

Jeotermal ısı kaynaklı Organik Rankine Çevriminde kuru ve izantropik akışkanların çevresel etkilerinin ve termodinamik performanslarının karşılaştırılması

Comparison of the environmental effects and thermodynamic performances of dry and isentropic fluids in a geothermal heat sourced Organic Rankine Cycle

Sadık ATA^{*1,a}, Mehmet AKSOY^{2,b}, Remzi ŞAHİN^{1,c}, Ali KAHRAMAN^{3,d}

¹KTO Karatay Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 42020, Konya

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

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

• Geliş tarihi / Received: 05.12.2021

• Düzeltilerek geliş tarihi / Received in revised form: 31.03.2022

• Kabul tarihi / Accepted: 14.04.2022

Öz

Organik Rankine Çevrimi (ORÇ), düşük sıcaklık aralığında su yerine organik akışkanın kullanıldığı bir elektrik üretim sistemidir. ORÇ, elektrik üretmek için atık ısıyı değerlendirmek amacıyla santrallerde kullanılmaktadır. Bu çalışmada kuru ve izantropik akışkanlar kullanılarak ORÇ modelinin çevresel ve termodinamik performans karşılaştırmaları yapılmıştır. Jeotermal uygulamaları kapsamında ısı kaynağı sıcaklığı 110 °C olarak belirlenmiştir. Buharlaşma sıcaklığının 65-100 °C arasında değişmesinin sistem performansı üzerindeki etkisi belirlenmiştir. Performans parametreleri olarak pompa işi, türbin işi, giren ısı, tersinmezlik değerleri, ısı verim ve ekserji verimleri ORÇ için tespit edilmiştir. Termodinamik analizi Engineering Equation Solver (EES) kullanılarak yapılmıştır. Bu çalışma sonucunda R601 akışkanıyla türbin işi ve ısı verim yönünden en yüksek değerlerin sırasıyla 54.72 kJ/kg ve %11.34 olduğu, R141b akışkanıyla ise 32.84 kJ/kg ve %11.91 olduğu görülmüştür. Kuru ve izantropik akışkanlardan en iyi performans gösteren bir akışkan ORÇ için önerilmiştir.

Anahtar kelimeler: Jeotermal ORÇ, Organik akışkan, Organik Rankine Çevrimi (ORÇ), Termodinamik performans

Abstract

Organic Rankine Cycle (ORC) is an electricity generation system in which organic fluid is used instead of water in the low temperature range. ORC is used in power plants to use waste heat to generate electricity. In this study, thermophysical, environmental and thermodynamic performance comparisons of the ORC model were made using dry and isentropic fluids. Within the scope of geothermal applications, the heat source temperature was determined as 110 °C. The effect of changing the evaporation temperature between 65-100 °C on system performance was determined. As performance parameters, pump work, turbine work, input heat, irreversibility values, thermal efficiency and exergy efficiency have been determined for ORC. Thermodynamic analysis was performed using Engineering Equation Solver (EES). As a result of this study, it was observed that the highest values in terms of turbine work and thermal efficiency with R601 fluid were 54.72 kJ/kg and 11.34%, respectively, and 32.84 kJ/kg and 11.91% with R141b fluid, respectively. A fluid that performs best from dry and isentropic fluids has been proposed for ORC.

Keywords: Geothermal ORC, Organic fluid, Organic Rankine Cycle (ORC), Thermodynamic performance

*a Sadık ATA; sadik.ata@karatay.edu.tr, Tel: (0507) 293 03 87, orcid.org/0000-0002-6791-593X

^b orcid.org/0000-0002-1777-1341

^c orcid.org/0000-0001-7656-7538

^d orcid.org/0000-0002-5598-5017

1. Giriş

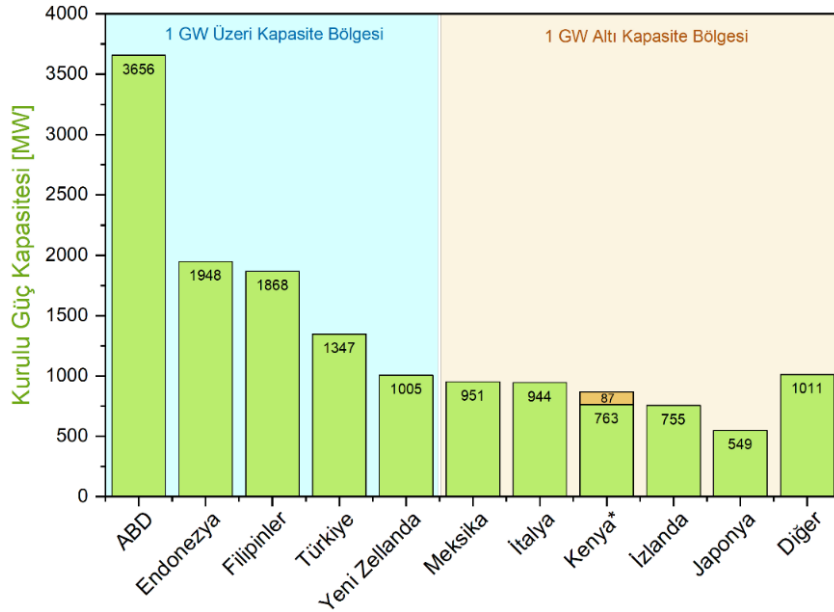
1. Introduction

Elektrik ihtiyacı, günümüzde karşılanması gereken en büyük taleplerden birisidir. Teknolojinin gelişmesi ve elektronik ekipmanların kullanımının artması da güç tüketimini günden güne artırmaktadır. Talebin karşılanması amacıyla elektrik üretimi için farklı yöntemler uygulanmaktadır. Bunlar hidro, termik, nükleer ve yenilenebilir kaynaklı yöntemlerdir. Örneğin, termik santrallerde elektrik üretimi fosil yakıtların yakılması ile açığa çıkan enerjinin akışkanlara aktarılması ve ardından ortaya çıkan yüksek basınçlı buharın türbin kanatçıklarını döndürmesiyle gerçekleştirilir.

Organik Rankine Çevrimi (ORÇ) herhangi bir ısıl kaynaktan alınan enerjinin elektrik enerjisine dönüşümünü sağlayan bir teknolojidir. Bu ısıl kaynaklar; güneş, jeotermal, biyokütle veya atık ısılardan oluşabilir. Sistemin "Organik" olarak isimlendirilmesindeki ve onu klasik Rankine çevriminden ayıran en büyük farklılık çevrimde

buhar-su kullanımının yerine organik bir akışkanın tercih edilmesidir. ORÇ'nin ideal sıvısı genellikle sıfır veya pozitif eğimli "İzantropik" veya "Kuru Akışkan" olup aşırı ısınma gerektirmezler. Klasik Rankine çevrimi aşırı ısınma gerektirir, bu nedenle türbin giriş sıcaklığı ORÇ sisteminden daha yüksektir. Bu sebeplerle organik akışkan kullanımı türbin bıçaklarının imalatı için yüksek ısıl dayanım gereksinimlerini düşürdüğü gibi maliyeti de alt seviyelere çekmektedir.

Türkiye son yıllarda artan enerji ihtiyacını karşılamaya yollarını ararken jeotermal güç santralleri konusunda da oldukça büyük ilerlemeler kaydetmiştir. Halihazırda elektrik üretimi yapan 50'nin üzerinde jeotermal santral ve yapımı devam eden santraller bulunmaktadır. Özellikle Ege bölgesinde Aydın, Denizli ve Manisa illeri çevresinde yoğunlaşan bu santraller sayesinde Türkiye Şekil 1'de görüldüğü gibi dünyada jeotermal enerji santralleri kurulu güç kapasitesi sıralamasında 1347 MW'lık kurulu güç kapasitesi ile 1 GW ve üzeri kapasite grubunda yer almaktadır.



Şekil 1. Jeotermal enerji santralleri kurulu güç kapasitesinde ilk 10 ülke (Ahmadi vd., 2020).
Figure 1. Top 10 countries in installed power capacity of geothermal power plants.

Literatüre bakıldığında ORÇ analizi ve akışkan seçimi konusunda farklı çalışmalar olduğu görülmektedir. Farklı organik akışkanlar kullanılarak tasarlanan ORÇ sisteminin termodinamik analizi ve parametre optimizasyonu yapmışlardır. Araştırma sonuçları, sabit 277 °C ısı kaynağı sıcaklığı için R123 akışkanının en yüksek verime ulaştığını ve aynı zamanda en az tersinmezliğe sahip olduğunu göstermektedir (Roy vd., 2011). Uygun akışkan seçmek için genetik algoritma yöntemini kullanarak bir optimizasyon

çalışması yürütmüşlerdir. Araştırma sonucunda tersinmezlik performansı olarak Novec649 akışkanını ve ısı transfer alanı açısından benzen akışkanını önermişlerdir (Cataldo vd., 2014). Atık ısı ORÇ'de enerji ve ekserji analizini R245fa sıvısını kullanarak yapmıştır. Buharlaştırıcı basıncının enerji ve ekserji verimliliği üzerinde büyük bir etkisi olduğunu gözlemlemiştir (Kaşka, 2014). Karışım akışkanları ile tasarlanan ORÇ'de $\Delta T_{PP,e}$ ve $\Delta T_{PP,k}$ 'nin (evaporatör-kondenser pinch point sıcaklık farkı) belirlenmesi üzerine çalışma

yapmışlardır. Değerlendirme kriteri olarak ekserjo-ekonomik performansı belirlemişlerdir. Karışım akışkanları için optimum $\Delta T_{PP,e}$ 'nin 3-6 °C arasında olması gerektiği sonucuna ulaşmışlardır (Wu vd., 2014). ORÇ'de organik akışkan ve çalışma koşullarını ΔT_{PP} 'ye bağlı olarak belirleyebilen bir yöntem üzerine çalışmışlardır. Isı kaynağının giriş sıcaklığı ile akışkanın kritik sıcaklığı arasında uygun bir fark olduğunda maksimum güce ulaşabileceğini ve akışkanın kritik bölgenin yakınında buharlaştığını belirlediler (Yu vd., 2015). Jeotermal enerji kaynağı ile elektrik üreten ORÇ'nin analizi üzerinde çalışma yapmıştır. R245fa çevrim akışkanı olarak kullanılmıştır. Hesaplanan veriler ile toplam türbin gücü 250 kW olan analiz için gerekli demo bir model oluşturulmuştur (Ağırkaya, 2015). Bir işletmenin biyokütleden elde edilen termal ısı verileri ile ORÇ'nin termodinamik analizini yapmıştır. Çalışma sonucunda 891.76 kW net elektrik üretimine göre sistem geri ödeme süresi 3.24 yıl olarak hesaplanmıştır. ORÇ'de birim ekserji maliyeti en yüksek ekipmanın kondenser olduğu tespit edilmiştir (Pelit, 2015).

ORÇ termodinamik analizini EES yazılımını kullanarak gerçekleştirmişlerdir. Araştırmasında, buharlaştırıcı girişindeki farklı fazda bulunan suyun sistem verimliliğine etkisi incelenmiştir. Buharlaştırıcı bileşenlerinin sistem performansının belirlenmesinde önemli bir rol oynadığını belirlemişlerdir (Tumen Ozdil vd., 2015). ORÇ'de HFE7100 ve FC72 akışkanlarını kullanarak sistemin enerji ve ekserji analizini yapmışlardır. Çalışmada farklı sıcaklık aralıklarında ORÇ için uygun akışkan seçimi ile sistem verimliliğini maksimize etmeyi amaçlamışlardır. Çalışma sonucunda FC72 akışkanını belirlenen parametreler için en uygun seçim olduğu belirlenmiştir (Tumen Ozdil vd., 2016). Sistemde kullanılan organik akışkanlar karşılaştırılmıştır. Akışkan tipinin türbin giriş sıcaklığının ısı verimine etkisinin çok önemli olduğu belirlenmişlerdir. Araştırma sonuçları, izantropik sıvının etkinliğinin kuru akışkan ve ıslak akışkandan daha iyi olduğunu göstermiştir (Javanshir & Sarunac, 2017). R1234ze ile tasarladıkları kritik altı ORÇ ve transkritik ORÇ sisteminin performans analizini yapmışlardır. Bu çalışma aynı zamanda önceki araştırmalarda da kullanılan R245fa ve R600a akışkanlarının R1234ze akışkanı ile karşılaştırması yapılmıştır. Kaynak sıcaklığı 100 °C ile 167 °C olduğunda R1234ze'nin R245fa ve R600a'dan sırasıyla %31.4 ve %25.8 fazla net güç değerine sahip olduğu belirlenmiştir (Li vd., 2017). ORÇ sistemlerinde Analitik Hiyerarşi Prosesi (AHP) – Entropi

yöntemi kullanarak $\Delta T_{PP,e}$ optimizasyonu üzerinde çalışmışlardır. Farklı akışkanlar kullanılan ORÇ'nin ekonomik ve ısı performansını değerlendirmişlerdir. Çalışma sonucunda maksimum güç çıktısına R141b ile maksimum ısı verim ve ekserji verim değerlerine ise R11 ile ulaştıklarını belirtmişlerdir (Wang vd., 2017). ORÇ enerji ve ekserji analizi için farklı akışkanlar kullanmışlardır. Performans parametreleri olarak buharlaşma sıcaklığını ve ısı kaynağı sıcaklığını belirlenmiştir. Isıl verim, net güç, toplam tersinmezlik ve ekserji verimliliği göz önüne alındığında, R600a akışkanını en iyi performansı gösterdiğini belirlemişlerdir (Özdemir & Kılıç, 2017). ORÇ'nin bileşenlerinde oluşan tersinmezlik değerleri üzerine çalışma yapmışlardır. Buharlaşma basıncının 250 kPa'dan 400 kPa'a artması sonucu yüksek basınç oranından dolayı türbin tersinmezliğinin %32 arttığını belirtilmiştir. 250 kPa ve 20 °C aşırı kızdırma sıcaklığı altında toplam tersinmezliğin %79,6'sının buharlaştırıcıda, %10,9'unun ise yoğunlaştırıcıda, %9,4'ünün ise türbinde meydana geldiğini tespit etmişlerdir (Kahraman vd., 2018a). R134a ve R152a akışkanı kullanılarak tasarlanan ORÇ'nin enerji analizini yapmışlardır. Çalışma sonucunda R152a kullanılarak tasarlanan sistemin R134a'ya göre daha fazla ısı girdisine gerek duyduğu belirlenmiştir. Çalışmada maksimum ısı verim, R134a ve R152a akışkanları için sırasıyla %8.123 ve %9.351 olarak bulunmuştur (Kahraman vd., 2018b).

Kuru akışkan ile çalışan rejeneratif ORÇ sisteminin termodinamik analizini ve tasarımını Epsilon-Professional yazılımını kullanarak yapmışlardır. Farklı çalışma koşulları altında ideal akışkanın belirlenmesi amaçlanmıştır. Yaptıkları çalışmada kuru akışkan olan sistemde minimum sıcaklığın sabit olması durumunda maksimum sıcaklığın artması ile ısı veriminin arttığı görülmüştür. Rejeneratif ORÇ sisteminde en iyi ve en kötü ısı verim değerlerinin sırasıyla R113 ve R227ea akışkanlarında olduğu tespit edilmiştir (Javanshir vd., 2017). ORÇ'nin atık ısı uygulaması kapsamında 160 °C'de baca gazının ısı kaynağı olarak kullanıldığı reküperatörlü ORÇ'nin termodinamik ve ekonomik analizini MATLAB programını kullanarak yapmışlardır. ORÇ'de daha uygun bir organik akışkan seçimi ve optimum aşırı kızdırma sıcaklığının belirlenmesi için optimizasyon tekniği olarak bulanık çok kriterli değerlendirme yönteminden yararlanılmışlardır. Uygulanan optimizasyon ile en iyi performansı bütan akışkanı optimum buharlaşma sıcaklığının 100 °C ve aşırı kızdırma sıcaklığının da 5 °C olduğu durumda göstermiştir (Han vd., 2017). Jeotermal

ORÇ uygulamaları kapsamında $\Delta T_{PP,e}$ 'nin termodinamik performansına etkisini incelemişlerdir. $\Delta T_{PP,e}$ 'nin termodinamik ve ekonomik performans için önemli bir parametre olduğunu belirtmişlerdir. Düşük $\Delta T_{PP,e}$ 'nin daha fazla türbin net gücünü sağlayacağı fakat ısı transfer alanını arttıracığı için ekonomik yönden olumsuz etkisinin olduğunu tespit etmişlerdir (Sun vd., 2018). Çok amaçlı yaklaşım tekniğini kullanarak ORÇ sistemlerinde optimum $\Delta T_{PP,e}$ değerini belirlemişlerdir. Ekonomi ve çevre olmak üzere iki amaç fonksiyonu üzerinde çalışmışlardır. Ekonomi fonksiyonunu toplam ısı transfer alanının net güce oranı; çevre fonksiyonunu ise toplam tersinmezliğin sıcak kaynaktaki ekserji düşüşüne oranı olarak tanımlamışlardır. Çalışmaları sonunda R245fa akışkanı kullanılarak optimum $\Delta T_{PP,e}$ 'nin 7-10 °C arasında olması gerektiğine ulaşmışlardır (Jankowski vd., 2019).

50-100 °C sıcaklık aralığında jeotermal kaynaklar için ORÇ sisteminin performansını dört farklı akışkan kullanarak araştırmıştır. Performans parametreleri birinci ve ikinci yasa verimleri, net iştir. Çalışma sonucunda R141b birinci ve ikinci yasa verimlerinde öne çıkarken net iş olarak R134'nın en iyi performansı gösterdiğini belirlemiştir (Akkurt, 2020). 2.7 MW kapasiteli Afyon Jeotermal Enerji Santrali'nin ORÇ tasarımını, santralin termoeconomik performans değerlendirilmesi ve optimizasyonu gerçek santral verilerini kullanarak yapmıştır. Çalışma sonucunda üretilen elektriğin ekserjetik maliyetini 0.0233 \$/kWh ve geri ödeme süresini 3.6 yıl olarak, optimize edilmiş ekserjetik maliyetini 0.0176 \$/kWh ve geri ödeme süresini 2.87 yıl olarak belirlemiştir (Yılmaz, 2020). İki fazlı flaş genişlemeli ORÇ ve Zeotropik akışkanları kullanarak tasarlanmış ORÇ konfigürasyonları üzerinde çalışma yapmışlardır. Çalışmalarında net güç maksimizasyonu amaç fonksiyonu olarak alınmıştır. En yüksek ısı verimin görüldüğü noktada maksimum net güce ulaşılmadığı bundan dolayı da ısı verim maksimizasyondan daha önemli olarak net güç maksimizasyonunun incelenmesi gerektiğini belirtmişlerdir. Çalışma sonucunda, düşük ısı kaynağı sıcaklıklarında ve yüksek kondenser fan gücünde zeotropik akışkanlı ORÇ'nin daha avantajlı olduğunu belirtmişlerdir (Woodland vd., 2020).

Literatür kapsamında ele alınan çalışmalarda kullanılan yöntemlere bakıldığında termodinamik analiz için Engineering Equation Solver (EES) yazılımından yararlanıldığı, termodinamik

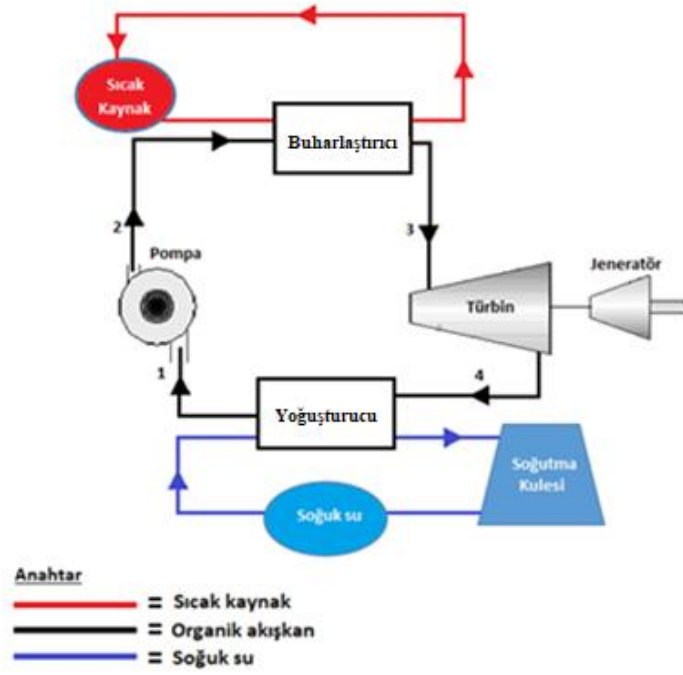
optimizasyon için ise daha çok genetik algoritma yöntemine başvurulduğu görülmektedir. Bazı çalışmalarda tek bir organik akışkan üzerinden ORÇ performansı incelenirken, bazı çalışmalarda da çoklu organik akışkanın farklı parametrelere bağlı olarak performans karşılaştırılması yapılmıştır. Çalışmalarda farklı performans parametreleri belirlendiğinden çalışmalar sonucunda önerilen akışkanların farklı olduğu görülmektedir.

Özetle, literatür incelendiğinde organik akışkanların performansları ile ilgili çok fazla çalışma olduğu görülmektedir. Çoğu çalışmada tek veya iki parametre altında incelenen akışkanlardan iyi performans gösteren akışkanın tavsiye edildiği görülmektedir. Fakat, türbin işi bakımından iyi sonuç veren bir akışkanın her zaman ısı verim performansının da iyi olmadığı görülmektedir. Bazı akışkanlarda gereken ısı girdisi ihtiyacının fazla olmasından dolayı ısı verim değeri beklenenden düşük olabilmektedir. Bundan dolayı bu çalışmada akışkanların farklı çıktılar altında (gereken pompa işi, ısı girdisi, türbin işi, ısı verim, tersinmezlik ve ekserji verimi) sergiledikleri performans durumları incelenmiştir. Bu çıktılar altında performansların değişken olduğu tespit edilmiştir. Bunun için literatürde çok fazla kullanılan 12 organik akışkanın (6 kuru-6 izantropik) performansı farklı parametreler bakımından karşılaştırılmıştır. Bu çalışma ile ORÇ üzerine çalışan kişilerin amaç fonksiyonuna (türbin gücü maksimizasyonu, ısı verim maksimizasyonu, tersinmezlik minimizasyonu gibi) bağlı olarak akışkan performansını belirleyebilmesi amaçlanmaktadır.

2. Materyal ve metot

2.1. Material and method

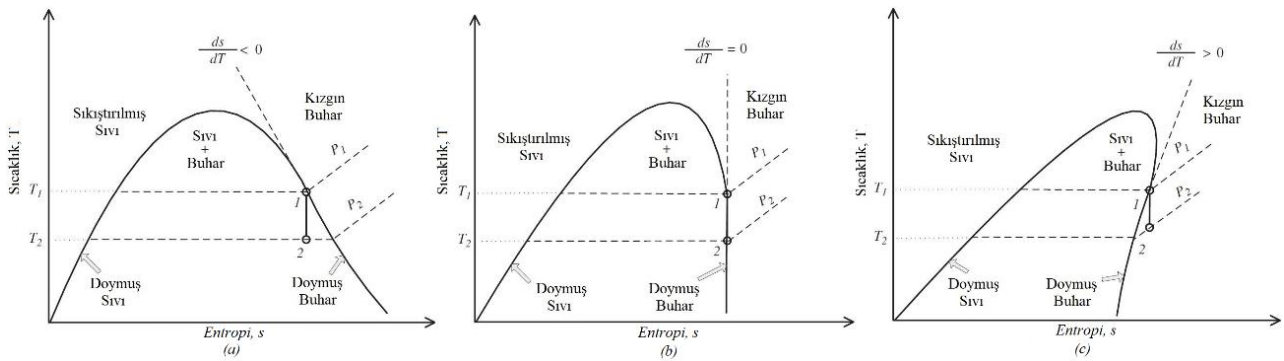
Bu çalışmada kuru ve izantropik akışkanlar kullanılarak tasarlanmış ORÇ'nin termodinamik performansı Engineering Equation Solver (EES) ile belirlenmiştir. EES yazılımının kullanılmasının nedeni, kütüphanesinde bulunan zengin içerikli farklı organik akışkan özellikleridir. Termodinamik analiz için gerekli denklemler sisteme girilerek, aynı anda birçok parametrede meydana gelen değişikliklere yanıt olarak istenen sonuçlar elde edilebilir. Farklı akışkanlar kullanmanın sistem performansı üzerindeki etkisini görmek EES sayesinde oldukça kolaydır. EES yazılımının kütüphane ve denklem çözme özelliklerinden faydalanılarak termodinamik modeller oluşturulabilir.



Şekil 2. İdeal Rankine çevrimi çalışma prensibi.
Figure 2. Working principle of ideal Rankine cycle

ORÇ’de kuru ve izantropik olarak farklı tiplerde akışkanların sistem performansı üzerindeki etkisi belirlenmiştir. Şekil 2’de ORÇ çalışma prensibi gösterilmiştir. Organik akışkan ilk olarak pompada basınclandırıldıktan sonra buharlaştırıcıdan geçerken sıcak kaynak üzerinden ısı transferi gerçekleşip sıcaklığı arttırılmaktadır. Buharlaşan akışkan yüksek basınç ve sıcaklıkta türbin kanatçıklarına çarparak döndürür, şafttan türbine bağlı olan jeneratör vasıtasıyla elektrik üretilir. Türbinden çıkan akışkan yoğuşturucudan geçirilerek yoğuşturulur ve döngü tamamlanır.

Bu çalışmada ORÇ’de farklı akışkan gruplarının etkisi belirlenmiştir. Akışkanlar doymuş buhar eğrisinin eğimine göre Şekil 3’te gösterildiği gibi kuru, izantropik 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 (Bao & Zhao, 2013).



Şekil 3. Organik akışkanların t-s diyagramında gösterimi a) Kuru, b) İzantropik, c) Islak.
Figure 3. Representation of organic fluids in t-s diagram a) Dry, b) Isentropic, c) Wet.

Yapılan çalışmalar, kuru ve izantropik akışkanların ORÇ sistemleri için daha uygun olduğunu göstermiştir. Türbinde genişleme sonunda akışkanın ıslak buhar fazına geçmesi türbine zarar verir. Bu durumu engellemek amacıyla ıslak

akışkanlar kullanılan sistemlerde aşırı kızdırma işlemi yapılmalıdır. Fakat kuru veya izantropik akışkanlarda türbinde genişleme esnasında ıslak buhar fazına geçme durumu oluşmamaktadır. Kuru akışkanlarda genişleme sonrasında akışkan fazının

kızgın buhar olması, ıslak buhar içermemesi sistem bileşenlerinin en önemlilerinden biri olan ve su moleküllerinden dolayı hasar görebilen türbin kanatçıklarının aşınmasını önüne geçer (Günaydın, 2016).

Organik akışkanlar kuru, izantropik olmak üzere iki farklı kategori altında sınıflandırılarak performansı karşılaştırılmıştır. Her bir akışkan türünden 6 akışkan olmak üzere toplam 12 akışkanın performansı aynı tasarım parametreleri altında belirlenmiştir. Bu akışkanlar aşağıda belirtilmiştir.

- **Kuru akışkanlar:** RC318, R114, R600, R600a, R601, R601a
- **İzantropik akışkanlar:** R141b, R123, R245fa, R142b, R124, R227ea

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.
- Buharlaştırıcı ve yoğuşturucudaki basınç kayıpları ihmal edilmiştir. Boru hatlarındaki kayıplar ihmal edilmiştir.
- Analizde kullanılan tüm bileşenler adyabatik olarak kabul edilmiş ve yüzey ile çevre arasında bir ısı transferinin olmadığı varsayılmıştır.
- Potansiyel ve kinetik enerji değişimleri ihmal edilmiştir.

Sistem için genel tanımlar ve denklemler aşağıda verilmiştir (Çengel & Boles, 2007; Safarian ve Aramoun, 2015).

Kütle dengesi (Toplam Kütle Girişi = Toplam Kütle Çıkışı);

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

Enerji dengesi (Toplam Enerji Girişi = Toplam Enerji Çıkışı);

$$\sum E_g = \sum E_ç \quad (2)$$

$$\dot{Q} - \dot{W} = \dot{m} * (h_ç - h_g) \quad (3)$$

Ekserji dengesi (Toplam Ekserji girişi = Son Ekserji + Ekserji Tüketimi + Ekserji Yıkımı);

$$\dot{E}x_g = \dot{E}x_s + \dot{E}x_t + \dot{E}x_y \quad (4)$$

Sistemdeki bileşenlerin enerji analizinde pompa işi (5), buharlaştırıcı ısı girdisi (6), türbin işi (7), yoğuşturucudan atılan ısı miktarı (8), için kullanılan denklemler aşağıda verilmiştir.

$$W_p = (h_2 - h_1) = (h_{2s} - h_1)/\eta_p \quad (5)$$

$$Q_b = (h_3 - h_2) \quad (6)$$

$$W_t = (h_3 - h_4) = (h_3 - h_{4s})\eta_t \quad (7)$$

$$Q_y = (h_4 - h_1) \quad (8)$$

Sistemdeki net iş (9) ve ısı verim (10) için kullanılan denklemler aşağıdaki verilmiştir.

$$W_{net} = W_t - W_p \quad (9)$$

$$\eta_{Isul} = W_{net}/Q_b \quad (10)$$

Sistemdeki bileşenlerin ekserji analizinde pompa (11), buharlaştırıcı (12), türbin (13) ve yoğuşturucu (14) için kullanılan tersinmezlik denklemleri aşağıda verilmiştir.

$$i_p = T_0(s_2 - s_1) \quad (11)$$

$$i_b = T_0[(s_3 - s_2) - (h_3 - h_2)/T_h] \quad (12)$$

$$i_t = T_0(s_4 - s_3) \quad (13)$$

$$i_y = T_0[(s_1 - s_4) + (h_4 - h_1)/T_c] \quad (14)$$

Sistemdeki toplam tersinmezlik (15), harcanan ekserji (16) ve ekserji verimi (17) için kullanılan denklemler aşağıda verilmiştir.

$$i_{Toplam} = i_p + i_b + i_t + i_y \quad (15)$$

$$e_{harcanan} = [1 - T_0/T_H]Q_b + W_p \quad (16)$$

$$\eta_{II} = 1 - i_{Toplam}/e_{harcanan} \quad (17)$$

Ortalama ısı kaynağı ve soğutma suyu sıcaklıkları da denklem 18 ve 19'da belirtilmiştir.

$$T_h = (T_{h,i} - T_{h,o})/Ln(T_{h,i} - T_{h,o}) \quad (18)$$

$$T_c = (T_{c,i} - T_{c,o})/Ln(T_{c,i} - T_{c,o}) \quad (19)$$

Tablo 1’de ORÇ tasarımında kullanılan kuru ve izantropik akışkanların termofiziksel özellikleri karşılaştırılmıştır. Seçilen kuru akışkanlardan kaynama noktası sıcaklığı en düşük olan akışkan R600a, izantropik akışkanlarda ise R227ea olarak

belirlenmiştir. Kritik sıcaklık değeri kuru akışkanlar arasından en yüksek olan akışkan R601, izantropik akışkanlar arasında ise R141b olduğu belirtilmiştir.

Tablo 1. Kuru ve İzantropik akışkanların termofiziksel özellikleri (Calm & Hourahan, 2007)

Table 1. Thermophysical properties of dry and isentropic fluids

Akışkanlar	Akış Türü (dT/ds)	Molekül Ağırlığı (g/mol)	Kaynama Noktası (°C)	Kritik Sıcaklık Değeri (°C)	Kritik Basınç Değeri (MPa)
RC318	dT/ds > 0	200.03	-6.00	115.20	2.78
R114	dT/ds > 0	170.92	3.60	145.70	3.26
R600	dT/ds > 0	58.12	-0.50	152.00	3.80
R600a	dT/ds > 0	58.12	-11.70	134.70	3.63
R601	dT/ds > 0	72.15	36.01	196.60	3.37
R601a	dT/ds > 0	72.15	27.80	187.20	3.38
R141b	dT/ds = 0	116.95	32.0	204.40	4.21
R123	dT/ds = 0	152.93	27.80	183.70	3.66
R245fa	dT/ds = 0	134.05	15.10	154.00	3.65
R142b	dT/ds = 0	100.50	-9.10	137.10	4.06
R124	dT/ds = 0	136.48	-12.00	122.30	3.62
R227ea	dT/ds = 0	170.03	-16.40	102.80	3.00

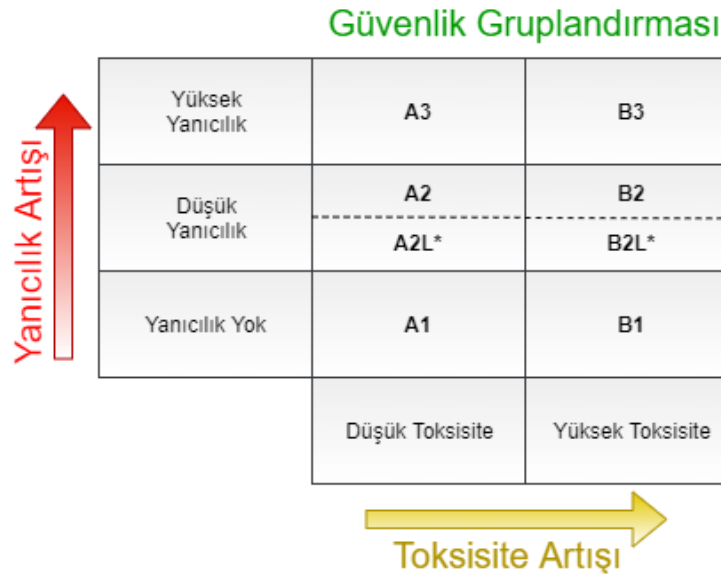
Tablo 2. Kuru ve İzantropik akışkanların çevresel özellikleri (Calm & Hourahan, 2007)

Table 2. Environmental properties of dry and isentropic fluids

Akışkanlar	ASHRAE Standartları Güvenlik Sınıfı	ODP	GWP
RC318	A1	0	10250
R114	A1	1.0	10040
R600	A3	0	20
R600a	A3	0	20
R601	A3	0	20
R601a	A3	0	20
R141b	n.a	0.12	725
R123	B1	0	77
R245fa	B1	0	1030
R142b	A2	0.070	2310
R124	A1	0.020	609
R227ea	A1	0	3220

Tablo 2’de ORÇ tasarımında kullanılan kuru ve izantropik akışkanların çevresel özellikleri karşılaştırılmıştır. ODP (Ozon Delme Potansiyeli-Ozone Depletion Potential) 8 akışkan için 0 olduğu ve GWP (Küresel Isınma Potansiyeli-Global Warming Potential) değerinin en yüksek RC318 akışkanında olduğu görülmektedir.

Bu bölümde ORÇ tasarımında kullanılan akışkanların çevresel özellikleri kapsamında GWP ve ASHRAQ güvenlik sınıfı belirtilmiştir. ASHRAE güvenlik sınıfına dair gruplandırma da Şekil 4’te verilmiştir.



*Şekil 4'te A2L ve B2L düşük yanıcılık değeri olan ve maksimum yanma hızı 10 cm/s olan akışkanları ifade etmektedir.

Şekil 4. Akışkanların çevresel özelliklerini belirleyen güvenlik gruplandırması.

Figure 4. Safety grouping that determines the environmental characteristics of fluids.

3. Model doğrulaması

3. Model validation

EES ile oluşturulan termodinamik modelin doğruluğunu tespit etmek için kaynak araştırması kapsamında belirlenen bir çalışmadan

yararlanılmıştır. Tablo 3'te aynı tasarım parametreleri altında üç farklı organik akışkan kullanılarak belirlenen ısı verim ve ekserji verim değerleri karşılaştırılmıştır. Tablo 3 incelendiğinde EES ile hazırlanan termodinamik modelin başarılı bir şekilde kullanılabileceği görülmektedir.

Tablo 3. EES ile hazırlanan modelin aynı tasarım parametreleri kullanılarak başka bir çalışma ile karşılaştırılması

Table 3. Comparison of the model prepared with EES with another study using the same design parameters

Tasarım Parametreleri	Buharlaştırma Sıcaklığı: 75 °C; Yoğuşma Sıcaklığı: 35 °C; Türbin ve pompa izantropik verimi: %70 ve %80			
	R600		R141b	
Organik Akışkanlar Performans Parametreleri	Mevcut Çalışma	Tchanche (2010)	Mevcut Çalışma	Tchanche (2010)
Isıl Verim (%)	4.18	4.236	4.54	4.526
Ekserji Verimi (%)	24.1	24.81	26.7	26.51

4. Bulgular

4. Results

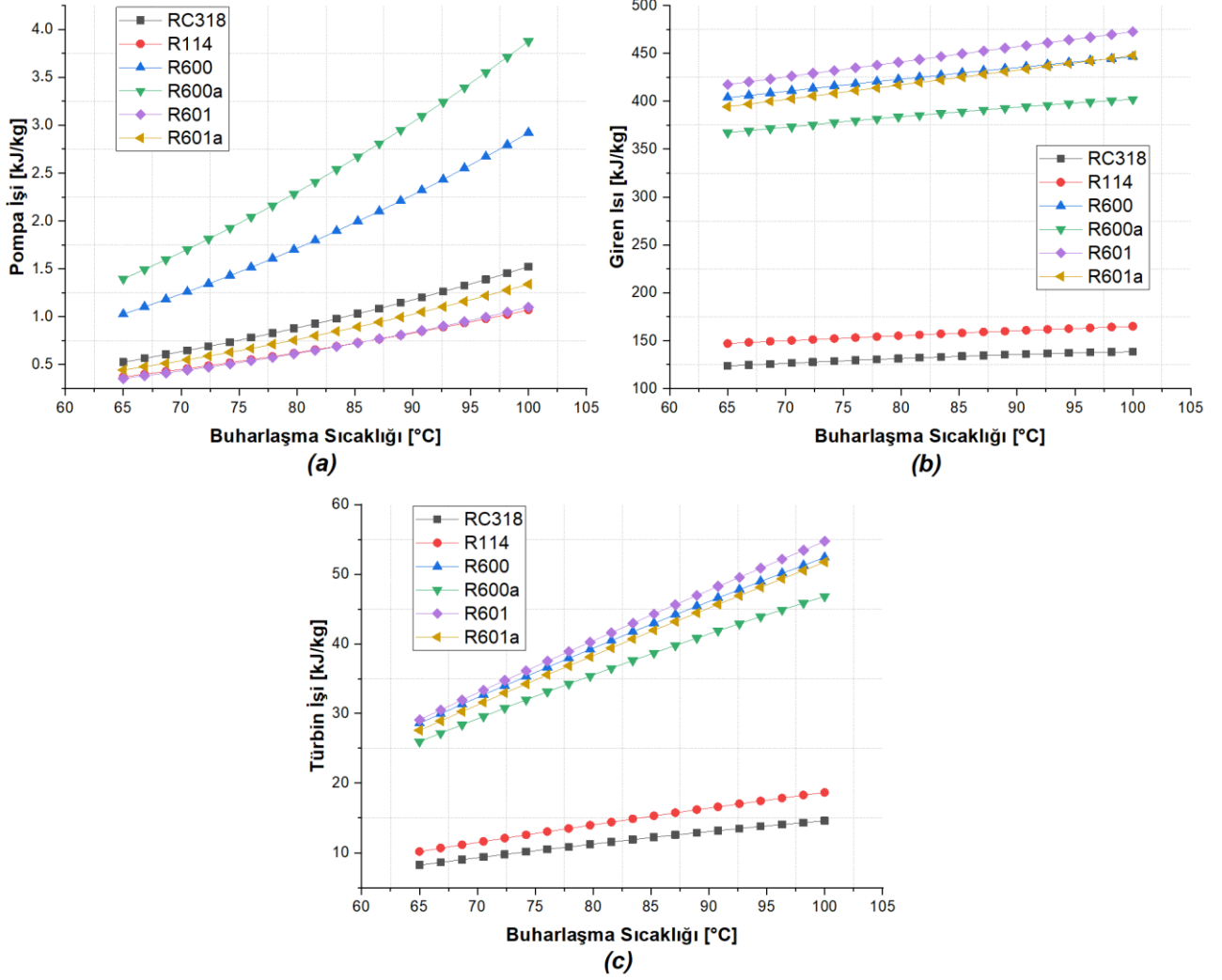
4.1. Organik akışkanların termodinamik performanslarının belirlenmesi

4.1. Determination of thermodynamic performances of organic fluids

Bu bölümde kuru ve izantropik akışkanların ORÇ performansına etkisi belirlenmiştir. Performans parametreleri pompa işi (kJ/kg), türbin işi (kJ/kg), ısı girdisi (kJ/kg), bileşenlerin tersinmezlik değerleri (kJ/kg), toplam tersinmezlik değeri (kJ/kg), ısı verim ve ekserji verimi olarak belirlenmiştir. Isı kaynağı sıcaklığı jeotermal

uygulamaları kapsamında 110 °C olarak belirlenmiştir. Buharlaştırma sıcaklığının 65-100 °C arasında değişmesinin sistem performansı üzerindeki etkisi incelenmiştir.

Şekil 5'te kuru akışkanların termodinamik performansları karşılaştırılmıştır. Pompa işi incelendiğinde en yüksek R600a'da, en düşük ise R601 ve R114'te olduğu görülmüştür. Giren ısı değerlerinde ise R601 en yüksek değere sahip iken RC318'in en düşük değerlere sahip olduğu görülmektedir. Türbin işi incelendiğinde R601 akışkanının en iyi değerlere sahip olduğu belirlenmiştir.

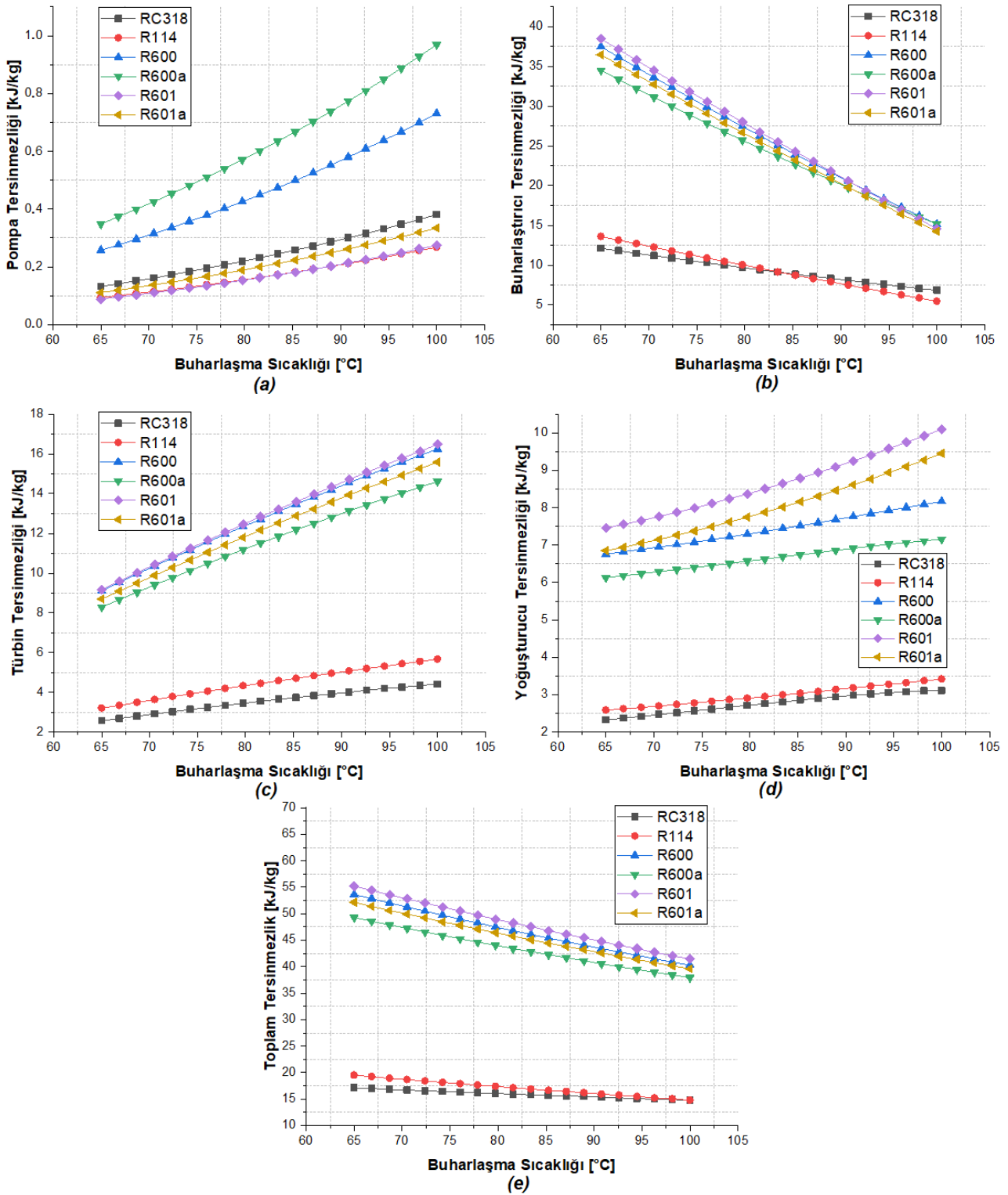


Şekil 5. Kuru akışkanların termodinamik performanslarının karşılaştırılması (a) Pompa İş, (b) Giren Isı (c) Türbin İş.

Figure 5. Comparison of thermodynamic performances of dry fluids (a) Pump Work, (b) Heat Input (c) Turbine Work

Kuru akışkanlar için bileşen bazlı tersinmezlik değerleri ve toplam tersinmezlik değerleri Şekil 6'da gösterilmiştir. Pompa için en düşük tersinmezlik değerlerine R114 ve R601 sahipken, türbinde ise RC318'in sahip olduğu görülmüştür. Buharlaştırıcı ve yoğuşturucuda ise RC318 ve

R114 akışkanlarında en düşük tersinmezlik değerlerinin elde edildiği görülmüştür. Toplam tersinmezlik değerlerine bakıldığında ise yine RC318 ve R114 akışkanlarının diğerlerinden daha iyi performans gösterdikleri görülmektedir.

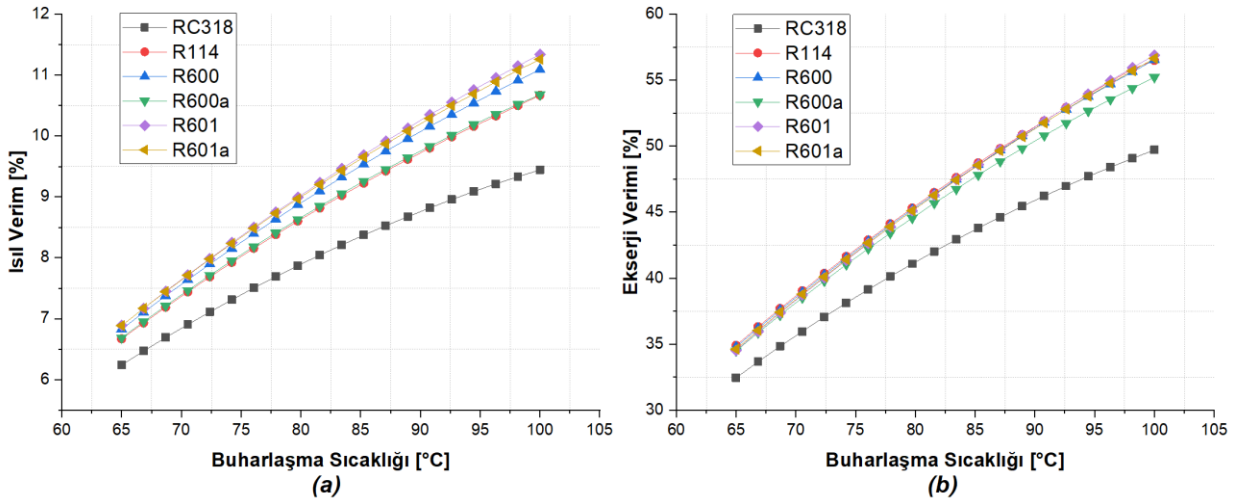


Şekil 6. Kuru akışkanların bileşen ve toplam tersinmezlik değerleri karşılaştırılması (a) Pompa, (b) Buharlaştırıcı, (c) Türbin, (d) Yoğuşturucu, (e) Toplam Tersinmezlik.

Figure 6. Comparison of component and total irreversibility values of dry fluids (a) Pump, (b) Evaporator, (c) Turbine, (d) Condenser, (e) Total irreversibility.

Şekil 7’de verilen kuru akışkanların ısı verim ve ekserji verimleri incelendiğinde, ısı verim yönünden en iyi performansı gösteren akışkanın

R601 olduğu gözlemlenmiştir. Ekserji veriminde ise yine aynı akışkanın öne çıktığı açıkça görülmektedir.



Şekil 7. Kuru akışkanların termodinamik performanslarının karşılaştırılması (a) Isıl Verim, (b) Ekserji Verimi.
Figure 7. Comparison of thermodynamic performances of dry fluids (a) Thermal Efficiency, (b) Exergy Efficiency

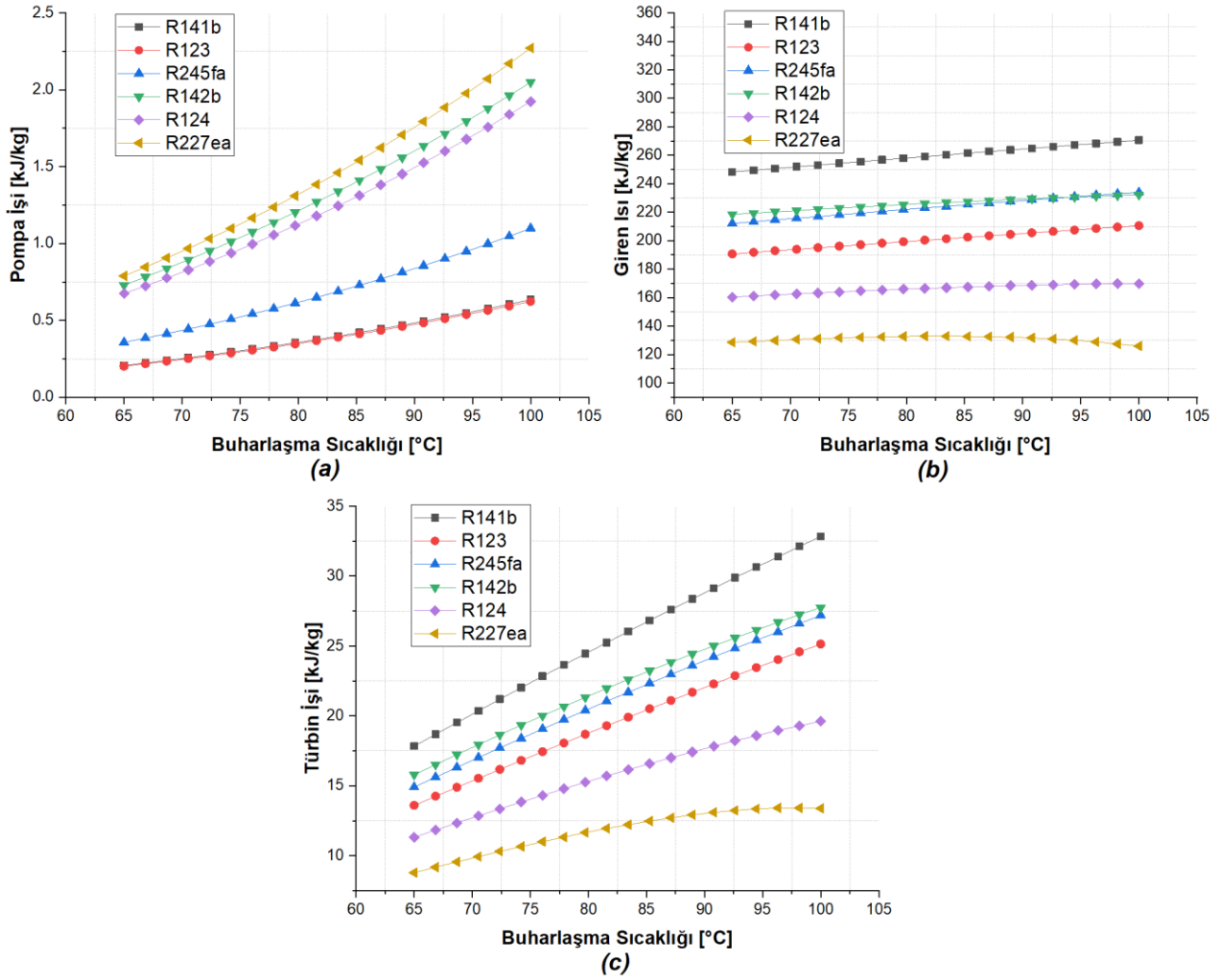
Şekil 5-7 incelendiğinde;

- Türbin işi elde edilmesinde performans sıralaması $R601 > R600 > R601a$ iken ısı verim değerlerinde ise $R601 > R601a > R600$ olduğu görülmektedir.
- En yüksek ısı girdisi ihtiyacının da R601 akışkanlı tasarımda olduğu belirlenmiştir.
- R600a ve R600 akışkanlarının diğer kuru akışkanlardan daha yüksek bir pompa işi değerine sahip olduğu belirtilmiştir.
- Isıl verim ve ekserji verim performansında ise R114'ün RC318'e göre daha iyi olduğu belirlenmiştir.
- En yüksek tersinmezlik değerlerine buharlaştırıcıda görüldüğü tespit edilmiştir.

Buharlaştırma sıcaklığının artmasıyla ısı kaynağı sıcaklığına yaklaşılmaya çalışıldığında tüm akışkanlarda buharlaştırıcı tersinmezliği azalmıştır.

- Tüm parametreler birlikte değerlendirildiğinde R601 akışkanının diğerlerinden daha iyi bir performans sergilediği görülmektedir.

Şekil 8'de izantropik akışkanların termodinamik performansları karşılaştırılmıştır. Pompa işi incelendiğinde en düşük değerlerin R141b ve R123'te olduğu görülmüştür. Giren ısı değerleri karşılaştırıldığında ise R141b akışkanı en yüksek değere sahip iken R227ea'nın en düşük değerlere sahip olduğu görülmektedir. Türbin işinde R141b'nin diğer akışkanlardan daha iyi değerlere sahip olduğu belirlenmiştir.

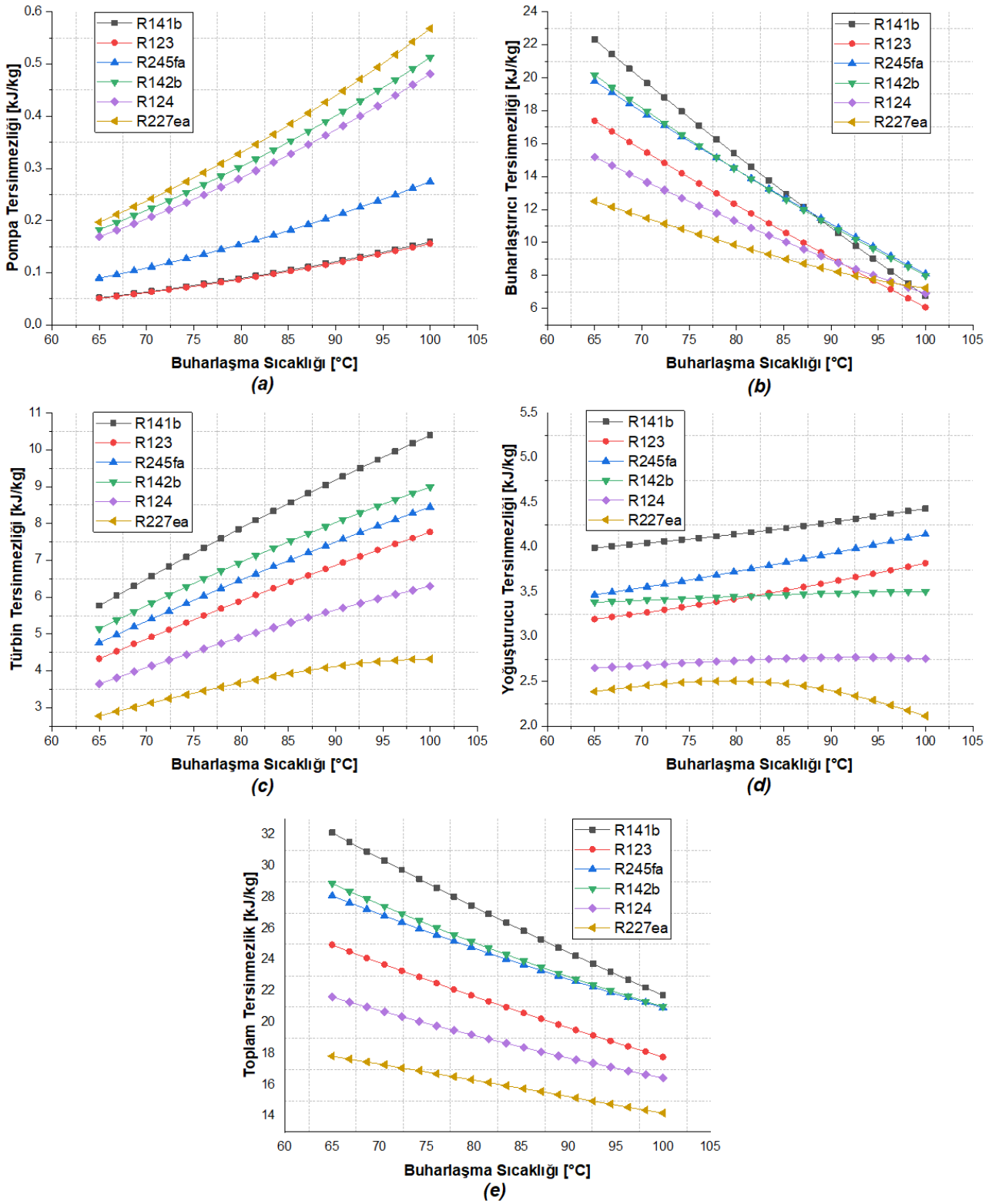


Şekil 8. İzantropik akışkanların termodinamik performanslarının karşılaştırılması (a) Pompa İşi, (b) Giren Isı (c) Türbin İşi.

Figure 8. Comparison of thermodynamic performances of isentropic fluids (a) Pump Work, (b) Heat Input (c) Turbine Work.

İzantropik akışkanlar için bileşenlerde oluşan tersinmezlik değerleri ve toplam tersinmezlikler Şekil 9'da verilmiştir. Pompa için en düşük tersinmezlik değerlerine R141b ve R123 sahip olurken türbin için R227ea sahip olmuştur. Buharlaştırıcı için 100 °C'de akışkanlar yakın

değerleri gösterirken daha düşük sıcaklıklarda R227ea akışkanının öne çıktığı görülmüştür. Toplam tersinmezlik değerlerinde ise R227ea akışkanının en iyi performansı gösterdiği belirlenmiştir.

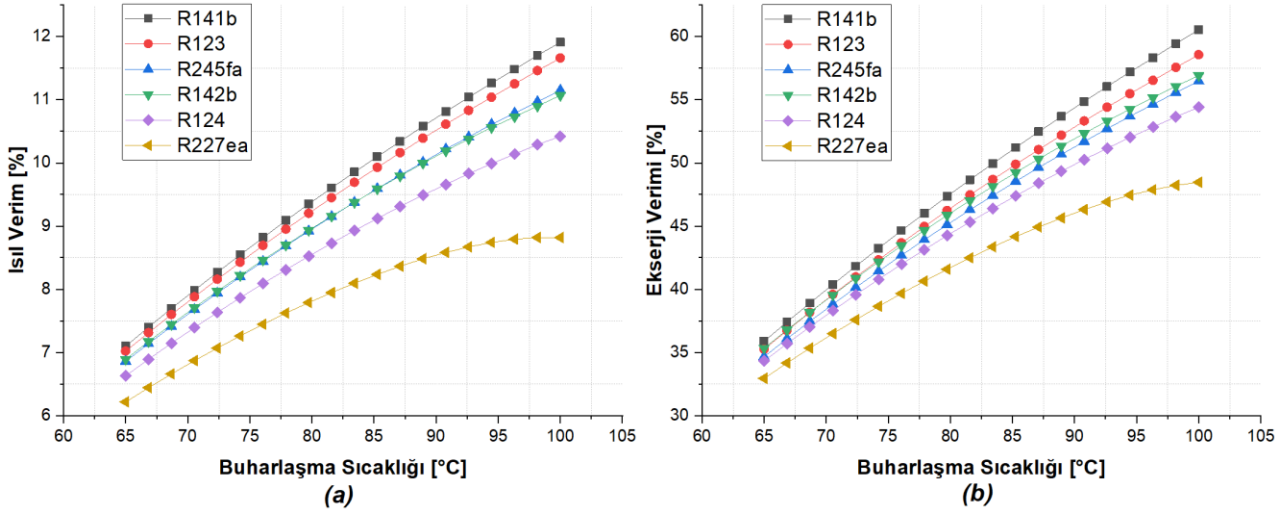


Şekil 9. İzantropik akışkanların bileşen ve toplam tersinmezlik değerleri karşılaştırılması (a) Pompa, (b) Buharlaştırıcı, (c) Türbin, (d) Yoğuşturucu, (e) Toplam Tersinmezlik.

Figure 9. Comparison of component and total irreversibility values of isentropic fluids (a) Pump, (b) Evaporator, (c) Turbine, (d) Condenser, (e) Total irreversibility.

Şekil 10'da verilen grafiklerde izantropik akışkanlar için ısı verim ve ekserji verimleri karşılaştırılmıştır. Her iki grafikte de görüldüğü

gibi R141b akışkanı en iyi performans gösteren akışkan olmuştur.



Şekil 10. İzantropik akışkanların termodinamik performanslarının karşılaştırılması (a) Isıl Verim, (b) Ekserji Verimi.

Figure 10. Comparison of thermodynamic performances of isentropic fluids (a) Thermal Efficiency, (b) Exergy Efficiency.

Şekil 8-10 incelendiğinde;

- Türbin işi elde edilmesinde performans sıralaması R141b>R142b>R245fa iken ısı verim değerlerinde ise R141b>R123>R245fa olduğu görülmektedir.
- R142b akışkanının türbin işi elde edilmesinde iyi bir performans göstermesine rağmen yüksek ısı girdisi ihtiyacından dolayı ısı verim sıralamasında ilk üç akışkan içerisinde yer alamamıştır.
- En yüksek ısı girdisi ihtiyacının da R141b akışkanlı tasarımda olduğu belirlenmiştir.
- Pompa işi gereksinimin de en düşük değerlere R141b ve R123'te ulaşılmıştır.
- En yüksek tersinmezlik değerlerine buharlaştırıcıda görüldüğü tespit edilmiştir. Buharlaşma sıcaklığının artmasıyla ısı kaynağı sıcaklığına yaklaşılmaya tüm akışkanlarda buharlaştırıcı tersinmezliği azalmış olup R141b'deki azalma diğerlerine göre daha fazla gerçekleşmiştir.
- Tüm parametreler birlikte değerlendirildiğinde R141b akışkanının diğerlerinden daha iyi bir performans sergilediği görülmektedir.

5. Sonuç

5. Conclusion

Bu çalışmada, organik akışkan seçimi çevresel ve termodinamik performans kriterleri bakımından değerlendirilmiştir. Bu değerlendirmede kuru ve izantropik akışkanlar kullanılmıştır. Kuru akışkanlardan; RC318, R114, R600, R600a, R601, R601a akışkanları, izantropik akışkanlardan ise;

R141b, R123, R245fa, R142b, R124, R227ea akışkanları pompa işi, türbin işi, giren ısı, tersinmezlik değerleri, ısı verim ve ekserji verimlerine göre karşılaştırılmıştır. 12 farklı akışkan için EES yazılımı üzerinden termodinamik model oluşturulmuş ve performans karşılaştırılması yapılmıştır.

Kuru akışkanlar içerisinde türbin işi yönünden R601>R600>R601a iken ısı verim bakımından R601>R601a>R600 şeklinde performans sıralaması olduğu tespit edilmiştir. Çevresel özellik bakımından da GWP ve ODP değerleri yakın olan bu üç akışkan içerisinde R601 akışkanın diğerlerinden önde olduğu görülmektedir. R601 akışkanlı ORÇ tasarımında %11.34 ısı verim değerine ve 54.72 kJ/kg türbin işi değerine ulaşılmıştır. RC318 ve R114 akışkanlarının bütan ve pentan akışkan gruplarına göre daha düşük ısı girdisi ihtiyacının olduğu fakat türbin işi elde edilmesinde de düşük bir performansa sahip olduğu görülmektedir.

İzantropik akışkanlar içerisinde türbin işi yönünden R141b>R142b>R245fa iken ısı verim bakımından R141b>R123>R245fa şeklinde performans sıralaması olduğu tespit edilmiştir. Çevresel özellikler incelendiğinde R123'ün R141b'ye göre çok daha düşük GWP değerine sahip olduğu görülmektedir. R123'lü akışkan tasarımında yüksek bir türbin işi elde edilmemesine rağmen düşük ısı girdisi ihtiyacından dolayı ısı verim performansının iyi olduğu dikkat çekmektedir. R141b akışkanlı ORÇ tasarımında %11.91 ısı verim değerine ve 32.84 kJ/kg türbin işi değerine ulaşılmıştır.

Kuru ve izantropik akışkanlarda en iyi performans gösteren akışkanlar birlikte değerlendirildiğinde ısı verim değerlerinin yakın olduğu fakat birim kütle başına elde edilen türbin işi değerlerinde kuru akışkanlarda daha iyi değerler elde edildiği görülmektedir. R601 akışkanlı tasarımda 54.72 kJ/kg türbin işi elde edilmesine rağmen R141b'li akışkanda türbin işi 32.84 kJ/kg olarak tespit edilmiştir.

Sonuç olarak; Tablo 4'te kuru ve izantropik akışkanlarda en iyi performans sergileyen R601 ve

R141b akışkanlı ORÇ tasarım sonuçları verilmiştir. Tablo 4 incelendiğinde;

- Düşük ısı girdisi, pompa işi gereksinimi ve toplam tersinmezlik bakımından **R141b**;
- Yüksek ısı verim ve ekserji verim bakımından **R141b**;
- Yüksek türbin işi elde edilmesi bakımından **R601**;
- Çevresel özellik bakımından **R601** akışkanın daha iyi durumda olduğu görülmektedir.

Tablo 4. Kuru ve izantropik akışkanlarda en iyi performans sergileyen akışkanların analiz sonuçları
Table 4. Analysis results of fluids with the best performance in dry and isentropic fluids

Performans Parametresi/Akışkan	R601	R141b
Isıl Verim (%)	11.34	11.91
Türbin İş (kJ/kg)	54.72	32.84
Isı Girdisi (kJ/kg)	472.7	270.6
Pompa İş (kJ/kg)	1.1	0.6347
Ekserji Verimi (%)	56.9	60.52
Toplam Tersinmezlik (kJ/kg)	41.44	21.73
ODP	0	0.12
GWP	20	725

Bu çalışma ile organik akışkan performanslarının tek bir parametre üzerinden belirlenmemesi gerektiği ve çıktı fonksiyonlarına bağlı olarak akışkanların performanslarının değişken olduğu

tespit edilmiştir. Küresel ısınma faktöründen dolayı akışkan seçiminde termodinamik performans kadar çevresel özelliklerinin de dikkate alınması gerektiği belirtilmiştir.

Semboller ve kısaltmalar

Symbols and abbreviations

e_{harcanan}	: Harcanan ekserji (kJ/kg)
h	: Entalpi (kJ/kg)
i_p	: Pompa Tersinmezliği (kJ/kg)
i_b	: Buharlaştırıcı tersinmezliği (kJ/kg)
i_t	: Türbin tersinmezliği (kJ/kg)
i_y	: Yoğuşturucu tersinmezliği (kJ/kg)
i_{toplaml}	: Toplam tersinmezlik (kJ/kg)
J	: Joule
kg	: Kilogram
\dot{m}	: Kütleli Debi (kg/s)
$\eta_{\text{Isıl}}$: Isıl Verim
η_{II}	: Ekserji Verimi
η_p	: Pompa izantropik verimi
η_t	: Türbin izantropik verimi
$^{\circ}C$: Santigrat derece
P	: Basınç (kPa)
s	: Entropi (kJ/kg $^{\circ}C$)
T	: Sıcaklık ($^{\circ}C$)
T_c	: Ortalama Soğutma Suyu Sıcaklığı ($^{\circ}C$)

Semboller ve kısaltmalar (devamı)*Symbols and abbreviations (continuing)*

T_h	: Ortalama Isı Kaynağı Sıcaklığı ($^{\circ}C$)
$T_{c,i}$: Soğutma suyu giriş sıcaklığı ($^{\circ}C$)
$T_{c,o}$: Soğutma suyu çıkış sıcaklığı ($^{\circ}C$)
$T_{h,i}$: Isı kaynağı giriş sıcaklığı ($^{\circ}C$)
$T_{h,o}$: Isı kaynağı çıkış sıcaklığı ($^{\circ}C$)
Q_b	: Buharlaştırıcı Isı Girdisi (kJ/kg)
Q_y	: Yoğuşturucudan Atılan Isı (kJ/kg)
W_p	: Pompa İşi (kJ/kg)
W_t	: Türbin İşi (kJ/kg)
W_{net}	: Net İş (kJ/kg)
W_t	: Türbin İşi (kJ/kg)
$\Delta T_{pp,e}$: Evaporatör pinch noktası sıcaklık farkı ($^{\circ}C$)
$\Delta T_{pp,k}$: Kondenser pinch noktası sıcaklık farkı ($^{\circ}C$)
EES	: Engineering Equation Solver
ODP	: Ozon Delme Potansiyeli (Ozone Depletion Potential)
ORÇ	: Organik Rankine Çevrimi
GWP	: Küresel Isınma Potansiyeli (Global Warming Potential)

Yazar katkısı*Author contribution*

Araştırmacılardan Ata; makalenin düzenlenmesi, literatür kısmı, verilerin elde edilmesi ve ilerleyişinin denetlenmesi, Aksoy; ilgili tabloların/şekillerin hazırlanması ve yorumlanmasında katkı sunmuştur. Araştırmacılardan Şahin ve Kahraman ise bulgular ve sonuç kısmının şekillendirilmesine yönelik katkı sunmuştur.

Etik beyanı*Declaration of ethical code*

Bu makalenin yazarları, bu çalışmada kullanılan materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve / veya yasal-özel izin gerektirmediğini beyan etmektedir.

Çıkar çatışması beyanı*Conflicts of interest*

Yazarlar herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan eder.

Kaynaklar*References*

Ağırkaya, O. (2015). Jeotermal enerji kaynaklı Organik Rankine Çevriminin modellenmesi ve analizi. [Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Enerji Bilim ve Teknoloji Programı].

Ahmadi, A., El Haj Assad, M., Jamali, D. H., Kumar, R., Li, Z. X., Salameh, T., Al-Shabi, M., & Ehyaei, M. A. (2020). Applications of geothermal Organic Rankine Cycle for electricity production. *Journal of Cleaner Production*, 274. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122950>

Akkurt, F. (2020). Düşük sıcaklıkta jeotermal enerji kaynaklı Organik Rankine Çevrimi sisteminin enerji ve ekserji analizi. *Uludağ University Journal of The Faculty of Engineering*, 729–742. <https://doi.org/10.17482/uumfd.624475>

Bao, J., & Zhao, L. (2013). A review of working fluid and expander selections for Organic Rankine Cycle. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 24, 325–342. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.03.040>

Calm, J. M., & Hourahan, G. C. (2007). Refrigerant data update, HPAC Heating, Piping, AirConditioning Engineering, 79(1), 50–64.

Cengel, Y., & Boles, M. (2007). *Thermodynamics an engineering approach*. McGraw- Hill.

Cataldo, F., Mastrullo, R., Mauro, A. W., & Vanoli, G. P. (2014). Fluid selection of Organic Rankine Cycle for low-temperature waste heat recovery based on thermal optimization. *Energy*, 72, 159–167. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2014.05.019>

Günaydın, İ. (2016). 1,5 kW gücünde Organik Rankine Çevriminin parametrik tasarımı termodinamik analizi prototip imalatı ve testi. [Yüksek Lisans Tezi, Kırıkkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü].

- Jankowski, M., Borsukiewicz, A., Szopik-Depczyńska, K., & Ioppolo, G. (2019). Determination of an optimal pinch point temperature difference interval in ORC power plant using multi-objective approach, *Journal of Cleaner Production*, 217, 798-807. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.01.250>
- Javanshir, A., & Sarunac, N. (2017). Thermodynamic analysis of a simple Organic Rankine Cycle, *Energy*, 118, 85-96. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.12.019>
- Javanshir, A., Sarunac, N., & Razzaghpahanah, Z. (2017). Thermodynamic analysis of a regenerative organic Rankine cycle using dry fluids, *Applied Thermal Engineering*, 123, 852-864. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.05.158>
- Han, Z., Li, P., Han, X., Mei, Z., & Wang, Z. (2017). Thermo-Economic Performance Analysis of a Regenerative Superheating Organic Rankine Cycle for Waste Heat Recovery, *Energies*, 10, 1593, 1-23. <https://doi.org/10.3390/en10101593>
- Kahraman, A., Sahin, R., & Ata, S. (2018a). Analysis of exergy destruction rates in the components of the orc system using n-pentane fluid. *International Conference on Engineering Technologies ICENTE'18*, 513-518, Konya.
- Kahraman, A., Sahin, R., & Ata, S. (2018b). Çevresel özellik yönünden farklı özelliklere sahip R134a ve R152a akışkanı kullanılarak tasarlanan Organik Rankine Çevriminin performanslarının karşılaştırılması. VI. KOP Uluslararası Bölgesel Kalkınma Sempozyumu, 554-562, Konya.
- Kaşka, Ö. (2014). Energy and exergy analysis of an Organic Rankine for power generation from waste heat recovery in steel industry. *Energy Conversion and Management*, 77, 108-117. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2013.09.026>
- Li, J., Liu, Q., Ge, Z., Duan, Y., & Yang, Z. (2017). 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, 140-154. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.06.060>
- Özdemir, E. & Kılıç, M. (2017). Energy and exergy analysis of an Organic Rankine Cycle using different working fluids from waste heat recovery. *Uluslararası Çevresel Eğilimler Dergisi*, 1(1), 32-45. <https://dergipark.org.tr/ijent/issue/32841/368720>
- Pelit, M. (2015). Biyokütle kaynaklı Organik Rankine Çevrimli güç ünitesinin termoeconomik analizi. [Yüksek Lisans Tezi, Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü].
- Roy, J. P., Mishra, M. K., & Misra, A. (2011). Performance analysis of an Organic Rankine Cycle with superheating under different heat source temperature conditions. *Applied Energy*, 88(9), 2995-3004. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2011.02.042>
- Safarian, S., & Aramoun, F. (2015). Energy and exergy assessments of modified Organic Rankine Cycles (ORCs). *Energy Rep.* 1, 1-7. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2014.10.003>
- Sun, J., Liu, Q., & Duan, Y. (2018). Effects of evaporator pinch point temperature difference on thermoeconomic performance of geothermal organic Rankine cycle systems, *Geothermics*, 75, 249-258. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2018.06.001>
- Tchanche, B.F. (2010). *Low-Grade Heat Conversion into Power Using Small Scale Organic Rankine Cycles*, [Doctoral Thesis, Agricultural University Of Athens].
- Tumen Ozdil, N. F., Segmen, M. R., & Tantekin, A. (2015). Thermodynamic analysis of an Organic Rankine Cycle (ORC) based on industrial data. *Applied Thermal Engineering*, 91, 43-52. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2015.07.079>
- Tumen Ozdil, N. F., Segmen, M. R., & Tantekin, A. (2016). Investigation of different working fluid effects on exergy analysis for Organic Rankine Cycle (ORC). *Çukurova University Journal of the Faculty of Engineering and Architecture*, 31(June), 441-449.
- Wang, J., Diao, M., & Yue, K. (2017). Optimization on pinch point temperature difference of ORC system based on AHP-Entropy method. *Energy*, 141, 97-107. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.09.052>
- Woodland B.J., Ziviani, D., E. Braun, J., & A. Groll, E. (2020). Considerations on alternative Organic Rankine Cycle configurations for low-grade waste heat recovery, *Energy*. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.116810>
- Wu, Y. T., Lei, B., Ma, C. F., Zhao, L., Wang, J. F., Guo, H., & Lu, Y. W. (2014). Study on the characteristics of expander power output used for offsetting pumping work consumption in Organic Rankine Cycles. *Energies*, 7(8), 4957-4971. <https://doi.org/10.3390/en7084957>
- Yilmaz, C. (2020). Improving performance and thermoeconomic optimization of an existing binary geothermal power plant: A case study. *Journal of Thermal Science and Technology*, 40(1), 37-51.

Yu, H., Feng, X., & Wang, Y. (2015). A new pinch based method for simultaneous selection of working fluid and operating conditions in an ORC (Organic Rankine Cycle) recovering waste

heat. *Energy*, 90, 36–46.
<https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.02.059>