

Organik Rankine Çevriminde Farklı Tip Akışkanlarda Türbin Giriş Sıcaklığı ve Basıncının Sistem Bileşenlerindeki Tersinmezlik Değerlerine Etkisinin Belirlenmesi

Remzi ŞAHİN¹, Sadık ATA^{*1}, Ali KAHRAMAN²

¹KTO Karatay Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Konya

²Necmettin Erbakan Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Enerji Sist. Müh. Bölümü, Konya

Geliş tarihi: 12.04.2018 Kabul tarihi: 29.06.2018

Öz

Bu çalışmada, R600a, R290 ve R152a akışkanı kullanılarak tasarlanan üç farklı Organik Rankine Çevrimi (ORÇ) modelinin ekserji analizi yapılmıştır. Bu analiz, farklı türbin giriş sıcaklığı (°C) ve türbin giriş basıncı (kPa) değerlerinde yapılmıştır. Bu giriş parametreleri kullanılarak, ısıl verim, sistemin ekserji verimi ve birim kütle başına bileşenlerde oluşan tersinmezlik değerleri üç farklı akışkan içeren ORÇ için tespit edilmiştir. Ekserji analizi, MATLAB ve Engineering Equation Solver (EES) yazılımı kullanılarak yapılmıştır. ORÇ teknolojisinde çeşitli tipteki akışkanların kıyaslamalı olarak ekserji analizinin yapılabilmesi için, kuru tip akışkan için R600a, izentropik tip akışkan için R290, ıslak tip akışkan için ise R152a akışkanı seçilerek, 150 giriş ve 900 çıkış numerik veri kullanılmıştır. Bu çalışmada, MATLAB ve EES yazılımı kullanılarak oluşturulan üç farklı model ile Organik Rankine çevriminin ekserji analizinin başarıyla uygulanabildiği gösterilmiş, farklı akışkan kullanılmasının bileşenlerde meydana gelen tersinmezlik değerlerine etkisi belirtilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Organik rankine çevrimi (ORÇ), Ekserji, Tersinmezlik

Determination of Impact of Turbine Input Temperature and Pressure on the Irreversibility Values in System Components of Different Type Fluids in ORC

Abstract

In this study, exergy analysis was performed on three different Organic Rankine Cycle (ORC) models designed using R600a, R290 and R152a fluids. This analysis was carried out at different values of condenser inlet pressure (kPa), turbine inlet temperature (°C) and turbine inlet pressure (kPa). Using these input parameters, the thermal efficiency, the exergy of the system, and the irreversibility values of the components per unit mass were determined for the ORC containing three different fluids. Exergy analysis was performed using the MATLAB and Engineering Equation Solver (EES) software. R600a for dry type fluid, R290 for isentropic type fluid and R152a fluid for wet type fluid were selected and 150 input and 900 output numerical test values were used in order to perform exergy analysis in different types of fluids in ORC technology. In this study, we show that the exergy analysis of the Organic Rankine cycle can be successfully applied with three different models created using the MATLAB and EES software, and the effect of using different fluids on the irreversibility values that occur in the components is indicated.

Keywords: Organic rankine cycle (ORC), Exergy, Irreversibility

*Sorumlu yazar (Corresponding author): Sadık ATA, sadik.ata@karatay.edu.tr

1. GİRİŞ

Organik Rankine Çevrimi (ORÇ); güneş, jeotermal, biyokütle, vs. gibi yenilenebilir kaynaklardan veya atık ısıdan enerjiye kadar herhangi bir kaynaktan gelen sıcaklığın dönüşümünü içeren umut verici bir teknolojidir. Sistem, bazı farklılıklar dışında klasik Rankine çevrimine benzemektedir. Esasen geleneksel olarak kullanılan buhar/su yerine bir organik sıvı olan çalışan akışkan olmasıdır. Su ıslak bir sıvı olarak sınıflandırılır. Bu tür sıvılar, genişleme işlemi sırasında yoğunlaşmayı önlemek için aşırı ısınmayı gerektirir. ORÇ'ler için ideal akışkanlar genellikle aşırı ısınmayı gerektirmeyen sırasıyla sıfır veya pozitif eğimli "İzantropik" veya "Kuru akışkanlar" dır. Klasik Rankine Çevrimi, bir ORÇ sistemine göre aşırı ısınma ve dolayısıyla daha yüksek türbin giriş sıcaklıklarını gerektirir. Bu türbin bıçakları ve kazan için pahalı yüksek sıcaklık malzemelerinin kullanılmasını gerektirecektir [1].

Literatür incelendiğinde ORÇ analizi ve akışkan seçimi hakkında yapılmış farklı çalışmaların olduğu görülür. Türkiye'de son yıllarda yapılan tez çalışmalarından bazıları aşağıda özetlenmiştir. Günaydın [2], reküperatörlü ORÇ sisteminin tasarımı, termodinamik analizleri ve prototip sistem imalatı üzerine çalışmıştır. Bu amaçla 1,5 kW'lık bir ORÇ sistemi farklı kaynak sıcaklıkları (90,100 ve 110 °C) için tasarlamıştır. Termodinamik çevrim analizleri için CYCLE TEMPO v. 5.1 ve REFPROP v. 9.0 yazılımları kullanarak R236ea, R245ca, R245fa ve R365mfc akışkanları ve %60, %70, %80 izantropik verimli türbin analiz edilmiştir. Analiz sonucunda en yüksek ORÇ verimi 110 °C ısı kaynağı sıcaklığı, %80 izantropik verimi, 5 °C aşırı kızdırma sıcaklığı ve R365mfc ile %10,4 olarak hesaplanmıştır. Piyasada R365mfc az bulunduğu için prototip test sisteminde R245fa kullanılmıştır. Maliyet düşürme amaçlı kabul edilebilir olduğu için türbin yerine de scroll kompresör kullanılmıştır. Bu durumda sistemin en düşük türbin verimi %46,76, en yüksek türbin verimi de %58,51 olarak ölçülmüştür. Türbin verimi arttıkça ORÇ verimi de artmıştır. Karaman [3], kombine Organik Rankine ve kompresörlü soğutma

çevriminin termodinamik analizini EES yazılımı ile analiz etmiştir. Kombine sisteminde ORÇ veriminin düşük olması genel sistemin veriminin de düşük olduğunu saptamıştır. R134a akışkanı seçildiği zaman yüksek sıcaklıklarda yüksek verim elde edilememiştir. Yüksek sıcaklıklarda kritik sıcaklığı yüksek akışkanların daha verimli olduğu anlaşılmıştır. Ağırkaya [4], jeotermal enerji kaynağı elektrik üreten ORÇ'yi analiz etmiştir. Türbin gücü 250 kW ve ısı kaynağı sıcaklığı 140 °C olan demo bir model oluşturmuştur. HFC-245fa akışkanın kullanıldığı ORÇ'de çevrimin genel verimi ise %14 olarak belirlemiştir. FLOWNEX yazılımından yapılan dinamik analiz ile çevrim verimini artırmak için yoğunlaştırıcı soğutma suyu sıcaklığını azaltan bir senaryo yapılmış ve 34 °C'den 31,5 °C'ye anlık düşürerek santralin genel veriminin %14,26'ya çıktığını tespit etmiştir.

Ayrıca, dünya üzerinde yapılan çalışmalar incelenmiş ve 2017 yılı çalışmalarından bazıları aşağıda özetlenmiştir. Javanshir ve Sarunac [5], kritik altı ve kritik üstü basit ORÇ'nin termodinamik modellemesi için EBSILON Professional yazılımını kullanmışlardır. Seçilen tüm organik akışkanlar için, maksimum basınç yükseldikçe termal verim artmaktadır. Türbin giriş sıcaklığının çevrim verimi üzerindeki etkisi organik akışkanın çeşidine bağlıdır. Islak organik akışkan için ORÇ'nin termal veriminin türbin giriş sıcaklığı arttıkça arttığını tespit etmişlerdir. İzantropik akışkanların termal veriminin doğrudan türbin giriş sıcaklığından bağımsız olduğunu bulmuşlardır. Ayrıca izantropik akışkanların veriminin kuru ve ıslak akışkanlara göre daha yüksek olduğuna ve organik akışkanların belirli yüksek sıcaklık kapasitesiyle yüksek çevrim gücü elde ettiğine ulaşmışlardır. Dong ve arkadaşları [6], yaptıkları çalışmada düşük sıcaklıktaki ORÇ için saf akışkan ve zeotropik karışım kullanılmasıyla çevrim performansını karşılaştırmışlardır. Akışkan özellik veri tabanı REFPROP ve MATLAB birleştirilerek çevrim simülasyonu yapılmıştır. Zeotropik karışım kullanarak verimin saf akışkana göre %17,96 arttığı elde edilmiştir. Wang ve arkadaşları [7], HFE7000, HFE7100 ve HFE7500 içeren hidro flora eterleri sabit dış şartlar altında organik

akışkan olarak kullanarak ORÇ'nin analizini incelemişlerdir. Birinci ve ikinci verim yasalarını, net güç çıkışı, türbin giriş sıcaklığı artışıyla türbin boyutu faktörünü karşılaştırmak için bir bilgisayar yazılımı geliştirmişlerdir. Türbin giriş sıcaklığı altında test edilen organik akışkanların termodinamik analizleri EES bilgisayar yazılımı kullanılarak yapılmıştır. HFE7000'nin maksimum termodinamik verimi ürettiği ve verilen şartlar altında net güç açısından en iyi sonucu verdiği bulunmuştur. HFE7000 organik akışkanının HFE7100 ve HFE7500'le kıyaslanınca en düşük türbin boyutuna sahip olduğu bulunmuştur. ORÇ'de, düşük dereceli ısının güce dönüşümü için HFE7000'nin organik akışkan olarak kullanılabileceğini önermişlerdir.

Sun ve arkadaşları [8], çift basınç ORÇ sisteminde, yüksek türbin seviyesi ve düşük seviye giriş basıncının en iyi sistem performansına erişmek için uygun değerler olduğunu belirtmişlerdir. Sistemin simülasyonu MATLAB ile yapılmıştır. Organik akışkanın termodinamik özellikleri de REFPROP'la hesaplanmıştır. Üç akışkan karşılaştırılmıştır. Bunlar; R21, R114 ve R245fa'dır. R245fa'nın 3 organik akışkan arasından en iyi performansı verdiği belirlenmiştir. Toplam sistemin ekserji verimliliğinin besleme suyu 120 °C'nin altında %5,8'i aştığını ve 250 t/h kütle akış debisinde jeotermal suyla 800 kW'tan fazla elektrik ürettiğini tespit etmişlerdir. Sistem optimizasyonu, çift basınç ORÇ'nin, jeotermal enerjiyi kullanarak tek basınç sisteminden daha iyi bir performansa sahip olduğunu bulmuşlardır.

Muhammad ve arkadaşları [9], düşük dereceli buharın atık ısı geri kazanımı için, R245fa aracı akışkanını kullanarak 1 kW'lık ORÇ tasarımı ve deneysel araştırmasını yapmışlardır. R245fa aracı akışkanı REFPROP yazılımıyla seçilmiştir. Genişleyici olarak scroll kompresör kullanılmıştır. Sistemin termal verimini %5,64, net verimini %4,66 ve maksimum güç üretim noktasında genişleyicinin izantropik verimini %58,3 olarak elde etmişlerdir. Deneysel verilere göre maksimum termal verim %5,75 ve genişleyicinin maksimum izantropik verimini %77,74 olarak bulmuşlardır. Kaska [10], atık ısı ile çalışan ORÇ'nin enerji ve ekserji analizini incelemiştir. Çalışmasında,

buharlaştırıcı/yoğurturucu basıncının, aşırı ısınma ve soğutmanın sistemin enerji ve ekserji verimi üzerindeki etkisini göstermiştir. En fazla ekserji kaybına yol açan bileşenleri buharlaştırıcı, türbin, yoğurturucu ve pompa olarak sıralamıştır. Buharlaştırıcı basıncının hem enerji hem de ekserji verimi üzerindeki etkisinin büyük olduğunu tespit etmiştir.

Dong ve arkadaşları [11], zeotropik karışımı organik akışkan olarak kullanarak yüksek sıcaklıklı ORÇ'nin performans analizini yapmışlardır. Belirlenen çevrimin MATLAB ile simülasyonu yapılmıştır. Akışkan özellikleri için REFPROP 9.0 yazılımından yararlanılmıştır. Siloxanes hexamethyldisiloxane (MM)/octamethyltrisiloxane (MDM) zeotropik karışımın saf akışkanlara göre verimi arttırdığını bulmuşlardır. Le ve arkadaşları [12], düşük küresel ısınma potansiyeline sahip organik akışkanları kullanarak düşük sıcaklıklı güç üretimi ile süper kritik ORÇ sisteminin performans optimizasyonunu yapmışlardır. Yaygın kullanılan R134a akışkanı karşılaştırma yapmak için kullanılmıştır. 150 °C, 5 bar basınç altında sıcak su, ısı kaynağı ortamı olarak kullanılmıştır. Sistemin en yüksek verimi R152a ile basit çevrim için %11,6 ve rejeneratif çevrim için %13,1 elde edilmiştir. En yüksek elektrik güç çıkışı değeri R1234ze için 4,1 kW olarak bulunmuştur.

Cataldo ve arkadaşları [13], termal optimizasyona dayanarak düşük sıcaklıklı atık ısı geri kazanımı için ORÇ'nin akışkan seçimini yapmışlardır. Genetik algoritma optimizasyonu kullanılarak, uygun akışkan seçimi yapılmıştır. Sıcak su kaynağının giriş sıcaklığı 100 °C ve 150 °C varsayılmıştır. Suyun kütleli debisi ise 1,0 kg/s olarak sabit tutulmuştur. 100 °C ısı kaynağı sıcaklığında, Novec649, Perfluoropentane, RE347mcc, Perfluorobutane ve R365mfc ile %18 ekserji verimine ulaşılmıştır. Çevresel yönden ise en uygun akışkanın Novec649 olduğunu belirtmişlerdir. Ayrıca, buharlaştırıcı sıcaklığının 68 °C ve yoğurturucu sıcaklığının ise 35 °C olduğunu tespit etmişlerdir. Andreasen ve arkadaşları [14], çevrimin net güç çıkışı maksimize etmek için aracı akışkanın bir

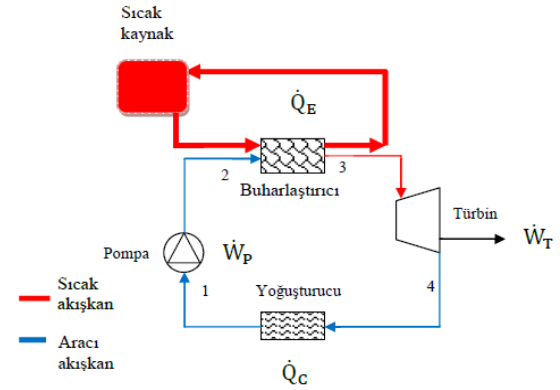
optimizasyon parametresi olarak dahil edildiği ORÇ'nin generik algoritma ile optimizasyonunu yapmışlardır. Bu metot 120 °C ve 90 °C sıcak akışkan giriş sıcaklıklarıyla iki optimizasyon durumunda uygulanmıştır. Saf akışkanlar ve karışımların performansı nasıl etkilendiğini görmek için birbiriyle karşılaştırılmıştır. Karışımlarda, basınç seviyesi azalırken net güç çıkışının arttığı tespit edilmiştir. Etan, karışımlarda kullanıldığında büyük bir net güç artışı sağlayan bir akışkan olarak bulunmuştur. Etan/Pentan karışımı saf etan ile kıyaslandığında sıcak akış sıcaklığı 120 °C olduğunda %12,9'lık net güç artışı ve sıcak akış sıcaklığı 90 °C olduğunda ise %11,1'lik bir artış elde edilmiştir.

Literatürdeki çalışmalardan, akışkan karşılaştırılan çok fazla çalışma olduğu fakat akışkan türlerinin (ıslak/izantropik/kuru) ortaya çıkardığı sayısal sonuçların tartışıldığı bir çalışma olmadığı görülmüştür. Aynı zamanda türbin giriş sıcaklığı ve basıncının aynı anda değişmesinin sistem üzerindeki etkisine yer verilmemiştir. Bu çalışmada, ORÇ'de farklı akışkan tiplerinin kullanılmasıyla oluşturulan termodinamik tasarım modeli ile ekserji analizi yapılmıştır. İlk olarak, farklı tip akışkanların aynı şartlarda değerlendirilmesi için, üç akışkanın da termodinamiğin yasalarına aykırı olmayacak şekilde giriş parametre değerleri belirlenmiştir. Termodinamiğin ikinci yasası gereği, tersinmezlik değerlerinin pozitif olmasına dikkat edilerek üç akışkan içinde türbin giriş basıncı 1200 kPa ile 2000 kPa arasında, türbin giriş sıcaklığı da 100 °C ile 150 °C arasında belirlenmiştir. Islak akışkan olarak R152a, izantropik akışkan olarak R290 ve kuru akışkan olarak ise R600a akışkanı seçilmiştir. Farklı türbin giriş sıcaklığı ve basınçta, sistemin ekserji verimi, bileşenlerde meydana gelen tersinmezlik değerleri belirlenmiştir. Bunların yanı sıra, termodinamiğin 1. yasası kapsamında ısı veriminde tespit edilmiştir. Ekserji analizi, MATLAB ve EES kullanılarak oluşturulan üç farklı termodinamik tasarım modeli ile yapılmıştır. Bu çalışmanın temel amacı, bir termodinamik tasarım modeli üreterek, aynı çalışma aralıklarında farklı tip akışkan kullanılarak, türbin giriş sıcaklığı ve basıncının ORÇ'nin performansındaki etkisini net şekilde ortaya koymaktır.

2. MATERYAL VE METOT

Bu çalışmada 150 giriş - 900 çıkış değeri olmak üzere toplam 1050 numerik veri kullanılarak ORÇ'de üç farklı tip akışkanın sistem performansındaki etkisi belirlenmiştir.

Şekil 1'de ORÇ çalışma prensibi gösterilmiştir. ORÇ dört bileşenden meydana gelir: pompa, evaporatör (buharlaştırıcı), türbin ve kondenser (yoğuşturucu). Evaporatör ve kondenser ısı değiştiricisi olarak çalışırlar. Evaporatör ısıyı çevrime absorbe ederken kondenserde ısıyı çevrimden dışarı atar.



Şekil 1. ORÇ çalışma prensibi [15]

Sistemin çalışma prensibi ile enerji ve ekserji analizinin yapılabilmesi için gereken eşitlikler MATLAB ve EES yazılımlarına tanıtarak tasarım modeli oluşturulmuştur. Eşitlik 1 ile 12 arasında verilen eşitlikler aşağıda belirtilmiştir.

Enerji Analizi İçin;

$$\text{Pompa: } W_p = \dot{m}(h_2 - h_1) = \dot{m}(h_{2s} - h_1) / \eta_p \quad (1)$$

$$\text{Evaporatör: } Q_{\text{evap}} = \dot{m}(h_3 - h_2) \quad (2)$$

$$\text{Türbin: } W_t = \dot{m}(h_3 - h_4) = \dot{m}(h_3 - h_{4s}) / \eta_T \quad (3)$$

$$\text{Kondenser: } Q_{\text{kond}} = \dot{m}(h_4 - h_1) \quad (4)$$

$$\text{Isıl Verim: } \eta = (W_t - W_p) / Q_{\text{evap}} \quad (5)$$

Ekserji Analizi İçin;

$$I_{Xp} = T_0 \dot{m} (s_2 - s_1) \quad (6)$$

$$I_{Xevap} = T_0 \dot{m} [(s_3 - s_2) - (h_3 - h_2)/T_H] \quad (7)$$

$$I_{Xt} = T_0 \dot{m} (s_4 - s_3) \quad (8)$$

$$I_{Xkond} = T_0 \dot{m} [(s_1 - s_4) - (h_1 - h_4)/T_L] \quad (9)$$

$$\eta_{II} = 1 - \left[\frac{I_{Xtoplam}}{E_h} \right] \quad (10)$$

Eşitlik 10'da E_h harcanan ekserjiyi ifade etmekte olup, evaporatörde buharla verilen ısının ekserjisi ile pompaya verilen işi (W_p) anlatmaktadır.

$$E_h = e_{evap} + e_{pompa} \quad (11)$$

$$e_{evap} = \left(1 - \left(\frac{T_0}{T_H}\right)\right) (Q_{evap}) \quad (12)$$

Akışkan belirlendikten sonra, giriş parametrelerinin ilgili akışkanlar için termodinamik yasalarına uygunluğu da yukarıdaki eşitliklerin sisteme tanıtılmasıyla elde edilen tasarım modeli ile kontrol edilmiştir. Çalışma kapsamında belirlenen üç farklı akışkana dair fiziksel ve çevresel özellikler Çizelge 1'de verilmiştir.

Farklı akışkan türlerinin kıyaslanması amaçlandığından her bir akışkan türünden bir akışkan seçilmiştir. Seçilen akışkanlardan R290'nın kaynama noktasının diğer akışkanlara göre daha düşük olduğu, kritik sıcaklık değerlerinde ise R600a'nın daha yüksek olduğu belirtilmiştir. ODP (Ozon Delme Potansiyeli)'nin üç akışkan için de 0 olduğu, GWP (Küresel Isınma Potansiyeli) değerlerinin ise R152a akışkanında daha fazla olduğu görülmektedir.

Çizelge 1. Tasarımda kullanılan akışkanların fiziksel ve çevresel özellikleri [16]

Akışkanlar/ Özellikler	R152a	R290	R600a
Akış Türü	Islak $dT/ds < 0$	İzantropik $dT/ds = 0$	Kuru $dT/ds > 0$
Molekül Ağırlığı (g/mol)	66,05	44,10	58,12
Kaynama Noktası (°C)	-24	-42,1	-11,7
Kritik Sıcaklık Değeri (°C)	113,3	96,7	134,7
Kritik Basınç Değeri (MPa)	4,52	4,25	3,63
ASHRAE standartları güvenlik sınıfı	A2	A3	A3
ODP	0	0	0
GWP	124	20	20

MATLAB ve EES'nin entegre bir şekilde kullanılmasıyla üç farklı akışkana ait hazırlanan termodinamik tasarım modelinde kullanılan sabit değerler ve bağımsız değişkenler Çizelge 2'de, bu model ile belirlenen giriş ve çıkış parametrelerine ait bilgiler Çizelge 3'de verilmiştir.

EES yazılımının kullanılma sebebi, veri tabanında birçok organik akışkanın termodinamik özelliklerini içermesidir. Termodinamik analizin yapılabilmesi için gereken eşitliklerin sisteme işlenmesiyle aynı anda birçok parametrenin değişimine karşılık

istenilen sonuçlar alınabilmektedir. Farklı akışkan kullanılmasının sistem performansı üzerindeki etkisi kolay bir şekilde görülmektedir. Tersinmezlik bağıntılarının sisteme işlenmesiyle belli bir sıcaklık veya basınç aralığında tersinmezlik değeri negatif değere ulaşan bir bileşenin tespit edilmesinde de EES yazılımının hem denklem çözücü özelliğinden hem de termodinamik verilere sahip olmasından yararlanır. Bu sayede hazırlanan modelin termodinamiğin ikinci yasasına uygunluğu kontrol edilir.

Çizelge 2. Tasarımda kullanılan sabit değerler ve bağımsız değişkenler

Sabit Değerler	Türbin İzzantropik Verimi	%85
	Pompa İzzantropik Verimi	%85
	Kaynak Sıcaklığı	100 °C-150 °C
	Soğutma Suyu Sıcaklığı	27 °C
	Kondenser Giriş Basıncı	900 kPa
Bağımsız Değişkenler	Organik Akışkanlar	R600a/R290/ R152a
	Türbin Giriş Basıncı Aralığı	1200 kPa- 2000 kPa
	Türbin Giriş Sıcaklık Aralığı	100 °C-150 °C

Bu çalışmanın amacı, ORÇ performansının belirlenmesinde akışkan seçiminin önemini ortaya koymak ve türbin giriş sıcaklığı ve basıncının sistemin verimindeki etkisini belirlemektir. Bu çalışmada ayrıca, sistemin ulaştığı maksimum enerji ve ekserji veriminin hangi şartlarda hangi akışkanda oluştuğunu belirlemek amaçlanmıştır. Pompa, evaporatör, türbin ve kondenserdeki tersinmezlikler belirlenerek hangi bileşenin sistem performansı üzerinde ne kadarlık bir etkisinin olduğu belirlenmiştir.

Çizelge 3. Termodinamik tasarım modeli belirlenen giriş ve çıkış parametreleri

GİRİŞ PARAMETRELERİ			
	Türbin Giriş Basıncı (kPa)	Türbin Giriş Sıcaklığı (°C)	
1)	1200	100	1-)
2)	1233	103	2-)
3)	1267	106	3-)
...
...
...
24)	1967	148	24-)
25)	2000	150	25-)
GİRİŞ VERİSİ: 25x2 = 50			
R152a / R290 / R600a için			
Toplam Giriş Verisi: 50x3 = 150			
ÇIKIŞ PARAMETRELERİ			
1)	Isı Gereksinim Miktarı (kJ/kg)	Pompa Tersinmezlik Değeri (kJ/kg)	7-)
2)	Çıkan Isı Miktarı (kJ/kg)	Evaporatör Tersinmezlik Değeri (kJ/kg)	8-)
3)	Türbin İşi (kJ/kg)	Türbin Tersinmezlik Değeri (kJ/kg)	9-)
4)	Pompa İşi (kJ/kg)	Kondenser Tersinmezlik Değeri (kJ/kg)	10-)
5)	Net İş (kJ/kg)	Toplam Tersinmezlik Değeri (kJ/kg)	11-)
6)	Isıl Verim (%)	Sistemin Ekserji Verimi (%)	12-)
ÇIKIŞ VERİSİ: 25x12 = 300			
R152a / R290 / R600a için			
Toplam Çıkış Verisi: 300x3 = 900			

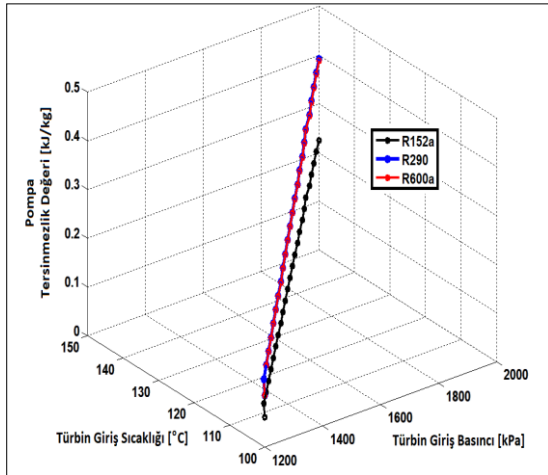
3. BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu çalışmada, üç farklı akışkanın farklı türbin giriş sıcaklığı ve basınç değerlerinde enerji ve ekserji analizinin yapılması için termodinamik tasarım modelleri oluşturulmuş, sistem bileşenlerinde meydana gelen tersinmezlik değerleri belirlenmiştir. Termodinamiğin 1. yasası

kapsamında, üç farklı akışkana dair ısı verim değerleri hesaplanmıştır. Termodinamiğin 2.yasası kapsamında ise, üç farklı akışkana dair sistemin ekserji verimi hesaplanmış, sistem bileşenlerinde meydana gelen tersinmezlik değerleri dört bileşen için de belirlenmiştir. Sistemin toplam tersinmezliğinin içinde bileşenlerde meydana gelen tersinmezlik değerlerinin yüzdesi ıslak, izantropik ve kuru akışkanlar için ayrı ayrı belirlenmiştir. Üç

farklı akışkanın türbin giriş sıcaklığı ve basınç aralığında, ısıl verim ve ekserji verim dağılımı kontur grafikler ile gösterilmiştir.

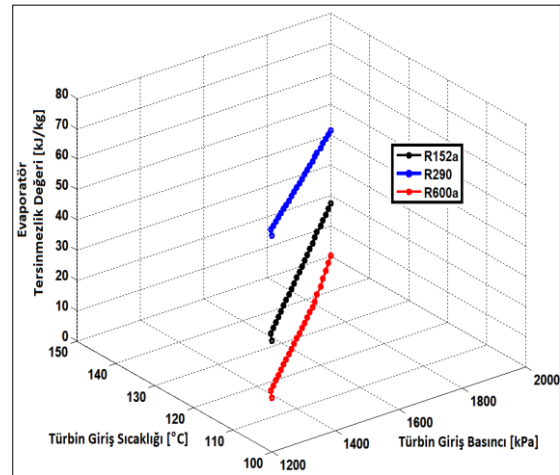
Şekil 2, türbin giriş basıncı ve sıcaklığı değişiminin pompa tersinmezlik değerine etkisini göstermektedir. Üç farklı akışkan için de türbin giriş basıncı ve sıcaklığı arttıkça pompa tersinmezlik değerleri artmıştır. R290 ve R600a akışkanları benzer bir artış gösterirken, R152a'da ise diğerlerinden daha az bir artış gerçekleşmiştir. 1200 kPa türbin giriş basıncı ve 100 °C türbin giriş sıcaklığı için, R152a, R290 ve R600a akışkanları için pompa tersinmezlik değerleri sırasıyla, 0,06153 kJ/kg, 0,1068 kJ/kg ve 0,106 kJ/kg olduğu belirlenmiştir. 2000 kPa türbin giriş basıncı ve 150 °C türbin giriş sıcaklığı için ise, R152a, R290 ve R600a akışkanları için pompa tersinmezlik değerleri sırasıyla, 0,2256 kJ/kg, 0,3917 kJ/kg ve 0,3887 kJ/kg olduğu belirlenmiştir. Ulaşılan maksimum değerler için, pompa tersinmezlik değeri en az olan R152a'da, en fazla oluşan tersinmezlik ise izantropik akışkan olan R290'da görülmüştür.



Şekil 2. Üç farklı tür akışkan için türbin giriş sıcaklığı ve basınç değişiminin pompa tersinmezlik değerine etkisi

Şekil 3, türbin giriş basıncı ve sıcaklığı değişiminin evaporatör tersinmezlik değerine etkisini göstermektedir. Üç farklı akışkan için de türbin giriş basıncı ve sıcaklığı arttıkça türbinde oluşan tersinmezlik değerleri artmıştır. R152a ve R600a akışkanları benzer bir artış gösterirken, R152a'da ise diğerlerinden daha fazla bir artış gerçekleşmiştir. 1200 kPa türbin giriş basıncı ve 100 °C türbin giriş sıcaklığı için, R152a, R290 ve R600a akışkanları için evaporatörde oluşan

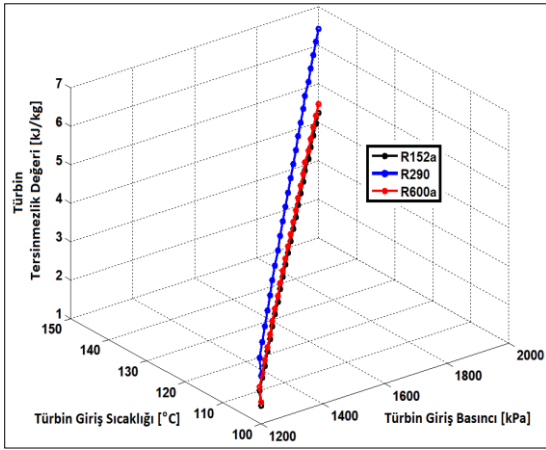
evaporatörde oluşan tersinmezlik değerleri azalmıştır. R290 akışkanında, diğer akışkanlara oranla çok daha yüksek bir tersinmezlik değeri görülmüştür. 1200 kPa türbin giriş basıncı ve 100 °C türbin giriş sıcaklığı için, R152a, R290 ve R600a akışkanları için evaporatörde oluşan tersinmezlik değerleri sırasıyla, 36,75 kJ/kg, 71,42 kJ/kg ve 17,9 kJ/kg olduğu belirlenmiştir. 2000 kPa türbin giriş basıncı ve 150 °C türbin giriş sıcaklığı için ise, R152a, R290 ve R600a akışkanları için evaporatörde oluşan tersinmezlik değerleri sırasıyla, 17,41 kJ/kg, 41,46 kJ/kg ve 0,79 kJ/kg olduğu belirlenmiştir. Ulaşılan maksimum değerler için, evaporatörde en az oluşan tersinmezlik kuru akışkan olan R600a'da, en fazla oluşan tersinmezlik ise izantropik akışkan olan R290'da görülmüştür.



Şekil 3. Üç farklı tür akışkan için türbin giriş sıcaklığı ve basınç değişiminin evaporatörde oluşan tersinmezlik değerine etkisi

Şekil 4, türbin giriş basıncı ve sıcaklığı değişiminin türbin tersinmezlik değerine etkisini göstermektedir. Üç farklı akışkan için de türbin giriş basıncı ve sıcaklığı arttıkça türbinde oluşan tersinmezlik değerleri artmıştır. R152a ve R600a akışkanları benzer bir artış gösterirken, R152a'da ise diğerlerinden daha fazla bir artış gerçekleşmiştir. 1200 kPa türbin giriş basıncı ve 100 °C türbin giriş sıcaklığı için, R152a, R290 ve R600a akışkanları için evaporatörde oluşan

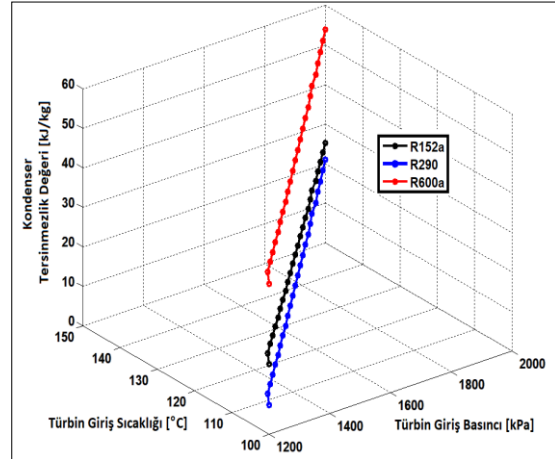
tersinmezlik değerleri sırasıyla, 1,475 kJ/kg, 2,253 kJ/kg ve 1,563 kJ/kg olduğu belirlenmiştir. 2000 kPa türbin giriş basıncı ve 150 °C türbin giriş sıcaklığı için ise, R152a, R290 ve R600a akışkanları için türbinde oluşan tersinmezlik değerleri sırasıyla, 4,241 kJ/kg, 6,429 kJ/kg ve 4,469 kJ/kg olduğu belirlenmiştir. Ulaşılan maksimum değerler için, türbinde en az oluşan tersinmezlik ıslak akışkan olan R152a'da, en fazla oluşan tersinmezlik ise izantropik akışkan olan R290'da görülmüştür.



Şekil 4. Üç farklı tür akışkan için türbin giriş sıcaklığı ve basınç değişiminin türbinde oluşan tersinmezlik değerine etkisi

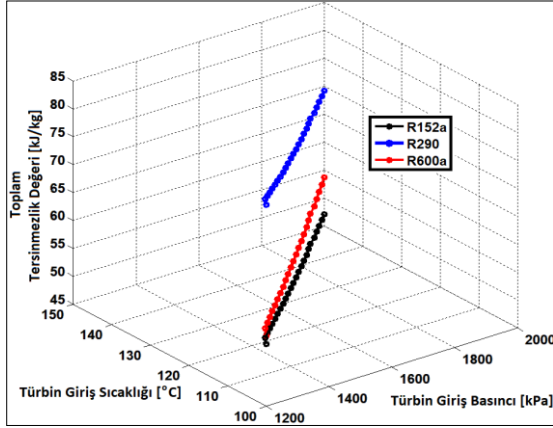
Şekil 5, türbin giriş basıncı ve sıcaklığı değişiminin kondenser tersinmezlik değerine etkisini göstermektedir. Üç farklı akışkan için de türbin giriş basıncı ve sıcaklığı arttıkça türbinde oluşan tersinmezlik değerleri artmıştır. R152a ve R290 akışkanları benzer bir artış gösterirken, R600a'da ise diğerlerinden daha fazla bir artış gerçekleşmiştir. 1200 kPa türbin giriş basıncı ve 100 °C türbin giriş sıcaklığı için, R152a, R290 ve R600a akışkanları için kondenserde oluşan tersinmezlik değerleri sırasıyla, 17,87 kJ/kg, 7,398 kJ/kg ve 38,12 kJ/kg olduğu belirlenmiştir. 2000 kPa türbin giriş basıncı ve 150 °C türbin giriş sıcaklığı için ise, R152a, R290 ve R600a akışkanları için kondenserde oluşan tersinmezlik değerleri sırasıyla, 25,18 kJ/kg, 20,97 kJ/kg ve 53,86 kJ/kg olduğu belirlenmiştir. Ulaşılan

maksimum değerler için, kondenserde en az oluşan tersinmezlik izantropik akışkan olan R290'da, en fazla oluşan tersinmezlik ise kuru akışkan olan R600a'da görülmüştür.



Şekil 5. Üç farklı tür akışkan için türbin giriş sıcaklığı ve basınç değişiminin kondenserde oluşan tersinmezlik değerine etkisi

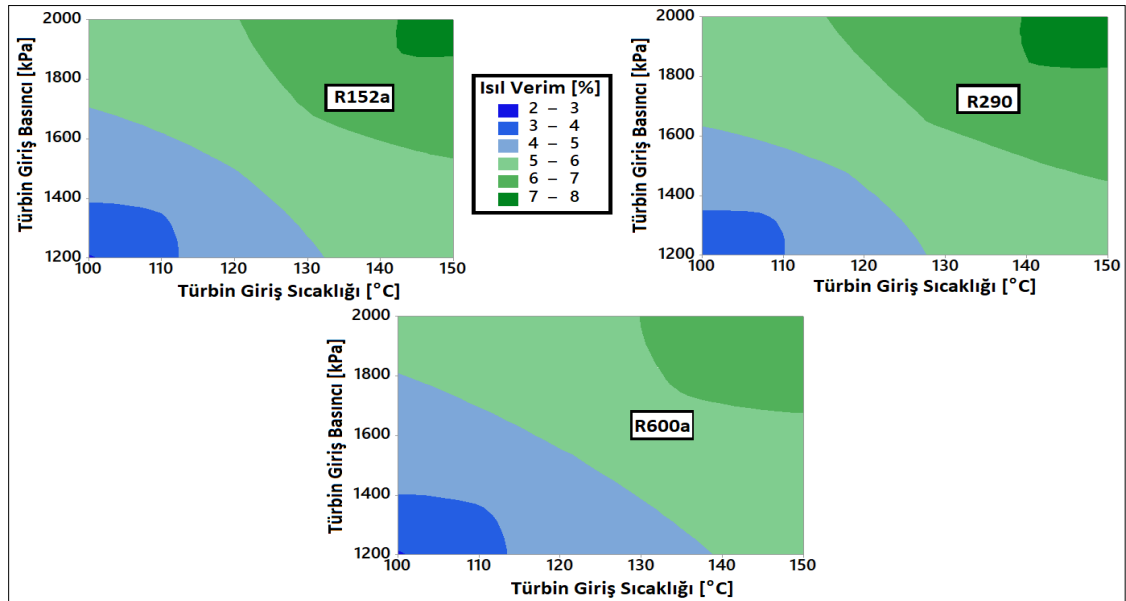
Şekil 6, türbin giriş basıncı ve sıcaklığı değişiminin sistemde oluşan toplam tersinmezlik değerine etkisini göstermektedir. Üç farklı akışkan için de türbin giriş basıncı ve sıcaklığı arttıkça sistemde oluşan toplam tersinmezlik değerleri azalmıştır. R152a ve R600a akışkanları benzer bir artış gösterirken, R290'da ise diğerlerinden daha fazla bir artış gerçekleşmiştir. 1200 kPa türbin giriş basıncı ve 100 °C türbin giriş sıcaklığı için, R152a, R290 ve R600a akışkanları için toplam tersinmezlik değerleri sırasıyla, 56,15 kJ/kg, 81,18 kJ/kg ve 57,69 kJ/kg olduğu belirlenmiştir. 2000 kPa türbin giriş basıncı ve 150 °C türbin giriş sıcaklığı için ise, R152a, R290 ve R600a akışkanları için toplam tersinmezlik değerleri sırasıyla, 47,08 kJ/kg, 69,25 kJ/kg ve 53,66 kJ/kg olduğu belirlenmiştir. Ulaşılan maksimum değerler için, sistemde oluşan toplam tersinmezlik değerleri incelendiğinde, en az toplam tersinmezlik ıslak akışkan olan R152a'da, en fazla oluşan tersinmezlik ise izantropik akışkan olan R290'da görülmüştür.



Şekil 6. Üç farklı tür akışkan için türbin giriş sıcaklığı ve basınç değişiminin sistemde oluşan toplam tersinmezlik değerine etkisi

Şekil 7, türbin giriş basıncı ve sıcaklığı değişiminin sistemin ısı verim değerine etkisini göstermektedir. Üç farklı akışkan için de türbin

giriş basıncı ve sıcaklığı arttıkça ısı verim artmaktadır. Isıl verim %2 ile %8 arasındaki dağılımları %1'er aralıkla gösterecek şekilde kontur grafik ile gösterilmiştir. Türbin giriş basıncı ve sıcaklığı arttıkça, R152a ve R290 akışkanları, %7 ile %8 arasında bir dağılım gösteriyor iken R600a akışkanının %7 dilimine ulaşmadığı görülmektedir. 1200 kPa türbin giriş basıncı ve 100 °C türbin giriş sıcaklığı için, R152a, R290 ve R600a akışkanları için ısı verim sırasıyla, %2,87, %3,01 kJ/kg ve %2,88 olduğu belirlenmiştir. 2000 kPa türbin giriş basıncı ve 150 °C türbin giriş sıcaklığı için ise, R152a, R290 ve R600a akışkanları için ısı verim sırasıyla, %7,52, %7,68 ve %6,96 olduğu belirlenmiştir. Ulaşılan maksimum değerler için, ısı verim değerleri incelendiğinde, en az ısı verim kuru akışkan olan R600a'da, en fazla ısı verim ise izantropik akışkan olan R290'da görülmüştür.



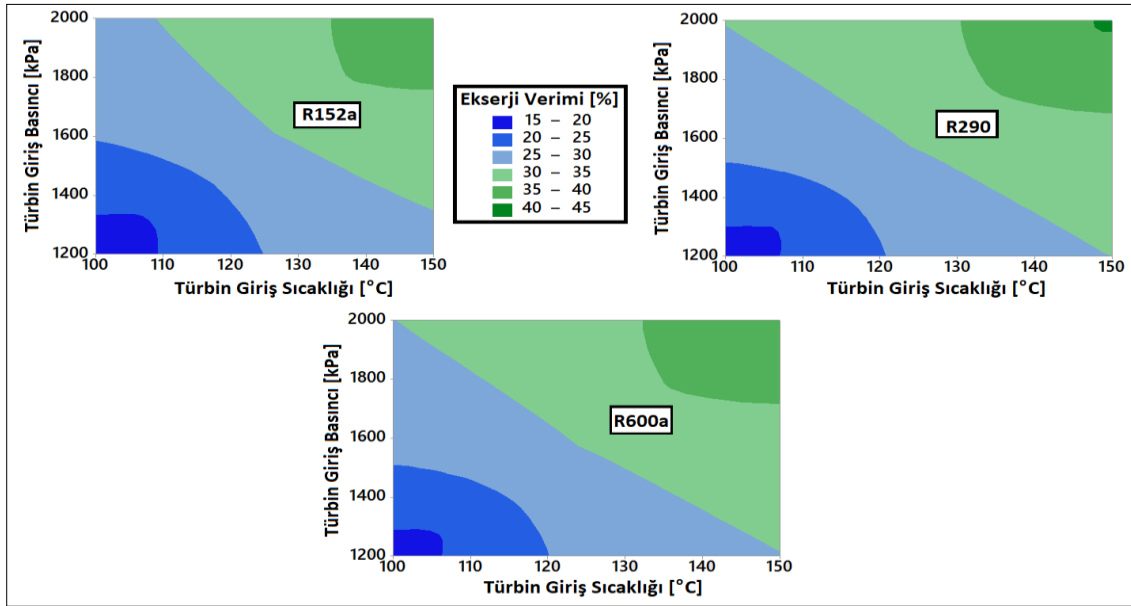
Şekil 7. Üç farklı tür akışkan için türbin giriş sıcaklığı ve basınç değişim aralıklarının ısı verime etkisinin dağılım grafiği

Şekil 8, türbin giriş basıncı ve sıcaklığı değişiminin sistemin ekserji verim değerine etkisini göstermektedir. Üç farklı akışkan için de türbin giriş basıncı ve sıcaklığı arttıkça ekserji

verimi artmaktadır. Ekserji verimi %15 ile %45 arasındaki dağılımları %5'er aralıkla gösterecek şekilde kontur grafik ile gösterilmiştir. Türbin giriş basıncı ve sıcaklığı arttıkça, R290 akışkanı, %40

dilimini geçiyor iken, diğer akışkanların bu dilime ulaşmadığı görülmektedir. 1200 kPa türbin giriş basıncı ve 100 °C türbin giriş sıcaklığı için, R152a, R290 ve R600a akışkanları için ekserji verimi sırasıyla, %15,29, %16,09 ve %16,49 olduğu belirlenmiştir. 2000 kPa türbin giriş basıncı ve 150 oC türbin giriş sıcaklığı için ise, R152a, R290 ve

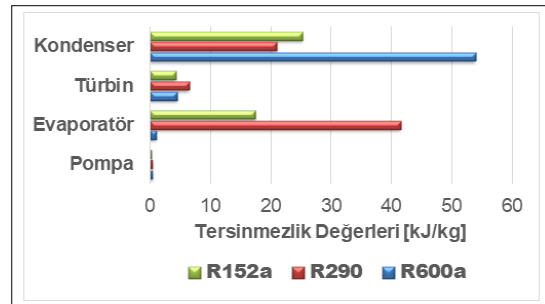
R600a akışkanları için ekserji verimi sırasıyla, %39,16, %41,05 kJ/kg ve %39,36 olduğu belirlenmiştir. Ulaşılan maksimum değerler için, ekserji verim değerleri incelendiğinde, en az ekserji verim ıslak akışkan olan R152a'da, en fazla ekserji verimi ise izantropik akışkan olan R290'da görülmüştür.



Şekil 8. Üç farklı tür akışkan için türbin giriş sıcaklığı ve basınç değişim aralıklarının ekserji verimine etkisinin dağılım grafiği

Şekil 9, üç farklı akışkanın maksimum ısı verim ve ekserji verimine ulaştığı durumda, sistem bileşenlerinde meydana gelen tersinmezlik değerlerini tek grafik altında göstermektedir. Bu durumda, pompada oluşan tersinmezlik değerlerinin üç akışkan için de en az ve birbirine yakın olduğu, evaporatörde oluşan tersinmezlik değerlerinde ise, R600a akışkanının diğer akışkanlara göre çok az bir tersinmezlik değeri olduğu görülmektedir. Evaporatörde oluşan tersinmezlik en fazla R290 akışkanında görülmüştür. Türbinde oluşan tersinmezlik değerlerinde ise yine üç akışkanın birbirine yakın olduğu görülmektedir. Kondenserde oluşan tersinmezlik incelendiğinde ise, evaporatörde oluşan tersinmezliğin aksine bu sefer R600a akışkanının diğerlerine göre çok fazla tersinmezlik

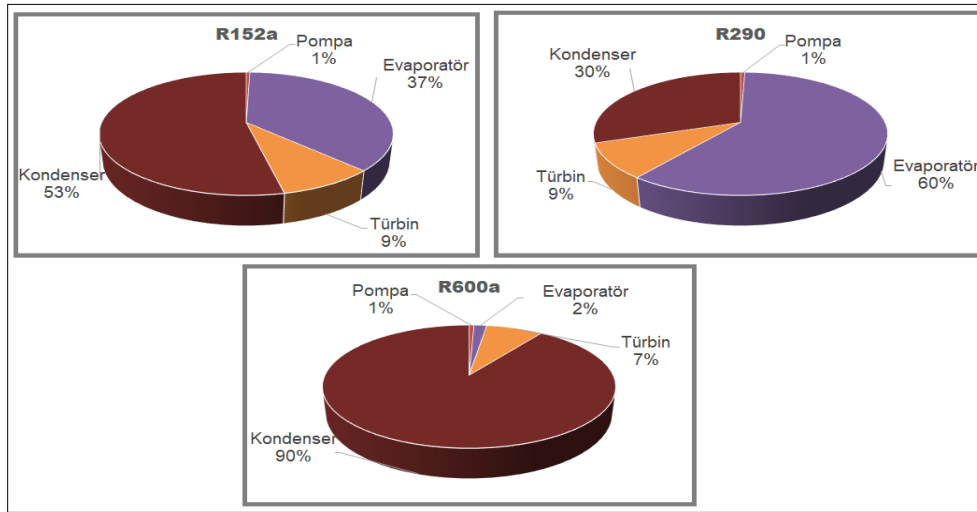
içerdiği görülmektedir. Diğer iki akışkan ise yine birbirine yakın tersinmezlik değerleri içermektedir.



Şekil 9. Üç farklı tür akışkanın maksimum ısı verim ve ekserji verimine ulaştığı durumda sistem bileşenlerinde meydana gelen tersinmezlik değerleri

Şekil 10, üç farklı akışkanın maksimum ısı verim ve ekserji verimine ulaştığı durumda, sistem bileşenlerinde meydana gelen tersinmezlik değerlerinin toplam tersinmezlik içindeki yüzdesini göstermektedir. Bu durumda, R152a için ilk sırayı %53 ile kondenser; R290 için %60 ile evaporatör ve R600a için ise %90 ile kondenserde

oluşan tersinmezlik yer almaktadır. Üç akışkan içinde, pompada oluşan tersinmezlik yüzdesi yaklaşık olarak %1 civarındadır. Şekil incelendiğinde, evaporatörde meydana gelen tersinmezlik yüzdesinin, kuru akışkan olan R600a'da %2 ile diğerlerine göre çok az olduğu görülmektedir.



Şekil 10. Üç farklı tür akışkanın maksimum ısı verim ve ekserji verimine ulaştığı durumda sistem bileşenlerinde meydana gelen tersinmezliğin toplam tersinmezlik içindeki yüzdesi

4. SONUÇ

Bu çalışmada, akışkan seçiminin ORÇ'nin performansındaki rolü ekserji analizi yapılarak belirlenmiştir. Kuru, izantropik ve ıslak akışkan gruplarından sırasıyla R600a, R290 ve R152a akışkanları için farklı türbin giriş sıcaklığı ve basınçta sistem bileşenlerinde meydana gelen tersinmezlik değerleri belirlenmiştir. Üç farklı akışkan için MATLAB ve EES yardımıyla termodinamik tasarım modeli oluşturulmuş. Üç akışkanın da termodinamik yasalarına aykırı olmayacak giriş parametreleri belirlenmiştir. Yapılan çalışma sonucunda, en yüksek enerji verimine (%7,78) ve ekserji verimine (%41,05) R290 akışkanında ulaştığı görülmüştür. R290 akışkanında oluşan tersinmezliğin %60'ının evaporatörde meydana geldiği, %30'unun da kondenserde meydana geldiği belirlenmiştir. Bu kısımlarda yapılacak iyileştirmeler ile sistemin performansının daha da artacağı düşünülebilir.

Pompada ve türbinde oluşan tersinmezlik yüzdeleri üç akışkan için de birbirine yakın iken evaporatör ve kondenserde oluşan tersinmezlikler birbirinden çok farklıdır. 2000 kPa türbin giriş basıncı ve 150 °C türbin giriş sıcaklığı için, kuru akışkan olan R600a'da kondenserde oluşan tersinmezliğin toplam tersinmezliğin %90'ını oluşturduğu görülmüştür. R600a akışkanı için kondenser basıncının düşürülmesi ile sistemin performansına katkı yapılabileceği görülmüştür.

ORÇ'nin performansında akışkan seçiminin önemi, farklı akışkan türlerinin birbirleri ile karşılaştırılmasıyla belirtilmiştir. Her bir akışkan türünün performansı farklı türbin giriş sıcaklığı ve basıncında, bileşenlerinde meydana gelen tersinmezlik değerlerinin tespit edilmesiyle yapılmıştır. Bu çalışmada, MATLAB ve EES ile geliştirilen termodinamik tasarım modeli ile, aynı çalışma aralıklarında farklı akışkan tiplerinin ekserji analizinin başarıyla uygulanabileceği

sunulmuştur. Ayrıca, bileşenlerde meydana gelen tersinmezlik yüzdelerinin verilmesiyle akışkan türlerinin hangi kısımlarında daha fazla iyileştirme yapılması gerektiği belirlenmiştir.

5. KAYNAKLAR

1. Hattiangadi, A., 2013. Working Fluid Design for Organic Rankine Cycle (ORC) Systems, MSc Thesis, Delft University of Technology, Delft.
2. Günaydın, İ., 2016. 1,5 kW Gücünde Organik Rankine Çevriminin Parametrik Tasarımı Termodinamik Analizi Prototip İmalatı ve Testi, Yüksek Lisans Tezi, Kırıkkale Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kırıkkale.
3. Karaman, R., 2016. Kombine Organik Rankine Ve Kompresörlü Soğutma Çevriminin Termodinamik Analizi, Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta.
4. Ağırkaya, O., 2015. Jeotermal Enerji Kaynaklı Organik Rankine Çevriminin Modellenmesi ve Analizi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Enerji Bilim ve Teknoloji Anabilim Dalı, İstanbul.
5. Javanshir, A., Sarunac, N., Razzaghpanah, Z., 2017. Thermodynamic Analysis of a Regenerative Organic Rankine Cycle using Dry Fluids, Applied Thermal Engineering, 123, 852-864.
6. Dong, B., Xu, G., Luo, X., Zhuang, L., Quan, Y., 2017. Potential of Low Temperature Organic Rankine Cycle with Zeotropic Mixtures as Working Fluid, Energy Procedia, 105, 1489-1494.
7. Wang, H., Li, H., Wang, L., Bu, X., 2017. Thermodynamic Analysis of Organic Rankine Cycle with Hydrofluoroethers as Working Fluids, Energy Procedia, 105, 1889-1894.
8. Sun, Q., Wang, Y., Cheng, Z., Wang, J., Zhao, P., Dai, Y., 2017. Thermodynamic Optimization of Double-Pressure Organic Rankine Cycle Driven by Geothermal Heat Source, Energy Procedia, 129, 591-598.
9. Muhammad, U., Imran, M., Lee, D., Park, B., 2015. Design and Experimental Investigation of a 1 kW Organic Rankine Cycle System using R245fa as Working Fluid for Low-grade Waste Heat Recovery from Steam, Energy Conversion and Management, 103, 1089-1100.
10. Kaska, 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.
11. Dong, B., Xu, G., Yi Cai, X., Li, H., 2014. Analysis of Zeotropic Mixtures used in High-Temperature Organic Rankine Cycle, Energy Conversion and Management, 84, 253-260.
12. Le, V., Feidt, M., Kheiri, A., Pelloux-Prayer, S., 2014. Performance Optimization of Low-Temperature Power Generation by Supercritical ORCs (Organic Rankine Cycles) using Low GWP (Global Warming Potential) Working Fluids, Energy, 67, 513-526.
13. Cataldo, F., Mastrullo, R., Mauro, A., Vanoli, G., 2014. Fluid Selection of Organic Rankine Cycle for Low-temperature Waste Heat Recovery Based on Thermal Optimization, Energy, 72, 159-167.
14. Andreasen, J., Larsen, U., Knudsen, T., Pierobon, L., Haglind, F., 2014. Selection and Optimization of Pure and Mixed Working Fluids for Low Grade Heat Utilization using Organic Rankine Cycles, Energy, 73, 204-213.
15. Yılmaz, F., 2013. Güneş Çanaklı Organik Rankine Çevriminin Isparta Şartlarında İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta.
16. Calm, J.M., Hourahan, G.C., 2007. Refrigerant Data Update, Heating/Piping/Air Conditioning Engineering, 79(1), 50-64.