



JEOTERMAL ISI KAYNAKLI ORGANİK RANKİNE ÇEVİRİMİNİN (ORC) FARKLI ORGANİK AKIŞKANLAR İÇİN TERMODİNAMİK ANALİZİ

Canan CİMSİT

Kocaeli Üniversitesi, Gölçük MYO, Gölçük-Kocaeli
ccimsit@kocaeli.edu.tr

(Geliş Tarihi: 22.10.2018, Kabul Tarihi: 03.07.2019)

Özet: Organik Rankine Çevrimleri düşük sıcaklık ve basınç altında alternatif enerji kaynaklarından (güneş enerjisi, jeotermal enerji ve atık ısı) elektrik enerjisi üretmek için kullanılan sistemlerdir. Organik Rankine Çevrimlerinde akışkan olarak çevre dostu olan soğutucu akışkanlar kullanılmaktadır. Bu çalışmada Organik Rankine Çevrimi (ORC) için ısı kaynağı olarak Ülkemiz için zengin bir potansiyel teşkil eden jeotermal enerji düşünülmüş olup, çevrimin teorik termodinamik analizi yapılmıştır. Çevrimde R-124 akışkanının kullanıldığı kabul edilerek kazan ve yoğunlaştırıcı sıcaklıklarının çevrim performansına etkisi incelenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre kazan sıcaklığı arttıkça güç çevrimi termal verimi de artmaktadır. Benzer şekilde yoğunlaştırıcı sıcaklığı artarken güç çevrimi termal verimi de azalmaktadır. Çalışmada ayrıca Organik Rankine Çevrimine uygun akışkan belirlemek amacıyla farklı organik akışkanlar için analiz yapılmıştır. Organik akışkan olarak R-134a, R-123, R-124, R-125, R-404A, R-407C, R-410A, R-600, R-600a ve R-290 seçilerek elde edilen Organik Rankine Çevrimlerinin performans, çevresel ve güvenlik etkilerinin karşılaştırılması yapılmıştır. Hesaplamalar Engineering Equation Solver (EES) programında yapılmıştır. Karşılaştırma sonuçlarından akışkanlar arasından en yüksek güç çevrimi termal verim değeri R-123 akışkanına ait iken, en düşük ise R-125 akışkanına ait olduğu görülmüştür. R-600, R-600a ve R-290 akışkanlarının diğer akışkanlara göre çevresel açıdan değerlendirilmesinde kullanılacak en uygun akışkan oldukları görülmüştür. Ancak bu akışkanların yanıcılıklarından dolayı gerekli güvenlik önlemlerine ihtiyaç duyulmaktadır.

Anahtar kelimeler: Organik Rankine Çevrimi, Organik Akışkanlar, Termodinamik Analiz.

THERMODYNAMIC ANALYSIS OF GEOTHERMAL HEAT SOURCED ORGANIC RANKINE CYCLE FOR DIFFERENT ORGANIC FLUIDS

Abstract: Organic Rankine Cycles are systems used to generate electricity from alternative energy sources (solar energy, geothermal energy and waste heat) under low temperature and pressure. In Organic Rankine Cycles, environmentally friendly refrigerants are used. In this study, geothermal energy which is a rich potential for our country as a heat source for Organic Rankine Cycle (ORC), has been considered and theoretical thermodynamic analysis of the cycle has been made. It is assumed that R-124 fluid has been used in the cycle and analyzed according to different boiler and condenser temperatures in order to examine the effect on the cycle performance. According to the results, thermal efficiency of power cycle increases as boiler temperature increases. Similarly, while the condenser temperature increases, the thermal efficiency of the power cycle decreases. In addition, different organic fluids have been analyzed in order to determine the suitable fluid for the Organic Rankine Cycle in the study. A comparison of the performance, environmental and safety effects of Organic Rankine Cycles obtained by selecting R-134a, R-123, R-124, R-125, R-404A, R-407C, R-410A, R-600, R-600a and R-290 as organic fluid has been performed. Calculations have been made in Engineering Equation Solver (EES) program. From the comparison results, R-123 has the maximum power cycle thermal efficiency while R-125 has the minimum. It has been observed that R-600, R-600a and R-290 fluids are most suitable fluids for the environmental evaluation according to other fluids. However, these fluids need safety precautions, owing to their flammability.

Keywords: Organic Rankine Cycle, Organic Fluids, Thermodynamic Analysis.

SEMBOLLER

GWP Global Warming Potential-Küresel ısınma potansiyeli
g Yerçekimi ivmesi [m/s^2]
h Entalpi [kJ/kg]
H Basma yüksekliği [m]
LFL Lower flammability limit- Alt yanma limiti (havadaki % hacim)

\dot{m} Kütleli debi [kg/s]
ODP Ozone Depletion Potential- Ozon tabakası delme potansiyeli
OEL Occupational Exposure Limit-En yüksek maruz kalmabilme limiti (PPMv)
P Basınç [bar]
 \dot{Q} Isıl güç [kW]

\dot{Q}	Debi [m^3/s]
T	Sıcaklık [$^{\circ}C$]
\dot{W}	İş [kW]

Yunan harfleri

η_{is}	İzentropik verimi
ρ	Yoğunluk [kg/m^3]

Alt indisler

ζ	Çıkış
---------	-------

g	Giriş
jss	Jeotermal sıcak su
K	Kazan
ORC	Organik Rankin Çevrimi
p	Pompa
ss	Soğutma suyu
T	Türbin
$yoğ$	Yoğuşturucu

GİRİŞ VE AMAÇ

Organik Rankine Çevrimi günümüzde yaygın olarak kullanılan bir sistemdir. Sistemde su yerine kaynama noktası düşük olan akışkanlar kullanılmaktadır. Böylece düşük sıcaklıklardaki çeşitli ısı kaynaklarının kullanımıyla enerji üretimi mümkün olabilmektedir.

Gelecekteki fosil yakıt rezervleri tükenmesi ve çevremizin dramatik tahribatı konusundaki artan endişeler, düşük sıcaklıktaki ısı geri kazanımı için ORC teknolojisini ortaya çıkarmıştır (Tchanche *vd.*, 2014). Düşük sıcaklıktaki ısı kaynaklarından elektrik üretmek için önerilen bir dizi yeni çözüm vardır. Bunların arasında ORC çok potansiyelli bir adaydır ve biyokütle enerjisi, güneş enerjisi, okyanus termal enerji dönüşümü (OTEC), jeotermal enerji, atık ısı gibi pratik endüstriyel uygulamalarda kullanılmaktadır (Kuo *vd.*, 2011). Düşük ve orta sıcaklıklardaki ısı kaynaklarının değerlendirildiği en önemli sistemlerden birisi de ORC'dir. Kullanılan donanımlar bakımından buharlı Rankine çevrimleri ile aynı olan ORC, buharlı çevrimlerden temel farkı kullanılan çevrim akışkanıdır. Buharlı Rankine çevrimlerinde su buharı kullanılmakta iken ORC'de organik akışkanlar kullanılmaktadır. Organik akışkanlar su ile kıyaslandığında daha düşük sıcaklıklarda kızgın buhar fazına geçebildiklerinden dolayı daha düşük sıcaklıklarda çevrimin çalışmasını mümkün kılmaktadır (Bilgiç *vd.*, 2016). Günümüzde ORC teknolojisi jeotermal uygulamalarda, güneş enerji santrallerinde, biyokütle uygulamalarında ve atık ısıdan elektrik enerjisinin üretildiği farklı uygulamalarla birlikte son yıllarda gemilerde yaygın kullanım olanakları sunmaktadır (Konur *vd.*, 2017). Düşük sıcaklıklarda ($<150^{\circ}C$) tercih edilen teknoloji ORC'dir. Su ve yüksek basınçlı buhar yerine, organik akışkan kullanıldığı için böyle adlandırılmaktadır. ORC teknolojisinde sudan daha düşük sıcaklıkta kaynayan, yüksek moleküler ağırlıklı bir sıvılar kullanılmaktadır (Özden ve Paul, 2011).

ORC ile ilgili olarak literatürde teorik ve deneysel olarak birçok çalışmalar sunulmuştur. Tchanche *vd.* (2009), düşük sıcaklıklı güneş enerjisi kaynağı kullanan ORC' de akışkan olarak seçilen farklı akışkanların termodinamik özelliklerini ve performanslarını analiz etmişlerdir. Karşılaştırma için verim, hacim, kütleli debi, basınç, zehirlilik, yanıcılık, ODP ve GWP değerlerini kullanmışlardır. İncelenen 20 akışkandan R-134a, küçük ölçekli güneş uygulamaları için en uygun olduğunu, R-152a, R-600a, R-600 ve R-290 cazip performanslar

sunmakta olup, ancak yanıcılıklarından dolayı güvenlik önlemlerine ihtiyaç duymakta olduğunu belirtmişlerdir. Wei *vd.* (2007), egzoz ısı ile çalışan ve çalışma akışkanı olarak HFC-245fa (1,1,1,3,3-pentafloropropan) kullanan bir ORC'nin performans analizini yapmışlardır. Egzoz ısı kullanımı mümkün olduğunca yükseltmek sistemin net gücünü ve verimliliğini artırmanın iyi bir yol olduğunu belirtmişlerdir. Wang *vd.* (2011), farklı çalışma akışkanlarının performansını Matlab'da REFPROP ile birlikte kurulan bir termodinamik model kullanılarak analiz etmişlerdir. Dokuz farklı saf organik çalışma akışkan seçilmiştir. R-11, R-141b, R-113 ve R-123 akışkanlarının diğer akışkanlara göre biraz daha yüksek termodinamik performans göstermekle birlikte, R-245fa ve R-245ca akışkanlarının motor atık ısı geri kazanım uygulamaları için en çevre dostu çalışma akışkanları olduklarını belirtmişlerdir. Yamamoto *vd.* (2001), çalışma akışkanı olarak düşük sıcaklık değerlerindeki ısı kaynakları kullanmak için düşük kaynama noktasına ve düşük gizli ısıya sahip olan organik bir akışkan kullanmışlardır. Optimum çalışma koşullarını tahmin etmek için bir ORC'nin sayısal bir simülasyon modelini yapmışlardır. Çalışmada bir deney aparatı da yapılmıştır. Sayısal simülasyondan, HCFC-123'ün geleneksel bir çalışma akışkan olan sudan daha yüksek türbin gücü verdiği ve türbin girişindeki doymuş buharın en iyi performansı vereceğini öne sürmüşlerdir. Sun ve Li (2011), R-134a'yı çalışma akışkanı olarak kullanan bir ORC'nin ayrıntılı bir analizini yapmışlardır. Tesis performansını değerlendirmek ve optimize etmek için evaporatör, hava soğutmalı kondenser, türbin ve pompa için matematiksel modeller geliştirmişlerdir. Rayeng ve Tao, (2011), bir güneş enerjisi destekli ORC çalıştırmak için en uygun akışkanları bulmak amacıyla kapsamlı bir çalışma akışkanları listesini analiz etmişlerdir. Benzer çalışma koşullarıyla güneş enerjisi destekli Rankine çevrimlerinde kullanıldığı zaman çalışma akışkanlarının özelliklerini karşılaştırmak için bir prosedür önermişlerdir. Akışkanları iki gruba ayırmışlardır: soğutucu akışkanlar ve soğutucu olmayanlar. Güneş kolektörleri kategorilerine dayanarak, düşük veya orta sıcaklıktaki güneş kolektörleri kullanan güneş enerjisi destekli ORC'de 11 akışkanın kullanılmasını önermişlerdir. Hesaplama sonuçlarında seçilen akışkanlar için, kolektör veriminin %70'ten %100'e yükseltilmesi durumunda, kolektör veriminin iyileştirilmesi yoluyla tersinmezliğin azaltılması ve ekserji verimliliğinin artırılması için teorik sınırların sırasıyla %35 ve %5 olduğunu göstermişlerdir. Hettiarachchi *vd.* (2007), düşük sıcaklıklı jeotermal ısı

kaynaklarını kullanan ORC için uygun maliyetli bir optimum tasarım kriteri sunmuşlardır. Toplam eşanjör alanının net güç çıkışına oranını, amaç fonksiyonu olarak kabul etmişlerdir. Buharlaştırma ve yoğunlaşma sıcaklıkları, jeotermal ve soğutma suyu hızları optimizasyon yönteminde değişkenlik gösterir. Çalışma akışkanları olarak seçilen amonyak, HCFC123, n-Pentane ve PF5050 için optimum çevrim performansının bir karşılaştırma ve değerlendirme çalışması yapılmış olup, amonyağın minimum amaç fonksiyonuna ve maksimum jeotermal su kullanımına sahip olduğunu belirtmişlerdir. Ekserji analizinde amonyak çevriminin verimliliğinin optimizasyon sürecinde diğer çalışma akışkanlarından daha fazla tehlikeye atıldığını göstermişlerdir. Ayrıca HCFC 123 ve n-Pentan akışkanlarının PF5050 akışkanından daha iyi bir performansla sahip olduğunu belirtmişlerdir. Acar ve Aslan (2018), güneş ve jeotermal enerji destekli ORC'nin termodinamik analizini yapmışlardır. Analizde Simav jeotermal sahasını ısı kaynağı olarak ele almışlardır. Güneş kolektörleri ve ısı enerji depolama tankını sisteme ilave etmişlerdir. ORC'de akışkan olarak R-600a akışkanını kullanmışlardır. Çalışma sonucunda jeotermal enerji kaynaklı ORC'nin enerji ve ekserji verimliliği güneş enerjisinin birleştirilmesi ile azaltılmış ancak sistemin net güç çıkışı arttığı sonucunu belirtmişlerdir. Kong *vd.* (2019), düşük sıcak ısı kaynaklarına sahip bir R245fa akışkan ile çalışan ORC'nin teorik termodinamik analizini yapmışlardır. Analizde ORC için sıcak su, doymuş buhar ve birleşik sıcak su/doymuş buhar olan farklı ısı kaynakları kullanılmıştır. Isı kaynağı sıcaklığı 80-110°C arasında ve yoğunlaşma sıcaklığı 40°C'de sabit tutmuşlardır. Birleşik sıcak su/doymuş buhar ısı kaynağının en yüksek ekserji verimliliğini sağladığını bunu doymuş buhar ve sıcak su ısı kaynaklarının takip ettiğini belirtmişlerdir. Javanshir ve Sarunac (2017), çevrim performansı üzerindeki çalışma parametrelerinin etkisini belirlemek ve en iyi çalışma akışkanını seçmek için çeşitli çalışma akışkanları için çeşitli çalışma koşullarında basit bir kritik ve süper kritik ORC'nin termodinamik performansı analiz etmişlerdir. Çalışmalarında kuru bir çalışma akışkanla çalışan bir ORC'nin türbin giriş sıcaklığındaki artış ile termal verimin düştüğünü ayrıca izentropik çalışma akışkanlarıyla çalışan bir ORC'nin verimliliğinin kuru ve ıslak akışkanlara kıyasla daha yüksek olduğunu ve daha yüksek özgül ısı kapasitesine sahip çalışma akışkanlarının daha yüksek çevrim net güç çıkışı sağladığını belirtmişlerdir. Özahı *vd.* (2017), enerji geri kazanımı çerçevesinde bir belediye katı atık santraline adapte edilmiş ORC' de kullanılabilir bazı farklı organik akışkanların enerji ve ekserji analizlerini yapmışlardır. Bazı organik akışkanların, R141b, izobütan, R245fa, n-pentan ve n-heksanın optimal çalışma koşulları ASPEN ve EES yazılım programları ile değerlendirmişlerdir. Maksimum net güç çıkışı, n-heksan organik akışkanın kullanıldığında elde edildiğini ayrıca en yüksek ekserji verimine n-heksan sahipken, R245fa akışkanının ise en düşük ekserji verimine sahip olduğunu belirtmişlerdir.

Fosil yakıtlı enerji kaynaklarının belli bir süre içinde bitecek olması ve yeni rezervlerin üretiminin oldukça

pahalı olması, alternatif yeni kaynakların bulunmasını zorunlu kılmaktadır. Bu konuda başta AB ülkeleri ile ABD ve Japonya gibi gelişmiş dünya ülkeleri araştırma-geliştirme (AR-GE) çalışmalarına oldukça yüksek miktarlarda maddi kaynak ayırmaktadırlar. Bilim adamları alternatif enerji kaynakları ile ilgili çalışmalarda, sırası ile üretilen enerjinin ekonomik olması, uzun vadede enerji açığını büyük ölçüde kapatması, ülkeyi enerji açısından dışa bağımlılıktan kurtarması ve çevreyi en az şekilde kirletmesi konularını göz önünde bulundurmaktadır. Ülkemiz açısından yukarıda belirtilen hususlar dikkate alındığında alternatif enerji kaynaklarının önemi ortaya çıkmaktadır (Etemoğlu *vd.*, 2006). Türkiye'nin enerji potansiyelini fosil ve yenilenebilir enerji kaynakları olmak üzere iki bölüm halinde incelenebilir. Maden kömürü, linyit, asfaltit, bitümler, petrol ve doğal gaz ülkede bulunan fosil enerji kaynaklarıdır. Ancak Türkiye linyit dışında bu kaynak türleri açısından zengin bir ülke değildir. Yenilenebilir enerji kaynaklarından ise hidrolik, rüzgar, güneş, jeotermal ve biyokütle enerjisi açısından önemli potansiyeli bulunmaktadır (Yılmaz, 2012). Ülkemiz, coğrafi konumu nedeniyle sahip olduğu güneş enerjisi potansiyeli açısından birçok ülkeye göre şanslı durumdadır. Güneşten dünyaya saniyede yaklaşık olarak 170 milyon MW enerji gelmektedir. Türkiye'nin yıllık enerji üretiminin 100 milyon MW olduğu düşünülürse bir saniyede dünyaya gelen güneş enerjisi, Türkiye'nin enerji üretiminin 1.700 katıdır (Varınca ve Gönüllü, 2006). Türkiye, dünyanın 7. büyük jeotermal enerji potansiyeline sahiptir (Koç ve Şenel, 2013). Alp-Himalaya tektonik kuşağı üzerinde olan ülkemiz jeotermal kaynaklar açısından oldukça zengin bir konumdadır. Türkiye'de termal suların dağılımı fay hatlarının ve üçüncül-dördüncül volkanların dağılımı ile paralellik gösterir. Türkiye'de 40°C'nin üzerinde jeotermal akışkan içeren 140 adet jeotermal saha bulunmaktadır. Bunlardan Aydın-Germencik (200-232°C), Denizli-Kızıldere (200-212°C), Çanakkale-Tuzla (173°C), Aydın-Salavatlı (171°C) elektrik üretimine uygun, diğerleri ise merkezi ısıtmaya uygundur (Cemek *vd.*, 2005). Jeotermal akışkanlar; sıcaklıklarına göre elektrik üretimi ve doğrudan uygulamalar olmak üzere iki kategoride değerlendirilmektedir. Genellikle jeotermal akışkanlardan; yüksek sıcaklıkta olanlar (>150°C) elektrik üretiminde, orta sıcaklık (90°C-150°C) ile düşük sıcaklıkta olanlar ise doğrudan uygulamalarda kullanılmaktadır. Jeotermal enerji kullanımındaki son yıllardaki gelişim, düşük sıcaklıklı kaynaklardan (<150°C) elektrik üretimini mümkün hale getirmiştir. Bu nedenle, ülkemizdeki jeotermal sahaların yaklaşık % 95'inin düşük ve orta entalpili olmasından dolayı düşük sıcaklıktaki jeotermal akışkanlardan elektrik üretimine imkan sağlayan yeni teknolojilerin kullanımı üzerinde durulmaktadır. Bu teknolojilerde ise, kapalı Rankine çevrimi ile birlikte ikinci bir akışkan kullanılmakta olup ORC ve Kalina çevrimleri bu sistemlerin en güzel örneklerindedir (Arslan ve Köse, 2006).

Literatür çalışmaları, ORC' de düşük ve orta sıcaklıklardaki ısı kaynaklarından elektrik üretiminin mümkün olduğunu belirterek bu sistemlerin verimlerini artırma metodlarını sunmaktadır. Türkiye yukarıda da

belirtildiği gibi jeotermal ve güneş enerjisi potansiyeli bakımından zengin konumunda olup, kullanımı oldukça düşük düzeydedir. Bunun yanında birçok sanayi tesislerinde mevcut olan ve çok çeşitlilik gösteren atık ısı enerji kaynakları bulunmaktadır. Bu kapsamda bu çalışmada jeotermal, güneş ve atık ısı enerji kaynaklarımızın değerlendirilerek enerji üretilmesi amacıyla teorik olarak ORC analiz edilmiştir. Analizde ORC'nin ısı kaynağı olarak jeotermal enerji düşünülmüş olup, çevrimin verimini arttırmak amacıyla farklı organik akışkanlar seçilerek bunların performans, çevre ve güvenlik değerleri göz önüne alınarak karşılaştırılması yapılmıştır. Çalışmada organik akışkan olarak R-134a, R-123, R-124, R-125, R-404A, R-407C, R-410A, R-600, R-600a ve R-290 seçilmiştir.

ORGANİK RANKİNE ÇEVİRİMİ (ORC)

ORC pompa, buharlaştırıcı (kazan), türbin ve yoğuşturucudan oluşur (Şekil 1). Çevrimde kullanılan organik akışkan pompa aracılığıyla basınçlandırılarak buharlaştırıcıya gönderilir, buharlaştırıcı olarak kullanılan eleman bir ısı değiştiricidir, yenilenebilir bir kaynaktan alınan ısıyı, organik akışkana aktarır. Bu işlemler sonrasında organik akışkan yüksek sıcaklık ve basınca geçmiş olur. Ardından türbine gönderilerek mekanik işe dönüştürülür. Daha sonra yoğuşturucuya dönerek tekrar sıvı hale gelir. Çevrim bu döngüde devam eder (Ergün vd., 2016).

Termodinamik Analiz

Bu bölümde ORC'nin R-124 akışkanının kullanıldığı kabulü ile teorik olarak analizi yapılmıştır. Analizde ORC'nin ısı kaynağı olarak jeotermal enerji

düşünülmüştür. Hesaplamalarda Engineering Equation Solver (EES) programı kullanılmıştır.

ORC'nin termodinamik analizine temel oluşturacak aşağıda belirtilen birtakım kabuller yapılmıştır, bunlar:

- Kazan ve yoğuşturucu da iş etkileşimi yoktur.
- Türbin ve pompadaki hal değişimleri izentropik kabul edilebilir.
- Çevrimde dolaşan akışkanın debisi sabittir.

ORC'nin genel kütle ve sistem elemanları için enerji dengesi aşağıdaki denklemlerle elde edilebilir (Yamankaradeniz vd., 2002):

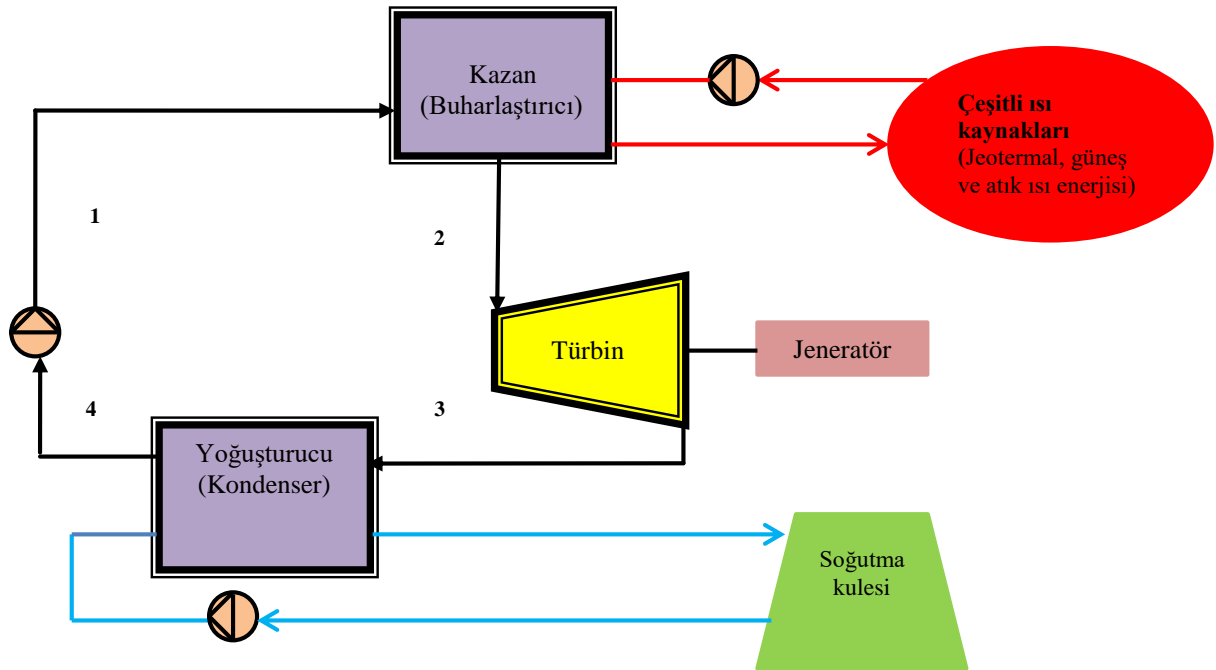
$$\sum \dot{m}_g = \sum \dot{m}_ç \quad (1)$$

$$\dot{Q} - \dot{W} = \sum \dot{H}_ç - \sum \dot{H}_g \quad (2)$$

ORC'nin enerji denklıkları ve güç çevrimi termal verimi Tablo 1'de verildiği gibidir.

Organik Rankine Çevrimi için enerji kaynağı

Yukarı analiz edilen ORC için gerekli olan ısı enerjisinin düşük ve orta sıcaklık jeotermal sahalarından biri olan Salihli Jeotermal Sahası'ndan (bu sahadaki sıcaklık 104°C ve debi 150 kg/s değerindedir (Satman, 2007)) karşılanabilmesi mümkün olabilmektedir. ORC düşük ve orta sıcaklıklardaki jeotermal kaynaklardan elektrik elde etmek için etkili bir yöntemdir. Jeotermal enerji kaynaklarımızın dışında zengin güneş enerjisi potansiyelimizle birlikte birçok sanayi tesislerindeki atık ısı enerji kaynaklarımızın da değerlendirilerek ORC'de enerji üretimi mümkün olabilmektedir.



Şekil 1. Organik Rankine Çevrimi.

Tablo 1. Analiz edilen Organik Rankine Çevriminin termodinamik eşitlikleri.

Bileşen	Enerji Denklemi	Denklem No
Yoğuşturucu (Kondenser)	$\dot{Q}_{yoğ} = m_1 \cdot (h_4 - h_3)$	(3)
Kazan (Buharlaştırıcı)	$Q_K = m_1 \cdot (h_2 - h_1)$	(4)
Türbin	$\dot{W}_T = m_1 \cdot (h_2 - h_3)$	(5)
ORC Pompası	$\dot{W}_{ORC-p} = m_1 \cdot (h_4 - h_1)$	(6)
Güç çevrimi termal verimi	$\eta_{ORC-güç} = \frac{\dot{W}_T - \dot{W}_{ORC-p}}{\dot{Q}_K}$	(7)

Sistemin çalışma koşulları olarak kazan sıcaklığı $T_K=80^\circ\text{C}$, yoğuşturucu sıcaklığı $T_{yoğ}=40^\circ\text{C}$ ve kazan kapasitesi 100 kW, türbinin izantropik verimi $\eta_{is,T}=0.90$ ve pompanın izantropik verimi $\eta_{is,P}=0.80$ alınmıştır. Kararlı durum için çevrimin kütleli debisi 0.647 kg/s olarak belirlenmiştir. ORC’de giriş ve çıkış sıcaklıkları 95°C ve 90°C olan 4.771 kg/s debili jeotermal ısı kaynağından kazana ısı transferi gerçekleşmektedir. Burada yoğuşturucu soğutma suyu giriş ve çıkış sıcaklıkları sırasıyla 30°C ve 35°C olup, debisi ise 4.333 kg/s olacak şekilde çevrim tasarlanmıştır. Basınç değerleri olarak da jeotermal kaynak ve soğutma suyu giriş basıncı 200 kPa kabul edilmiştir. Şekil 2 ORC’nin T-s diyagramını göstermektedir.

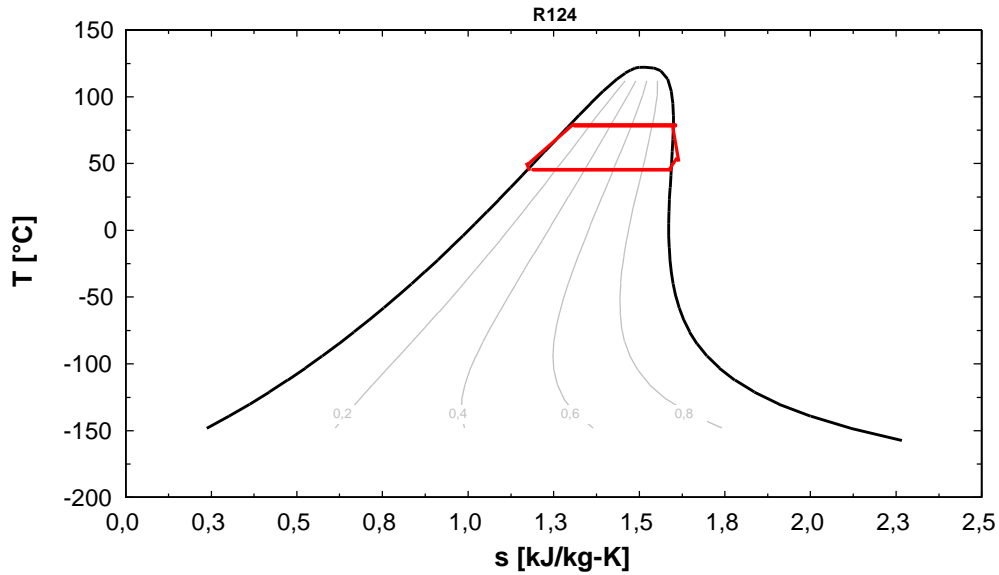
ORC’nin sistem elamanlarının kapasite değerleri Tablo 2’de gösterilmektedir. Analiz edilen çevrimden güç üretimi $\dot{W}_T=9.15$ kW değerinde olup, güç çevrimi termal verimi % 8.54 olarak hesaplanmıştır.

Ayrıca analiz edilen örnek çevrim için hem yoğuşturucu soğutma suyu hem de jeotermal sıcak su pompa gücü hesaplamaları aşağıda verilmiştir (Goncaloğlu, 2010):

$$H = \frac{P}{\rho \cdot g} \quad (8)$$

$$W_p = (Q \cdot H \cdot \rho) / (367 \cdot \eta_{is,P}) \quad (9)$$

Buna göre;



Şekil 2. Organik Rankine Çevriminin T-s diyagramı.

Tablo 2. Organik Rankine Çevriminin sistem elemanlarının kapasite değerleri.

Q_K (kW)	100
$Q_{yoğ}$ (kW)	91.48
\dot{W}_T (kW)	9.15
\dot{W}_{ORC-p} (kW)	0.61
$\eta_{ORC-güç}$ (%)	8.54

$$W_{ss-p} = 1.083 \text{ (kW)}$$

$$W_{jss-p} = 1.193 \text{ (kW)}$$

hesaplanmıştır. Bu durumda toplam pompa güçleri de ilave edilirse ORC'nin güç çevrimi termal verimi % 6.264 olarak hesaplanmıştır.

Ayrıca ORC'nin kazan ve yoğuşturucu sıcaklıklarının çevrim performansına etkisinin incelenebilmesi için farklı kazan ve yoğuşturucu sıcaklıklarına göre analizi yapılmıştır. ORC'nin yoğuşturucu sıcaklığı ve kazan kapasitesi sabit tutulup ($T_{yoğ}=40^{\circ}\text{C}$ ve kazan kapasitesi 100 kW), kazan sıcaklığının artması durumunda güç verim değerlerinin değişimi Şekil 3'te gösterilmiştir. Şekle göre kazan sıcaklığı (T_K) arttıkça güç çevrimi termal verimi de artmaktadır. Kazan sıcaklığı $T_K=100^{\circ}\text{C}$ ve yoğuşturucu sıcaklığı $T_{yoğ}=40^{\circ}\text{C}$ olan çalışma şartlarında en yüksek güç çevrimi termal verimi % 11.11 olarak hesaplanmıştır.

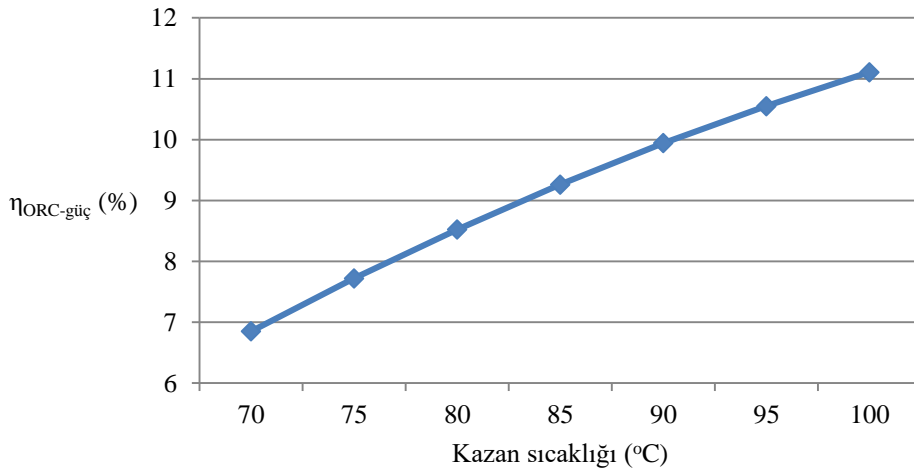
Şekil 4'te ORC'nin termal veriminin yoğuşturucu sıcaklığı ile değişimi gösterilmiştir ($T_K=80^{\circ}\text{C}$ ve kazan kapasitesi 100 kW). Şekilden de anlaşılacağı gibi sistemin termal verimi yoğuşturucu sıcaklığı arttıkça azalmaktadır. Verilen çalışma şartlarında en yüksek güç

çevrimi termal verimi yoğuşturucu sıcaklığının $T_{yoğ}=35^{\circ}\text{C}$ olması durumunda % 9.48 bulunmuştur.

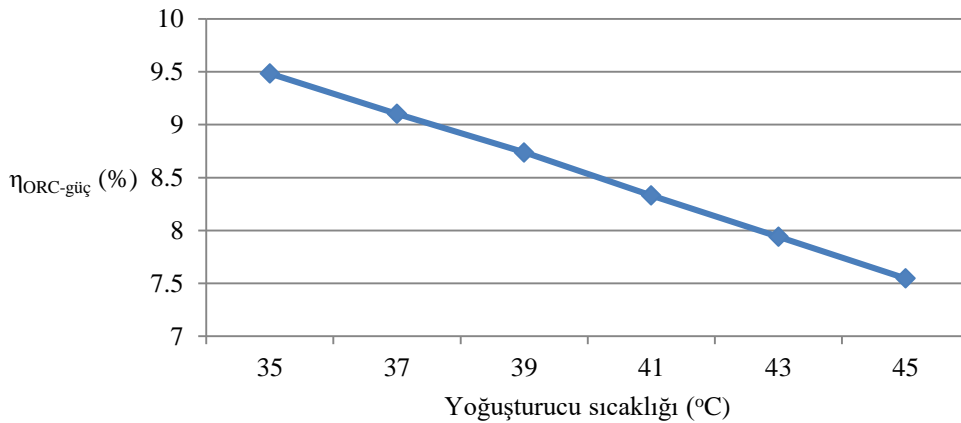
ORGANİK RANKİNE ÇEVİRİMİNİN FARKLI ORGANİK AKIŞKANLAR İÇİN ANALİZİ

ORC'e dayalı sistemlerin performansı seçilen iş yapan akışkanın termodinamik özelliklerine kuvvetle bağlı olup, en uygun akışkanın seçimi, verim ve elde edilebilecek net iş değerlerini maksimize edebilme açısından çok önemlidir. Hidrokarbonlar (HC), hidroflorokarbonlar (HFC), hidrokloroflorokarbonlar (HCFC), kloroflorokarbonlar (CFC), perflorokarbonlar (PFC), siloksanlar, alkoller, aldehitler, eterler, hidrofloeterler (HFE), aminler ve uygun karışımlar iş yapan akışkan olarak ORC'de kullanılabilirler. Bu akışkanlar dS/dT değerine göre ıslak, kuru ve izentropik akışkanlar olarak sınıflandırılabilirler (Önal *vd.*, 2017).

Bu çalışmada ORC'e uygun akışkan belirlemek amacıyla farklı organik akışkanlar için performans analizi yapılmıştır. Bu amaçla akışkan olarak R-134a, R-123, R-124, R-125, R-404A, R-407C, R-410A, R-600, R-600a ve R-290 seçilerek bu organik akışkanlar için oluşturulan çevrimlerin (kazan sıcaklığı $T_K=60^{\circ}\text{C}$,



Şekil 3. Güç çevrimi termal veriminin kazan sıcaklığı ile değişimi.



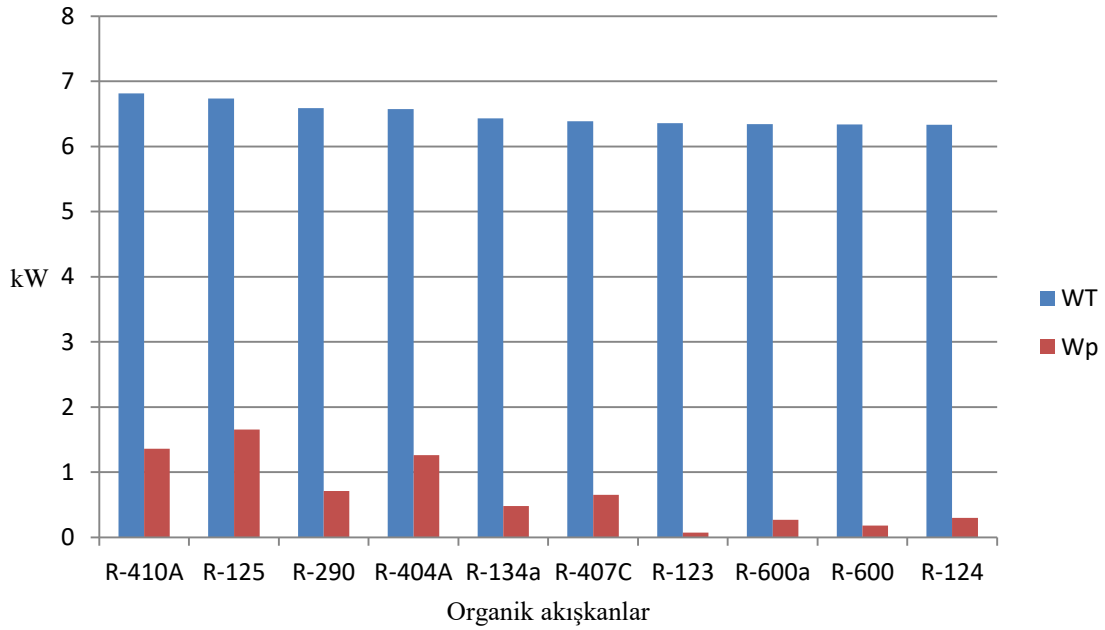
Şekil 4. Güç çevrimi termal veriminin yoğuşturucu sıcaklığı ile değişimi.

$T_{yog}=35^{\circ}\text{C}$ ve kazan kapasitesi 100 kW) sistem elemanlarından türbin ve pompanın güç değerleri Şekil 5'te verilmiştir. Analiz edilen akışkanlardan en yüksek türbin net işi R-410A akışkanına ait iken en düşük türbin net işi değeri de R-124 akışkanına ait olduğu görülmüştür. En yüksek pompa gücü de sırasıyla R-125 ve R-410A akışkan kullanımında elde edilmiştir.

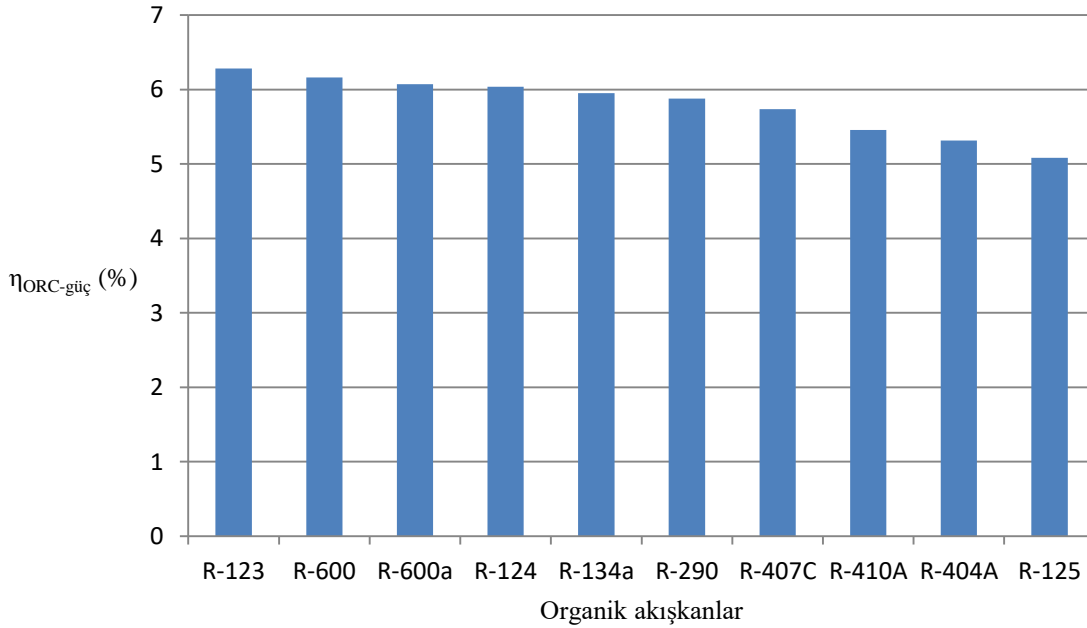
ORC'nin güç çevrimi termal veriminin farklı organik akışkanlara göre değişimi Şekil 6'da verilmiştir. Buna göre en yüksek güç verimi termal verimi R-123 organik akışkan ($\eta_{ORC-güç} = \% 6.28$) kullanımında elde edilirken bunu R-600 ve R-600a takip etmektedir. En düşük güç

çevrimi termal verimi ise R-125 organik akışkan ($\eta_{ORC-güç} = \% 5.35$) seçiminde elde edilmiştir.

Şekil 6 sonuçlarına göre seçilen akışkanlardan ORC'de kullanılacak en iyi akışkan R-123 akışkanıdır. Ancak akışkan seçiminde akışkanın performansının yanında çevresel ve güvenlik etkileri de göz önünde bulundurulmalıdır. Bu çalışmada analiz edilen akışkanların fiziksel, çevresel ve güvenlik verileri Tablo 3'te gösterilmektedir (Calm ve Hourahan, 2007). Buna göre diğer akışkanlara kıyasla iyi performans gösteren R-123 akışkanının çevresel ve güvenlik verilerine göre diğer akışkanlardan sakıncalı olduğu görülmektedir. R-



Şekil 5. Türbin ve pompanın güç değerleri.



Şekil 6. Güç çevrimi termal veriminin Organik akışkanlara göre değişimi.

Tablo 3. Analiz edilen akışkanların fiziksel, çevresel ve güvenlik verileri.

Akışkan	Molekül ağırlığı (g/mol)	Kritik sıcaklık değeri (°C)	OEL (PPMv)	LFL (%)	ASHRAE 34 Güvenlik grubu	ODP	GWP
R-123	152.93	187.3	50	-	B1	0.02	77
R-124	136.48	122.3	1000	-	A1	0.02	609
R-134a	102.03	101.1	1000	-	A1	0	1430
R-407C	86.20	85.8	1000	-	A1	0	1800
R-410A	72.58	70.5	1000	-	A1	0	2100
R-404A	97.60	72	1000	-	A1	0	3900
R-125	120.02	66	1000	-	A1	0	3500
R-290	44.10	96.7	2500	2.1	A3	0	20
R-600	58.12	152	800	1.5	A3	0	20
R-600a	58.12	134.7	800	1.7	A3	0	20

134a, R-125, R-404A, R-407C ve R-410A akışkanlarının ODP değerlerinin 0 olmasına rağmen yüksek GWP değerlerine sahip olmaları bu akışkanların en büyük dezavantajıdır. R-600 ve R-600a akışkanlarının diğer akışkanlara göre hem yüksek performans göstermeleri hem de çevresel açıdan düşük değerlere sahip olmalarında dolayı ORC’de kullanılabilir en iyi akışkan oldukları görülebilmektedir. Ancak bu akışkanların yanıcılıklarından dolayı gerekli güvenlik önlemlerine ihtiyaç duyulmaktadır. R- 290 akışkanının da çevresel açıdan uygun akışkan olduğu Tablo 3’te görülmekte olup, bu akışkan için de yanıcılıktan dolayı gerekli güvenlik önlemleri alınmalıdır.

SONUÇ VE ÖNERİLER

ORC ısı enerjisini elektrik enerjisine dönüştüren bir teknoloji olup, özellikle düşük ve orta sıcaklıklardaki kaynakları değerlendirmekte mümkündür. Türkiye jeotermal ve güneş enerjisi bakımından zengin konumundadır. Bunun yanında birçok sanayi tesislerinde mevcut olan ve çok çeşitlilik gösteren atık ısı enerji kaynakları bulunmaktadır. Mevcut olan bu zengin jeotermal, güneş ve atık ısı enerji kaynaklarımızı ORC ile değerlendirilerek elektrik üretmek mümkündür. Bu kapsamda bu çalışmada jeotermal, güneş, atık ısı gibi ısı kaynaklarından elektrik enerjisinin elde edilmesinde kullanılan ORC’ nin termodinamik analizi yapılmıştır. Çevrimde R-124 akışkanının kullanıldığı kabul edilmiştir. Çalışmada analiz edilen ORC için gerekli olan ısı enerjisinin düşük ve orta sıcaklık jeotermal sahalarından biri olan Salihli Jeotermal Sahası’ndan (bu sahadaki sıcaklık 104°C ve debi 150 kg/s değerindedir (Satman, 2007)) karşılanabilmesi mümkün olabilmektedir. Ayrıca bu ORC’ nin kazan ve yoğunlaştırıcı sıcaklıklarının çevrim performansına etkisinin incelenmesi için farklı kazan ve yoğunlaştırıcı sıcaklıklarına göre analizi yapılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre kazan sıcaklığı (T_K) arttıkça güç çevrimi termal verimi de artmaktadır. Benzer şekilde yoğunlaştırıcı sıcaklığı artarken güç çevrimi termal verimi de azalmaktadır.

Çalışmada ORC’ nin verimini arttırmak amacıyla farklı organik akışkanlar için performans analizi yapılmıştır. Organik akışkan olarak R-134a, R-123, R-124, R-125, R-404A, R-407C, R-410A, R-600, R-600a ve R-290 seçilerek elde edilen ORC’ nin güç çevrimi termal verimlerinin, çevresel ve güvenlik etkilerinin karşılaştırılması yapılmıştır. Buna göre en yüksek güç verimi termal verimi R-123 organik akışkan kullanımında elde edilirken en düşük güç çevrimi termal verimi ise R-125 akışkan kullanımında elde edilmektedir. Diğer akışkanlara kıyasla iyi performans gösteren R-123 akışkanının çevresel ve güvenlik verilerine göre diğer akışkanlardan sakıncalı olduğu sonucu elde edilmektedir. R-134a, R-125, R-404A, R-407C ve R-410A akışkanlarının ODP değerlerinin 0 olmasına rağmen yüksek GWP değerlerine sahip olmaları bu akışkanların en büyük dezavantajıdır. R-600 ve R-600a akışkanlarının diğer akışkanlara göre hem yüksek performans göstermeleri hem de çevresel açıdan düşük değerlere sahip olmalarında dolayı ORC’de kullanılabilir en iyi akışkan oldukları görülebilmektedir. Ancak bu akışkanların yanıcılıklarından dolayı gerekli güvenlik önlemlerine ihtiyaç duyulmaktadır.

ORC ile özellikle alternatif enerji kaynakları (jeotermal, güneş ve atık ısı enerji kaynakları) kullanılarak elektrik enerjisi üretilebilmektedir. Alternatif enerji kaynakları bakımından zengin olan ülkemizde bu ORC sistemlerin kullanımının yaygınlaştırılması ile daha etkin ve ekonomik elektrik enerjisi üreterek artan enerji ihtiyacımızın karşılanabilmesi mümkün olabilmektedir. Ayrıca bu çevrimde ozon tabakası üzerinde olumsuz etki yapmayan ve küresel ısınmaya çok az neden olan akışkanlar kullanılarak çevre kirliliğinin önüne geçerek elektrik üretmek mümkündür.

KAYNAKLAR

Acar, M. ve Arslan, O., 2018, Energy and exergy analysis of solar energy-integrated, geothermal energy-powered Organic Rankine Cycle, *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry* Journal of <https://doi.org/10.1007/s10973-018-7977-1>.

- Arslan, O., Köse, R., 2006, Kütahya Simav Jeotermal Sahasının Kalina Teknolojisiyle Elektrik Üretim Potansiyeli. *Dünya Enerji Konseyi Türk Milli Komitesi Türkiye 10. Enerji Kongresi*.
- Bilgiç, H., Yağlı, H., Koç, A. ve Yapıcı, A., 2016, Deneysel bir organik rankine çevriminde yapay sınır ağları (ysa) yardımıyla güç tahmini, *Selçuk Üniversitesi Mühendislik Fakültesi*, SUJEST, c.4, s.1.
- Calm J. M. and Hourahan G. C., 2007, Refrigerant Data Update, *HPAC Engineering*, 79, 50-64.
- Cemek, M., Aydıngöz, M. ve Konuk, M., 2005, Jeotermal Enerji ve Afyon Bölgesinin Jeotermal Enerji Potansiyeli, *Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi* (1) 39-48.
- Ergün, A., Özkaymak, M. ve Kılıçaslan, E., 2016, Organik rankine çevrimi prensibi ile düşük sıcaklıktaki kaynaklardan elektrik üretim uygulamaları, *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 4, 686-696.
- Etemoğlu, A.B., İşman, M. K. ve Can, M., 2006, Bursa Ve Çevresinde Jeotermal Enerjinin Kullanılabilirliğinin İncelenmesi, *Uludağ Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, Cilt 11, Sayı 1.
- Goncaloğlu, B., 2010, Pompa seçimi nasıl yapılır, Derleme, YTÜ Çevre Müh. Bölümü.
- Hettiarachchia, H.M., Golubovic, M., Worek, W. M. and Ikegami, Y., 2007, Optimum design criteria for an Organic Rankine cycle using low-temperature geothermal heat sources, *Energy*, 32, 1698-1706.
- Javanshir, A. and Sarunac, N., 2017, Thermodynamic analysis of a simple Organic Rankine Cycle, *Energy*, 118, 85-96.
- Koç, E. ve Şenel, M.C., 2013, Dünyada Ve Türkiye’de Enerji Durumu-Genel Değerlendirme, *Mühendis ve Makina*, Cilt 54, sayı 639, s. 32-44.
- Kong, R., Deethayat, T., Asanakhamb, A., Vorayosb, N. and Kiatsiriroatb, T., 2019, Thermodynamic performance analysis of a R245fa organic Rankine cycle (ORC) with different kinds of heat sources at evaporator, *Case Studies in Thermal Engineering*, 13, 100385.
- Konur, O., Pamık, M. ve Çolpan, C.Ö., 2017, Liman sahasındaki gemilerde organik rankine çevriminin yakıt kazancı ve egzoz salımına etkisi, *III. Ulusal Liman Kongresi*.
- Kuo, C. Hsu, S., Chang, K. and Wang, C., 2011, Analysis of a 50 kW organic Rankine cycle system, *Energy*, 36, 5877-5885.
- Önal, A.S., Etemoğlu, A.B., ve Can, M., 2017, Düşük sıcaklıklı atık akışkan destekli Organik Rankine Çevrimlerinin optimizasyonu, *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, Cilt 22, Sayı 2.
- Özahi, E., Tozlu, A. ve Abuşoğlu, A., 2017, Thermodynamic Performance Assessment of Different Fluids in a Typical Organic Rankine Cycle for Usage in Municipal Solid Waste Power Plant, *Acta Physica Polonica A*, Vol. 132, No. 3-II.
- Özden, H. ve Paul, D., 2011, Organik rankin çevrim teknolojisiyle düşük sıcaklıktaki kaynaktan faydalanılarak elektrik üretimi. örnek çalışma: Sarayköy Jeotermal Santrali, *X. Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi*.
- Rayegan, R. and Tao, Y.X., 2011, A procedure to select working fluids for Solar Organic Rankine Cycles (ORCs), *Renewable Energy*, 36, 659-670.
- Satman, A., 2007, Türkiye’ni Jeotermal Enerji Potansiyeli, *Jeotermal Enerji Semineri*.
- Sun, J. and Li, W., 2011, Operation optimization of an organic rankine cycle (ORC) heat recovery power plant, *Applied Thermal Engineering*, 31, 2032-2041.
- Tchanche, B. F., Pétrissans, M. and Papadakis, G., 2014, Heat resources and organic Rankine cycle machines, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 39, 1185-1199.
- Tchanche, B.F., Papadakis, G., Lambrinos, G., and Frangoudakis, A., 2009, Fluid selection for a low-temperature solar organic Rankine cycle, *Applied Thermal Engineering*, 29, 2468-2476.
- Varınca, K. ve Gönüllü, T., 2006, Türkiye’de Güneş Enerjisi Potansiyeli ve Bu Potansiyelin Kullanım Derecesi, Yöntemi ve Yaygınlığı Üzerine Bir Araştırma, *I. Ulusal Güneş Ve Hidrojen Enerjisi Kongresi*.
- Wang, E.H., Zhang, H.G., Fan, B.Y., Ouyang, M.G., Zhao, Y. and Mu, Q.H., 2011, Study of working fluid selection of organic Rankine cycle (ORC) for engine waste heat recovery, *Energy*, 36, 3406-3418.
- Wei, D., Lu, X., Lu, Z. and Gui J., 2007, Performance analysis and optimization of organic Rankine cycle (ORC) for waste heat recovery, *Energy Conversion and Management*, 48, 1113-1119.
- Yamamoto, T., Furuhashi, T., Arai, N. and Mori, K., 2001, Design and testing of the Organic Rankine Cycle, *Energy*, 26, 239-251.
- Yamankaradeniz, R., Horuz, İ. ve Çoşkun, S., 2002, Soğutma Tekniği ve Uygulamaları, *Bursa: Vipaş A.Ş., Uludağ Üniversitesi Güçlendirme Vakfı*.
- Yılmaz, M., 2012, Türkiye’nin Enerji Potansiyeli ve Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının Elektrik Enerjisi Üretimi Açısından Önemi, *Ankara Üniversitesi Çevre Bilimleri Dergisi* 4(2), 33-54.