



T.C.
NECMETTİN ERBAKAN
ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



YENİ-NESİL VE ZEOTROPİK AKIŞKANLAR
KULLANILARAK TASARLANMIŞ
REJENERATİF REKÜPERATÖRLÜ
ORGANİK RANKİNE ÇEVİRİMİNİN
PERFORMANSININ BELİRLENMESİ

Mehmet AKSOY

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Eylül-2023
KONYA
Her Hakkı Saklıdır

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

YENİ-NESİL VE ZEOTROPİK AKIŞKANLAR KULLANILARAK TASARLANMIŞ REJENERATİF REKÜPERATÖRLÜ ORGANİK RANKİNE ÇEVİRİMİNİN PERFORMANSININ BELİRLENMESİ

Mehmet AKSOY

Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Ali KAHRAMAN

2023, 53 Sayfa

Jüri

Prof. Dr. Ali KAHRAMAN

Dr. Öğr. Üyesi Mehmet Numan KAYA

Dr. Öğr. Üyesi Remzi ŞAHİN

Bu tez çalışmasında yeni nesil ve zeotropik akışkanlar kullanılarak tasarlanmış Organik Rankine Çevrimin'in performansı belirlenmiştir. Klasik Organik Rankine Çevrimi ile Rejeneratif Reküperatörlü Organik Rankine Çevrimi'nin performansının akışkan türü bakımından karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırmada açık besleme suyunun ve reküperatörün sistem performans değerleri üzerindeki etkisi gözlemlenmiştir.

Saf organik akışkanların küresel ısınma potansiyel (Global Warming Potential – GWP) değerinin yüksek olduğundan dolayı tasarlanan konfigürasyonlarda GWP değeri sıfıra yakın olan yeni nesil R1216, R1234ze(E), R1234yf, R1243zf akışkanlar kullanılmıştır. Çevresel etkilerinin iyi olmasının yanı sıra enerji ve ekserji performansı da belirlenmiştir. Buna ek olarak yeni nesil akışkanlar ile saf akışkanların belirli kütleli oranlarda karıştırılmasıyla oluşan zeotropik akışkanların R448A(%26 R32, %26 R125, %20 R1234yf, %21 R134a, %7 R1234zee), R449A(%24,3 R32, %24,7 R125, %25,3 R1234yf, %25,7 R134a), R450A(%42 R134a, %58 R1234zee), R454C(%21,5 R32, %78,5 R1234yf), R513A(%44 R1234yf, %56 R134a) performansı ısı verim, ekserji verimi, net iş ve pompa gücü parametreleri üzerinden incelenmiştir. Ayrıca akışkanların 0,8 ve 0,9 olmak üzere farklı kritik basınç katsayıları altında göstermiş oldukları performans belirlenmiştir.

Bu çalışmanın sonucunda ORÇ, Rr-ORÇ kıyaslamasında açık besleme suyu ve reküperatörün farkı sistem üzerinde açıkça görülmüştür. Belirlenene akışkanlardan R_p 0,9 iken R1234ze(E) %13,26 ısı verim %52,93 ekserji verimi, 58,08 kJ/kg net iş ve 8,64 kJ/kg pompa işi olarak en iyi performans gösteren akışkan olarak belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Organik Rankine Çevrimi (ORÇ), Reküperatör, Termodinamik performans, Yeni nesil akışkan, Zeotropik akışkan.

ABSTRACT

MS THESIS

DETERMINING THE PERFORMANCE OF REGENERATIVE RECUPERATIVE ORGANIC RANKINE CYCLE DESIGNED USING NEW-GENERATION AND ZEOTROPIC FLUIDS

Mehmet AKSOY

THE GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCE OF
NECMETTİN ERBAKAN UNIVERSITY
THE DEGREE OF MASTER OF SCIENCE
IN MECHANICAL ENGINEERING

Advisor: Prof. Dr. Ali KAHRAMAN

2023, 53 Pages

Jury

Prof. Dr. Ali KAHRAMAN
Asst. Prof. Mehmet Numan KAYA
Asst. Prof. Üyesi Remzi ŞAHİN

In this thesis study, the performance of the Organic Rankine Cycle designed using new generation and zeotropic fluids was determined. The performance of the Classical Organic Rankine Cycle and the Organic Rankine Cycle with Regenerative Recuperator was compared in terms of fluid type. In this comparison, the effect of open feed water and recuperator on system performance values was observed.

Since the global warming potential (GWP) value of pure organic fluids is high, new generation R1216, R1234ze(E), R1234yf, R1243zf fluids with GWP values close to zero were used in the designed configurations. In addition to its good environmental effects, energy and exergy performance have also been determined. In addition, zeotropic fluids formed by mixing new generation fluids and pure fluids in certain mass ratios are R448A (26% R32, 26% R125, 20% R1234yf, 21% R134a, 7% R1234zee), R449A (24.3% R32, 24%, 7 R125, 25.3% R1234yf, 25.7% R134a), R450A(42% R134a, 58% R1234zee), R454C(21.5% R32, 78.5% R1234yf), R513A(44% R1234yf, 56% R134a) performance was examined through thermal efficiency, exergy efficiency, net work and pump consumption parameters. In addition, the performance of the fluids under different critical pressure coefficients of 0.8 and 0.9 was determined.

As a result of this study, the difference between open feed water and recuperator was clearly seen on the system in the comparison of ORÇ, Rr-ORÇ. Among the determined fluids, R1234ze(E) was determined as the best performing fluid with R_p of 0.9, 13.26% thermal efficiency, 52.93% exergy efficiency, 58.08 kJ/kg net work and 8.64 kJ/kg pump consumption.

Keywords: Organic Rankine Cycle (ORC), Recuperator, Thermodynamic performance, New generation fluid, Zeotropic fluid.

ÖNSÖZ

Tez çalışmasında, değerli yardım ve katkılarıyla beni yönlendiren, kıymetli fikir ve tecrübelerinden faydalandığım danışman hocam Prof. Dr. Ali KAHRAMAN'a anlayışlarından ve bana olan desteklerinden dolayı teşekkürlerimi ve saygılarımı sunarım. Ayrıca tezimin ikinci danışmanı olan Dr. Öğr. Üyesi Sadık ATA'ya bana olan katkılarından dolayı teşekkürlerimi sunarım.

Bu günlere gelmemde en büyük katkı ve emeğe sahip olan çok değerli aileme ve arkadaşlarıma sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Mehmet AKSOY
KONYA-2023



İÇİNDEKİLER

ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
ÖNSÖZ	vi
İÇİNDEKİLER	vii
SİMGELER VE KISALTMALAR	viii
1. GİRİŞ	1
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI	3
3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	12
4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA.....	17
4.1 B-ORC ve Rr-ORC Performans Karşılaştırması	17
4.2 Rr-ORC $R_p=0,9$ İçin Performans Sonuçları.....	23
4.3 Rr-ORC $R_p=0,8$ İçin Performans Sonuçları.....	35
4.3 R1234ze(E) Akışkanı İçin R_p Performans Sonuçları.....	37
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	39
5.1 Sonuçlar	39
5.2 Öneriler	39
6. KAYNAKLAR	40
ÖZGEÇMİŞ	44

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

C_p	: Özgül Isı (kJ/kg°C)
E	: Ekserji
h	: Entalpi (kJ/kg)
I	: Tersinmezlik
J	: Joule
kg	: Kilogram
kPa	: Kilopaskal
kW	: Kilowatt
\dot{m}_{ORC}	: Organik akışkanın kütleli debisi (kg/s)
\dot{m}_h	: Sıcak akışkan kütleli debisi (kg/s)
\dot{m}_c	: Soğutma suyu kütleli debisi (kg/s)
$\eta_{Isıl}$: Isıl Verim
η_{II}	: Ekserji Verimi
η_p	: Pompa izantropik verimi
η_t	: Türbin izantropik verimi
°C	: Santigrat derece
P	: Basınç (kPa)
P_{kritik}	: Akışkanın kritik basıncı (kPa)
s	: Entropi (kJ/kg°C)
T	: Sıcaklık (°C)
T_{ak}	: Aşırı kızdırma sıcaklığı (°C)
$T_{c,i}$: Soğutma suyu giriş sıcaklığı (°C)
$T_{c,o}$: Soğutma suyu çıkış sıcaklığı (°C)
$T_{h,i}$: Isı kaynağı giriş sıcaklığı (°C)
$T_{h,o}$: Isı kaynağı çıkış sıcaklığı (°C)
T_{kritik}	: Akışkanın kritik sıcaklığı (°C)
$T_{p,e}$: Evaporatör pinch noktası sıcaklığı (°C)
$T_{p,k}$: Kondenser pinch noktası sıcaklığı (°C)
W	: Güç (Watt)
X	: Kuruluk derecesi
ΔT_{PP}	: Pinch noktası sıcaklık farkı (°C)
$\Delta T_{PP,e}$: Evaporatör pinch noktası sıcaklık farkı (°C)
$\Delta T_{PP,k}$: Kondenser pinch noktası sıcaklık farkı (°C)

Kısaltmalar

A-BSI	: Açık Besleme Sıvı Isıtıcısı
A-ORÇ	: Ara Isıtmalı ORÇ
B-ORÇ	: Basit ORÇ
EES	: Engineering Equation Solver
GWP	: Küresel Isınma Potansiyeli (Global Warming Potential)
ODP	: Ozon Delme Potansiyeli (Ozone Depletion Potential)
ORÇ	: Organik Rankine Çevrimi
PP	: Pinch Point
PR	: Türbin Basınç Oranı (Pressure Ratio)
RA-ORÇ	: Rejeneratif Ara Isıtmalı ORÇ
R-ORÇ	: Rejeneratif ORÇ
r-ORÇ	: Reküperatörlü ORÇ
Rr-ORÇ	: Rejeneratif Reküperatörlü ORÇ



1. GİRİŞ

Teknolojinin gelişimi ve elektronik aletlerin kullanımının artmasıyla birlikte elektrik günümüzde karşılanması gereken en büyük ihtiyaçlardan birisi haline gelmiştir. Artan bu talebin karşılanması için farklı elektrik üretim yöntemleri uygulanmaktadır. Bu yöntemler hidro, termik, nükleer ve yenilenebilir kaynaklı olabilir. Örneğin, termik santrallerde elektrik üretimi fosil yakıtların yakılması ile ortaya çıkan ısının akışkanlar yardımıyla yüksek basınçlı buharın türbin kanatçıklarını döndürmesiyle sayesinde gerçekleşir.

Organik Rankine Çevrimi (ORC) bir ısı kaynağından alınan enerjiyle elektrik üretimi sağlayan bir sistemdir. Güneş, jeotermal, biyokütle veya atık ısılar bu ısı kaynağı olarak kullanılabilir. Bu sistemin "Organik" olarak anılmasında ve onu klasik Rankine çevriminden ayrılmasındaki en büyük etken çevrimde buhar-su kullanılmasının yerine organik bir akışkanın tercih edilmesidir. ORC'nin ideal akışkanı genellikle sıfır veya pozitif eğimli "İzantropik" veya "Kuru Akışkan" olup bu akışkanlar aşırı ısınma gerektirmezler. Ama Klasik Rankine çevrimi aşırı ısınma gerektirdiği için türbin giriş sıcaklığı ORC sisteminden daha yüksektir. Bu sebeplerle organik akışkan kullanımı türbin kanatlarının üretimi için yüksek ısı dayanım gereksinimlerini düşürdüğü gibi sistem maliyetlerine de oldukça önemli katkısı bulunmaktadır.

Son zamanlarda Klasik Organik Çevriminden ziyade farklı konfigürasyonlarda ORC'lerin incelendiği görülmektedir. Bu tez çalışmada Rejeneratif Reküperatörlü ORC'nin sistem performansı üzerindeki etkisi tespit edilecektir. Performansa etkiyen parametrelerden en önemlisi yine organik akışkan seçimidir.

Bu kapsamda yaygın olarak kullanılan organik akışkanların R134a, R245fa, R141b, R32 olduğu görülmektedir, fakat bu akışkanların GWP değerleri incelendiğinde çok yüksek olduğu bu nedenle çevresel performanslarından dolayı yeni bir akışkan arayışına girildiği tespit edilmiştir. Örneğin R134a'nın GWP değeri 1430 iken yeni nesil organik akışkan olarak adlandırılan R1234ze'nin GWP değeri 6'dır. Çevresel etkisindeki bu büyük farktan dolayı akışkanın ORC sistemlerinde kullanılması durumunda enerji ve ekserji performansının belirlenmesi önem arz etmektedir.

Bunun yanı sıra zeotropik olarak adlandırılan karışım akışkanlarının performansı belirlenecektir. Karışım akışkanları i(saf-saf), ii(saf-yeni nesil) karışımları olarak incelenecektir. Karışım akışkanları içerisinde yeni nesil akışkanlarının kullanılmasının etkisi tespit edilecektir.

Bu tez çalışması ile,

- Çevresel etkisi iyi olan akışkanların enerji ve ekserji performansları tespit edilecek
- Yeni nesil organik akışkanların kendi içlerinde bir performans karşılaştırması yapılacak
- Saf-saf, saf-yeni nesil karışımlarından oluşan zeotropik akışkanların performansı tespit edilecek
- Klasik Organik Rankine Çevrimi'nin yanı sıra Rejeneratif Reküperatörlü ORC sisteminin etkisi belirlenecektir.

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Bu tez çalışması kapsamında incelenen kaynaklar aşağıda özetlenmiştir.

150 °C ısı kaynağı altında 3 kW ve 10 kW altı nominal güç kapasitelerine sahip ORC sistemlerinin deneyleri yapılmıştır. Çalışma sonucunda 81,5 - 118,3 °C ve 68,6 - 123,5 °C sıcaklıktaki ısı kaynakları için 3 kW ORC ve 10 kW ORC'nin genel sistem verimleri %2,67 ile %3,91 ve %0,61 ile %4,59 aralığında değişmiştir. Sistemlerin optimal verimleri %3,91 ve %4,59'dur ve en iyi çıkışlar sırasıyla 42 kW ve 113 kW'lık sağlanan termal güç ile 2,1 kW ve 6,3 kW'dır. Sonuçlar, ısıtma kaynağı yeterli olduğunda daha büyük sistemin daha iyi performans gösterdiğini ve sistem kapasitesi, ısı kaynağı ve soğutucu arasındaki koordinasyonun vurgulandığını göstermiştir. (Yi-Fan Zhang vd., 2022)

Gemiler için alternatif bir atık ısı geri kazanım çözümü, tersine çevrilebilir bir üniteye dayalı olarak incelenmiştir. Elektrik üretimi için ORC, buhar üretimi için yüksek sıcaklıklı ısı pompası (HTHP) ve soğutucu akışkan R1233zd(E) kullanılmıştır. Aynı kompresör/evaporatör için ısı eşanjörlerinin boyutlandırılmasıyla ilgili olarak referans koşullarda incelendi ve verimliliği en üst düzeye çıkarmak için evaporatörün mümkün olduğunca büyük olması gerektiğini göstermiştir. (George Kosmadakis ve Panagiotis Neofytou, 2022)

Farklı ICE (İçten Yanmalı Motor) dereceli güç çıkışları için ORC net güç çıkışını maksimize etmek için yeni bir ICE-ORC konfigürasyonu önerilmiştir. Çalışma sonucunda akışkan olarak pentan kullanılması, üç farklı ICE-ORC dip çevrimi ve on akışkan için ORC güç çıkışının 556 kW olduğunu ve ICE-ORC dip indirme çevrimi verimliliği, tek ICE ile karşılaştırıldığında %17 oranında arttığını görmüşlerdir. (Tao Zhang vd., 2021)

Termodinamik ve ekonomik açılarından B-ORC, RH-ORC, REG-ORC. Dört farklı akışkan R123, R245fa, Isobutane ve R152a enerji, ekserji ve ekonomik olarak değerlendirilmiş. Çalışma sonucunda, REG-ORC'nin daha iyi enerji verimliliği gösterdiğini göstermiştir. Aynı çalışma koşulları için temel ORC'den yaklaşık %13 daha yüksektir, buna karşın temel ve yeniden ısıtılmalı ORC'nin ısı verimlilikleri birbirine çok yakındır. Üç kriter bir arada ele alındığında, REG-ORC'nin akışkan kategorisinden bağımsız olarak önerilmiştir. (Rania Zhar vd., 2021)

RH-ORC bu çalışmada düşük egzoz sıcaklığına sahip yüksek verimli, geri kazanılmış gaz türbini çevrimini tamamlamak için alt çevrim tesisi olarak entegre edilmiştir. RH-ORC'nin performansı, farklı sıcaklıklar için çeşitli yeniden ısıtma basınç oranlarında incelenmiştir. Çalışma sonucunda Benzen, 0,558 yeniden ısıtma basıncı oranında, 557,15 K sıcaklıkta yeniden ısıtma durumu için SM-50 ve Rolls-Royce WR-21'in entegrasyonundan 1292.033 kW ve 4772.631 kW maksimum güç çıkışı elde edilmiştir. (Vinayak B.Hemadria ve P.M.V. Subbarao, 2021)

Birleştirilmiş süper kritik karbon dioksit ve organik Rankine çevriminin (SeCO₂/ORC) tersinmezliğin gerçek kaynağı ve iyileştirme olasılığı, gelişmiş ekserji analizine dayalı olarak araştırılmıştır. Sonuçlar, toplam ekserji yıkım oranının %34,76'sının önlenebilir olduğunu ve azaltılabileceğini göstermiştir ayrıca ORC'de meydana gelen toplam ekserji yıkımının %75,4'ünün SeCO₂ döngüsündeki tersinmezliklerden kaynaklanması ve bu miktarın %62,98'inin önlenebilir olmasıdır. (M. Fallah vd., 2022)

Eksergoekonomik açıdan ORC'nin dört farklı mimarisi, Temel ORC, Reküperatif ORC, Rejeneratif ORC ve Reküperatif-Rejeneratif ORC (RR-ORC) karşılaştırılmıştır. Ayrıca PESA-II algoritması kullanılarak dört konfigürasyonun performansını optimize etmek için çok amaçlı bir optimizasyon gerçekleştirilmiştir. Çalışma sonucunda RR-ORC'nin diğer üç konfigürasyondan daha üstün performans gösterdiği bulunmuştur. Temel ORC ile karşılaştırıldığında, RR-ORC'nin net gücü ve ekserji verimliliği %16,19 ve %15,33 daha yüksek, sistem maliyet oranı ise %1,68 düşük olduğu bulunmuştur. (J.Nondy ve T.K.Gogoi, 2021)

Hibrit güneş ve jeotermal enerji üretimi için birleşik SCO₂-ORC sisteminin dört konfigürasyonu termodinamik ve ekonomik açıdan incelenmiştir. Önce jeotermal ısıyı kullanan sistem, önerilen tüm konfigürasyonlar arasında maksimum olan ve %45 daha yüksek olan 2940 kW net güç çıkışı sağlamıştır. Yıllık performans değerlendirmesi, birleşik sistemlerin, bağımsız SCO₂ tesisinin toplam elektrik üretimi üzerinde %22 ila %45 arasında değişen önemli iyileştirmeler sağlayabileceğini göstermiştir. (Jian Song vd., 2021)

Elektrik, sıcak su ve soğutma yükünün birleşik güç üretimi için güneş ön ısıtma konseptine ve biyokütle doğrudan yanmaya dayalı yenilikçi bir konfigürasyon önerilmiştir. Eksergo-ekonomik analizin sonuçları, referans durumun enerji ve ekserjisinin %55,56 ve %20,38 olduğunu ve ürün maliyet oranınının 26,4 \$/saat olduğunu

göstermiştir. Termodinamik sonuçlar önerilen sistemin enerji verimliliğinde yaklaşık %10'luk bir iyileşme sağladığı kanıtlanmıştır. (Nazari vd., 2021)

Çok amaçlı genetik algoritma ile termo-ekonomik optimizasyonu kullanarak ORÇ'nin optimal konfigürasyon seçimini bulmayı amaçlamıştır. Optimizasyon ile her bir farklı akışkanı kullanan ORÇ konfigürasyonları ve ilgili termo-ekonomik parametreler, tüm optimum koşullar için karşılaştırılmıştır. Çevrim konfigürasyonları karşılaştırıldığında, IHE'li ORÇ, rejeneratif ORÇ ve basit ORÇ'ye kıyasla sırasıyla yaklaşık %0,4 %5 ve %2,53 %8,78 daha yüksek net güç çıkışı göstermiştir. Bununla birlikte, rejeneratif ORÇ çoğunlukla ıslak akışkanlar için uygun olduğu belirlenmiştir. Ayrıca, basit ORÇ konfigürasyonunun en düşük EPC'ye sahip olduğu, bunu rejeneratif konfigürasyon takip ettiği, ORÇ-IHE'nin ise en yüksek EPC'ye sahip olduğu belirlenmiştir. (Laouid vd., 2021)

R245fa, R123 ve bunların karışımlarının deneysel verilerine dayanarak, 3KeyMASTER (3KM) simülasyon platformu tarafından 3 kW'lık bir organik Rankine çevrimi (ORÇ) test teçhizatı için mühendislik simülatörü oluşturulmuştur. Sonuçlar, önerilen kızgınlık kontrol stratejisi için optimum bir çalışma koşulunun elde edilebileceğini göstermiştir. 1,78 kW net güç ve %5,14 sistem verimliliği ile 293 K çevre sıcaklığında en iyi çalışma 0,67 R245fa / 0.33 R123'tür. (Pang vd., 2020)

Yeni bir kombine Organik Rankine Çevrimi (ORÇ) ve ısı pompası çevrimi (ORÇ-HP) sistemi analiz edilmiştir. Ayrıca, optimum çalışma koşullarını belirlemek için sistemde hassasiyet analizine dayalı olarak çok amaçlı optimizasyon uygulanmıştır. Sonuçlar, bütan ve amonyağın en uygun çalışma akışkanı olduğunu göstermektedir. Hassasiyet analizi sonuçları, SIC için, ORC'nin evaporatör basıncının ve HP evaporatörünün kızgınlık derecesinin daha büyük bir etkiye sahip olduğunu ve ORC-HP sistem verimliliği için, HP'nin evaporatör sıcaklığının, HP evaporatörünün kızgınlığının ve ortam sıcaklığının daha büyük bir etkiye sahip olduğunu göstermiştir. (Pan vd., 2020)

ORÇ'nin parametre ve performansının tahmini ve optimizasyonu için Makine Öğreniminin ORÇ araştırmasına makul bir şekilde uygulanmasına yönelik kapsamlı bir yöntem sunulmuştur. Termodinamik modelleme ile dört ORÇ konfigürasyonu ve yedi çalışma sıvısı içeren bir çevrim veri tabanı oluşturulmuştur. Daha sonra, Makine Öğrenimi için, ORC için Geri Yayılımlı Sinir Ağı (BPNN) ve Destek Vektör Regresyon (SVR) tahmin modelleri, BPNN ve SVR'nin en iyi parametrelerini belirleyebilen veri tabanının bir parçası ile hata analizini tahmin ederek oluşturulmuştur. Sonuç olarak, doğruluk, hesaplama süresi, ekonomik maliyet ve güvenlik göz önüne alındığında, bu

yazıda önerilen ORC tahmin ve optimizasyon yöntemi, Makine Öğrenimi ve enerji kullanımını birleştiren ve bu alandaki araştırmalar için yeni bir bakış açısı sağlayabilecek umut verici bir teknoloji olduğu düşünülmüştür. (Wang vd. 2020)

20 kW'lık bir ORC sisteminin dinamiklerinin tahmininde İleri Beslemeli, Tekrarlayan ve Uzun Kısa Süreli Bellek ağları karşılaştırılmıştır. Bu çalışma, üç mimarinin, ORC sisteminin dinamik davranışını iyi bir doğruluk derecesi ile tahmin etme yeteneğine sahip olduğunu göstermektedir. Uzun Kısa Süreli Bellek mimarisi, sistemin dinamiklerini doğru bir şekilde tahmin etmesi ve 10 ve 60 saniye sonraki tahminle ilgili olarak sırasıyla %5 ve %10'dan daha düşük bir hata tahmini göstermesi bakımından en yüksek performansla sonuçlandı. (Palagi vd. 2019)

80-200 °C'den aralığındaki atık ısı sıcaklıkları için R1233zd(E), R1234ze(E) ve R1234yf'nin zeotropik karışımlarının yanı sıra izobütan ve propan ile çift fazlı genişlemenin ORC için ekserji verimliliği iyileştirilebilme potansiyeli incelenmiştir. Çevrimin tipine bağlı olarak, akışkan ısıtıcıdan doymuş sıvı (T-ORC), doymuş buhar (S-ORC) veya kısmen buharlaştırılmış buhar (PE-ORC) olarak çıkabilmektedir. Çalışma sonucunda R1233zd(E), R1234yf için 140 °C ve altındaki sıcaklıklarda üstün olduğu sırasıyla R1234ze(E)- R1234yf için, PE-ORC ve R1234ze(E) ile çalışan standart ORC 140 °C'nin altındaki ve üzerindeki sıcaklıklarda en verimli akışkanlar olduğu görülmüştür. (Konstantinos vd., 2023)

Kriyojenik soğuk enerji geri kazanımı R290 ile 1 kW ölçekli bir Organik Rankine Çevriminin (ORC) deneysel çalışmaları yapılmıştır. Spesifik olarak, Basit ORC (bORC) ve Reküperatif ORC (rORC) konfigürasyonları kullanılmıştır. Çalışma sonucunda toplam sistem ekserji kaybı, bORC ve rORC için sırasıyla 4.88-7.43 kW ve 4.20-10.91 kW aralığında değişmiştir. bORC ve rORC için maksimum ekserji verimi sırasıyla %21.34 ve %28.99 olarak bulunmuştur. Reküperatör, toplam ekserji kaybının en büyük bölümünü oluşturdu; sırasıyla bORC ve rORC için %83.13 ve %84.12'ye kadar çıktığı görüldü. Bu nedenle, üç akışkanlı reküperatörü ve çalışma parametrelerini optimize etmenin, ORC performanslarını daha da iyileştirmek için potansiyel bir yol olduğu gözlemlendi. (Zhen vd., 2022)

100-160 °C arasındaki sıcaklıklarda atık ısı tarafından çalıştırılan double-stage (çift kademeli) Organik Rankine Çevrimlerinde (DS-ZORC'ler) çalışma akışkanı olarak beş doğal hidrokarbon ve CO₂'nin zeotropik karışımlarının ekserjetik verimlilik potansiyelini araştırılmıştır. Termodinamik olarak DS-ZORC'ler, özellikle 100 °C (%31,7), 120 °C (%35,5) ve 140 °C (%38) ısı kaynağı sıcaklıklarında en yüksek ekserjetik

verimliliğe ulaştığı görülmüştür. 160°C'de, en yüksek ekserji verimine (%42.4) bir ZORC, ardından bir DS-ZORC (%39.8) tarafından ulaşılmıştır. DS-ZORC'ler için en verimli karışımlar, değişken bileşimlerde siklopentan-bütan, n-pentan-izobütan ve bütanpropan içerdiği belirlenmiştir. Sonuç olarak DS-ZORC'ler için aşırı derecede yüksek veya düşük olmayan kritik sıcaklıklara sahip karışımlar seçilmesi gerektiği belirtilmiştir. (Konstantinos vd., 2021)

Temel transkritik Organik Rankine Çevriminin (TORC) termodinamik bir modeli ve karbondioksit bazlı transkritik Rankine çevrimi, akışkanının optimum durumunu inceleyerek doğrulanmış bir MATLAB kodu kullanılarak modellenmiştir. Çalışmada CO₂, R32, R134a, R123, Isobutane, and Ethane akışkanları kullanılmıştır. Çalışma sonucunda düşük türbin giriş sıcaklıklarında R32, R123 ve R245fa en iyi performansı gösterdiği ve ısıl verimlilikte artan bir eğilim gösterirken, yüksek sıcaklıkta çalışma sıvıları R32, R227ea ve etan daha iyi performans verdiği görülmüştür. Ancak, çevre ve güvenlik talep faktörü göz önüne alındığında, R245fa ve R227ea daha fazla optimizasyonun dışında tutulmuştur. (A.N.M Nihaj Uddin vd., 2022)

Akışkan olarak kullanılan zeotropik Pentan ve Heksan karışımı ile dört temel Organik Rankine Çevrimi (ORC) yapısını karşılaştırmayı amaçlamıştır. Her konfigürasyon, en yüksek gücü üreten parametreleri elde etmek için farklı mol fraksiyonlarında optimize edilmiştir. Daha sonra enerji ve ekserji verimlilikleri hesaplanmış ve her bir bileşenin ekserji yıkımları karşılaştırılmıştır. Sonuçlara göre, reküperatif çift basıncılı ORC en verimli ve en fazla üretilen güce (2038 kW) sahipken, diğerinin performansları karmaşıklık seviyelerine göre düştüğü görülmüştür. Performansının, önemli bir gelişmeyi kanıtlayan basit ORC yapısından %16'dan daha iyi olduğu bulunmuştur. Ek olarak, bir zeotropik karışım kullanmanın çevrim performansını artırabileceği ve ekserji yıkımlarını azaltabileceği görülmüştür. (Arvin vd., 2021)

Organik Rankine Çevrimi'nin (ORC) deneysel bir araştırması, akışkan olarak bütan, pentan, siklopentan veya heksametildisiloksan kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Isıl ve ekserji verimlilikleri, geniş bir ısı kaynağı sıcaklığı, türbin giriş basıncı ve aşırı ısınma derecesi aralığında sistem performans parametreleri olarak kullanılmıştır. Isı kaynağı sıcaklığı, bütan için 80–180 °C, pentan için 130–230 °C, siklopentan için 180–280 °C ve MM için 180–280 °C aralığında alınmıştır. Çalışma sonucunda deneysel koşullar altında, optimize edilmiş bir türbin kullanılmadan, en yüksek termal verim ve ekserji verimi sırasıyla %8.0 ve %25.2 olarak görülmüş. Heksametildisiloksanın alkanlardan daha iyi çalışan bir akışkan olduğunu göstermektedir. Ekserji kaybı analizi,

kaybın çoğunun evaporatörde meydana geldiği görülmüştür. (Wameedh Khider Abbas vd., 2022)

Zeotropik karışımlar ve saf akışkanlar arasındaki termo-ekonomik performans karşılaştırmaları, LNG yakıtlı gemiden kaynaklanan atıklar tarafından sağlanan paralel iki kademeli (two-stage) bir Organik Rankine Çevrimi (PTORC) için simülasyon yapılmıştır. Birinci kademedeki çalışma akışkanı olarak R1150/R170 ve R170/R1270, ikinci kademedeki ise R600a/R601a ve R600/R601 kullanılmaktadır. Çalışma sonucunda net güç çıkışı, 665,67 kW'lık atık ısının geri kazanılmasıyla 146,9 kW'a ulaşmış, maksimum enerji ve ekserji verimliliği sırasıyla %22.09 ve %23.28 olarak görülmüştür. Zeotropik karışımların her zaman saf akışkanlara göre bir avantaj göstermediği sonucuna varılmıştır. (Zhen vd., 2021)

Düşük sıcaklıklı jeotermal kaynaklarla birleştirilmiş Organik Rankine Çevrimleri (ORC'ler) için, n-pentan ile çalışan bir ikili jeotermal tesisin mevcut veri setini kullanarak yeni bir çalışma akışkanı seçim metodolojisi önerilmiştir. Güç üretiminin termodinamik ve termoekonomik yönleri, dört aşamalı eleme metodolojisinde farklı kimyasal dallardan 29 farklı tek bileşenli çalışma akışkanı değerlendirilmiştir. Sonuçlar, önerilen metodolojiyi uygulayarak, tesisin birinci ve ikinci yasa verimliliklerini sırasıyla %0,59 ve %3,18 artırmanın mümkün olduğunu ve seviyelendirilmiş elektrik maliyetini (LEC) n-pentan ile temel tesis çıktılarını kıyasla yaklaşık %11 oranında azaltmanın mümkün olduğunu göstermektedir. (Zekeriya ve Özgür, 2021)

Isı kaynağı sıcaklığı 125-300 °C ve 25 saf akışkan ve 104 akışkan karışımı analiz edilmiş ve sonuçlar iki çerçevede incelenmiştir. İlk perspektifte, ikili karışımları saf bileşenlerine kıyaslanmıştır. İkinci perspektifte, saf bileşenlerine göre performansı artıran ve ekserji verimi yüksek olan karışımlar belirlenmiştir. Çalışma sonucunda saf bileşenlere ve yüksek mutlak ekserji verimliliğine kıyasla performans artışı olan ikili karışımları haritalamak için bir tarama yöntemi sunulmuştur. (Mina vd., 2022)

Kompozisyonu ayarlanabilen yeni bir zeotropik ORC önerilmiştir. Isı transferi yoğunlaştırmasını ve karışım bileşimi ayarını birleştiren sıvı ayırma kondansatörü tabanlı bir ünite, kavramsal olarak tasarlanmış ve zeotropik ORC'ye entegre edilmiştir. Sonuçlar, önerilen ORC'nin klasik ORC'ye göre %0.52 daha yüksek yıllık ortalama net güç çıkışı, %2.20 daha yüksek yıllık ortalama ısıl verimlilik ve %21.43 daha düşük ortalama elektrik üretim maliyetine sahip olduğunu göstermektedir. (Pei vd., 2021)

Gelişmiş Jeotermal Sistemin sürdürülebilir ve verimli kullanımı için 40 yılı aşkın çalışma süresi boyunca gerçekleştirilen simülasyonlarla birlikte Wellbore-Rezervuar-

Organik Rankine Çevrimi (ORC) enerji santrali modelini sunmaktadır. ORC'nin tasarım dışı koşullar altında çok amaçlı bir optimizasyonu, amaç fonksiyonları olarak spesifik yatırım maliyeti, enerji ve ekserji verimlilikleri dikkate alınarak kısıtlı NSGA-II tekniği kullanılarak gerçekleştirilmiştir. En iyi performans gösteren çalışma akışkanı, %19,2-19,32 enerji verimliliği sağlayan R1233zd(E) olmuş ve bulunan ekserji verimliliği, tasarım dışı koşullar ve optimum çalışma koşullarında 40 yıllık üretim boyunca %56,4 ile %58,44 arasında bulunmuştur. (Joël vd., 2022)

20 farklı zeotropik karışım kullanılarak organik Rankine çevrimi (ORC) ile entegre edilmiş hidrojen bazlı proton değişim membranlı (PEM) yakıt hücresinin karşılaştırmalı optimizasyon analizi gerçekleştirilmiştir. MATLAB yazılımında geliştirilen bir genetik algoritma kodu kullanılarak, her bir karışım için optimum noktaların yoğunluğunu ve optimum fraksiyonunu belirlemek amacıyla histogram ve dağılım dağılımları bulunmuştur. ORC ünitesinin ve genel sistemin tek amaçlı optimizasyon sonuçlarına bakıldığında, sırasıyla R601/Cis-2-Buten (2/98) ve R601a/Cis-2-Buten (1.32/98.68) kullanımı en yüksek ekserji verimliliğine ulaşılmıştır. (Iman vd., 2021)

Karbon yakalama ve depolama ile donatılmış biyokütle yakıtlı entegre gazlaştırma kombine çevrim (BIGCC) tesislerinde üç tip atık ısı kaynağından Organik Rankine Çevriminin (atık ısı geri kazanımı (WHR) için ORC) termodinamik ve tekno-ekonomi açıdan incelenmiştir. Bunlar arasında (1) hava ayırma ünitesi (ASU) hava sıkıştırırmalı ara soğutucular, (2) CCS CO₂ sıkıştırırmalı ara soğutucular ve (3) su gazı kaydırma reaktörü çıkışındaki sentez gazı soğutucusu yer almıştır. Üçü arasında, sentez gazı soğutma entegrasyonu senaryosu, en yüksek tesis verimliliği artışına (%2,81) ve en iyi ekonomik performansı göstermiştir. Levelized Cost of Electricity (LCOE) ve Discounted Payback Period (DPP) 35,42–35,67 €/MWh ve 5,7–5,8 yıl olarak bulunmuştur. (Serafim vd., 2021)

Son yıllarda bu konu ile ilgili yapılan yüksek lisans ve doktora tezleri incelendiğinde;

Düşük kapasiteli değişik ısı kaynaklı, akışkanlı ve konfigürasyonlu ORÇ'nin tasarımı ve termodinamik optimizasyonu yapılmıştır. 40 farklı akışkanın ORÇ performansı üzerindeki etkisi belirlenmiştir. Çok amaçlı genetik algoritma optimizasyon tekniği ile ısı verim, türbin gücü ve ekserji verimi maksimizasyonu ile toplam tersinmezlik, hacimsel debi oranı ve çevresel etki faktörünün minimizasyonu

amaçlanmıştır. Son olarak optimum akışkan ile R-ORÇ, A-ORÇ, RA-ORÇ, r-ORÇ ve Rr-ORÇ'nin konfigürasyonlarından değişik ısı kaynakları sıcaklıkları için optimum konfigürasyon belirlenmiştir. (Sadık Ata, 2020)

Belçika'daki bir fabrikadaki birleşik ısı ve güç motorundan (CHP) atık ısının geri kazanımı ve evsel atıklardan biyogaz üretimi incelenmiştir. Akışkan olarak R245fa'yı kullanan, rejeneratörlü ve rejeneratörsüz bir organik Rankine çevrimi (ORC) konfigürasyonları kullanılmıştır. Subkritik ve süperkritik çalışma koşulları için parametreler optimize edilmiştir. En iyi performansın elde edildiği sistem parametrelerinde, egzoz gazı ve CS atık ısısının geri kazanımı için tasarlanan ORC çevrimlerinin ekserji analizi yapılmıştır. (Hüseyin Yağlı, 2018)

Düşük entalpili ve düşük debili jeotermal akışkanın elektrik üretiminde kullanılması için bir ORC sistemi geliştirilmiştir. 150 ton/saat debide ve 90 °C sıcaklıkta düşük sıcaklıktaki jeotermal kaynakları kullanan ORC tabanlı enerji santrallerinin performansını hesaplamak için ORC Designer adında ayrıntılı bir MATLAB programı geliştirilmiştir. En yüksek verim ve net güç üretimi açısından optimum akışkan n-pentan olarak belirlenmiştir. N-pentanlı ORC, 90 °C'de 150 ton/saat jeotermal su kullanarak %4.32 net verimlilikle 245 kWe brüt ve 189 kWe net elektrik üretimi elde edilmiştir. (Murat Karadaş, 2022)

Bağdat'ta bulunan Taji benzin istasyonunu Rankine çevrimi ve organik Rankine çevrimi ile entegre ederek ekstra elektrik üretimi ve çevre emisyonlarını azaltmak için atık ısı geri kazanımı incelenmiştir. Üç amaç fonksiyonu ve sistemin toplam maliyet oranları dikkate alınarak, termodinamik ve eksergo-ekonomik incelemesi yapılmıştır. Çalışma sonucunda GSO CC sisteminden 258,2 MW güç üretilirken, optimum çalışma koşulunda Brayton çevrimi (BC) için 167,3 MW güç üretilmiştir. Enerji ve ekserji verimlerinin GSO CC sistemi için sırasıyla %44,37 ve %42,87 olduğu, Brayton çevrimi için ise sırasıyla %28,74 ve %27,75 olduğu gösterilmiştir. Ayrıca GSO CC sistemi 9,03 \$/MWh iken BC için 8,24 \$/MWh olarak bulunmuştur. (Alaa Fadhıl Kareem, 2023)

İki kademeli bir Organik Rankine Çevrimi (ORC), EES kullanılarak analiz edilmiştir. R32, R227ea, R410a, R290, R134a, RC318, R407c, R22, R23, R116, R218 ve R245fa olarak 12 organik akışkan kullanılmıştır. ORC'nin ısıl verimliliği, ekserjisi ve net iş çıkışı için uygun soğutucu veya soğutucu akışkan seçimi yapılmıştır. Sonuç olarak en yüksek net güç çıkışının ve en yüksek ısıl verimin 425K'da R23 + R23 çiftinden elde edildiğini ve R227ea + R410a çifti 355K'de en yüksek ısıl verimi sağladığı görülmüştür. R245fa'nın en uygun çalışma akışkanı olduğunu görülmüştür. (Ahmet Kaplan, 2022)

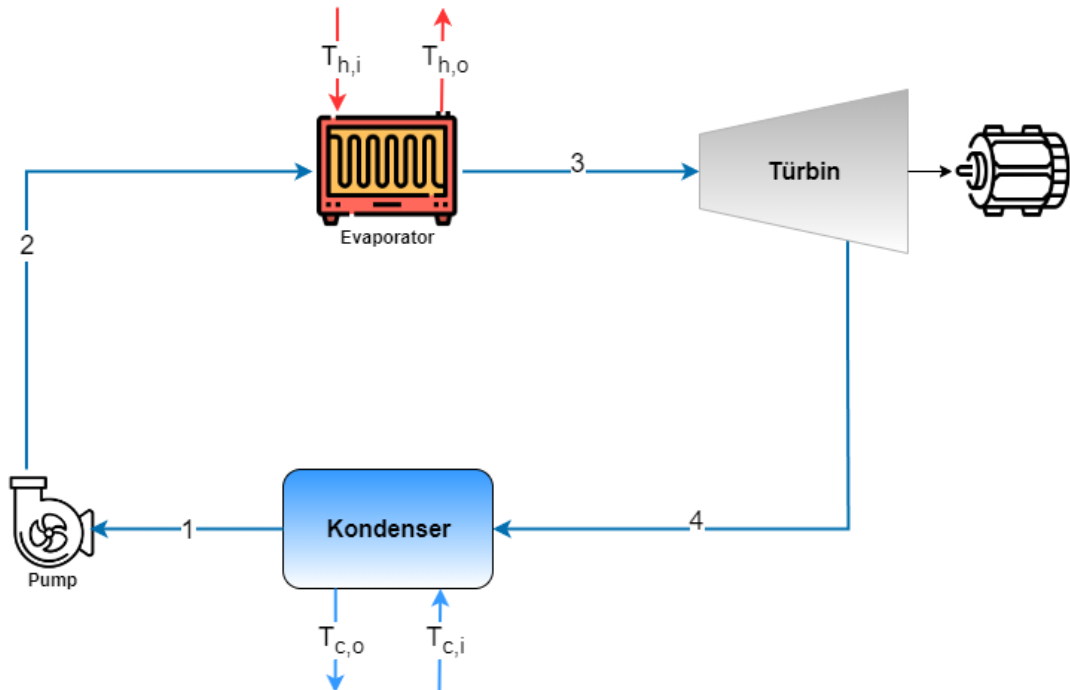
Boğaziçi Üniversitesi Yenilenebilir Enerji Teknolojileri (BÜRET) laboratuvarında laboratuvar ölçekli Organik Rankine Döngüsünün (ORC) dinamik bir modeli geliştirilmiştir. Model, Modelica dili ve nesne yönelimli modelleme yazılımı olan Dymola programı kullanılarak elde edilmiştir. Her bileşen için dinamik model test cihazları oluşturulduktan sonra bileşen modellerinin simülasyon sonuçları, BÜRET laboratuvarındaki ORC sisteminden alınan deneysel veriler kullanılarak doğrulanmıştır. Bu çalışmada oluşturulan dinamik model ile her bir bileşenin giriş ve çıkışına ait sıcaklık ve basınç değerlerinin doğru bir şekilde simüle edildiği görülmüştür. (Ertuğrul Altun, 2022)

Bu tez çalışması ile literatür araştırmalarının dışında incelenmemiş bir konu olan Rr-ORÇ'nin klasik ORC'den farkı olan açık besleme suyunun ve reküperatörün sistem performansı üzerindeki etkisi incelenecek ve bu incelemede yeni-nesil ve zeotropik akışkanlar kullanılarak alternatif konfigürasyonlar oluşturulacaktır. Bunlara ek olarak R_p kritik basınç katsayısının sistem üzerindeki etkisi gözlemlenecektir. Tüm bunlar 10 farklı akışkanla ve çevresel etki değerlerinin de değerlendirmeye alınarak incelenmesiyle yapılacaktır.

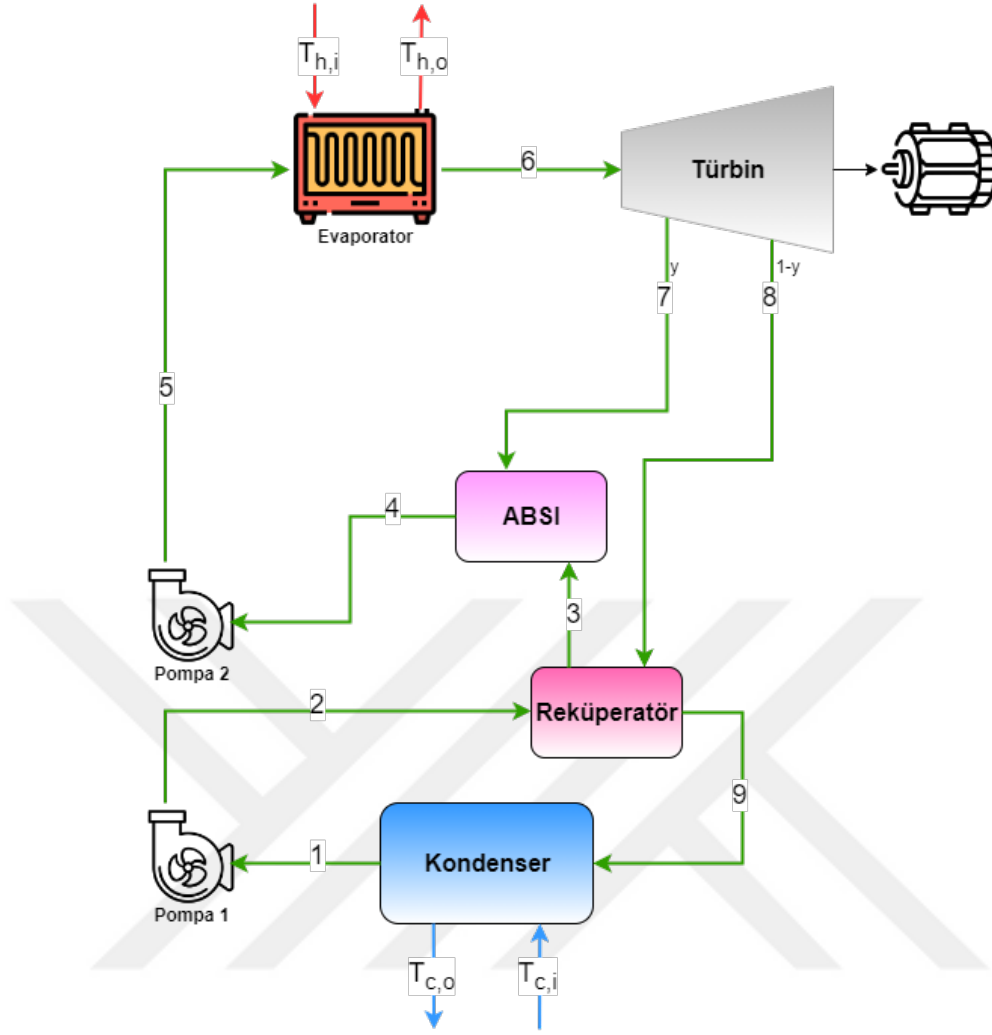
3. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu tez çalışmasında Rejeneratif Reküperatörlü ORC'nin performansı tespit edilecektir. Yeni nesil ve zeotropik akışkanlar ile tasarlanmış ORC'nin modellenmesi için Engineering Equation Solver (EES)'den yararlanılacaktır. Bu akışkanların termofiziksel özellikleri için ise NIST Reference Fluid Thermodynamic and Transport Properties Database (REFPROP) yazılımı kullanılacaktır. Rejeneratif Reküperatörlü ORC'nin performansı Klasik Organik Rankine Çevrimi ile karşılaştırılacaktır. Rejeneratif Reküperatörlü ORC'nin çalışma prensibi Şekil 3.2'de verilmiştir.

Bu sistemde Klasik ORC'den farklı olarak türbin çıkışındaki ısıyı kullanıp, türbinden bir miktar kızgın buhar çekilir ve rejeneratöre gönderilir, kalan kısmı ise reküperatöre aktarılır. Kondenserden çıkıp basınçlandırılan akışkan ilk olarak reküperatörden geçer ve ısı artışı sağlanır, ardından rejeneratöre giren akışkan türbinden çekilen kızgın buhar ile bir miktar daha ısıtılır ve tekrar bir pompa yardımıyla basınçlandırılıp evaporatöre aktarılır. Bu sayede sistemdeki akışkan evaporatöre girmeden ek bir ön ısıtma işlemine tabi tutulmasını sağlar ve sistem performansını artırır.



Şekil 3.1. Klasik ORC'nin çalışma prensibi



Şekil 3.2. Rejeneratif Reküperatörlü ORC'nin çalışma prensibi

Rejeneratif Reküperatörlü ORC'nin termodinamik modellenmesi için EES'de tanımlanan denklemler aşağıda verilmiştir (*Denklem 1-43*).

Enerji Analizi

Pompa:

$$W_{p,1} = \frac{v_1(P_2 - P_1)}{\eta_{p,1}} = h_2 - h_1 \quad (1)$$

$$W_{p,2} = \frac{v_4(P_5 - P_4)}{\eta_{p,2}} = h_5 - h_4 \quad (2)$$

$$W_{p,total} = (W_{p,1} \times m_z) + (W_{p,2} \times m_o) \quad (3)$$

Evaporatör:

$$Q_{evap} = \dot{m}_o(h_6 - h_5) = \dot{m}_h C_p(T_{h,i} - T_{h,o}) \quad (4)$$

$$\varepsilon_{evap} = \frac{T_{h,i} - T_{p,e}}{T_{h,i} - T_{6f}} \quad (5)$$

Evaporatör Pinch Point Sıcaklık Farkı:

$$\dot{m}_o(h_6 - h_{6f}) = \dot{m}_h C_p(T_{h,i} - T_{p,e}) \quad (6)$$

$$\Delta T_{pp,e} = T_{p,e} - T_{6f} \quad (7)$$

Kondenser:

$$Q_{cond} = \dot{m}_z(h_9 - h_1) = \dot{m}_c C_{pc}(T_{c,o} - T_{c,i}) \quad (8)$$

Kondenser Pinch Point Sıcaklık Farkı:

$$\dot{m}_o(h_1 - h_{1g}) = \dot{m}_c C_p(T_{p,k} - T_{c,i}) \quad (9)$$

$$\Delta T_{pp,k} = T_9 - T_{p,k} \quad (10)$$

Türbin:

$$W_t = \dot{m}_y(h_6 - h_7) + \dot{m}_z(h_6 - h_8) \quad (11)$$

$$\eta_t = \frac{h_6 - h_7}{h_6 - h_{7s}} \quad (12)$$

$$\eta_t = \frac{h_6 - h_8}{h_6 - h_{8s}} \quad (13)$$

Rekuperatör- Rejeneratör:

$$\varepsilon_{recup} = \frac{T_8 - T_3}{T_8 - T_2} \quad (14)$$

$$y_{h7} + (1 - y)h_3 = h_4 \quad (15)$$

$$Q_{IHE} = \dot{m}_z(h_8 - h_9) = \dot{m}_z(h_3 - h_2) \quad (16)$$

$$\dot{m}_o h_4 = \dot{m}_z h_3 + \dot{m}_y h_7 \quad (17)$$

Ekserji Analizi

$$e = (h - h_0) - T_0(s - s_0) \quad (18)$$

$$I = T_0 S_{generation} \quad (19)$$

$$\eta_{t,II} = \frac{\dot{E}_p}{\dot{E}_f} \quad (20)$$

$$\dot{E}_p: \text{Üretilen Ekserji (Product Exergy)} \quad (21)$$

$$\dot{E}_f: \text{Sağlanan Ekserji (Fuel Exergy)} \quad (22)$$

Pompa:

$$W_{p,1} + (\dot{m}_z e_1) = \dot{m}_z e_2 + I_{p,1} \quad (23)$$

$$\dot{E}_{p,1} = \dot{m}_z (e_2 - e_1) \quad (24)$$

$$\dot{E}_{f,1} = W_{p,1} \quad (25)$$

$$W_{p,2} + (\dot{m}_o e_4) = \dot{m}_o e_5 + I_{p,2} \quad (26)$$

$$\dot{E}_{p,2} = \dot{m}_o (e_5 - e_4) \quad (27)$$

$$\dot{E}_{f,2} = W_{p,2} \quad (28)$$

Evaporatör:

$$\left(1 - \frac{T_0}{T_h}\right) Q_{evap} + \dot{m}_o e_5 = \dot{m}_o e_6 + I_{evap} \quad (29)$$

$$\dot{E}_p = \dot{m}_o (e_6 - e_5) \quad (30)$$

$$\dot{E}_f = \left(1 - \frac{T_0}{T_h}\right) Q_{evap} \quad (31)$$

Kondenser

$$\dot{m}_z e_9 + \dot{m}_c e_{c,i} = \dot{m}_z e_1 + \dot{m}_c e_{c,o} + I_{con} \quad (32)$$

$$\dot{E}_p = \dot{m}_c (e_{c,o} - e_{c,i}) \quad (33)$$

$$\dot{E}_f = \dot{m}_z (e_9 - e_1) \quad (34)$$

Türbin:

$$\dot{m}_o e_6 = \dot{m}_y e_7 + \dot{m}_z e_8 + W_t + I_t \quad (35)$$

$$\dot{E}_p = W_t \quad (36)$$

$$\dot{E}_f = \dot{m}_o e_6 - \dot{m}_y e_7 - \dot{m}_z e_8 \quad (37)$$

Rekuperatör:

$$\dot{m}_z e_8 + \dot{m}_z e_2 = \dot{m}_z e_3 + \dot{m}_z e_9 + I_{IHE} \quad (38)$$

$$\dot{E}_p = \dot{m}_z e_3 - \dot{m}_z e_2 \quad (39)$$

$$\dot{E}_f = \dot{m}_z e_8 - \dot{m}_z e_9 \quad (40)$$

Rejeneratör:

$$\dot{m}_y e_7 + \dot{m}_z e_3 = \dot{m}_o e_4 + I_{ABSI} \quad (41)$$

$$\dot{E}_p = \dot{m}_o e_4 \quad (42)$$

$$\dot{E}_f = \dot{m}_y e_7 - \dot{m}_z e_3 \quad (43)$$

Bu tez çalışmasında NIST Reference Fluid Thermodynamic and Transport Properties Database (REFPROP) kullanılarak erişilecek yeni-nesil çevreci organik akışkanlar aşağıda belirtilmiştir.

- R1216
- R1234ze(E)
- R1234yf
- R1243zf

Yeni-nesil çevreci organik akışkanların R32, R125, R134a gibi akışkanlar ile karıştırılması durumunda ortaya çıkan karışım zeotropik akışkanlarının performansı tespit edilecektir. Bu sonuçlar hem geleneksel akışkanlar ile hem de yeni-nesil çevreci organik akışkanlar ile karşılaştırılacaktır. Tek başına yeni-nesil çevreci organik akışkan kullanılması ile belirli oranda çevresel akışkan barındıran karışım akışkanın termodinamik performansı karşılaştırılacaktır. Bu akışkanlar ve kütlece karışım oranları aşağıda belirtilmiştir.

- R448A [32/125/1234YF/134A/1234ZEE] (26.0/26.0/20.0/21.0/7.0)
- R449A [32/125/1234YF/134A] (24.3/24.7/25.3/25.7)
- R450A [134A/1234ZEE] (42.0/58.0)
- R454C [32/1234YF] (21.5/78.5)
- R513A [1234YF/134A] (44.0/56.0)

Son olarak performans karşılaştırmasında klasik akışkanlarda kullanılan saf akışkan aşağıda belirtilmiştir.

- R134a

4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA

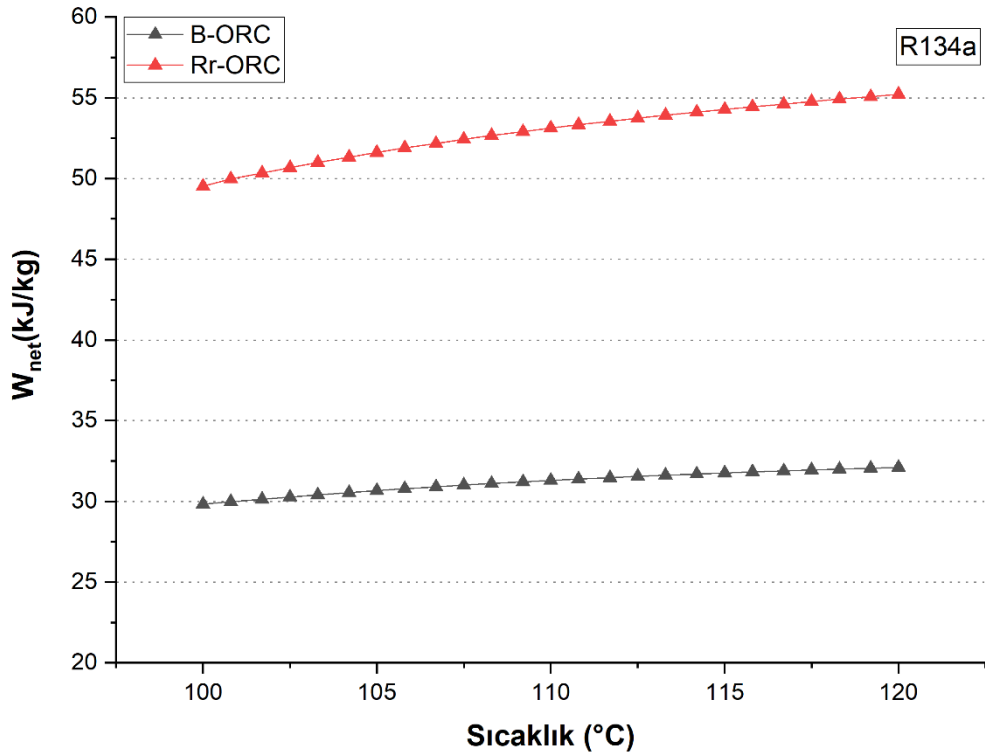
Bu çalışmada ilk olarak B-ORC ve Rr-ORC'nin aynı akışkanlar kullanılarak 100-120 °C ısı kaynağı sıcaklığı altında göstermiş oldukları performanslar W_{net} kriteri üzerinden incelenmiştir. Daha sonra Rr-ORC için 10 yeni-nesil ve zeotropik akışkanların kullanıldığı $R_p=0,9$ olan bir sistemde akışkan performansları belirlenen parametreler üzerinden incelenmiştir. Bu sistemde R_p 'nin değişimine bağlı olarak sistem performans parametrelerindeki değişimlerin karşılaştırmaları yapılmıştır.

Son olarak belirlenen konfigürasyonlar için en iyi performans gösteren sistem ve akışkan belirlenmiş olup bu akışkanın diğer performans parametreleri incelenmiştir.

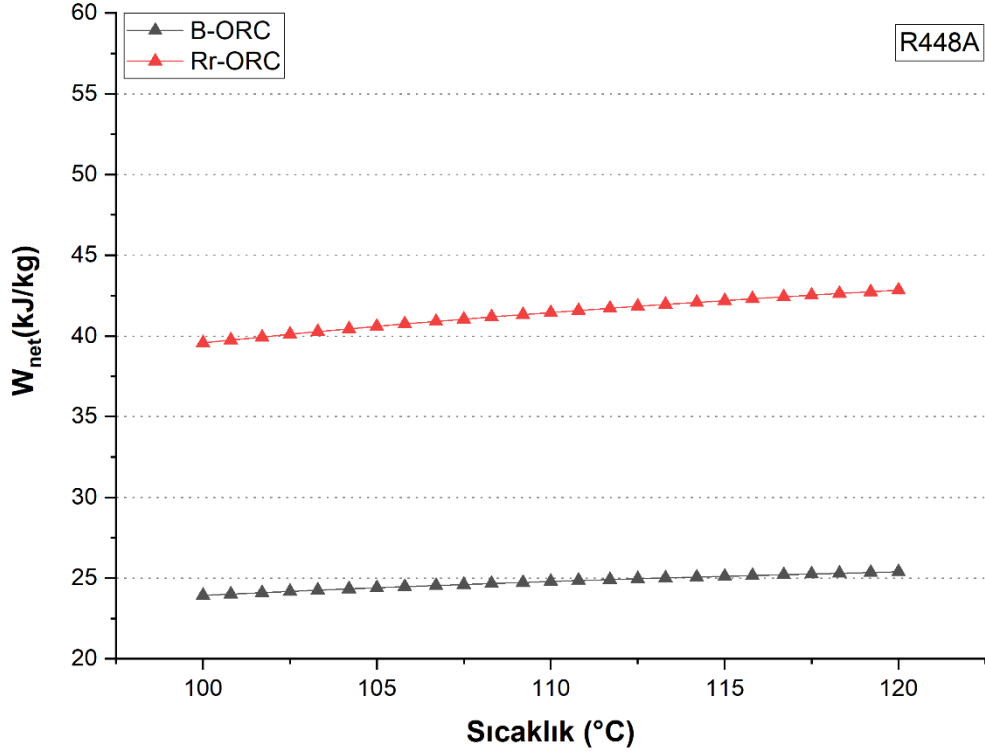
4.1 B-ORC ve Rr-ORC Performans Karşılaştırması

Bu çalışmada ilk olarak B-ORC ve Rr-ORC için performans karşılaştırması yapılmıştır. Bu karşılaştırmada W_{net} performans kriteri olarak kullanılmış olup belirlenen akışkanlar için türbin giriş sıcaklığı 100-120 °C için performansları incelenmiştir.

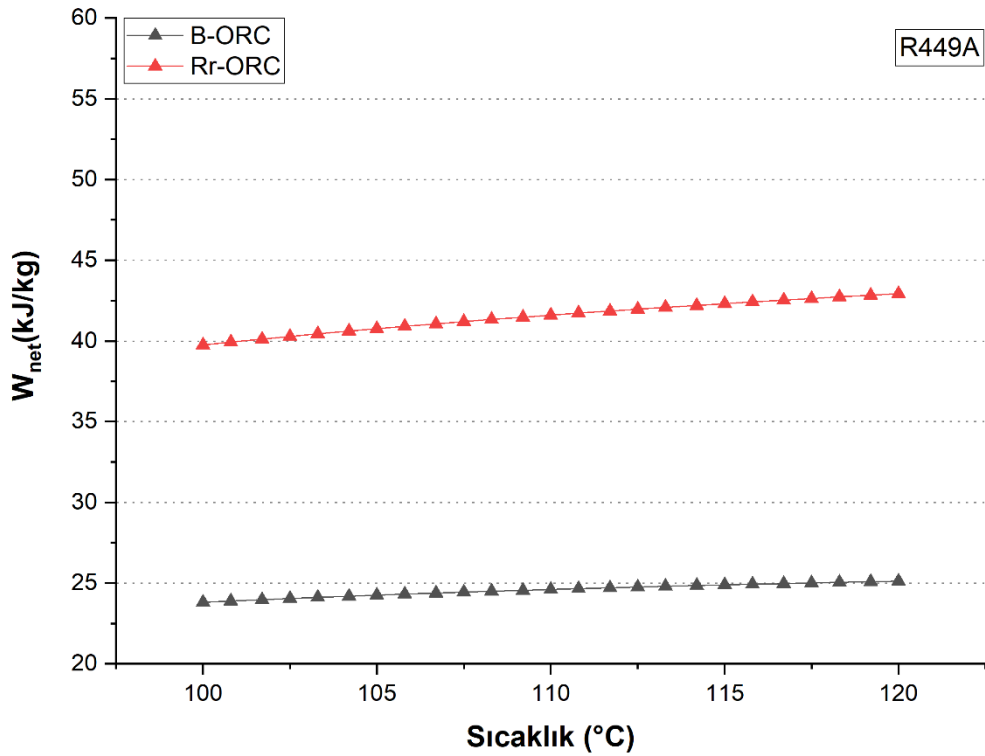
Şekil 4.1-4.10 incelendiğinde kullanılan tüm akışkanlar için net iş performansları Rr-ORC'de akışkanlar için daha yüksek değerlere sahiptir. Sistemler arasındaki değişken prensiplerden reküperatör ve ABSI'nın net işe olan katkısı açıkça görülmüştür.



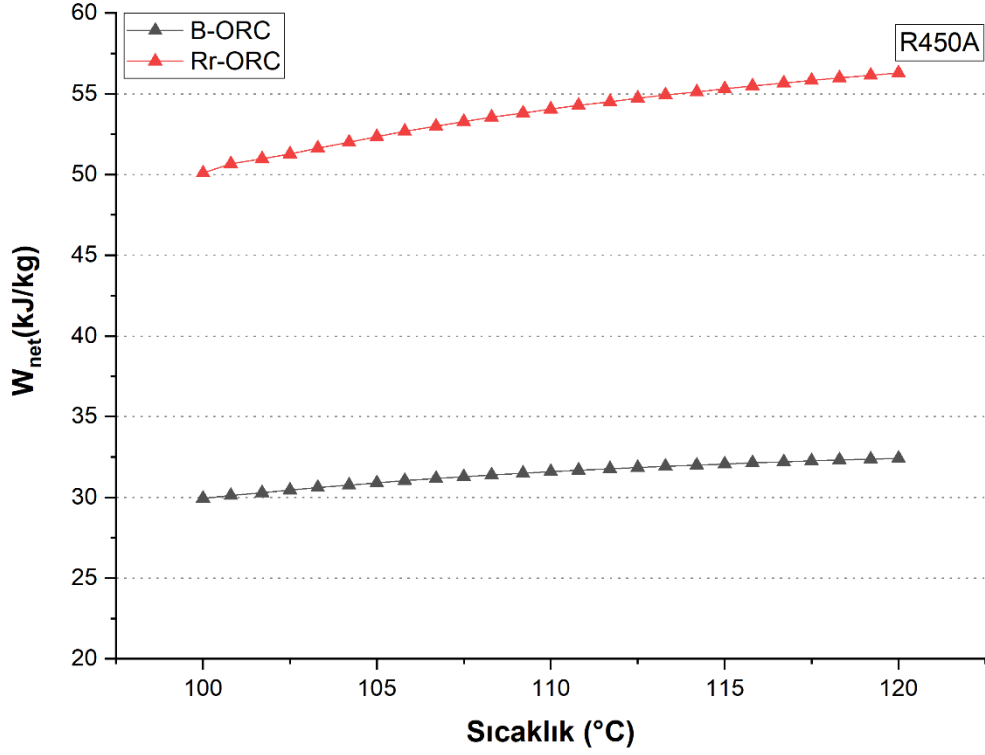
Şekil 4.1. R134a için Basic-Rr ORC performans karşılaştırması



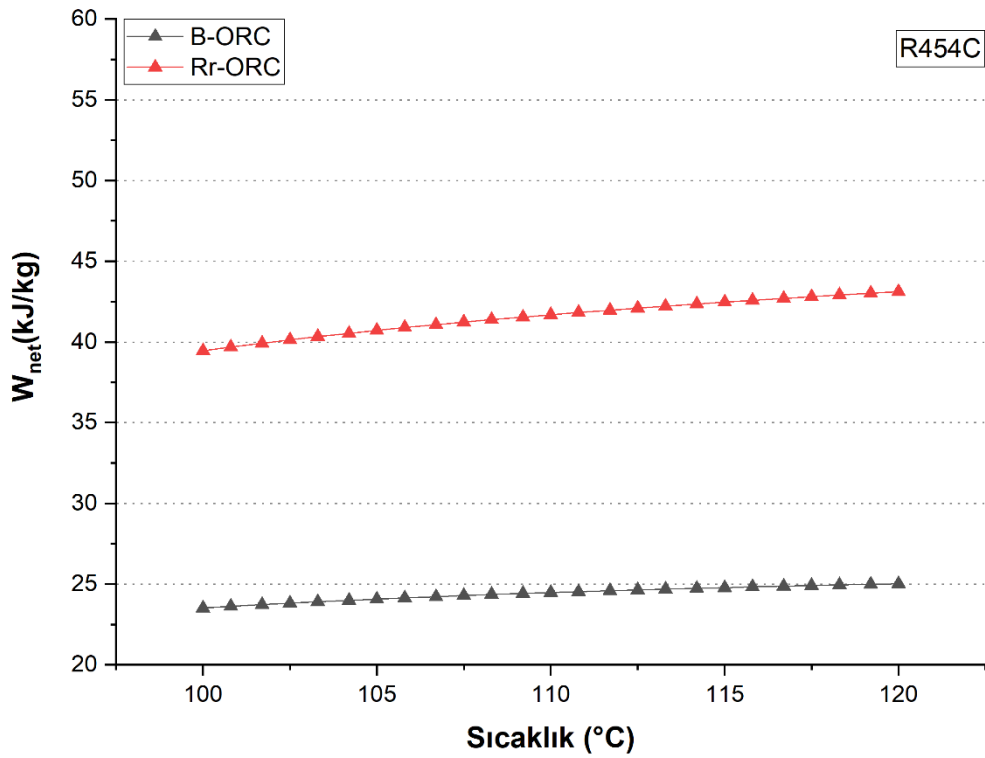
Şekil 4.2. R448A için Basic-Rr ORC performans karşılaştırması



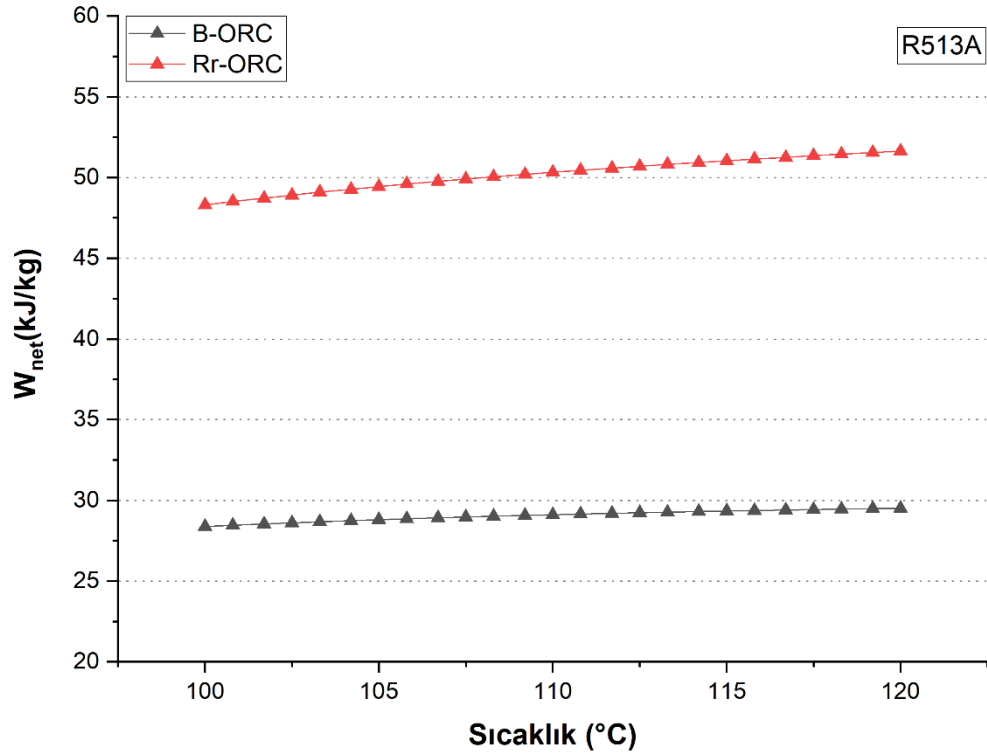
Şekil 4.3. R449A için Basic-Rr ORC performans karşılaştırması



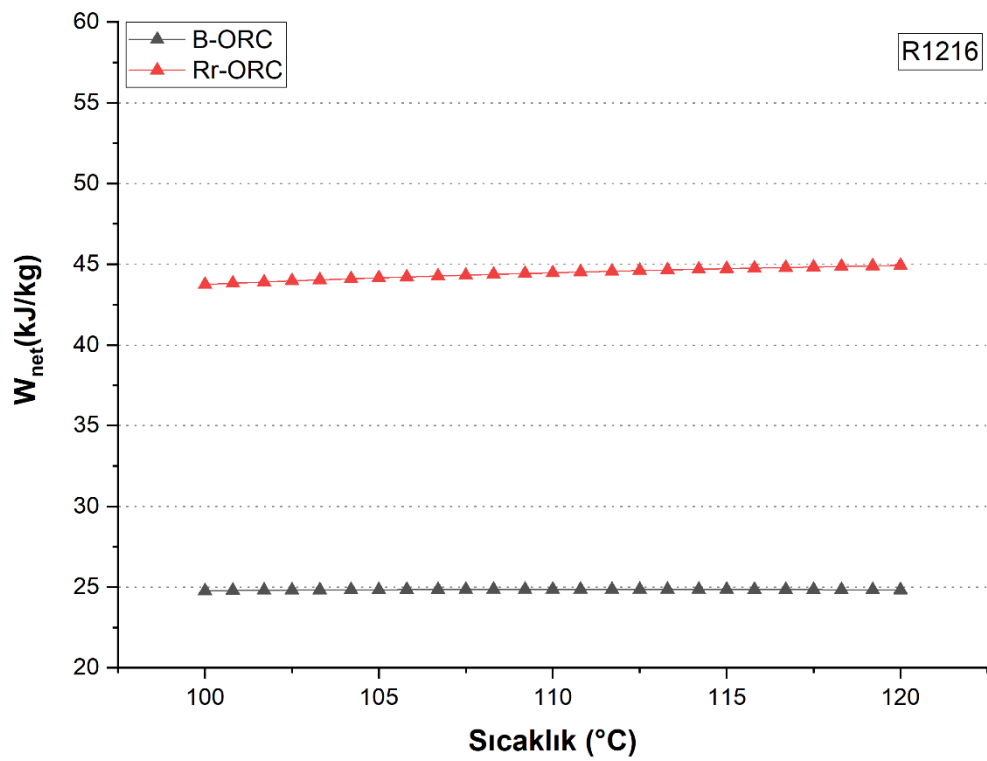
Şekil 4.4. R450A için Basic-Rr ORC performans karşılaştırması



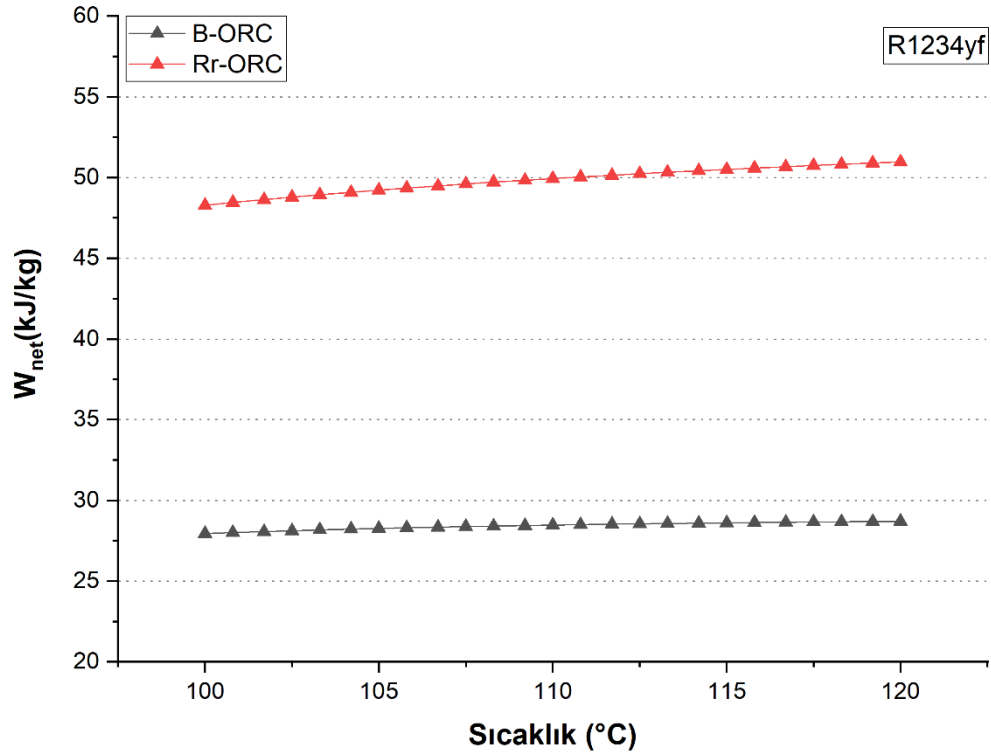
Şekil 4.5. R454C için Basic-Rr ORC performans karşılaştırması



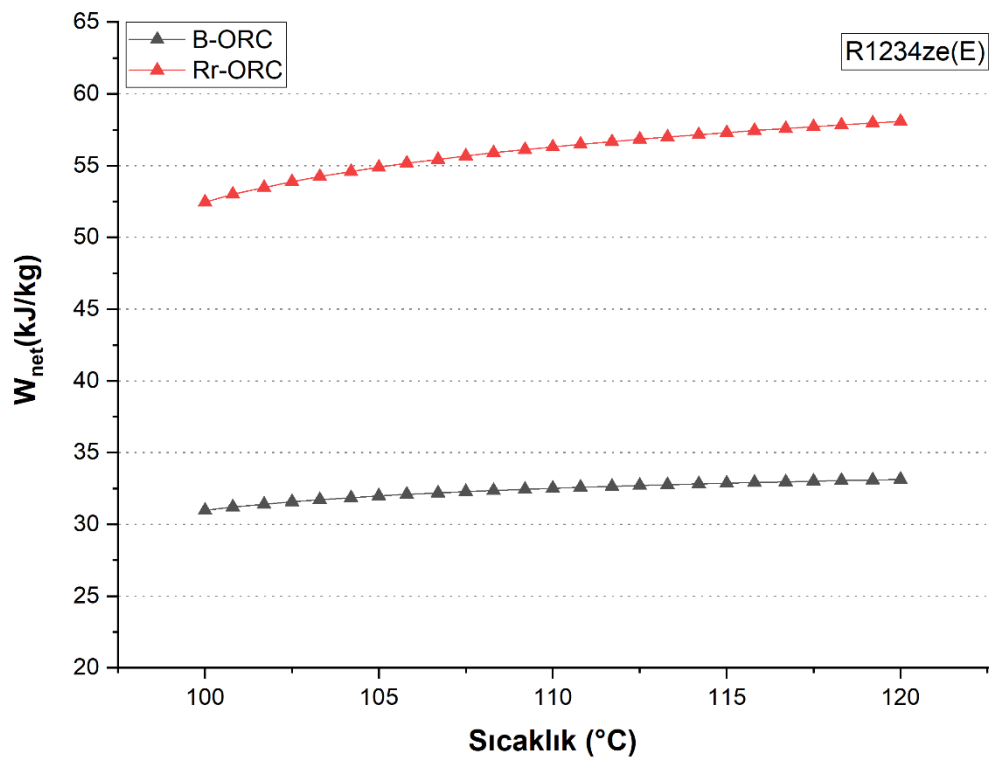
Şekil 4.6. R513A için Basic-Rr ORC performans karşılaştırması



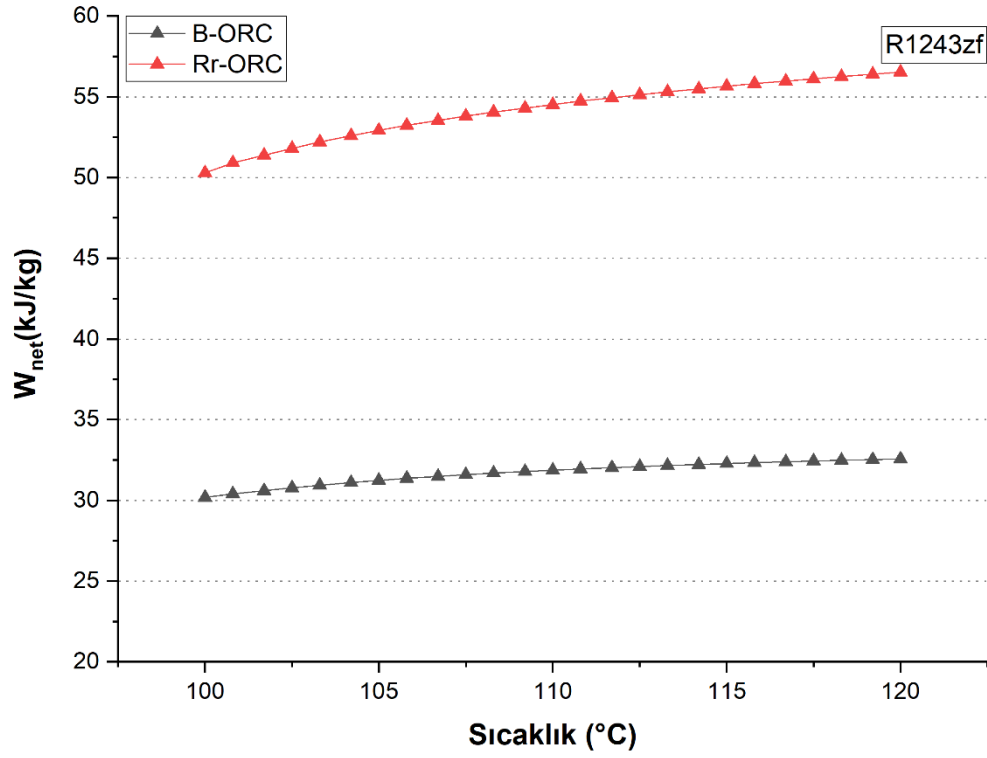
Şekil 4.7. R1216 için Basic-Rr ORC performans karşılaştırması



Şekil 4.8. R1234yf için Basic-Rr ORC performans karşılaştırması



Şekil 4.9. R1234ze(E) için Basic-Rr ORC performans karşılaştırması



Şekil 4.10. R1243zf için Basic-Rr ORC performans karşılaştırması

4.2 Rr-ORC $R_p=0,9$ İçin Performans Sonuçları

Araştırma sonucunda belirlenen yeni-nesil ve zeotropik akışkanlar için 100-120 °C ısı kaynağı sıcaklığı için altında $R_p=0,9$ olarak belirlenen sistemde elde edilen veriler aşağıdaki tablolarda özetlenmiştir.

Özetlenen tablolarlar belirlenen akışkanların W_{net} , Isıl Verim, Ekserji Verimi ve $W_{PG,Toplam}$ değerler incelenmiştir. Çizelge 4.1.'de görüldüğü gibi R513a akışkanı için 120 °C sıcaklıkta net iş 51,64 kJ/kg, ısı verim %11,79, ekserji verimi %47,06 ve toplam pompa işi 7,76 kJ/kg olarak görülmüştür.

Çizelge 4.1. R513a akışkanı performans sonuçları

Sıcaklık (°C)	W_{net} (kJ/kg)	Isıl Verim (%)	Ekserji Verimi (%)	$W_{PG,Toplam}$ (kJ/kg)
100,00	48,31	11,03	44,02	9,12
100,80	48,52	11,08	44,21	9,04
101,70	48,72	11,12	44,40	8,97
102,50	48,91	11,17	44,57	8,90
103,30	49,10	11,21	44,74	8,83
104,20	49,27	11,25	44,90	8,76
105,00	49,44	11,29	45,05	8,70
105,80	49,60	11,32	45,20	8,63
106,70	49,76	11,36	45,34	8,57
107,50	49,91	11,39	45,48	8,51
108,30	50,05	11,43	45,61	8,45
109,20	50,19	11,46	45,74	8,40
110,00	50,33	11,49	45,86	8,34
110,80	50,45	11,52	45,98	8,29
111,70	50,58	11,55	46,09	8,23
112,50	50,70	11,58	46,20	8,18
113,30	50,82	11,60	46,31	8,13
114,20	50,93	11,63	46,41	8,08
115,00	51,04	11,65	46,51	8,03
115,80	51,15	11,68	46,61	7,99
116,70	51,25	11,70	46,71	7,94
117,50	51,36	11,72	46,80	7,89
118,30	51,45	11,75	46,89	7,85
119,20	51,55	11,77	46,97	7,81
120,00	51,64	11,79	47,06	7,76

Çizelge 4.2.'de görüldüğü gibi R454C akışkanı için 120 °C sıcaklıkta net iş 43,12 kJ/kg, ısıl verim %9,84, ekserji verimi %39,29 ve toplam pompa işi 8,10 kJ/kg olarak görülmüştür.

Çizelge 4.2. R454C akışkanı performans sonuçları

Sıcaklık (°C)	W_{net} (kJ/kg)	Isıl Verim (%)	Ekserji Verimi (%)	$W_{PG,Toplam}$ (kJ/kg)
100,00	39,45	9,01	35,95	9,46
100,80	39,69	9,06	36,17	9,38
101,70	39,92	9,11	36,38	9,30
102,50	40,13	9,16	36,57	9,23
103,30	40,34	9,21	36,76	9,16
104,20	40,53	9,25	36,93	9,09
105,00	40,72	9,30	37,10	9,03
105,80	40,90	9,34	37,27	8,96
106,70	41,07	9,38	37,42	8,90
107,50	41,23	9,41	37,57	8,84
108,30	41,39	9,45	37,72	8,78
109,20	41,54	9,48	37,85	8,73
110,00	41,69	9,52	37,99	8,67
110,80	41,83	9,55	38,12	8,62
111,70	41,96	9,58	38,24	8,57
112,50	42,10	9,61	38,36	8,51
113,30	42,22	9,64	38,48	8,46
114,20	42,35	9,67	38,59	8,42
115,00	42,47	9,70	38,70	8,37
115,80	42,58	9,72	38,80	8,32
116,70	42,70	9,75	38,91	8,27
117,50	42,81	9,77	39,01	8,23
118,30	42,91	9,80	39,10	8,19
119,20	43,02	9,82	39,20	8,14
120,00	43,12	9,84	39,29	8,10

Çizelge 4.3.'de görüldüğü gibi R450A akışkanı için 120 °C sıcaklıkta net iş 56,30 kJ/kg, ısı verim %12,85, ekserji verimi %51,30 ve toplam pompa işi 8,61 kJ/kg olarak görülmüştür.

Çizelge 4.3. R450A akışkanı performans sonuçları

Sıcaklık (°C)	W_{net} (kJ/kg)	Isıl Verim (%)	Ekserji Verimi (%)	$W_{PG,Toplam}$ (kJ/kg)
100,00	50,10	11,44	45,65	10,73
100,80	50,67	11,57	46,17	10,58
101,70	50,98	11,64	46,46	10,42
102,50	51,27	11,70	46,72	10,28
103,30	51,64	11,79	47,06	10,15
104,20	52,00	11,87	47,38	10,04
105,00	52,35	11,95	47,70	9,93
105,80	52,68	12,03	48,01	9,83
106,70	52,99	12,10	48,29	9,74
107,50	53,28	12,16	48,55	9,64
108,30	53,55	12,23	48,80	9,56
109,20	53,81	12,29	49,04	9,47
110,00	54,06	12,34	49,26	9,39
110,80	54,29	12,40	49,47	9,32
111,70	54,51	12,45	49,67	9,24
112,50	54,73	12,49	49,87	9,17
113,30	54,93	12,54	50,05	9,10
114,20	55,12	12,59	50,23	9,03
115,00	55,31	12,63	50,40	8,97
115,80	55,49	12,67	50,57	8,90
116,70	55,67	12,71	50,72	8,84
117,50	55,83	12,75	50,88	8,78
118,30	55,99	12,78	51,02	8,72
119,20	56,15	12,82	51,17	8,67
120,00	56,30	12,85	51,30	8,61

Çizelge 4.4.'de görüldüğü gibi R449A akışkanı için 120 °C sıcaklıkta net iş 42,93 kJ/kg, ısı verim %9,80, ekserji verimi %39,12 ve toplam pompa işi 7,67 kJ/kg olarak görülmüştür.

Çizelge 4.4. R449A akışkanı performans sonuçları

Sıcaklık (°C)	W_{net} (kJ/kg)	Isıl Verim (%)	Ekserji Verimi (%)	$W_{PG,Toplam}$ (kJ/kg)
100,00	39,75	9,08	36,23	8,77
100,80	39,94	9,12	36,39	8,71
101,70	40,11	9,16	36,55	8,66
102,50	40,28	9,20	36,71	8,60
103,30	40,45	9,24	36,86	8,55
104,20	40,61	9,27	37,00	8,49
105,00	40,76	9,31	37,14	8,44
105,80	40,91	9,34	37,28	8,39
106,70	41,06	9,37	37,41	8,34
107,50	41,20	9,41	37,54	8,29
108,30	41,34	9,44	37,67	8,25
109,20	41,47	9,47	37,79	8,20
110,00	41,60	9,50	37,91	8,16
110,80	41,73	9,53	38,02	8,11
111,70	41,85	9,56	38,14	8,07
112,50	41,97	9,58	38,25	8,02
113,30	42,09	9,61	38,35	7,98
114,20	42,20	9,64	38,46	7,94
115,00	42,31	9,66	38,56	7,90
115,80	42,42	9,69	38,66	7,86
116,70	42,53	9,71	38,76	7,82
117,50	42,63	9,73	38,85	7,78
118,30	42,74	9,76	38,94	7,75
119,20	42,83	9,78	39,03	7,71
120,00	42,93	9,80	39,12	7,67

Çizelge 4.5.'de görüldüğü gibi R448A akışkanı için 120 °C sıcaklıkta net iş 42,84 kJ/kg, ısı verim %9,78, ekserji verimi %39,04 ve toplam pompa işi 7,82 kJ/kg olarak görülmüştür.

Çizelge 4.5. R448A akışkanı performans sonuçları

Sıcaklık (°C)	W_{net} (kJ/kg)	Isıl Verim (%)	Ekserji Verimi (%)	$W_{PG,Toplam}$ (kJ/kg)
100,00	39,57	9,03	36,06	8,82
100,80	39,75	9,08	36,22	8,77
101,70	39,93	9,12	36,39	8,71
102,50	40,11	9,16	36,55	8,66
103,30	40,27	9,20	36,70	8,61
104,20	40,44	9,23	36,85	8,56
105,00	40,59	9,27	36,99	8,52
105,80	40,75	9,30	37,13	8,47
106,70	40,90	9,34	37,27	8,43
107,50	41,04	9,37	37,40	8,38
108,30	41,18	9,40	37,53	8,34
109,20	41,32	9,43	37,65	8,30
110,00	41,45	9,46	37,77	8,26
110,80	41,58	9,49	37,89	8,22
111,70	41,71	9,52	38,01	8,18
112,50	41,84	9,55	38,12	8,14
113,30	41,96	9,58	38,23	8,10
114,20	42,08	9,61	38,34	8,06
115,00	42,19	9,63	38,45	8,03
115,80	42,31	9,66	38,55	7,99
116,70	42,42	9,69	38,65	7,95
117,50	42,53	9,71	38,75	7,92
118,30	42,64	9,73	38,85	7,88
119,20	42,74	9,76	38,95	7,85
120,00	42,84	9,78	39,04	7,82

Çizelge 4.6.'da görüldüğü gibi R134a akışkanı için 120 °C sıcaklıkta net iş 55,22 kJ/kg, ısı verim %12,61, ekserji verimi %50,32 ve toplam pompa işi 8,21 kJ/kg olarak görülmüştür.

Çizelge 4.6. R134a akışkanı performans sonuçları

Sıcaklık (°C)	W_{net} (kJ/kg)	Isıl Verim (%)	Ekserji Verimi (%)	$W_{PG,Toplam}$ (kJ/kg)
100,00	49,53	11,31	45,13	9,93
100,80	49,98	11,41	45,55	9,81
101,70	50,34	11,49	45,87	9,70
102,50	50,68	11,57	46,18	9,60
103,30	51,00	11,64	46,48	9,50
104,20	51,32	11,72	46,76	9,41
105,00	51,62	11,78	47,03	9,32
105,80	51,90	11,85	47,30	9,24
106,70	52,17	11,91	47,54	9,16
107,50	52,43	11,97	47,78	9,09
108,30	52,67	12,03	48,00	9,01
109,20	52,91	12,08	48,21	8,95
110,00	53,13	12,13	48,41	8,88
110,80	53,34	12,18	48,61	8,81
111,70	53,54	12,22	48,79	8,75
112,50	53,74	12,27	48,97	8,69
113,30	53,93	12,31	49,14	8,63
114,20	54,11	12,35	49,31	8,58
115,00	54,28	12,39	49,46	8,52
115,80	54,45	12,43	49,62	8,47
116,70	54,61	12,47	49,77	8,41
117,50	54,77	12,51	49,91	8,36
118,30	54,93	12,54	50,05	8,31
119,20	55,07	12,57	50,19	8,26
120,00	55,22	12,61	50,32	8,21

Çizelge 4.7.'de görüldüğü gibi R1234ze(E) akışkanı için 120 °C sıcaklıkta net iş 58,08 kJ/kg, ısı verim %13,26, ekserji verimi %52,93 ve toplam pompa işi 8,64 kJ/kg olarak görülmüştür.

Çizelge 4.7. R1234ze(E) akışkanı performans sonuçları

Sıcaklık (°C)	W_{net} (kJ/kg)	Isıl Verim (%)	Ekserji Verimi (%)	$W_{PG,Toplam}$ (kJ/kg)
100,00	52,45	11,98	47,80	10,61
100,80	53,01	12,10	48,30	10,42
101,70	53,47	12,21	48,72	10,26
102,50	53,88	12,30	49,10	10,12
103,30	54,25	12,39	49,44	10,00
104,20	54,59	12,46	49,74	9,89
105,00	54,89	12,53	50,02	9,79
105,80	55,17	12,60	50,28	9,70
106,70	55,43	12,66	50,51	9,62
107,50	55,67	12,71	50,73	9,53
108,30	55,90	12,76	50,93	9,46
109,20	56,11	12,81	51,13	9,38
110,00	56,30	12,85	51,31	9,31
110,80	56,49	12,90	51,48	9,25
111,70	56,67	12,94	51,64	9,18
112,50	56,84	12,98	51,79	9,12
113,30	57,00	13,01	51,94	9,06
114,20	57,15	13,05	52,08	9,00
115,00	57,30	13,08	52,22	8,95
115,80	57,45	13,12	52,35	8,89
116,70	57,58	13,15	52,47	8,84
117,50	57,72	13,18	52,59	8,79
118,30	57,84	13,21	52,71	8,74
119,20	57,97	13,23	52,82	8,69
120,00	58,08	13,26	52,93	8,64

Çizelge 4.8.'de görüldüğü gibi R1243zf akışkanı için 120 °C sıcaklıkta net iş 56,53 kJ/kg, ısı verim %12,91, ekserji verimi %51,52 ve toplam pompa işi 8,41 kJ/kg olarak görülmüştür.

Çizelge 4.8. R1243zf akışkanı performans sonuçları

Sıcaklık (°C)	W_{net} (kJ/kg)	Isıl Verim (%)	Ekserji Verimi (%)	$W_{PG,Toplam}$ (kJ/kg)
100,00	50,29	11,48	45,83	10,53
100,80	50,91	11,62	46,39	10,35
101,70	51,38	11,73	46,82	10,19
102,50	51,81	11,83	47,21	10,05
103,30	52,21	11,92	47,58	9,92
104,20	52,59	12,01	47,92	9,80
105,00	52,93	12,08	48,23	9,70
105,80	53,24	12,16	48,52	9,59
106,70	53,53	12,22	48,78	9,50
107,50	53,81	12,28	49,03	9,41
108,30	54,06	12,34	49,26	9,32
109,20	54,30	12,40	49,48	9,24
110,00	54,52	12,45	49,68	9,16
110,80	54,74	12,50	49,88	9,09
111,70	54,94	12,54	50,06	9,02
112,50	55,13	12,59	50,24	8,95
113,30	55,31	12,63	50,40	8,88
114,20	55,49	12,67	50,56	8,81
115,00	55,66	12,71	50,72	8,75
115,80	55,82	12,74	50,86	8,69
116,70	55,97	12,78	51,00	8,63
117,50	56,12	12,81	51,14	8,57
118,30	56,26	12,85	51,27	8,52
119,20	56,40	12,88	51,39	8,46
120,00	56,53	12,91	51,52	8,41

Çizelge 4.9.'da görüldüğü gibi R1234yf akışkanı için 120 °C sıcaklıkta net iş 50,97 kJ/kg, ısı verim %11,64, ekserji verimi %46,44 ve toplam pompa işi 7,74 kJ/kg olarak görülmüştür.

Çizelge 4.9. R1234yf akışkanı performans sonuçları

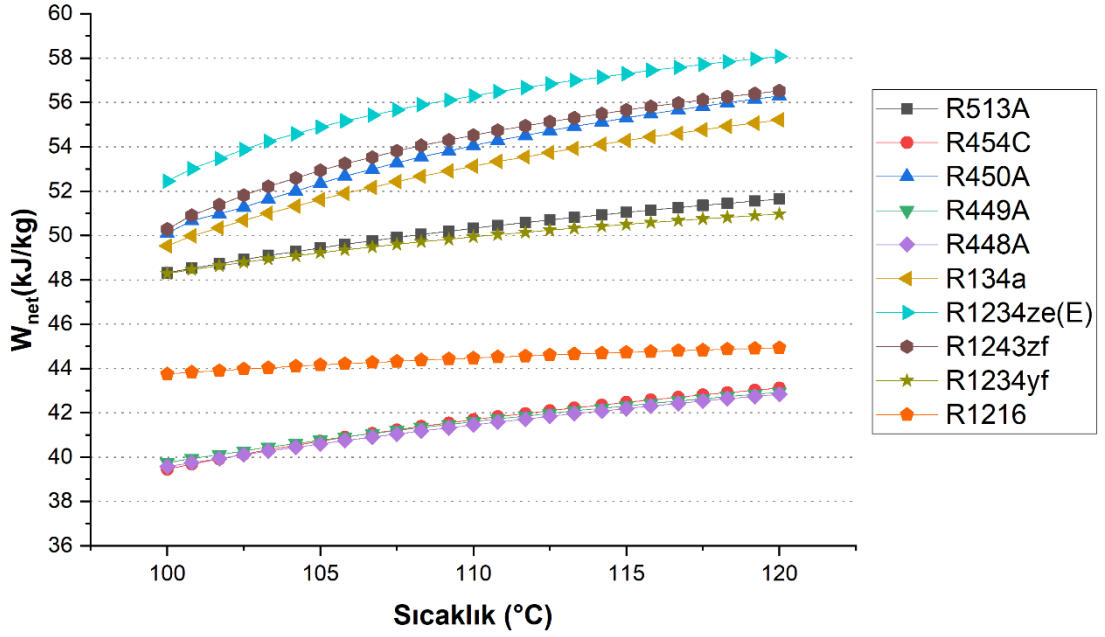
Sıcaklık (°C)	W_{net} (kJ/kg)	Isıl Verim (%)	Ekserji Verimi (%)	$W_{PG,Toplam}$ (kJ/kg)
100,00	48,28	11,02	43,99	9,14
100,80	48,46	11,06	44,16	9,06
101,70	48,63	11,10	44,31	8,98
102,50	48,79	11,14	44,46	8,91
103,30	48,94	11,17	44,60	8,84
104,20	49,08	11,21	44,73	8,77
105,00	49,22	11,24	44,85	8,70
105,80	49,35	11,27	44,97	8,63
106,70	49,48	11,30	45,09	8,57
107,50	49,60	11,32	45,20	8,51
108,30	49,72	11,35	45,31	8,45
109,20	49,83	11,38	45,41	8,39
110,00	49,94	11,40	45,50	8,34
110,80	50,04	11,42	45,60	8,28
111,70	50,14	11,45	45,69	8,23
112,50	50,24	11,47	45,78	8,17
113,30	50,33	11,49	45,86	8,12
114,20	50,42	11,51	45,94	8,07
115,00	50,50	11,53	46,02	8,02
115,80	50,59	11,55	46,10	7,97
116,70	50,67	11,57	46,17	7,93
117,50	50,75	11,59	46,24	7,88
118,30	50,82	11,60	46,31	7,83
119,20	50,90	11,62	46,38	7,79
120,00	50,97	11,64	46,44	7,74

Çizelge 4.10.'da görüldüğü gibi R1216 akışkanı için 120 °C sıcaklıkta net iş 44,93 kJ/kg, ısı verim %10,26, ekserji verimi %40,94 ve toplam pompa işi 6,79 kJ/kg olarak görülmüştür.

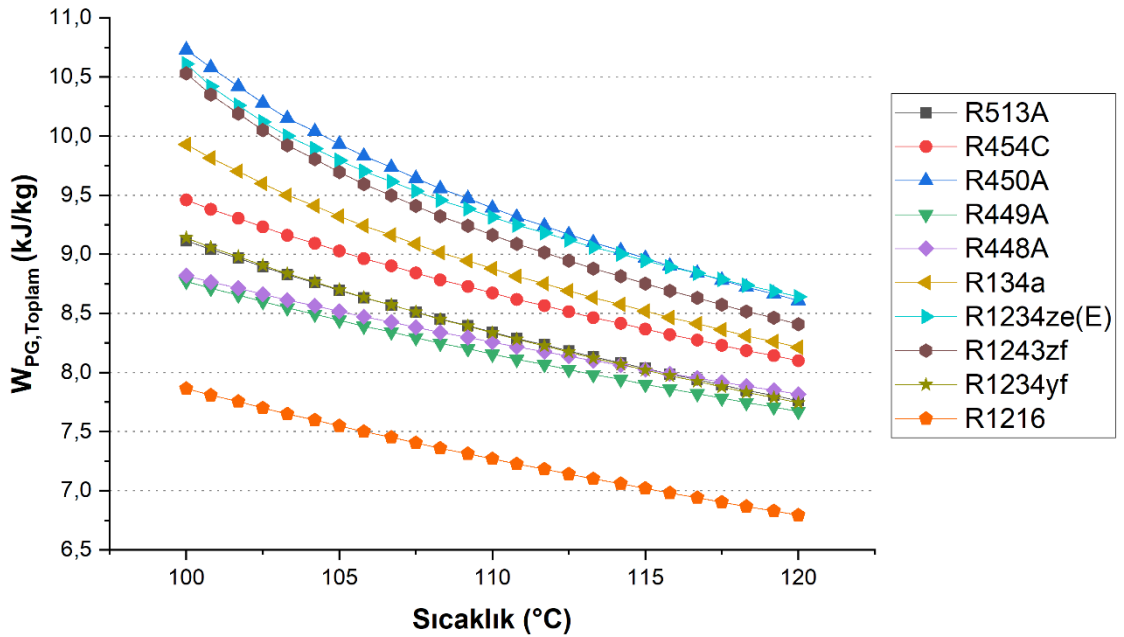
Çizelge 4.10. R1216 akışkanı performans sonuçları

Sıcaklık (°C)	W_{net} (kJ/kg)	Isıl Verim (%)	Ekserji Verimi (%)	$W_{PG,Toplam}$ (kJ/kg)
100,00	43,75	9,99	39,87	7,86
100,80	43,83	10,01	39,94	7,81
101,70	43,90	10,02	40,00	7,75
102,50	43,97	10,04	40,06	7,70
103,30	44,03	10,05	40,12	7,65
104,20	44,10	10,07	40,18	7,60
105,00	44,16	10,08	40,24	7,55
105,80	44,21	10,09	40,29	7,50
106,70	44,27	10,11	40,34	7,45
107,50	44,32	10,12	40,39	7,40
108,30	44,38	10,13	40,44	7,36
109,20	44,43	10,14	40,48	7,31
110,00	44,47	10,15	40,53	7,27
110,80	44,52	10,16	40,57	7,23
111,70	44,56	10,17	40,61	7,18
112,50	44,61	10,18	40,65	7,14
113,30	44,65	10,19	40,69	7,10
114,20	44,69	10,20	40,72	7,06
115,00	44,73	10,21	40,76	7,02
115,80	44,76	10,22	40,79	6,98
116,70	44,80	10,23	40,82	6,94
117,50	44,83	10,24	40,85	6,90
118,30	44,87	10,24	40,89	6,87
119,20	44,90	10,25	40,91	6,83
120,00	44,93	10,26	40,94	6,79

Şekil 4.11 incelendiğinde 100-120 °C ısı kaynağı sıcaklığı altında en yüksek W_{net} değerlerine sahip akışkanın yeni-nesil akışkanlardan R1234ze(E) olduğu görülmektedir. Ek yakın değerlere sahip olan R1243yf'den %2,7 daha yüksek performans gösterdiği görülmüştür. Şekil 4.12'de ise en düşük toplam pompa gücü tüketimi gösteren akışkan R1216 olmuştur.

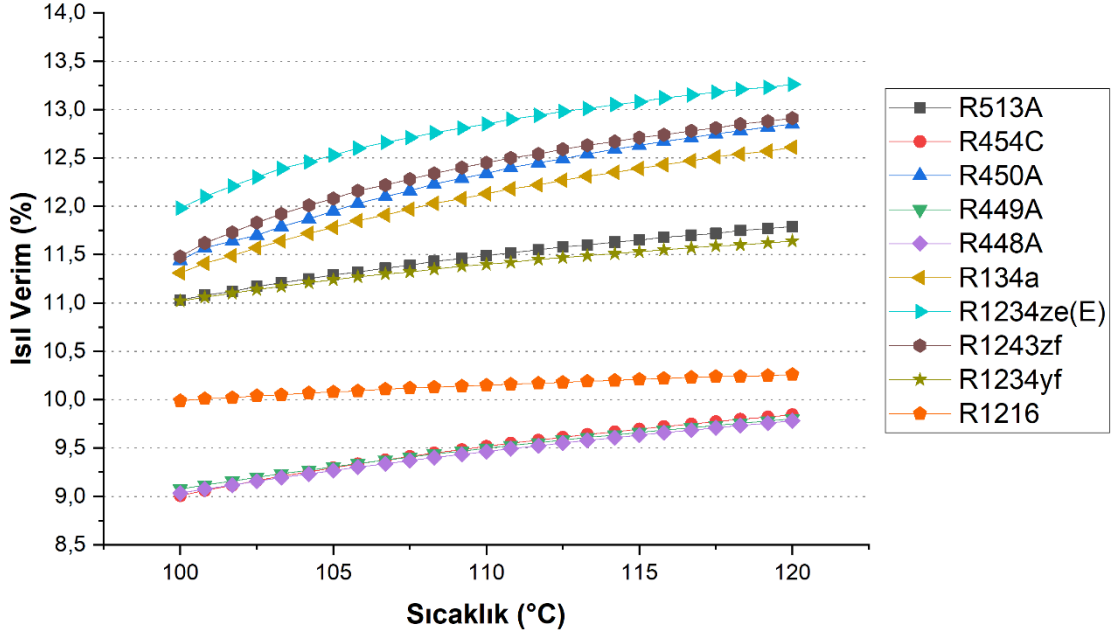


Şekil 4.11. Sıcaklık değişimine bağlı akışkanların W_{net} performansları ($R_p=0,9$)

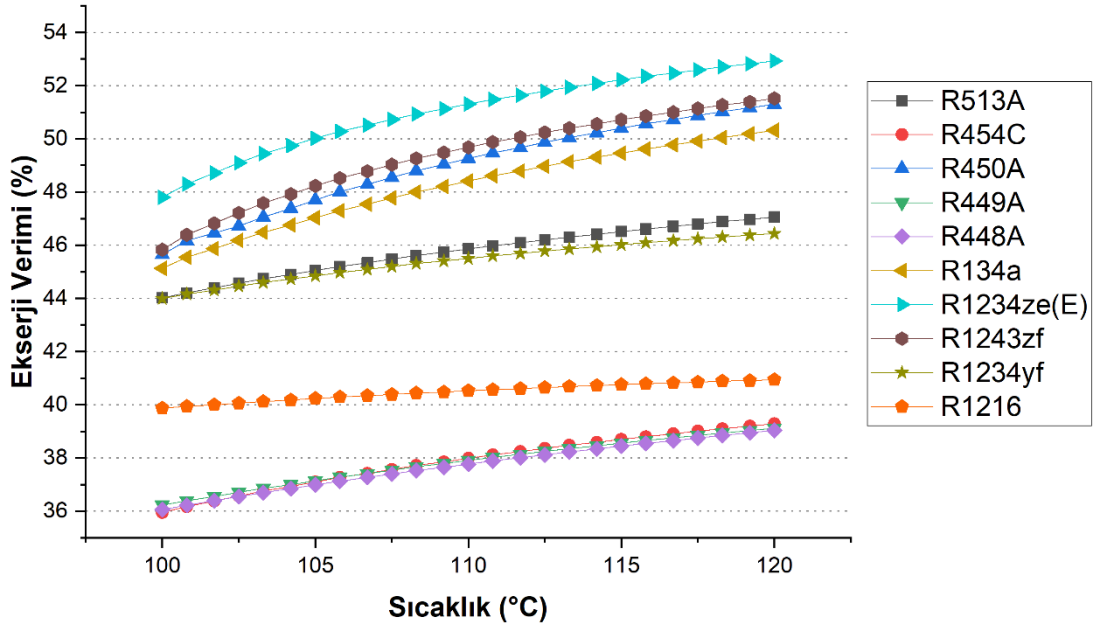


Şekil 4.12. Sıcaklık değişimine bağlı akışkanların $W_{PG,Toplam}$ performansları ($R_p=0,9$)

Şekil 4.13 incelendiğinde en yüksek ısı verim değerlerine sahip akışkanın yeni-nesil akışkanlardan olan R1234ze(E) olduğu gözlemlenmiştir. En düşük performans değerleri ise R448A, R449A, R454C akışkanlarında görülmüştür. Şekil 4.14’de verilen ekserji verimlerinde ise ilk yine ilk sırada R1234ze(E) akışkanını %52,93 değeriyle görülmüştür.



Şekil 4.13. Sıcaklık değişimine bağlı akışkanların Isıl Verim performansları ($R_p=0,9$)

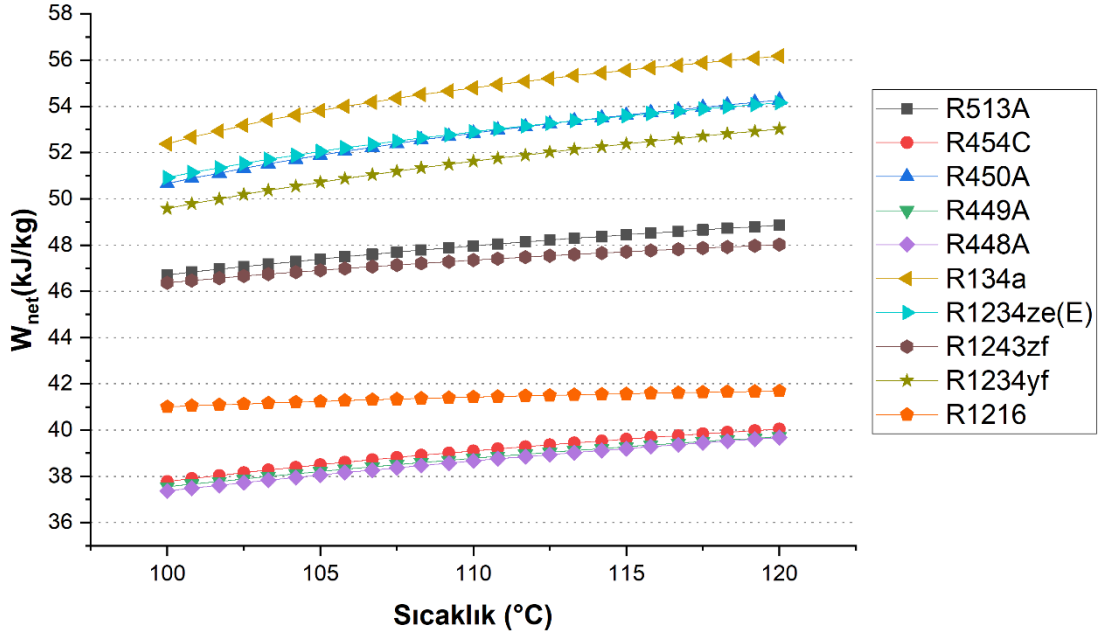


Şekil 4.14. Sıcaklık değişimine bağlı akışkanların Ekserji Verimi performansları ($R_p=0,9$)

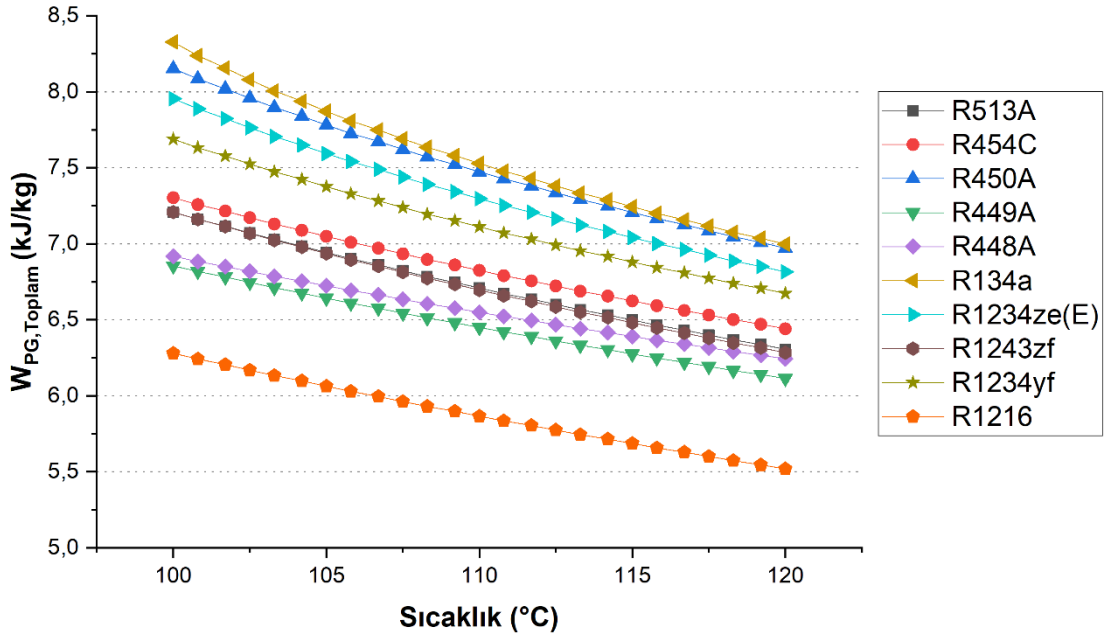
4.3 Rr-ORC $R_p=0,8$ İçin Performans Sonuçları

Bu bölümde akışkanalar için R_p değerleri değişken olarak belirlenip performans sonuçları incelenmiştir.

Şekil 4.15 incelendiğinde en yüksek W_{net} değerlerine sahip akışkanın R134a olduğu gözlemlenmiştir. R_p değişimine bağlı olarak yaklaşık %2'lik performans artışı göstermiştir. Şekil 4.16'da ise aynı şekilde R1216 akışkanında en düşük pompa gücü kullanıldığı görülmüştür.

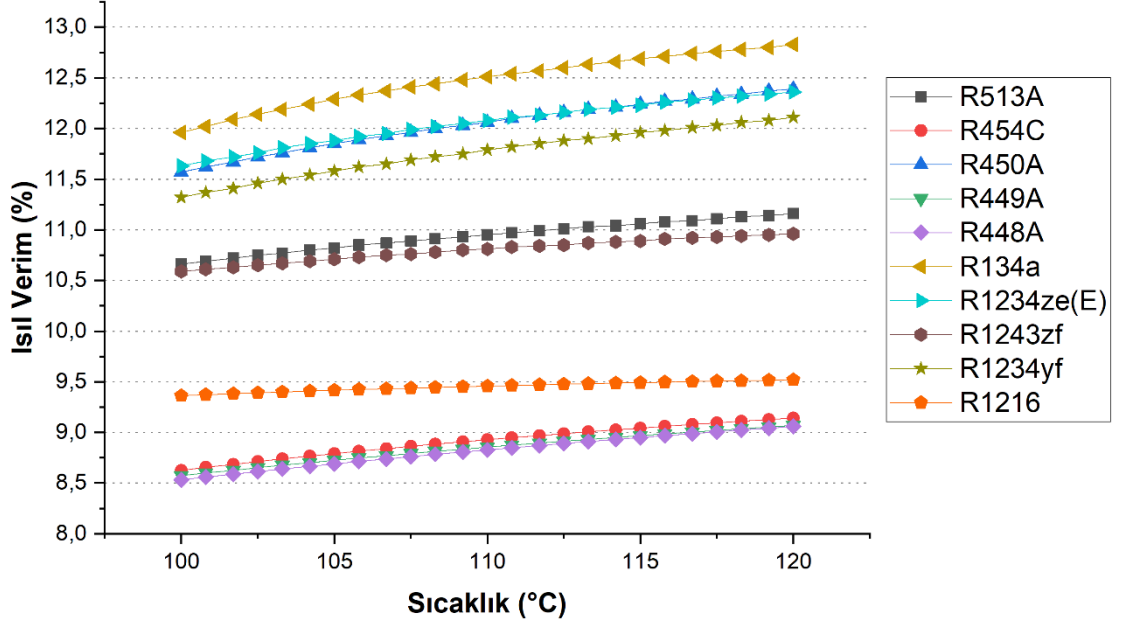


Şekil 4.15. Sıcaklık değişimine bağlı akışkanların W_{net} performansları ($R_p=0,8$)

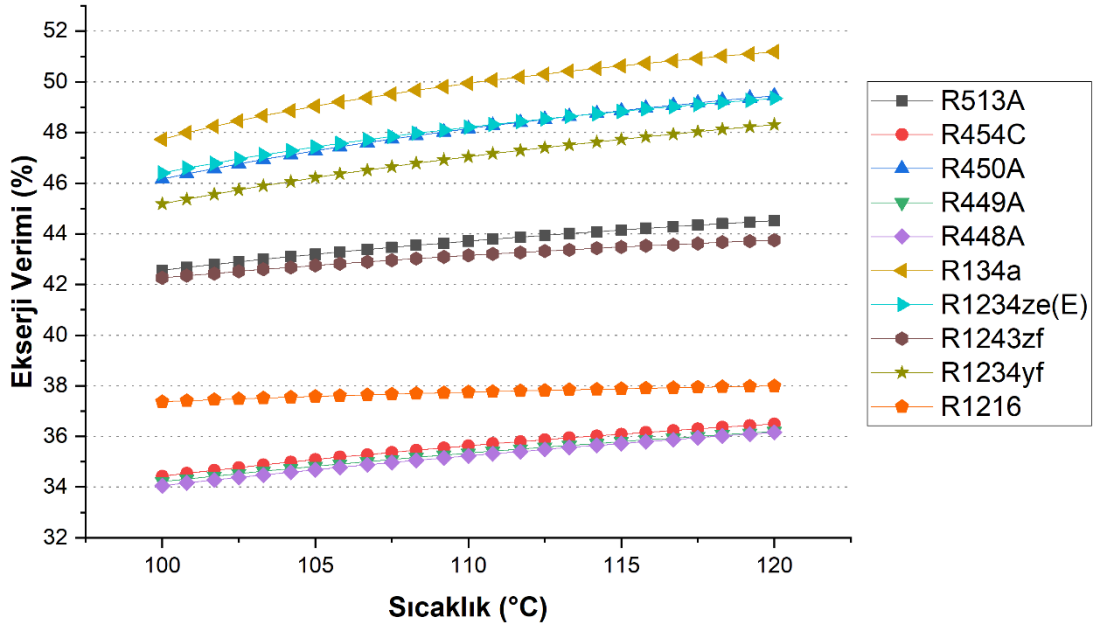


Şekil 4.16. Sıcaklık değişimine bağlı akışkanların $W_{PG,Toplam}$ performansları ($R_p=0,8$)

Şekil 4.17 incelendiğinde ısı verim değeri en yüksek akışkan R134a'da görülmüştür. En düşük değerlere ise R448A, R449A ve R454C akışkanlarında olduğu tespit edilmiştir. Şekil 4.18'de ise ısı verimle aynı şekilde ekserji veriminde de R134a akışkanın önde olduğu açıkça görülmektedir.



Şekil 4.17. Sıcaklık değişimine bağlı akışkanların Isıl Verim performansları ($R_p=0,8$)

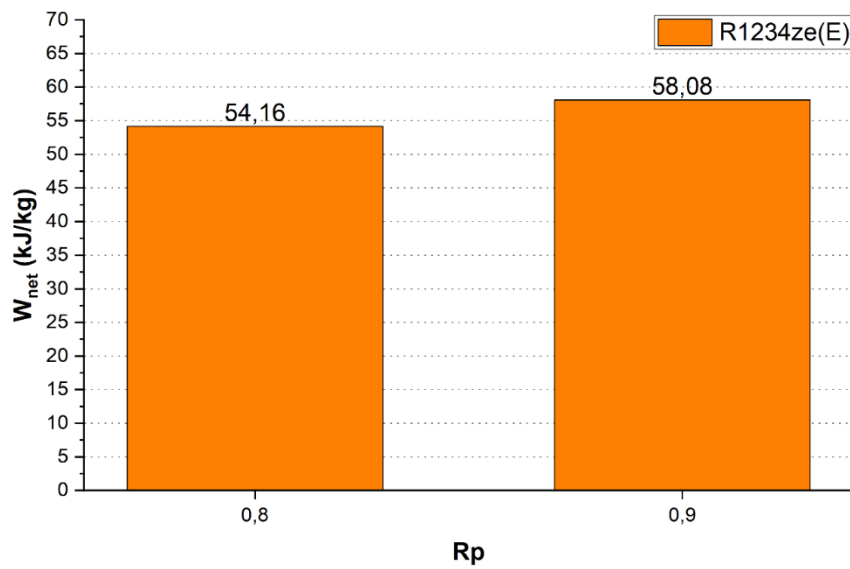


Şekil 4.18. Sıcaklık değişimine bağlı akışkanların Ekserji Verimi performansları ($R_p=0,8$)

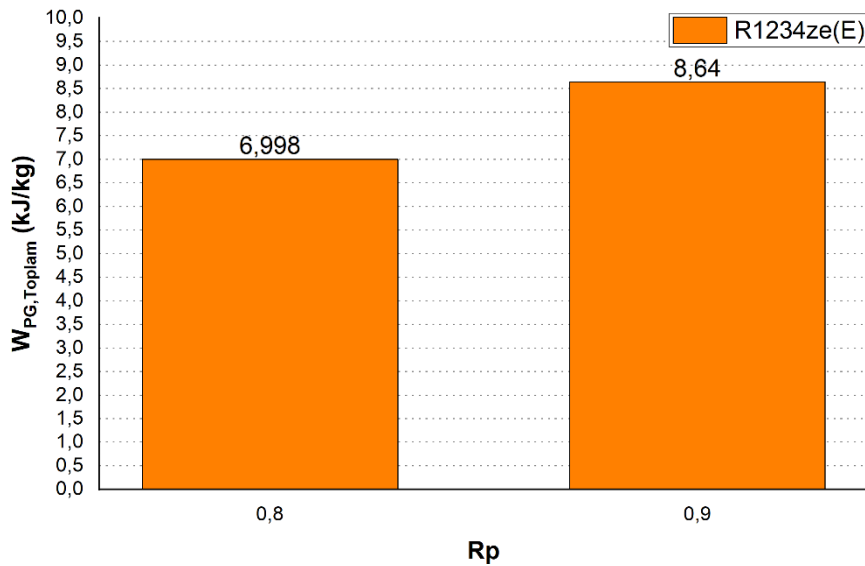
4.3 R1234ze(E) Akışkanı İçin R_p Performans Sonuçları

Bu kısımda önceki bölümlerde performans değerleri farklı parametreler altında incelenen akışkanların en iyi performans gösteren akışkanı seçilmiş olup farklı R_p 'ler altında belirlenen performans kriterleri için göstermiş olduğu sonuçlar incelenmiştir.

Şekil 4.19 incelendiğinde seçilmiş olan R1234ze(E) akışkanı için W_{net} değeri $R_p=0,8$ için 54,16 kJ/kg olarak görülürken $R_p=0,9$ için bu değer 58,08 kJ/kg olarak görülmüştür. Fakat Şekil 4.20'de görüldüğü üzere pompa $R_p=0,9$ için pompa gücü daha yüksek olmuştur.



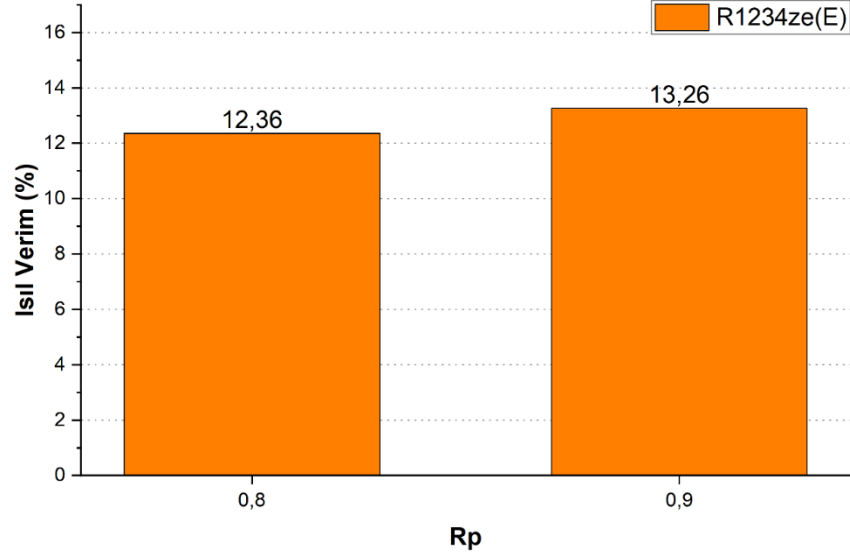
Şekil 4.19. R1234ze(e) akışkanı $R_p=0,8$ ve $R_p=0,9$ için W_{net} performans sonuçları



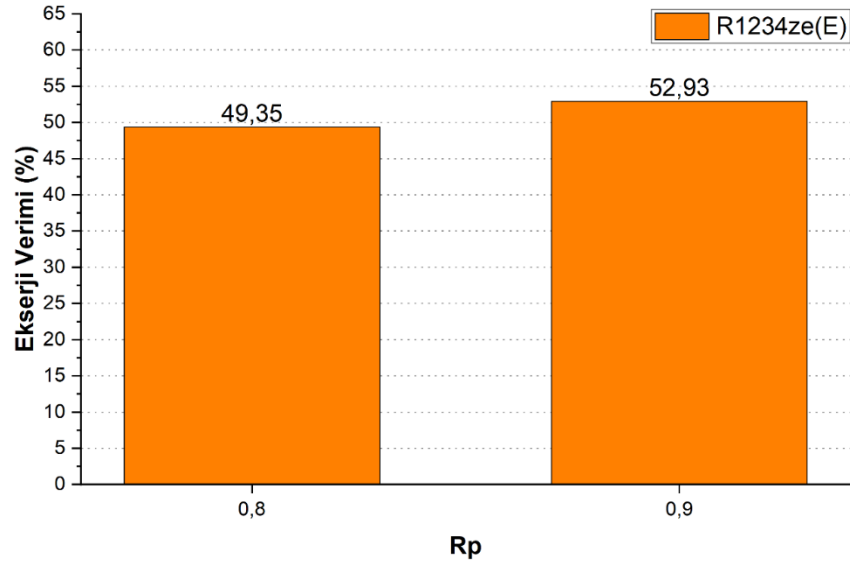
Şekil 4.20. R1234ze(e) akışkanı $R_p=0,8$ ve $R_p=0,9$ için $W_{PG,Toplam}$ performans sonuçları

Şekil 4.21 incelendiğinde $R_p=0,8$ için ısı verim değerinin %12,36 olduğu ve $R_p=0,9$ bu değer %13,26'ya çıktığı görülmüştür. Aynı durumda Şekil 4.22 görüldüğü üzere ekserji veriminin $R_p=0,8$ ve $R_p=0,9$ içi sırasıyla %49,35 ve %52,92 olarak hesaplandığı görülmüştür.

Bu sonuçlar doğrultusunda basınç faktörünün verimler üzerindeki etkisi açıkça görülmektedir.



Şekil 4.21. R1234ze(e) akışkanı $R_p=0,8$ ve $R_p=0,9$ için Isıl Verim performans sonuçları



Şekil 4.22. R1234ze(e) akışkanı $R_p=0,8$ ve $R_p=0,9$ için Ekserji Verimi performans sonuçları

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

5.1 Sonuçlar

Çalışma sonucunda saf-saf, saf-yeni nesil karışımlarından oluşan zeotropik akışkanların performansı tespit edilmiş, Klasik Organik Rankine Çevrimi'nin yanı sıra Rejeneratif Reküperatörlü ORC sisteminin etkisi belirlenmiştir. Çalışmada aynı şartlar altında Rejeneratif Reküperatörlü ORC'ni Klasik Organik Rankine Çevriminden daha yüksek performans gösterdiği açıkça görülmüştür. Bu kıyaslamada net iş verileri üzerinden yapılmıştır.

Çalışmanın devamında akışkanların kritik basınç katsayısının sistem üzerindeki etkisini görebilmek için belirlenen 10 farklı akışkan ve performans göstergeleri ile $R_p=0,8$ ve $R_p=0,9$ olduğu durumlar için sistem performansları incelenmiştir. Daha sonra bu sistemler içerisinde en iyi performans gösteren akışkan belirlenmiş olup bu akışkanın ekserji yıkımları ve ikinci yasa verimleri incelenmiştir.

Sonuç olarak yeni-nesil ve zeotropik akışkanların farklı konfigürasyonlu sistemler üzerinde farklı kritik basınç katsayısı değerlerinde göstermiş oldukları sonuçlar incelenmiş ve en yüksek performans kriterlerini gösteren sistem ve akışkan önerilmiştir.

5.2 Öneriler

Bu çalışmada belirlenen konfigürasyon ve parametreler doğrultusunda 100-120 C° ısı kaynağı sıcaklığında Rejeneratif Reküperatörlü ORC'nin Klasik Rankine Çevrimine göre daha yüksek net iş çıktısı verdiği için alternatif konfigürasyon olarak değerlendirilebilir. Belirlenen tüm akışkanlar için daha yüksek performans değerleri veren Rejeneratif Reküperatörlü ORC, açık besleme suyu ve reküperatörün sistem performansı üzerindeki etkisini net olarak göstermiştir.

Yeni nesil ve zeotropik akışkanların klasik akışkanlara bir alternatif olarak değerlendirilebileceği bu çalışmayla birlikte görülmüş olup belirlenen akışkanlarda R1234ze(E)'nin diğer akışkanlardan ayrılarak ısı verim, ekserji verimi, net iş ve pompa gücü gibi çıktılar üzerinden değerlendirildiğinde en yüksek performansı göstererek belirlenen konfigürasyon için önerilmiştir.

Yapılan çalışmayla birlikte akışkanların kritik basınç katsayısı değerlerinin değişimiyle sistem performansı üzerindeki etkileri açıkça görülmüş olup önerilen akışkan olan R1234ze(E) için en yüksek performans değerlerinin görüldüğü $R_p=0,9$ katsayısı akışkan için ideal kritik basınç katsayısı olarak önerilmiştir.

6. KAYNAKLAR

- A.N.M Nihaj Uddin Shan, Md. Zayed Mostafa, Arman Hossain, Mohmmad. Shadman Sakib, M. Monjurul Ehsan, “Thermal assessment and optimization of process fluids in transcritical organic and transcritical CO₂ Rankine cycle for waste energy recuperating system”, *Energy Conversion and Management: X*, Volume 15, 2022, <https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2022.100258>.
- Altun, E., 2022, Dynamic modeling of organic rankine cycle and its experimental verification, Yüksek lisans tezi, *Boğaziçi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul
- Arvin Sohrabi, Ali Behbahaninia, Saeed Sayadi, “Thermodynamic optimization and comparative economic analysis of four organic Rankine cycle configurations with a zeotropic mixture”, *Energy Conversion and Management*, Volume 250, 2021, <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2021.114872>.
- Ata, S., 2020, Düşük kapasiteli değişik ısı kaynaklı, akışkanlı ve konfigürasyonlu organik rankine çevrimlerinin tasarımı ve termodinamik optimizasyonu, Doktora tezi, *Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Konya
- George Kosmadakis, Panagiotis Neofytou, “Reversible high-temperature heat pump/ORC for waste heat recovery in various ships: A techno-economic assessment”, *Energy*, Volume 256, 2022, 124634, <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.124634>.
- Iman Fakhari, Amirmohammad Behzadi, Ehsan Gholamian, Pouria Ahmadi, Ahmad Arabkoohsar, “Comparative double and integer optimization of low-grade heat recovery from PEM fuel cells employing an organic Rankine cycle with zeotropic mixtures”, *Energy Conversion and Management*, Volume 228, 2021, <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.113695>.
- J. Nondy, T.K. Gogoi, “Exergoeconomic investigation and multi-objective optimization of different ORC configurations for waste heat recovery: A comparative study”, *Energy Conversion and Management*, Volume 245, 2021, 114593, ISSN 0196-8904, <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2021.114593>.
- Jian Song, Yaxiong Wang, Kai Wang, Jiangfeng Wang, Christos N. Markides, “Combined supercritical CO₂ (SCO₂) cycle and organic Rankine cycle (ORC) system for hybrid solar and geothermal power generation: Thermoeconomic assessment of various configurations”, *Renewable Energy*, Volume 174, 2021, Pages 1020-1035, <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.04.124>.
- Joël M. Zinsalo, Louis Lamarche, Jasmin Raymond, “Performance analysis and working fluid selection of an Organic Rankine Cycle Power Plant coupled to an Enhanced Geothermal System”, *Energy*, Volume 245, 2022, <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.123259>.

- Kaplan, A., 2022, Thermodynamic and exergoeconomic analysis of two-stage organic rankine cycle using different refrigerants, Yüksek lisans tezi, *Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Adana
- Karadaş, M., 2022, Designing of an organic rankine cycle power plant by using low enthalpy geothermal resources, Doktora tezi, *Aydın Adnan Menderes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Aydın
- Kareem, A. F., 2023, Thermodynamic and exergo-economic analysis of a combined power plant on gas turbine cycle and organic rankine cycle, Yüksek lisans tezi, *Karabük Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü*, Karabük
- Konstantinos Braimakis, Victoras Grispos, Sotirios Karellas, “Exergetic efficiency potential of double-stage ORCs with zeotropic mixtures of natural hydrocarbons and CO₂”, *Energy*, Volume 218, 2021, <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.119577>.
- Konstantinos Braimakis, Sotirios Karellas, “Exergy efficiency potential of dual-phase expansion trilateral and partial evaporation ORC with zeotropic mixtures”, *Energy*, Volume 262, Part B, 2023, <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.125475>.
- Laouid, Youcef Abdellah Ayoub, Cheikh Kezrane, Yahia Lasbet, and Apostolos Pesyridis. 2021. “Towards Improvement of Waste Heat Recovery Systems: A Multi-Objective Optimization of Different Organic Rankine Cycle Configurations.” *International Journal of Thermofluids* 11:100100. doi: 10.1016/j.ijft.2021.100100.
- M. Fallah, Z. Mohammadi, S.M. Seyed Mahmoudi, “Advanced exergy analysis of the combined S–CO₂/ORC system”, *Energy*, Volume 241, 2022, 122870, <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.122870>.
- Mina Shahrooz, Per Lundqvist, Petter Nekså, “Performance of binary zeotropic mixtures in organic Rankine cycles (ORCs)”, *Energy Conversion and Management*, Volume 266, 2022, <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2022.115783>.
- Nazari, Navid, Seyedmostafa Mousavi, and Seyedali Mirjalili. 2021. “Exergo-Economic Analysis and Multi-Objective Multi-Verse Optimization of a Solar/Biomass-Based Trigeneration System Using Externally-Fired Gas Turbine, Organic Rankine Cycle and Absorption Refrigeration Cycle.” *Applied Thermal Engineering* 191(February):116889. doi: 10.1016/j.applthermaleng.2021.116889.
- Palagi, Laura, Apostolos Pesyridis, Enrico Sciubba, and Lorenzo Tocci. 2019. “Machine Learning for the Prediction of the Dynamic Behavior of a Small Scale ORC System.” *Energy* 166:72–82. doi: 10.1016/j.energy.2018.10.059.

- Pan, Mingzhang, Fulu Lu, Yan Zhu, Guicong Huang, Jiwen Yin, Fuchuan Huang, Guisheng Chen, and Zhaohui Chen. 2020. "Thermodynamic, Exergoeconomic and Multi-Objective Optimization Analysis of New ORC and Heat Pump System for Waste Heat Recovery in Waste-to-Energy Combined Heat and Power Plant." *Energy Conversion and Management* 222(February):113200. doi: 10.1016/j.enconman.2020.113200.
- Pang, Kuo Cheng, Tzu Chen Hung, Ya Ling He, Yong Qiang Feng, Chih Hung Lin, and Kin Wah Wong. 2020. "Developing ORC Engineering Simulator (ORCES) to Investigate the Working Fluid Mass Flow Rate Control Strategy and Simulate Long-Time Operation." *Energy Conversion and Management* 203(October 2019):112206. doi: 10.1016/j.enconman.2019.112206.
- Pei Lu, Xianglong Luo, Jin Wang, Jianyong Chen, Yingzong Liang, Zhi Yang, Chao Wang, Ying Chen, "Thermo-economic design, optimization, and evaluation of a novel zeotropic ORC with mixture composition adjustment during operation", *Energy Conversion and Management*, Volume 230, 2021, <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.113771>.
- Rania Zhar, Amine Allouhi, Abdelmajid Jamil, Khadija Lahrech, "A comparative study and sensitivity analysis of different ORC configurations for waste heat recovery", *Case Studies in Thermal Engineering*, Volume 28, 2021, 101608, <https://doi.org/10.1016/j.csite.2021.101608>.
- Serafim Georgousopoulos, Konstantinos Braimakis, Dimitrios Grimekis, Sotirios Karellas, "Thermodynamic and techno-economic assessment of pure and zeotropic fluid ORCs for waste heat recovery in a biomass IGCC plant", *Applied Thermal Engineering*, Volume 183, Part 2, 2021 <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2020.116202>.
- Tao Zhang, Junhua Ma, Yanglin Zhou, Yongzhen Wang, Qifang Chen, Xiaoping Li, Liuchen Liu, "Thermo-economic analysis and optimization of ICE-ORC systems based on a splitter regulation", *Energy*, Volume 226, 2021, 120271, <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.120271>.
- Vinayak B. Hemadri, P.M.V. Subbarao, "Thermal integration of reheated organic Rankine cycle (RH-ORC) with gas turbine exhaust for maximum power recovery", *Thermal Science and Engineering Progress*, Volume 23, 2021, 100876, <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2021.100876>.
- Wameedh Khider Abbas Abbas, Elmar Baumhögger, Jadran Vrabec, "Experimental investigation of organic Rankine cycle performance using alkanes or hexamethyldisiloxane as a working fluid", *Energy Conversion and Management: X*, Volume 15, 2022, <https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2022.100244>.

- Wang, Wei, Shuai Deng, Dongpeng Zhao, Li Zhao, Shan Lin, and Mengchao Chen. 2020. "Application of Machine Learning into Organic Rankine Cycle for Prediction and Optimization of Thermal and Exergy Efficiency." *Energy Conversion and Management* 210(March):112700. doi: 10.1016/j.enconman.2020.112700.
- Yağlı, H., 2018, Basit ve rejeneratif organik rankine çevrimi (ORC) tasarımları kullanılarak biyogaz yakıtlı ısı-güç kombine (CHP) motorunun atık ısısının geri dönüştürülebilirliği, enerji ve ekserji analizi, Doktora tezi, *İskenderun Teknik Üniversitesi Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü*, Hatay
- Yi-Fan Zhang, Ming-Jia Li, Xiao Ren, Xin-Yue Duan, Chia-Jung Wu, Huan Xi, Yong-Qiang Feng, Liang Gong, Tzu-Chen Hung, "Effect of heat source supplies on system behaviors of ORCs with different capacities: An experimental comparison between the 3 kW and 10 kW unit", *Energy*, Volume 254, Part B, 2022, 124267, <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.124267>.
- Zekeriya Özcan, Özgür Ekici, "A novel working fluid selection and waste heat recovery by an exergoeconomic approach for a geothermally sourced ORC system", *Geothermics*, Volume 95, 2021, <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2021.102151>.
- Zhen Tian, Wanlong Gan, Zhixin Qi, Molin Tian, Wenzhong Gao, "Experimental study of organic Rankine cycle with three-fluid recuperator for cryogenic cold energy recovery", *Energy*, Volume 242, 2022, <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.122550>.
- Zhen Tian, Weijie Zeng, Bo Gu, Yuan Zhang, Xin Yuan, "Energy, exergy, and economic (3E) analysis of an organic Rankine cycle using zeotropic mixtures based on marine engine waste heat and LNG cold energy", *Energy Conversion and Management*, Volume 228, 2021, <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.113657>.