

DÜŞÜK SICAKLIKLI ATIK AKIŞKAN DESTEKLİ ORGANİK RANKİNE ÇEVİRİMLERİNİN OPTİMİZASYONU

*Ahmet Serdar ÖNAL**
*Akın Burak ETEMOĞLU***
*Muhiddin CAN***

Alınma: 20.10.2016; düzeltme: 07.04.2017; kabul: 11.05.2017

Öz: Bu çalışmada, Engineering Equation Solver (EES) programı kullanılarak düşük sıcaklıklardaki endüstriyel atık akışkanlardan ısı geri kazanımı vasıtasıyla elektrik üretimi için Organik Rankine Çevrimine (ORÇ) dayalı iki farklı çevrim incelemesi sunulmuştur. İncelenen çevrimler Basit Organik Rankine Çevrimi (B-ORÇ) ve Rejeneratif Organik Rankine Çevrimleridir (R-ORÇ). Tasarlanan her iki sistemde de atık akışkan giriş sıcaklığı ve atık akışkan debisi sabit alınmıştır. Organik iş akışkanları olarak; izopentan, izobütan, R134a, R123, R245fa, R22, R13, propan ve R600 akışkanları incelenmiştir. Optimum akışkanı belirlemek amacıyla tasarlanan sistemlerde her akışkan için Termodinamiğin Birinci Kanunu (T1K) ve Termodinamiğin İkinci Kanunu (T2K) analizleri yapılmıştır. Yapılan çalışmalar sonucunda farklı çevrim tiplerinde ve basınç aralıklarına göre çalışacak optimum akışkanlar tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Organik Rankine Çevrimi, ekserji analizi, organik iş akışkanı, EES.

Optimization of Organic Rankine Cycle Systems Driven by the Low-Temperature Waste Heat Sources

Abstract: In this study, two different cycle systems on the base of Organic Rankine Cycle (ORC) have been designed for heat recovery from the industrial waste fluids at the low temperature to generate electricity using Engineering Equation Solver (EES). The designed cycles are Simple Organic Rankine Cycle (S-ORC) and Regenerative Organic Rankine Cycle (R-ORC). Waste fluid input temperature and mass flow rate are fixed in each cycle. Organic working fluids such as isopentane, isobutane, R134a, R123, R245fa, R22, R13, propane and R600 have been investigated. In order to detect the optimum working fluid, first (T1K) and second law of thermodynamics (T2K) values have been analyzed for each fluid. Finally, our study demonstrated that optimum fluids have been determined for different types of cycles and fluid pressure ranges.

Key words: Organic Rankine cycle, exergy analyze, organic working fluid, EES.

1. GİRİŞ

Alternatif enerji üretim yöntemlerinin tespiti ve mevcut enerji üretim yöntemlerinin daha verimli kullanımına yönelik gerçekleştirilen çalışmalar, günümüzde sürdürülen önemli araştırmalardandır. Atık akışkanlardan ısı geri kazanımı ise bu yöntemlerden bir tanesidir. Isı geri kazanımı düşüncesi merkezinde, atık akışkanlardan, ısıtma işlemlerinden elektrik üretimine kadar pek çok değişik şekilde faydalanılabilir.

* Uludağ Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Görükle/Bursa

** Uludağ Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Görükle/Bursa
İletişim Yazarı: Akın Burak ETEMOĞLU (aetem@uludag.edu.tr)

Birincil, tükenbilir kaynaklardan elde edilen enerjinin maliyetlerindeki artışlar ve çevre kirliliğini azaltmaya yönelik ihtiyaçlar, ısı geri kazanımı ve alternatif enerji üretim metodlarının önemini arttırmaktadır.

Atık akışkanların sahip oldukları enerjiyi kullanma fikri, son yıllarda oldukça yoğun bir şekilde literatürde yer almaktadır. Najjar ve Radhwan (1988) gaz türbini motorlarının kısmi yükte düşük verimli olduklarına atıfta bulunarak enerji tasarrufu ve işletme maliyetlerini azaltmak amacıyla atık ısıdan ısı geri kazanımını gaz türbini çevrimiyle kapalı ORÇ arasında ısı alış verışı ile sağladıkları bir kojenerasyon sistemi üzerinde analitik bir çalışma yapmışlardır. Yaptıkları bilgisayar programı sayesinde kombine çevrim performansını net iş ve ısı verim cinsinden hesaplamışlardır. Ekonomik analizlerinin sonucunda kojenerasyonla ısı geri kazanım yatırımının, kendini amorti etmesi yönünde olumlu olduğunu vurgulamışlardır.

Lee ve diğ. (1988) ,organik Rankine çevriminin enerji geri kazanım sistemi üzerindeki parametrelerin analizi için sistematik bir algoritma önermişlerdir. Yaptıkları termodinamik analiz, ekonomik değerlendirme ve duyarlılık analizi, ekonomik ve tasarım parametrelerinin araştırılmasını içermektedir. Çalıştıkları durumlarda, sistemin ekonomik fizibilite ve tasarım parametrelerinin etkilerinin çok önemli olduğunu belirterek, bu parametrelerin ekonomik bir kombinasyonu olduğuna değinmişlerdir. ORÇ sistemi ile düşük sıcaklık, gaz fazı atık ısı geri kazanımının ekonomik olduğunu, ancak ORÇ sistemi ile düşük basınçlı atık buhar geri kazanım orta kapasiteli tesisler için yüksek bir maliyette olduğunu belirtmişlerdir.

Maizza ve diğ. (2001), çalışmalarında atık enerji geri kazanımı ORÇ sistemlerinde kullanılmak üzere alışılmamış bir dizi akışkanın termodinamik ve fiziksel özelliklerini incelemişlerdir. Gerçekçi tasarım koşulları altında enerji gereksinimi ve geri kazanım sistemi performanslarını analiz etmişlerdir. İnceledikleri iş akışkanları R-600, R-123, R-142b, R-401A, R-401B, R-290, R-124a, R-401C olup sistem verimlerini 35°C asgari yoğunlaşma sıcaklığında hesaplamışlardır. Belirledikleri çalışma koşulları altında ORÇ sistemleri için en elverişli akışkanın R-401C olabileceğini tespit etmişlerdir.

Liu ve diğ. (2004), çalışma sıvılarının ORÇ termik verimi ve toplam ısı geri kazanım verimi üzerinde etkilerini incelenmişlerdir. Çalışmada su, amonyak ve etanol gibi hidrojen bağı olan akışkanların büyük buharlaşma entalpisi nedeniyle ORÇ sistemlerine uygun olmadıkları belirlemişlerdir. Wei ve ark. (2006), egzoz ısısı tarafından yönlendirilen HFC-245fa iş akışkanı kullanan bir ORÇ sisteminde sistemin performans analizleri ve optimizasyonu üzerinde çalışmışlardır. Sonuçlar, egzoz ısı kullanımını maksimize etmenin sistemin net gücü ve verimini artırmada olumlu rol oynadığını göstermiştir.

Hettiarachchi ve diğ. (2007) düşük sıcaklıktaki jeotermal kaynaklardan yararlanan ORÇ sistemleri için amaç fonksiyonu olarak toplam ısı değiştiricisi alanının net güç çıkışına oranını kullanan bir optimizasyon çalışması sunmuşlardır. Organik akışkan seçiminin amaç fonksiyonuna çok büyük etkisi olduğunu, bu etkinin güç santrali maliyetlerini neredeyse iki kat artırabileceğini belirtmişlerdir. Diğer taraftan, Schuster ve diğ. (2009) ORÇ'nin birleşik ısı güç üretimi için gelecek vadede bir çözüm olduğuna atıfta bulunarak, düşük sıcaklıklı ısı kaynaklarının kullanımına olanak sağlayan sistemin, küçük ölçekli uygulamalarda verim artışı sunduğunu ifade etmişlerdir.

Dai ve diğ. (2009), ekserji verimliliğini amaç fonksiyonu olarak belirledikleri bir optimizasyon çalışmasını, düşük sıcaklıklı atık ısı kaynaklarını kullanan bir ORÇ için gerçekleştirmişlerdir. Aynı atık ısı koşulları altında R-236EA akışkanının en fazla ekserji verimine sahip olduğunu ve sisteme bir iç ısı değiştiricisi eklenerek sistem veriminin arttırılamayacağını belirtmişlerdir.

Heberle ve Brüggemann (2010) 450K'in altındaki sıcaklıklardaki jeotermal kaynaklarla birleşik ısı güç üretimi sağlamak amacıyla, ısı üretimini ORÇ ile seri ve paralel düşünerek ikinci kanun analizleri gerçekleştirmişlerdir. Yüksek kritik sıcaklığa sahip izopentan gibi organik akışkanları seri devreler için, R-227EA gibi düşük kritik sıcaklığa sahip organik akışkanları ise paralel devreler için önermişlerdir.

Roy ve ark. (2010) enerji üretimi için 140°C sıcaklık ve 312 kg/s debide baca gazını kullanan ORÇ'ne dayalı bir atık ısı geri kazanım sisteminin parametrik optimizasyon ve performans analizlerini çalışma akışkanı R-12, R-123 ve R-134a kullanarak incelenmişlerdir. Sonuçlarda incelenen akışkanlar arasında maksimum iş ve verimin R-123 ile elde edildiğini belirtmişlerdir.

Sun ve Li (2011), iş akışkanı olarak R-134a kullanan bir ORÇ ısı geri kazanım santralini incelemişlerdir. Santralin performansını değerlendirmek ve optimize etmek üzere evaporatör, genişletici, hava soğutmalı kondenser ve pompa için matematik model geliştirmişlerdir. Kontrollü değişkenler olarak tanımladıkları iş yapan akışkan debisi, kondenser hava debisi, genişletici giriş basıncının sistemin ısı verimi ve net gücü üzerindeki etkileri incelenmişlerdir. Optimizasyon sonuçlarına dayanarak, kontrollü ve kontrolsüz değişkenler (ısı kaynağı sıcaklığı ve ortam kuru termometre sıcaklığı) arasındaki ilişkiyi veren ifadenin net güç üretimi için lineer bir fonksiyon, ısı verim için ikinci dereceden bir fonksiyon olduğunu belirtmişlerdir.

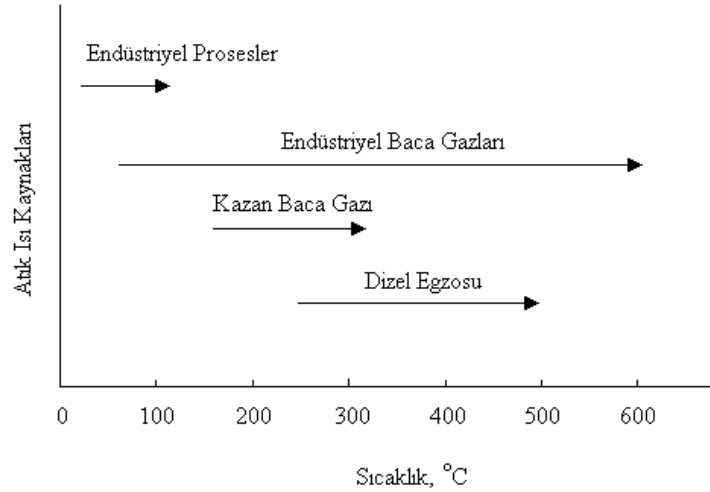
Atık akışkandan enerji geri kazanımında kullanılan en yaygın yöntem organik akışkan destekli güç sistemleridir. Sistemin temel prensibi geleneksel Rankine çevrimine dayanmaktadır. Organik Rankine Çevrimi (ORÇ) temel prensipleri geleneksel Rankine çevriminin prensipleri ile benzerdir. Geleneksel Rankine çevrimi ile ORÇ arasındaki temel fark, ORÇ'nde organik çalışma akışkanı geleneksel Rankine çevrimindeki çalışma akışkanı olan sudan daha düşük bir kaynama noktası ve daha yüksek bir buhar basıncına sahip olmasıdır. Bu temel fark çevrimin verimini artırdığından seçilecek çalışma akışkanının kaynama noktası ne kadar düşük, buhar basıncı ne kadar yüksek olursa türbinden elde edilen enerjide o kadar artar. Ekserji analizi, ısı sistemlerinin tasarım, analiz, seçim ve sınıflandırmasında katkıda bulunacak etkin bir araçtır. Bu araçla elde edilebilecek yüksek verim, doğrudan işletme giderlerini azaltarak ekonomik katkı sağlayabilecektir (Etemoğlu ve Can, 2007; Etemoğlu, 2008).

Termodinamiğin birinci kanunu enerjinin niceliğiyle ilgilidir. Bu kanun, bir hal değişimi sırasında enerjinin hesabını tutmak için bir yöntem ortaya koyar ve enerjinin var veya yok edilemeyeceğini belirtir. Termodinamiğin ikinci kanunu ise enerjinin niteliğiyle ilgilidir. Bir hal değişimi sırasında enerjinin mevcut niteliğinin azalması, entropi üretimi, iş yapma imkanının değerlendirilememesi bu yasanın inceleme alanı içindedir. Proses analizlerinde termodinamiğin birinci kanununun yukarıda belirtilen yetersizliği, ikinci kanuna dayanan ekserji (kullanılabilir enerji miktarı-kullanılabilirlik) analizlerini önemli kılmakta ve dolayısıyla, termodinamiğin ikinci kanunu, sistemlerin optimizasyonu için güçlü bir araç olarak karşımıza çıkmaktadır. Kullanılabilirlik, bir sistemin sahip olduğu enerjisiyle iş yapabilme kabiliyeti olarak tanımlanabilmektedir. Bir sistemden mümkün olan en yüksek işi elde edebilmek için, sistemin sabit olan ilk halinden, hal değişimi sonunda, sistemin ölü noktasına gelmesi gereklidir. Ölü hal, sistemin çevresiyle termodinamik açıdan denge durumunda bulunması demek olup, ölü haldeyken sistemlerden elde edilebilecek yararlı iş potansiyelinin sıfır olduğu açıktır. Dolayısıyla, bir sistem, doğal çevrenin temel elemanları ile tersinir bir hal değişimi sonucu termodinamik denge durumuna (ölü hale) getirildiğinde elde edilebilecek iş miktarı, o sistem için en yüksek ekserji değerine karşılık gelmektedir. Bu tanım, bir cihazın termodinamik yasalara karşı gelmeden yapabileceği işin üst sınırını belirler. İkinci yasa verimi, sürecin, tersinir hal değişimine ne kadar yakın olduğunu belirleyen bir kriterdir. Bu tanıma bağlı olarak, ikinci yasa verimi, sistemden elde edilen kullanılabilirliğin elde edilebilecek en yüksek kullanılabilirliğe oranı olup, bu bakış açısıyla Rankine çevrimleri optimize edilebilir ve işletme şartları belirlenebilir (Çengel, 1989).

Endüstride çevreye atılan atık akışkanların azımsanamayacak bir kısmının, düşük sıcaklıklara sahip olduğu bilinmektedir. Bu çalışmada, bu bilgiden yola çıkılarak, enerji-ekserji bakış açıları temel alınmak şartıyla, düşük sıcaklıklı atık akışkan kaynaklı B-ORÇ ve R-ORÇ çevrimleri incelenmiş, belirlenmiş şartlarda ilgili çevrimlerin çalışma limitleri belirlenmiştir.

2. MATERYAL ve METOD

Atık ısı kaynakları olarak Şekil 1’de görülen pekçok sanayi uygulaması, incelenmeye değer potansiyele sahiptir. Şekil 1’de görülen ve endüstriyel prosesler sonucu oluşan atık ısı kaynakları arasında yer alan sıcak proses sıvıları (32-232°C), bu çalışma kapsamında atık ısı kaynağı olarak seçilmiştir. Örnek olarak tipik bir tekstil fabrikasında değişik işlemler için kullanılan su sıcaklık ve debileri miktarları (Tablo 1) esas alınarak incelemeler gerçekleştirilmiştir.

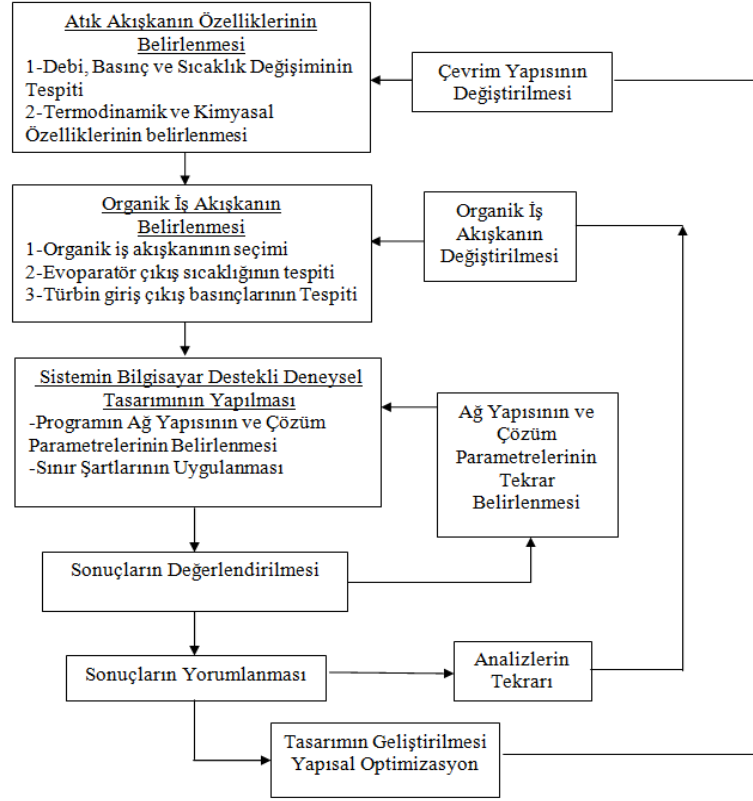


Şekil 1:
Bazı endüstriyel atık ısı kaynakları ve tipik sıcaklıkları

Tablo 1. Boyama işleminde atık akışkanın sıcaklık, debi ve süreleri

İşlem Sırası	İşlem	Süre (dakika)	Sıcaklık (°C)	Debi (litre)
1	Kasar	30	96	5000
2	Asitleme	10	50	5000
3	Yıkama	20	96	5000
4	Boyama	20	96	5000
5	Yıkama	10	50	5000
6	Yumuşatıcı Verilmesi	20	40	5000

Süre, sıcaklık ve debi değerleri ile işlemin etkinliği esas alınarak atık akışkan ortalama sıcaklığı belirlenmiş (~70-80°C) ve ORÇ hesaplamalarında kullanılmıştır. Prosese ait bu başlangıç kabullerini takiben, Organik Rankine Çevrimine dayalı atık akışkan destekli güç üretim tesisi tasarımında, sistemin nümerik modellenmesi ve optimizasyonuna yönelik olarak Şekil 2’de verilen akış diyagramındaki yol izlenmiştir. Bu akış diyagramı, tasarım-optimizasyon süreci çerçevesinde; ihtiyaç analizi, hedef ve kısıtlayıcı fonksiyonların belirlenmesi, problemi tanımlayan verilerin eldesi, teknik tasarımın oluşturulması, parametrik analize bağlı yakınsama kriterlerinin değerlendirilmesi ve ihtiyaç halinde parametre ve/veya tasarımın iyileştirilmesi olarak özetlenecek bir mantıkla oluşturulmuştur (Stoecker, 1989).



Şekil 2:
Sistem nümerik modellenmesinde kullanılan akış şeması

ORÇ'ne dayalı sistemlerin performansı seçilen iş yapan akışkanın termodinamik özelliklerine kuvvetle bağlı olup, en uygun akışkanın seçimi, verim ve elde edilebilecek net iş değerlerini maksimize edebilme açısından çok önemlidir. Hidrokarbonlar (HC), hidroflorokarbonlar (HFC), hidrokloroflorokarbonlar (HCFC), kloroflorokarbonlar (CFC), perflorokarbonlar (PFC), siloksanlar, alkoller, aldehytler, eterler, hidrofloroeterler (HFE), aminler ve uygun karışımlar iş yapan akışkan olarak ORÇ sistemlerinde kullanılabilirler. Bu akışkanlar dS/dT değerine göre ıslak, kuru ve izentropik akışkanlar olarak sınıflandırılabilirler (Bao ve Zhao (2013)). Alternatifler arasında, işletme şartlarında en uygun akışkanın tespiti, özellikle düşük sıcaklıklı kaynaklar gözönüne alındığında dikkatli bir seçim prosesi gerektirir. Bu araştırma, bu maksada yönelik olarak Termodinamiğin İkinci Kanunu (T2K) ilkelerini esas alan bir seçim ve değerlendirme aracı ve/veya modeli olarak değerlendirilebilir. Bu çalışma çerçevesinde, incelenen akışkanlar ve kabul edilen küresel etkileri Tablo 2'de verilmiştir (Maizza ve Maizza (2001); Wongwises ve Chimres (2005)).

Tablo 2. Bu çalışmada incelenen akışkanlar

No	Akışkan	ODP	GWP
1	İzopentan	0	<0.0004
2	R13	1	14420
3	R22	0.05	1700
4	R123	0.02	120
5	R134a	0	1300
6	R245fa	0	950
7	Propan (R290)	0	20
8	R600	0	20
9	İzobütan (R600a)	0	20

ODP : ozone depletion potential : ozon delme/tüketme potansiyeli

GWP: global warming potential : küresel ısınma potansiyeli

Atmosfere bırakılan soğutucu gazların bileşenlerine ayrışması sonunda ortaya çıkan klor bileşiklerinin ozonu tükettiği ve dolayısıyla küresel ısınma probleminde etkili olduğu bilinmektedir. Dolayısıyla incelenen akışkanların bu özelliklerinin de dikkatten kaçırılmaması gereklidir.

Analiz için termodinamik literatüründe iyi bilinen güç çevrimlerinden olan basit Rankine çevrimi ve rejeneratif Rankine çevrimi ele alınmıştır. Tablo 2’de verilen akışkanların termofiziksel özellikleri ve özellikle düşük sıcaklıklarda buharlaşabilir olmaları, yukarıda isimleri geçen çevrimlerde kullanılabilmelerine olanak tanımaktadır. Dolayısıyla organik akışkanların kullanılması durumunda, B-ORÇ ve R-ORÇ’nde verim ve elde edilen enerji potansiyellerine bağlı olarak limit ve optimum değerlerin eldesi mümkün olabilmektedir. Bu noktada termodinamik incelemelerin gerçekleştirilmesi ve görselleştirilmesi amacıyla Engineering Equation Solver (EES) programı arayüz olarak kullanılmıştır.

2.1. Basit Organik Rankine Çevrimi

EES programında modellenen B-ORÇ aşağıda verilmektedir (Şekil 3). Öncelikle çevrimde kullanılacak organik iş akışkanı seçilir. İşletme şartlarını belirlemek üzere, türbin giriş ve çıkış basınçları (P_1 , P_2) belirlenir. Ardından ısı kaynağı olan atık akışkan giriş ve çıkış sıcaklıkları (T_5 , T_6) ve atık akışkan debisi ($\dot{m}_{GF}$) istenilen değerlerde seçilir. Türbin ve pompa iç verimleri (η_T , η_P) girilerek, T1K ve T2K çerçevesinde iş, ısı ve verim değerleri elde edilebilir.

B-ORÇ’nde kullanılan evaporatör, türbin, kondenser ve pompa için T1K’na bağlı elde edilen denklemler sırasıyla aşağıda verilmektedir.

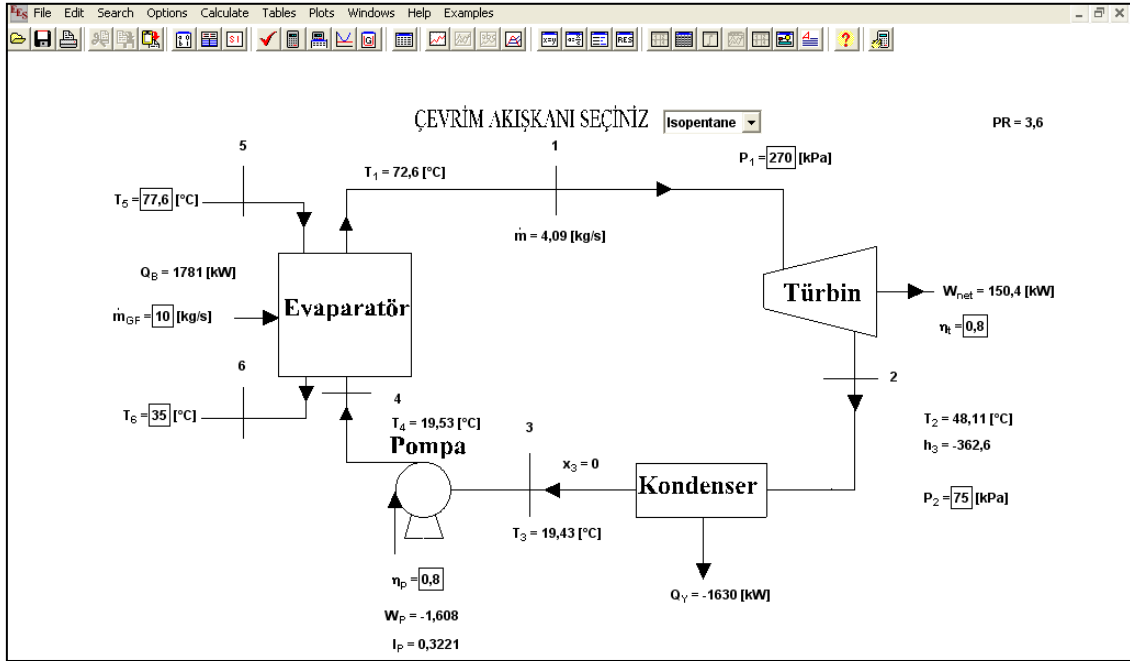
Evaporatör için kullanılan denklemler;

$$\dot{m} \cdot (h_1 - h_4) = \dot{m}_{GF} \cdot c_p (T_5 - T_6) \quad (1)$$

$$Q_E = \dot{m}_{GF} \cdot c_p (T_5 - T_6) \quad (2)$$

$$P_1 = P_4 \quad (3)$$

$$P_5 = P_6 \quad (4)$$



Şekil 3:

B-ORÇ için hazırlanan program

Türbin için kullanılan denklemler;

$$W_T = \dot{m} \cdot (h_1 - h_2) \quad (5)$$

$$\eta_T = \frac{h_1 - h_2}{h_1 - h_{2s}} \quad (6)$$

Kondenser için kullanılan denklem;

$$Q_K = \dot{m} \cdot (h_3 - h_2) \quad (7)$$

Pompa için kullanılan denklemler;

$$W_P = \dot{m} \cdot (h_3 - h_4) \quad (8)$$

$$\eta_P = \frac{h_{4s} - h_3}{h_4 - h_3} \quad (9)$$

Sistemin net işi;

$$W_{net} = W_T + W_P \quad (10)$$

Sistemin T1K verimi;

$$\eta = \frac{W_T + W_P}{Q_E} \quad (11)$$

B-ORÇ çevrim elemanları olan evaporatör, türbin, kondenser ve pompa için tersinmezlik (I), ekserji (Ex), özgül ekserji (oe) ve T2K verimi (η_{II}) ifadeleri sırasıyla aşağıda verilmektedir. Evaporatör;

$$I_E = (T_0 + 273,15) \cdot \dot{m} \cdot (s_1 - s_4) + (T_0 + 273,15) \cdot \dot{m} \cdot (s_6 - s_5) \quad (12)$$

Türbin;

$$\eta_{IIT} = \frac{W_T}{Ex_1 - Ex_2} \quad (13)$$

$$I_T = Ex_1 - Ex_2 - W_T \quad (14)$$

$$Ex_1 = \dot{m} \cdot oe_1 \quad (15)$$

$$oe_1 = h_1 - h_0 - [(T_0 + 273,15) \cdot (s_1 - s_0)] \quad (16)$$

$$Ex_2 = \dot{m} \cdot oe_2 \quad (17)$$

$$oe_2 = h_2 - h_0 - [(T_0 + 273,15) \cdot (s_2 - s_0)] \quad (18)$$

Kondenser;

$$I_K = (T_0 + 273,15) \cdot \left[\dot{m} \cdot (s_3 - s_2) - \left(\frac{Q_K}{T_0 + 273,15} \right) \right] \quad (19)$$

Pompa;

$$I_P = -W_P - (Ex_4 - Ex_3) \quad (20)$$

$$Ex_3 = \dot{m} \cdot oe_3 \quad (21)$$

$$oe_3 = h_3 - h_0 - [(T_0 + 273,15) \cdot (s_3 - s_0)] \quad (22)$$

$$Ex_4 = \dot{m} \cdot oe_4 \quad (23)$$

$$oe_4 = h_4 - h_0 - [(T_0 + 273,15) \cdot (s_4 - s_0)] \quad (24)$$

Carnot verimi;

$$\eta_C = 1 - \left[\frac{T_0 + 273,15}{T_5 + 273,15} \right] \quad (25)$$

Sistemin T2K verimi;

$$\eta_{II} = \frac{\eta}{\eta_C} \quad (26)$$

Sistemin toplam tersinmezlik değeri;

$$I = I_E + I_T + I_K + I_P \quad (27)$$

Tersinir iş, bir sistem hal değiştirdiğinde üretilebilecek olan işin üst sınırını tanımlar. Tersinir iş ile gerçek iş arasında oluşan fark, tersinmezliklerden kaynaklanır. Dolayısıyla tersinmezlikler, ekserji yokoluşuna eşittir ve harcanmış iş potansiyeli olarak tarif edilir. Bu bakış açısıyla sistem elemanlarındaki tersinmezliklerin hesaplanması ile hangi elemanların verimlilik açısından iyileştirilmesi gerektiği belirlenmiş olur.

2.2.Rejeneratif Organik Rankine Çevrimi

Şekil 4'te EES programında modellenen R-ORÇ görülmektedir. B-ORÇ uygulamasına benzer olarak işletme şartlarını belirleyen girişler yapılarak, T1K ve T2K çerçevesinde iş, ısı ve verim değerleri elde edilebilir.

R-ORÇ’nde kullanılan evaporatör, kondenser, pompalar için T1K ve T2K yaklaşımları B-ORÇ ile benzerdir. Dolayısıyla burada uygulaması farklı elemanlar olan türbin ve ısıtıcı için kullanılan denklemler sunulmuştur.

Türbin;

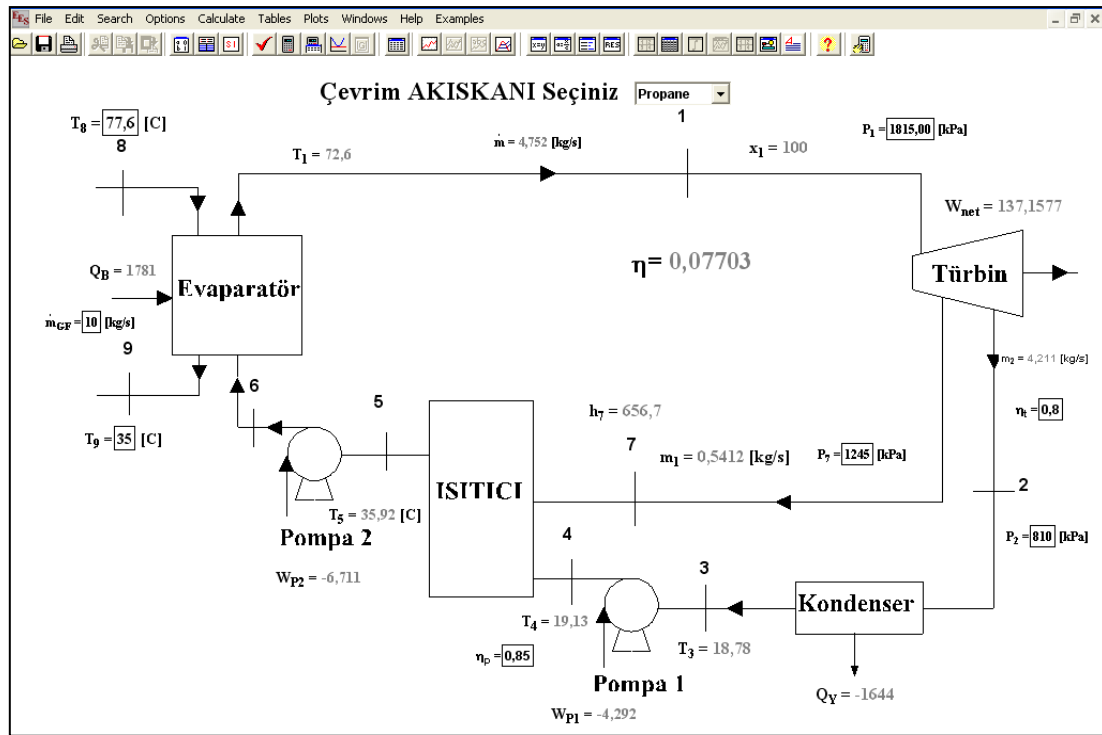
$$W_T = W_{Ta} + W_{Tb} \quad (28)$$

$$W_{Ta} = \dot{m} \cdot (h_1 - h_7) \quad (29)$$

$$W_{Tb} = m_2 \cdot (h_7 - h_2) \quad (30)$$

Isıtıcı için kullanılan enerji dengesi;

$$m_1 \cdot h_7 + m_2 \cdot h_4 = \dot{m} \cdot h_5 \quad (31)$$



Şekil 4:
R-ORÇ için hazırlanan program

3. BULGULAR

Yapılan işlem alt adımları iki çevrimde tüm organik akışkanlar için aynıdır. İşlem adımları örnek olarak izopentan iş akışkanı için anlatılan şekilde tüm iş akışkanları için ayrı ayrı gerçekleştirilmiştir. $T_1=72,6^\circ\text{C}$ olmak üzere iş akışkanının basınç değerine bağlı olarak bulunduğu bölge tespit edilmiştir (Tablo 3). Basınç değeri 380,31 kPa değerinin üzerine çıktığında verilen $T_1=72,6^\circ\text{C}$ sıcaklık koşulunda izopentan ıslak buhar bölgesine geçmektedir. Bu noktada “gerçekleşebilen tüm proseslerde tersinmezlik değerlerinin pozitif bir değer alması” gerektiği unutulmamalıdır (Çengel ve Boles, 1989). Dolayısıyla çalışma limitleri T2K çerçevesinde ($\Delta S_{\text{net}} > 0$, $I > 0$) belirlenmek zorundadır. Bu ilkenin dışındaki tüm durumlar, termodinamik sınırların dışında, kabul edilemez değerlerdir. Bu bakış açısıyla izopentan için P_1 basıncının üst limiti $T_1=72,6^\circ\text{C}$ sıcaklığında 250 kPa olarak seçilmiştir. Seçilen basınç değeri, başlangıç iterasyonu değeridir (Önal, 2011).

Tablo 3. $T_1=72,6^\circ\text{C}$ sıcaklıkta izopentan için basınç dayalı bölge tespiti

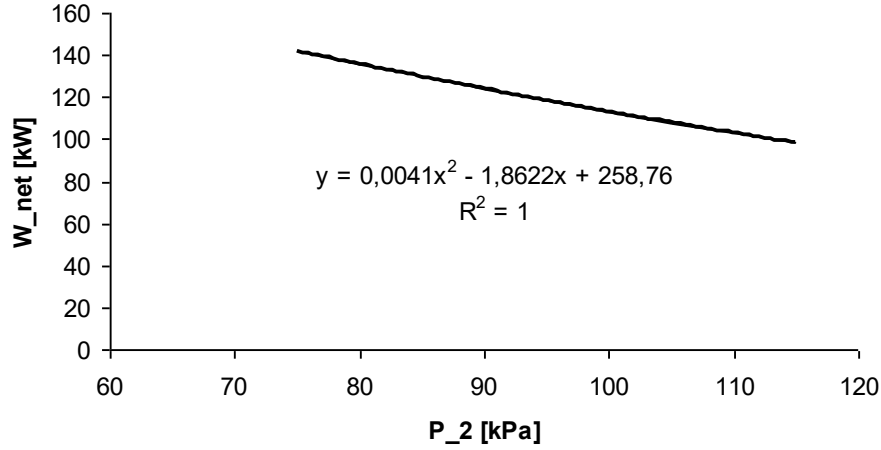
P_1 [kPa]	Organik Akışkan	P_{kritik} [kPa]	Bölge
5	İzopentan	3370	Kızgın Buhar
10	İzopentan	3370	Kızgın Buhar
15	İzopentan	3370	Kızgın Buhar
375	İzopentan	3370	Kızgın Buhar
380	İzopentan	3370	Kızgın Buhar
385	İzopentan	3370	Islak Buhar
390	İzopentan	3370	Islak Buhar
395	İzopentan	3370	Islak Buhar
400	İzopentan	3370	Islak Buhar

$P_1=250$ kPa, $T_1=72,6^\circ\text{C}$ ve $m_{\text{GF}}=10$ kg/s olmak üzere seçilebilecek P_2 değerleri hesaplanmıştır. Hesaplanan değerler sonucunda P_2 basınç değerinin 75 kPa ile 115 kPa değerleri arasında seçilebileceği görülmüştür (Tablo 4). Bu basınç aralığının üzerinde veya altında sistem ekipmanlarının bir veya birkaçının tersinmezlik değerlerinin $I>0$ şartını sağlamayarak kabul edilemez değerlere ulaştığı tespit edilmiştir.

Tablo 4. Seçilebilecek P_2 değerlerine yönelik hesap örneği

P_2 [kPa]	m [kg/s]	I [kW]	I_E [kW]	I_P [kW]	I_T [kW]	I_K [kW]	W_{net} [kW]	W_P [kW]	W_T [kW]	η	η_{II}
15	3,449	-78,54	57,82	0,355	69,02	-205,7	271,1	-1,544	272,6	0,1522	0,933
20	3,533	-58,5	48,77	0,35	62,79	-170,4	251,1	-1,561	252,6	0,141	0,864
25	3,604	-42,19	41,84	0,346	57,91	-142,3	234,8	-1,569	236,3	0,1318	0,808
30	3,667	-28,32	36,25	0,341	53,88	-118,8	220,9	-1,57	222,5	0,124	0,76
35	3,725	-16,18	31,59	0,336	50,45	-98,55	208,7	-1,567	210,3	0,1172	0,718
40	3,778	-5,328	27,62	0,331	47,45	-80,72	197,9	-1,56	199,5	0,1111	0,681
45	3,828	4,511	24,18	0,325	44,77	-64,76	188,1	-1,55	189,6	0,1056	0,647
50	3,875	13,54	21,15	0,319	42,36	-50,28	179	-1,536	180,6	0,1005	0,616
55	3,92	21,91	18,46	0,313	40,15	-37,01	170,7	-1,521	172,2	0,09584	0,587
60	3,963	29,72	16,05	0,307	38,12	-24,76	162,8	-1,503	164,4	0,09145	0,56
65	4,004	37,05	13,88	0,301	36,23	-13,35	155,5	-1,484	157	0,08733	0,535
70	4,043	43,98	11,91	0,295	34,47	-2,686	148,6	-1,463	150	0,08344	0,511
75	4,082	50,56	10,11	0,288	32,81	7,347	142	-1,44	143,4	0,07975	0,489
80	4,119	56,82	8,472	0,282	31,24	16,82	135,7	-1,415	137,2	0,07623	0,467
85	4,155	62,81	6,967	0,275	29,76	25,8	129,8	-1,39	131,1	0,07287	0,446
90	4,19	68,55	5,582	0,268	28,35	34,35	124	-1,362	125,4	0,06965	0,427
95	4,225	74,07	4,305	0,261	27,01	42,5	118,5	-1,334	119,8	0,06655	0,408
100	4,258	79,39	3,125	0,254	25,72	50,29	113,2	-1,305	114,5	0,06356	0,389
105	4,291	84,53	2,033	0,247	24,48	57,76	108	-1,274	109,3	0,06067	0,372
110	4,324	89,5	1,022	0,24	23,29	64,94	103,1	-1,242	104,3	0,05788	0,355
115	4,356	94,32	0,084	0,233	22,15	71,85	98,25	-1,209	99,46	0,05517	0,338
120	4,387	99	-0,787	0,225	21,04	78,52	93,57	-1,175	94,74	0,05254	0,322
125	4,418	103,6	-1,595	0,218	19,97	84,96	89,01	-1,141	90,15	0,04999	0,306
130	4,449	108	-2,345	0,21	18,94	91,18	84,58	-1,105	85,69	0,0475	0,291
135	4,479	112,3	-3,042	0,202	17,93	97,22	80,26	-1,068	81,33	0,04507	0,276
140	4,508	116,5	-3,689	0,194	16,95	103,1	76,04	-1,03	77,07	0,0427	0,262

Şekil 5-12 arasında ele alınan farklı parametrelerin B-ORÇ ve R-ORÇ performansı üzerindeki etkileri sunulmuştur. Şekil 5'te türbin çıkış basıncının (P_2) net iş üzerindeki etkisi görülmektedir. P_2 değeri arttıkça elde edilen net iş azaldığı görülmektedir. Bu sebeple maksimum net iş değerinin elde edilebilmesi için $I > 0$ kriteri çerçevesinde P_2 basınç değeri minimum seçilmelidir. Bu analiz sonucu türbin çıkış basıncının 75 kPa seçilebileceği tespit edilmiştir.

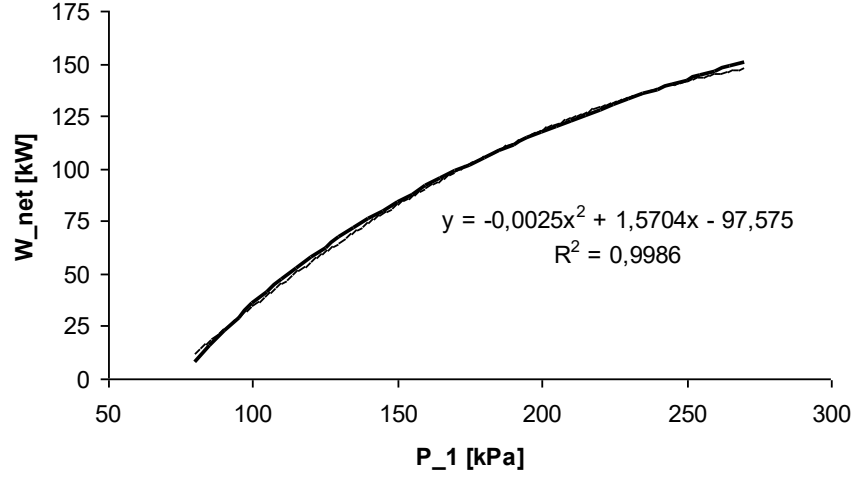


Şekil 5:
İzopentan için P_2 basıncı ile W_{net} değişimi

Türbin çıkış basıncı bilgisinden hareketle, bir sonraki adımda türbin giriş basıncı (P_1) değeri araştırılmıştır. Yapılan iterasyonlar sonucunda P_1 basıncı 80 kPa ile 270 kPa değerleri arasında seçilebileceği görülmüştür (Tablo 5). Net iş değerlendirmesi için çizilen Şekil 6'dan, P_1 basıncı arttıkça net iş arttığı görülmektedir. Bu sebeple maksimum net iş değerinin elde edilebilmesi için P_1 basınç değeri termodinamik ilkelere aykırı olmayacak şekilde mümkün olan en yüksek değerde seçilmelidir.

Tablo 5. Seçilebilecek P_1 değerlerine yönelik hesap örneği

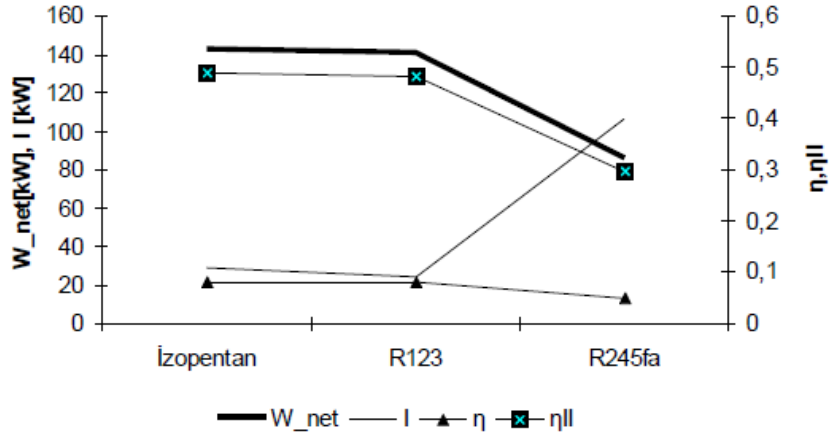
P_1 [kPa]	m [kg/s]	I [kW]	I_E [kW]	I_P [kW]	I_T [kW]	I_K [kW]	W_{net} [kW]	W_P [kW]	W_T [kW]	η	η_{II}
80	4,015	184,5	156	0,0081	1,718	26,76	8,032	-0,0405	8,073	0,004511	0,0276
100	4,022	157,1	127	0,0406	7,691	22,39	35,47	-0,2027	35,67	0,01992	0,122
140	4,037	116,8	83,51	0,106	16,8	16,34	75,81	-0,529	76,34	0,04258	0,2608
180	4,053	87,5	51,43	0,1719	23,69	12,22	105,1	-0,8578	105,9	0,059	0,3615
200	4,061	75,49	38,09	0,205	26,6	10,59	117,1	-1,023	118,1	0,06575	0,4028
220	4,069	64,75	26,09	0,2383	29,24	9,173	127,8	-1,189	129	0,07178	0,4398
240	4,077	55,06	15,2	0,2717	31,67	7,92	137,5	-1,356	138,9	0,07722	0,4731
260	4,086	46,25	5,237	0,3052	33,91	6,804	146,3	-1,524	147,8	0,08217	0,5034
270	4,09	42,14	0,557	0,3221	34,97	6,29	150,4	-1,608	152	0,08448	0,5176
275	4,093	40,14	-1,714	0,3305	35,48	6,043	152,4	-1,65	154,1	0,0856	0,5244
280	4,095	38,19	-3,94	0,339	35,99	5,802	154,4	-1,692	156,1	0,08669	0,5311
285	4,097	36,28	-6,125	0,3474	36,49	5,567	156,3	-1,734	158	0,08777	0,5377



Şekil 6:
İzopentan için P_1 basıncı ile W_{net} değişimi

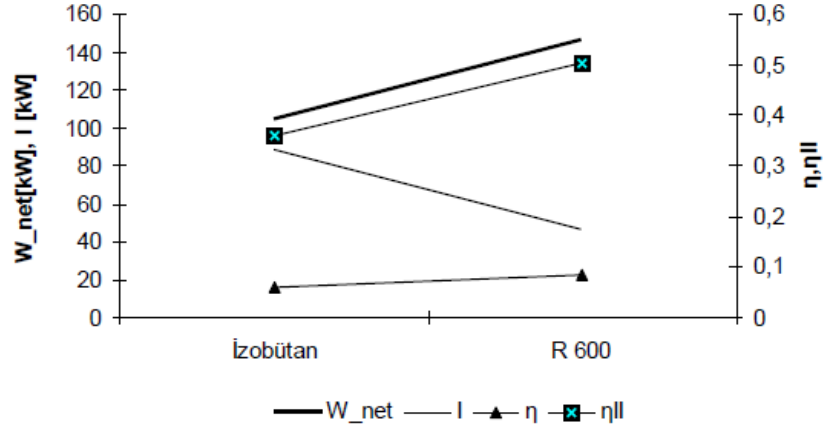
3.1. B-ORÇ İçin İncelenen Akışkanların Karşılaştırması

Yukarıda belirtilen yaklaşım, seçilen dokuz adet organik iş akışkanı için benzer şekilde tekrarlanmıştır ve her bir organik iş akışkanı için ideal çalışma basınç aralığı değerleri hesaplanmıştır. Çalışma aralığı açısından benzer akışkanlar, performansı belirleyebilmek amacıyla, net iş, tersinmezlik, birinci ve ikinci kanun verimleri açısından Şekil 7, 8 ve 9'da karşılaştırılarak sırasıyla sunulmuştur. $P_1=250$ kPa, $T_1=72,6^\circ\text{C}$, $m_{GF}=10$ kg/s olmak üzere izopentan, R123 ve R245fa organik iş akışkanları için W_{net} (kW), I (kW), η ve η_{II} değerleri Şekil 7'de verilmektedir.



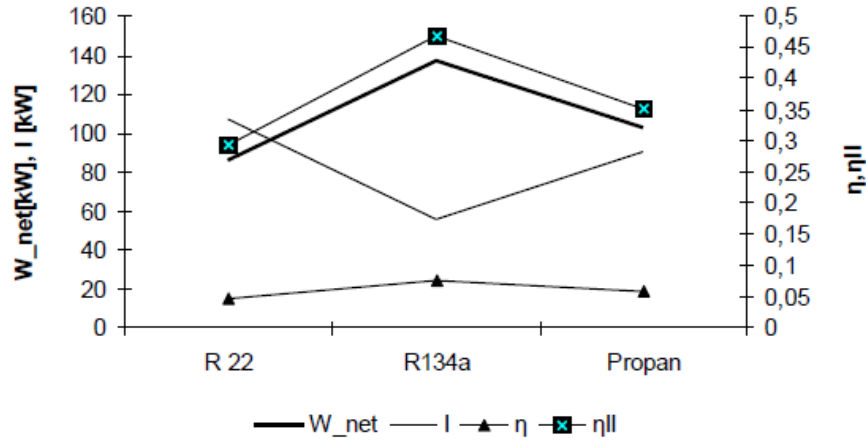
Şekil 7:
B-ORÇ için izopentan, R123 ve R245fa karşılaştırması

Şekil 8'de $P_1=600$ kPa, $T_1=72,6^\circ\text{C}$, $m_{GF}=10$ kg/s olmak üzere izobütan ve R600 organik iş akışkanları için W_{net} (kW), I (kW), η ve η_{II} değerleri karşılaştırılmıştır.



Şekil 8:
B-ORÇ için izobütan ve R600 karşılaştırması

$P_1=1500$ kPa, $T_1=72,6^\circ\text{C}$, $m_{GF}=10$ kg/s olmak üzere R22, R134a ve propan organik iş akışkanları için W_{net} (kW), I (kW), η ve η_{II} değerleri ise Şekil 9'da karşılaştırılmıştır.

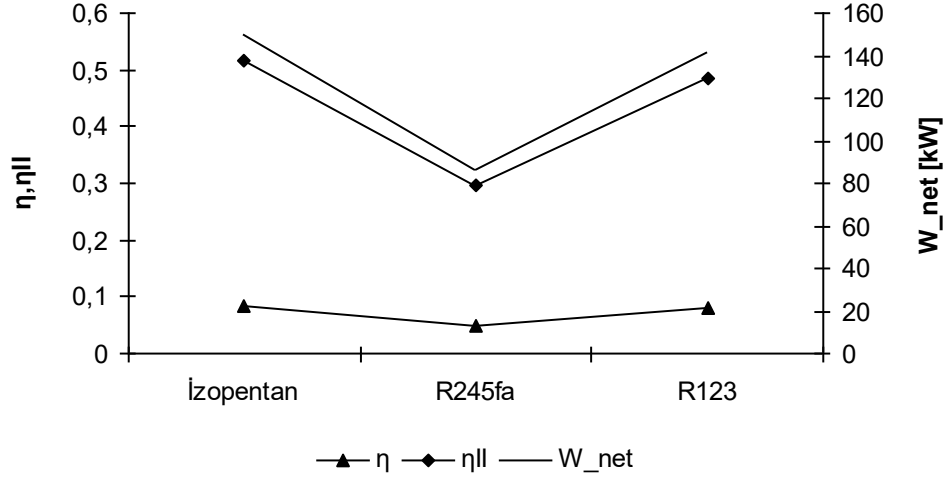


Şekil 9:
B-ORÇ için R22, R134a ve propan karşılaştırması

Yapılan hesaplamalar, R13 iş akışkanının $T_1=72,6^\circ\text{C}$ sıcaklığında sistemde kullanılmaya uygun olmadığını göstermiştir. Bu nedenle sunulan grafiklerde gösterilmemiştir.

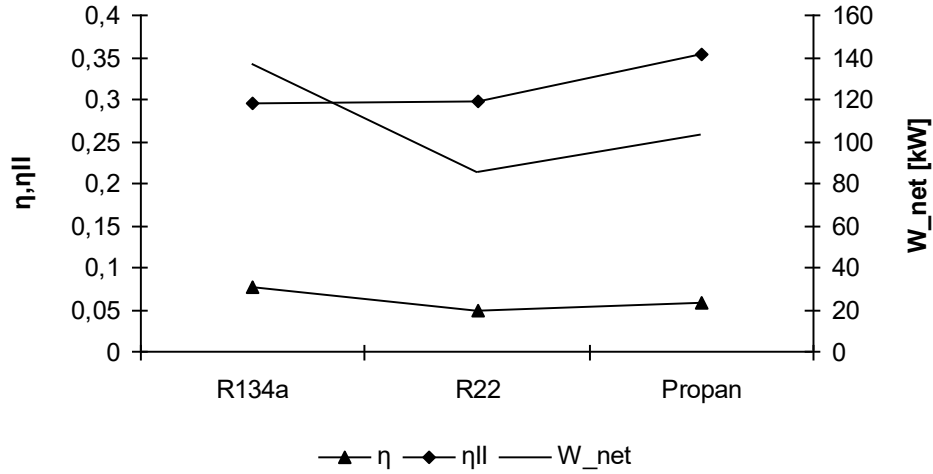
3.2 R-ORÇ İçin İncelenen Akışkanların Karşılaştırması

Benzer bir karşılaştırma işlemi R-ORÇ için Şekil 10, 11 ve 12'de verilmiştir. $P_1=250$ kPa, $T_1=72,6^\circ\text{C}$, $m_{GF}=10$ kg/s olmak üzere izopentan, R123 ve R245fa organik iş akışkanları için W_{net} (kW), η ve η_{II} değerleri Şekil 10'da karşılaştırılmıştır.



Şekil 10:
R-ORÇ için izopentan, R245fa ve R123 karşılaştırması

Şekil 11’de $P_1=1500$ kPa, $T_1=72,6^\circ\text{C}$, $m_{GF}=10$ kg/s olmak üzere R134a, R22 ve propan organik iş akışkanları için W_{net} (kW), η ve η_{II} değerleri verilmiştir.



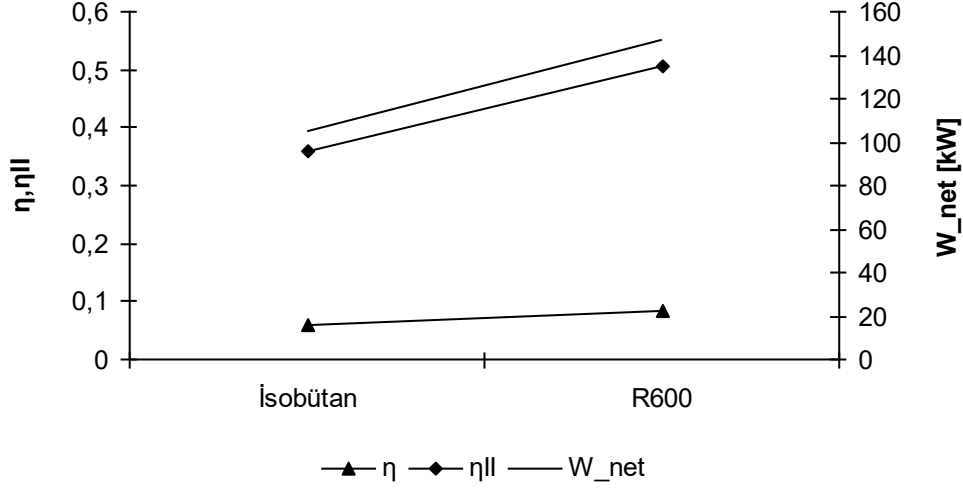
Şekil 11:
R-ORÇ için R134a, R22 ve propan karşılaştırması

$P_1=600$ kPa, $T_1=72,6^\circ\text{C}$, $m_{GF}=10$ kg/s olmak üzere izobütan ve R600 organik iş akışkanları için W_{net} (kW), η ve η_{II} değerleri Şekil 12’de karşılaştırılmıştır.

Yapılan hesaplamalar, R13 iş akışkanının $T_1=72,6^\circ\text{C}$ sıcaklığında bu çevrim için de uygun olmadığını göstermiştir. Bu nedenle sunulan grafiklerde yer almamıştır.

Düşük sıcaklık atık akışkanlar sanayide önemli ölçüde bulunmaktadır. Ancak, standart çevrimlerde ve/veya uygulamalarda gösterdikleri performans nedeniyle, bu kaynaklardan tam olarak faydalanılamamaktadır. Dolayısıyla bu kaynaklara yönelik geliştirilmiş yöntemlere ihtiyaç bulunmaktadır. ORÇ çevrimlerinde kullanılabilme potansiyeli olan akışkanlar, T-s diyagramında doymuş buhar eğrisinin eğimine bağlı olarak ıslak, izentropik ve kuru akışkanlar olarak literatürde sınıflandırılmaktadır. Dolayısıyla kullanılabilecek akışkanlar; hidrokarbonlar (HC), hidroflorokarbonlar (HFC), hidrokloroflorokarbonlar (HCFC), kloroflorokarbonlar

(CFC), perflorokarbonlar (PFC), siloksanlar, alkoller, aldehitler, eterler, hidrofloroeterler (HFE) ve aminler olabilir. Bu akışkan çeşitliği içinde doğru akışkanın ve/veya akışkan karışımının seçimi önemli bir araştırma alanı olarak karşımıza çıkmaktadır. Sonuç olarak, parametrik analizlerle akışkan-çevrim performansı ilişkisinin belirlenmesi gerekmektedir. Bu bakış açısıyla, bu çalışma çerçevesinde, işletme sınır değerlerinin belirlenmesi ve performansın geliştirilmesi amacıyla bir temel model sunulmuştur.



Şekil 12:
R-ORÇ için izobütan ve R600 karşılaştırması

4. TARTIŞMA VE SONUÇLAR

Bu çalışmada tekstil sektöründeki bir standart uygulamalar dizisi sonunda elde edilen atık su miktar ve sıcaklık değerleri kullanılmıştır. Buna göre;

- T2K prensiplerinin düşük sıcaklıklı atık akışkanların ORÇ’nde kullanımına yönelik bir düşünce oluşturabildiği görülmüştür.
- İşletme şartlarında termodinamik kurallara karşı gelinmeden ulaşılabilecek net iş, verimlilik değerleri B-ORÇ ve R-ORÇ için elde edilmiştir.
- Optimizasyonda ortaya konan amaç ve kısıt fonksiyonlarına bağlı olarak çevrimi oluşturan elemanların tersinmezlik değerleri hesaplanmıştır. Bu bilgiyle, hangi çevrim elemanının en büyük kaybı oluşturduğu yani geliştirilmesi gerektiğinin tespit edilebileceği gösterilmiştir. Türbin çıkış basıncının etkisi incelenirken, P_2/P_1 oranına bağlı olarak büyük tersinmezlik değerlerine türbin ve kondenserde ulaşıldığı görülmüştür. Buna karşılık türbin giriş basıncının etkisi incelenirken, benzer şekilde P_2/P_1 oranına bağlı olarak en büyük tersinmezlik değerine ise evaporatörde ulaşılmıştır.
- İncelenen dokuz farklı akışkan için ortak olarak, tersinmezlik değerlerinin düşmesine bağlı T2K ve T1K verimlerinin ve elde edilebilen net iş değerlerinin arttığı belirlenmiştir.
- Ele alınan her iki çevrimde de, T2K ilkeleri çerçevesinde belirlenen çalışma aralığında incelenen akışkanlar içinde, izopentanın en yüksek verim değerine sahip olduğu belirlenmiştir. Bu karşılık R13 ise kullanım sınırları içerisine girememiştir.

Sonuç olarak, yüksek sıcaklıklarda kolaylıkla kullanılabilen çevrimlerin, düşük sıcaklıklı atık ısı kaynaklarındaki kullanım olasılığı gösterilmiş, net iş ve verim değerleri elde edilmiştir.

KAYNAKLAR

1. Bao, J. ve Zhao, L. (2013) A review of working fluid and expander selections for organic Rankine cycle, *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 24:325-342. doi:10.1016/j.rser.2013.03.040
2. Çengel, Y. ve Boles, M.A. (1989) *Thermodynamics: An Engineering Approach*. McGraw Hill Book Co. International Edition, Singapore, 859 p.
3. Dai, Y.P., Wang, J.F., Gao, L. (2009). Parametric optimization and comparative study of organic Rankine cycle (ORC) for low grade waste heat recovery, *Energy Conversion and Management*, 50(3):576-582. doi: 10.1016/j.enconman.2008.10.018
4. Etemoglu, A.B. ve Can, M. (2007) Classification of geothermal resources in Turkey by exergy analysis, *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 11:1596-1606. doi: 10.1016/j.rser.2006.01.001
5. Etemoglu, A.B. (2008) Thermodynamic evaluation of geothermal power generation systems in Turkey, *Energy Sources*, 30:905-916. doi:10.1080/15567030601082589
6. Heberle, F. ve Brüggemann, D. (2010) Exergy based fluid selection for a geothermal Organic Rankine Cycle for combined heat and power generation, *Applied Thermal Engineering*, 30(11-12):1326-1332. doi:10.1016/j.applthermaleng.2010.02.012
7. Hettiarachchi, H.D. M., Golubovic, M., Worek, W.M., Ikegami, Y. (2007) Optimum design criteria for an Organic Rankine cycle using low-temperature geothermal heat sources. *Energy*, 32(9): 1698-1706. doi:10.1016/j.energy.2007.01.005
8. Lee, K. M., Kuo, S. F., Chien, M. L., Shih, Y. S. (1988) Parameters analysis on organic Rankine cycle energy recovery system, *Energy Conversion and Management*, 28 (2):129-136. doi:10.1016/0196-8904(88)90038-6
9. Liu, B.T., Chien, K.H., Wang, C.C. (2004) Effect of working fluids on organic Rankine cycle for waste heat recovery, *Energy*, 29(8): 1207-1217. doi:10.1016/j.energy.2004.01.004
10. Maizza, V. ve Maizza, A. (2001) Unconventional working fluids in organic Rankine-cycles for waste energy recovery systems, *Applied Thermal Engineering*, 21(3): 381-390. doi:10.1016/S1359-4311(00)00044-2
11. Najjar, Y. S.H., Radhwan, A.M. (1988) Cogeneration by combining gas turbine engine with organic Rankine cycle, *Heat Recovery Systems and CHP*, 8 (3): 211-219. doi:10.1016/0890-4332(88)90057-9
12. Önal, A.S. (2011) Düşük sıcaklıklı atık akışkan destekli güç üretim sistemlerinin optimizasyonu, *Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi*, 114 s.
13. Roy, J.P., Mishra, M.K., Misra, A. (2010) Parametric optimization and performance analysis of a waste heat recovery system using Organic Rankine Cycle, *Energy*, 35(12): 5049-5062. doi:10.1016/j.energy.2010.08.013
14. Schuster, A., Karellas, S., Kakaras, E., Spliethoff, H. (2009) Energetic and economic investigation of Organic Rankine Cycle applications, *Applied Thermal Engineering*, 29(8-9): 1809-1817. doi:10.1016/j.applthermaleng.2008.08.016
15. Stoecker, W.F. (1989) *Design of Thermal Systems*, McGraw Hill Book Co., Singapore, 565 p.

16. Sun, J. ve Li,W. (2011) Operation optimization of an organic Rankine cycle (ORC) heat recovery power plant, *Applied Thermal Engineering*, 31(11-12): 2032-2041. doi:10.1016/j.applthermaleng.2011.03.012
17. Wei, D., Lu, X., Lu, Z., Gu, J. (2007) Performance analysis and optimization of organic Rankine cycle (ORC) for waste heat recovery, *Energy Conversion and Management*, 48(4): 1113-1119. doi:10.1016/j.enconman.2006.10.020
18. Wongwises, S ve Chimres, N. (2005) Experimental study of hydrocarbon mixtures to replace HFC-134a in a domestic refrigerator, *Energy Conversion and Management*, 46(1):85-100.doi:10.1016/j.enconman.2004.02.011

