1,03–1,31 kg/s değerleri aralığında doğrusal olarak arttığı belirlenmiştir. R134a için ise bu artış 1,06–2,11 kg/s aralığında üstel olmuştur.



Şekil 4:
Jeotermal Kaynak Sıcaklığının Değişimine Bağlı Net İş Değerleri



Şekil 5:
Jeotermal Kaynak Sıcaklığının Değişimine Bağlı Birinci Yasa Verimi Değerleri

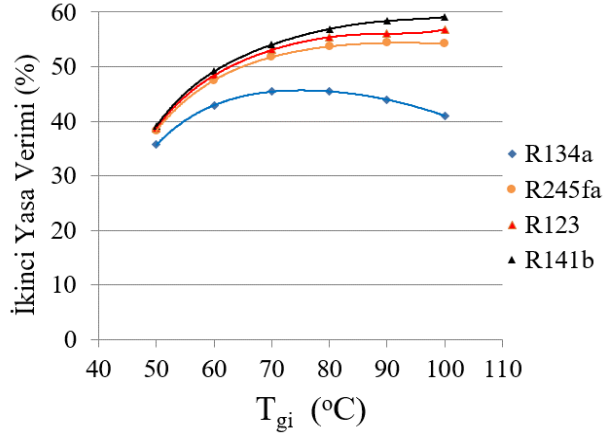


Şekil 6:
Jeotermal Kaynak Sıcaklığının Değişimine Bağlı Soğutma Suyu Debi Değerleri

3.2 İkinci Yasa Analiz Sonuçları

ORÇ sisteminin ikinci yasa analizini yapmak amacıyla sistemi oluşturan her bir elemanın giren ve çıkan ekserji değerlerini, ekserji yıkımı miktarlarını ve yüzdelerini hesaplamak için Tablo 2’de sunulmuş olan denklemler kullanılmıştır. Sistemin ikinci yasa verimi de ayrıca hesaplanmıştır.

Sistemin ikinci yasa veriminin farklı akışkanlar için artan jeotermal kaynak sıcaklığına göre değişimi Şekil 7’de sunulmuştur. İkinci yasa veriminin incelenen jeotermal kaynak sıcaklığı aralığında en yüksek akışkanın % 39,1-59,1 üstel bir artışla seyreden R14b olduğu tespit edilmiştir. Benzer artış seyri sırasıyla % 38,8-56,8 ve % 38,3-54,2 değerleri aralığında R123 ve R245fa akışkanları için de görülmüştür. R134a akışkanının ikinci yasa veriminin ise 50-80°C jeotermal kaynak sıcaklığı aralığında 35,7% ile başlayıp maksimum % 45,4’e kadar üstel olarak arttığı, 80°C’den sonra %40,1 değerine kadar üstel olarak azaldığı görülmüştür. Sistemdeki cihazlara giren ve çıkan ekserji değerleri ve ekserji yıkımları akışkan debilerine, entalpiye ve entropiye bağlıdır. Jeneratöre giren ve çıkan akışkanların ekserji değerleri için etkin olan debi hem jeotermal akışkan hem de soğutucu akışkan debisidir. Türbin pompa ve yoğunlaştırucuda ise yalnızca soğutucu akışkan debisidir. Sistemde dolaşan soğutucu akışkan debisi jeotermal sıcaklığın artışı ile R134a için üstel olarak artmaktadır. Yüksek sıcaklıklarda özellikle türbin pompa ve yoğunlaştırucuda meydana gelen ekserji yıkımları R134a için debiye bağlı olarak diğer akışkanlara göre daha fazladır. Bu yüzden R134a için ekserji verimi diğer akışkanlara göre daha düşük seyretmiş, jeotermal sıcaklığın 80°’nin üzerindeki sıcaklıklarda ise azalma eğilimi göstermiştir.



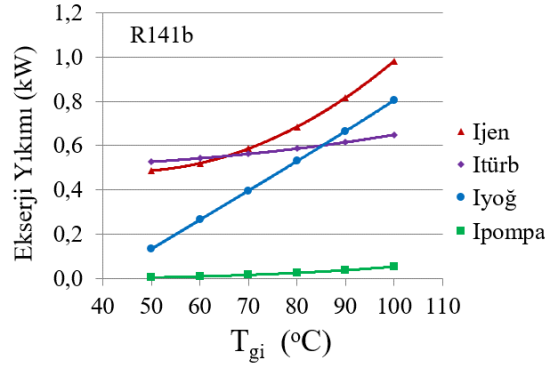
Şekil 7:

Jeotermal Kaynak Sıcaklığının Değişimine Bağlı İkinci Yasa Verimi Değerleri

Sistemi oluşturan her bir eleman için ekserji yıkım miktarları ve yüzdeleri, artan jeotermal kaynak sıcaklığına bağlı olarak R141b akışkanı için Şekil 8 ve Şekil 9’da sunulmuştur. Diğer akışkanlar için de farklı sayısal değerlerde benzer eğrilerin elde edilmesi neticesinde sistem elemanlarında meydana gelen ekserji yıkımı ve yüzdeleri ikinci yasa verimi en yüksek olarak hesap edilen R141b akışkanı üzerinden değerlendirilmiştir. Sistemi oluşturan elemanlar arasında 50-85°C’ jeotermal kaynak sıcaklığı aralığında en fazla ekserji yıkımı jeneratörde görülmüştür. Bunu sırasıyla yoğunlaştırucu, türbin ve pompa izlemiştir. 85°C’nin üstü sıcaklıklarda türbindeki ekserji yıkımı yoğunlaştırucunun önüne geçmiştir. Genel olarak ekserji yıkım miktarları tüm sistem elemanları için sıcaklık artışıyla artmıştır. Her bir elemanın sıcaklık artışına ekserji yıkımı ile gösterdiği tepki farklı olmuştur. Sistem elemanlarındaki ekserji yıkım yüzdeleri ekserji yıkım miktarlarının artan sıcaklıkla nispeten daha az ya da daha fazla olmasına bağlı olarak her bir eleman için değişik bir seyir izlemiştir.

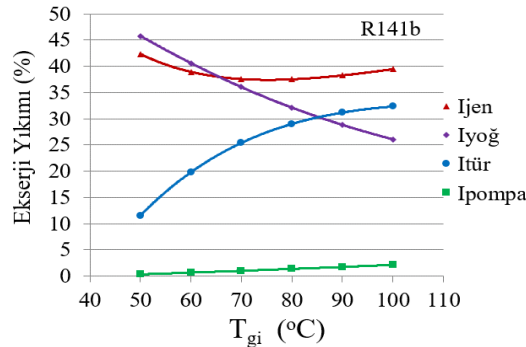
Jeneratördeki ekserji yıkım miktarı 0,48-0,98 kW aralığında jeotermal kaynak sıcaklığının artmasıyla transfer edilen ısı miktarının artışıyla üstel olarak artmıştır. Ekserji kayıp yüzdesi ise 50°C için %42,3 ile başlamış, 80°C’ de minimum %37,5’ e düşmüş, 100°C’ de %39,5’ e yükselmiştir. Ekserji yıkımının en çok olduğu ikinci sistem elemanı olan yoğuşturucuda ekserji yıkımı miktarı 50-100°C’ aralığında artan jeotermal kaynak sıcaklığı ile jeneratördekine benzer şekilde transfer edilen ısı miktarının artmasına bağlı olarak 0,52-0,64 kW aralığında yaklaşık doğrusal olarak artmıştır. Ekserji kayıp yüzdesi ise sıcaklık artışıyla %45,8 ile başlamış azalarak en son %26,1’e gerilemiştir. Türbindeki ekserji yıkım miktarı jeotermal kaynak sıcaklığının artmasıyla 0,13-0,80 kW değerleri aralığında yaklaşık doğrusal olarak artmıştır. Ekserji yıkım yüzdeleri ise 11,6-32,3% aralığında üstel olarak artmıştır. Sistemdeki en düşük ekserji yıkım değerleri ve yüzdeleri pompada görülmüştür. Ekserji yıkım değerleri jeotermal kaynak sıcaklığının artmasıyla 0,01-0,04 kW, ekserji yıkım yüzdeleri 0,3-2,1% aralığında doğrusal olarak artmıştır.

Ekserji yıkım yüzdelerinin değişen jeotermal kaynak sıcaklıkları için her bir sistem elemanı için farklılık göstermesinin neticesinde kaynak sıcaklığına bağlı olarak sistem kayıpları açısından odaklanması gereken sistem elemanının da değişmesi anlamına gelmektedir. Örneğin 50°C kaynak sıcaklığında kurulacak bir sistemde yoğuşturucu ve jeneratörün ekserji yıkım yüzdesinin fazla çıkması sonucu odaklanması gereken öncelikli sistem elemanlarının bu ikisi olması gerektiği anlamına gelmektedir. 100°C kaynak sıcaklığında ise jeneratörün ardında türbine odaklanmanın gerekliliği daha sonra yoğuşturucunun önem kazandığı anlaşılmaktadır (Şekil 9).



Şekil 8:

Jeotermal Kaynak Sıcaklığının Değişimine Bağlı Sistem Elemanlarının Ekserji Yıkım Değerleri



Şekil 9:

Jeotermal Kaynak Sıcaklığının Değişimine Bağlı Sistem Elemanlarının Ekserji Yıkım Yüzde Değerleri

4. SONUÇ VE ÖNERİLER

Ülkemizde yoğun olarak mevcut olan düşük sıcaklıktaki jeotermal kaynaklar için 50-100°C sıcaklık kurulabilecek ORÇ sisteminin performansı R141b, R123, R245fa ve R134a akışkanları için araştırılmıştır. Araştırma çerçevesinde sistemin birinci ve ikinci yasa verimleri, birim jeotermal akışkan debisi için üretilebilecek net iş ve ORÇ sistemini oluşturan her bir cihaz için ekserji yıkım miktarları ve yüzdeleri belirlenmiştir. Söz konusu sıcaklık aralığında kurulacak bir sistem için en yüksek birinci ve ikinci yasa verimleri sırasıyla % 2,5-10,3 ve % 39,1-59,1 değerleri aralığında R141b akışkanı için elde edilmiştir. En fazla net iş değeri 0,57-5,16 kW aralığında çevrim akışkan debisinin etkisi ile R134a akışkan için hesaplanmıştır. Her bir sistem elemanı için ekserji yıkım miktarları ve yüzde değerleri belirlenmiştir. Sistemi oluşturan her bir eleman için ekserji yıkımı artan sıcaklıkla artmış olduğu görülmüştür Ekserji yıkımı değerleri R141 b akışkanı için araştırılmıştır. En fazla ekserji yıkımı artan jeotermal sıcaklık ile 0,48-0,98 kW aralığında jeneratörde görülmüştür. Bunu sırasıyla 0,52-0,64 kW ile yoğunlaştırıcı, 0,13-0,80 kW ile türbin ve 0,01-0,04 kW ile pompa izlemiştir. Kurulacak bir sistemde R134a akışkanını kullanılması durumunda ise elde edilecek net iş miktarının en fazla olması ile birlikte sistemin 1017-3247 kPa aralığında yüksek basınçlarda çalışması, gerekli çevrim akışkanının miktarını daha fazla olması, bunlara bağlı olarak gerekli sistem elemanlarının kapasite değerlerinin yüksek olması sistemin maliyeti ve güvenliği açısından bir dezavantaj oluşturmaktadır. R141b akışkanının kullanılması durumunda bahsedilen dezavantajlar görülmeyecektir. Sistem tasarımında en fazla ekserji yıkımının görülen jeneratör ve yoğunlaştırıcunun seçimine ve iyileştirilmesine dikkat edilmelidir. Kurulacak bir sistemde jeotermal kaynak sıcaklığı ile gerekli jeotermal kaynak debisi arasında ters bir orantının olduğu anlaşılmaktadır. Dolayısıyla kaynak sıcaklığının artışına bağlı olarak ihtiyaç duyulacak jeotermal kaynak debisinin azalacağı ve sistemlerin uygulanabilirliğinin artacağı anlaşılmaktadır.

KAYNAKLAR

1. Algieri, A. ve Sebo, J. (2017) Energetic Investigation of Organic Rankine Cycles (ORÇs) for the Exploitation of Low-Temperature Geothermal Sources – A possible application in Slovakia, *Procedia Computer Science* , 109, 833–840. doi 10.1016/j.procs.2017.05.348.
2. Astolfi M., Romano M.C., Bombarda P.ve Macchi E. (2014) Binary ORC (Organic Rankine Cycles) power plants for the exploitation of mediumlow temperature geothermal sources e Part A: Thermodynamic optimization, *Energy*, 66, 423-434. doi.org/10.1016/j.energy.
3. Baral, S., Kim, D., Yun, E. ve Chun K. (2015) Energy, Exergy and Performance Analysis of Small-Scale Organic Rankine Cycle Systems for Electrical Power Generation Applicable in Rural Areas of Developing Countries, *Energies*, 8, 684-713. doi:10.3390/en8020684
4. Bianchi, M., Branchini, L., De Pascale, A., Melino, F., Ottaviano, S., Torricelli, N. ve Zampieri, G. (2018) Performance and operation of micro-ORC energy system using geothermal heat source, *Energy Procedia*, 148, 384-391. doi:10.1016/j.egypro.2018.08.099.
5. Cihan E., Kavasogulları B. (2016) Energy And Exergy Analysis of a Combined Refrigeration and Waste Heat Driven Organic Rankine Cycle System, *Thermal Science*, 21, 2621-2631. doi: 10.2298/TSCI150324002C
6. Etemoğlu, A. B., Şişman, M.K. ve Can, M. (2006) Bursa ve Çevresinde Jeotermal Enerjinin Kullanılabilirliğinin İncelenmesi, *Uludağ Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 11, 1,55-64. doi: 10.17482/uujfe.61946

7. Heberle, F. ve Dieter Brüggemann, D. (2010) Exergy based fluid selection for a geothermal Organic Rankine Cycle for combined heat and power generation, *Applied Thermal Engineering*, 30, 1326-1332. doi:10.1016/j.applthermaleng.2010.02.012
8. Hettiarachchia H.D., Golubovica, M., Woreka W.M. ve Ikegamib Y. (2007) Optimum design criteria for an Organic Rankine cycle using low-temperature geothermal heat sources, *Energy*, 32, 1698–1706. doi:10.1016/j.energy.2007.01.005
9. <https://ORC-world-map.org> Erişim Tarihi: 29.03.2019, Konu: *Dünya’da kurulu ORÇ sistemlerinin harita üzerinde gösterilmesi.*
10. Karimi S., Mansouri S. (2018) A comparative profitability study of geothermal electricity production in developed and developing countries: Exergoeconomic analysis and optimization of different ORC configurations *Renewable Energy*, 115, 600-619, doi.org/10.1016/j.renene.
11. Kaşka Ö.,(2014) Energy and exergy analysis of an organic Rankine for power generation from waste heat recovery in steel industry, *Energy Conversion and Management*, 77, 108-117. doi: 10.1016/j.enconman.2013.09.026
12. Kılıç F. (2016) Geothermal Energy in Turkey, *Energy & Environment*, 27, 360-376. doi 10.1177/0958305x15627544
13. Li, J., Pei, G., , Li, Y., Wang D. ve Ji, J. (2012) Energetic and exergetic investigation of an organic Rankine cycle at different heat source temperatures, *Energy*, 38, 85-95. doi: 10.1016/j.energy.2011.12.032
14. Shengjun, Z., Huaixin, W. ve Tao, G. (2011) Performance comparison and parametric optimization of subcritical Organic Rankine Cycle (ORC) and transcritical power cycle system for low-temperature geothermal power generation, *Applied Energy*, 88, 2740–2754. doi:10.1016/j.apenergy.2011.02.034
15. Tchanche, B.F., Lambrinos, Gr., Frangoudakis , A. ve Papadakis, G. (2010) Exergy analysis of micro-organic Rankine power cycles for a small scale solar driven reverse osmosis desalination system, *Applied Energy*, 87, 1295–1306. doi:10.1016/j.apenergy.2009.07.011.

