

KONYA İLİ ATMOSFERİK ŞARTLARINDA GÜNEŞ ENERJİSİ DESTEKLİ JEOTERMAL KAYNAKLI ORGANİK RANKİNE ÇEVİRİMİ SİSTEMİNİN TERMODİNAMİK ANALİZİ

Fatih AKKURT *^{id}
Emre KAÇANOĞLU **^{id}

Alınma: 15.03.2021; düzeltme: 11.08.2021; kabul: 12.08.2021

Öz: Bu çalışmada Konya ili atmosferik şartlarında güneş enerjisi destekli jeotermal kaynaklı Organik Rankine Çevrimi (ORÇ) sisteminin termodinamik analizi yapılmıştır. Sistemde iş akışkanı olarak R141b seçilmiştir. Jeotermal enerji kaynağı 50°C olarak belirlenmiştir. Sistem gündüz şartlarında güneş enerjisi ile desteklenmektedir. Birim jeotermal akışkan debisi ($m_j=1\text{kg/sn}$) için sistemin elektrik üretimi, enerji ve ekserji verimleri saatlik, aylık ve yıllık periyotlar için belirlenmiştir. Sistem elemanlarının ekserji yıkım değerleri ve yüzdeleri yıllık verilere göre belirlenmiştir. Sistemden birim jeotermal akışkan debisi için yıllık elektrik üretimi 3711 kWh olarak hesaplanmıştır. Güneş enerjisi ve jeotermal enerjinin yıllık elektrik üretimine katkısı sırasıyla %5,3 ve %94,7 olarak belirlenmiştir. Sistemin enerji verimi saatlik, aylık ve yıllık periyotlar için %4,3 olarak belirlenmiştir. Sistemin yıllık ekserji verimi %6,1 olarak belirlenmiştir. Sistemin yıllık ekserji yıkım oranları güneş kolektörlerinde %60,2, kondenserde %16,3 evaporatörde %13,1, türbinde %11,3, ısı değiştiricide %0,6 ve çevrim pompasında %0,3 olarak elde edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: ORÇ, enerji üretimi, enerji ve ekserji analizi

Thermodynamic Analysis of Solar Assisted Geothermal Organic Rankine Cycle System in Atmospheric Conditions of Konya Province

Abstract: In this study, the thermodynamic analysis of the solar energy assisted geothermal Organic Rankine Cycle (ORC) system was made under the atmospheric conditions of Konya. R141b was considered as the work fluid in the system. The geothermal energy source is determined as 50°C. The system was supported by solar energy in daytime conditions. The energy production, first law and exergy efficiency of the system for unit geothermal fluid flow rate ($m_j=1\text{kg/sec}$) were determined for hourly, monthly and annual periods. Exergy destruction values and percentages of the system elements were determined for the annual period. Annual electricity production was obtained 3711 kWh for unit geothermal fluid flow rate. The contribution of solar energy and geothermal energy to annual electricity generation has been determined as 5.3% and 94.7%, respectively. The first law efficiency of the system has been determined as 4.3% for daily, monthly and annual periods. The annual exergy efficiency of the system has been determined as 6.1%. The annual exergy destruction rates of the system were obtained as 60.2% in solar collectors, 16.3% in the condenser, 13.1% in the evaporator, 11.3% in the turbine, 0.6% in the heat exchanger and 0.3% in the cycle pump.

Keywords: ORC, energy production, energy and exergy analysis

* Necmettin Erbakan Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Enerji Sistemleri Mühendisliği, 42140 Konya, Türkiye

** AKDAŞ Makina Silah Sanayi Ltd., Beyşehir, Konya, Türkiye

İletişim Yazarı: Fatih Akkurt (fakkurt@erbakan.edu.tr)

1. GİRİŞ

Jeotermal enerji dünyada azalan konvensiyonel enerji kaynaklarına alternatif olabilecek yenilenebilir enerji kaynaklarından birisidir. Türkiye dünya ülkeleri arasında, jeotermal enerji kapasitesi olarak 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 üzerindedir (Kılıç, 2016). Elektrik üretimi için kullanılan jeotermal santraller temelde flaşlı ve ikili olmak üzere iki farklı tiptedir. Jeotermal enerji kaynakları arasında yüksek sıcaklıktaki kaynaklar (> 220°C) flaşlı sistemler için, orta ve düşük sıcaklıklı jeotermal enerji kaynakları için ikili sistemler uygundur (Shengjun ve diğ., 2011).

ORÇ, orta ve düşük sıcaklıkta enerji kaynakları kullanılarak elektrik üretimi yapılabilen termodinamik bir çevrimdir. Lakin düşük sıcaklıktaki kaynaklar için ORÇ sistem verimliliğin çok düşüktür (Tchanché ve diğ., 2009). Türkiye'de toplam 32 adet kurulu jeotermal kaynaklı ORÇ tesisi bulunmaktadır (Anonim, 2020).

Ekserji analizi termodinamiğin birinci ve ikinci yasalarının birleşimi olarak sistemlerin performansını değerlendirmek için etkin bir yöntemdir. Enerji analizi enerjinin niceliği konusunda bilgi verse de niteliği konusunda yetersizdir. Ekserji analiz sonuçları sistem elemanlarında meydana gelen önemli tersinmezlikleri ve sistem elemanların performans düzeylerini hakkında bilgi verir. Ekserji analizi ile sistemlerin mükemmelle ne kadar yaklaştığının bir ölçüsü olan ikinci yasa verimi başka bir deyişle ekserji verimi hesaplanır.

Isı kaynağı olarak sadece jeotermal enerjinin kullanıldığı ORÇ sistemlerini içeren pek çok araştırma yapılmıştır (Bianchi ve diğ., 2018; Algieri ve Sebo, 2017; Akkurt, 2020). Akkurt (2020) yapmış olduğu çalışmada 50-100°C sıcak aralığında jeotermal kaynaklar için ORÇ sisteminin performansını araştırmıştır. R141b, R123, R245fa ve R134a akışkanları arasında en yüksek birinci ve ikinci yasa verimleri R141b akışkanı için elde edilmiştir. Bu tip çalışmaların yanı sıra sistem performansını artırmak amacıyla jeotermal enerjinin diğer enerji kaynaklarla desteklediği hibrit sistemler düşünülmüştür. Jeotermal enerjinin güneş enerjisi ile desteklediği çalışmalar arasında Lentz ve Almanza (2005) Kuzey batı Meksika' da jeotermal kaynaklı güç sistemine Parabolik Oluklu Güneş Enerji Kolektörlerin (POK) ilavesini araştırmışlardır. Çalışmada, güneş kolektörlerinin ilavesi ile entalpi artışına bağlı olarak buhar akışında %10' luk bir artış ve scaling problemini azaltmak ya da yok etmek amaçlanmıştır. Cardemil ve diğ. (2016) Kuzey Şili' de PTC sistemiyle desteklenen jeotermal kaynaklı tek ve çift flaşlı güç sisteminin performansını araştırmışlardır. Araştırma sonuçlarına göre güneş enerjisi desteği ile tek flaşlı sistemde kaynak özelliklerine bağlı olarak yaklaşık %20 ilave elektrik üretimine ulaşılabileceği belirtilmiştir. Sisteme güneş enerjisi ilavesi ile jeotermal kaynak kullanımının tek flaşlı sistemde %16, çift flaşlı sistemde %19 azalacağı hesaplanmıştır. Mir ve diğ. (2011) jeotermal kaynakları korumak amacıyla PTC ilave edilmiş tek flaşlı bir jeotermal santralin enerji üretimini araştırmışlardır. Güneş enerjisi desteği ile elektrik üretiminin %11,6' ya kadar arttırılabileceği ve jeotermal kaynağın kullanımında %10,3' e varan tasarruflar elde edileceği belirtilmiştir. Tempesti ve diğ. (2012) düşük sıcaklıkta (80–100°C) jeotermal enerji kaynağını ve güneş enerjisini kullanarak mikro ölçekli (50 kWe) ORC ısı güç santralinin performansını R134a, R236fa ve R245fa akışkanları için araştırmışlardır. Araştırmalarının sonucu olarak ısı ve ekserji verimliliği en yüksek akışkanın R245fa olduğu anlaşılmıştır. Zhou (2014) iş akışkanı olarak iso-pentanin, kolektör olarak PTC kullanılan güneş enerjisi ve jeotermal enerji kaynaklı hibrit ORC sisteminin performansını Avusturalya iklim şartlarına araştırmıştır. Sistem performansı hibrit, sadece güneş enerjisi ve sadece jeotermal çalışma şartları için karşılaştırılmıştır. Araştırma sonucuna göre kritik üstü şartlarda çalışan sistemin aynı jeotermal kaynakla kritik altı çalışması durumuna göre %4-17 daha fazla elektrik ürettiği belirlenmiştir. Astolfi ve diğ. (2010) POK ilave edilerek güneş enerjisinin kullanıldığı ORÇ sisteminin teknik ve ekonomik analizini gerçekleştirmişlerdir. Dört farklı yerleşim yeri (İmperial, San Diago, Palermo, Pisa) için hibrit sistemin bir yıllık üretim simülasyonu gerçekleştirilmiştir. Çakıcı ve diğ. (2017) PTC sisteminin ilave edildiği kritik üstü

şartlarda çalışan jeotermal kaynaklı ORÇ'nin performansını için araştırmışlardır. Araştırmada POK sisteminin ilavesinin elektrik üretim potansiyelinin artmasına, elektrik ve ekserji verimlerinin azalmasına neden olduğu belirtilmiştir. Atiz ve diğ. (2019) Vakum tüp kolektör (VTK) sistemi ile jeotermal kaynak suyunun ısıtılması yöntemi ile çalışan ORÇ sisteminin enerji, ekserji elektrik üretim performansı n-heksan, n-propan ve n-bütan akışkanları için araştırmışlardır. Kula (63°C), Saraycık (74°C) ve Turgutlu (86°C) yerleşimleri arasında en yüksek enerji ve ekserji verimleri sırasıyla n-butane akışkanıyla %6,9 ve %21,1 olarak Turgutlu'da elde edilmiştir.

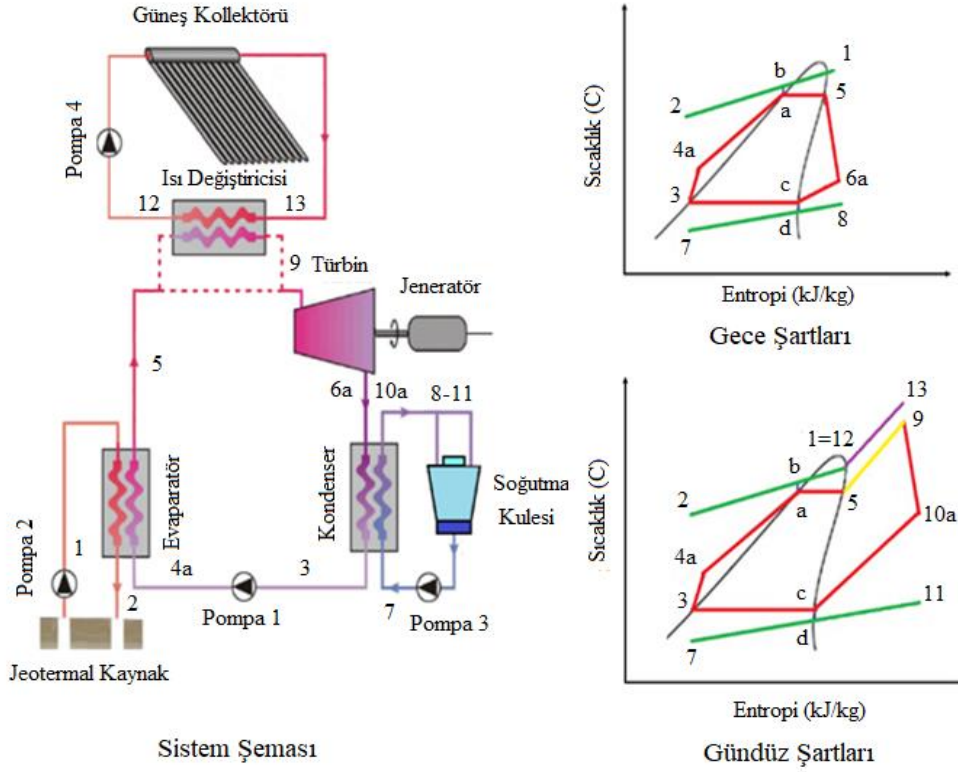
Genellikle düşük sıcaklıktaki jeotermal kaynaklar ısıtma ve kaplıca amaçlı kullanılmaktadır. Düşük veriminden dolayı ORÇ sistemi düşük sıcaklıktaki jeotermal kaynaklar için tercih edilmemektedir. Sıcaklığı düşük lakin yeterli debide jeotermal kaynakları için yakın çevrelerinde buluna bina ve konutların ihtiyacını karşılayacak kapasitede ORÇ sistemi kurmak mümkün olabilir. Bu çalışmada genellikle düşük sıcaklıkta jeotermal kaynaklara sahip Konya ili çevresinde 50°C jeotermal sıcaklığa sahip bir kaynağın güneş enerjisiyle desteklenmesi durumunda birim debide üretilebilecek elektrik enerjisi miktarı, sistemin enerji ve ekserji verimi hesaplanmıştır (Anonim, 2020). Sistemde sadece jeotermal enerji kaynağı kullanıldığı varsayımıyla yapılan önceki çalışma sonuçlarına göre enerji ve ekserji verimi en fazla olan izentropik bir soğutucu akışkan olan R141b akışkanı hibrit sistem için de çevrim akışkanı olarak belirlenmiştir. Aynı jeotermal sıcaklık için sahada kurulacak sistemler için sistem elemanlarının kapasiteleri ve elektrik üretim miktarları mevcut çalışma verilerinin kurulacak sistemin jeotermal kaynak debisi ile çarpımı ile belirlenebilecektir. Bu çalışma Konya çevresinde benzer sıcaklıkta, mevcut haliyle kaplıca, sera ısıtması gibi amaçlarla değerlendirilen jeotermal kaynaklarda ORÇ sisteminin kurulabilmesi için bir yol gösterici olarak yapılmıştır. Hesaplamalarda Konya ilinde 37⁰ eğimle kolektör yüzeyine gelen güneş radyasyonu değerleri, EU Science Hub: Avrupa Komisyonu'nun bilim ve bilgi servisi verilerine göre hesaplanmıştır (Anonim, 2020).

2. METODOLOJİ

2.1. Sistem Tanımlaması

Güneş enerjisi destekli jeotermal kaynaklı ORÇ sisteminin şeması ve çevrimin gece ve gündüz çalışma şartlarına ait sıcaklık entropi diyagramı Şekil 1'de görülmektedir Sistem evaporatör, türbin-jeneratör, kondenser-soğutma kulesi, ısı değiştiricisi-kolektör ve sirkülasyon pompalarından oluşmaktadır. Sistemin çalışması gece şartlarında sadece jeotermal enerjiye, gündüz ise hem jeotermal hem de güneş enerjisine bağlı olarak gerçekleşmektedir. Sistemin gece şartlarında çalışma prensibi kısaca şu şekildedir: Jeotermal akışkan evaporatöre girmekte, ısını ORÇ iş akışkanına aktararak evaporatörden çıkmaktadır. Bu arada ORÇ'de dolaşan iş akışkanı evaporatöre girmekte ve doymuş buhar olarak türbine girmek üzere çıkmaktadır. Türbine doymuş buhar olarak giren iş akışkanı türbinde iş üretildikten sonra, türbinden çıkmaktadır. Yoğusturucuda soğutma suyu ile yoğuşan iş akışkanı doymuş sıvı olarak yoğusturucudan çıkmakta ve pompa ile jeneratöre gönderilmektedir.

Gündüz çalışma şartlarında iş akışkanı evaporatör sonrasında güneş ışınımına duyarlı otomatik kontrollü vana ile ısı değiştiricisine yönlendirilmektedir. Çevrim akışkanı, güneş enerjisinden sağlanan ilave ısı ile türbine kızgın buhar olarak girmektedir. Türbinden çıkan iş akışkanı kondenserde ısını attıktan sonra pompada basıncı yükselerek evaporatöre giriş yapmaktadır. Soğutma kulesinden kondensere gelen soğutma suyu kondenserde iş akışkanından aldığı ısı ile soğutma kulesine geri dönmektedir. Gündüz türbinden elde edilen iş ve aynı zamanda kondenserde atılması gereken ısı miktarı sürekli değişmektedir. Kondensere daima sabit sıcaklıkta giren soğutma suyunun soğutma kulesine taşıdığı değişken ısı, orantılı integral türev (PID) otomatik kontrol sistemiyle soğutma kulesindeki hava debisinin değişimiyle dengelenmekte ve çevreye atılmaktadır.



Şekil 1:

ORÇ sisteminin şeması ve gece ve gündüz çalışma şartları sıcaklık entropi diyagramları

2.2. Tasarım Parametreleri

Sistem tasarımında iş akışkanı, soğutma suyu, kolektör akışkanı debisi değerleri ile evaporatör, kondenser, ısı değiştiricisi, pompa kapasiteleri ve kolektör alanı birim jeotermal akışkan debisi ($m_j=1\text{kg/s}$) için belirlenmiştir.

Evaporatör, kondenser ve pompa kapasiteleri ve iş akışkanı, soğutma suyu debi değerleri sistemin sadece jeotermal kaynakla çalıştırıldığı gece şartları esas alınarak hesaplanmıştır. İş akışkanı ve soğutma suyu debi değerleri sırasıyla iş akışkanının evaporatörde jeotermal akışkan ve kondenserde soğutma suyu ile olan ısı transferine bağlı olarak 1-2 denklemleri ile hesaplanmıştır. Soğutma suyunun kondensere giriş sıcaklığı daima 20°C kabul edilmiştir. Evaporatörde ve kondenserde akışkanlar arasındaki sıcaklık farkı 'pinch point' yaklaşımı ile 3°C , evaporatörde iş akışkanının evaporatöre girişi ve jeotermal akışkanın evaporatöre girişi arasındaki sıcaklık farkı ve kondenserde iş akışkanının kondenserden çıkışı ve iş akışkanının kondensere girişi arasındaki sıcaklık farkları 5°C olarak kabul edilmiştir. İş akışkanı debisinin belirlenmesi sonucu evaporatör, kondenser ve pompa kapasiteleri de gece şartlarına göre 3-5 denklemleri ile hesaplanmıştır.

Sistemde türbin ve ısı değiştiricisi kapasiteleri, kolektör akışkanı debisi ve kolektör alanı değerleri yıl içinde maksimum çalışma şartları olan Ağustos ayı saat 12'de 1 kW/m^2 ve 30°C olarak belirlenen güneş ışınımının ve çevre sıcaklığının maksimum şartlarda, iş akışkanının türbine 120°C ' de girmesi esas alınarak belirlenmiştir. Kolektör akışkanı debisi, ısı değiştiricisinde iş akışkanının ve kolektör arasında ısı transferine göre 6 denklemi ile hesaplanmıştır. Akışkanların kolektöre ve türbine giriş sıcaklığı arasındaki sıcaklık farkı 5°C kabul edilmiştir. Kolektör alanının belirlenmesi amacıyla maksimum çalışma şartları için kolektör verimi 7 denklemi belirlenmiştir (Pridasawas ve Lundqvist, 2006). Sonrasında sistem için gerekli

güneş enerjisi miktarı ve aynı zamanda ısı eşanjör kapasitesi ve kolektör alanı sırasıyla Eşitlik 8-9 denklemleri hesaplanmıştır. Maksimum çalışma şartlarında sistemde birim jeotermal akışkan için üretilen maksimum güç değeri 10 denklemi ile hesaplanmıştır.

$$\dot{m}_r * (h_5 - h_a) = \dot{m}_g * (h_1 - h_b) \quad (1)$$

$$\dot{m}_{ss} * (h_d - h_7) = \dot{m}_r * (h_c - h_3) \quad (2)$$

$$\dot{Q}_{eva} = \dot{m}_r * (h_5 - h_{4a}) \quad (3)$$

$$\dot{Q}_{kond} = \dot{m}_r * (h_{6a} - h_3) \quad (4)$$

$$\dot{W}_{p1} = \dot{m}_r * (h_{4a} - h_3) \quad (5)$$

$$\dot{m}_{güneş} * (h_{13} - h_{12}) = \dot{m}_r * (h_9 - h_5) \quad (6)$$

$$\eta_{kollmax} = 0,8 - 1,5 * \left(\frac{T_{12} - T_{çevremax}}{I_{max}} \right) \quad (7)$$

$$\dot{Q}_{güneşmax} = Q_{ısı değiştiricisi} = \dot{m}_r * (h_9 - h_5) \quad (8)$$

$$A_{koll} = \dot{Q}_{güneşmax} / (\eta_{kollmax} * I_{max}) \quad (9)$$

$$\dot{W}_{tmax} = \dot{m}_r * (h_9 - h_{10a}) \quad (10)$$

Tasarım kabüllerine göre gece ve maksimum gündüz çalışma şartlarındaki düğüm noktaları sıcaklık değerleri ve birim jeotermal akışkan debisi ($m_j=1\text{kg/s}$) için sistem elemanlarının tasarım değerleri ve sistemde dolaşan akışkanların debileri sırasıyla Tablo 1 ve Tablo 2’de sunulmuştur.

Tablo 1. Sistemin gece ve maksimum gündüz şartlarda düğüm noktası sıcaklıkları

Sistem Düğüm Noktaları	T ₁	T ₂	T ₃	T _{4a}	T ₅	T _{6a}	T ₇	T ₈	T ₉	T _{10a}	T ₁₁	T ₁₂	T ₁₃
Gece Çalışma Şartları (°C)	50	47,8	25	25,7	45	27,8	20	22,1	-	-	-	-	-
Gündüz Maksimum Çalışma Şartları (°C)	50	47,8	25	25,7	45	-	20	-	120	97,9	22,6	50	125

Tablo 2. Birim jeotermal akışkan debisi ($m_j=1\text{kg/s}$) için sistem tasarım değerleri

Sistem Tasarım Parametreleri	Tasarım Çalışma Şartı	Birim	Değer
İş akışkanı debisi (m_r)	Gece	kg/s	0,038
Soğutma suyu debisi (m_{ss})	Gece	kg/s	1,045
Evaporatör kapasitesi (Q_{eva})	Gece	kW	9,26
Kondenser kapasitesi (Q_{kond})	Gece	kW	8,82
ORÇ pompa kapasitesi (W_p)	Gece	kW	0,0028
Kolektör akışkan debisi ($m_{güneş}$)	Gündüz maksimum	kg/s	0,0078
Isı eşanjörü kapasitesi ($Q_{ısı değiştiricisi}$)	Gündüz maksimum	kW	2,48
Kolektör alanı (A_{koll})	Gündüz maksimum	m ²	3,22
Türbin kapasitesi (W_{tmax})	Gündüz maksimum	kW	0,56

2.3. Enerji ve Ekserji Verimleri

Sistemin gece performans değerleri jeotermal kaynak sıcaklığına bağlı olarak değişirken, gündüz performans değerleri ise jeotermal kaynak sıcaklığı ile birlikte gün içinde değişen güneş ışınımı ile değişmektedir. Sistemin saatlik, günlük veya aylık ve yıllık termik verim değerleri söz konusu periyotlarda sistemde üretilen toplam elektrik enerjisinin sisteme giren toplam ısı miktarına oranı olarak 11-13 denklemleri ile hesaplanmıştır.

$$\eta_{\text{saatlik}} = \frac{W_{\text{elk}}}{Q_{\text{giren}}} \quad (11)$$

$$\eta_{\text{aylık}} = \frac{\sum_{h=1}^{h=24} W_{\text{elk}}}{\sum_{h=1}^{h=24} Q_{\text{giren}}} \quad (12)$$

$$\eta_{\text{yillik}} = \frac{\sum_{m=1}^{m=12} W_{\text{elk}}}{\sum_{m=1}^{m=12} Q_{\text{giren}}} \quad (13)$$

Sisteme giren ısı miktarı, evaporatör ısı ile güneş enerjisinden gelen ısının toplamı olarak 14 denklemi ile hesaplanmıştır. Bu değer gece çalışma şartları için sadece evaporatörden gelen ısıya karşılık gelmektedir. Vakum tüp kolektörlerin saatlik verimi ve güneş enerjisi ile sisteme giren saatlik enerji değerleri, sırasıyla 15-16 denklemleri ile belirlenmiştir. Hesaplamalarda saatlik değişen ortalama güneş radyasyonu I ve çevre sıcaklığı T_{amb} değerleri kullanılmıştır.

$$\dot{Q}_{\text{giren}} = \dot{Q}_{\text{eva}} + \dot{Q}_{\text{güneş}} \quad (14)$$

$$\eta_{\text{koll}} = 0,8 - 1,5 * \left(\frac{T_{12} - T_{\text{çevre}}}{I} \right) \quad (15)$$

$$\dot{Q}_{\text{güneş}} = A_{\text{koll}} * I * \eta_{\text{koll}} \quad (16)$$

Gece çalışma şartlarında elde edilen saatlik türbin işi değerleri 17 denklemi ile hesaplanmıştır. Güneş enerjisinin etkin olduğu saatlerde sistemden elde edilen işi hesaplamak için öncelikle günün her saatinde değişen türbin giriş şartları 18 denklemi ile hesaplanmış, sonrasında türbin giriş şartlarına bağlı olarak sistemden güneş enerjisi desteğiyle elde edilen iş 19 denklemi ile belirlenmiştir. Sistemin elektrik üretim gücü 20 denklemi ile hesaplanmıştır. Bu eşitlikte \dot{W}_{elek} hem gece hem de gündüz şartlarındaki saatlik elektrik üretimini, η_{gen} , %90 elektrik jeneratörünün verimini ifade etmektedir.

$$\dot{W}_{\text{tn}} = \dot{m}_r * (h_5 - h_{6a}) \quad (17)$$

$$\dot{Q}_{\text{giren}} = \dot{m}_r * (h_9 - h_{65}) \quad (18)$$

$$\dot{W}_{\text{td}} = \dot{m}_r * (h_9 - h_{10a}) \quad (19)$$

$$\dot{W}_{\text{elk}} = \eta_{\text{gen}} * (\dot{W}_t - \dot{W}_{p1}) \quad (20)$$

Sistemin ekserji verim değerleri saatlik, aylık ve yıllık olarak 21-23 denklemleri ile hesaplanmıştır. Bu verim değerleri söz konusu zaman dilimlerinde sistemin toplam elektrik üretim değerlerinin toplam ekserji girişine oranını ifade etmektedir. Sistem düğüm noktalarına ait ekserji değerleri 24 denklemi ile belirlenmiştir. Denklemden \dot{m}_x akışkan debisi, h ve s düğüm noktalarında ve referans şartlarındaki entalpi ve entropi değerleridir. Ekserji analizi için referans şartları $P_0=100$ kPa ve $T_0= 20^\circ\text{C}$ olarak sabit kabul edilmiştir.

Sisteme giren ekserji değeri, jeotermal akışkanın ekserjisi ile güneş enerjisinin ekserjisinin toplamı olarak 25 denklemi ile hesaplanmıştır. Gece şartlarında sadece jeotermal akışkanın ekserji girişi olurken, gündüz şartlarında ekserji girişi jeotermal ve güneş enerjisinin ekserjilerinin toplamıdır. Gündüz güneş enerjisi ile sisteme giren ekserji 26 denklemi ile belirlenmiştir (Petela, 1964). Bu eşitliklerde A_{koll} kolektör yüzey alanını, I (W/m^2) saatlik ortalama güneş ışınımını $T_{güneş}=6000$ K güneş radyasyonu sıcaklığını, T_0 referans sıcaklığını ifade etmektedir.

Sistem elemanlarındaki ekserji dengesi ile her bir sistem elemanının ekserji yıkımı değerleri 27 denklemi ile belirlenmiştir. Tüm sistem elemanlarının ekserji yıkım değerlerinin toplamı ve her bir sistem elemanının ekserji yıkımındaki etkinlik yüzdesi sırasıyla 28-29 denklemleri ile belirlenmiştir.

$$\Psi_{\text{saatlik}} = \frac{W_{\text{elk}}}{Ex_{\text{giren}}} \quad (21)$$

$$\Psi_{\text{aylık}} = \frac{\sum_{h=1}^{h=24} W_{\text{elk}}}{\sum_{h=1}^{h=24} Ex_{\text{giren}}} \quad (22)$$

$$\Psi_{\text{yillik}} = \frac{\sum_{m=1}^{m=12} W_{\text{elk}}}{\sum_{m=1}^{m=12} Ex_{\text{giren}}} \quad (23)$$

$$\dot{E}x_x = \dot{m}_x * [(h_x - h_0) - T_0(s_x - s_0)] \quad (24)$$

$$\dot{E}x_{\text{giren}} = \dot{E}x_{1(\text{jeo})} + \dot{E}x_{\text{güneş}} \quad (25)$$

$$\dot{E}x_{\text{güneş}} = A_{koll} * I * [1 + \frac{1}{3} * (\frac{T_0}{T_{güneş}})^4 - \frac{4}{3} * (\frac{T_0}{T_{güneş}})] \quad (26)$$

$$\sum (1 - \frac{T_0}{T}) * Q - W + \sum \dot{E}g - \sum \dot{E}g - I = 0 \quad (27)$$

$$I_{\text{toplam}} = I_{\text{eva}} + I_{\text{türb}} + I_{\text{kond}} + I_{\text{koll}} + I_{\text{ısı eşanjörü}} + I_{\text{pompa}} \quad (28)$$

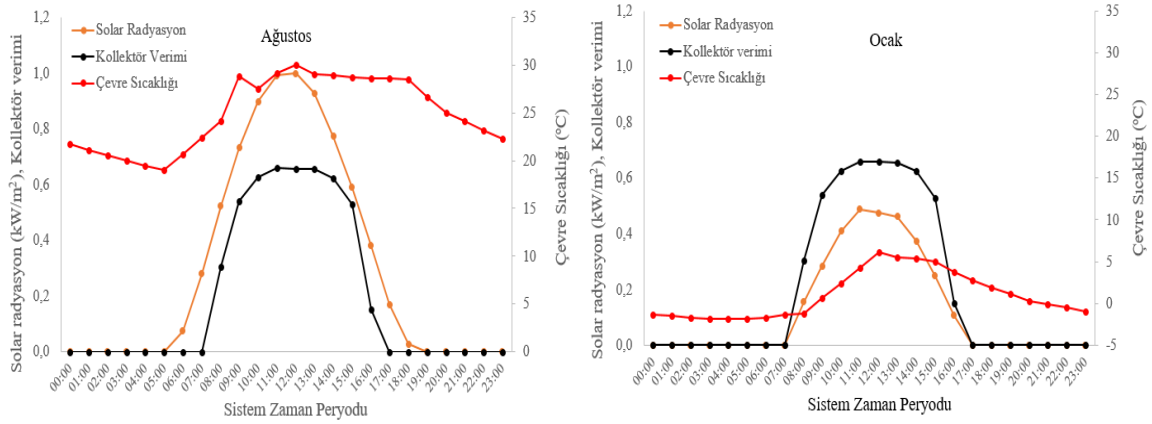
$$I_{\text{cihaz}}(\%) = I_{\text{cihaz}} / I_{\text{toplam}} \quad (29)$$

3. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

Güneş enerjisi destekli jeotermal kaynaklı ORC sisteminin saatlik, aylık ve yıllık performansı birim jeotermal akışkan debisi ($\dot{m}_j=1\text{kg}/\text{s}$) için araştırılmıştır. Performans araştırmalarında ilgili zaman süreçlerinde üretilen elektrik enerjisi miktarları, enerji verimleri ve ekserji verimleri belirlenmiştir. Enerji verimi ilgili zaman içerisinde üretilen toplam elektrik

enerjisinin sisteme giren enerjiye oranı olarak, ekserji verimi ise elektrik üretim miktarın sisteme giren toplam ekserjiye oranı olarak belirlenmiştir.

Sistemin saatlik performans araştırması güneş ışıını ve çevre sıcaklığı değerleri maksimum ve minimum olan Ağustos ve Ocak ayları için karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Ağustos ve Ocak aylarına ait saatlik ortalama güneş ışıını ve 15 denklemleri ile hesaplanmış güneş kolektörlerinin verimin değerlerinin gün içerisindeki değişimleri Şekil 2’de görülmektedir. Güneşlenme süreleri Ağustos ayı için 13 saat, Ocak ayı için 9 saattir. Ağustos ayında kolektör yüzeyine saat 12:00’ de ortalama 1 kW/m² güneş ışıını gelirken, Ocak ayı için bu değer 0,47 kW/m²’dir. Çevre sıcaklığı değerleri ise Ağustos için saat 12:00’de ortalama 30°C, Ocak ayı için 6,1°C’dir. Güneş ışıınına ve çevre sıcaklığına göre kolektör verimleri Ağustos ve Ocak ayları için güneş ışıınıının en fazla olduğu saatte sırasıyla %77 ve %68 olarak belirlenmiştir. Her iki ay için sistemdeki jeotermal ve güneş enerjisi kaynaklı saatlik elektrik üretimi miktarları, enerji ve ekserji verimlerinin gün içerisindeki değişimi Şekil 3’de görülmektedir. Ağustos ayında yirmi dört saat içerisinde sistemde toplam 10,4 kWh elektrik üretimi olmaktadır. Sistemin elektrik gücü öğlen saat 12:00’ de maksimum 0,51 kW’a ulaşmaktadır. Güneş enerjisi etkisi ile üretilen elektrik enerjisi miktarı 0,78 kWh olarak belirlenmiştir. Bu değer yirmi dört saatlik elektrik üretiminin %7,5’ine, güneşin etkin olduğu saatlerdeki üretimin %15’ine karşılık gelmektedir. Ocak ayında ise yirmi dört saatlik elektrik üretimi 9,9 kWh’dir. Sistemin öğlen saatinde ulaştığı maksimum güç 0,45 kW’dır. Güneş enerjisi ile üretilen elektrik enerjisi 0,26 kWh olarak belirlenmiştir. Bu değer yirmi dört saat boyunca ve gün içerisinde üretimin sırasıyla %2,7 ve %7,6’ine eşittir.

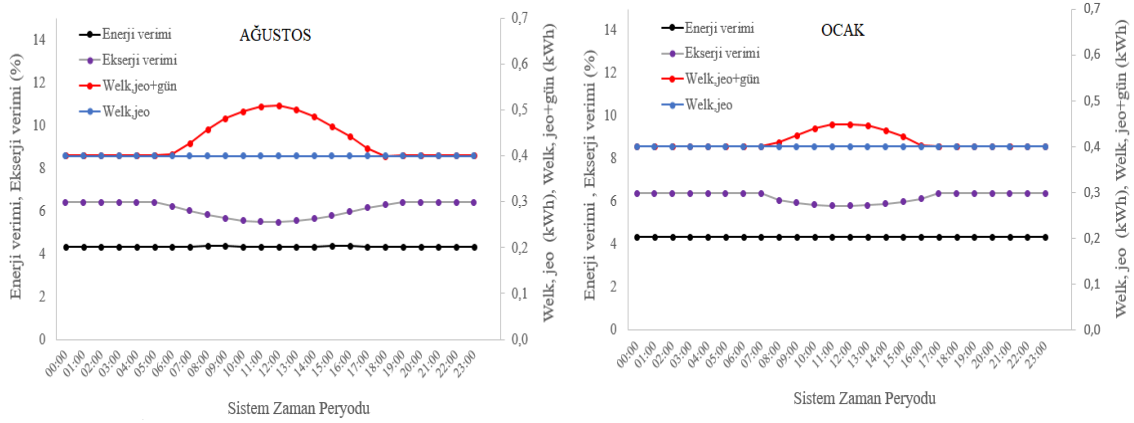


Şekil 2:

Ağustos ve Ocak aylarına ait saatlik ortalama güneş ışıını, çevre sıcaklığı ve güneş kolektörlerinin verimi değerleri

Sistemin enerji verimi Ağustos ve Ocak aylarında yirmi dört saat boyunca yaklaşık %4,3 olarak belirlenmiştir. Gün içerisinde güneş enerjisinin etkisi ile elektrik üretimi artışı ile birlikte sisteme giren toplam enerjide artmıştır. Her iki değerdeki artış miktarının verim oranını değiştirmemesi sonucu enerji verimi her iki ay için de yirmi dört saat boyunca sabit olarak belirlenmiştir.

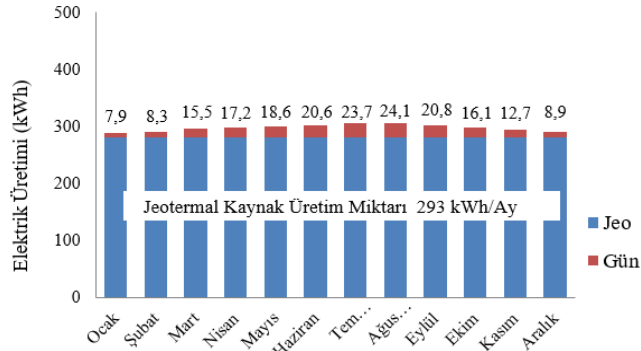
Sisteme ekserji girişi gece şartlarında sadece jeotermal kaynak sıcaklığına bağlıdır. Dolayısıyla ekserji verim değerleri Ağustos ve Ocak aylarında gece saatlerinde her iki ay için %6,4 olarak belirlenmiştir. Gündüz saatlerinde ise güneş enerjisinin etkisi ile sisteme giren ekserji artmıştır. Ekserji girişindeki artışın elektrik üretiminin artışına göre daha fazla olması sonucu ekserji verim değerleri gün içerisinde güneş ışıınıının artması ile azalmıştır. Ekserji verimi öğlen saat 12: 00’de Ağustos ayında %5,5 değerine, Ocak ayında ise %5,8 değerine kadar düşüş göstermiştir.



Şekil 3:

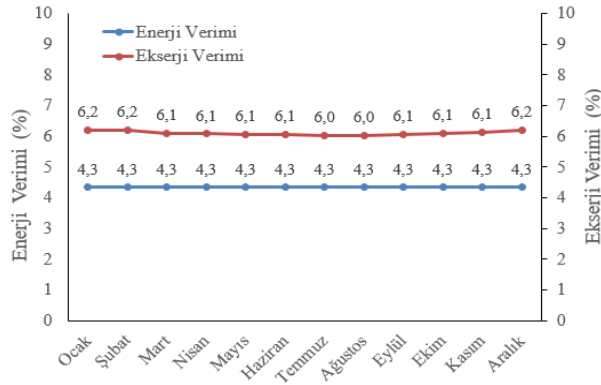
Ağustos ve Ocak aylarına ait saatlik elektrik üretimi, enerji ve ekserji verimleri

Sistemin jeotermal ve güneş enerjisi kaynaklı aylık elektrik üretim değerlerinin, enerji ve ekserji verimlerinin aylara göre değişimi sırasıyla Şekil 4 ve 5’de sunulmuştur. Yılın tüm aylarında jeotermal kaynağın elektrik üretimine etkisi sabittir. Jeotermal kaynak etkisi ile aylık ortalama 293 kWh elektrik üretimi sağlanmaktadır. Elektrik üretiminin aylara göre farkı, güneş radyasyonu şiddetinin ve güneşlenme saatlerinin değişiminden kaynaklanmaktadır. Güneş enerjisi kaynaklı elektrik üretimi en az Ocak ayında 8,3 kWh, en fazla Ağustos ayında sırasıyla 24,1 kWh olarak belirlenmiştir.



Şekil 4:

Sistemin jeotermal ve güneş enerjisi kaynaklı aylık elektrik üretim değerleri



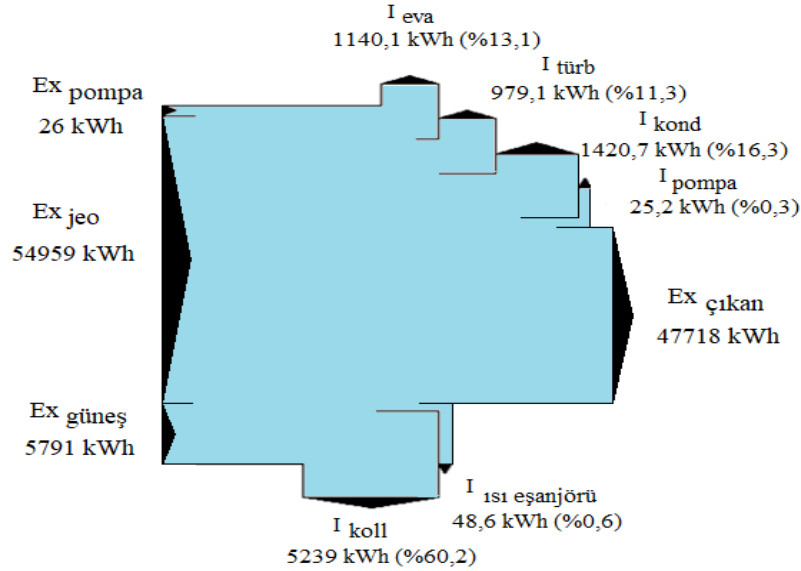
Şekil 5:

Sistemin aylık enerji ve ekserji verimleri

Sistemin enerji verim değerleri tüm yıl boyunca %4,3 olarak belirlenmiştir. Sisteme giren enerji tüm aylarda sadece güneş enerjisine bağlı olarak değişmektedir. Sıcak aylarda güneş enerjisi etkisi ile sistemin ürettiği elektrik enerjisinin artışı ile birlikte sisteme giren enerjinin de artması ve her iki artışın bu iki değer birbirine oranını değiştirmeyecek düzeyde olması yıl boyunca enerji veriminin sabit kalmasına neden olmuştur.

Sistemde üretilen elektrik enerjisini güneş enerjisi ile armasına rağmen sisteme güneş enerjisi etkisi giren ekserjinin artışının daha fazla olması yılın sıcak aylarında ekserji veriminin bir miktar düşmesine neden olmuştur. En düşük ekserji verimi Temmuz ve Ağustos aylarında %6,0 olarak belirlenirken, en yüksek ekserji verimi Aralık, Ocak ve Şubat aylarında %6,2 olarak belirlenmiştir.

Sistemin yıllık elektrik üretim miktarı tüm aylarda jeotermal ve güneş enerjisi kaynaklı elde edilen üretimin toplamı olarak belirlenmiştir. Tüm yılda üretilen elektrik enerjisi birim jeotermal akışkan debisi için toplam 3711 kWh'dır. Elektrik üretiminin %5,3'i güneş enerjisi kaynaklı, %94,7'i jeotermal enerji kaynaklıdır. Sistemin yıllık enerji verimi de tüm aylar için belirlenen değere eşit olarak %4,3 olarak elde edilmiştir. Sistemde birim jeotermal akışkan için yıllık giren ve çıkan ekserji değerleri, sistem elemanlarının ekserji yıkım miktarları ve toplam ekserji yıkımına göre yüzde değerlerini gösteren ölçeksiz Grossman diyagramı Şekil 6'da sunulmuştur. Sisteme yıl içerisinde birim jeotermal akışkan debisi için toplam 60776 kWh ekserji girişi olmaktadır. Bu miktarın %90,43'ü jeotermal kaynak, %9,53'ü güneş enerjisi ve %0,04'ü pompa etkisi ile olmaktadır. Yıllık ekserji verimi toplam elektrik üretiminin sisteme giren toplam ekserji girişine oranına göre %6,1 olarak belirlenmiştir. Sistemden çıkan ekserji birim jeotermal akışkan debisi için 47718 kWh'dır. Bu miktarın %99,6'sı jeotermal kaynak suyunun kaynağa reenjektisi ile %0,4'ü kondenserden çıkan enerji ile olmaktadır. Sistemde toplam ekserji yıkımı yıllık 8698,2 kWh olarak belirlenmiştir. En fazla ekserji yıkımı 5239,1 kWh (%60,2) ile güneş kolektörlerinde meydana gelmektedir. Diğer sistem elemanlarında meydana gelen ekserji yıkım miktarları ve yüzdeleri sırasıyla 1420,7 kWh (%16,3) ile kondensörde, 1140,1 kWh (%13,1) ile evaporatörde, 979,1 kWh (%11,3) ile türbinde, 48,6 kWh (%0,6) ile ısı eşanjöründe ve 25,2 kWh (%0,3) ile pompada belirlenmiştir.



Şekil 6:

Grossman diyagramı: Sistem elemanlarının ekserji yıkım miktarları ve toplam ekserji yıkımındaki yüzdeleri

4. SONUÇ VE ÖNERİLER

Güneş enerjisi destekli jeotermal ORC sisteminin elektrik üretimi, enerji ve ekserji verimleri saatlik, aylık ve yıllık olarak birim jeotermal akışkan debisi ($m_j=1\text{kg/s}$) için belirlenmiştir. Sistemin parametreleri sadece jeotermal kaynak sıcaklığına bağlı çalıştığı gece şartlarında tüm zaman süreçlerinde sabit kalmıştır. Sistem parametreleri sadece gündüz şartlarında güneş enerjisine bağlı olarak değişmiştir. Sistemin enerji verimi saatlik, aylık ve yıllık olarak yaklaşık %4,3 olarak belirlenmiştir. Ekserji verimi tüm süreçlerde güneş enerjisinin artışı ile azalmıştır. Ekserji verimi gece saatlerinde sadece jeotermal kaynağa bağlı olarak %6,4 olarak belirlenmiştir. Gün içinde ise Ağustos ayında %5,5 değerine, Ocak ayında ise %5,8 değerine kadar düşüş göstermiştir. Aylık değerlendirmede soğuk aylarda %6,2, sıcak aylarda %6,0 olarak belirlenmiştir. Tüm yıl için ekserji verimi ise %6,1 belirlenmiştir. Tüm yılda üretilen elektrik enerjisi birim jeotermal akışkan debisi için toplam 3711 kWh'dır. Bu miktarın %5,3'i güneş enerjisi kaynaklı, %94,7'i jeotermal kaynaklıdır. Sistemin yıllık ekserji verimi %6,1 belirlenmiştir. Bu değer sıcak aylarda aylarında %6,0'e düşerken, soğuk aylarda %6,2'e yükselmiştir. Sistemde yıllık toplam ekserji yıkımının %60,2'si güneş kolektörlerinde meydana gelmiştir. Bunu sırasıyla %16,3 ile kondenser, %13,1 ile evaporatör, %11,3 ile türbin, %0,6 ile ısı eşanjörü ve %0,3 ile pompa izlemiştir. Yapılan hesaplamalara göre hibrit sistem uygulamasında ilave güneş enerjisi sistemi ile sisteme giren enerji ve ekserjinin de artması enerji ve ekserji verimleri açısından artışa neden olmamıştır. Lakin güneş enerjisi ilavesi ile elektrik üretiminde yaz ve kış sırasıyla, yirmi dört saatlik elektrik üretiminde %7,5 ve %2,7, güneşin etkin olduğu saatlerde ise %15 ve %7,6'a varan artış belirlenmiştir. Bu değerler düşük jeotermal kaynak sıcaklıkları için kurulabilecek sistemler için önemlidir. Ülkemizde yaygın olarak bulunan ve genellikle kaplıca ve sera ısıtması amaçlı faydalanılan çok düşük sıcaklıklarda jeotermal enerji tesislerinde elektrik ihtiyaçlarının düşük verim değerlerine rağmen kurulacak bu tür hibrit ORÇ sistemleri ile karşılanabileceği düşünülebilir.

ÇIKAR ÇATIŞMASI

Yazarlar, bilinen herhangi bir çıkar çatışması veya herhangi bir kurum/kuruluş ya da kişi ile ortak çıkar bulunmadığını onaylamaktadırlar.

YAZAR KATKISI

Bu makalede Emre KAÇANOĞLU tarafında yüksek lisans tezi kapsamında enerji analizi kısmı yapılmıştır. Makalenin ekserji analizi kısmı tez danışmanı Fatih AKKURT tarafından tez çalışması dışında ilaveten yapılmıştır.

KAYNAKLAR

1. Akkurt, F. (2020) Düşük Sıcaklıkta Jeotermal Enerji Kaynaklı Organik Rankine Çevrimi Sisteminin Enerji Ve Ekserji Analizi, *Uludağ University Journal of The Faculty of Engineering*, 25(2), 730-741. doi: 10.17482/uumfd.624475
2. Algieri, A. ve Sebo, J. (2017) Energetic Investigation of Organic Rankine Cycles (ORCs) 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.
3. Anonim, 2020. Konya İli Jeotermal Enerji Potansiyelinin Turizm Amaçlı Değerlendirilmesi ve Yatırım Olanakları, *Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü*, Mayıs

4. Atiz, A., Karakılıç, H., Erden, M. ve Karakılıç, M. (2019). Investigation energy, exergy and electricity production performance of an integrated system based on a low-temperature geothermal resource and solar energy, *Energy Conversion and Management*, 195: 798–809. doi: 10.1016/j.enconman.2019.05.056
5. Astolfi, M., Xodo, L., Romano, M.C. ve Macchi, E. (2010) Technical and economical analysis of a solar–geothermal hybrid plant based on an Organic Rankine Cycle, *Geothermics*, 40: 58–68. doi: 10.1016/j.geothermics.2010.09.009
6. <https://ec.europa.eu/jrc/en/pvgis> Erişim Tarihi: 29.09.2020, Konu: *Konya ili şartlarında eğimli kolektöre gelen radyasyon değerleri*
7. <https://ORC-world-map.org> Erişim Tarihi: 29.03.2019, Konu: *Dünya’da kurulu ORÇ sistemlerinin harita üzerinde gösterilmesi.*
8. 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.
9. Çakıcı, D.M., Erdogan, A. ve Colpan, C.Ö. (2017) Thermodynamic performance assessment of an integrated geothermal powered supercritical regenerative organic Rankine cycle and parabolic trough solar collectors, *Energy*, 120: 306-319. doi:10.1016/j.energy.2016.11.083
10. Cardemil, J.M., Cortés, F., Díaz, A. ve Escobar, R. (2016) Thermodynamic evaluation of solar-geothermal hybrid power plants in northern Chile, *Energy Conversion and Management*, 123, 348–361 doi: 10.1016/j.enconman.2016.06.032
11. Lentz, A. ve Almanza, R. (2005) Solar-geothermal hybrid system, *Appl Therm Eng*, 26, 1537–44. doi:10.1016/j.applthermaleng.2005.12.008
12. Kılıç, F. (2016) Geothermal Energy in Turkey. *Energy & Environment*, 27: 360-376. doi: 10.1177/0958305X15627544
13. Mir I., Rodrigo, R., Vergara, J. ve Bertrand, J.(2011) Performance Analysis of a Hybrid Solar-Geothermal Power Plant in Northern Chile, *World renewable energy congress, Linköping, Sweden*, 1281-1288
14. Pridasawas, W ve Lundqvist, P. (2006) A year-round dynamic simulation of a solar-driven ejector refrigeration system with iso-butane as a refrigerant, *International Journal of Refrigeration*, 30: 840-850. doi: 10.1016/j.ijrefrig.2006.11.012
15. Petela, R. (1964) *Exergy of heat radiation*, ASME J. Heat Transfer, 86:187–192.
16. 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
17. Tchanche, B.F., Lambrinos, Gr., Frangoudakis, A. ve Papadakis, G. (2009) 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.
18. Tempesti, D., Manfrida, G. ve Fiaschi D. (2012) Thermodynamic analysis of two micro CHP systems operating with geothermal and solar energy. *Applied Energy*, 97, 609-617 doi: 10.1016/j.apenergy.2012.02.012
19. Zhou C. (2014) Hybridisation of solar and geothermal energy in both subcriticaland supercritical Organic Rankine Cycles, *Energy Conversion and Management*, 81,72–82 doi: 10.1016/j.enconman.2014.02.007