



DÜŞÜK SICAKLIĞA SAHİP JEOTERMAL KUYULARDA GÜÇ ÜRETİMİ EKSERJETİK PERFORMANS ANALİZİ

Mehmet ALTINKAYNAK^{1*}, Doğançan ÇELİK²

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

² Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Enerji Sistemleri Mühendisliği Bölümü, Isparta, Türkiye

Anahtar Kelimeler

*Jeotermal Enerji,
Enerji,
Ekserji,
n-pentane,
Therminol 72.*

Öz

Düşük sıcaklığa sahip bir jeotermal kuyu destekli bir ORC çevrimi incelenmiş ve çalışma akışkanı olarak n-pentane seçilmiştir. N-pentane akışkanının kazanda direkt olarak ısıtılması işlemi için Terminol 72 ısı transfer yağı seçilmiştir. Yağ kazanda ısıtılmadan önce, jeotermal kuyudan alınan düşük kaynak ısı ile ön ısıtılmaya tutulmuştur. Jeotermal kuyu sıcaklığı 80°C olan bir kuyu kaynağına Terminol 72 ısı transfer yağı ile sıcaklık artışı sağlanarak bir ORC çevrimi incelenmiştir. Bu çevrimde türbin sıcaklığı 170°C'ye kadar çıkarılmaya çalışılmıştır. Yağ kazanı kapasitesi 4000 kW alınarak, güç üretimi 806.2 kW olarak hesaplanmıştır. N-pentane akışkanının 1000 kPa basınçta türbin girişinde sistem verimi %14 iken buna bağlı olarak sistemin ekserji verimi de aynı basınçta %34 olduğu hesaplamalarda bulunmuştur. Sistemin toplam ekserji yıkımları incelendiğinde kazanda %74, türbinde %16, ısı değiştiricilerinde %9 Terminol ve n-pentane pompasında %1 olarak bulunmuştur. Bu çalışmada düşük sıcaklığa sahip jeotermal kuyuların enerji verimlerinde ısı ön ısıtma işlemiyle veriminde artış olacağı gösterilmiştir.

POWER GENERATION EXERGETIC PERFORMANCE ANALYSIS IN GEOTHERMAL WELLS WITH LOW TEMPERATURE

Keywords

*Geothermal Energy,
Energy,
Exergy
n-pentane,
Therminol 72.*

Abstract

An ORC cycle with a low temperature geothermal well support was examined and n-pentane was chosen as the working fluid. Therminol 72 heat transfer oil was chosen for the direct heating of the N-pentane fluid in the boiler. Before the oil was heated in the boiler, it was preheated with low source heat taken from the geothermal well. An ORC cycle was examined by providing a temperature increase with Therminol 72 heat transfer oil to a well source with a geothermal well temperature of 80 °C. In this cycle, the turbine temperature was tried to be increased up to 170 °C. By taking the oil boiler capacity 4000 kW, power generation is calculated as 806.2 kW. While the system efficiency of N-pentane fluid at turbine inlet at 1000 kPa pressure is 14%, the exergy efficiency of the system is 34% at the same pressure. When the total exergy destructions of the system were examined, it was found as 74% in the boiler, 16% in the turbine, 9% in the heat exchangers and 1% in the n-pentane pump. In this study, it has been shown that the energy efficiency of low temperature geothermal wells will increase with the heat preheating process.

Alıntı / Cite

Altinkaynak, M., Çelik, D., (2021). Düşük Sıcaklığa Sahip Jeotermal Kuyularda Güç Üretimi Ekserjetik Performans Analizi, Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 9(2), 574-587.

Yazar Kimliği / Author ID (ORCID Number)

M. Altinkaynak, 0000-0003-2434-576X
D. Çelik, 0000-0002-9492-3062

Makale Süreci / Article Process

Başvuru Tarihi / Submission Date	09.04.2020
Revizyon Tarihi / Revision Date	18.07.2020
Kabul Tarihi / Accepted Date	22.12.2020
Yayın Tarihi / Published Date	20.06.2021

* İlgili yazar / Corresponding author: mehmetaltinkaynak@isparta.edu.tr, +90-246-214-6784

1. Giriş (Introduction)

İnsanlığın varoluşundan bugüne dek en önemli gereksinimlerinin başında enerji ihtiyacı gelmektedir (Islam ve Hasanuzzaman, 2020). Dolayısıyla bu enerji ihtiyacının karşılanabilmesi için en başta fosil kaynaklar sonrasında da yenilenebilir enerji kaynakları kullanılmaya başlanmıştır (Leonard vd., 2020). Fosil yakıtların tükenmesi çevresel etki konusunda artan endişe insanları temiz ve verimli enerji teknolojileri alanına yöneltmiştir (Colonna vd., 2015).

Yenilenebilir enerji kaynaklarından olan jeotermal enerji, enerji üretimi için geleceğin alternatif enerji kaynaklarından biridir (Cetin vd., 2019). Jeotermal enerji, dünya yüzeyinin yeraltı katmanlarından alınan bir enerji türüdür ve ticari amaçlı olarak uzun yıllardan beri kullanılmaktadır (Aneke ve Menkiti, 2016). Dünya jeotermal enerji kapasitesinin 2020 yılında 21 GW seviyelerine ulaşacağı ve dünya enerji tüketiminin 2050 yılında %8,3'ünü jeotermal enerjinin sağlayacağı ön görülmektedir (Bertani 2016).

Literatürde düşük sıcaklığa sahip jeotermal kuyular ve santraller için birçok performans ve güç üretim analizleri mevcuttur. Bu konuda yapılmış çalışmalara bakıldığında; Leveni vd. (2019) çalışmalarında Torre Alfina jeotermal santralini incelemişlerdir. Bu santral için, LiBr çözeltilisi kullanarak absorpsiyonlu çevrim ve yine organik rankine çevrimi kullanarak güç üretimini araştırmışlardır. Çalışmaları sonucunda enerji kullanım faktörü %46,2 ve %27,7 ekserji verimlilik olduğunu ifade etmişlerdir. Yaptıkları analizlerde de ekserji yıkımları ise ORC (Organik Rankine cycle) ekonomizerin de %8,6, jeneratörde %6,3, absorber de ise %5,5 olarak hesaplamışlardır. Başoğul (2019) yaptığı çalışmada bir jeotermal santralin enerji ve ekserji analizlerini yapmış ve bu santral için çevresel etkiyi de incelemiştir. Jeotermal santralin çevresel etkisi, ekserji ekonomik etkisi ve toplam çevresel faktörleri arasındaki bağıl farkları sırasıyla %122, %2,5, 2285 Pts/saat olarak bulmuştur. Ayrıca çevresel etkinin yaklaşık %98'i jeotermal santralin ekipmanlarından meydana geldiği analiz yöntemi ile göstermiştir. Ayhan vd (2019) yaptıkları çalışmalarında düşük sıcaklı jeotermal kuyu suyunun güneş kollektöründen geçirilerek ORC döngüsüyle elektrik üretimi ve ev ısıtmasında kullanılmasını amaçlamışlardır. Çalışma sıvısı olarak n-pentan, n-bütan, n-hekzan kullanmışlardır. Jeotermal saha olarak çalışmalarını Kula (63 °C), Saraycık (74 °C), Turgutlu (86 °C) bölgesinde yapmışlardır. Maksimum enerji ve ekserji verimliliği Turgutlu'da %6,92 ve %21,06 iken en düşük enerji ve ekserji verimini de %0,2 ve %2,19 olarak Kula' da bulmuşlardır. Maksimum ve minimum elektrik üretimini 19.46 kW (Turgutlu) ve 0,6168kW (Kula) olarak hesaplamışlardır. Koroneos vd. (2017) Yunanistan'daki Nisyros adasındaki jeotermal santralinin enerji ve ekserji analizlerini yapmışlardır. Santralin fizibilitesinin %41 kısmının ekserji verimliliğini %12,8 olarak bulmuşlardır. Nami vd. (2017) Çift akışkanlı organik rankine çevrimi ile çalışan bir jeotermal santralin ekserji analizini yapmışlardır. Sistem bileşenlerin ekserji yıkımlarını ekipman bazında incelediklerinde düşük basınçlı buhar jeneratörünün %38,11, yüksek basınçlı buhar jeneratörün %29,98, kondenserin %15,93 olarak bulmuşlardır. Ancak ileri seviye de ekserji analizini yorumladıklarında kondenserde sadece yıkımın %15 mertebesinde önlenebileceğini ifade etmişlerdir. Bina vd. (2018) çalışmalarında Sabalan jeotermal santralini incelemişlerdir. Santrale yaptıkları enerji ve ekserji analizine bağlı olarak ekserji ekonomik ve optimizasyon uygulamışlardır. Double (çiftli) flaş çalışma sistemleri için enerji verimliliği sırasıyla %16,26 dan %17,73 ekserji verimliliği ise %40,06 dan %50,89 iyileştirme olduğunu yöntemsel olarak ifade etmişlerdir. El-Emam ve Dincer (2013) yaptıkları çalışmada jeotermal santrallerde yeni bir tip rejenaratifli bir sistem öne sürmüşlerdir. Santralin türbin çıkışından aldıkları ıslak buharı rejenatörde ön ısıtıcı olarak kullanmış ve buna bağlı olarak enerji ve ekserji performansındaki değişimlerden bahsetmişlerdir. Bu yeni tip sistem önerisi için, enerji ve ekserji verimliliğini sırasıyla %16,37 ve %48,8 olarak bulmuşlardır. Ayrıca santralin termoeconomik analizini de yapmışlardır. Isı değiştiricilerinde optimizasyon üzerine çalışmalarının olduğu bu analizde 5 MWe alınabileceğini de belirtmişlerdir. Behnam vd. (2018) yaptıkları çalışmalarında Tatlı su hazırlama, ısıtma (sıcak su) ve elektrik üretimi için düşük sıcaklıklı jeotermal kaynaklarla yönlendirilen küçük ölçekli bir trijenerasyon sisteminin performansını termodinamik ve ekonomik açıdan araştırmışlardır. Çalışmaların sonucunda 100 °C jeotermal su kullanılarak önerilen sistem, 0,662 kg/s tatlı su, 161,5 kW güç ve 246 kW ısı yükü üretim kapasitesine sahip olduğunu hesaplamışlardır. Kanoglu (2002) çalışmasında 12,4 MW bir jeotermal santralin ekserji analizini yapmıştır. Tesisteki ekserji yıkımının nedenleri kondenserde kaybedilen akışkan, ön ısıtıcı, türbine bağlı olan pompada ve jeotermal kaynakta meydana geldiğini gözlemiştir. Ekserji yıkımları sırasıyla %22,16, %13,0, %13,9, %14,8 olarak bulmuştur. Cimşit (2019) çalışmasında jeotermal ısı kaynaklı organik rankine çevriminin farklı organik akışkanlar için termodinamik analizini yapmıştır. Çalışmasında kullandığı akışkanlar R-134a, R-123, R-124, R-125, R-404A, R-407C, R-410A, R- 600, R-600a ve R-290 olarak seçmiştir. En yüksek güç üretimi için termal verim değerinin R-123 akışkanına ait iken en düşük ise R-125 akışkanı olduğunu gözlemlemiştir.

Bu çalışma literatürle kıyaslandığında, düşük sıcaklıklarda güç üretiminin verimsel düşüklüğünü giderecek, ilave ısıtma sistemi tasarlanmış ve sistemin verimindeki gözle görülür artış ifade edilmeye çalışılmıştır. Ayrıca ülkemizde genellikle ege bölgesinin iç kısımlarında bulunan enerji potansiyeli düşük kuyulardan da güç üretilebileceği gösterilmiştir.

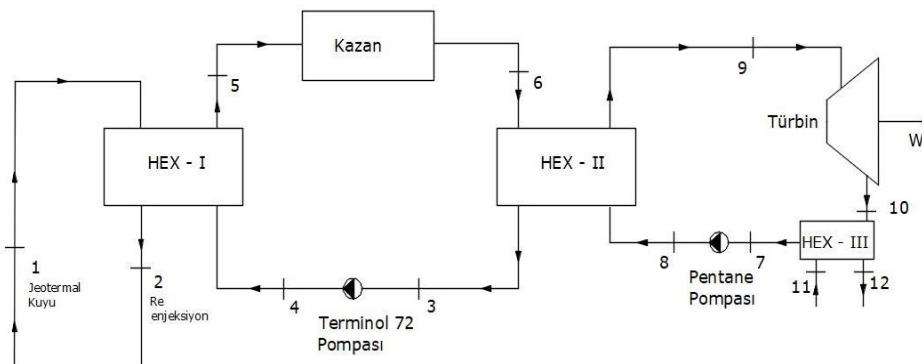
2. Materyal ve Yöntem (Material and Method)

Düşük sıcaklıklara sahip jeotermal kuyulardan güç üretimi yapmak oldukça zor olmaktadır. Bu tasarlanan sistemde kuyu sıcaklığının 80 °C olduğu bir bölgeye ait jeotermal bir kuyu ele alınmıştır. Jeotermal kuyudan alınan sıcak su ilk önce Hex-I olarak ifade edilen ısı değiştiricisine girmektedir. Burada terminol 72 ısı transfer yağının ön ısıtılması planlanmaktadır. Kazan sistemlerinde ara ısıtma veya genel ısıtma proseslerinde yüksek basınç ve sıcaklıklarda suyun buhar fazında kontrol edilmesinin zorluklarından dolayı terminol 72 vb ısı transfer yağları tercih edilmektedir. Terminol 72 çalışma sıcaklığı aralığı -10 ile 380°C'dir (Chernikova vd., 2015). Terminol yağ pompası ile ısı değiştiriciye basılan yağ akışkan ısı değiştiricisinde 77 °C'ye kadar ısıtılmaktadır. Ön ısıtmaya tabii tutulan terminol 72 ısı transfer yağı, kazana girerek burada 204 C'ye kadar ısıtılmaktadır. Düşük sıcaklığa sahip ORC çevrimlerinde türbinde ıslak buhar sorununu önlemek amacıyla kuru ve izentropik durumda olan n-pentane akışkanı seçilmiştir (Jubori vd., 2016). Kazanda ısıtılan yağ akışkan ısısını n-pentane'a devretmek için Hex-II ısı değiştiricisine basılır. Buradan-pentane pompası ile yaklaşık 26 °C'deki akışkan ile temas ettirilerek pentanın türbin giriş sıcaklığına kadar ısıtılmasını sağlanmaktadır. Türbin girişinde 170 °C'ye ulaşan akışkan türbinde güç üretimi için genişleyerek Hex-III ile adlandırılan kondanser ısı değiştiricisine gelir ve burada yoğunlaşır. Bu şekilde çevrim tamamlanmış olur. Tablo 1'de çevrimde kullanılan ısı transfer yağı Terminol 72 ve n-pentan akışkanının özellikleri verilmiştir.

Tablo 1. n-pentane ve Terminol 72 akışkanlarının özellikleri
(Properties of n-pentane and Terminol 72 fluids) (Qiu, 2012 ; Yilmazoglu 2016)

n- pentane	Formül	C ₅ H ₁₂
	Molekül Ağırlığı (g/mol)	72
	Kaynama Sıcaklığı (°C)	36
	Kritik Sıcaklığı (°C)	196,5
	Kritik Basınç (MPa)	3,36
	ODP	0
Terminol 72	GWP	20
	Minimum Sıcaklık (°C)	-9,44
	Maksimum Sıcaklık (°C)	379,4
	ρ (kg/m ³)	1084,1
	C _p (kJ/kg°C)	1,539
	ν (kg/ms)	0,018
	K (W/m°C)	0,1403

Jeotermal ön ısıtmalı yağ kazanı destekli bir güç üretim sisteminin şekli Şekil 1'de verilmiştir. Sisteme ait tüm ekipmanların termodinamik özellikleri Tablo 2 'de verilmiştir.



Şekil 1. Jeotermal ön ısıtmalı yağ kazanı destekli bir güç üretim sistemi (A geothermal preheated oil boiler assisted power generation system)

Tablo 2. Sistem ekipmanlarının termodinamik özellikleri (Thermodynamic properties of system equipment)

No	Akışkan	\dot{m} (kg/s)	T (°C)	P (kPa)	h (kJ/kg)	s (kJ/kgK)	Enerji (kW)	Ekserji (kW)
1	Jeotermal su	11,66	80	600	335,5	1,075	3911,13	253,5
2	Jeotermal su	11,66	47,46	600	199,2	0,6706	2322,672	57,05
3	Terminol 72	21	32	270	64,44	0,226	1353,24	8,928
4	Terminol 72	21	32,02	400	64,59	0,2261	1356,39	11,51
5	Terminol 72	21	77,93	400	140,2	0,4567	2944,2	170,9
6	Terminol 72	21	204,5	400	378,3	1,033	7944,3	1601
7	n-Pentane	10,44	26	71,51	0,2103	0,001741	2,195532	0,2044
8	n-Pentane	10,44	26,52	1001	2,209	0,003408	23,06196	15,93
9	n-Pentane	10,44	170,8	1001	633,6	1,666	6614,784	1488
10	n-Pentane	10,44	120,5	71,51	545,3	1,742	5692,932	331,5
11	Hava	78	22	101	92,37	0,3249	7204,86	0
12	Hava	78	39,45	101	165,3	0,5651	12893,4	164,7

Bu kısımda termodinamik yasalara göre bazı tanımlayıcı açıklamalar jeotermal sistemin analizi için verilmiştir. Kütle enerji ve ekserji denge denklemlerini kapsayan ilkeler sistemin performansı incelemek amacıyla sırasıyla aşağıda verilmiştir (Dincer ve Rosen 2012).

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

Burada “g” ve “ç” indisleri sisteme giren ve çıkan maddeyi göstermektedir. İncelemesi yapılan sistemin enerji dengesi termodinamiğin 1. Yasasına göre sistem içinde korunur. Potansiyel ve kinetik enerjilerinin ihmal edilmesiyle kararlı hal şartları için enerji denklemi aşağıdaki gibi verilir (Bejan vd., 1996).

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

Ekserji analizi enerji kaynaklarının ekonomik ve etkin kullanımı oluşturmada destekleyicidir ve enerji üretim sistemlerinin tasarımlarının incelenmesinde kullanılır. Sistemin termodinamik analizi için kullanılan ekserji denge denklemi aşağıdaki gibi verilir (Dincer, 2012).

$$\sum_g \dot{m}_g ex_g + \dot{E}x_Q = \sum_g \dot{m}_ç ex_ç + \dot{E}x_W + \dot{E}x_Y \quad (3)$$

Burada $\dot{E}x$ ekserji transfer hızı $\dot{E}x_Q$ ise ısı transfer hızının ekserjisi ve $\dot{E}x_W$ iş ile alakalı ekserji ısı transfer hızıdır. Ekserji yıkımı $\dot{E}x_Y$ ile ifade edilmektedir. ex prosesin spesifik ekserjisidir. Bu kavramlar aşağıdaki şekilde ifade edilmektedir

$$\dot{E}x_Q = \left(1 - \frac{T_o}{T_g}\right) \dot{Q}_g \quad (4)$$

$$\dot{E}x_W = \dot{W} \quad (5)$$

$$ex = ex_{ke} + ex_{pe} + ex_{ph} + ex_{ch} \quad (6)$$

Yukarıda verilen ex_{ke} , ex_{pe} , ex_{ph} , ve ex_{ch} sırasıyla kinetik, potansiyel, fiziksel ve kimyasal enerjinin ekserjileridir. Potansiyel, kimyasal ve kinetik enerjilerin ekserjileri ihmal edilebildiğinden fiziksel enerjinin ekserjisi aşağıdaki şekilde ifade edilmektedir.

$$ex_{ph,i} = (h_i - h_o) - T_o(s_i - s_o) \quad (7)$$

Isı eşanjörünün etkinliği, ısı transfer hızı ile termodinamik olarak maksimum ısı oranı arasındaki oran olarak ifade edilir.

$$\varepsilon = \frac{q}{q_{max}} = \frac{C_{sıcak}(T_{sıcak,giriş} - T_{sıcak,çıkış})}{C_{min}(T_{sıcak,giriş} - T_{soğuk,giriş})} \quad (8)$$

Veya

$$\varepsilon = \frac{q}{q_{max}} = \frac{C_{soğuk}(T_{soğuk,çıkış} - T_{soğuk,giriş})}{C_{min}(T_{sıcak,giriş} - T_{soğuk,giriş})} \quad (9)$$

Sistemde sistemin verimi ve ekserji verimi aşağıdaki şekilde yazılır,

$$Q_{kazan,ex} = \left(1 - \frac{T_0}{T}\right) Q_{kazan} \quad (10)$$

$$\eta_{sistem} = \frac{(W_{Türbin} - W_{Pompa,Pentan} - W_{Pompa,Terminol})}{(Q_{jeotermal} - Q_{kazan})} \quad (11)$$

$$\phi_{ex} = \frac{(W_{Türbin} - W_{Pompa,Pentan} - W_{Pompa,Terminol})}{(Q_{kazan,ex} + \dot{E}x_{jeotermal\ giren} - \dot{E}x_{jeotermal\ çıkan})} \quad (12)$$

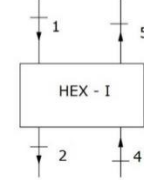
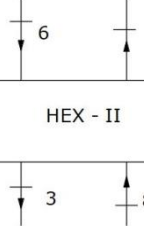

Ekserji çalışmalarında önemli hususlardan biri sistemin referans değerleridir. Çalışmada kabul edilen değerler Tablo 3'te ve verilmiştir.

Tablo 3. Sistemde kabul edilen referans değerleri (Reference values accepted in the system)
($\eta_{türbin} = 0,75$, $\eta_{n-pentane\ pompa} = 0,75$, $\eta_{Terminol\ 72\ pompa} = 0,8$)


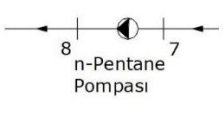
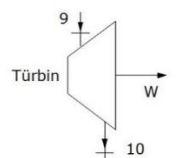
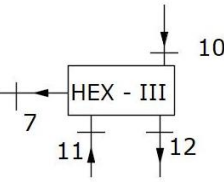
	T_0 (°C)	P_0 (kPa)	h_0 (kJ/kg)	s_0 (kJ/kgK)
Jeotermal Su	22	101,325	92,37	0,3249
Terminol 72	22	101,325	48,57	0,1736
n-pentane	22	101,325	-9,011	-0,02945
Hava	22	101,325	295,4	6,849

Jeotermal ön ısıtmalı yağ kazanı destekli bir güç üretim sistem ekipmanlarının kütle enerji ve ekserji dengeleri Tablo 4'te verilmiştir

Tablo 4. Sistem ekipmanlarının denge denklemleri (Balance equations of system equipment)

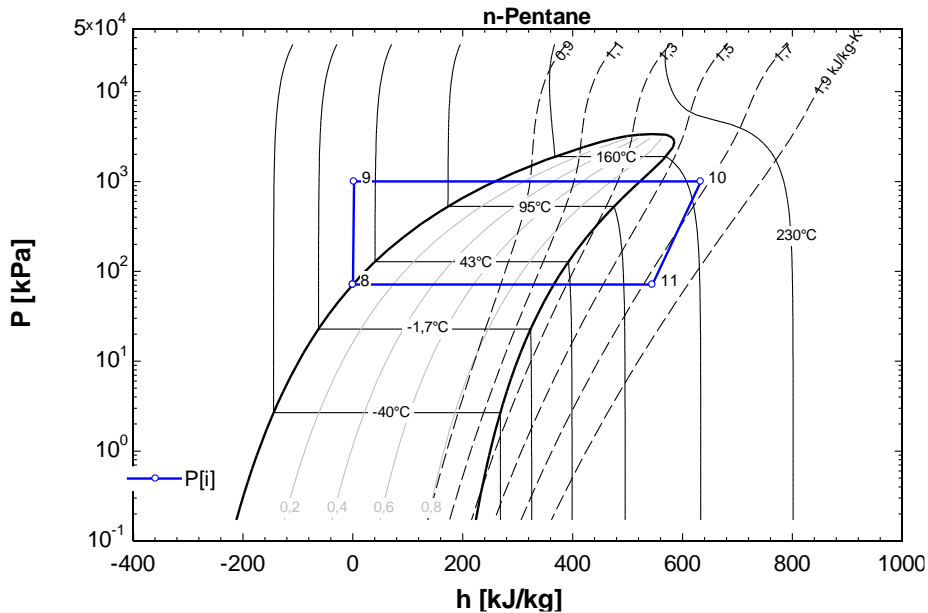
Isı Değiştiricisi I		$\dot{m}_1 + \dot{m}_4 = \dot{m}_2 + \dot{m}_5$ $\dot{m}_1 h_1 + \dot{m}_4 h_4 = \dot{m}_2 h_2 + \dot{m}_5 h_5$ $\dot{m}_1 s_1 + \dot{m}_4 s_4 + \dot{S}_{\dot{u}retim,Hex-I} = \dot{m}_2 s_2 + \dot{m}_5 s_5$ $\dot{m}_1 ex_1 + \dot{m}_4 ex_4 = \dot{m}_2 ex_2 + \dot{m}_5 ex_5 + \dot{E}x_{yıkım,HEX-I}$
Isı Değiştiricisi II		$\dot{m}_6 + \dot{m}_8 = \dot{m}_3 + \dot{m}_9$ $\dot{m}_6 h_6 + \dot{m}_8 h_8 = \dot{m}_3 h_3 + \dot{m}_9 h_9$ $\dot{m}_6 s_6 + \dot{m}_8 s_8 + \dot{S}_{\dot{u}retim,Hex-II} = \dot{m}_3 s_3 + \dot{m}_9 s_9$ $\dot{m}_6 ex_6 + \dot{m}_8 ex_8 = \dot{m}_3 ex_3 + \dot{m}_9 ex_9 + \dot{E}x_{yıkım,HEX-II}$
Terminol 72 Isıtma Kazanı		$\dot{m}_5 = \dot{m}_6$ $\dot{m}_5 h_5 + \dot{Q}_{kazan} = \dot{m}_6 h_6$ $\dot{m}_5 s_5 + \dot{S}_{kazan} = \dot{m}_6 s_6$ $\dot{m}_5 ex_5 = \dot{m}_6 ex_6 + \dot{E}x_{yıkım,kazan}$

Tablo 4. Devamı (Continued)

Terminol 72 Pompası		$\dot{m}_3 = \dot{m}_4$ $\dot{m}_3 h_3 + \dot{W}_{Terminol-pompa} = \dot{m}_4 h_4$ $\dot{m}_3 s_3 + \dot{S}_{\dot{u}retim, Terminol-pompa} = \dot{m}_4 s_4$ $\dot{m}_3 ex_3 + \dot{W}_{Terminol-pompa} = \dot{m}_4 ex_4 + \dot{E}x_{yikim, Terminol pompa}$
n-Pentane Pompası		$\dot{m}_7 = \dot{m}_8$ $\dot{m}_7 h_7 + \dot{W}_{n-Pentane-pompa} = \dot{m}_8 h_8$ $\dot{m}_7 s_7 + \dot{S}_{\dot{u}retim, n-Pentane-pompa} = \dot{m}_8 s_8$ $\dot{m}_7 ex_7 + \dot{W}_{n-Pentane-pompa} = \dot{m}_8 ex_8 + \dot{E}x_{yikim, n-Pentane pompa}$
Türbin		$\dot{m}_9 = \dot{m}_{10}$ $\dot{m}_9 h_9 = \dot{m}_{10} h_{10} + \dot{W}_{Türbin}$ $\dot{m}_9 s_9 + \dot{S}_{\dot{u}retim, Türbin} = \dot{m}_{10} s_{10}$ $\dot{m}_9 ex_9 = \dot{m}_{10} ex_{10} + \dot{W}_{Türbin} + \dot{E}x_{yikim, Türbin}$
Isı Değiştiricisi III		$\dot{m}_{10} + \dot{m}_{11} = \dot{m}_7 + \dot{m}_{12}$ $\dot{m}_{10} h_{10} + \dot{m}_{11} h_{11} = \dot{m}_7 h_7 + \dot{m}_{12} h_{12}$ $\dot{m}_{10} s_{10} + \dot{m}_{11} s_{11} + \dot{S}_{\dot{u}retim, Hex-III} = \dot{m}_7 s_7 + \dot{m}_{12} s_{12}$ $\dot{m}_{10} ex_{10} + \dot{m}_{11} ex_{11} = \dot{m}_7 ex_7 + \dot{m}_{12} ex_{12} + \dot{E}x_{yikim, HEX-III}$

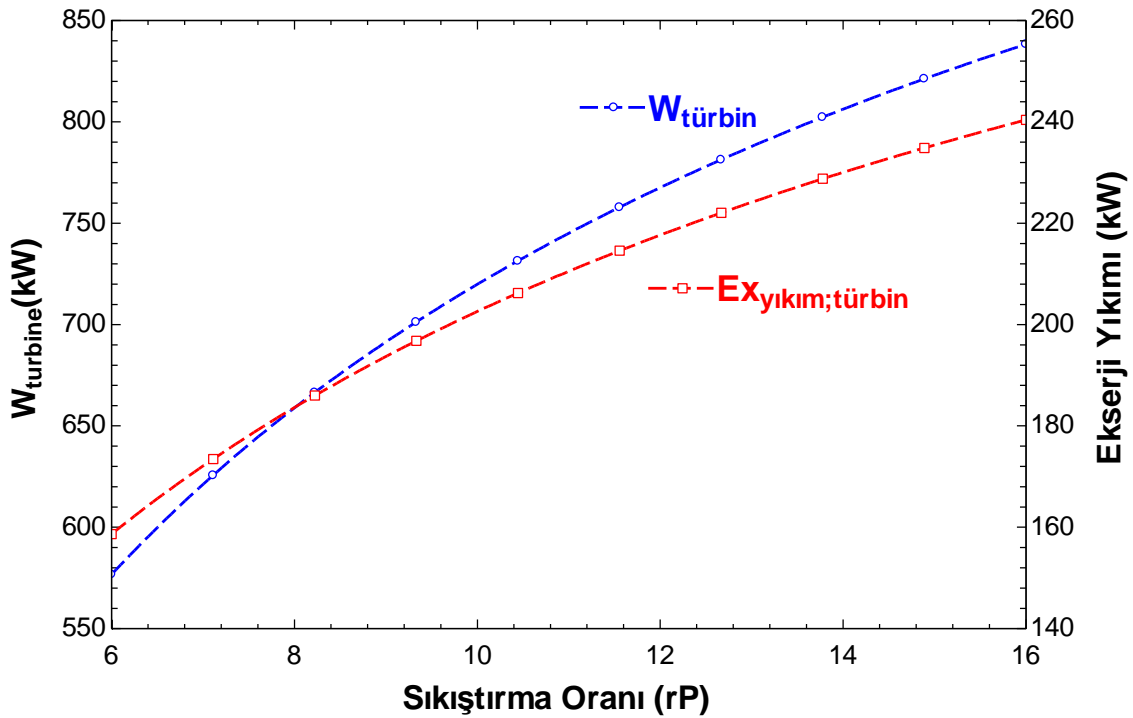
5. Araştırma Bulguları ve Tartışma (Result and Discussion)

Düşük kaynaklı jeotermal kaynakları bir ORC çevriminde ön ısıtma yapmak amacıyla düzenlenmiş bu çalışmada, güç üretiminin sağlandığı türbinde de kullanılan n-Pentane akışkanına ait, sistemde çalışma aralıklarının gösterildiği P-h diyagramı Şekil 2'de aşağıdaki gibi verilmiştir.



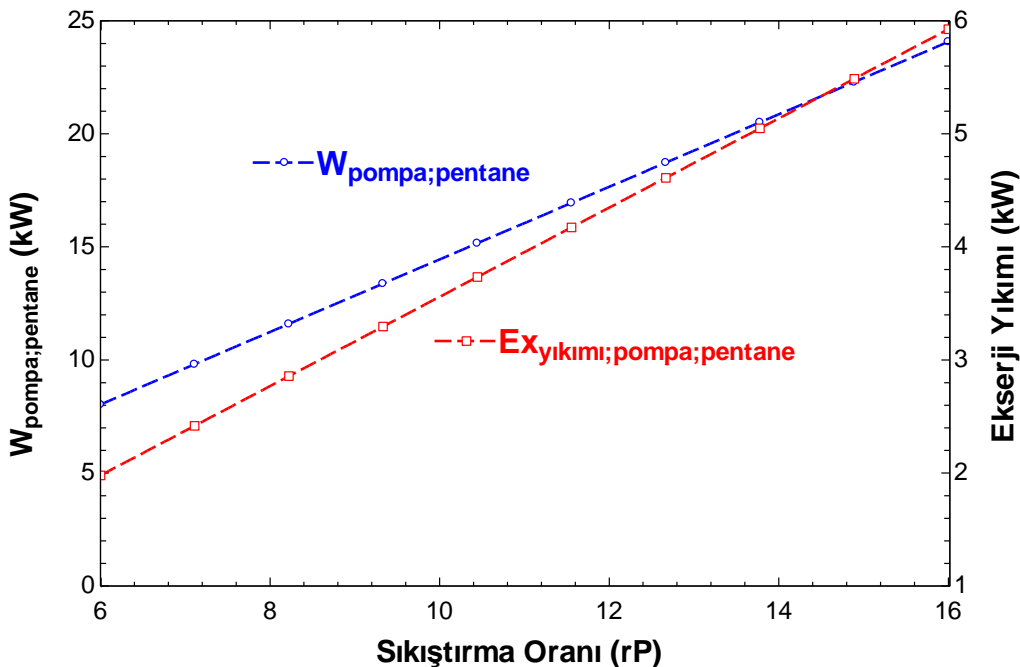
Şekil 2. Çevrim akışkanı n-Pentane'in P-h diyagramı (P-h diagram of the cycle fluid n-Pentane)

Yukarıdaki basınç aralığında çalışan bir çevrimde, sıkıştırma oranı çok önem taşımaktadır. Çevrim akışkanının sıkıştırma oranı arttıkça; doğal olarak türbine daha yüksek basınçta giren akışkan daha fazla güç üretimine sebep olacaktır. Ancak sıkıştırma oranının artırılması türbinde meydana gelecek entropi üretimin de arttıracığından dolayı, türbindeki ekserji yıkımı da buna bağlı olarak artacaktır. Türbinin sıkıştırma oranına bağlı güç üretimi ve ekserji yıkımını gösteren şekil, Şekil 3' te gösterilmiştir.



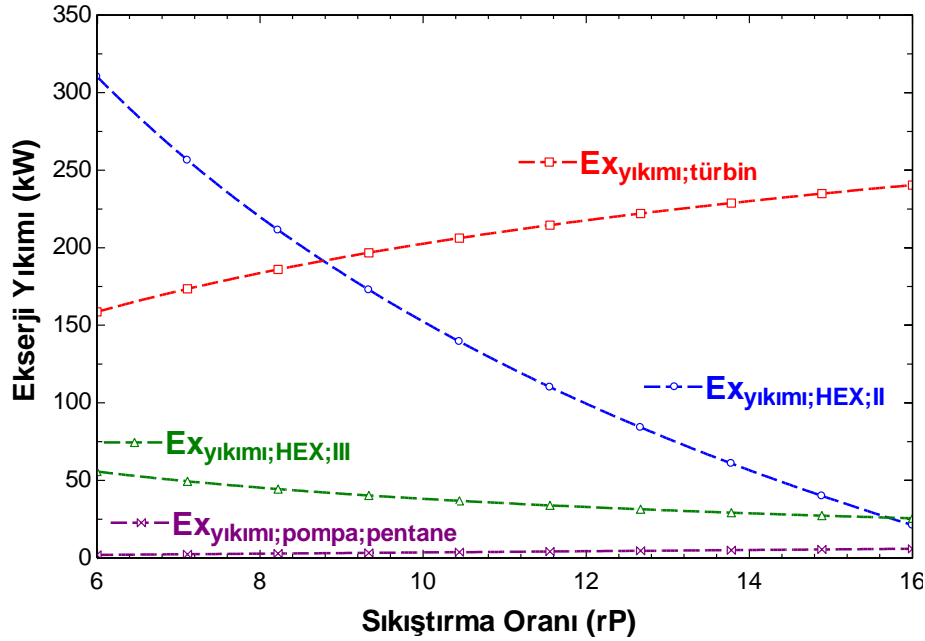
Şekil 3. Sıkıştırma oranına bağlı olarak güç üretimi ve Türbinin ekserji yıkım diyagramı
(Power generation and exergy destruction diagram of the turbine depending on the compression ratio)

Sıkıştırma oranına bağlı olarak güç üretiminin arttığı yukarıda görülmekteydi. Ancak bu sıkıştırma oranını sağlayacak sistem ekipmanı n-Pentane pompası olarak tanımlanan ORC pompasıdır. Doğal olarak sıkıştırma oranının artırmak, bu işlemi gerçekleştirecek olan pompanın çekeceği elektriksel gücünün de artmasına sebep olacaktır. Aynı zamanda buna paralel olarak pompa da üretilen entropi artışına bağlı, pompaya ait ekserji yıkımının da artmasına sebep olacaktır. Sistemdeki n-Pentane pompasının sıkıştırma oranına bağlı olarak güç tüketimindeki artışı ve pompaya ait ekserji yıkımındaki artışı gösteren diyagram Şekil 4 'te verilmiştir.



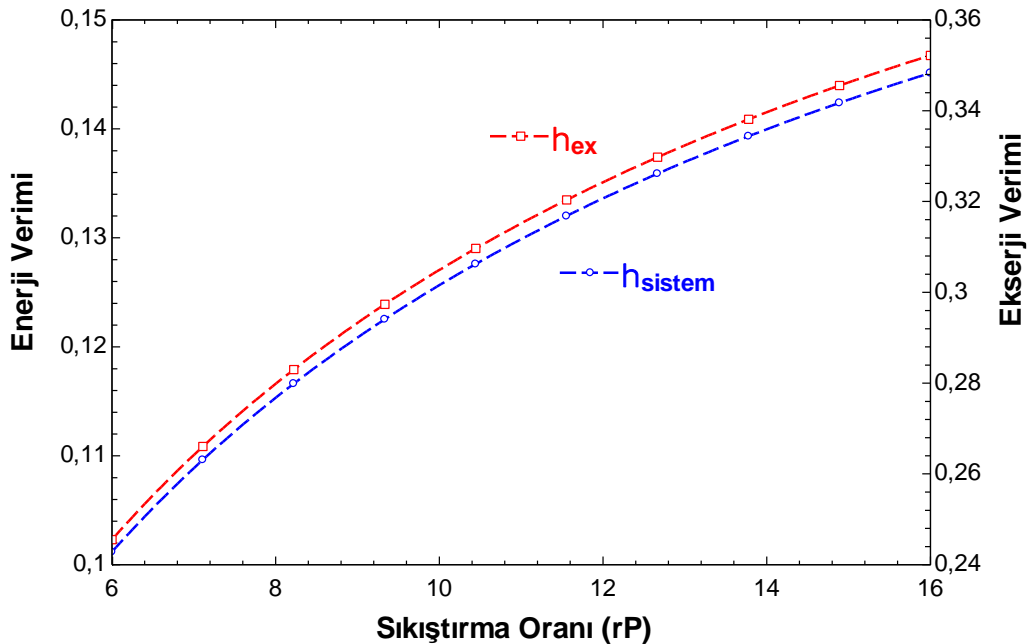
Şekil 4. Sıkıştırma oranına bağlı n-pentane pompasına ait güç tüketimi ve ekserji yıkım diyagramı
(Power consumption and exergy destruction diagram of n-pentane pump depending on compression ratio)

Sisteme ait ekipmanların, sıkıştırma oranı 14 olarak kabul edildiği hesaplamalarda, n-pentane pompasını 20 kW güç tüketimine karşılık olarak, türbinde üretilen güç miktarı ise 806,2 kW' tır. Bu sıkıştırma oranı ve bu orandaki değişimleri göz önüne aldığımızda tüm sistem ekipmanları da etkilenmektedir. Dolayısıyla sisteme ait ekipmanlardaki ekserji yıkımlarını da incelemek gerekmektedir. Bundan dolayı sıkıştırma oranının sistemin diğer ekipmanlarındaki ekserji yıkımlarına ait sonuçların grafiksel değerlendirmesi Şekil 5'te verilmiştir. Şekilde de görüldüğü gibi, türbinde ekserji yıkımı artarken, jeotermal kaynaktan ısının yağ hattına aktarılmasını sağlayan yani kazanda ısıtılacak olan yağın ön ısıtılmasını yapan ısı değiştiricisinde (HEX-I) sıkıştırma oranına bağlı olarak ekserji yıkımı azalmaktadır. Ayrıca terminol 72 yağının enerjisinin de aktarılmasını sağlayan ikinci ısı değiştiricisinde de (HEX-II) sıkıştırma oranına bağlı olarak ekserji yıkımı azalmaktadır.



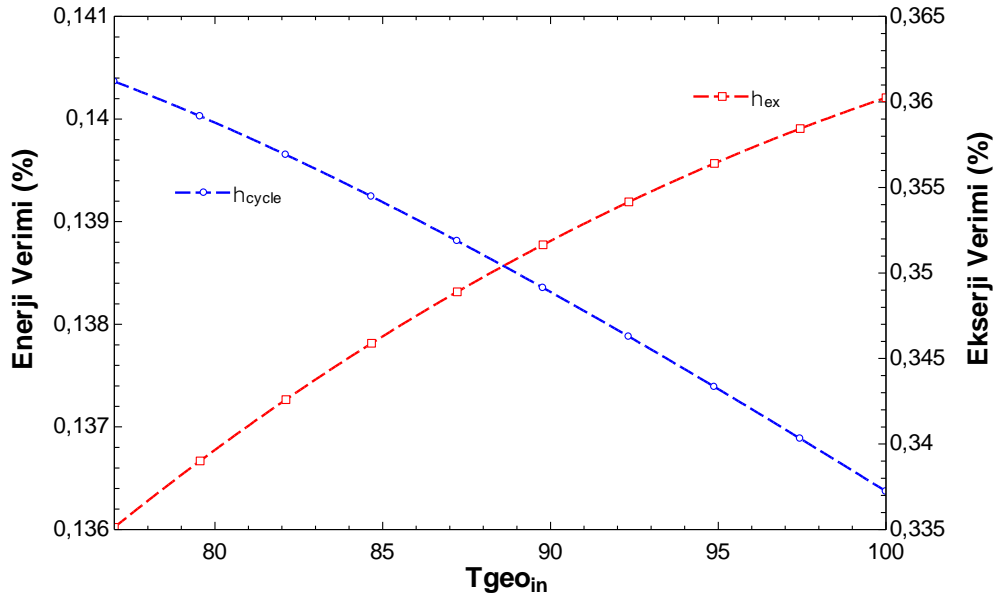
Şekil 5. Sıkıştırma oranına bağlı sistem ekipmanlarının ekserji yıkım diyagramı
(Exergy destruction diagram of system equipment depending on compression ratio)

Sıkıştırma oranı $rP=14$ için, sistemin birinci yasa verimi %14, ikinci yasa verimi ise %34 çıkmaktadır. Sıkıştırma oranı azaldığında, türbinde üretilen güç azalacağından sistemin enerji ve ekserji verimi de düşüş gösterecektir. Şekil 6' da sisteme ait sıkıştırma oranının enerji ve ekserji verimine etkisi görülmektedir.



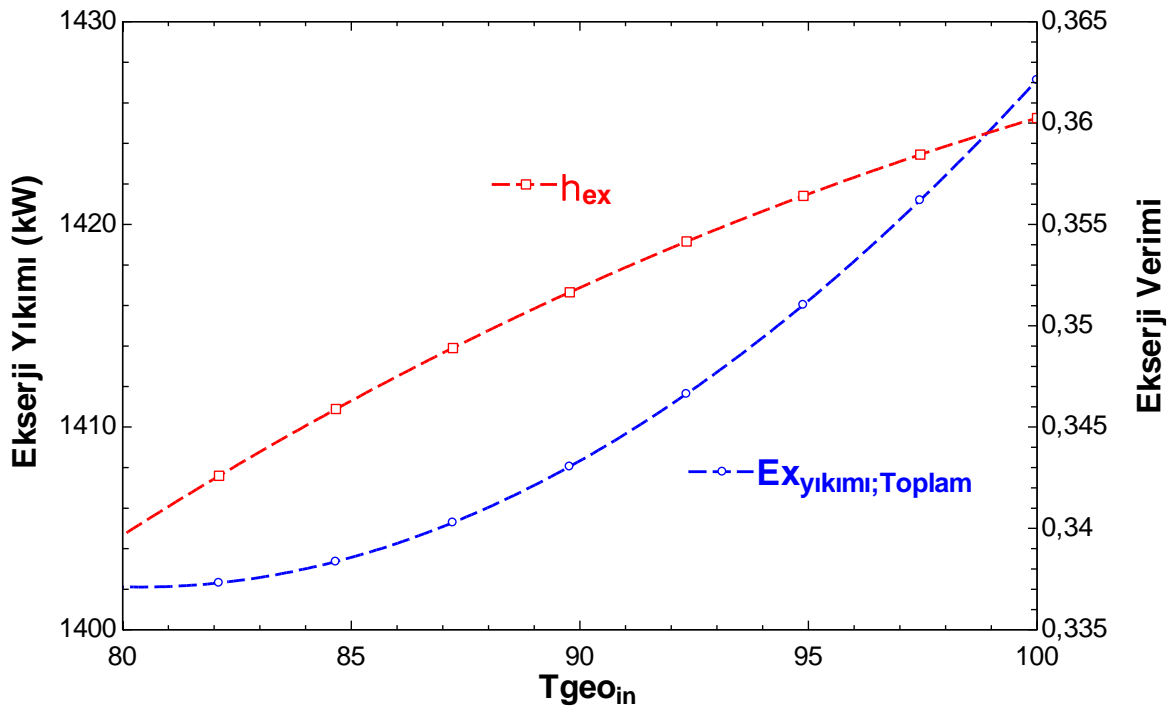
Şekil 6. Sıkıştırma oranına bağlı enerji ve ekserji verimleri
(Energy and exergy efficiencies depending on compression ratio)

Jeotermal kuyu suyu sıcaklığının 90 °C'den daha küçük olduğu kaynak sıcaklıklarında sistem verimini artırmak üzere mutlaka ilave kaynak girişi ile güç üretimi çalışmaları yapılmaktadır. Bu çalışma da jeotermal kuyu sıcaklığı 80 °C olan bir kuyu kaynağına, terminol 72 ile sıcaklık artışı sağlanarak bir ORC çevrimi incelenmektedir. Bu çevrimde türbin sıcaklığı 170 °C'ye kadar çıkılmaya çalışılmıştır. Üretim kapasitesinin 1MW civarlarında olabilmesi için yağ kazanı kapasitesi 4000 kW alınarak, güç üretimi 806,2 kW olarak hesaplanmıştır. Jeotermal kuyu sıcaklığının artması, sabit olan kazan kapasitesinden dolayı sistemin enerji veriminin azalmasına sebep olmaktadır. Sistemin jeotermal kuyu sıcaklığına bağlı enerji ve ekserji verim grafiği Şekil 7'de verilmiştir. Şekil 7 de görüldüğü gibi sistemde ön ısıtmanın sağlandığı jeotermal kuyu sıcaklığının artması çok küçük çapta enerji ve ekserji verimi değişikliklerine sebep olmaktadır.



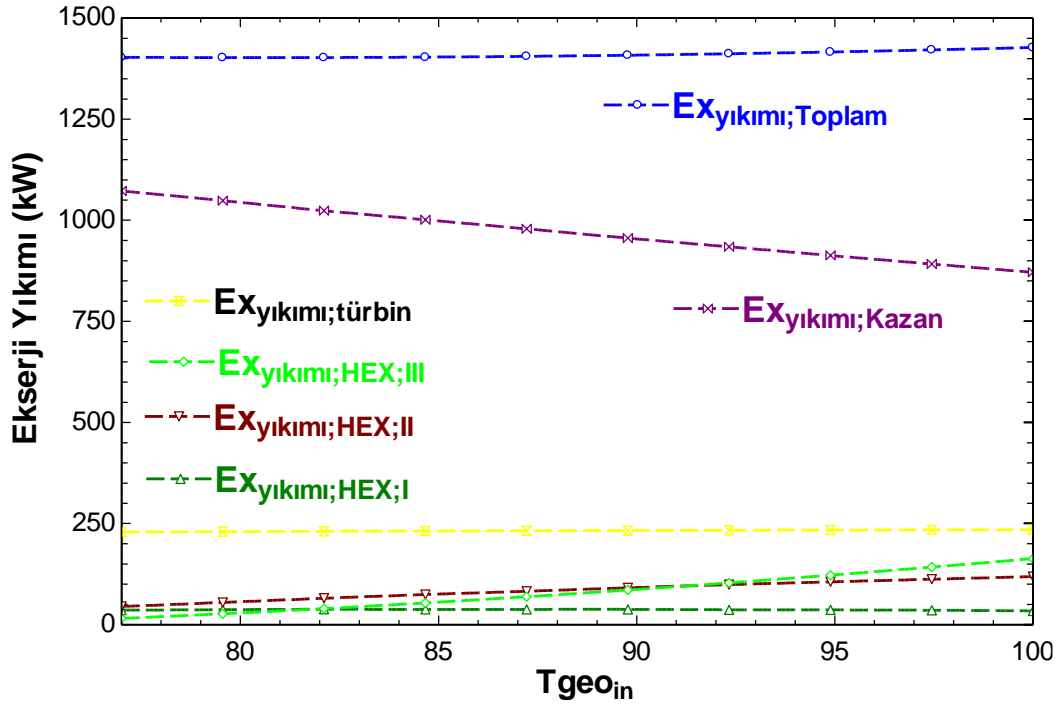
Şekil 7. Jeotermal kuyu sıcaklığının enerji ve ekserji verimine etkisi
(Effect of geothermal well temperature on energy and exergy efficiency)

Jeotermal kuyu sıcaklığının değişiminin sistemin ekserji verime ve toplam ekserji yıkımına etkisi Şekil 8'de verilmiştir. Şekil 8' de görüldüğü gibi düşük kuyu sıcaklığında sistemin ekserji verimi %34 civarında olmaktadır. Ekserji yıkımı ise, 1400 ile 1430 kW arasında kuyu sıcaklığına göre değişim göstermektedir.



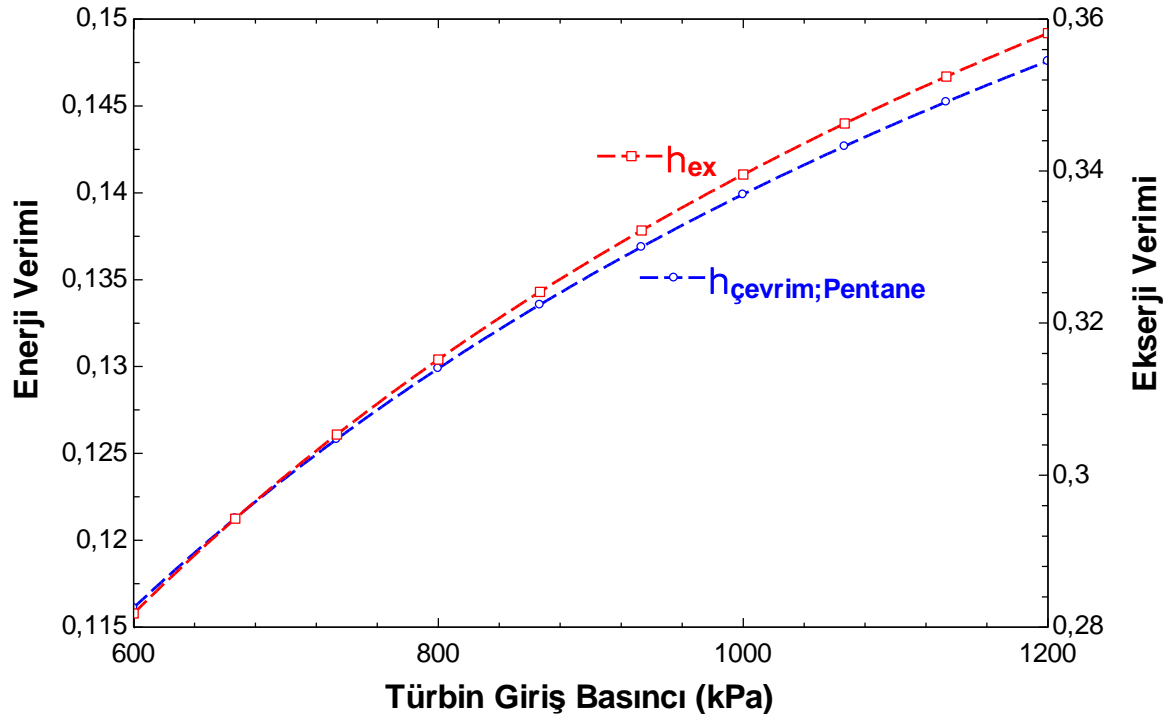
Şekil 8. Jeotermal kuyu sıcaklığının ekserji yıkımı ve ekserji verimine etkisi
(The effect of geothermal well temperature on exergy destruction and exergy efficiency)

Sistemin tüm ekipmanlarının ayrı ayrı ekserji yıkımlarına kuyu sıcaklığı açısından bakıldığında, en yüksek ekserji yıkımının kazanda olduğu görülmekte ve hatta kuyu sıcaklığının artışının kazana ek kazanç sağlamasından dolayı, sıcaklık artışının kazandaki ekserji yıkımına azaltıcı etkisi Şekil 9' da görülmektedir.



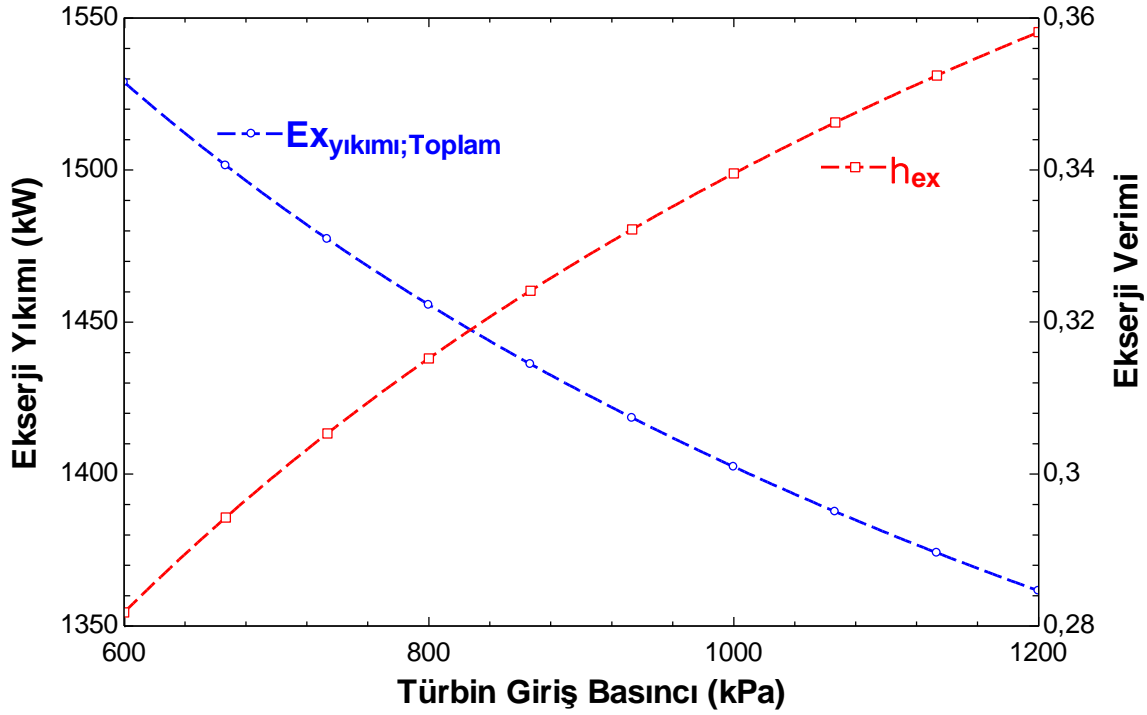
Şekil 9. Jeotermal kuyu sıcaklığının ekserji yıkımı ve ekserji verimine etkisi
(The effect of geothermal well temperature on exergy destruction and exergy efficiency)

Türbin giriş basıncının 600kPa -1200kPa aralığındaki değişiminin enerji verimini ve ekserji verimini arttırdığı Şekil 10 'da görülmektedir. N-pentane akışkanın 1000 kPa basınçta türbine girişinde sistem verimi %14 olarak görülmekte, buna bağlı olarak sistemin ekserji verimi de bakıldığında aynı basınçta %34 civarında olduğu aşağıda şekilde görülmektedir.



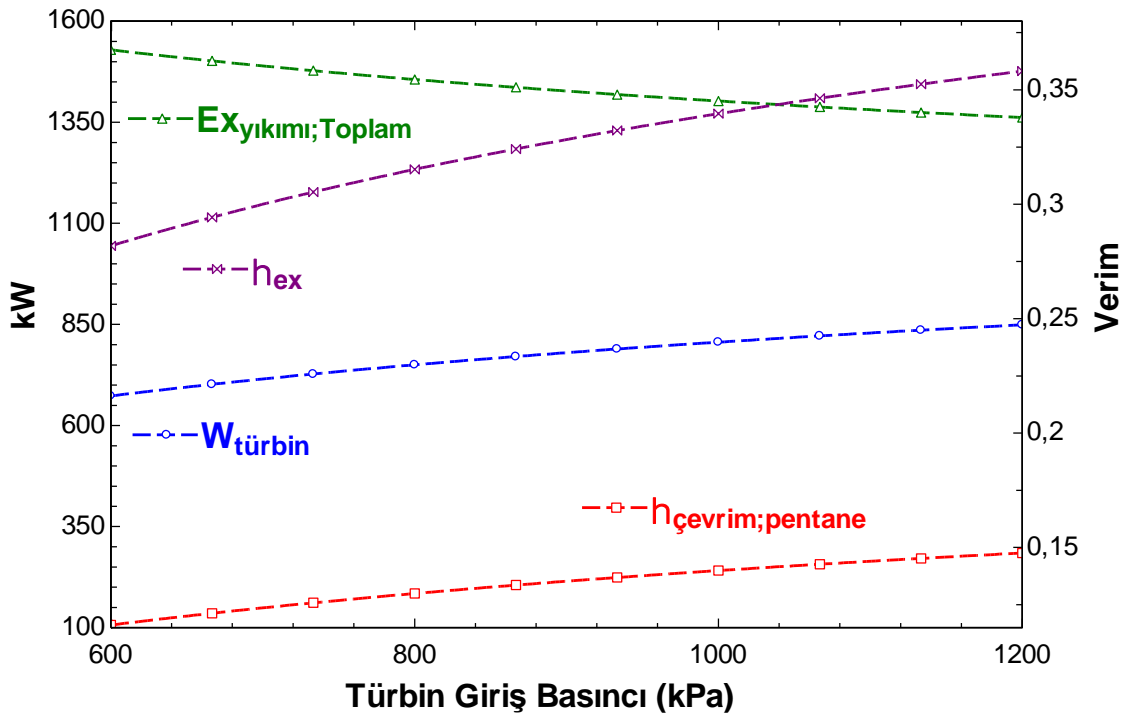
Şekil 10. Türbin giriş basıncının enerji ve ekserji verimine etkisi
(The effect of geothermal well temperature on exergy destruction and exergy efficiency)

Türbin giriş basıncının artırılması sistemin ekserji verimini artırırken buna bağlı olarak toplam ekserji yıkımının da azalmasına sebep olmaktadır. Türbinin giriş basıncının artırılmasının ekserji verimi ve toplam ekserji yıkımına etkisi Şekil 11’ de gösterilmiştir.



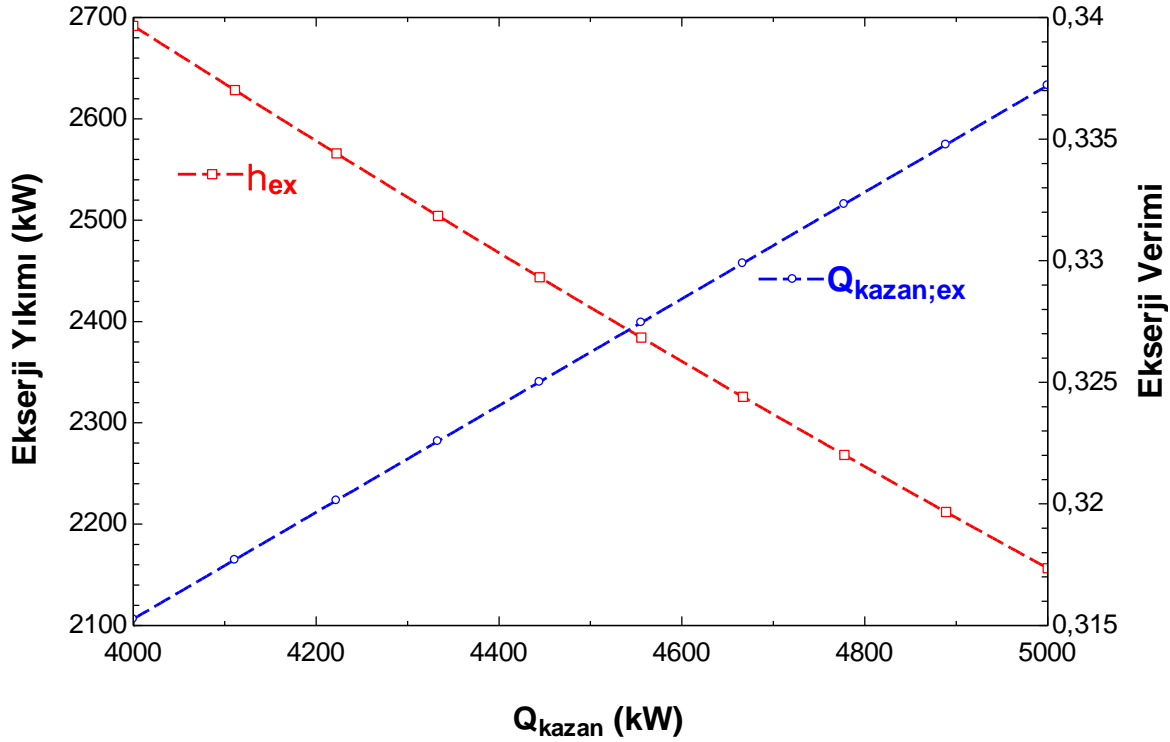
Şekil 11. Türbin giriş basıncının ekserji yıkımına ve ekserji verimine etkisi
(The effect of turbine inlet pressure on exergy destruction and exergy efficiency)

Türbin giriş basıncının artırılması sistemin güç üretimini de attırmaktadır. Dolayısıyla çıktı ürünü olarak kabul edilen türbin işi de artarak, sistemin enerji veriminin artmasına, buna da paralel olarak ekserji veriminin de artmasına sebep olmuştur. Bu artışlar istenilen artışlar olduğundan yani sistemin toplam entropisinde azalma görüldüğünden toplam ekserji yıkımı da azalmaktadır. Türbinin giriş basıncının; sistemin birinci yasa verimi, ikinci yasa verimi, güç üretimine etkisi ve ekserji yıkımına etkisi Şekil 12’de verilmiştir.



Şekil 12. Türbin giriş basıncının güç üretimi, ekserji yıkımı ve verimlere ait değişimi
(Variation of turbine inlet pressure for power generation, exergy destruction and efficiencies)

Düşük jeotermal kaynaklardan ön ısıtma yapılmak suretiyle güç üretiminin denendiği bu çalışmada, akışkanın ısıtılması amacıyla terminol 72 yağı kazanda ısıtılmaktaydı. Kazan kapasitesinin artırılmasının ekserji yıkımına ve ekserji verimine etkisi Şekil 13'te gösterilmiştir. Kazan kapasitesinin artması, en çok entropi üretiminin olduğu kazanda artışa sebep olacağından ekserji yıkımının 2000 kW seviyelerinden 2700 kW seviyelerine kadar çıkmasına sebep olacaktır. Buna bağlı olarak da sistemin ekserji veriminin de azaldığı görülecektir.



Şekil 13. Kazan kapasitesinin ekserji yıkımına ve ekserji verimlerine ait değişimi
(Variation of the boiler capacity of exergy destruction and exergy efficiencies)

Sistemin çalışma şartlarındaki toplam ekserji yıkımlarının ekipman bazında dağılımı Şekil 14.'de verilmiştir. Şekle göre en yüksek ekserji yıkımı %74 ile kazanda meydana gelmektedir. Çünkü ısıl girdinin maksimum düzeyde olduğu ekipman kazandır. Ekserji yıkım dağılım grafiğine Şekil 14'e bakıldığında ikinci sırada en fazla ekserji yıkımı %16 ile türbinde görülmektedir. Daha sonra sistemde kullanılan ısı değiştiricileri %9 ile gelmekte, yağ pompası ve n-pentane pompası da bunları %1 ile takip etmektedir.



Şekil 14. Sistem ekipmanlarının toplam ekserji yıkımlarının bazında dağılımı
(Distribution of system equipment by total exergy destruction)

4. Sonuçlar (Conclusions)

Bu çalışmada, düşük kuyu sıcaklığına sahip bir jeotermal destekli bir ORC çevrimi incelemiş, akışkan olarak n-pentane tercih edilmiştir. N-pentane akışkanının kazanda direkt olarak ısıtılması gerçek şartlarda zor olmasından dolayı, arada ısı taşıma işlemi yapabilecek Terminol 72 ısı transfer yağı seçilmiştir. Yağı kazanda ısıtmadan önce, jeotermal kuyudan alınan düşük kaynak ısı ile ön ısıtılmaya tabii tutulmuştur. Düşük sıcaklıklı jeotermal kuyunun analiz ve araştırmaları EES (Engineering Equation Solver) yazılımı ile yapılmıştır (Klein 2011).

Jeotermal kuyu suyu sıcaklığının 90°C'den daha küçük olduğu kaynak sıcaklıklarında sistem verimini artırmak üzere mutlaka ilave kaynak girişi ile güç üretimi çalışmaları yapılmaktadır. Bu çalışma da jeotermal kuyu sıcaklığı 80°C olan bir kuyu kaynağına, Terminol 72 ısı transfer yağı ile sıcaklık artışı sağlanarak bir ORC çevrimi incelenmiştir. Bu çevrimde türbin sıcaklığı 170°C'ye kadar çıkarılmaya çalışılmıştır. Yağ kazanı kapasitesi 4000 kW alınarak, güç üretimi 806.2 kW olarak hesaplanmıştır. Jeotermal kuyu sıcaklığının değişiminin sistemin ekserji verimine ve toplam ekserji yıkımına etkisi de incelenmiş 80 °C düşük kuyu sıcaklığında sistemin ekserji veriminin %34 olduğu, ekserji yıkımının ise, 1405kW olduğu görülmüştür.

Türbin giriş basıncının 600kPa -1200kPa aralığındaki değişiminin enerji verimini ve ekserji verimini arttırdığı görülmüştür. N-pentane akışkanının 1000 kPa basınçta türbine girişinde sistem verimi %14 olarak görülmekte, buna bağlı olarak sistemin ekserji verimi de bakıldığında aynı basınçta %34 civarında olduğu yapılan hesaplamalarda ortaya çıkmıştır.

Sisteme ait ekipmanların, sıkıştırma oranı 14 olarak kabul edildiği hesaplamalarda, n-pentane pompasını 20 kW güç tüketimine karşılık olarak, türbinde üretilen güç miktarı ise 806,2 kW' dır. Bu sıkıştırma oranı ve bu orandaki değişimleri göz önüne aldığımızda tüm sistem ekipmanları da bu sıkıştırma oranından etkilenmektedir. Dolayısıyla sisteme ait ekipmanlardaki ekserji yıkımlarını da ayrı ayrı incelemesi yapılmıştır. Türbinde ekserji yıkımı artarken, jeotermal kaynaktan ısının yağ hattına aktarılmasını sağlayan yani kazanda ısıtılacak olan yağın ön ısıtılmasını yapan ısı değiştiricisinde (HEX-I) sıkıştırma oranına bağlı olarak ekserji yıkımı azalmaktadır. Ayrıca terminol 72 yağının enerjisinin de aktarılmasını sağlayan ikinci ısı değiştiricisinde de (HEX-II) sıkıştırma oranına bağlı olarak ekserji yıkımının azaldığı görülmüştür. Sıkıştırma oranı azaldığında, türbinde üretilen güç azalacağından sistemin enerji ve ekserji verimi de düşüş göstermiştir. Sistemin tüm ekipmanlarının ayrı ayrı ekserji yıkımlarına kuyu sıcaklığı açısından bakıldığında, en yüksek ekserji yıkımının kazanda olduğu görülmektedir. Sistemin çalışma şartlarındaki toplam ekserji yıkımlarına ekipman bazında bakıldığında, en yüksek ekserji yıkımı %74 ile kazanda meydana gelmektedir. Çünkü ısıl girdinin ve buna bağlı olarak entropi üretiminin maksimum düzeyde olduğu ekipman kazandır. Ekserji yıkım dağılımına bakıldığında ikinci sırada en fazla ekserji yıkımı %16 ile türbinde görülmektedir. Bunu takiben sistemde kullanılan ısı değiştiricileri %9 ile gelmekte, yağ pompası ve n-pentane pompası da bunları %1 ile takip etmektedir.

Yapılan çalışmalarda genellikle jeotermal kaynaklı güç üretim sistemlerinde enerji verimleri sistem tasarımına bağlı olarak %8,5-11 arasında değişmekte olduğu literatürde görülmektedir (Ganjehsarabi vd., 2012 ;). Bu çalışmada ön ısıtma işlemi jeotermal kuyudan sağlandığından dolayı sistemin enerji veriminin %14' e kadar çıkabileceği gösterilmiştir.

Bundan sonraki çalışmalara da katkı olması amacıyla, düşük kaynaklı kuyuların da güç üretiminde ilave ekipmanlar kullanmak yardımıyla kullanılabilmesi ifade edilmiştir.

Çıkar Çatışması (Conflict of Interest)

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir. No conflict of interest was declared by the authors.

Kaynaklar (References)

- Aneke, M.C., Menkiti, M.C., 2016. Geothermal: History, Classification, and Utilization for Power Generation. *Alternative Energy and Shale Gas Encyclopedia*, 253-264.
- Atiz, A., Karakilcik, H., Erden, M., Karakilcik, 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.
- Başoğlu, Y., 2019. Environmental assessment of a binary geothermal sourced power plant accompanied by exergy analysis. *Energy Conversion and Management*, 195, 492-501.
- Bejan, A, Tsatsaronis. G, *Thermal Design and Optimization*. John Wiley & Sons, 1996.

- Benham, P., Arefi, A., Shafii, M.B., 2018. Exergetic and thermoeconomic analysis of a trigeneration system producing electricity, hot water, and fresh water driven by low-temperature geothermal sources. *Energy Conversion and Management*, 157, 266-276.
- Bertani, R., 2016. Geothermal power generation in the world 2010–2014 update report. *Geothermics*, 60, 31-43.
- Bina, S.M., Jalilinasrabad S., Fujii, H., 2018. Exergoeconomic analysis and optimization of single and double flash cycles for Sabalan geothermal power plant. *Geothermics*, 72, 74-82.
- Cetin, T. H., Kanoglu, M., Yanikomer, N., 2019. Cryogenic energy storage powered by geothermal energy. *Geothermics*, 77, 34-40.
- Chernikova, E.A., Glukhov, L.M., Krasovskiy, V.G., Kustov, L.M., Vorobyeva, M.G., Koroteev, A., 2015. Ionic liquids as heat transfer fluids: comparison with known systems, possible applications, advantages and disadvantages, *Russian Chemical Reviews*. 84 (8), 875-890.
- Cimsit, C., 2019. Jeotermal ısı kaynaklı organik rankine çevriminin (ORC) farklı organik akışkanlar için termodinamik analizi, *Isı Bilimi ve Tekniği Dergisi*. 39 (2), 169-177.
- Colonna, P., Casati, E., Trapp, C., Mathijssen, T., Larjola, J., Saaresti, T.T., Uusitalo, A., 2015. Organic Rankine Cycle Power Systems: From the Concept to Current Technology, Applications, and an Outlook to the Future. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 137 (10), 1-19.
- Dincer, I., Rosen, M. A. *Exergy: Energy, Environment and Sustainable Development*. Newnes, 2012.
- El-Emam, R.S., Dincer, I., 2013. Exergy and exergoeconomic analyses and optimization of geothermal organic Rankine Cycle. *Applied Thermal Engineering*, 59, 435-444.
- Ganjehsarabi, H., Gungor, A., Dincer, I., 2012. Exergetic performance analysis of Dora II geothermal power plant in Turkey. *Energy*, 46, 101-108.
- Islam, M.M., Hasanuzzaman, M., 2020. Introduction to energy and sustainable development. *energy for sustainable development*. 1-18.
- Jubori A.A., Daabo, A., Al-Dadah, R.K., Mahmoud, S., Ennil, A.B., 2016. Development of micro-scale axial and radial turbines for low-temperature heat source driven organic Rankine Cycle. *Energy Conversion and Management*, 130, 141-155.
- Kanoglu M., 2002. Exergy analysis of a dual-level binary geothermal power plant. *Geothermics* 31,709-724.
- Klein, S. A., *Engineering Equation Solver*, version 9.022-3D, F-Chart Software, 2011.
- Koroneos, C., Polyzakis, A., Xydis, G., Stylos, N., Nanaki, E., 2017. Exergy analysis for proposed binary geothermal power plant in Nisyros Island, Greece. *Geothermics*, 70, 38-46.
- Leonard, D.M., Michaelides, E.E., Michaelides, D.N., 2020. Energy storage need for the substitution of fossil power plants with renewables. *Renewable Energy*, 145, 951-962.
- Leveni, M., Manfrida, G., Cozzolino, R., Mendecka, B., 2019. Energy and exergy analysis of cold and power production from the geothermal reservoir of Torre Alfina. *Energy*, 180, 807-818.
- Nami, H., Nemati, A., Fard, F.J., 2017. Conventional and advanced exergy analysis of a geothermal driven dual fluid organic Rankine cycle (ORC). *Applied Thermal Engineering*. 122, 59-70.
- Yilmazoglu Z.M., 2016. Effects of the selection of heat transfer fluid and condenser type on the performance of a solar thermal power plant with techno-economic approach. *Energy Conversion and Management*, 111, 271-278.
- Qiu 2012. Selection of working fluids for micro-CHP systems with ORC. *Renewable Energy*, 48, 565-570.