

ORÇ ile Düşük Sıcaklıklı Isı Kaynaklarından Elektrik Üretilmesinde Islak ve Yeni Nesil Akışkanların Çevresel ve Termodinamik Performanslarının Karşılaştırılması

Sadık ATA¹  Muhammed Emin BOYACIOĞLU²  Remzi ŞAHİN¹  Ali KAHRAMAN³ 

¹ KTO Karatay Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 42020, Konya, Türkiye
(Sorumlu Yazar/ Corresponding Author)

² Necmettin Erbakan Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı, 42090, Konya, Türkiye

³ Necmettin Erbakan Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 42090, Konya, Türkiye

Makale Bilgileri

Makale Geçmişi

Geliş: 22.02.2021

Kabul: 24.05.2021

Yayın: 30.06.2021

Anahtar Kelimeler:

Çevresel Performans,
Yeni Nesil Akışkanlar,
Düşük Sıcaklıklı Organik
Rankine Çevrimi (ORÇ),
Ekserji.

ÖZET

Organik Rankine Çevrimi (ORÇ), termal enerjiyi elektrik enerjisine dönüştüren, yüksek oranda erişilebilir, yaygın olarak kullanılan bir enerji üretim şeklidir. ORÇ’de, türbin jeneratörü termal enerjiyi önce mekanik enerjiye sonra da jeneratör aracılığıyla elektrik enerjisine dönüştürür. Sıradan buhar türbinleri ile karşılaştırıldığında; ORÇ sisteminde dolaşan organik akışkanlar su buharının yerini alır, ancak sudan daha yüksek moleküler ağırlıklı organik sıvıları buharlaştırarak sirkülasyon hızını düşürür ve metal parçalar üzerindeki basıncı azaltır. ORÇ’nin ideal akışkanları genellikle sıfır veya pozitif eğimli sırasıyla ıslak veya yeni nesil akışkanlar olup, aşırı ısıtılmasına gerek yoktur. Bu çalışmada düşük kapasiteli değişik ısı kaynaklı, organik akışkanlı ve konfigürasyonlu ORÇ tasarımı ve termodinamik optimizasyonu yapılmıştır. Bu çalışmadaki termodinamik analiz Engineering Equation Solver kullanılarak yapılmıştır. ORÇ’de farklı akışkan gruplarının etkisi belirlenmiştir. Akışkan tipini önemli kılan en önemli etken türbinde akışkanın genleşmesinden sonra kuruluk oranının akışkanın tipine göre değişmesidir. R290, R32, R152a, R134a, R125, R1270, R1234ze, R1234yf gibi yeni nesil ve ıslak akışkanlar kullanılarak organik akışkanların tasarım değerlendirmeleri yapılmıştır. Akışkan türleri kendi aralarında incelendiğinde R152a’nın özellikle elde edilen türbin işi bakımından R134a’dan çok iyi durumda olduğu, R1234ze’nin ise R1234yf’den ısı verim ve ekserji verimi bakımından önde olduğu görülmektedir.

Comparison of Environmental and Thermodynamic Performance of Wet and New-Generation Fluids for Electricity Generation from Low Temperature Heat Sources with ORC

Article Info

Article History

Received: 22.02.2021

Accepted: 24.05.2021

Published: 30.06.2021

Keywords:

Environmental
Performance, New
Generation Fluids,
Low Temperature
Organic Rankine
Cycle (ORC), Exergy.

ABSTRACT

The organic Rankine Cycle (ORC) is a highly accessible, widely used form of energy generation that converts thermal energy into electrical energy. ORC converts the thermal energy of the turbine generator first into mechanical energy and then into electrical energy through the generator. Compared with ordinary steam turbines; Organic fluids circulating in the ORC system replace water vapor, but by evaporating organic liquids with higher molecular weight than water, it reduces the circulation rate and reduces the pressure on the metal parts. The ideal fluids of ORC are generally wet or new generation fluids with zero or positive slope, respectively, and they do not need to be overheated. In this study, ORC design and thermodynamic optimization with low capacity, different heat source, organic fluid and configuration have been made. The thermodynamic analysis in this study was performed using Engineering Equation Solver. The effect of different fluid groups has been determined in ORC. The most important factor that makes the fluid type important is that the dryness rate changes according to the type of fluid after the fluid expands in the turbine. Design evaluations of organic fluids were made using new generation and wet fluids such as R290, R32, R152a, R134a, R125, R1270, R1234ze, R1234yf. When the fluid types are examined among themselves, it is seen that R152a is in a better condition than R134a especially in terms of turbine work achieved, and R1234ze is ahead of R1234yf in terms of thermal efficiency and exergy efficiency.



Atıf/Citation: Ata, S.; Boyacıoğlu, ME.; Şahin, R.; Kahraman, A. (2021). Orç ile düşük sıcaklıklı ısı kaynaklarından elektrik üretilmesinde ıslak ve yeni nesil akışkanların çevresel ve termodinamik performanslarının karşılaştırılması, *Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 3(1), 13-23.

“This article is licensed under a [Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/). (CC BY-NC 4.0)”

GİRİŞ (INTRODUCTION)

Organik Rankine Çevrimi (ORÇ) ısı enerjisini elektrik enerjisine çeviren, kullanılabilirliği yüksek, oldukça yaygın kullanılan bir enerji üretim biçimidir. ORÇ çalışma prensibi olarak turbo jeneratörün ısı enerjisini önce mekanik enerjiye, sonra ise bir elektrik jeneratörü vasıtasıyla elektrik enerjisine dönüşümüdür. Normal buhar türbiniyle karşılaştırıldığında; ORC sistemi su buharı yerine moleküler ağırlığı sudan yüksek olan ve böylece daha yavaş devir hızına ve metal aksamlara daha az basınca yol açan bir organik sıvıyı buharlaştırır. ORÇ için ideal akışkanlar genellikle aşırı ısınmayı gerektirmeyen sırasıyla sıfır veya pozitif eğimli ıslak veya yeni nesil akışkanlardır.

ORÇ sayesinde yüksek verim elde edilir: %2.5'lik bir ısı kaybı dışında termal yağdan %76.5 oranında termal güç ısıya, %21 ise elektriğe çevrilir. Bunun sonucu olarak ORÇ güvenilir, verimli bir elektrik üretme yoludur. Özellikle biyokütle ve jeotermal alanında önemli büyüme fırsatlarına ve ısı geri kazanımı, atığın enerjiye dönüşümü ve güneş enerjisi uygulamalarındaki üstün işlevlerine sahiptir.

Literatür incelendiğinde ORÇ analizi ve akışkan seçimi hakkında yapılmış farklı çalışmaların olduğu görülür. Wang vd [1]; Hidrofloroeter kullanılarak tasarlanan ORÇ sisteminin termodinamik analizini yapmışlardır. EES planından yararlanıyorlar. HFE7000, HFE7100 ve HFE7500 organik sıvılarının birincil verimliliği, net gücü ve türbin boyutu faktörü türbin giriş sıcaklığı ile karşılaştırılır. Uusitalo vd. [2], ORÇ sisteminin termodinamik performansının belirlenmesinde organik akışkan türü ve akışkanın termofiziksel özelliklerinin etkisini araştırmıştır. Akışkanın kritik sıcaklığının ve molar kütesinin sistem üzerindeki etkisi belirlenmiştir. Çalışma sonunda, buhar basıncı akışkanın kritik basıncından daha düşük olduğunda kritik sıcaklığı yüksek bir akışkan içinde yüksek verim elde edilebileceği belirtildi. Ancak, yüksek kritik sıcaklığın türbinde yüksek bir genişleme oranına yol açtığı gözlemlenmiştir. Florokarbonların ve düşük sıcaklık kritik hidrokarbonların düşük sıcaklıktaki ORÇ uygulamalarında; siloksanlar ve yüksek kritik sıcaklıklara sahip hidrokarbonların yüksek sıcaklık ORÇ uygulamaları için uygun olduğu bulunmuştur. Ergün [3] doktora çalışmasında, Çanakkale Ayvacık ilçesine bağlı Tuzla köyündeki jeotermal ORÇ santralının termodinamik analizini yapmıştır. Analiz sonucunda, sistemdeki en yüksek kayıp değerinin kondenserde 24410 kW ile tespit edilmiştir. Eyidoğan [4] doktora araştırmasında biyokütleden elde edilen termal yağı elektrik ve ısı (sıcak su) üretmek için kullanan ORÇ cihazının enerji ve ekserji analizini yapmıştır. Araştırmanın temelini oluşturan veriler, entegre ahşap sektöründe faaliyet gösteren bir sanayi firmasının ORÇ departmanından gelmektedir. ORÇ cihazının ana ekipmanı olan evaporatör, kondenser, türbin ve rejeneratörün enerji ve ekserji analizleri altı farklı çalışma koşulunda (tam yük ve kısmi yük) analiz edilmiştir. Giuffrida [5], yeni nesil organik sıvılar kullanan ORÇ'de 2 kW spiral kompresör kullanarak sistemin performansını çevresel faktörler nedeniyle analiz etti. Sonuçları şu anda kullanımda olan R245fa sıvısı ile karşılaştırdı. İnceleme sıvısı; R1234yf, R1234ze(E), R1234ze(Z), R1243zf, R1336mzz(Z), R1224yd(Z), R1233zd(E). REFPROP yazılımı akışkan özellikleri için kullanılır. R245fa sıvısının GWP değeri 858 olmasına rağmen, seçilen tüm sıvılarda değerin 1'den küçük olduğu belirtilmektedir. Çalışmada ısıl verimlilik açısından R1224yd(Z) ve R1233zd(E) sıvılarının R245fa sıvısı kullanan sistemlere göre daha iyi sonuçlar verdiği görülmüştür. Yang vd. [6], ORÇ sistemi analizinde iki sıvıyı karşılaştırarak deneysel bir çalışma yürütmüştür. Sistem, mevcut sistemde kullanılan R245fa sıvısı yerine iyi çevresel özelliklere sahip R1233zd(E) sıvısını kullanmaktadır. Deneysel çalışmada, R1233zd(E) sıvısı kullanan sistemin ısıl veriminin %3.8, elektrik gücünün ise %4.5 arttığı tespit edilmiştir. Elde edilen verilere göre, R1233zd(E) sıvısının R245fa sıvısının yerine geçen bir sıvı olduğu söylenebilir. Behzadi vd. [7] Tahran ORÇ entegre enerji santralının çok amaçlı optimizasyonu ve ekserji ekonomik analizi gerçekleştirildi. MATLAB tabanlı GA tabanlı çok amaçlı optimizasyon teknolojisini kullanırlar. Bademlioğlu ve ark. [8], $\Delta T_{PP,e}$ 'nin ORÇ'nin ekserji performansı üzerindeki etkisini araştırmıştır. $T_{PP,e}$ 'yi 5-20 °C arasında değiştirmenin farklı organik akışkanlarla hazırlanmış sistemler üzerindeki etkisini

belirlenmiştir. Şahin vd. [9], ORÇ performansında akışkan seçiminin rolü ekserji analizi yapılarak belirlenmiştir. Çalışma sonucunda, en yüksek ısı verim %7.78 ve ekserji verimine %41.05 R290 akışkanının ulaştığı görülmüştür. R290 akışkanında oluşan tersinmezliğin %60'ının evaporatörde olduğu, %30'unun da kondenserde olduğunu belirlemişlerdir. Xi vd. [10], R123, R11, R245ca, R245fa, R113 ve R141b olmak üzere altı farklı organik akışkanın performansı karşılaştırılmıştır. R245fa'nın net güç maksimizasyonu için en iyi değere ulaştığı görülmüştür. R141b ve R11 akışkanlarının daha iyi termodinamik performans verdiklerini tespit etmişlerdir. Rahbar vd. [11], ORÇ'de küçük ölçekli radyal türbinin performansı 8 organik akışkan kullanılarak incelenmiştir. Çalışma sonucunda, radyal türbin veriminin %82.9 ile %84 arasında olduğu belirtilmiştir. Sarkar [12], ORÇ'de maksimum ısı geri kazanımı için $\Delta T_{PP,e}$ tasarımı ve optimizasyonu üzerinde çalışmıştır. Optimum noktalarda düşük kütleli debi gereksinimi, yüksek ekserji gerimi, düşük türbin boyutu bakımından amonyak akışkanında; yüksek güç çıktısı ve ısı geri kazanımı verimi bakımından ise izopentan akışkanında en iyi sonuçlara ulaşılmıştır. Li vd. [13], çevresel özellikleri iyi durumda yeni nesil organik bir akışkan olan R1234ze ile tasarladıkları kritik altı ORÇ ve transkritik ORÇ sisteminin performans analizini yapmışlardır. Isı kaynağı giriş sıcaklığı 100-160 °C olan sistemler için kritik altı ORÇ'nin; 160-200 °C olan sistemler için ise transkritik ORÇ'nin uygun olduğu tespit edilmiştir. Zhu vd. [14], ORÇ performansında organik akışkanların önemini incelediler. Çalışma sonunda, daha yüksek bir net güç değeri elde etmek için organik akışkanların kritik sıcaklığı ile ısı kaynağının sıcaklığı arasındaki farkın küçük olması gerektiğini belirlediler. Velez vd. [15], ORÇ sisteminin analizi için su, bazı hidrokarbonlar ve soğutucular gibi farklı akışkanlar üzerinde çalışmışlardır. Çalışmalarında, basınç oranı ve türbin giriş sıcaklığının artışı ile sistem ısı veriminin arttığını belirtmişlerdir. Maksimum ısı verim değeri ise %9 olarak belirlemişlerdir. Javanshir ve Sarunac [16], ıslak, izantropik ve kuru akışkan gruplarından olmak üzere 23 farklı akışkan ile çalışan ORÇ'nin performansı ısı verim ve net güç çıktısı bakımından analiz edilmiştir. Çalışma sonucunda izantropik akışkanların veriminin kuru ve ıslak akışkanlara göre daha iyi olduğu sonucuna varılmıştır.

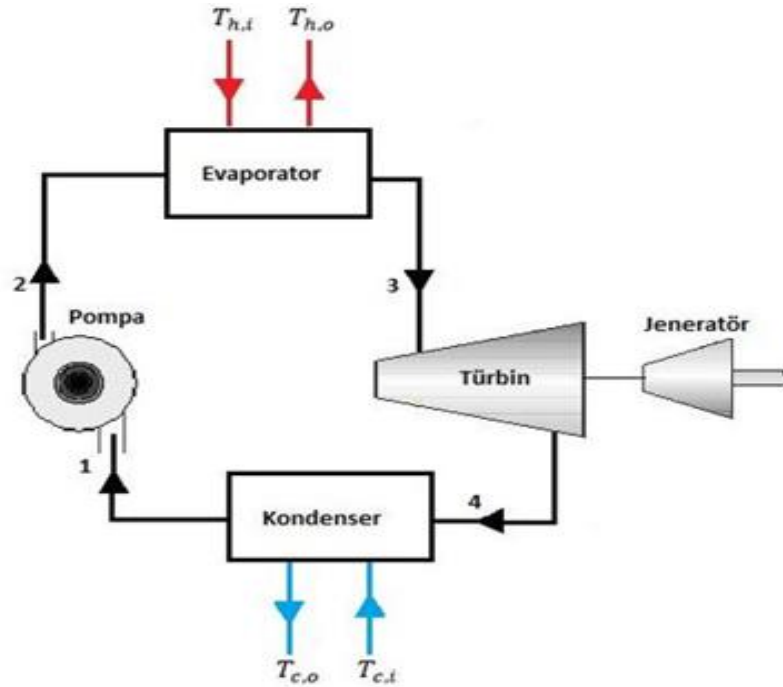
Bu çalışmanın amacı ORÇ sisteminde ıslak ve yeni nesil akışkanların sistem parametreleri üzerindeki etkilerini belirlemek, akışkanların sistem üzerindeki çevresel ve termodinamik etkilerini karşılaştırmaktır. Çalışmada 8 farklı akışkan kullanılmış olup belirlenen sistem parametreleri için en iyi performans gösteren farklı sınıflardan akışkanlar belirlenmiştir.

MATERYAL VE METOT (MATERIALS AND METHODS)

Bu çalışmada ıslak ve yeni nesil organik akışkanlar kullanılarak tasarlanan ORÇ'nin termodinamik analizi ve özellikleri Engineering Equation Solver (EES) belirlenmiştir. EES yazılımını kullanma nedenleri; veri tabanında bulunan birçok organik sıvının termodinamik özelliklerini içermesidir. Termodinamik analiz için gerekli denklemler sisteme girilerek, aynı anda birçok parametreye meydana gelen değişikliklere yanıt olarak istenen sonuçlar elde edilebilir. Farklı sıvılar kullanmanın sistem performansı üzerindeki etkisini görmek kolaydır. EES yazılımı, geri döndürülemez ilişkiyi sistemle işleyerek, geri döndürülemez değeri belirli bir sıcaklık veya basınç aralığında negatif bir değere ulaşan bileşenleri tespit etmek için denklem çözücü işlevini ve termodinamik verilerini kullanır. Bu şekilde hazırlanan modelin termodinamiğin ikinci yasasına uygunluğu kontrol edilmiştir.

ORÇ'de üç farklı tip akışkanın sistem performansındaki etkisi belirlenmiştir. Şekil 1'de ORÇ çalışma prensibi gösterilmiştir. Organik akışkan (ara sıvı) düşük basınçtan yüksek basınca pompalanır. Akışkan sıvı halde olduğu için, pompa az miktarda enerji girişi gerektirir. Yüksek basınçlı sıvı, sabit bir basınçta büyük bir ısı kaynağı tarafından ısıtıldığı ve doymuş kuru buhar haline geldiği kazana girer. Gerekli giriş enerjisi, bir entalpi-entropi tablosu (h-s diyagramı veya Mollier diyagramı) kullanılarak grafiksel olarak kolayca hesaplanabilir veya gerekli giriş enerjisi, bir buhar ölçer kullanılarak dijital olarak kolayca hesaplanabilir. Doymuş kuru buhar fazındaki çalışma sıvısı, enerji üreten bir türbin tarafından genişletilir. Bu, sıvı ve buhar

basıncını düşürür ve biraz yoğunlaşmaya neden olabilir. Islak buhar, yoğunlaştırıcıya (yoğunlaştırıcı) girer ve sabit bir basınçta doymuş bir sıvıya yoğunlaşır. Sonuç olarak termal enerji mekanik enerjiye dönüştürülerek elektrik enerjisi elde edilmiş olur.



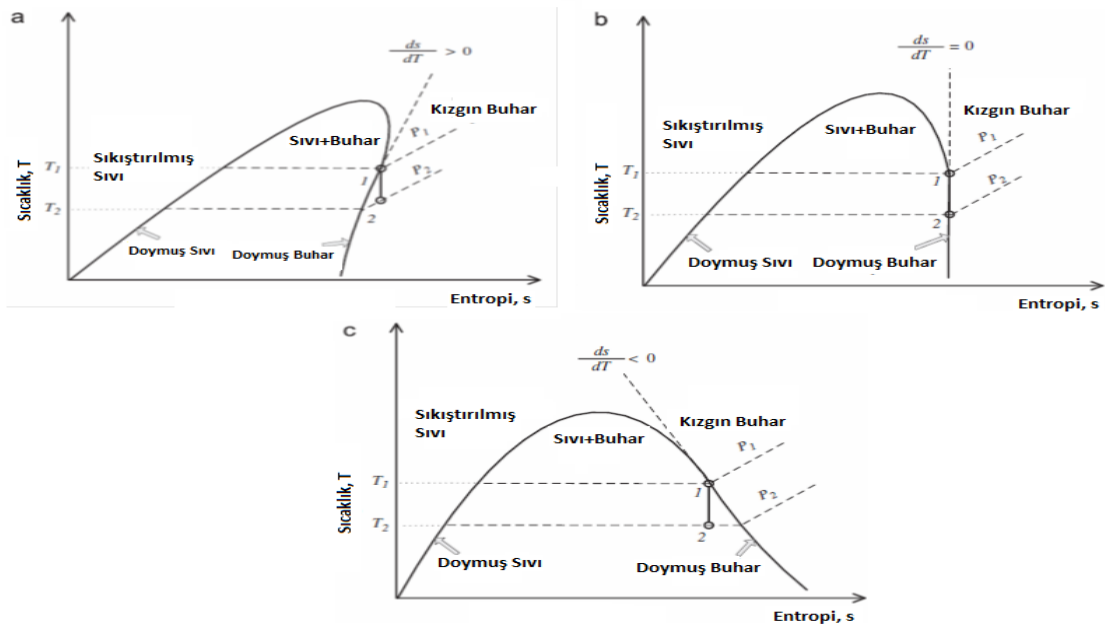
Şekil 1. Organik Rankine Çevrimi Çalışma Prensibi

Bu çalışmada ORÇ’de farklı akışkan gruplarının etkisi belirlenmiştir. Akışkanlar doymuş buhar eğrisinin eğimine göre Şekil 2’de gösterildiği gibi kuru, yeni nesil ve ıslak olmak üzere üç grupta incelenir. Akışkan tipini önemli kılan en önemli etken türbinde akışkanın genişlemesinden sonra kuruluk oranının akışkanın tipine göre değişmesidir. Akışkanların T-s diyagramlarındaki doyma eğrilerinin eğimi pozitif olduğunda akışkan kuru, negatif olduğunda ıslak ve sonsuz olduğunda ise izantropik olarak isimlendirilir.

Organik akışkanlar ıslak ve yeni nesil olmak üzere iki farklı kategori altında sınıflandırılarak performansı karşılaştırılmıştır. Islak akışkanlardan 6, yeni nesil akışkanlardan 2 olmak üzere toplam 8 akışkanın performansı aynı tasarım parametreleri altında belirlenmiştir. Bu akışkanlar Tablo 1’de belirtilmiştir.

ORÇ’nin jeotermal ısı kaynaklı uygulamaları kapsamında ısı kaynağı sıcaklığı 110 °C olarak sabit belirlenmiştir. Soğutma suyu sıcaklığı ise 25 °C, türbin ve pompa izantropik verimleri de %75 olarak ele alınmıştır. Ölü nokta basıncı ve sıcaklığı sırasıyla 100 kPa ve 25 °C olarak kabul edilmiştir. Bu bölümde yapılan diğer kabuller aşağıda belirtilmiştir.

- Bütün prosesler kararlı şartlardadır.
- Evaporatör ve kondenserdeki basınç kayıpları ihmal edilmiştir. Boru hatlarındaki kayıplar ihmal edilmiştir.
- Analizde tüm ekipmanlar adyabatik olarak kabul edilmiş ve yüzeyleri ile çevre arasında bir ısı transferinin olmadığı varsayılmıştır.
- Potansiyel ve kinetik enerji değişimleri ihmal edilmiştir.



Şekil 2. Organik Akışkanların T-s Diyagramında Gösterimi a) Kuru, b) İzantropik, c) Islak [17].

Tablo 1. Farklı Kategorilerden Belirlenen Organik Akışkanlar

Islak Akışkanlar	Yeni Nesil Akışkanlar
R290	R1234ze
R32	R1234yf
R152a	
R134a	
R125	
R1270	

ORÇ'nin termodinamik analizinde kullanılan denklemler aşağıda belirtilmiştir.

Aşağıdaki çizelgede verilen denklemlerde; η_t ve η_p sırasıyla türbin ve pompanın izantropik verimleri, $T_{h,i}$ ve $T_{h,o}$ sırasıyla ısı kaynağı giriş-çıkış; $T_{c,i}$ ve $T_{c,o}$ ise sırasıyla soğutma suyu giriş-çıkış sıcaklıklarıdır. Tablo 2'de verilen T_h ve T_c ise denklem (1) ve (2)'de tanımlanmıştır.

$$T_h = (T_{h,i} - T_{h,o}) / \ln(T_{h,i} - T_{h,o}) \quad (1)$$

$$T_c = (T_{c,i} - T_{c,o}) / \ln(T_{c,i} - T_{c,o}) \quad (2)$$

BULGULAR (RESULTS)

Organik Akışkanların Termofiziksel Özelliklerinin Değerlendirilmesi (Evaluation of Thermophysical Properties of Organic Fluids)

Tablo 3'de ORÇ tasarımında kullanılan ıslak ve yeni nesil akışkanların termofiziksel özellikleri karşılaştırılmıştır. Seçilen ıslak akışkanlardan kaynama noktası sıcaklığı en düşük olan akışkan R32, yeni nesil akışkanlarda ise R1234yf olarak belirlenmiştir. Kritik sıcaklık değeri ıslak akışkanlar arasında en yüksek olan akışkan R152a, yeni nesil akışkanlar arasında ise R1234ze olduğu belirtilmiştir. R125 ve R32'nin kritik sıcaklıkta daha düşük değerlere sahip olduğu, diğer akışkanların birbirine yakın olduğu görülebilmektedir. 30 °C'ye karşılık gelen tüm akışkanların yoğuşma basıncını ve 100 °C'lik buharlaşma

basıncını kontrol ederken, ıslak akışkanın diğer akışkan türlerinden daha yüksek bir basınç değerine sahip olduğuna dikkat etmek önemlidir. Islak sıvıda R152a ve R134a en düşük basınç değerine ulaşır.

Tablo 2. ORÇ Termodinamik Analiz Bağıntıları

BİLEŞENLER	ENERJİ ANALİZİ	EKSERJİ ANALİZİ
Pompa	Pompa İşi (kJ/kg) $w_p = (h_2 - h_1) = (h_{2s} - h_1)/\eta_p$	Pompa Tersinmezliği (kJ/kg) $i_p = T_0(s_2 - s_1)$
Evaporatör	Evaporatör ısı girişi (kJ/kg) $q_e = (h_3 - h_2)$	Evaporatör Tersinmezliği (kJ/kg) $i_e = T_0[(s_3 - s_2) - (h_3 - h_2)/T_h]$
Türbin	Türbin İşi (kJ/kg) $w_t = (h_3 - h_4) = (h_3 - h_{4s})\eta_t$	Türbin Tersinmezliği (kJ/kg) $i_t = T_0(s_4 - s_3)$
Kondenser	Kondenserde Atılan Isı Miktarı (kJ/kg) $q_c = (h_4 - h_1)$	Kondenser Tersinmezliği (kJ/kg) $i_k = T_0[(s_1 - s_4) + (h_4 - h_1)/T_c]$
	Net İş (kJ/kg) $w_{net} = q_e - q_c$	Toplam Tersinmezlik (kJ/kg) $i_{toplam} = i_p + i_e + i_t + i_c$
	Isıl Verim	Harcanan Ekserji (kJ/kg) $e_{harcanan} = [1 - T_0/T_H]q_e + w_p$
Sistem	$\eta_{isil} = w_{net}/q_e$	Ekserji Verimi $\eta_{II} = 1 - i_{toplam}/e_{harcanan}$

Tablo 3. Kendi kategorilerinde en iyi performans gösteren akışkanların ve yeni-nesil organik akışkanların çevresel etkisi [18]

Akışkanlar/ Özellikler	R290	R32	R125	R1270	R152a	R134a	R1234yf	R1234ze
Molekül Ağırlığı (g/mol)	44.10	52.02	120.02	42.08	66.05	102.03	114.04	114.04
Kaynama Noktası (°C)	-42.1	-51.7	-48.1	-47.7	-24	-26.1	-29.3	-18.8
Kritik Sıcaklık Değeri (°C)	96.7	78.1	66	92.4	113.3	101.1	94.85	109.52
Kritik Basınç Değeri (MPa)	4.25	5.78	3.62	4.66	4.52	4.06	3.38	3.63
ASHRAE standartları güvenlik sınıfı	A3	A2	A1	A3	A2	A1	A2L	A2L
ODP	0	0	0	0	0	0	0	0
GWP	20	675	3500	20	124	1430	4	6

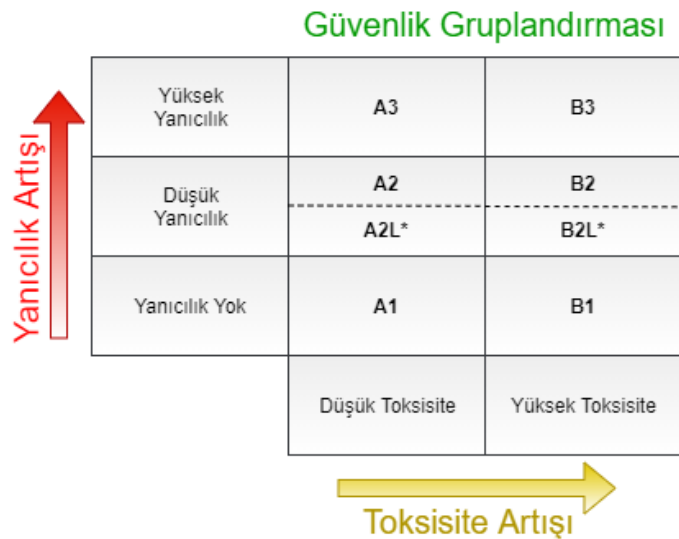
Organik Akışkanların Çevresel Özelliklerinin Değerlendirilmesi (Evaluation of Environmental Properties of Organic Fluids)

Tablo 4’de ORÇ tasarımında kullanılan kuru ve izantropik akışkanların çevresel özellikleri karşılaştırılmıştır. Ozon Yok Etme Potansiyeli (ODP) 8 akışkan için 0 olduğu ve Küresel Isınma Potansiyeli (Global Warming Potential-GWP) değerinin en yüksek R125 akışkanında olduğu görülmektedir.

Tablo 4. Islak ve Yeni Nesil Akışkanların Çevresel Özellikleri [18]

Akışkanlar/ Özellikler	R290	R32	R152a	R134a	R125	R1270	R1234yf	R1234ze
ASHRAE standartları güvenlik sınıfı	A3	A2	A2	A1	A1	A3	A2L	A2L
ODP	0	0	0	0	0	0	0	0
GWP	20	675	124	1430	3500	20	4	6

Bu bölümde ORÇ tasarımında kullanılan akışkanların çevresel özellikleri kapsamında GWP ve ASHR güvenlik sınıfı belirtilmiştir. ASHR güvenlik sınıfına dair gruplandırma da Şekil 3’de verilmiştir.

**Şekil 3.** Akışkanların çevresel özelliklerini belirleyen güvenlik gruplandırması

*Şekil 3’de A2L ve B2L düşük yanıcılık değeri olan ve maksimum yanma hızı 10 cm/s olan akışkanları ifade etmektedir.

Organik Akışkanların Termodinamik Performanslarının Belirlenmesi (Determination of Thermodynamic Performance of Organic Fluids)

Bu bölümde ıslak ve yeni nesil akışkanların ORÇ performansına etkisi belirlenmiştir. Performans parametreleri pompa işi(kJ/kg), türbin işi(kJ/kg), ısı girdisi(kJ/kg) ısı verim ve ekserji verimi olarak belirlenmiştir. Isı kaynağı sıcaklığı jeotermal uygulamaları kapsamında 110 °C olarak belirlenmiştir. Buharlaşma sıcaklığının 65-100 °C arasında değişmesinin sistem performansı üzerindeki etkisi belirlenmiştir.

Şekil 4’de görüldüğü üzere ıslak akışkanların 100 °C buharlaşma sıcaklığı altında ulaştıkları analiz sonuçları dikkate alınarak en iyi performans gösteren 2 ıslak akışkanın R152a ve R134a olduğu görülmektedir. Isıl verim ve ekserji verimi yönünden en iyi değerlere R152a’da ulaşıldığı ve aynı zamanda sadece R134a’da belli bir buharlaşma sıcaklığı değerinden sonra (98 °C) ısı verim ve ekserji veriminin azalmaya başladığı gözlenmiştir.

En düşük performans değerlerinin R125’li sistemde elde edildiği, türbin işi performansı bakımından en iyi değerlere R290 ve R1270’li sistemde ulaşılmasına rağmen, yüksek ısı girdisi ihtiyacından dolayı ısı verim sıralamasında R152a ve R134a’nın gerisinde kaldığı belirlenmiştir. R134a’nın yüksek ısı verim ve ekserji veriminin olmasının yanı sıra toplam tersinmezlik değerinin de düşük olduğu görülmektedir. Yeni nesil akışkanlarda ise ısı veriminde R1234ze akışkanın yüksek olduğu görülmektedir.

Şekil 5’te tüm akışkanların 100 °C buharlaşma sıcaklığı altında türbin giriş basıncı, buharlaşma entalpisi(h_{fg}), türbin çıkışı buharın kuruluk derecesi gibi değerler belirlenmiştir. En yüksek Türbin giriş basıncı ıslak akışkanlarda R32’de yeni nesil akışkanda ise R1234yf’de olduğu belirlenmiştir. Islak akışkanlarda buharlaşma entalpisi değeri en fazla R290 en düşük R125 de gözlemlenirken yeni nesil akışkanlarda ise R1234ze’nin, R1234yf den fazla buharlaşma entalpisi değerine ulaştığı belirlenmiştir. İncelenen diğer bir parametrede ise türbin çıkış kuruluk derecesi en fazla R134’a de gözlemlenirken yeni nesil akışkanda ise R1234ze’de gözlemlenmiştir.

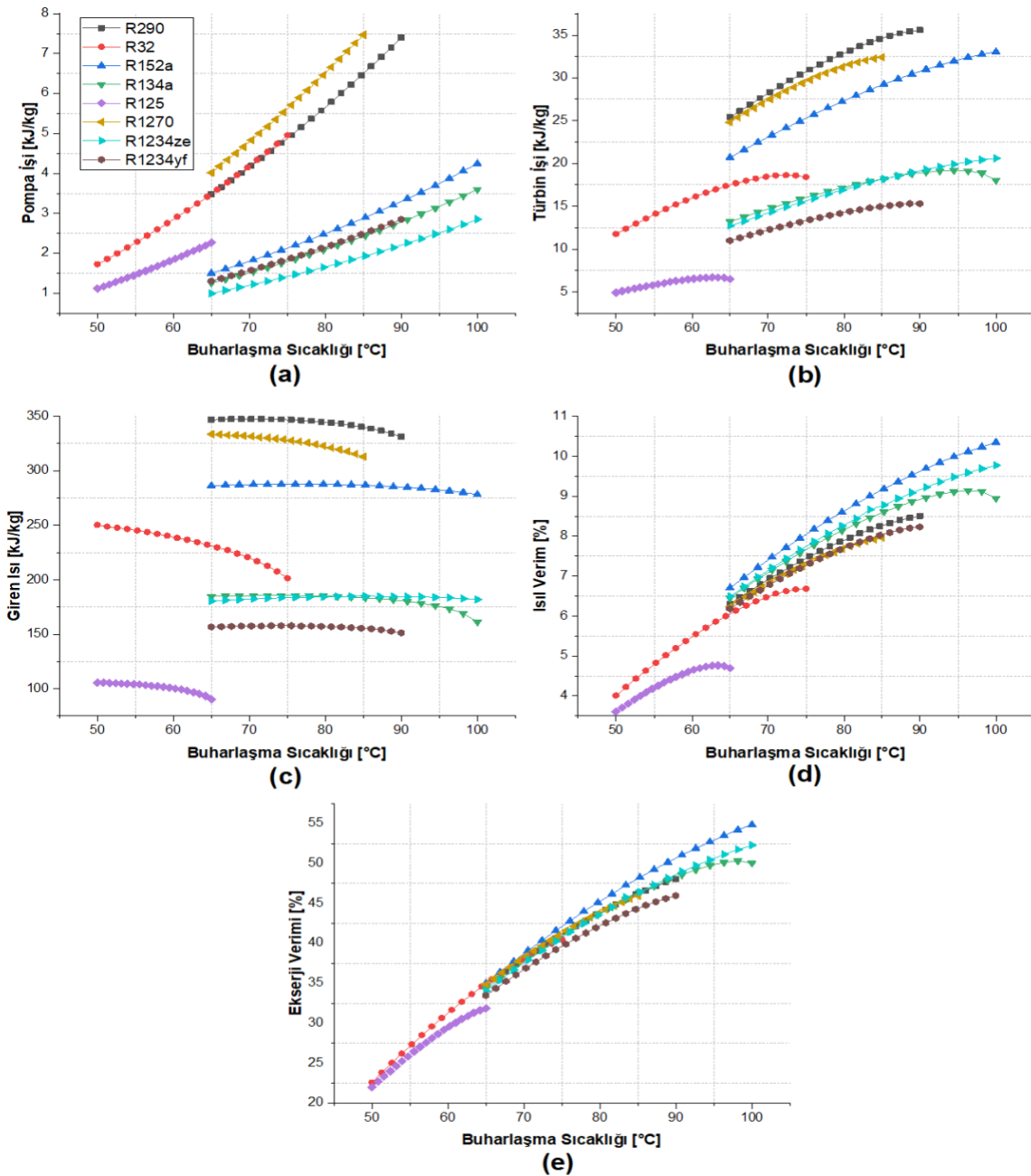
TARTIŞMA VE SONUÇLAR (DISCUSSION AND CONCLUSIONS)

Bu çalışmada, organik akışkan seçimi 3 farklı kriter üzerinden değerlendirilmiştir. Bunlar termofiziksel özellik, çevresel özellik ve termodinamik performanstır. Bu çalışmada EES, ıslak ve yeni nesil organik akışkanlar kullanılarak tasarlanan ORÇ’nin termodinamik özelliklerini belirlemiştir. R290, R32, R152a, R134a, R125, R1270, R1234ze, R1234yf gibi yeni nesil ve ıslak akışkanlar kullanılarak organik akışkanların tasarım değerlendirmeleri yapılmıştır. Aynı zamanda ıslak akışkanlar için buharlaşma sıcaklığı değişiminin performans parametreleri üzerindeki etkisi gözlemlenmiştir.

Belirlenen akışkanların çevresel özellikleri incelendiğinde tüm akışkanlar için ODP değerlerinin 0 olduğu görülürken, GWP değerlerinde yeni nesil akışkanların ıslak akışkanlara göre daha düşük değerlere sahip oldukları belirlenmiştir. ASHRAE standartları güvenlik sınıfına göre en düşük yanıcılık ve toksisite değerlerine R134a ve R125 sahip iken bu akışkanlar aynı zamanda en yüksek GWP değerlerine de sahip oldukları görülmüştür.

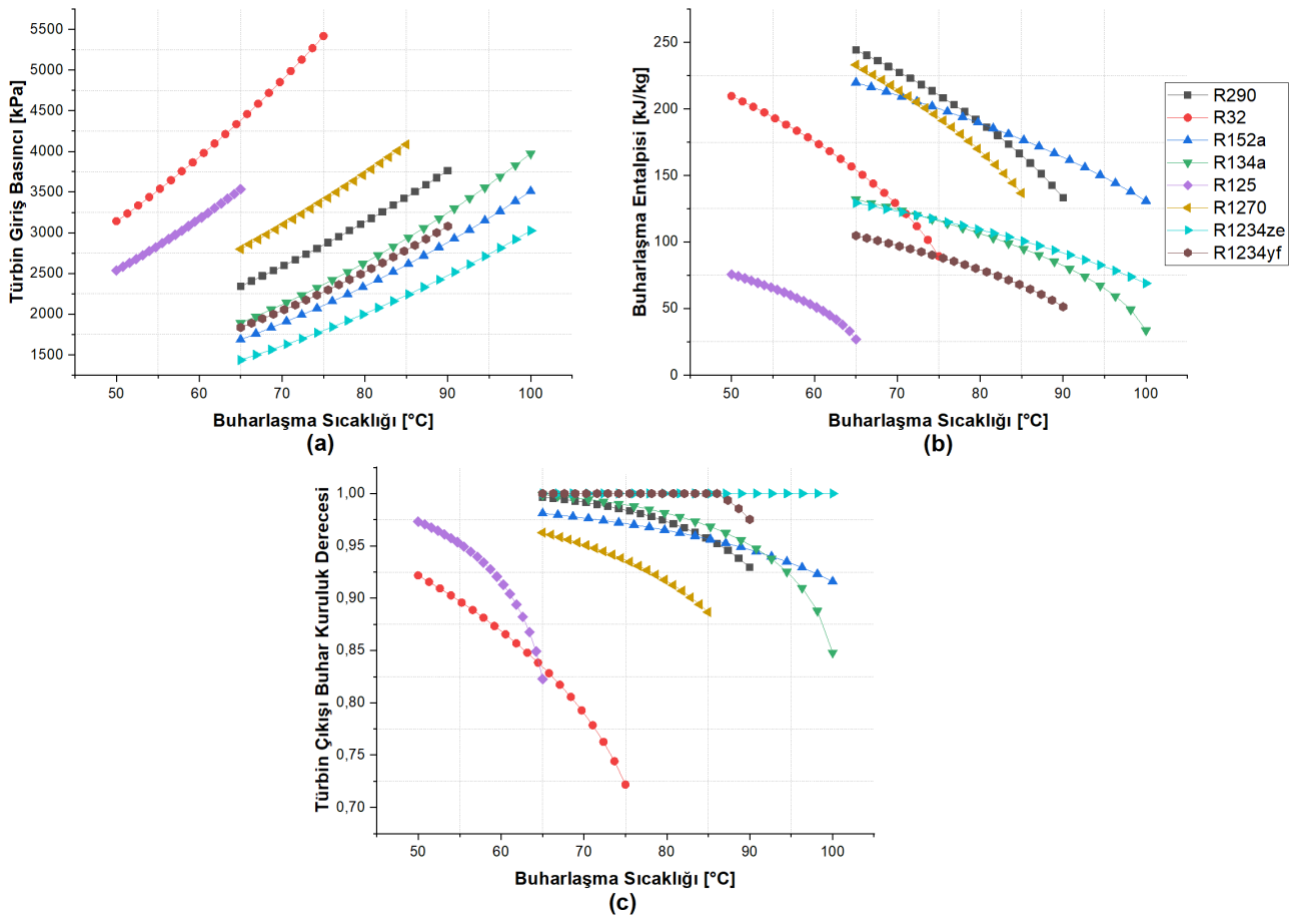
Bu çalışma sonucunda yeni nesil organik akışkanların ıslak akışkan türüne yakın özellikler sergilediği görülmüştür. Fakat yeni nesil organik akışkanların daha düşük yoğunlaşma ve buharlaşma basınç değerlerine sahip olduğu ve daha az pompa gücüne ihtiyaç duyduğu dikkat çekmektedir. Performans parametreleri altında ise özellikle R1234ze’nin R134a’dan daha iyi fakat R152a’dan ise daha düşük performansla sahip olduğu görülmektedir.

Tüm akışkanların 100 °C buharlaşma sıcaklığı altında ısı verim, türbin işi, ekserji verimi ve toplam tersinmezlik değerleri belirlenmiştir. Akışkanlar kendi kategorilerinde incelendiğinde R152a’nın özellikle elde edilen türbin işi bakımından 33.05 kJ/kg ile R134a’dan (18.03 kJ/kg) daha iyi performans gösterdiği, R1234ze’nin ise R1234yf’den ısı veriminde sırasıyla %9.77 ve %8.23, ekserji veriminde sırasıyla %52.3 ve %45.98 olarak önde olduğu görülmektedir.



Şekil 4. Kuru ve ıslak akışkanların termodinamik performanslarının karşılaştırılması a) Pompa İşi, b) Türbin İşi, c) Giren Isı, d) Isıl Verim, e) Ekserji Verimi

Islak akışkanların kaynama noktası sıcaklıklarının diğer tür akışkanlara göre çok düşük olduğu görülmektedir. En düşük kaynama noktası sıcaklığının $-51.7\text{ }^{\circ}\text{C}$ ile R32’de olduğu belirtilmiştir. Kritik sıcaklıklarda ise R125 ve R32’nin düşük değere sahip olduğu, diğer akışkanların ise birbirine yakın olduğu görülmektedir. Tüm akışkanların $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ ’ye karşılık gelen yoğuşma basınçları ile $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ ’deki buharlaşma basınçları incelendiğinde diğer tür akışkanlara kıyasla ıslak akışkanların yüksek basınç değerlerine sahip olduğu dikkat çekmektedir. Islak akışkanlar içerisinde en düşük kritik basınç değerine R152a 4.52 MPa ve R134a 4.06 MPa olarak görülmüştür.



Şekil 5. Kuru ve ıslak akışkanların termodinamik performanslarının karşılaştırılması a) Türbin giriş basıncı, b) Buharlaşma Entalpisi (h_{fg}), c) Türbin çıkışı buharın kuruluk derecesi

R123'lü sistemde oluşan basınç farkı R152a'lı sistemde oluşan basınç farkından %75 daha azdır, ayrıca özgül hacmi de %38 daha az olarak tespit edilmiştir. Hem basınç farkının hem de özgül hacminin düşük olmasından dolayı R123'lü sistemin pompa işi R152a'lı sistemden %85 daha az bulunmuştur. R1234ze'li sistemde de yüksek basınç farkı görülmesine rağmen yine de R152a'lı sistemden %13 daha az bir basınç farkına sahiptir. Ayrıca özgül hacmi de %22 daha azdır. Bundan dolayı R1234ze'li sistemde R152a'lı sistemden %32 daha düşük pompa işi tespit edilmiştir.

Bu çalışmada Organik Rankine Çevrimi'nde akışkan seçiminin sistem performansındaki önemi belirtilmiş olup; farklı türden akışkanların çevresel ve termodinamik özellikleri belirlenen performans parametreleri ile karşılaştırılmışlardır.

KAYNAKÇA (REFERENCES)

- [1] H. Wang, H. Li, L. Wang, X. Bu, Thermodynamic Analysis of Organic Rankine Cycle with Hydrofluoroethers as Working Fluids, *Energy Procedia*. 105 (2017) 1889–1894. doi:10.1016/j.egypro.2017.03.554.
- [2] A. Uusitalo, J. Honkatukia, T. Turunen-Saaresti, A. Grönman, Thermodynamic evaluation on the effect of working fluid type and fluids critical properties on design and performance of Organic Rankine Cycles, *Journal of Cleaner Production*. 188 (2018) 253–263. doi:10.1016/j.jclepro.2018.03.228.
- [3] A. Ergün, Organik Rankine Çevrimi Prensibine Göre Çalışan Bir Jeotermal Elektrik Santralinin

- Termoekonomik Analizi, Doktora Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Karabük Üniversitesi, Karabük, Türkiye, 2014.
- [4] M. Eyidoğan, Organik Rankine Çevrimli Güç Üretim Sisteminin Enerji ve Ekserji Analizi, Doktora Tezi, Karabük Üniversitesi, Karabük, Türkiye, 2014.
- [5] A. Giuffrida, A theoretical study on the performance of a scroll expander in an organic Rankine cycle with hydrofluoroolefins (HFOs) in place of R245fa, *Energy*. 161 (2018) 1172–1180. doi:10.1016/j.energy.2018.07.146.
- [6] J. Yang, Z. Sun, B. Yu, J. Chen, Experimental comparison and optimization guidance of R1233zd(E) as a drop-in replacement to R245fa for organic Rankine cycle application, *Applied Thermal Engineering*. 141 (2018) 10–19. doi:10.1016/j.applthermaleng.2018.05.105.
- [7] A. Behzadi, E. Gholamian, E. Houshfar, A. Habibollahzade, Multi-objective optimization and exergoeconomic analysis of waste heat recovery from Tehran's waste-to-energy plant integrated with an ORC unit, *Energy*. 160 (2018) 1055–1068. doi:10.1016/j.energy.2018.07.074.
- [8] A.H. Bademlioglu, R. Yamankaradeniz, O. Kaynakli, Exergy analysis of the organic rankine cycle based on the pinch point temperature difference, *Journal of Thermal Engineering*. 5 (2019) 157–165. doi:10.18186/THERMAL.540149.
- [9] R. Şahin, S. Ata, A. Kahraman, Organik Rankine Çevriminde Farklı Tip Akışkanlarda Türbin Giriş Sıcaklığı ve Basıncının Sistem Bileşenlerindeki Tersinmezlik Değerlerine Etkisinin Belirlenmesi Determination of Impact of Turbine Input Temperature and Pressure on the Irreversibility Values, *Çukurova Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*. 33 (2018) 225–236.
- [10] H. Xi, M.J. Li, C. Xu, Y.L. He, Parametric optimization of regenerative organic Rankine cycle (ORC) for low grade waste heat recovery using genetic algorithm, *Energy*. 58 (2013) 473–482. doi:10.1016/j.energy.2013.06.039.
- [11] K. Rahbar, S. Mahmoud, R.K. Al-Dadah, N. Moazami, Parametric analysis and optimization of a small-scale radial turbine for Organic Rankine Cycle, *Energy*. 83 (2015) 696–711. doi:10.1016/j.energy.2015.02.079.
- [12] J. Sarkar, Generalized pinch point design method of subcritical-supercritical organic Rankine cycle for maximum heat recovery, *Energy*. 143 (2018) 141–150. doi:10.1016/j.energy.2017.10.057.
- [13] J. Li, Q. Liu, Z. Ge, Y. Duan, Z. Yang, Thermodynamic performance analyses and optimization of subcritical and transcritical organic Rankine cycles using R1234ze(E) for 100–200 °C heat sources, *Energy Conversion and Management*. 149 (2017) 140–154. doi:10.1016/j.enconman.2017.06.060.
- [14] Q. Zhu, Z. Sun, J. Zhou, Performance analysis of organic rankine cycles using different working fluids, *Thermal Science*. 19 (2015) 179–191. doi:10.2298/TSCI120318014Z.
- [15] F. Vélez, J.J. Segovia, M.C. Martín, G. Antolín, F. Chejne, A. Quijano, Comparative study of working fluids for a Rankine cycle operating at low temperature, *Fuel Processing Technology*. 103 (2012) 71–77. doi:10.1016/j.fuproc.2011.09.017.
- [16] A. Javanshir, N. Sarunac, Thermodynamic analysis of a simple Organic Rankine Cycle, *Energy*. 118 (2017) 85–96. doi:10.1016/j.energy.2016.12.019.
- [17] J. Bao, L. Zhao, A review of working fluid and expander selections for organic Rankine cycle, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 24 (2013) 325–342. doi:10.1016/j.rser.2013.03.040.
- [18] J.M. Calm, G.C. Hourahan, Refrigerant data update, *HPAC Heating, Piping, AirConditioning Engineering*. 79 (2007) 50–64.