



T.C.
NECMETTİN ERBAKAN
ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



ORGANİK RANKİNE ÇEVİRİMİ İÇİN
KULLANICI ARAYÜZÜNE SAHİP EĞİTİCİ
BİR PROGRAMIN AÇIK KAYNAK KODLU
OLARAK GELİŞTİRİLMESİ

Mehmet Berk AZDURAL

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Şubat-2024
KONYA
Her Hakkı Saklıdır

TEZ BİLDİRİMİ

Bu tezdeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini ve tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

DECLARATION PAGE

I hereby declare that all information in this document has been obtained and presented in accordance with academic rules and ethical conduct. I also declare that, as required by these rules and conduct, I have fully cited and referenced all material and results that are not original to this work.

Mehmet Berk AZDURAL

Tarih: 14.02.2024

ÖZET**YÜKSEK LİSANS TEZİ****ORGANİK RANKİNE ÇEVİRİMİ İÇİN KULLANICI ARAYÜZÜNE SAHİP
EĞİTİCİ BİR PROGRAMIN AÇIK KAYNAK KODLU OLARAK
GELİŞTİRİLMESİ****Mehmet Berk AZDURAL****Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine mühendisliği Anabilim Dalı****Danışman: Prof. Dr. Ali KAHRAMAN****2024, 68 Sayfa****Jüri****Prof. Dr. Ali KAHRAMAN****Doç. Dr. Aziz Hakan ALTUN****Dr. Öğr. Üyesi Mehmet Numan KAYA**

Bu çalışmada kullanıcı grafik arayüzüne sahip, açık kaynak kodlu, herhangi bir platforma bağlı olmayan ve ücretsiz indirilip dağıtılabilen, eğitimsel bir basit Organik Rankine Çevrimi (ORC) hesaplayıcısı Python dili kullanılarak geliştirilmiştir. Çalışmanın diğer bir bölümünde ise açık kaynak kodlu bir kütüphane olan Pymoo optimizasyon kütüphanesi kullanılarak basit ORC sistemi için çok amaçlı proses optimizasyonu çalışması gerçekleştirilmiştir. Çalışma beş ana bölümden oluşmaktadır.

İlk bölümde, Rankine çevrimi ve ORC kavramları incelenmiştir. İkinci bölümde, literatür çalışmalarında kullanılan ticari ve açık kaynaklı programlardan bahsedilmiştir. Üçüncü bölümde, kullanılan programlama yöntemleri ve hazır kütüphaneler tanıtılmış ve bunların kullanımına dair örnekler verilmiştir. Dördüncü bölümde ise geliştirilen program kullanılarak bir parametrik çalışma gerçekleştirilmiştir. R245fa, R123 ve R141b akışkanlarının özellikleri 100 °C, 130 °C ve 160 °C ısı kaynak sıcaklıkları için incelenmiştir. Son bölümde ise pinch noktası sıcaklık farkı, aşırı kızdırma sıcaklığı değişkenleri ve bazı kısıtlar uygulanmış ve NSGA-II algoritması kullanılarak prosesler optimize edilmiştir. Her bir sıcaklık ve akışkan türü için η_{II} -LCOE ve W_{net} -LCOE amaç fonksiyonu çiftleri incelenip LCOE minimize, η_{II} ve W_{net} ise maksimize edilmeye çalışılmıştır. Her bir sıcaklık ve akışkan türü kombinasyonu için 3'er, tüm durumlar için ise toplam 18 pareto eğrisi oluşturulmuştur.

Bulgulara göre R245fa'nın maksimum güç elde edilmesi noktasında en avantajlı akışkan olduğu görülmüştür. R245fa akışkanı kullanımı ile 160 °C'de 9245,70W, 130 °C'de 5036,80 W, 100 °C'de ise 2283,02 W maksimum güç elde edilmektedir. Geri ödeme ve elde edilen güç unsurlarının dengesinin gözetildiği durumda ise R123 akışkanın ön plana çıktığı görülmüştür. En erken geri ödeme süreleri R123 akışkanı ile 160 °C'de 2,44 yıl, 130 °C'de 3,74 yıl, 100 °C'de ise 8,39 yıl olarak bulunmuştur. En düşük evaporatör basıncı ise R141b akışkanının kullanıldığı durumlarda 160 °C'de 672 kPa, 130 °C'de 456kPa, 100 °C'de ise 304 kPa olarak elde edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Açık kaynak kod, Çok amaçlı, Kullanıcı grafik arayüzü (GUI), NSGA-II, Optimizasyon, Organik Rankine Çevrimi (ORC)

ABSTRACT**MS THESIS****DEVELOPMENT OF AN EDUCATIONAL PROGRAM WITH A USER
INTERFACE FOR ORGANIC RANKINE CYCLE IN OPEN SOURCE CODE****Mehmet Berk AZDURAL****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****2024, 68 Pages****Jury****Prof. Dr. Ali KAHRAMAN
Assoc. Prof. Dr. Aziz Hakan ALTUN
Asst. Prof. Dr. Mehmet Numan KAYA**

In this study, a simple educational Organic Rankine Cycle (ORC) calculator, which has a user graphical interface, is open source, does not depend on any platform and can be downloaded and distributed free of charge, was developed using the Python language. In another part of the study, a multi-purpose process optimization study was carried out for the simple ORC system using the Pymoo optimization library, which is an open source library. The study consists of five main sections.

In the first part, the concepts of the rankine cycle and ORC are examined. In the second chapter, commercial and open-source programs used in literature studies are mentioned. In the third chapter, the programming methods and ready-made libraries used are introduced, and examples of their use are given. In the fourth chapter, a parametric study was carried out using the developed program. The properties of R245fa, R123, and R141b fluids were examined for thermal source temperatures of 100 °C, 130 °C, and 160 °C. In the last part, pinch point temperature differences, superheat temperature variables, and some constraints were applied, and the processes were optimized using the NSGA-II algorithm. For each temperature and fluid type, η_{II} -LCOE and W_{net} -LCOE objective function pairs were examined, and LCOE was tried to be minimized, while η_{II} and W_{net} were tried to be maximized. Three Pareto curves were created for each temperature and fluid type combination, and a total of 18 Pareto curves were created for all cases.

According to the findings, R245fa was found to be the most advantageous fluid in terms of obtaining maximum power. By using R245fa fluid, maximum power of 9245.70 W at 160 °C, 5036.80 W at 130 °C, and 2283.02 W at 100 °C is achieved. It has been observed that R123 fluid comes to the fore when the balance of payback and power obtained are taken into consideration. The earliest payback periods were found to be 2.44 years at 160 °C, 3.74 years at 130 °C, and 8.39 years at 100 °C with R123 fluid. The lowest evaporator pressure was obtained at 672 kPa at 160 °C, 456 kPa at 130 °C, and 304 kPa at 100 °C when R141b fluid was used.

Keywords: Multi-purpose, NSGA-II, Open source code, Optimization, Organic Rankine Cycle (ORC), User graphical interface (GUI)

ÖNSÖZ

Tez çalışması sürecindeki yönlendirmeleri, destekleri ve değerli önerileri için Prof. Dr. Ali KAHRAMAN ve Dr. Öğr. Üyesi Sadık ATA hocalarıma teşekkürlerimi bir borç bilirim.

Bana olan inancını daima koruyan, moral ve sevgi dolu desteklerini eksik etmeyen ve bugüne ulaşmamda karşılığı ödenmeyecek kadar büyük emeği olan aileme sonsuz şükranlarımı sunarım.

Mehmet Berk AZDURAL
KONYA-2024



İÇİNDEKİLER

ÖZET	1
ABSTRACT.....	2
ÖNSÖZ	3
İÇİNDEKİLER	4
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	5
1. GİRİŞ.....	6
1.1. Klasik rankine çevrimi.....	7
1.2. Organik Rankine Çevrimi ve akışkan seçiminin önemi	8
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI	10
3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	21
3.1. Programlama	21
3.1.1. Fortran programlama dili	22
3.1.2. Python programlama dili	22
3.1.3. CoolProp termodinamik kütüphanesi	23
3.1.4. WxWidgets kütüphanesi	24
3.1.5. Pymoo kütüphanesi.....	25
3.2. ORC matematik modeli	28
3.2.1. Enerji analizi	28
3.2.2. Ekserji analizi	33
3.2.3. Ekonomi analizi	36
3.3. Geliştirilen programın kullanımı	38
3.4. Modelin doğrulanması	41
4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA	43
4.1. Parametrik çalışma.....	43
4.1.1. R141b akışkanı için parametrik sonuçlar.....	44
4.1.2. R123 akışkanı için parametrik sonuçlar.....	46
4.1.3. R245fa akışkanı için parametrik sonuçlar	47
4.2. NSGA-II optimizasyon çalışması	48
4.2.1. 100 °C ısı kaynağı altında çalışma sonuçları	50
4.2.2. 130 °C ısı kaynağı altında çalışma sonuçları	55
4.2.3. 160 °C ısı kaynağı altında çalışma sonuçları	59
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	63
5.1. Sonuçlar	63
5.2. Öneriler	63
6. KAYNAKLAR	64

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

h: Entalpi (kJ/kg)

I: Tersinmezlik

J: Joule

kg: Kilogram

kPa: Kilopaskal

kW: Kilowatt

\dot{m}_{kaynak} : Sıcak akışkan kütleli debisi (kg/s)

\dot{m}_{orc} : Organik akışkanın kütleli debisi (kg/s)

\dot{m}_{kond} : Soğutma suyu kütleli debisi (kg/s)

η : Isıl Verim

η_{II} : Ekserji Verimi

η_p : Pompa izantropik verimi

η_t : Türbin izantropik verimi

$^{\circ}\text{C}$: Santigrat derece

P: Basınç (kPa)

T_{sup} : Aşırı kızdırma sıcaklığı

s: Entropi (kJ/kg $^{\circ}\text{C}$)

T: Sıcaklık ($^{\circ}\text{C}$)

$T_{c,i}$: Soğutma suyu giriş sıcaklığı ($^{\circ}\text{C}$)

$T_{c,o}$: Soğutma suyu çıkış sıcaklığı ($^{\circ}\text{C}$)

$T_{h,i}$: Isı kaynağı giriş sıcaklığı ($^{\circ}\text{C}$)

$T_{h,o}$: Isı kaynağı çıkış sıcaklığı ($^{\circ}\text{C}$)

$T_{p,e}$: Evaporatör pinch noktası sıcaklığı (oC)

$T_{p,k}$: Kondenser pinch noktası sıcaklığı (oC)

W: Güç (Watt)

x: Kuruluk derecesi

ΔT_{PP} : Pinch noktası sıcaklık farkı (oC)

$\Delta T_{PP, \text{evap}}$: Evaporatör pinch noktası sıcaklık farkı (oC)

$\Delta T_{PP, \text{kond}}$: Kondenser pinch noktası sıcaklık farkı (oC)

ε : Etkenlik değeri

Kısaltmalar

ORC -- Organic Rankine Cycle (Organik Rankine Çevrimi)

DORC – Dual loop ORC (Çift döngülü ORC)

GUI – Graphical User Interface (Grafik kullanıcı arayüzü)

EES – Engineering Equation Solver (Mühendislik denklem çözücü)

ODP – Ozone depletion potential (Ozon tüketme potansiyeli)

GWP: Küresel Isınma Potansiyeli (Global Warming Potential)

PEM – Proton Exchange Membrane (Proton değişim membranı)

NSGA-II – Non-dominated Sorting Genetic Algorithm

1. GİRİŞ

Organik Rankine Çevrimi (ORC), atık ısı geri kazanımı ve jeotermal enerji uygulamalarda yaygın kullanılan bir güç çevrimidir. Özellikle jeotermal enerji gibi düşük ısı kaynaklarına sahip olunan uygulamalarda elektrik üretimini mümkün kılmaktadır. Bilindik Rankine çevrimi akışkan olarak su kullanırken, ORC’de ısı kaynağının sıcaklığına göre farklı kimyasal gruplardan çevreci akışkanlar kullanılır. Literatürde, çeşitli konfigürasyonlarda ve koşullarda çalışmalar bulunmakla birlikte, genellikle hesaplamalar kolay, hızlı ve görsel öğelerle desteklenmiş mühendislik yazılımları ile gerçekleştirilmektedir. Mühendislik yazılımlarının geliştirilmesi zaman ve maddi kaynak gerektirmektedir. Bu sebeple yazılım firmaları tarafından geliştirilen bu tür araçlar ticari olarak kullanıma sunulmaktadır. Çalışmada basit kullanımı kolay bir kullanıcı grafik arayüzüne (GUI) sahip basit ORC hesaplayıcı program geliştirilmiştir.

Literatürdeki program geliştirme çalışmaları detaylı bir şekilde incelenmiştir. Kullanıcı grafik arayüzüne sahip bir ORC yazılımı geliştirilmesi alanında çalışmalar bulunmakla birlikte birçoğu ticari yazılım geliştirme ortamlarında geliştirilmiş veya ücretsiz olarak kullanıcıya sunulmamıştır. Ücretsiz olarak sunulan belirli çalışmaların ise geliştirilme süreci aktif olarak devam etmemektedir. Çalışma çıktısı program grafik kullanıcı arayüzü ile açık kaynak kodlu olarak sunulup herhangi bir kısıtlama olmaksızın ücretsiz ve eğitim amaçlı kullanılabilir. Ulusal olarak özgün, uluslararası olarak ise kısmi özgünlüğe sahip olan çalışma açık kaynak kodlu yazılım geliştirme topluluğuna katkıda bulunmayı amaçlamaktadır.

Bu tez çalışması ile:

- Çalışmanın kaynak araştırması bölümünde, bilimsel çalışmalarda yaygın olarak kullanılan paket programlar ve ücretsiz programlar incelenmiştir.
- Geliştirilen programda kullanılan programlama dilleri, kütüphaneler materyal ve metod kısmında incelenmiştir.
- ORC için kullanılan matematik model irdelenmiş, çevrim hesaplamalarına ait net güç, verim ve ekserji verimi gibi temel parametreler detaylı olarak açıklanmıştır.
- Termoekonomik analiz kısmında ise yatırım maliyeti, geri ödeme süresi ve seviyelendirilmiş enerji maliyeti gibi önemli parametrelerden bahsedilmiştir.

- Çevrim akışkanı olan suyun ucuz ve kolay erişilebilir olması (Quoilin et al., 2013).
- Sentetik olmayan maddeler arasında en yüksek buharlaşma gizli ısı ve özgül ısıya sahip olması.
- Pompa gücünün düşük viskoziteden dolayı az olması.
- Yüksek sıcaklık ve basınçta kimyasal kararlılığını yitirmemesi.
- Doğal olup sızıntısı durumunda çevreye herhangi bir zararı bulunmaması (Quoilin et al., 2013).
- Patlayıcı, zehirleyici, karsinogenik ya da teratogenik bir madde olmaması.

Dezavantajları ise şöyledir:

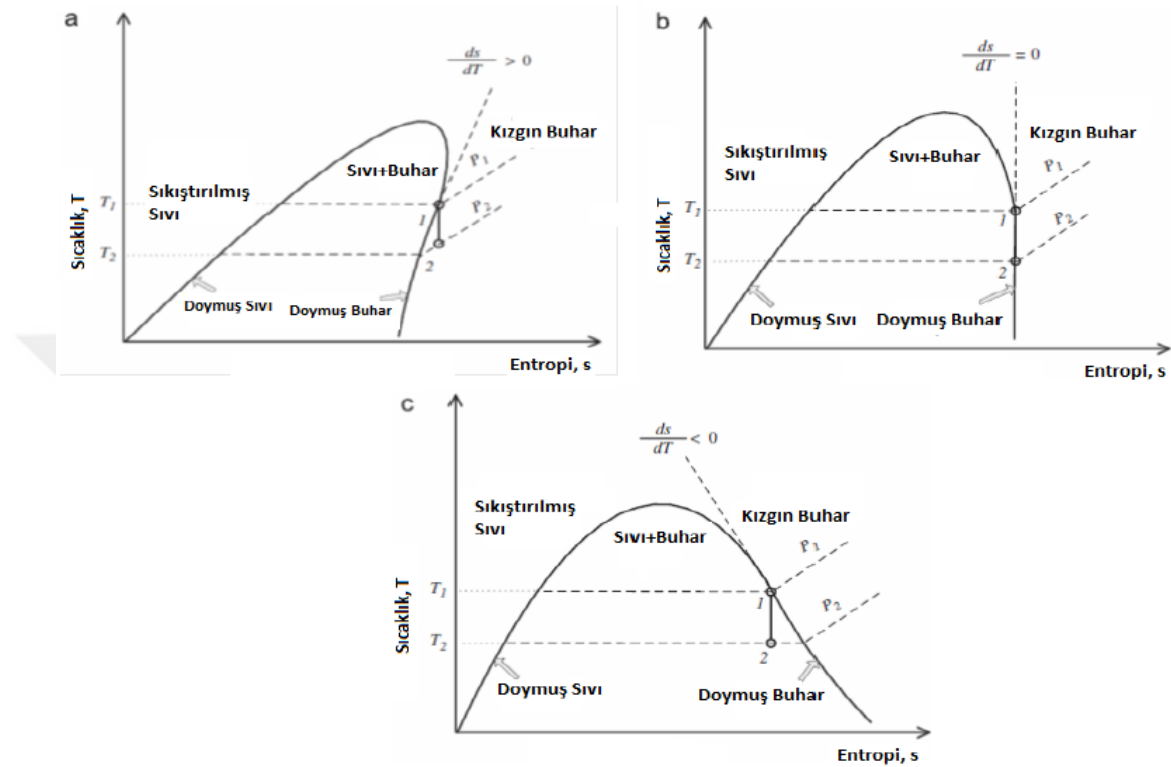
- Türbinde akışkanın yoğuşması ihtimaline karşı kızdırmaya ihtiyaç duyulması.
- Islak buhar bölgesinde genleşme sırasında genleşme elemanlarında damlacık erozyonu tehlikesinin bulunması (Lecompte vd., 2015).
- Düşük türbin izantropik verimi.
- Düşük sıcaklık uygulamalarında veriminin az olması (Yağlı, 2018).

1.2. Organik Rankine Çevrimi ve akışkan seçiminin önemi

Klasik Rankine çevriminin belirli dezavantajları farklı akışkan kullanımı ile ortadan kaldırılabilir. Su yerine hidrokarbonlar veya soğutma gazları gibi organik akışkanların kullanılmasıyla Organik Rankine Çevrimi kavramı ortaya çıkmıştır. Organik akışkan seçiminde en önemli kriterlerinden birisi ısı kaynak sıcaklığına uygun buharlaşma sıcaklığına sahip akışkanlar seçmektir. Buharlaşma sıcaklığı düşük akışkanlar seçilerek, düşük sıcaklığa sahip ısı kaynaklardan faydalı iş elde etmek mümkün hale gelir.

ORC'de kullanılan akışkanlar doymuş buhar eğrilerinin eğimlerine göre sınıflandırılırlar. Şekil 1.2'de gösterildiği üzere kuru, izantropik ve ıslak olmak üzere üç kategoriye ayrılırlar. Eğim pozitif ise akışkan kuru, negatif ise ıslak, eğimi sıfır olanlar ise izantropik akışkan olarak sınıflandırılır. İzantropik ve ıslak akışkanların kullanıldığı durumlarda türbinde genleşen akışkan sıvı-buhar fazına geçeceğinden dolayı türbine zarar verme durumu söz konusu olabilir. Türbin çıkışındaki sıvı-buhar karışımının %85 kuruluk derecesinin üstünde bulunmalıdır (Bao & Zhao, 2013). Altında kalması durumunda kızdırma işlemi gerçekleştirilmelidir. Kuru akışkanların kullanılması durumunda ise genleşme sonrasında halen daha kızgın buhar fazında olacağından böyle

bir risk oluşmamaktadır. İzanotropik akışkanlarda ise genleşme doyma eğrisi üzerinde gerçekleştiğinden rejeneratör kullanımına gerek kalmamakta böylelikle daha düşük maliyetli bir sistem kurulabilmektedir (Hung vd., 1997).



Şekil 1.2 T-s diyagramı eğimine göre akışkan türleri a) Kuru b) İzanotropik c) Islak (Bao & Zhao, 2013)

Akışkan seçimi kriterleri literatürde geniş ölçüde araştırılmıştır. Öne çıkan bazı özelliklere aşağıda değinilmiştir:

- Uygun kaynama noktası sıcaklığına sahip olmak (Hoang, 2018).
- Evaporatör basıncının çok yüksek olması mekanik stresi arttıracığından alçak buharlaşma basıncına sahip akışkan seçilmelidir (Tchance, 2012).
- Yüksek gizli buharlaşma entalpisine sahip olmalı. Yüksek buharlaşma entalpisine sahip akışkanlar faz değişimi sırasında mümkün olan en fazla enerjiyi üzerlerinde depolayabilirler. Böylelikle, çevrim veriminin artışı ve daha yüksek iş çıktısı sağlanır (Yılmaz, 2013).
- Düşük yoğunluklu ve düşük özgül ısıya sahip akışkanlar pompalama maliyetini azaltmaktadır. Lakin, düşük yoğunluklu akışkanların kullanımı, yüksek yoğunluklu akışkanlara göre türbin boyutunu arttırmaktadır (Hoang, 2018).

- Küresel ısınma potansiyeli ve ozon tüketme potansiyeli (Ozone Depletion Potential-ODP) düşük olan akışkanların seçimi diğer bir önemli kriterdir.
- Yanıcılığı ve toksikliği düşük akışkanlar seçilmelidir (Bao & Zhao, 2013).

Kesin bir sıcaklık sınırı olmamakla birlikte, literatürde 90 ila 150 °C arasındaki uygulamalar düşük sıcaklıklı ORC uygulamaları olarak sınıflandırılır. 90 °C altındaki uygulamalardan faydalı iş üretimi azaldığından, küçük ölçekli uygulamalar için pratikte ekonomik bulunmamaktadır. Diğer sıcaklık aralıkları ve güç üretimi kapasitesine göre yapılan sınıflandırmalar. Çizelge 1.1’de gösterilmektedir.

Çizelge 1.1 Sıcaklığa bağlı ORC uygulama aralıkları

Sınıflandırma	Isı kaynağı sıcaklığı(°C)	Sınıflandırma	Güç kapasitesi (kW)
Düşük	<150	Mikro	<3
Orta	150-250	Mini	3-50
Yüksek	<250	Küçük	50-500
		Orta	500-5000
		Büyük	>5000

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Son üç yılda ORC alanında gerçekleştirilen çalışmalar ve bu çalışmalarda kullanılan programlar incelenmiştir.

Basit ve rejeneratif ORC ’de 106 farklı akışkan için yapay sinir ağı modeli geliştirilmiştir. Geliştirdiği sinir ağı modelini literatürdeki akışkan kütüphaneleri ile karşılaştırmış ve diğer araştırmacıların kullanabilmesi için paylaşmıştır. Çalışmasında Matlab yazılımını kullanmıştır (Peng vd., 2021).

Yakıt hücresi, solar fresnel lens ve ORC ile çoklu enerji kaynağı modellemesi gerçekleştirilmiştir. ORC ile üretilen enerjinin hidrojen formunda depolanması ve ihtiyaç

anında tekrar kullanımı üzerinde çalışılmıştır. EES ve Matlab kullanılmıştır (Sun vd., 2021).

Yoğunlaştırılmış solar kolektör, faz değiştiren malzemeler, adsorpsiyon soğutma çevrimini ve ORC sistemini bir arada kullanarak elektrik ve ısı formunda enerji depolayan bir sistem üzerinde çalışmıştır. Parametrik çalışma sonucunda türbin izantropik veriminin %20 artması sonucunda ORC genel veriminde %25'lik bir iyileşmenin olduğu sonucuna ulaşmıştır. Homer, Trnsys, Matlab, Hysys yazılımlarını kullanılmıştır (Mousavi vd., 2022).

120 °C jeotermal sıcaklığa sahip bir ısı kaynak için farklı akışkanları basit ORC için incelemiştir. Termodinamik çıktılar, eksergoekonomi ve yaşam döngüsü analizlerinden elde çıktıları NSGA-II algoritması ile değerlendirmiştir. Elde edilen çıktılarda tüm faktörler gözetildiğinde en yüksek güç çıktısı 232.48 kW ile R134a akışkanı olduğuna, 44.97 \$/kW ile R600a akışkanın ise en ekonomik olduğu sonucuna varılmıştır. Çalışmada ticari program ve kütüphane olarak ise Matlab ve Refprop kullanılmıştır (S. Wang vd., 2022).

Jeotermal kaynaklı bir ORC sistemi ile su, hidrojen ve elektrik üretimini içeren kombine bir sistemi incelenmiştir. Çok amaçlı optimizasyon algoritmaları ile incelenen optimal noktada düşük ısı kaynağı debileri için daha yüksek ekserji verimliliği elde edildiği görülmüştür. En yüksek eksergoekonomik maliyetin ORC sisteminde olduğu, komponent bazında ise türbinin en pahalı kalemi oluşturduğu bulguları edinilmiştir. Çalışmada EES programı kullanılmıştır (Hekmatshoar vd., 2022).

Güneş, jeotermal ve doğalgaz kaynaklı bir kombine güç sisteminin elektrik, hidrojen ve su üretim üzerinde enerji, ekserji, eksergoekonomik ve eksergoçevresel (4E) analizler gerçekleştirilmiştir. Çalışma sonucunda sistemin %23,87 ısı, %28,21 ekserji verimine sahip olduğu ve günde 4,67 m³ su üretimi ve saatte 1,85 kg hidrojen üretimi gerçekleştirebildiği açıklanmıştır. En uygun organik akışkanın ise R141b olduğu sonucuna varılmıştır. Çalışmada Matlab ve Thermoflex paket programları kullanılmıştır (Khoshgoftar Manesh vd., 2022).

Yüksek sıcaklıklı solar uygulamasında Toluene, Nonane, Decane ve Dodecane akışkanlarının performansını basit, rejeneratif ve reküparatif olmak üzere üç ayrı konfigürasyonda denemiştir. En yüksek güç üretimini 1364 kW'lık rejeneratif sistemden %37,01 verim ile Toluene akışkanından elde etmiştir. Çalışmanın

termodinamik modellenmesi kısmında EES, ekonomi kısmında ise Aspen paket programları kullanılmıştır (Javed ve Tiwari, 2023).

Heptane ve Isopentane akışkanlarına sahip çift döngülü ORC sisteminin çalışma koşulları yapay sinir ağları ve lineer programlama kullanarak optimize edilmiştir. Isıl kaynak sıcaklığı 250 °C'de iken maksimum 28,66 MW güç elde edilmiştir. Yapay sinir ağları ile gerçekleştirilen çalışmanın %99 ve üzeri doğruluğa sahip olduğu görülmüştür. Çalışmada Matlab ve Aspen Plus programları kullanılmıştır (Zheng et al., 2024).

LNG tekrar gazlaştırmada hava ayırıştırma üniteleriyle birlikte kombine bir ORC sistemi incelenmiştir. Parçacık sürü optimizasyonu (PSO) ve NSGA-II algoritmaları karşılaştırılmıştır. Çalışma sonucunda PSO algoritmasının NSGA-II'ye göre daha iyi olduğu LCOE- η_{II} karşılaştırmasında PSO kullanıldığında η_{II} 'nin %17,86'ya LCOE'nin %14,4 azaltıldığına dikkate çekilmiştir (Zhou vd., 2023).

Bir PEM yakıt hücresi sistemine bir ORC sistemi dahil edilmiştir. NSGA-III algoritması kullanılarak gerçekleştirilen optimizasyon çalışması sonucunda ORC sisteminin elektriksel verimi %3,94'ten %7,52'ye yükseltilmiştir. Sadece PEM yakıt hücresini kullanıldığı duruma göre net güç üretimi %20,1 artmıştır. Çalışmada Matlab ve Aspen plus kullanılmıştır (Lu vd., 2023).

56 ayrı ORC akışkanı EES programı üzerinde incelenmiştir. Sıcak, ılıman olmayan iklim, sıcaklık temel alındığında, dietil eter, izopentan, R123, neopentan ve R1233zd(E), basınç referans olarak alındığında ise benzen, sikloheksan, siklopentan, n-pentan ve metanol akışkanların uygun akışkanlar olarak ele alınabileceği çıkarımında bulunulmuştur (Njock vd., 2023).

Güneş enerjisi kaynaklı ev tipi bir ısıl depolama tankı ile ekuple çalışan bir ORC sistemi üzerinde çalışılmıştır. Trnsys ve Ees kullanılarak gerçekleştirilen çalışma sonucunda tank sıcaklığının 75,80 ve 85 °C olduğu durumlarda sırasıyla %4,10, %5,50 ve %5,53 ısıl verim değerlerine ulaşılmıştır (Rodriguez-Pastor vd., 2023).

Çift paralel evaporatörlü ve rejenerasyonlu (DTRORC) ORC sistemi için uygun çalışma akışkanı karışımı tayini için bir optimizasyon çalışması gerçekleştirmişlerdir. Çalışma kapsamında yapılan geliştirmeler sonucunda çift döngülü ORC(DORC) sistemine göre %1,75 daha yüksek ısıl verimliliğe, %3,5 daha yüksek ekserji verimliliğine ve 1kW daha yüksek güç çıktısına ulaşılmıştır. 0.8R245fa/0.2pentan kütlece karışım oranı DTRORC için en iyi ısıl performansı gösterdiği lakin ekonomik açıdan aynı

performansa sahip olamadığı görülmüştür. R245fa/pentan karışık kütlesinin iki amaçlı optimizasyonundan elde edilen sonuçlar, LINMAP karar yöntemiyle değerlendirilmesi sonucunda önerilen sistemin ekserji verimi %53,33 olarak bulunmuştur. Bir santralin ömrü boyunca gerektirdiği maliyetin, üreteceği elektiriğe oranı olarak tanımlanabilen seviyelendirilmiş enerji maliyeti (LCOE) ise aynı çalışmada 0,2930\$/kWh olarak elde edilmiştir (Y. qiang Feng vd., 2023).

Kömürle çalışan güç santralleri için karbon dioksit yakalama teknolojilerine dikkat çekmişlerdir. Özgün bir süperkritik CO₂ Brayton (SCBC) ve ORC çevrimleri kullanarak eş zamanlı enerji üretimi ile baca gazından CO₂ yakalamayı önermişlerdir. Gerçekleştirilen çalışma sonucunda sistemin toplam ekserji verimliliğinin %39,74 olduğunu, baca gazından CO₂ yakalamanın ekserji verimliliğine maliyetinin ise %3,14 olduğu sonucuna varmışlardır. Önerilen kombine çevrim ile CO₂ yakalamanın birim ton başına maliyetinin 21,81\$/tCO₂ olduğu, CO₂ üretiminden kaçınma maliyetinin ise 26,25\$/tCO₂ olduğu belirtilmiştir (Zhang vd., 2023).

49,228MW kapasiteli paralel çift kademeli bir düşük ısı kaynaklı ORC için optimum akışkan seçiminin ekonomik ve çevresel etkilerini incelemişlerdir. Optimum akışkanı seçimi kuantum kimyasal analizi ve termodinamik özellikler dikkate alınarak gerçekleştirilmiştir. Elde edilen bulgular sonucunda zayıf hidrojen bağı etkileşimlerine sahip olan R1234yf akışkanının bahsedilen sisteminin performansını arttırdığı görülmüştür. Toplam ekserji kaybının ise %37,92, türbin, evaporatör ve kondenserden gerçekleşen maksimum ekserji kaybının ise sırasıyla %19,17, %4,48 ve %4,72 olduğu belirtilmiştir (L. Wang vd., 2023).

Deneysel çalışmada ısı kaynağı olarak güneşi ısısını kullanan bir ORC sistemi ile hidrojen üretimi gerçekleştirildi. Çalışmanın teorik kısmında EES yazılımı kullanılırken, 0,016 kg/h gibi ekonomik olmayacak derecede az miktarda hidrojen üretimi gerçekleştirilmiştir (Karabuga vd., 2023).

İçten yanmalı araç motorlarına ORC sisteminin entegre edilerek egzoz gazlarından enerji eldesi araştırılmıştır. R245fa için maksimum %2,33 ısı verim ve yol koşullarına bağlı olarak ısı transfer yüzeyi başına 0,55 kW/m² 'lik güç elde edilmiştir. Gt-suite programı ile yapay sinir ağları ve NSGA-II algoritması kullanılmıştır (Xing vd., 2023).

3kW'lık bir ORC sistem için makine öğrenmesi metodolojisi uygulanarak bir otomatik kontrol sistemi geliştirilmiştir. Elde edilen pareto optimal sonuçlara göre 120

$^{\circ}\text{C}$ 'lık ısı kaynağı ile net güç çıktısı 2.87 kW ve ısı verim ise %8,855 olarak bulunmuştur (Y. Q. Feng vd., 2023).

135 $^{\circ}\text{C}$ 'lık jeotermal kaynak ile ters ozmos prosesine bağlı bir ORC sistemi incelenmiştir. Genetik algoritmalar ve yapay sinir ağları kullanılarak gerçekleştirilen karar süreci neticesinde en yüksek ekserji R1233zd(E) akışkanı, en yüksek güç üretimine ise amonyak ile ulaşıldığı paylaşılmıştır (Chitgar vd., 2023).

ORC'nin farklı bir versiyonu olan basit organik flaş çevrimi (SOFC) ve Brayton çevriminin ekuple edildiği sistemleri incelemiştir. Çift organik flaş çevrimi (ODFRC) ve geliştirilmiş OFRC (IOFRC) olarak isimlendirdiği konfigürasyonlarda, m-Xylene, o-Xylene, p-Xylene, toluene, ve ethylbenzene akışkanları karşılaştırılmıştır. o-Xylene ile p-Xylene için ekserji yıkımındaki azalma SOFRC, ODFRC ve IOFRC için sırasıyla %9, %12,5 ve %10 olmuştur. Ekserji yıkımının yüksek olması açısından çevrimler sırasıyla SOFRC, ODFRC ve IOFRC olarak sıralanmıştır (Hajjaligol vd., 2023).

Bu alanda ülkemizde yapılan güncel birkaç çalışmaya da aşağıda yer verilmiştir.

ORC sistemlerinde kullanılan radyal ve aksiyal türbinlerin tasarımı için kullanıcı grafik arayüzüne sahip, Matlab platformuna bağlı çalışan bir mühendislik programı geliştirilmiştir. Proses tasarımının yapılabilmesinin yanında komponent tasarımı da geliştirilen program ile yapılabilmektedir (Bilgiç, 2023).

Klasik ve rejeneratörlü ORC sistemleri için zeotropik akışkanların etkileri incelenmiş, açık besleme suyu ve reküperatörün sistem performans değerleri üzerindeki etkisi gözlemlenmiştir. En iyi performans gösteren akışkan, R1234ze(E) %13,26 ısı verim %52,93 ekserji verimi, 58,08 kJ/kg net iş ve 8,64 kJ/kg pompa işi olarak bulunmuştur (Aksoy, 2023).

1,55kW'lık bir mikro ORC sisteminin kurulumu gerçekleştirilmiştir. Genleştirici olarak bir araç turbosunu kullanan sistem Matlab üzerinde tasarlanmıştır. Düşük hızda dönen türbin sebebiyle kompresör etkin bir şekilde kullanılamamıştır (Bayraktar, 2022).

150 ton/saat debide ve 90 $^{\circ}\text{C}$ sıcaklıkta olan bu kaynaklardan yararlanarak ORC tabanlı bir santralin performansını değerlendirmek ve ana ekipmanları (ön ısıtıcı, buharlaştırıcı, hava soğutmalı kondenser) detaylı bir şekilde tasarlamak için ORC Designer adlı Matlab programı oluşturulmuştur. Dokuz farklı organik çevrim içi akışkan

kullanılarak yapılan değerlendirmede, n-pentan çevrim içi akışkanı en yüksek net güç üretimine sahiptir. N-pentanlı ORC sistemi, 18 °C ortam sıcaklığında 90 °C jeotermal su kullanarak %5.6 brüt ve %4.32 net verimlilikle 245 kWe brüt ve 189 kWe net elektrik üretebilmektedir (Karadaş, 2022).

Bu çalışmada, mühendislik denklem çözücüsü (EES) kullanılarak analiz edilen iki aşamalı bir ORC sistemi incelenmiştir. R32, R227ea, R410a, R290, R134a, RC318, R407c, R22, R23, R116, R218 ve R245fa dahil olmak üzere on iki farklı organik çalışma sıvısı, belirli sıcaklık sınırları içinde çalışma sıvısı olarak değerlendirilmiştir. ORC sistemi için uygun soğutucu veya soğutucu çiftinin seçimi, çevrim verimliliği, ekserji ve net iş çıkışı açısından kritik öneme sahiptir. Sonuçlar, en yüksek net güç çıkışının ve ısı verimliliğinin R23 + R23 çiftinde 425K'da elde edildiğini göstermektedir (Kaplan, 2022).

Bu tez, deniz taşıtlarında bulunan farklı sıcaklık aralıklarındaki çeşitli atık ısı kaynaklarını değerlendirerek, toplamda kullanılamayacak ısıyı azaltmak amacıyla bir Optimum Isı Değiştirici Ağı (IDA) tasarımının gerekliliğini vurgulamaktadır. Konteyner gemisi için en verimli çalışma akışkanının R1234ze(Z) ve tanker gemisi için R1233zd(E) olduğu belirlenmiştir. Tam yük işletimde, kargo yağ pompası türbininden kaynaklanan atık ısı geri kazanım potansiyelinin, ana makinenin seyir sırasında tam yükteki atık ısı geri kazanım potansiyeline göre yaklaşık 3,5 kat daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir (Konur, 2021).

Düşük ısı kaynak sıcaklığına sahip ORC sistemi için tasarım ve optimizasyon çalışması yürütülmüştür. Jeotermal uygulamalar için en iyi akışkanlar 90 °C için R141b, 100 °C için R1234yf, 110 °C için yine R1234yf olarak bulunmuştur (Ata, 2020).

Literatürde daha önce gerçekleştirilmiş olan çalışmalar araştırılmıştır ve çeşitli özelliklerine göre incelenmiştir. Yapılan araştırmaya göre 8 adet program çeşitli geliştiriciler tarafından geliştirilmiştir lakin Modelica, Scilab ve ORCsim dışındaki programlar açık kaynak kodlu veya erişilebilir değildir.

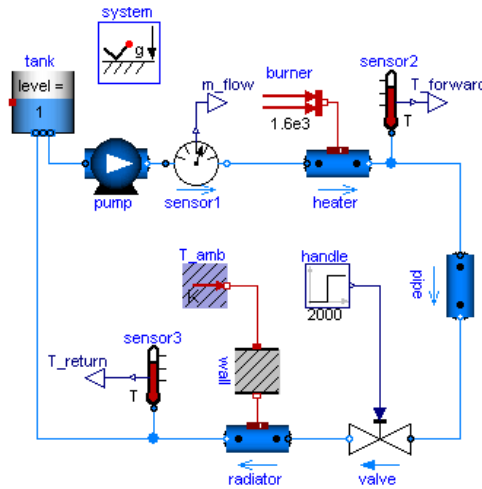
a. Modelica

Bir seramik fabrikasındaki fırınlardan ORC ile atık ısı geri kazanımı için gerçekleştirdiği çalışmada açık kaynak kodlu Modelica dilini kullanmıştır. Çalışmada

sadece Novec649 akışkanı kullanılmıştır (Castro Oliveira vd., 2022). Şekil 2.1'de programa dair genele görünümüne yer verilmiştir.

Çalışmasında ise ORC akışkanlarını hesaplamalı moleküler modelleme yöntemleri ve PC-SAFT hal denklemi kullanarak Modelica programında modellenmiştir (Tillmanns vd., 2017).

- Modelica, karmaşık fiziksel sistemlerin modellenmesi ve simülasyonu için kullanılan açık kaynaklı, nesne yönelimli bir modelleme dilidir.
- Mekanik, elektriksel, ısı ve hidrolik gibi çoklu alan sistemlerinin modellenmesini kolaylaştırmak için tasarlanmıştır.
- Kullanım olarak ticari bir program olan Matlab/Simulink yazılımıyla benzerlikler göstermektedir.
- Modelica modellerin yeniden kullanılabilirliğini destekler. Modeller, önceden var olan bileşenlerin birleştirilmesiyle oluşturulabilir ve yeniden kullanılabilir.
- Modüler yapısı sayesinde ORC sistemlerinin modellenmesinde de kullanılabilir.
- Modelica bir modelleme dili ve simülasyon platformudur. Bu sebeple var olan modellere ek özellikler kazandırabilmek için Modelica diline hâkim olmak gereklidir.



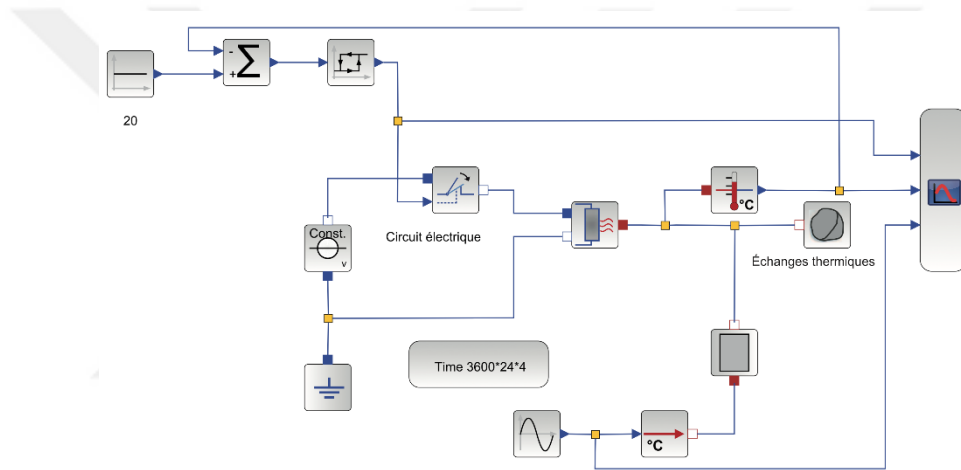
Şekil 2.1 Modelica şematik görünüm

b. Scilab

Geliştirilen yenilikçi bir organik flaş çevrimi için Scilab yazılımı üzerinde çalışmalarının yürütmüştür (Bonolo de Campos vd., 2020). Kurulumu yapılmış olan bir ORC sistemindeki scroll genişletirici için yarı-empirik matematiksel model Scilab

ortamında geliştirilmiştir (Fanelli vd., 2018). Şekil 2.2’de programa dair genel görünüme yer verilmiştir.

- Scilab, açık kaynaklı bir sayısal hesaplama ve bilimsel programlama yazılımıdır.
- Matematiksel hesaplamalar, veri analizi, grafik çizimi ve modelleme gibi birçok bilimsel ve mühendislik uygulamasında kullanılabilir.
- Scilab, Matlab'a benzer bir kullanıcı arayüzüne ve programlama diline sahiptir. Matematiksel fonksiyonlar, matris işlemleri, grafik çizimi, veri analizi ve simülasyon gibi birçok özelliği içerir.
- ORC komponentleri için ön tanımlı komponentleri bulunmamaktadır.



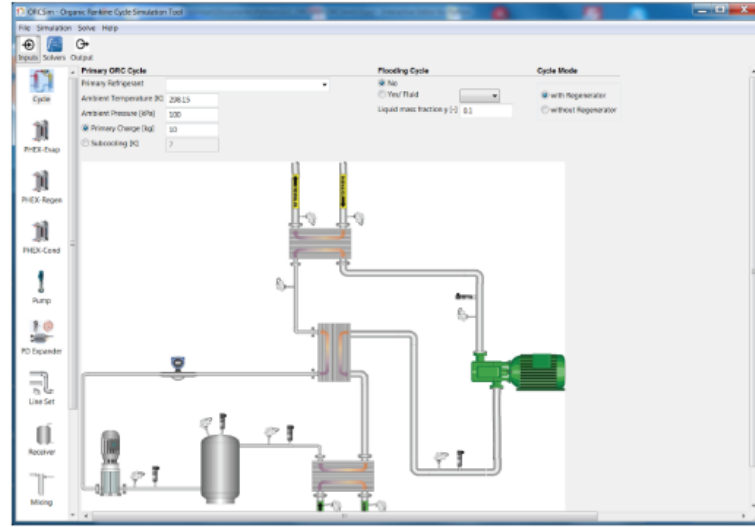
Şekil 2.2 Scilab şematik görünüm

c. Orcsim: Genelleştirilmiş Organik Rankine Çevrimi Simülasyon Aracı

Sistem bileşenleri üzerinde parça performansı esaslı bir çalışma yürütmüştür. Çalışmada Orcsim programını kullanmıştır (Motamed & Nord, 2022). Şekil 2.3’de programa dair genel görünüme yer verilmiştir.

- Açık kaynak kodludur.
- Matlab ve Python olmak üzere iki ayrı versiyonu vardır.
- Basit ORC ve rejeneratif ORC konfigürasyonları mevcuttur.
- Sadece kritik altı çevrimlerle kısıtlıdır.
- CoolProp termodinamik kütüphanesi kullanılmıştır. Lakin, CoolProp üzerinden çağırılarak Refprop ile de kullanılabilir.

- Farklı akışkanlar seçilebilir.
- Plakalı ısı değiştiricisi ve genişletirici modülleri bulunmaktadır.
- Yapısı ve çözümleme şeması açık kaynaklı havalandırma ve ısı pompası programı olan ACHP'den esinlenmiştir.
- Modüler bir yapıya sahip her bir komponente bağımsız müdahaleye izin vermektedir.



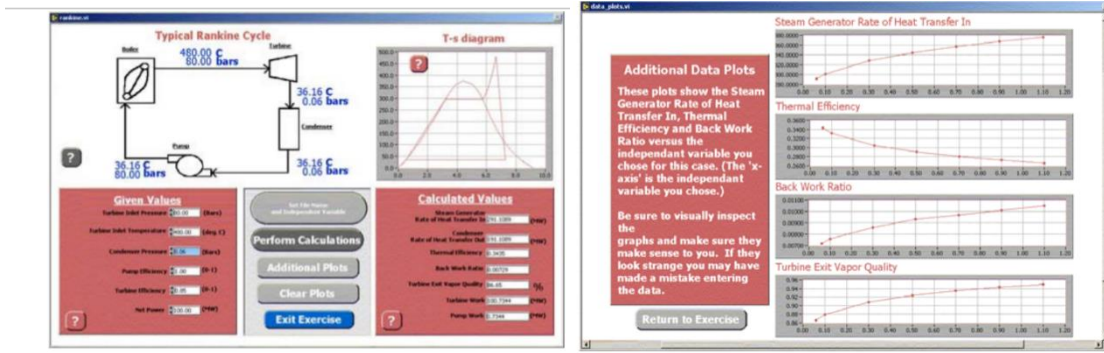
(a)

Şekil 2.3 Orcsim programı arayüz görünümü (Ziviani vd., 2015)

d. Labview görsel Rankine çevrimi hesaplama aracı

Şekil 2.4'de programa dair genel görünüme yer verilmiştir.

- Açık kaynak kodlu veya erişilebilir değildir.
- Labview programında yazılmıştır.
- Farklı akışkanlar seçilemez. Sadece su için hesaplamalar gerçekleştirilebilir.
- Termodinamik tablolar elle look-up table olarak girilmiş. Herhangi bir kütüphane kullanmamaktadır.
- Basit rankine çevrimi için yazılmıştır.
- Optimizasyon modülü bulunmamaktadır.

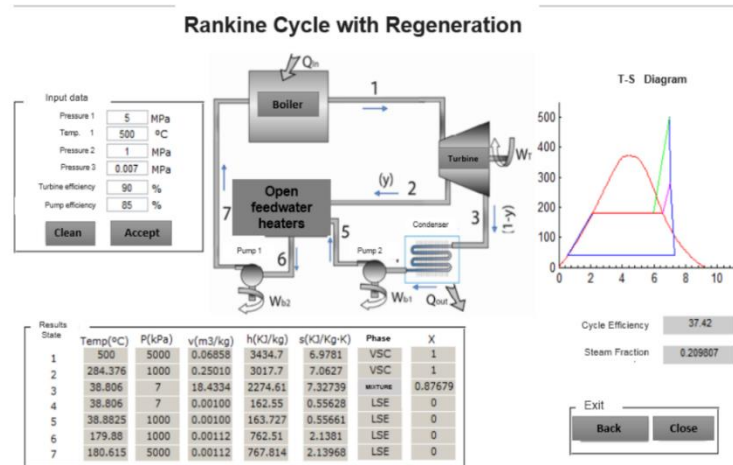


Şekil 2.4 Labview ile yapılmış bir görsel Rankine çevrimi arayüzü (Olsson, 2012)

e. Yeniden ısıtma ve rejenerasyonlu Rankine çevrimi için birinci yasa tabanlı eğitsel yazılımı

Şekil 2.5’de programa dair genel görünümüne yer verilmiştir.

- Rejenerasyonlu rankine çevrimi için geliştirilmiştir.
- Eğitim amaçlı geliştirilmiş. Lakin açık kaynak kodlu veya erişilebilir değildir.
- Farklı akışkanlar seçilemez. Sadece su kullanılabilir.
- Ticari Matlab programında geliştirilmiştir.
- Optimizasyon modülü bulunmamaktadır.



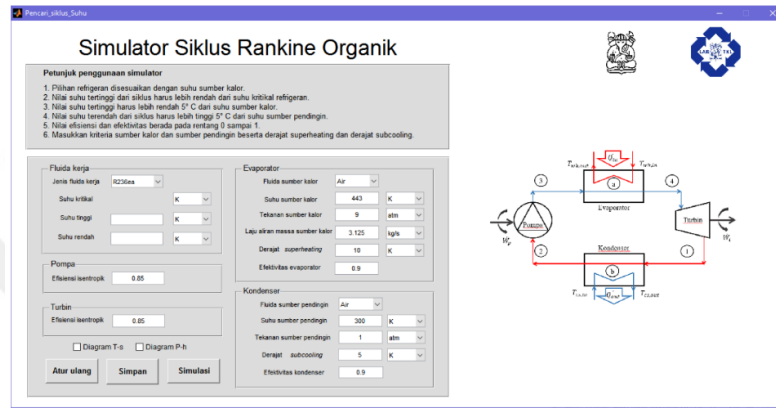
Şekil 2.5 Programa ait arayüz (Valencia vd., 2018)

f. Matlab tabanlı ORC simülatörü

Şekil 2.6’de programa dair genel görünümüne yer verilmiştir.

- CoolProp kütüphanesini kullanmaktadır.

- İngilizce versiyonu bulunmamaktadır.
- Açık kaynak kodlu veya erişilebilir değildir.
- Farklı akışkanlar seçilebilir.
- Ticari Matlab programında geliştirilmiştir.
- Basit ORC çevrimi için geliştirilmiştir.
- ε -NTU methodu ile ısı değiştirici hesabı gerçekleştirir.



Şekil 2.6 Matlab'da gerçekleştirilmiş eğitimsel bir arayüz (Prמודana & Aufari, 2018)

g. ORC için uzman tasarım aracı

Şekil 2.7'de programa dair genel görünümüne yer verilmiştir.

- Web arayüzüne sahip online araçtır.
- Online arayüz Html/Css, Javascript ve Flask ile yazılmıştır, ORC modelleri ise Python ile yazılmıştır.
- Açık kaynak kodlu veya erişilebilir değildir.
- CoolProp termodinamik kütüphanesini kullanmaktadır.
- Farklı akışkanlar seçilebilir.
- Dört ayrı konfigürasyona sahip bunlar; basit ORC, rekuperatif ORC, termal yağlı ORC ve çift ısı kaynaklı ORC.
- Radyal türbin, finli ısı değiştirici, finansal hesaplama ve sistem kontrol modülleri bulunmaktadır.

Simple ORC

Enter data into the text fields. Components can be selected by clicking on a component on the process diagram. When ready, click "Generate technical report" to continue.

Please select the heat source

Exhaust gas

Inlet temperature of the heat source, °C

Flow rate of the heat source, kg/s

Pressure of the heat source, Bar

Please select a working fluid

R245fa

Please select the cooling medium

Air

Inlet temperature of cooling medium, °C

Pressure of cooling medium, Bar

High pressure of ORC system, Bar

Low pressure of ORC system, Bar

Please specify the assumptions for the simulation

Turbine efficiency (%)

Pump efficiency (%)

Pinch temperature (°C)

Super heat temperature (°C)

Generate technical report

NOTE: The calculation is performed based on the thermodynamic model according to users' inputs which are also used in equipment module for preliminary design. Coolprop is utilized to determine fluid properties. This tool may be helpful to gain a basic performance evaluation, but inputs might be quite different from case to case.

The diagram illustrates a Simple ORC cycle. It consists of four main components: a Turbine, a Condenser, a Pump, and an Evaporator. The cycle is driven by a heat source (red arrow) which heats the working fluid (green arrow) in the evaporator. The working fluid then expands through the turbine, producing work. The turbine exhausts the working fluid into the condenser, where it is cooled by a cooling medium (blue arrow). The condensed working fluid is then pumped back to the evaporator by the pump. The cycle is completed by the evaporator heating the working fluid again. The diagram also includes a legend: red arrow for heat source, blue arrow for cooling medium, and green arrow for working fluid.

Şekil 2.7 Web arayüzüne sahip ORC hesaplama yazılımı (Dong et al., 2016)

Özet olarak, ticari veya ücretsiz birçok yazılım olmakla beraber ticari olmayan çoğu projenin geliştirilme süreci sonlandırılmıştır. Yukarıda bahsedilen Ees, Matlab, Modelica ve Scilab gibi yazılımlar genel proses tasarım yazılımlarıdır. Bu sebeple programlar hazır bir ORC modeli içermeyebilmekte veya çok detaylı olmayan kayıtlı örnekler üzerinden ilerlenmektedir. Ayrıca ORC özelinde geliştirilmemiş olan programlarda kullanıcılardan program özelinde kullanım becerisine sahip olunması beklenmektedir. Çalışma kapsamında geliştirilen yazılım ORC özelinde geliştirilmiş olup tüm hesaplamalar basit bir açılış sayfası üzerinde gerçekleştirilmektedir. Böylelikle, herhangi bir program kullanım becerisi gerektirmemekte ve kullanım kolaylığı sağlamaktadır.

3. MATERYAL VE YÖNTEM

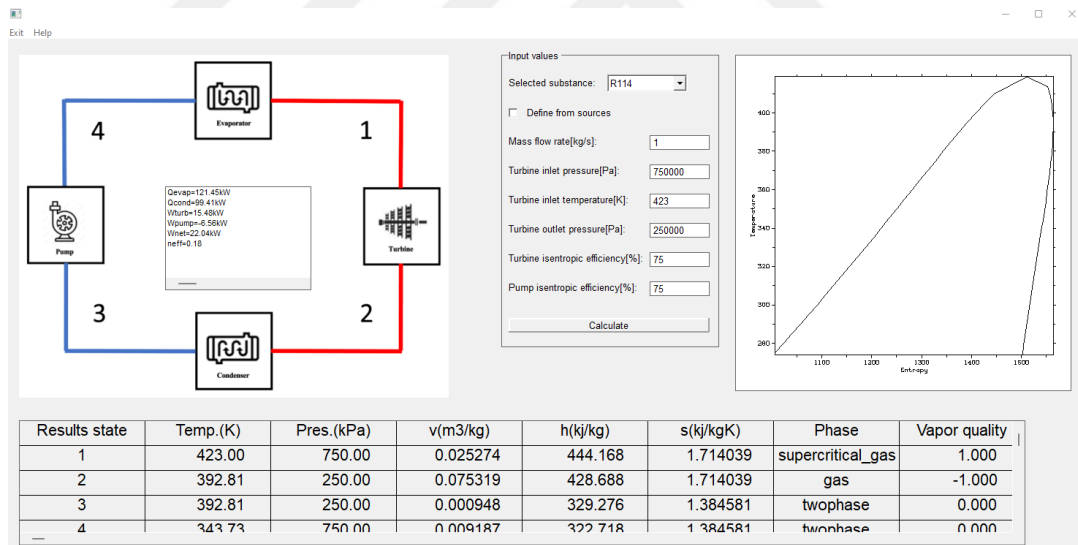
Bu bölümde programın geliştirilme sürecinde kullanılan materyaller ve kaynaklar incelenmiştir. Programlama, matematiksel model, programın kullanımı ve modelin doğrulanması alt başlıkları incelenmiştir.

3.1. Programlama

Bu başlık altında, çalışmada kullanılan programlama dilleri, termodinamik ve optimizasyon kütüphaneleri incelenmiştir. Kütüphanelerin temel özelliklerinden bahsedilmiş, kullanım amaçları ve basit örnekler paylaşılmıştır.

3.1.1. Fortran programlama dili

Çalışmaya başlamadan önce uygun programlama diline karar verilmiştir. Başlarda Fortran dili kullanılarak bir ön çalışma gerçekleştirilmiştir. Fortran, sayısal hesaplama için genel amaçlı, yordamsal programlama dilidir. Fortran makine diline yakın, derlenen, yüksek seviye bir programlama dili olduğundan sayısal hesaplamalarda oldukça hızlıdır. Fortran eski bir dil olmasına rağmen bilimsel hesaplama alanında çalışan kişiler tarafından tercih edilmektedir. 1950’li yıllardan günümüze değin belirli aralıklarla güncellenmektedir. Hesaplama araçları ve kütüphanelere entegre olmakla birlikte kullanıcı sayısı azaldığı için kütüphanelerdeki hataların giderilmesi vakit almaktadır. İlk çalışmada Fortran dilinde CoolProp termodinamik kütüphanesi ve Dislin grafik arayüzü kütüphanesi kullanılarak bir program oluşturulmuştur. Oluşturulan program Şekil 3.1’de görülmektedir.



Şekil 3.1 Fortran ile oluşturulan ilk program

Yeni yazılan kütüphanelerin Fortran’a entegrasyonun yapılmaması veya yetersiz olması sebebiyle daha güncel bir yazılım dili olan Python dili ile ilerleme kararı verilmiştir.

3.1.2. Python programlama dili

Python, 1991 yılında Guido van Rossum tarafından geliştirilen yüksek seviyeli bir programlama dilidir. Basit ve anlaşılır bir sözdizimine sahip olduğu için özellikle öğrenmeye yeni başlayanlar için uygun bir dildir. Çeşitli uygulama alanlarında yaygın bir şekilde kullanılır. Okunabilirliği ve yazımı kolaydır. Hızlı bir dildir. Farklı işletim sistemlerinde kullanılabilir. Geniş kütüphane desteği vardır. Farklı platformlarda çalışabilmektedir. Açık kaynak kodludur ve bu kodlara erişilebilir. Web uygulamaları geliştirme, nümerik hesaplamalar, yapay zekâ uygulamaları, makine öğrenimi, nesnelere interneti, veri madenciliği uygulamaları, görselleştirme ve oyun geliştirme gibi birçok alanda kullanılmaktadır. Çalışmanın ilerleyen aşamasında kütüphanelere kolay entegre edilmesi sebebiyle Python programlama dili kullanılmıştır.

3.1.3. CoolProp termodinamik kütüphanesi

CoolProp kütüphanesi, C++ dilinde yazılmış olan, içerisinde 122 bileşen için saf ve yarı-saf akışkan hal denklemi ve taşınım özelliklerini barındıran açık-kaynaklı bir termodinamik kütüphanesidir. Gazlar, sıvılar ve karışımlar gibi çeşitli akışkanların termodinamik ve taşıma özelliklerini hesaplamak için geniş bir veritabanı içerir. Ian Bell, Jorrit Wronski, Sylvain Quoilin ve Vincent Lemort tarafından geliştirilmiştir. Kütüphane, birçok farklı programlama dili ve platformla uyumlu olduğu için farklı uygulamalarda kullanılabilir. Çalışmada, kütüphanenin Python dilindeki modülü kullanılarak proje içerisine dahil edilmiştir. Kütüphanenin kullanımı Çizelge 3.1’de paylaşılmıştır.

Kütüphane CoolProp sitesinden indirilmelidir. İndirildikten sonra import satırları aşağıdaki örnekte görüldüğü gibi programın başında yazılmalıdır. Ulaşılmak istenen özellik CP.PropsSI fonksiyonu içerisinde sağ en başta yazılmalıdır. Akışkanın cinsi ise fonksiyonun içerisinde en sona yazılmalıdır. Ulaşılmak istenen özellik en başta belirtildikten sonra akışkanın sıvı veya kızgın buhar olması durumunda bilinen iki adet yeğin özellik tanımlanmalıdır. Akışkanın Sıvı-buhar karışımı olması durumunda da üç adet yeğin özellik tanımlamasına ihtiyaç duyulmaktadır. Ulaşılmak istenen ‘C’ özgül ısı değerini temsil etmektedir. ‘T’ sıcaklık değerini temsil etmekte ve Kelvin cinsinden girilmelidir. ‘P’ ise basıncı temsil etmekte ve Pascal cinsinden girilmelidir. En sonda ise akışkanın cinsi tanımlanmalıdır. Bu örnekte 80 °C’de atmosfer basıncı altındaki suyun özgül ısı değeri ekrana yazdırılmıştır. Sonuç 4196.75 J/kgK olarak elde edilmiştir. Özelliklerin harf gösterimleri CoolProp sitesinden öğrenilebilir.

Çizelge 3.1 CoolProp hesaplama örneği

```

import CoolProp
import CoolProp.CoolProp as CP

specific_heat_capacity = CP.PropsSI('C','T',(80 + 273.15),'P',101325,'Water')

print(specific_heat_capacity)

```

3.1.4. WxWidgets kütüphanesi

WxWidgets (eski adıyla wxWindows), C++ dilinde yazılmış bir grafik kullanıcı arayüzü kütüphanesidir. Widget adı verilen grafiksel nesnelere kullanılarak masaüstü ve mobil uygulamalar geliştirilebilmektedir. Terminal üzerinde yazılmış programların aksine grafiksel programlarda oluşturulan nesnelere kullanıcı ile etkileşerek daha rahat ve estetik bir kullanım sağlamaktadır. Kütüphane kullanılarak yazılmış olan programlar Windows, Linux, MacOS gibi farklı platformlarda ufak grafiksel farklılıklarla aynı işlevi yerine getirecek şekilde çalışabilmektedir.

CoolProp kütüphanesinden alınmış olan bir verinin butona basıldığında ekrana yazdırılması uygulaması Çizelge 3.2'de gösterilmiştir.

Çizelge 3.2 WxWidgets ile basit bir program

```

import wx
import CoolProp
import CoolProp.CoolProp as CP

def main():
    app = wx.App()
    window = wx.Frame(None, title="Özgül ısı hesaplama", size=(300, 200))
    global panel
    panel = wx.Panel(window)

    button = wx.Button(panel, wx.ID_ANY, label="Suyun cp değerini hesapla", pos=(60, 50))
    button.Bind(wx.EVT_BUTTON, Calculate)

    window.Show(True)
    app.MainLoop()

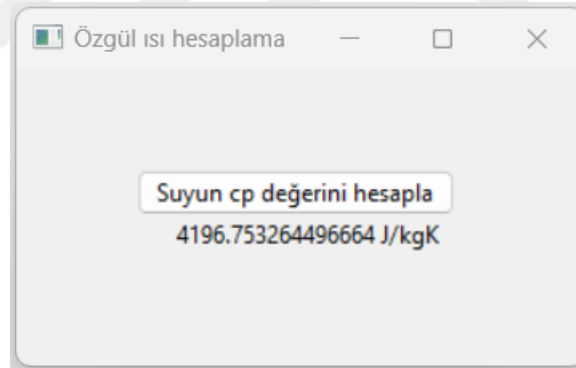
def Calculate(event):
    specific_heat_capacity = CP.PropsSI('C', 'T', (80 + 273.15), 'P', 101325, 'Water')
    label = wx.StaticText(panel, label=str(specific_heat_capacity) + " J/kgK", pos=(80, 75))

if __name__ == '__main__':
    main()

```

İki kütüphanenin de aynı programda kullanılabilmesi için import satırlarıyla kütüphaneler çağırılmıştır. Önce, main() fonksiyonun içerisine uygulama, pencere ve panel oluşturulur. Wx.Frame satırında pencerenin ismi ve ekrandaki boyutu ayarlanır. Daha sonra pencere içerisinde widgetların üzerine yerleştirileceği bir panel atanır. Bu panel üzerine bir buton widget'ı atanır. Wx.Button satırında buton üzerinde yazacak olan yazı ve ekrandaki pozisyonu argüman olarak girilir. Daha sonra button.Bind satırı kullanılarak butona basıldığında çağırılacak olan Calculate fonksiyonuna bağlanır. Ekranın gözükmesi ve uygulamanın kullanıcıdan sürekli olarak girdi beklemesi için ise bir döngü oluşturmalıdır. Bunun için window.Show(True) ve app.MainLoop() satırları eklenir. En sonda ise butona basıldığında çağırılan Calculate fonksiyonu tanımlanır. Bu fonksiyon içerisinde c_p (sabit basınçta özgül ısı) değerini hesaplayan CoolProp fonksiyonu bulunur. Bulunan değerleri ekranda koordinatları verilen bir yere yazdırmak için bir label tanımlanır. Böylelikle, alınan c_p değeri ekrana yazdırılır.

Yukarıdaki kodun ekranda gözüken grafik çıktısı, kullanıcı butona bastıktan sonra Şekil 3.2'deki gibi gözükmektedir.



Şekil 3.2 WxWidgets grafik çıktısı

3.1.5. Pymoo kütüphanesi

Pymoo kütüphanesi, Julian Blank tarafından yazılmış olan tek ve çok amaçlı optimizasyon algoritmalarını içeren bir optimizasyon kütüphanesidir (Blank & Deb, 2020). Optimizasyon dışında veri görselleştirme ve çok amaçlı karar verme özelliklerine de sahiptir.

Birden fazla sayıda amaç fonksiyonunun olduğu durumlarda her iki parametre için optimum koşulların bulunması için çok amaçlı optimizasyon algoritmaları kullanılır. Bu

çalışmada kütüphane içerisinde yer alan NSGA-II (Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II) çok amaçlı optimizasyon algoritması kullanılmıştır. İlk başta, her bir amaç parametresi için matematiksel fonksiyonlar kullanıcı tarafından oluşturulur. Daha sonra amaç fonksiyonlarındaki değişken parametrelerin kısıtları belirlenir. NSGA-II algoritması ilk başta rastgele bireylerden oluşan bir başlangıç popülasyonu oluşturulur. Başlangıç popülasyonu değişken parametrelerin farklı kombinasyonlarını içerir. Daha sonra fitness fonksiyonları hesaplanır. Oluşturulan her bir birey başarısına göre uygunluğu belirlenir. Bireylerin birbirlerine göre başarısı dominantlık olarak isimlendirilir. Eğer birey diğer bir bireyin tüm amaç fonksiyonları üzerinde eşit veya daha iyi performans gösteriyorsa domine edilmiş olarak adlandırılır. Daha sonraki denemelerde domine edilemeyen bireyler seçilerek, ayrı bir sınıfa aktarılır ardından bu bireyler kullanılarak yeni nesiller oluşturulur. Yeni nesiller, seçim, çaprazlama ve mutasyon operatörlerine tabii tutularak yeni bireyler oluşturulur. Her neslin en iyilerinin bir sonraki nesile taşınması ile en iyi bireyler çözüm boyunca korunur. Buna elitizm denir. Çözümleme döngüler halinde belli sayılarda tekrarlanır. En iyi sonuçlar korunarak domine edilmeyen değerler listesine, en iyi olmayan sonuçlar ise domine edilen sonuçlar olarak kaydedilir ve pareto eğrisi üzerinde görselleştirilir.

Çizelge 3.3'de gösterilen iki matematiksel fonksiyon için NSGA-II amaç parametrelerinin birincisi minimize edilirken, ikincisi maksimize edilmeye çalışılan bir örnek çözümlenmiştir.

Çizelge 3.3 Pymoo örnek problem

$$\begin{aligned}
 \min \quad & f_1(x) = 100(x_1^2 + x_2^2) \\
 \max \quad & f_2(x) = -(x_1 - 1)^2 - x_2^2 \\
 \text{s.t.} \quad & g_1(x) = 2(x_1 - 0.1)(x_1 - 0.9) \leq 0 \\
 & g_2(x) = 20(x_1 - 0.4)(x_1 - 0.6) \geq 0 \\
 & -2 \leq x_1 \leq 2 \\
 & -2 \leq x_2 \leq 2 \\
 & x \in \mathbb{R}
 \end{aligned}$$

Kullanılacak kütüphaneler ve bazı özellikler import fonksiyonları ile çağırılır. Çözümlenecek problem bir class yapısı içerisinde oluşturulur. N_var, değişken parametre

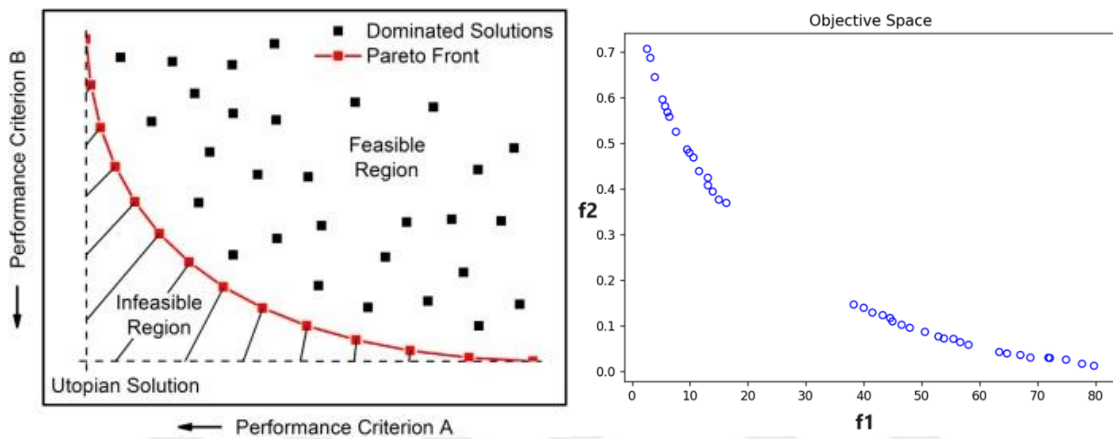
sayısını, n_obj amaç fonksiyonu sayısını, n_ieq_const kısıtlayıcı denklem sayısını, xl ve xu ise değişkenlerin alt ve üst sınırlarını tanımlar. Evaluate fonksiyonun amaç fonksiyonları yazılır. Amaç fonksiyonları olduğu gibi yazıldığında minimize edilir. Maksimize edilmek istenen fonksiyon -1 ile çarpılarak yazılır. Popülasyon boyutu pop_size parametresi ile tanımlanır. Offspring, çaprazlama ve mutasyon işlemleri sonucunda elde edilen yeni bireyleri ifade eden bir terimdir. Popülasyondaki yeni bireylerin sayısı $n_offsprings$ parametresi ile tanımlanır. Sampling parametresi ise başlangıç popülasyonunu oluşturmak için seçim yöntemini tanımlamaktadır. Probleme ait kodlar Çizelge 3.4'te paylaşılmıştır.

Çizelge 3.4 NSGA-II uygulama kodları

<pre>import numpy as np from pymoo.core.problem import ElementwiseProblem from pymoo.algorithms.moo.nsga2 import NSGA2 from pymoo.operators.crossover.sbx import SBX from pymoo.operators.mutation.pm import PM from pymoo.operators.sampling.rnd import FloatRandomSampling from pymoo.termination import get_termination from pymoo.optimize import minimize import matplotlib.pyplot as plt class MyProblem(ElementwiseProblem): def __init__(self): super().__init__(n_var=2, n_obj=2, n_ieq_constr=2, xl=np.array([-2,-2]), xu=np.array([2,2])) def evaluate(self, x, out, *args, **kwargs): f1 = 100 * (x[0]**2 + x[1]**2) f2 = (x[0]-1)**2 + x[1]**2 g1 = 2*(x[0]-0.1) * (x[0]-0.9) / 0.18 g2 = - 20*(x[0]-0.4) * (x[0]-0.6) / 4.8 out["F"] = [f1, f2] out["G"] = [g1, g2]</pre>	<pre>problem = MyProblem() algorithm = NSGA2(pop_size=40, n_offsprings=10, sampling=FloatRandomSampling(), crossover=SBX(prob=0.9, eta=15), mutation=PM(eta=20), eliminate_duplicates=True) termination = get_termination("n_gen", 40) res = minimize(problem, algorithm, termination, seed=1, save_history=True, verbose=True) X = res.X F = res.F xl, xu = problem.bounds() plt.figure(figsize=(7, 5)) plt.scatter(F[:, 0], F[:, 1], s=30, facecolors='none', edgcolors='blue') plt.title("Objective Space") plt.show()</pre>
--	---

İtalyan ekonomist Vilfredo Pareto, Pareto optimalite (Pareto verimi) kavramını geliştirilmiştir. Geliştirdiği kavramı gelir dağılımı ve ekonomi uygulamalarında kullanmıştır. Çözümün bir özelliğini kötüleştirmeden, diğer özelliklerini daha iyiye götürmek mümkün değil ise bu çözüm Pareto optimal çözüm olarak adlandırılmaktadır. Çok amaçlı optimizasyonda tüm pareto optimal çözümleri temsil eden eğriye ise Pareto eğrisi denir. Şekil 3.3'de sonuç çıktısı olan pareto eğrisi gösterilmiştir. Eğrinin altında

kalan bölge ulaşılması mümkün olmayan çözümleri temsil etmektedir. Üst tarafında kalan bölge ise ulaşılması mümkün olan lakin pareto eğrisi üzerinde yer alan çözümler tarafından domine edilen yani daha kötü özelliklere sahip olan çözümleri temsil eder. Pareto eğrisi problemin tipine ve hedeflerin yönüne göre farklı şekillerde olabilir. Süreksiz bir pareto eğrisi de mümkündür. Süreksizliğin olduğu bölgede, bir veya birden çok fonksiyonun belirli bir aralıkta optimize edilemediği ve herhangi bir amaç açısından belirgin bir avantaja sahip olmadığı durumlarda oluşabilir.



Şekil 3.3 a) Pareto eğrisinin temsil ettiği bölgeler, b) Paylaşılan probleme ait bir pareto eğrisi

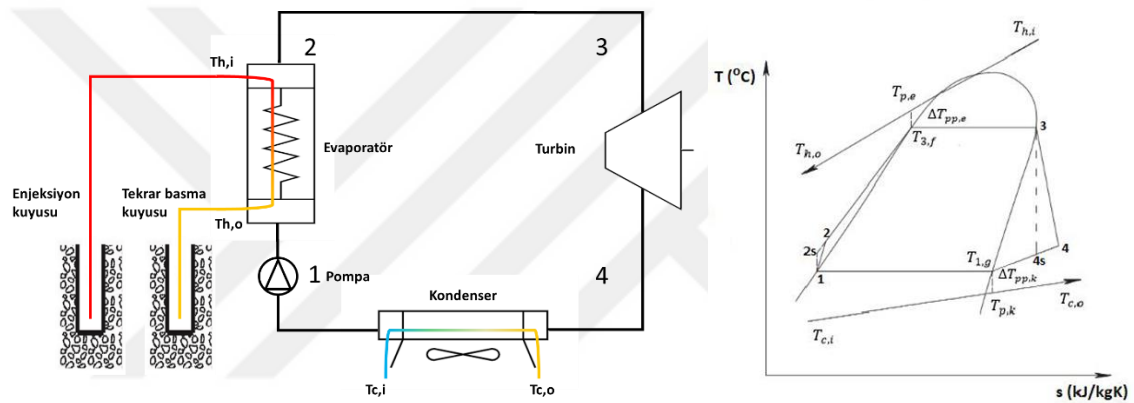
3.2. ORC matematik modeli

Bu bölümde enerji analizi ve ekonomik analiz konuları detaylı bir şekilde incelenmiştir. Daha sonrasında ise geliştirilen programın kullanımından bahsedilmiştir.

3.2.1. Enerji analizi

Çalışmada kullanılan hesaplama yöntemi, kullanıcı tarafından sağlanan minimum parametreler ile hesaplama yapmaktadır. ORC hesaplamalarının gerçeğe yakın gerçekleştirilebilmesi için ısı değiştiricilerinde ısı transfer hesaplamalarının yapılması gerekmektedir. Isı transferi hesaplamalarını gerçekleştirebilmek için ise konstrüksiyon tipi ve tüm geometrik özelliklerin belirli olması gerekmektedir. Fakat, program ön analiz yapmak için geliştirildiğinden ısı değiştirici hesaplamalarında ısı transferi hesaplamaları yapmak yerine pinch noktası yaklaşımı ve etkenlik yöntemini kullanır. Pinch noktası yaklaşımı, ısı değiştiricilerde proses kayıplarını minimize etme ve enerji verimliliğini

optimize etmek için kullanılan bir yaklaşımdır. Sıcak ve soğuk akışkanların birbirleri arasında oluşturabilecekleri minimum sıcaklık farkını ifade eder. Bu sıcaklık farkına Pinch noktası sıcaklık farkı adı verilir. Etkenlik yöntemi ise sadece giriş sıcaklıklarının bilindiği durumlarda iteratif çözüm yöntemlerine alternatif olarak kullanılır. Programda evaporatör etkenlik değeri için tahmini değerler girilir. Program çıktısı olarak ise çevrimi gerçekleştirmek için kullanılması gereken ısı değiştirici kapasitelerini ekrana yazdırır. Kullanılan formüller, hesaplama hiyerarşisi ve kabuller aşağıdaki gibidir. Pinch noktası sıcaklık farkı yaklaşımının T-s diyagramı gösterimi ve çevrime ait parametreler Şekil 3.4'te gösterilmiştir.



Şekil 3.4 Çevrime ait parametrelerin gösterimi

Hesaplamaya literatürde $\Delta T_{soğutma}$ olarak isimlendirilen sabit bir parametre ile başlanılır. Bu çalışmada $\Delta T_{soğutma}$ sabit $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ olarak kabul edilmiştir. Bu parametre kondenser soğutma sıvısı $T_{c,i}$ ile pompa giriş sıcaklığı T_1 arasındaki farkı temsil etmektedir. Başlangıçta $T_{c,i}$ değeri kullanıcı tarafından girildiği için sabit $\Delta T_{soğutma}$ değeri kullanılarak pompa giriş sıcaklığı T_1 hesaplanır.

$$\Delta T_{soğutma} = T_1 - T_{c,i} \quad (3.1)$$

ε_{evap} , yüzde evaporatör etkenliğini, $\Delta T_{pp,evap}$, pinch noktası sıcaklık farkını, $T_{h,in}$, ısı kaynak sıcaklığını, $T_{p,e}$ ise evaporatör pinch noktası sıcaklığını temsil etmektedir. ε_{evap} , $\Delta T_{pp,evap}$ ve $T_{h,in}$ değerleri kullanıcı tarafından ilgili metin kutularına girilir. Denklemde $T_{p,e}$ ve $T_{3,f}$ bilinmemektedir. Denklem (3.2), Denklem (3.3) formuna

dönüştürülür. Denklem (3.4)'deki $\Delta T_{pp,evap}$ bilinmektedir. $\Delta T_{pp,evap}$, Denklem (3.3)'de yerine yazılarak $T_{3,f}$ değeri elde edilir. Daha aynı denklemden $T_{p,e}$ değeri hesaplanır.

$$\varepsilon_{evap} = \frac{(T_{h,i} - T_{p,e})}{(T_{h,i} - T_{3,f})} \quad (3.2)$$

$$T_{3,f} = T_{hi} - \frac{\Delta T_{pp,evap}}{1 - \varepsilon_{evap}} \quad (3.3)$$

$$\Delta T_{pp,evap} = T_{p,e} - T_{3,f} \quad (3.4)$$

Evaporatör etkinliği kullanıcı arayüzünde yüzdelik olarak belirtildiğinden yüze bölünmüştür. $T_{3,f}$ ve T_1 değerleri bilindiğinden 3, 3f ve 1 durumlarına ait tüm değerler aşağıdaki şekilde Coolprop kütüphanesinden elde edilir.

```

h3f = CP.PropsSI('H', 'T', T3f, 'Q',0, fluid)
s3f = CP.PropsSI('S', 'T', T3f, 'Q',0, fluid)
T3 = T3f
P3 = CP.PropsSI('P', 'T', T3, 'Q',1, fluid)
h3 = CP.PropsSI('H', 'T', T3, 'Q',1,fluid)
s3 = CP.PropsSI('S', 'T', T3, 'Q',1,fluid)
P1 = CP.PropsSI('P','T',T1,'Q',0,fluid)
h1 = CP.PropsSI('H','T',T1,'Q',0,fluid)
v1 = 1/CP.PropsSI('D','T',T1,'Q',0,fluid)
s1 = CP.PropsSI('S','T',T1,'Q',0,fluid)

```

Sistemin içerisindeki basınç kayıpları dP değişkeni ile tanımlanır. dP değişkeni borulama ve komponentlerden kaynaklı basınç kayıplarını temsil etmektedir. Bu çalışmada ise dP sıfır alınmıştır. Basınç kaybının olmadığı durumda P_2, P_3 'e P_4 ise P_1 'e eşit olmaktadır. P_1 ve P_2 değerleri bilindiğinde ideal ve gerçek akış işi değerleri bulunur. Gerçek akış işinin h_1 'e eklenmesi ile h_2 ve 2 durumuna ait veriler elde edilir.

$$\begin{aligned}
dP &= 0 \text{ \#Pressure drop} \\
P2 &= P3/(1-dP) \\
P4 &= P1/(1- dP) \\
wpompa &= v1*(P2-P1) \\
wpompag &= (v1*(P2-P1))/(pumpeff/100) \\
h2 &= wpompag + h1 \\
T2 &= CP.PropsSI('T','H',H2,'P',P2,fluid) \\
s2 &= CP.PropsSI('S','H',H2,'P',P2,fluid)
\end{aligned}$$

s_3 ideal izantropik genişleme durumunda s_{4s} 'e eşit olduğu bilinmektedir. Daha önceki bilinen parametreler kullanılarak sırasıyla 4s ve 4 durumuna ait veriler bulunur.

$$\begin{aligned}
s4s &= s3 \\
h4s &= CP.PropsSI('H','S',S4s,'P',P4,fluid) \\
x4s &= CP.PropsSI('Q','H',H4s,'P',P4,fluid) \\
h4 &= h3 - (turbeff/100) * (h3 - h4s) \\
s4 &= CP.PropsSI('S','H',H4,'P',P4,fluid) \\
t4 &= CP.PropsSI('T','H',H4,'P',P4,fluid) \\
x4 &= CP.PropsSI('Q','H',H4,'P',P4,fluid)
\end{aligned}$$

Daha sonra, kullanıcı tarafından girilen ısı kaynağı akışkanın kütleli debisi m_h , ısı kaynağı akışkanın özgül ısı kapasitesi $c_{p,sıcak}$ ve Denklem (3.4)'ten hesaplanan $T_{p,e}$ kullanılarak buharlaştırıcı ısı Q_{buh} hesaplanır.

$$Q_{buh} = \dot{m}_h c_{p,sıcak} (T_{h,i} - T_{p,e}) \quad (3.5)$$

h_3 ve $h_{3,f}$ önceki hesaplamalardan bilinmektedir. Denklem (3.5)'ten hesaplanan buharlaştırıcı ısı da kullanılarak. Çevrim için gerekli organik akışkan kütleli debisi m_{orc} belirlenir.

$$m_{orc} = \frac{Q_{buh}}{(h_3 - h_{3,f})} \quad (3.6)$$

Çevrimin tüm noktaları bulunduktan sonra ön ısıtma ısısı, evaporatör kapasitesi Q_{evap} ve kondenser kapasitesi belirlenir.

$$Q_{önısıtma} = \dot{m}_{orc}(h_{3,fluid} - h_2) \quad (3.7)$$

$$Q_{evap} = Q_{önısıtma} + Q_{buh} \quad (3.8)$$

$$Q_{kond} = \dot{m}_{orc}(h_4 - h_1) \quad (3.9)$$

Daha sonra pompa gücü, türbinden elde edilen güç ve ısı verim hesaplanır.

$$W_p = \dot{m}_{orc}(h_2 - h_1) \quad (3.10)$$

$$W_T = \dot{m}_{orc}(h_3 - h_4) \quad (3.11)$$

$$W_{Net} = W_T - W_p \quad (3.12)$$

$$\eta_{ısıl} = W_{Net}/Q_{evap} \quad (3.13)$$

Belirli senaryolarda türbin çıkışındaki akışkan iki fazlı bölgede yer alabilmektedir. Bu sebeple T_{1g} bulunurken aşağıda yer alan if-else rutini çalıştırılır. Programda yer alan çift faz kontrolüne ait kodlama satırları Çizelge 3.5'te paylaşılmıştır.

Çizelge 3.5 Türbin çıkışı çift faz kontrolü

```
##### Türbin çıkışının çift fazlı olup olmadığının kontrolü
if CP.PhaseSI('S',S4,'T',T4,fluid) == 'gas':
    T1g = T1
    s1g = CP.PropsSI('S','Q',1,'T',T1g,fluid)
    h1g = CP.PropsSI('H','Q',1,'T',T1g,fluid)
else:
    if fluid in {"R404A", "R407C"}:
        raise Exception()
```

```

return
T1g = T4
s1g = s4
s1g = CP.PropsSI('S','P',P3,'H',H1g,fluid)

```

T_{1g} bulunduğundan sonra sırasıyla Denklem (3.15), (3.16), (3.17) kullanılarak m_{kond} , Q_{kond} ve $T_{c,o}$ parametreleri hesaplanır.

$$T_{pc} = T_{1g} - \Delta T_{pp,kond} \quad (3.14)$$

$$m_{kond} = \frac{m_{orc}(h_{1g} - h_1)}{C_p(T_{pc} - T_{c,i})} \quad (3.15)$$

$$Q_{kond} = m_{orc}(h_4 - h_1) \quad (3.16)$$

$$T_{c,o} = T_{c,i} + \frac{Q_{kond}}{m_{kond}C_p} \quad (3.17)$$

$$P_{ratio} = \frac{P_3}{P_4} \quad (3.18)$$

3.2.2. Ekserji analizi

Enerji hesaplamaları tamamlandıktan sonra ekserji hesaplamalarına geçilir. Çevre basıncı ve sıcaklığı T_0 ve P_0 sabit 1 bar ve 298.15 K kabulü yapılır. Ardından organik akışkan ve su için entropi ve entalpi değerleri bulunur.

$$T_0 = 298.15 \text{ [K]}$$

$$P_0 = 100000 \text{ [Pa]}$$

#Çevre durumunda organik akışkan için

$$s_0 = \text{CP.PropsSI}('S','T',T_0,'P',P_0,\text{fluid})$$

$$h_0 = \text{CP.PropsSI}('H','T',T_0,'P',P_0,\text{fluid})$$

#Çevre durumunda su için

s01 = CP.PropsSI('S','T',T0,'P',P0,"Water")

h01 = CP.PropsSI('H','T',T0,'P',P0,"Water")

Evaporatöre ısı kaynağı tarafından giren ve çıkan su 5 ve 6 durumları olarak isimlendirilmiştir. Kondenser tarafındaki su giriş ve çıkışı ise 7 ve 8 durumları olarak adlandırılmıştır. Evaporatörde ve kondenserdeki sıcak ve soğuk akışkanların sıvı formda olduğu kabulü ile entropi ve entalpi değerleri hesaplanmıştır.

x5 = 0

x6 = 0

h5 = CP.PropsSI('H','T',Thi,'Q',x5,"Water")

h6 = CP.PropsSI('H','T',Tho,'Q',x6,"Water")

s5 = CP.PropsSI('S','T',Thi,'Q',x5,"Water")

s6 = CP.PropsSI('S','T',Tho,'Q',x6,"Water")

x7 = 0

x8 = 0

h7 = CP.PropsSI('H','T',Tci,'Q',x7,"Water")

h8 = CP.PropsSI('H','T',Tco,'Q',x8,"Water")

s7 = CP.PropsSI('S','T',Tci,'Q',x7,"Water")

s8 = CP.PropsSI('S','T',Tco,'Q',x8,"Water")

Elde edilen değerler kullanılarak her bir durum için özgül ekserji değerleri hesaplanır. Birimi kJ/kg'dır.

$$e_1 = (h_1 - h_0) - ((T_0)(s_1 - s_0)) \quad [\text{kJ/kg}] \quad (3.19)$$

$$e_2 = (h_2 - h_0) - ((T_0)(s_2 - s_0)) \quad [\text{kJ/kg}] \quad (3.20)$$

$$e_3 = (h_3 - h_0) - ((T_0)(s_3 - s_0)) \quad [\text{kJ/kg}] \quad (3.21)$$

$$e_4 = (h_4 - h_0) - ((T_0)(s_4 - s_0)) \quad [\text{kJ/kg}] \quad (3.22)$$

$$e_5 = (h_5 - h_0) - ((T_0)(s_5 - s_0)) \quad [\text{kJ/kg}] \quad (3.23)$$

$$e_6 = (h_6 - h_0) - ((T_0)(s_6 - s_0)) \quad [\text{kJ/kg}] \quad (3.24)$$

$$e_7 = (h_7 - h_0) - ((T_0)(s_7 - s_0)) \quad [\text{kJ/kg}] \quad (3.25)$$

$$e_8 = (h_8 - h_0) - ((T_0)(s_8 - s_0)) \quad [\text{kJ/kg}] \quad (3.26)$$

$$I_e = m_{kaynak}(e_5 - e_6) - m_{orc}(e_3 - e_2) \quad [\text{W}] \quad (3.27)$$

$$\eta_{evap} = \frac{m_{orc}(e_3 - e_2)}{m_{kaynak}(e_5 - e_6)} 100 \quad (3.28)$$

$$I_c = m_{orc}(e_4 - e_1) - m_{orc}(e_8 - e_7) \quad [\text{W}] \quad (3.29)$$

$$\eta_{cond} = \frac{m_{kond}(e_8 - e_7)}{m_{orc}(e_4 - e_1)} 100 \quad (3.30)$$

$$I_t = m_{orc}(e_3 - e_4) - W_t \quad [\text{W}] \quad (3.31)$$

$$\eta_{tur} = \frac{W_t}{m_{orc}(e_3 - e_4)} 100 \quad (3.32)$$

$$I_p = m_{orc}(e_1 - e_2) + W_p \quad [\text{W}] \quad (3.33)$$

$$\eta_{pump} = \frac{m_{orc}(e_2 - e_1)}{W_p} 100 \quad (3.34)$$

$$I_{total} = I_e + I_c + I_t + I_p \quad [\text{W}] \quad (3.35)$$

Daha sonra sisteme sağlanan ekserji hesaplanır.

$$Ex_{in} = (h_5 - h_6 - ((T_0)(s_5 - s_6)))m_{kaynak} \quad [W] \quad (3.36)$$

$$\eta_{II} = \left(\frac{W_{net}}{Ex_{in}}\right)100 \quad (3.37)$$

3.2.3. Ekonomi analizi

Ekserji hesaplamalarından sonra maliyet hesaplamalarına geçilir. Maliyet hesaplamalarının gerçekleştirilebilmesi için kullanıcı tarafından evaporatör ve kondenser için toplam ısı transfer katsayıları girilir. Aşağıdaki hesaplama ile yüzey alanları ve ısı değiştirici maliyetleri hesaplanır. $\Delta T_{ln,eva}$ terimi evaporatör logaritmik sıcaklık farkını ifade eder. Aynı denklem kondenser için de hesaplanır. Bu denklem ısı değiştiricilerin karşıt akışlı olduğu varsayımı için geçerlidir.

$$\Delta T_{ln,eva} = \frac{(T_{hi} - T_3) - (T_{ho} - T_2)}{\ln\left(\frac{T_{hi} - T_3}{T_{ho} - T_2}\right)} \quad (3.38)$$

$$A_{evap} = \frac{Q_{evap}}{U_{evap}\Delta T_{ln,eva}} \quad [m^2] \quad (3.39)$$

Yüzey alanı bulunduktan sonra Denklem (3.40), (3.41)'den ısı değiştirici maliyetleri hesaplanır.

$$C_{ICEva} = 1010(A_{eva})^{0.8} \quad [\$] \quad (3.40)$$

$$C_{ICKond} = 516.62(A_{kond})^{0.6} \quad [\$] \quad (3.41)$$

Aynı şekilde türbin ve pompa maliyetleri de Denklem (3.42), (3.43)'den hesaplanır. Daha sonra bu değerlerin toplamı olan ekipman kurulum maliyeti (Equipment installation cost-EIC) değeri bulunur.

$$C_{ICPo} = 200(W_p)^{0.65} \quad [\$] \quad (3.42)$$

$$C_{ICTur} = 516.62(W_{tur})^{0.75} \quad [\$] \quad (3.43)$$

$$EIC = C_{ICEva} + C_{ICKond} + C_{ICPo} + C_{ICTur} \quad [\$] \quad (3.44)$$

Hesaplanan EIC üzerine belirli maliyet kalemleri yüzdesel olarak eklenir. EIC ekipman kurulum maliyeti, C_{sc} yapısal maliyetleri, C_{sf} servis maliyetleri, C_{cont} beklenmedik maliyetleri, C_{lc} arazi maliyeti, C_{vc} çeşitli giderler, C_{wm} organik akışkan maliyeti, C_{cw} soğutma suyu maliyetini temsil etmektedir. Tüm maliyetler literatürdeki bazı kaynaklarda ayrı ayrı ele alınmaktadır. Lakin bu çalışmada ayrı ayrı incelemek yerine EIC üzerine %80'lik bir artış eklenerek toplam yatırım maliyeti (Total Investment Cost-TIC) değerleri hesaplanır (Bejan et al., 1996).

$$TIC = 1.8 * EIC \quad [\$] \quad (3.45)$$

$$SIC = \frac{EIC}{W_{net}} \quad [$/kW] \quad (3.46)$$

Toplam yatırım maliyeti hesaplandıktan sonra kullanıcı tarafından girilen güncel dolar cinsinden yıllık faiz oranı i ve beklenen kurulum ömrü N kullanılarak Anapara geri kazanım maliyeti (Capital Recovery Cost-CRC) hesaplanır. SIC terimi ise Özgül yatırım maliyeti (Specific Investment Cost)'ni temsil eder.

$$CRC = \frac{i(1+i)^N}{(1+i)^N - 1} * TIC \quad [\$] \quad (3.47)$$

Diğer bir ekonomik parametre ise Seviyelendirilmiş enerji maliyeti (Levelized Cost of Energy-LCOE)'dir. LCOE farklı enerji kaynaklarını birim enerji maliyeti cinsinde karşılaştırmada kullanılır ve aşağıdaki formül ile hesaplanır. Φ terimi süregelen bakım ve operasyonel giderleri temsil eder ve bu çalışmada toplam yatırım maliyetinin %1.5'una eşit olduğu kabul edilmiştir. n değeri ise yıllık operasyonel saati temsil eder.

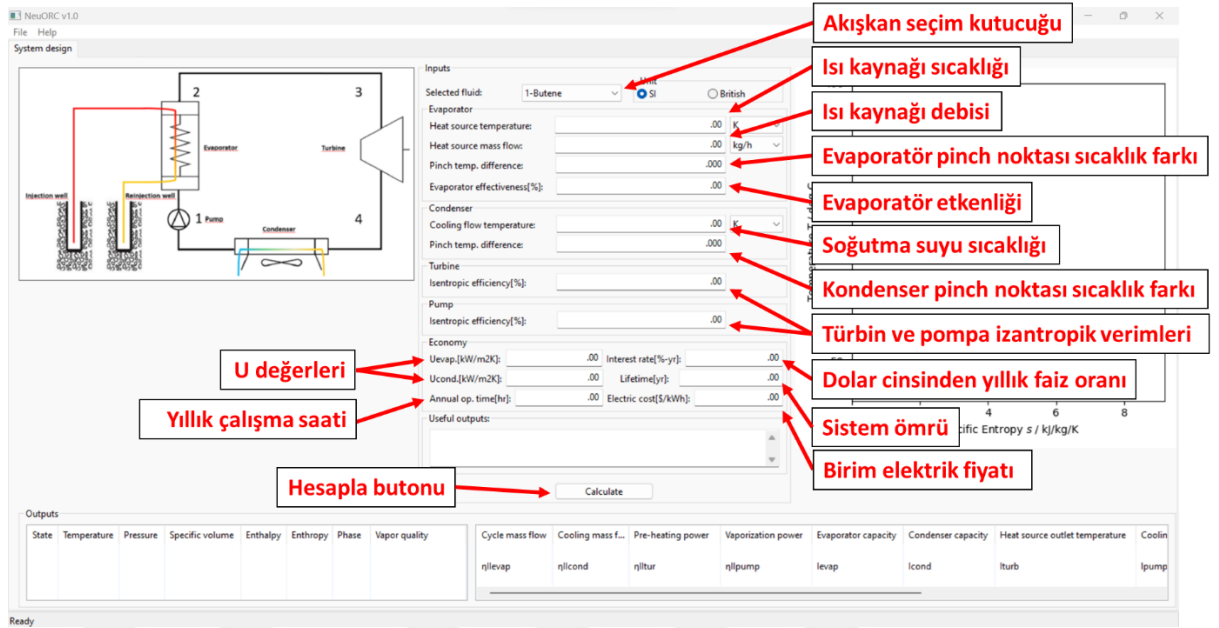
$$LCOE = \frac{CRC + \phi}{W_{net} * n} \quad [$/kWh] \quad (3.48)$$

Ekonomi kısmındaki en önemli parametrelerden biri ise yıl cinsinden Geri ödeme süresi (Payback time-PB)'dir. Bu çalışmada kullanılan fonksiyon logaritmik bir fonksiyon olup yatırım yapılan paranın zaman maliyetini de hesaba dahil etmektedir. c_{el} terimi ise kullanıcı tarafından girilen güncel birim kWh elektrik ücretidir (Aksar et al., 2022; Köse et al., 2022).

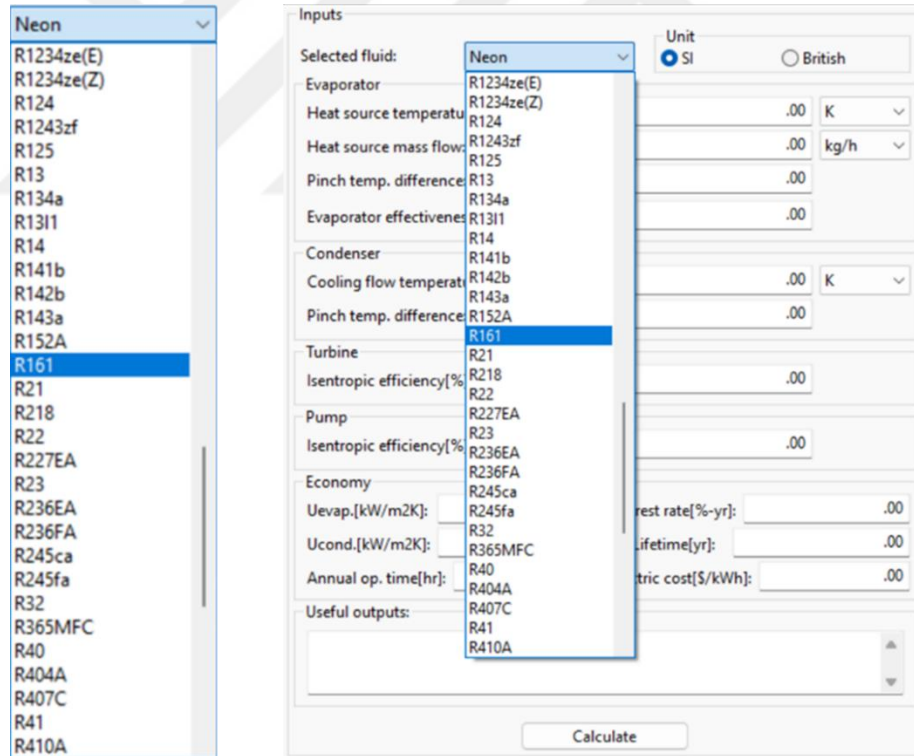
$$PB = \frac{\log \frac{(W_{net} * n * c_{el}) - \phi}{(W_{net} * n * c_{el}) - \phi - (i * TIC)}}{\log(1 + i)} \quad [yıl] \quad (3.49)$$

3.3. Geliştirilen programın kullanımı

NeuORC programı sistem dizaynı bölümünde temel olarak 9 verinin kullanıcı tarafından girilmesine ihtiyaç duymaktadır. Bunlar çevrim akışkanının türü ısı kaynak/kuyu sıcaklıkları, evaporatör/kondenser pinch noktası sıcaklık farkları, evaporatör etkenliği, türbin ve pompa izantropik verimleridir. Tüm bu verilerin kullanıcı tarafından tanımlanması gerekmektedir. Programın en önemli özelliği termodinamik çıktıların, ekonomik parametrelerin ve T-s diyagramının detaylı olarak tek bir sayfada kullanıcıya sunulmasıdır. Hesaplama programının çalıştırılabilmesi için ayrıca 6 adet ekonomik parametrenin de kullanıcı tarafından girilmesi gerekmektedir. Bunlar sırasıyla; Evaporatör/kondenser toplam ısı transfer katsayıları, dolar cinsinden yıllık faiz oranı, tahmini sistem ömrü, yıllık çalışma süresi ve güncel elektrik ücretidir. Programın genel görünümü ve girdi ekranı Şekil 3.5 ve Şekil 3.6'da gösterilmiştir.



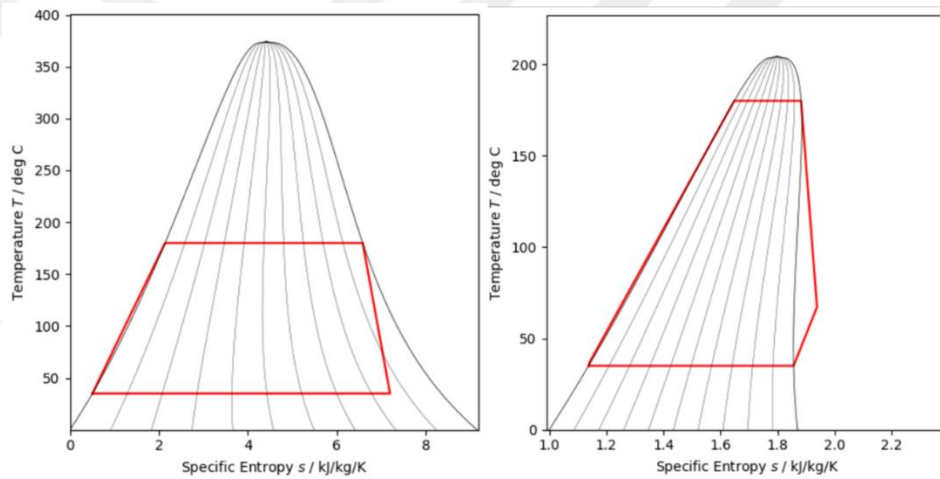
Şekil 3.5 NeuORC programı sistem dizaynı genel görünümü



Şekil 3.6 Girdiler ekranı ve akışkan listesi

Programda Coolprop kütüphanesinde tanımlı 123 farklı akışkan kullanıcı tarafından seçilebilmekte ve hesaplamalarda kullanılabilir. Program arayüzünde üç adet çıktı tablosu bulunmaktadır. Sol alt tabloda çevrimde ilgili noktalara karşılık gelen

sıcaklık, basınç, özgül hacim, entalpi, entropi ve faz bilgileri gibi parametreler gösterilmektedir. Sağ alt tabloda ise gerekli organik akışkan debisi ve soğutma sıvısı debisi, ön ısıtma gücü, buharlaştırma gücü, evaporatör kapasitesi, kondenser kapasitesi, sıcak/soğuk kaynak çıkış sıcaklıkları, pompa ve türbin gücü, elde edilen net güç, ısıl verim, toplam/komponentlere ait ikinci yasa verimleri, toplam/komponentlere ait ekserji yıkımları, sisteme giren ekserji gibi parametreler paylaşılmaktadır. Girdi kutucuklarının altında yer alan faydalı çıktılar tablosunda ise ekonomiye ait veriler paylaşılmaktadır. Bu veriler; sabit ve toplam yatırım maliyetleri (FIC, TIC), anapara geri kazanım maliyeti (CRC), seviyelendirilmiş enerji maliyeti (LCOE), özgül yatırım maliyeti (SIC) ve yatırım geri ödeme süresi (PB) şeklindedir.



Şekil 3.7 a) Çift fazlı genişleme b) Tek fazlı genişleme için T-s diyagramları

Girilen çevrime ait verilerin tablolarda paylaşılmasının yanında ilgili T-s diyagramları da kullanıcı ile ekranın sağ köşesinde paylaşılmaktadır. Seçilen akışkan türüne bağlı olarak tek ve çift fazlı genişleme prosesleri modellenmektedir.

Gerekli bilgiler girildikten sonra Şekil 3.8'de gösterildiği gibi çıktılar tablosunda sonuçlar kullanıcı ile paylaşılmaktadır. Proses noktalarındaki termodinamik özelliklerin dışında, gerekli çevrim kütleli debisi ve soğutma suyu debisi, ön ısıtma gücü, buharlaştırma gücü, evaporatör ve kondenser kapasitesi, komponentlerin ikinci yasa verimleri ve ekserji yıkımları, evaporatör ve kondenser çıkış sıcaklıkları, pompa ve türbin gücü, türbin basınç oranı, net güç, ısıl verim, ekserji girişi ve ikinci yasa verimi parametrelerdir.

Outputs							
State	Temperature	Pressure	Specific volume	Enthalpy	Entropy	Phase	Vapor quality
1	308.00	111702...	0.00082337	239935.7	1137.3...	twop...	
2	308.13	323718...	0.00082321	240168.5	1137.5...	liquid	
3	343.00	323718...	0.06892492	485034.0	1857.9...	twop...	
4	315.82	111702...	0.19347367	467683.6	1876.5...	qas	

Cycle mass flow	Cooling mass f...	Pre-heating power	Vaporization power	Evaporator capacity	Condenser capacity
0.0857 kg/s	0.9080 kg/s	3576.08 W	17416.67 W	20992.75 W	19525.22 W
η_{levap}	η_{lcond}	η_{ltur}	η_{lpump}	η_{evap}	η_{lcond}
77.37 %	25.02 %	75.86 %	75.80 %	753.55 W	473.16 W

Heat source outlet temperature	Cooling outlet temperature	Wpump	Wturbine	Turbi...	Wnet	$\eta_{thermal}$
344.92 K	303.14 K	19.95 W	1487.48 W	2.90	1467....	6.99 %
η_{turb}	η_{pump}	Exin	η_{ll}			
473.40 W	4.83 W	3330.3...	44.07 %			

Şekil 3.8 Çıktı tabloları

3.4. Modelin doğrulanması

Program çıktıları ticari bir program olan EES (Engineering Equation Solver) ile kontrol edilmiştir. NeuORC programı, açık kaynaklı bir termodinamik kütüphane kullanmaktadır. EES programı ise literatürden derlenmiş kendi özgün kütüphanesine sahiptir. Dolayısıyla hesaplamalar sırasında belirli farklar ortaya çıkmaktadır. NeuORC kodlarının bir kısmı EES programında EES kütüphanesini kullanacak şekilde yeniden yazılmıştır. Ortaya çıkan farklılıklardan biri kütüphaneler arasında referans entalpi ve entropi farklılıklarının olmasıdır. Örneğin; EES kütüphanesinde R11 akışkanının entalpi ve entropi referans sıcaklığı -40 Kelvin iken CoolProp kütüphanesinde aynı akışkanın referans sıcaklığı mutlak sıfırdır. Bu durum elde edilen sonuçları değiştirmezken, değerlendirme noktasında karışıklıklara yol açmaktadır. Bu sebeple hem EES hem de CoolProp kütüphanesinde mevcut ve referans sıcaklığı mutlak sıfır olan R123 akışkan doğrulama çalışması için seçilmiştir. Şekil 3.9'da gösterildiği gibi 180, 150 ve 120 °C ısı kaynak sıcaklıkları için diğer özellikleri sabit olmak üzere üç ayrı durum her iki programda da çözülmüştür. Elde edilen değerler Çizelge 3.6'da karşılaştırılmıştır.

{Bilinenler}
 $T_{src} = 393,15$ [K]
 $T_{sink} = 298,15$ [K]
 $m_{src} = 1$ [kg/s]
 $m_{sink} = 1$ [kg/s]
 $orc_fluid\$ = 'R123'$
 $src_fluid\$ = 'Water'$
 $cnd_fluid\$ = 'Water'$
 $DT_{evap_pinch} = 5$ [K]
 $DT_{cond_pinch} = 5$ [K]
 $\epsilon_{evap} = 70$ [%]
 $\epsilon_{cond} = 70$ [%]
 $turb_eff = 75$ [%]
 $pump_eff = 65$ [%]
 $Turb_out_pre = 120000$ [Pa]

Inputs

Selected fluid: R123 Unit: SI British

Evaporator

Heat source temperature: 393.15 K

Heat source mass flow: 1.00 kg/s

Pinch temp. difference: 5.00

Heat source fluid: Water

Evaporator effectiveness[%]: 70.00

Condenser

Cooling flow temperature: 298.15 K

Cooling flow mass flow: 1.00 kg/s

Pinch temp. difference: 5.00

Heat sink fluid: Water

Condenser effectiveness[%]: 70.00

Turbine

Turbine outlet pressure(abs.): 120000.00 Pa

Isentropic efficiency[%]: 70.00

Pump

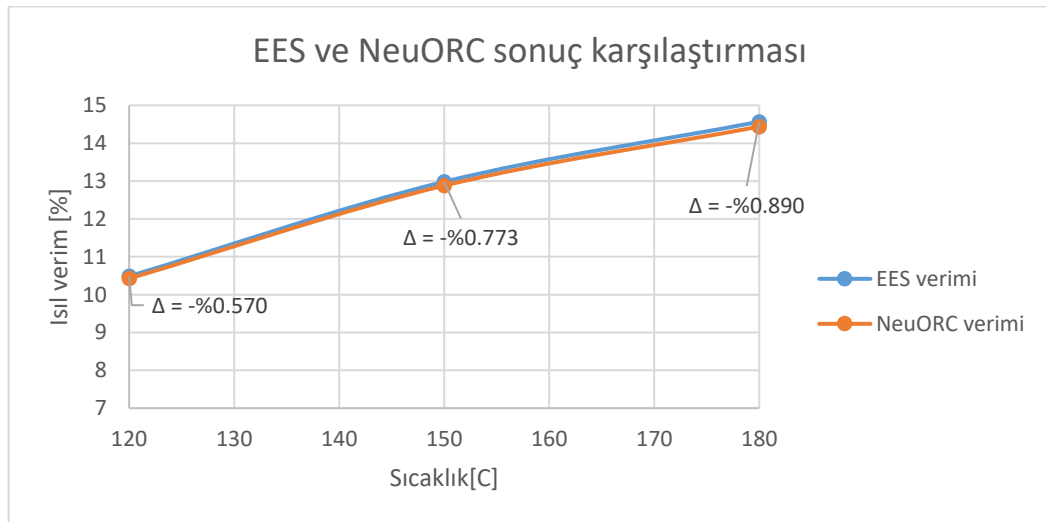
Isentropic efficiency[%]: 65.00

Calculate

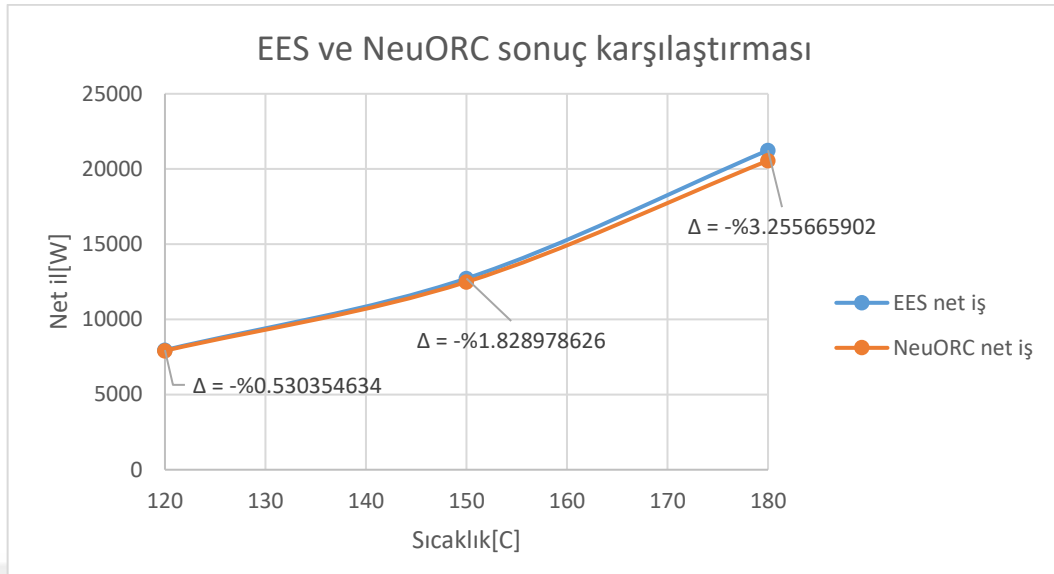
Şekil 3.9 Doğrulama testi girdileri

Çizelge 3.6 Doğrulama testi sonuçları karşılaştırması

R123	Farklı ısı kaynağı sıcaklıklarında karşılaştırma		
	180 °C	150 °C	120 °C
EES verimi	14.567	12.970	10.515
NeuORC verimi	14.437	12.880	10.424
EES net iş	21245.120	12719.263	7956.940
NeuORC net iş	20553.450	12486.630	7914.740



Şekil 3.10 Verim sonuçlarının gösterdiği yüzdesel farklılıklar



Şekil 3.11 Net iş sonuçlarının gösterdiği yüzdesel farklılıklar

4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA

4.1. Parametrik çalışma

Parametrik çalışma bölümünde R141b, R123 ve R245fa akışkanları için 100 °C, 130 °C ve 160 °C olmak üzere üç farklı sıcaklık değerinde sırasıyla, W_{net} , $\eta_{ısı}$, η_{II} , LCOE, PB ve SIC parametreleri $\Delta T_{pp,evap}$ değişkenine bağlı olarak incelenmiştir. Sabit tutulan parametreler ve problem kısıtları Çizelge 4.1’de belirtilmiştir. T_3 evaporatör sıcaklığı ve $T_{c,o}$ kondenser çıkış sıcaklığı problem kısıtları olarak tanımlanmıştır. Bu kısıtların uygulanması ile ekstrem değerler çözümden atılmıştır. Çalışmada aşırı kızdırma uygulanmamıştır.

Çizelge 4.1 İncelenen parametreler ve kısıtlamalar

$T_{h,i} = 100 \text{ °C}, 130 \text{ °C ve } 160 \text{ °C}$
$5 \text{ °C} < \Delta T_{pp,evap} < 20 \text{ °C}, \epsilon_{evap} = \%75$
$m_{kaynak} = 1000 \text{ kg/h}$
$T_{c,i} = 25 \text{ °C}, \Delta T_{pp,kond} = 5 \text{ °C}$
$\eta_{tur} = \%75, \eta_{po} = \%75$
$T_3 > 65 \text{ °C}, T_{c,o} > 70 \text{ °C}$
$U_{evap} = 0,88 \text{ kW/m}^2\text{K}, U_{cond} = 0,15 \text{ kW/m}^2\text{K}$

$$i = \%15, N = 20, n = 8200, c_{el} = 0,1 \$/kWh$$

İncelenen akışkanlara ait önemli termodinamik parametreler Çizelge 4.2’de paylaşılmıştır.

Çizelge 4.2 Akışkan özellikleri tablosu(Bell vd., 2014; JM Calm, 2007)

Akışkan özellikleri	R141b	R123	R245fa
Molekül ağırlığı(g/mol)	116.94	152.93	134.04
Kaynama noktası(°C)	32.04	27.82	15.04
Kritik sıcaklık değeri(°C)	204.35	183.68	153.86
Kritik basınç değeri (MPa)	4.212	3.672	3.651
ASHRAE standart güvenlik sınıfı	n.a	B1	A1
ODP	0.12	0.02	0
GWP	725	77	1030

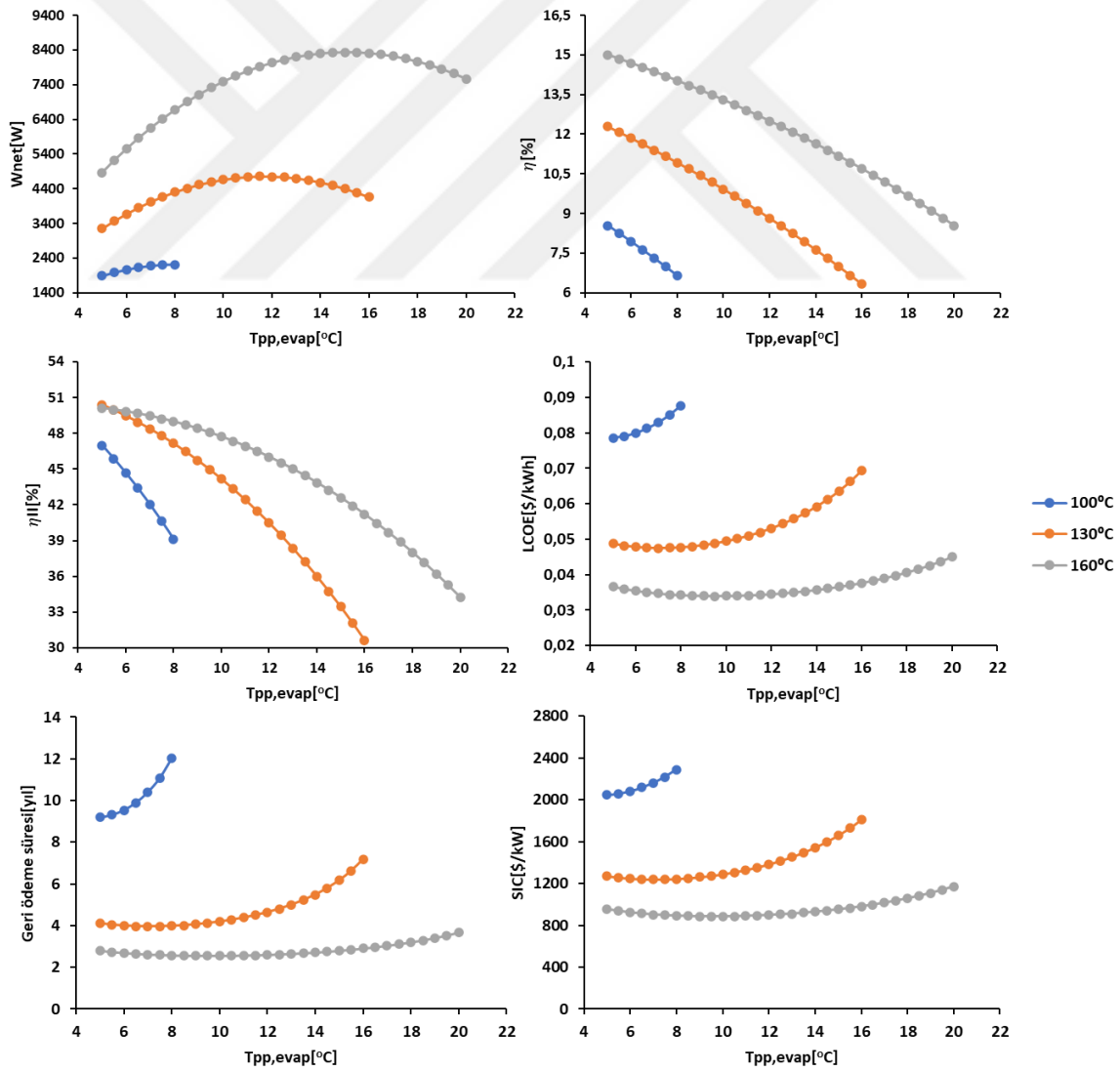
Gerçekleştirilen çalışmaya göre elde edilen bazı genel bulgular aşağıda paylaşılmıştır.

- W_{net} ’in ΔT_{pp} değerinin artmasıyla sürekli bir artış kaydetmediği ve belirli bir noktadan sonra azalma yaklaşımı gösterdiği görülmüştür.
- Isıl verimin (η) akışkan türü ve sıcaklıktan bağımsız olarak ΔT_{pp} değerinin artmasıyla sürekli olarak azaldığı görülmüştür.
- LCOE, PB ve SIC parametreleri birbirleriyle benzer değişimler göstermektedir. Bu parametreler sıcaklığın artması ile azalmaktadır.
- Ekserji verimin (η_{II}) incelendiğinde ise sıcaklık ve akışkan türünden bağımsız olarak ΔT_{pp} ’nin 5 K olduğu durumlarda %50 civarında görülmüştür. Düşük sıcaklıklı ısı kaynağına sahip olunan durumlarda ΔT_{pp} arttırıldığında ekserji verimi azalışının yüksek sıcaklıklı ısı kaynaklı durumlara nazaran daha fazla olduğu görülmüştür.
- Aynı sıcaklıktaki güç çıktılarını sırasıyla $W_{R245fa} > W_{R123} > W_{R141b}$ olmaktadır. Farklı akışkanlarda sabit ısı kaynağı sıcaklığında evaporatör kapasitesi sabit kaldığı için ısı verimleri sırasıyla $\eta_{R141b} > \eta_{R123} > \eta_{R245fa}$ olmaktadır.

4.1.1. R141b akışkanı için parametrik sonuçlar

R141b akışkanı için gerçekleştirilen parametrik çalışmaya dair detaylar Şekil 4.1’de verilmiştir.

- 100 °C, 130 °C ve 160 °C sıcaklıkları için W_{net} 'in maksimum olduğu $\Delta T_{pp,evap}$ değerleri sırasıyla 8 °C, 11.5 °C ve 15 °C olduğu bulunmuştur. Bu pinch noktası değerlerinde güç çıktıları sırasıyla 2122.03 W, 4750.94 W ve 8297.69 W'tır.
- 100 °C, 130 °C ve 160 °C sıcaklıkları için LCOE, PB ve SIC değerlerinin minimum olduğu $\Delta T_{pp,evap}$ değerlerinin sırasıyla 5 °C, 7 °C ve 9.5 °C olduğu bulunmuştur.
- LCOE değerleri sırasıyla 0,07856 \$/kWh, 0,04750 \$/kWh ve 0,03392 \$/kWh şeklindedir.
- PB değerleri ise 9,18 yıl, 3,96 yıl ve 2,55 yıl olarak bulunmuştur.
- SIC değerleri ise 2047,92 \$/kW, 1238,26 \$/kW ve 884,40 \$/kW olarak elde edilmiştir.

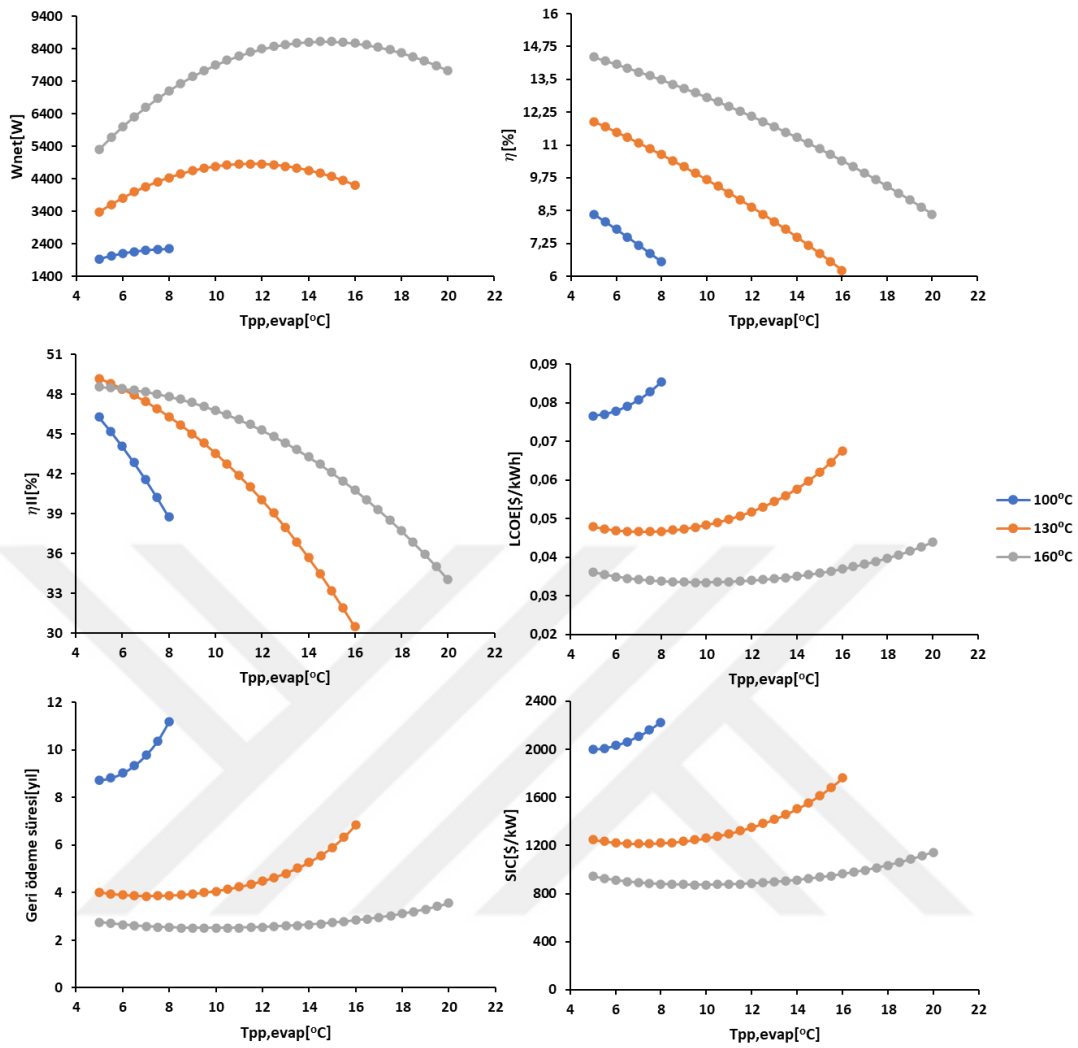


Şekil 4.1 R141b akışkanı için farklı sıcaklığa göre değişim grafikleri

4.1.2. R123 akışkanı için parametrik sonuçlar

R123 akışkanı için gerçekleştirilen parametrik çalışmaya dair detaylar Şekil 4.2’de verilmiştir.

- 100 °C, 130 °C ve 160 °C sıcaklıkları için W_{net} ’in maksimum olduğu ΔT_{pp} değerleri sırasıyla 8 °C, 11,5 °C ve 14,5 °C olduğu bulunmuştur. Bu pinch noktası değerlerinde güç çıktıları sırasıyla 2243,23 W, 4860,70 W ve 8624,36 W şeklindedir.
- 100 °C, 130 °C ve 160 °C sıcaklıkları için LCOE, PB ve SIC değerlerinin minimum olduğu ΔT_{pp} değerlerinin sırasıyla 5 °C, 7 °C ve 9.5 °C olduğu bulunmuştur.
- LCOE değerleri sırasıyla 0,07664 \$/kWh, 0,04663 \$/kWh ve 0,03350 \$/kWh şeklindedir.
- PB değerleri ise 8,71 yıl, 3,85 yıl ve 2,51 yıl olarak bulunmuştur.
- SIC değerleri ise 1997,83 \$/kW, 1215,58 \$/kW ve 873,48 \$/kW olarak elde edilmiştir.



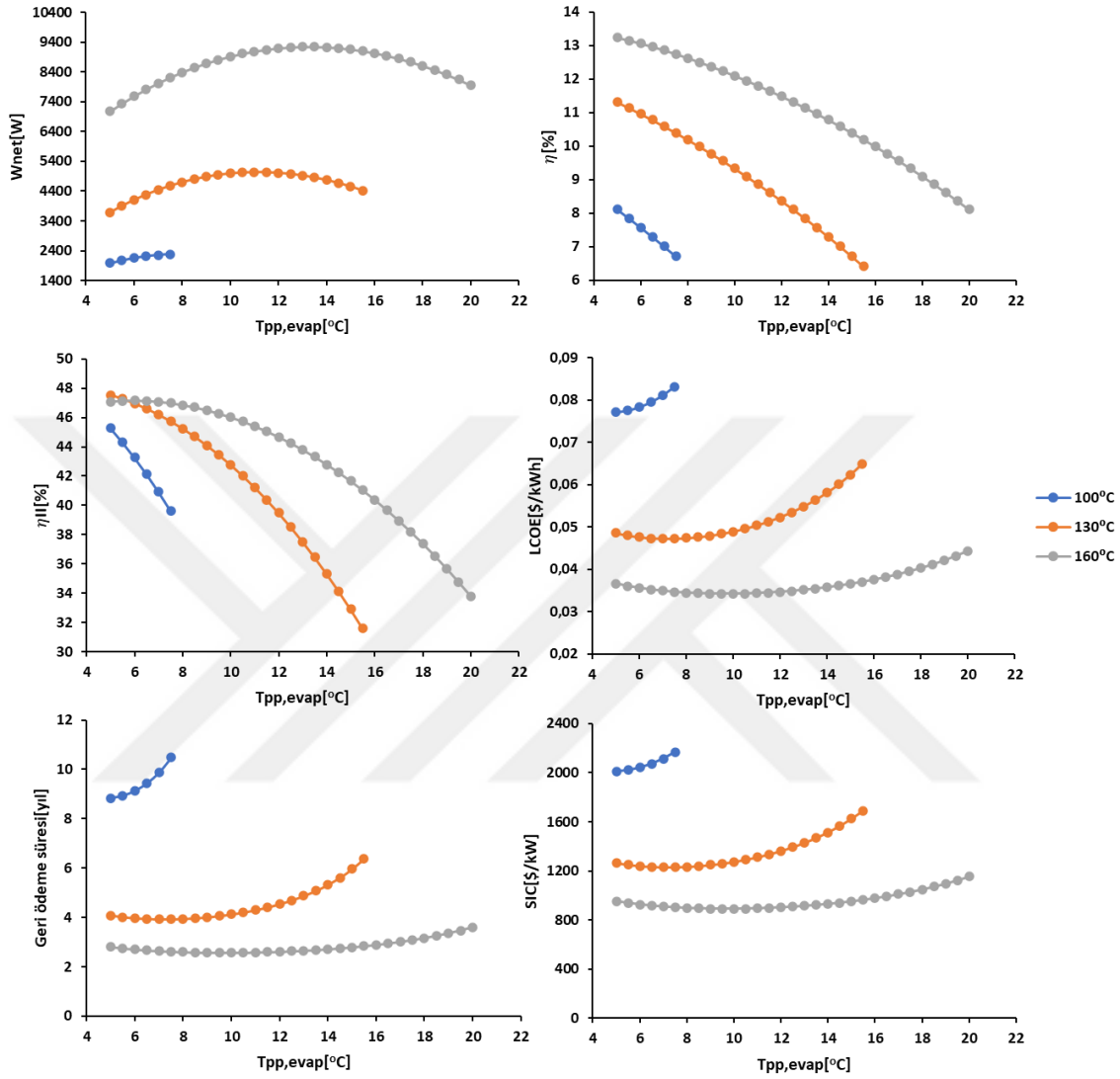
Şekil 4.2 R123 akışkanı için farklı sıcaklığa göre değişim grafikleri

4.1.3. R245fa akışkanı için parametrik sonuçlar

R245fa akışkanı için gerçekleştirilen parametrik çalışmaya dair detaylar Şekil 4.3'te verilmiştir.

- 100 °C, 130 °C ve 160 °C sıcaklıkları için W_{net} 'in maksimum olduğu ΔT_{pp} değerleri sırasıyla 7,5 °C, 11 °C ve 13,5 °C olduğu bulunmuştur. Bu pinch noktası değerlerinde güç çıktıları sırasıyla 2277,95 W, 5036,13 W ve 9243,08 W şeklindedir.
- 100 °C, 130 °C ve 160 °C sıcaklıkları için LCOE, PB ve SIC değerlerinin minimum olduğu ΔT_{pp} değerlerinin sırasıyla 5 °C, 7 °C ve 9.5 °C olduğu bulunmuştur.
- LCOE değerleri sırasıyla 0,0771 \$/kWh, 0,0472 \$/kWh ve 0,0341 \$/kWh şeklindedir.
- PB değerleri ise 8,83 yıl, 3,92 yıl ve 2,57 yıl olarak bulunmuştur.

- SIC değerleri ise 2010,55 \$/kW, 1231,40 \$/kW ve 892,20 \$/kW olarak elde edilmiştir.



Şekil 4.3 R245fa akışkanı için farklı sıcaklığa göre değişim grafikleri

4.2. NSGA-II optimizasyon çalışması

Çalışmanın bu kısmında NSGA-II algoritması kullanılarak çok amaçlı proses optimizasyonu çalışması yürütülmüştür. Materyal ve metot bölümünde bahsedildiği üzere açık kaynaklı Pymoo kütüphanesinden faydalanılmıştır. Parametrik çalışma bölümünde olduğu gibi R245fa, R123 ve R141b akışkanları için 100 °C, 130 °C ve 160 °C sıcaklıkları için hesaplamalar gerçekleştirilmiştir. Amaç fonksiyonu olarak LCOE - η_{II} , LCOE - W_{net} çiftleri kullanılmıştır. LCOE parametresinin minimizasyonu, η_{II} ve W_{net} parametrelerinin ise maksimizasyonu amaçlanmıştır. Parametrik çalışma bölümündeki

sınır koşullarına ek olarak T_3 üzerine aşırı kızdırma uygulanmıştır. Uygulanan aşırı kızdırma sıcaklık farkı T_{sup} olarak tanımlanmıştır. $0\text{ }^\circ\text{C} < T_{sup} < 10\text{ }^\circ\text{C}$ sıcaklık aralığında tutulmuştur. $\Delta T_{pp,evap}$ ve T_{sup} parametreleri değişken olarak alınıp diğer parametreler sabit tutulmuştur. Güncellenen girdi parametreleri aşağıda belirtilmiştir.

Sabitler:

- $T_{h,i} = 100\text{ }^\circ\text{C}, 130\text{ }^\circ\text{C}$ ve $160\text{ }^\circ\text{C}$
- $\varepsilon_{evap} = \%75$
- $m_{kaynak} = 1000\text{ kg/h}$
- $T_{c,i} = 25\text{ }^\circ\text{C}, \Delta T_{pp,kond} = 5\text{ }^\circ\text{C}$
- $\eta_{tur} = \%75, \eta_{po} = \%75$
- $i = \%15, N = 20\text{ yıl}, n = 8200\text{ saat}, c_{el} = 0.1\text{ } \$/\text{kW/h}$

Değişkenler:

- $5\text{ }^\circ\text{C} < \Delta T_{pp,evap} < 20\text{ }^\circ\text{C}$
- $0\text{ }^\circ\text{C} < T_{sup} < 10\text{ }^\circ\text{C}$

Kısıtlar:

- $T_3 > 65\text{ }^\circ\text{C}, T_{c,o} > 70\text{ }^\circ\text{C}$

NSGA-II algoritmasına ait girdi değerleri ise aşağıda paylaşılmıştır. Çalışma sonucunda elde edilen pareto eğrileri ve tablolar alt bölümlerde detaylı bir şekilde incelenmiştir.

- A noktaları y eksenindeki değişkenin diğer değişkene bağlı olmaksızın minimum olduğu noktayı,
- B değişkeni %50 ağırlıklı karar noktasını,
- C noktası ise x eksenindeki eksenindeki değişkenin diğer değişkene bağlı olmaksızın maksimum olduğu noktayı temsil etmektedir.
- %30 karar noktası x eksenindeki maksimize edilmek istenen değer için %30 öneme sahip olduğu, y eksenindeki minimize edilmek istenen değer için ise %70 öneme sahip olduğu karar noktasını temsil etmektedir. Aynı durum %70 karar noktası için de geçerlidir. Karar noktaları her bir akışkan için çizelgelerde paylaşılmıştır.

Çizelge 4.3’de NSGA-II algoritması için kullanılan parametreler belirtilmektedir.

Çizelge 4.3 NSGA-II çözüm parametreleri

Popülasyon büyüklüğü = 1000
Yavru sayısı (Offsprings) = 200
Örnekleme yöntemi = FloatRandomSampling
Çaprazlama yöntemi = SBK (Simulated Binary Crossover)
Çaprazlama olasılığı = 0.9, eta = 15
Mutasyon yöntemi = PM (Polynomial Mutation), eta = 20

4.2.1. 100 °C ısı kaynağı altında çalışma sonuçları

Çizelge 4.4 ve Şekil 4.4 incelendiğinde aşağıdaki bulgulara ulaşılmıştır.

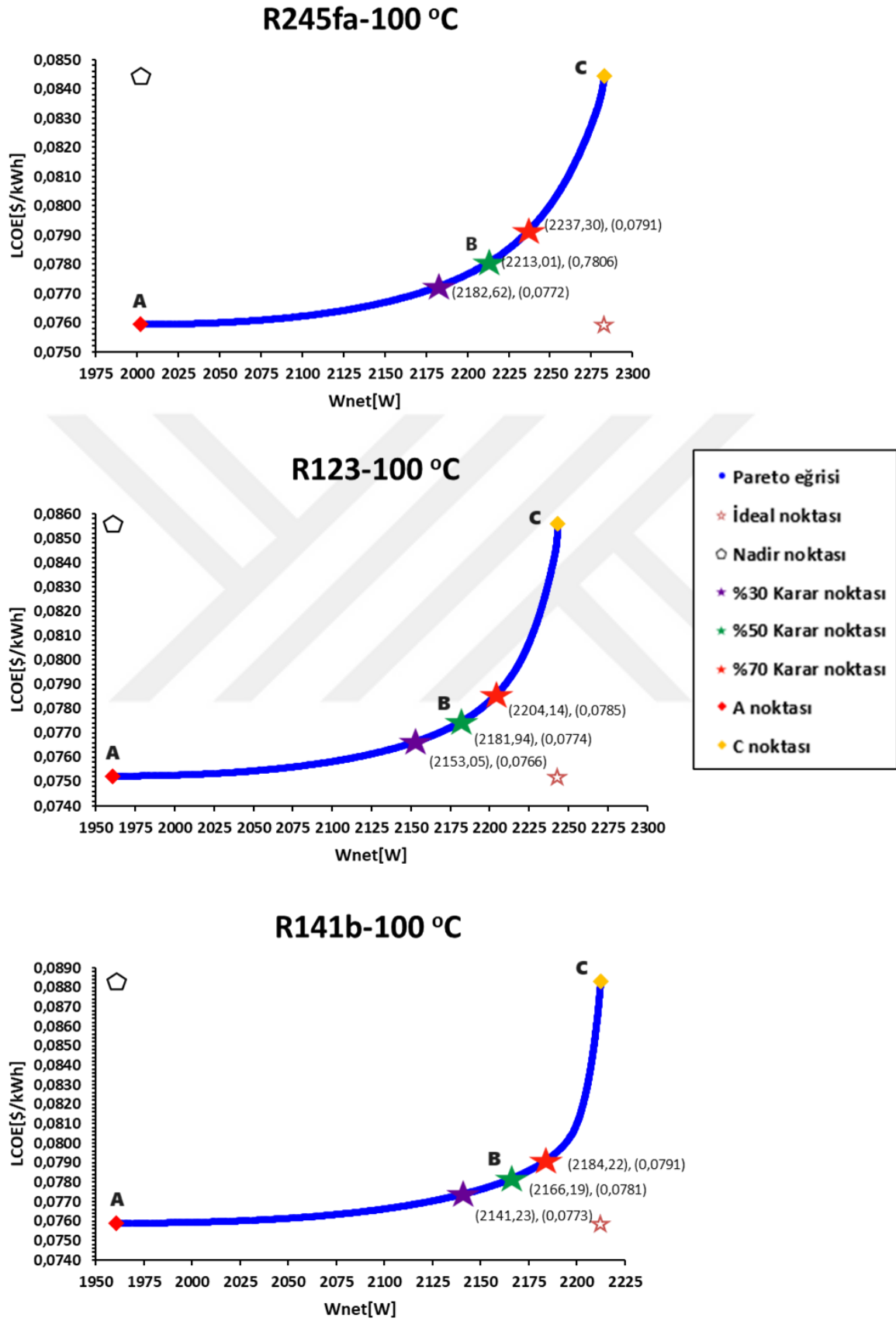
- Noktalar karşılaştırıldığında en yüksek güç çıktısının daima R245fa akışkanı ile alındığı görülmektedir. En düşük LCOE %30, %50 ve %70 karar noktalarında R123 akışkanı ile elde edilmektedir.
- R245fa daha diğer akışkanlara göre daha yüksek evaporatör basıncına ihtiyaç duymaktadır. R141b akışkanı daima en düşük evaporatör basıncına sahip olmaktadır.
- R245fa akışkanı tüm noktalarda diğer akışkanlara göre daha düşük pinch noktası sıcaklık farkı ve kızdırma sıcaklığına ihtiyaç duymaktadır.
- En yüksek ısıl verim tüm noktalar için R141b akışkanı ile elde edilmektedir.
- En erken geri ödeme süresi, sadece W_{net} ‘in maksimize edildiği C noktasında R245fa akışkanı ile minimum 10,88 yıl olurken, A ve B noktası için R123 akışkanı ile minimum 8,39 yıl olarak elde edilmektedir.
- R123 ve R141b akışkanlarında tüm karar noktalarında T_{sup} problem limiti olan 10 °C değerine yaklaşmaktadır. Bu akışkanlar için T_{sup} parametresinin belirlenen değer aralığında iki amaç fonksiyonuna da katkı sağladığı söylenebilir.

Çizelge 4.4 100 °C LCOE-Wnet çıktıları tablosu

	A noktası			B noktası			C noktası		
	R245fa	R123	R141b	R245fa	R123	R141b	R245fa	R123	R141b
T _{pp} [°C]	5,21	5,24	5,42	6,84	6,99	7,09	7,76	8,03	8,10
T _{sup} [°C]	6,50	7,22	9,25	7,15	9,39	9,99	0,01	0,01	0,01
T ₃ [°C]	85,67	86,24	87,58	79,80	81,42	81,62	68,98	67,88	67,60

P3[Pa]	772725	477150	404066	653575	398184	339541	592767	356101	304457
Wnet [W]	2001,75	1960,51	1960,51	2213,02	2181,94	2166,20	2283,02	2243,27	2212,39
η_{isil} [%]	7,99	8,22	8,30	7,09	7,18	7,27	6,56	6,53	6,59
η_{II} [%]	44,73	45,67	46,09	41,13	41,46	41,82	38,92	38,65	38,80
LCOE [\$/kWh]	0,07594	0,07523	0,07589	0,07806	0,07746	0,07818	0,08444	0,08560	0,08832
PB [yıl]	8,55	8,39	8,54	9,06	8,91	9,09	10,88	11,27	12,28
SIC [\$/kW]	1979,60	1961,01	1978,37	2034,87	2019,22	2038,05	2201,22	2231,27	2302,14





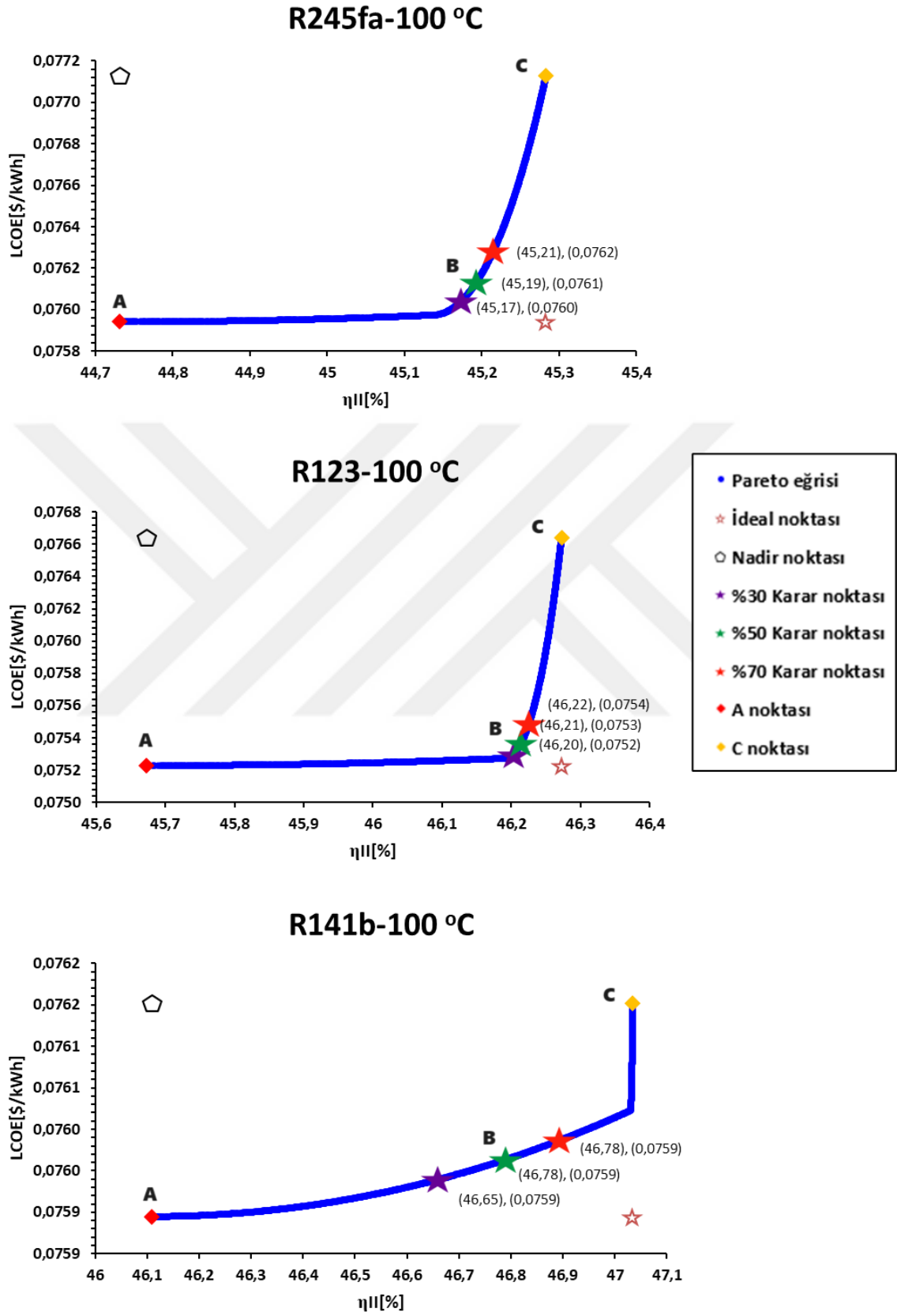
Şekil 4.4 100 °C LCOE-Wnet için elde edilen pareto eğrileri

Çizelge 4.5 ve Şekil 4.5 incelendiğinde aşağıdaki bulgulara ulaşılmıştır.

- Maksimize edilecek olan amaç fonksiyonlarından biri ekserji verimi olarak değiştirildiğinde tüm akışkanlar için A noktalarındaki çıktılar sadece LCOE'ya bağlı olduğu için sabit kalmaktadır.
- B noktasına bakıldığında tüm akışkanlar için pinch point sıcaklığı 5 °C'ye yakınsamaktadır.
- Karar noktaları için T_{kzd} değerleri R245fa, R123, R141b için sırasıyla 3,81 °C, 4,94 °C ve 8,53 °C olarak elde edilmiştir. R141b akışkanı için karar aralığının çok dar olduğu, pinch point sıcaklığının neredeyse sabit kaldığı ve karar sonuçlarında T_{kzd} değişimlerinin baskın olduğu sonucuna varılmıştır.
- R123 akışkanın pareto eğrisinde karar noktaları çok yakın bir bölgeye kümelenmiş olup problem pinch point sıcaklığının 5 °C, kızdırma sıcaklığının 5 °C olduğu duruma yakınsamaktadır.
- Tüm noktalarda ekserji verimliliği R141b akışkanında en yüksek noktaya ulaşmaktadır. R141b akışkanının pareto eğrisi incelendiğinde ekserji verimini maksimize ederken belirli bir noktadan sonra LCOE maliyetinin çok ani bir şekilde artmaya başladığı görülmektedir. Benzeri durumun R123 akışkanı için de gerçekleştiği söylenebilir.
- LCOE - W_{net} çıktılarıyla karşılaştırıldığında tüm noktalarda daha kısa geri ödeme süreleri elde edilmiştir. Aynı şekilde karar noktaları için daha düşük LCOE ve SIC değerleri elde edilmiştir.

Çizelge 4.5 100 °C LCOE- η_{II} çıktıları tablosu

	A noktası			B noktası			C noktası		
	R245fa	R123	R141b	R245fa	R123	R141b	R245fa	R123	R141b
T _{pp} [°C]	5,21	5,24	5,41	5,00	5,00	5,11	5,00	5,00	5,00
T _{sup} [°C]	6,50	7,23	9,24	3,81	4,94	8,53	0,01	0,01	10,00
T ₃ [°C]	85,68	86,25	87,60	83,81	84,94	88,09	80,01	80,01	90,00
P ₃ [Pa]	772870	477205	404418	789008	489087	416955	789008	489088	421578
W _{net} [W]	2001,39	1960,28	1959,00	1973,19	1918,38	1902,99	1990,53	1931,94	1878,69
η_{isil} [%]	7,99	8,22	8,31	8,11	8,36	8,48	8,11	8,36	8,55
η_{II} [%]	44,73	45,67	46,11	45,19	46,21	46,79	45,28	46,27	47,03
LCOE [\$/kWh]	0,07594	0,07523	0,07589	0,07613	0,07537	0,07596	0,07713	0,07664	0,07615
PB [yıl]	8,55	8,39	8,54	8,59	8,42	8,55	8,83	8,71	8,60
SIC [\$/kW]	1979,60	1961,01	1978,37	1984,61	1964,60	1980,16	2010,56	1997,84	1985,08



Şekil 4.5 100 °C LCOE- η_{II} için elde edilen pareto eğrileri

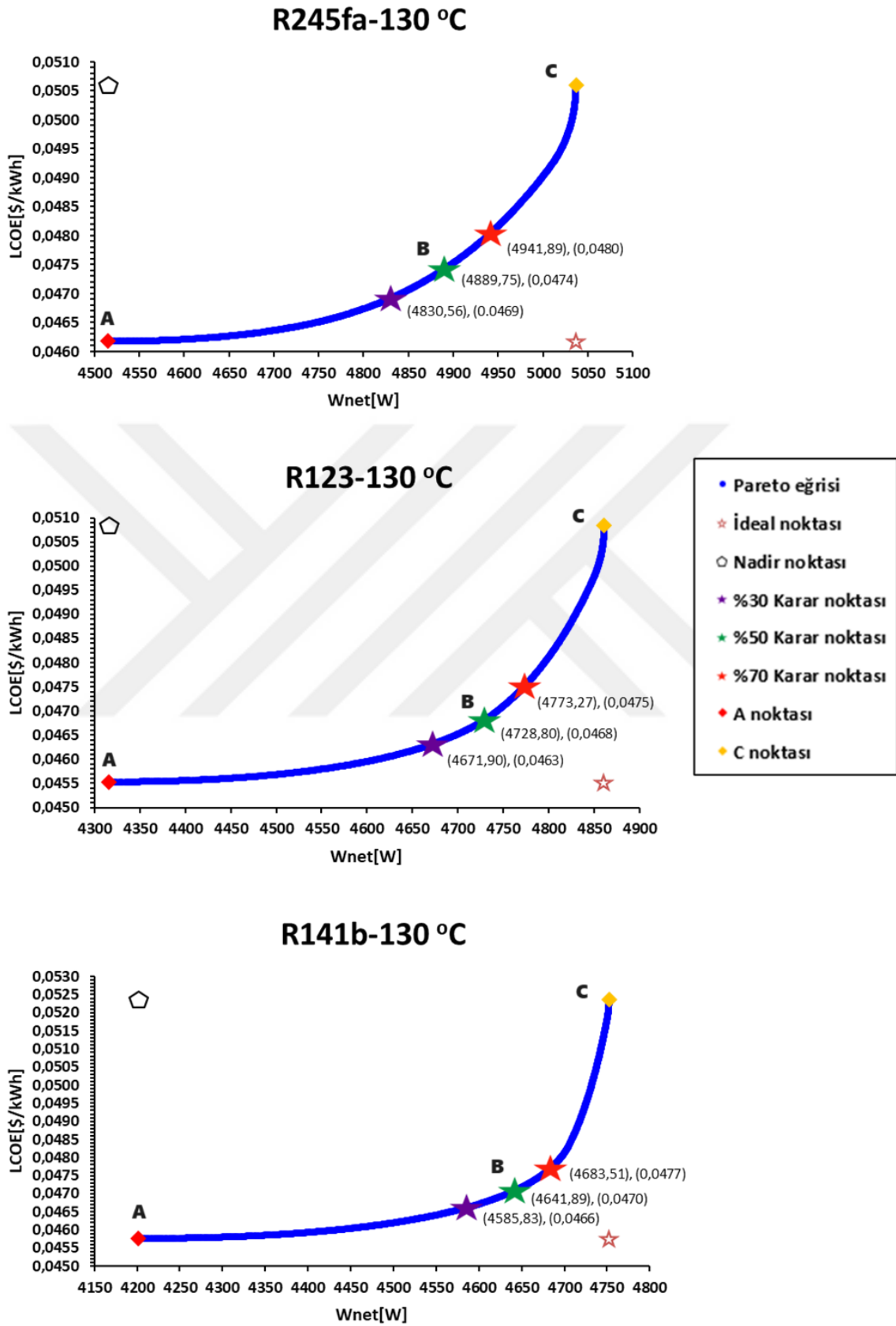
4.2.2. 130 °C ısı kaynağı altında çalışma sonuçları

Çizelge 4.6 ve Şekil 4.6 incelendiğinde aşağıdaki bulgulara ulaşılmıştır.

- Tüm akışkanlarda pinch noktası sıcaklık farkı değerleri % 50 karar noktası için 10 °C civarına çıkmıştır.
- R245fa akışkanı için gerekli evaporatör basıncı R141b'e göre yaklaşık 2 kat daha fazladır.
- Maksimum verim R141b akışkanı ile A noktasında elde edilmiştir ve %11,05 verim değerine ulaşılmıştır.
- Tüm akışkanlar için elde edilen güç çıktıları, 100 °C'de üretilen güç çıktılarına göre yaklaşık 2,3 kat artmıştır.
- Sadece LCOE'nin minimize edildiği A noktasında tüm akışkanlar için T_{kzd} maksimum limit olan 10 °C'ye ulaşmıştır. T_{kzd} 'nin LCOE, geri ödeme süresi ve SIC parametrelerini minimize etmede etki ettiği görülmektedir.
- Isıl kaynak sıcaklığının 30 derece artırılması ile tüm akışkanlar için ısıl verim yaklaşık %7'den, % 10'a çıkmıştır.
- Akışkandan ve koşullardan bağımsız olarak ekserji verimi %46-47 bandının dışına çıkmamaktadır. Ekserji verimi ile ısıl verim doğru orantılıdır.
- Isı kaynağı sıcaklığının artmasıyla beraber geri ödeme süreleri yaklaşık 8,5 yıldan 4 yıla, LCOE değerleri ise yaklaşık 0,0750 \$/kWh değerlerinden 0,0460 \$/kWh değerlerine azalmıştır.

Çizelge 4.6 130 °C LCOE-Wnet çıktıları tablosu

	A noktası			B noktası			C noktası		
	R245fa	R123	R141b	R245fa	R123	R141b	R245fa	R123	R141b
T _{pp} [°C]	7,87	7,85	7,82	9,92	10,28	10,29	11,14	11,53	11,70
T _{sup} [°C]	10,00	10,00	10,00	6,92	9,94	10,00	0,01	0,01	0,01
T ₃ [°C]	108,53	108,59	108,73	97,23	98,80	98,84	85,45	83,88	83,21
P ₃ [Pa]	1223997	761046	658304	1013120	607588	523627	902127	538536	456574
W _{net} [W]	4515,00	4315,69	4201,95	4889,76	4728,80	4641,90	5036,80	4860,73	4752,36
η _{ısıl} [%]	10,25	10,70	11,05	9,36	9,53	9,79	8,80	8,89	8,99
η _{II} [%]	45,10	46,34	47,41	42,66	42,93	43,69	41,01	40,94	41,08
LCOE [\$/kWh]	0,04618	0,04553	0,04577	0,04742	0,04681	0,04709	0,05060	0,05084	0,05237
PB [yıl]	3,81	3,74	3,76	3,95	3,88	3,91	4,33	4,36	4,55
SIC [\$/kW]	1203,72	1186,89	1193,09	1236,24	1220,28	1227,56	1318,99	1325,26	1365,27



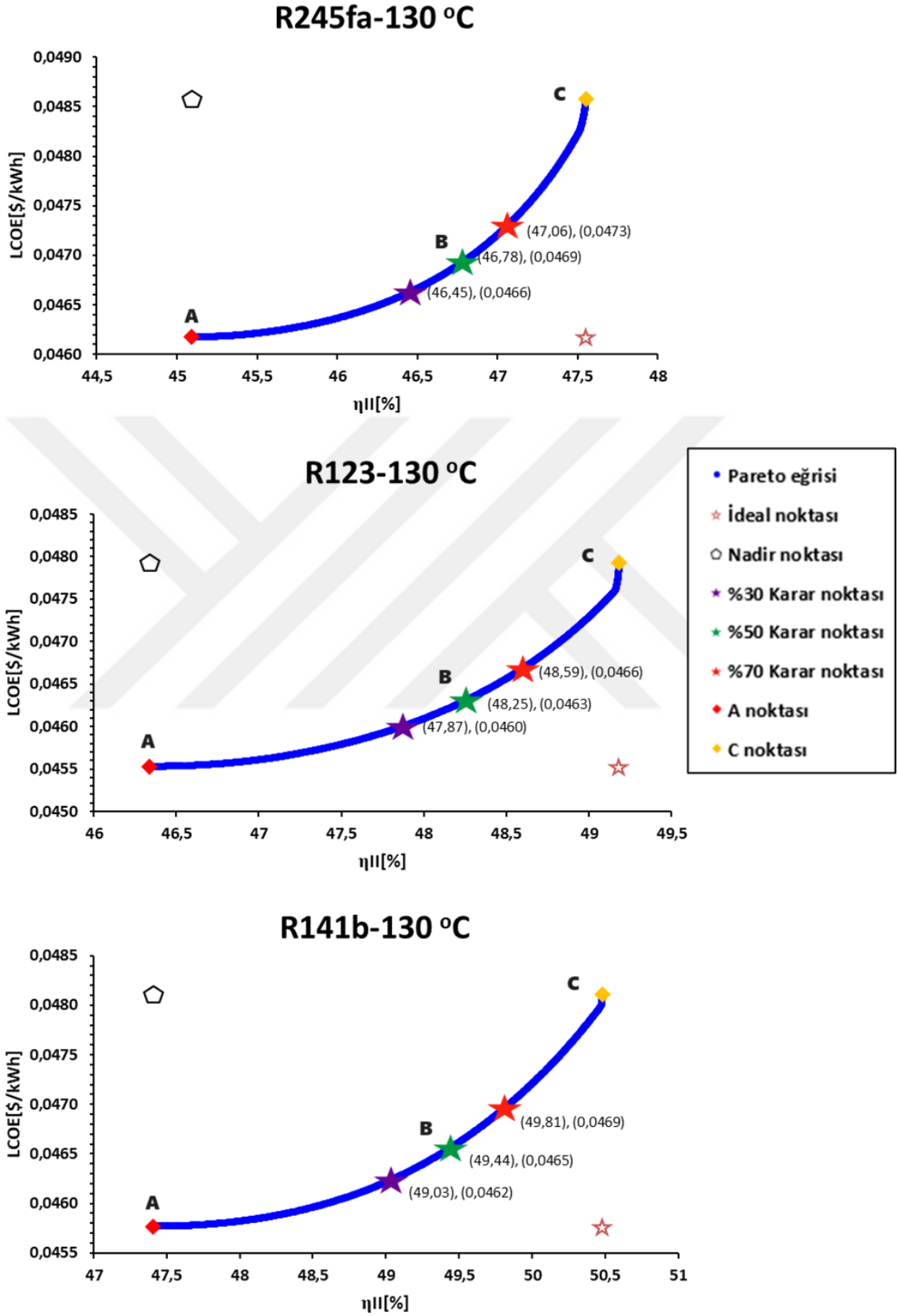
Şekil 4.6 130 °C LCOE- Wnet için elde edilen pareto eğrileri

Çizelge 4.7 ve Şekil 4.7 incelendiğinde aşağıdaki bulgulara ulaşılmıştır.

- Tüm akışkanlarda A noktası $\Delta T_{pp,evap}$ yaklaşık 7,8 °C, T_{sup} ise 10 °C'dir. A noktasında En düşük LCOE değerleri yaklaşık olarak 0,0450 \$/kWh değerlerine ulaşmaktadır.
- En yüksek güç çıktısı A noktasında 4515,95 W ile R245fa akışkanındadır.
- En yüksek ekserji verimliliğine %50,48, C noktasında yine R141b akışkanı ile elde edilmektedir.
- Tüm noktalarda en erken geri ödeme süresine R123 akışkanı sahiptir.
- En yüksek T3 sıcaklığı yine R141b akışkanında, en yüksek P3 basıncı da aynı şekilde R245fa akışkanında elde edilmiştir.
- Aynı sıcaklıktaki LCOE-Wnet karşılaştırmasına göre daha yüksek ekserji verimleri elde edilmiştir. B noktasında %4-5 aralığında ekserji verimi artışı gözlemlenmişken, C noktasında 100 °C-R141b maksimum ekserji verimi değerine göre yaklaşık %3'lük bir artış gözlemlenmiştir.

Çizelge 4.7 130 °C LCOE- η_{II} çıktıları tablosu

	A noktası			B noktası			C noktası		
	R245fa	R123	R141b	R245fa	R123	R141b	R245fa	R123	R141b
T _{pp} [°C]	7,87	7,86	7,82	6,08	6,06	6,08	5,00	5,00	5,00
T _{sup} [°C]	10,00	10,00	10,00	6,21	7,42	9,99	0,01	0,02	10,00
T3 [°C]	108,51	108,56	108,73	111,89	113,18	115,67	110,01	110,02	120,00
P3 [Pa]	1223552	760609	658273	1432862	891338	767321	1571100	976035	841396
W _{net} [W]	4515,95	4317,30	4202,08	4034,65	3772,17	3647,68	3690,78	3388,96	3198,70
$\eta_{sıl}$ [%]	10,25	10,69	11,05	10,95	11,48	11,85	11,32	11,90	12,33
η_{II} [%]	45,09	46,34	47,41	46,78	48,26	49,44	47,55	49,18	50,48
LCOE [\$/kWh]	0,04618	0,04553	0,04577	0,04693	0,04631	0,04656	0,04858	0,04793	0,04811
PB [yıl]	3,81	3,74	3,76	3,89	3,82	3,85	4,09	4,01	4,03
SIC [\$/kW]	1203,72	1186,89	1193,09	1223,40	1207,22	1213,77	1266,34	1249,49	1254,12



4.2.3. 160 °C ısı kaynağı altında çalışma sonuçları

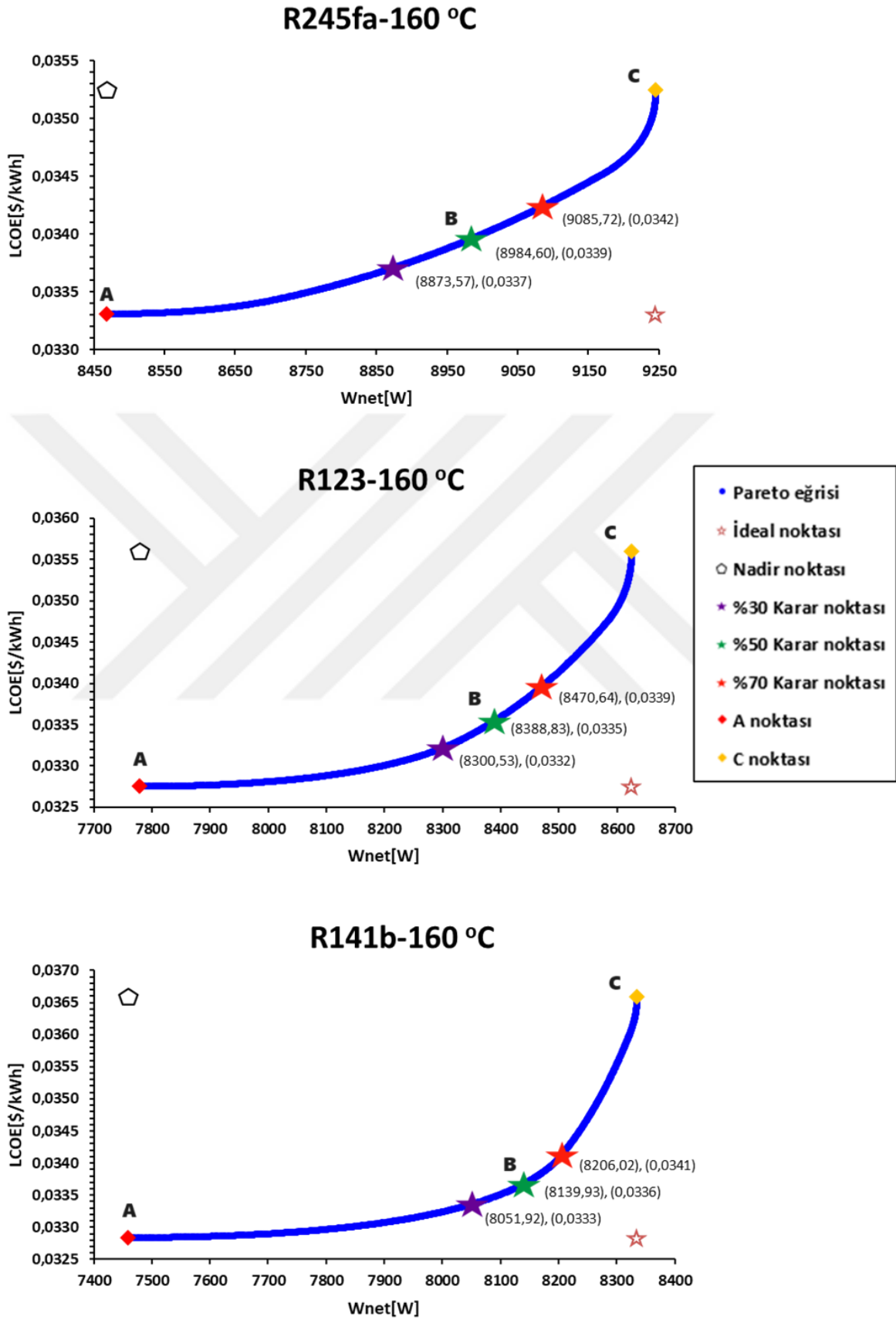
Çizelge 4.8 ve Şekil 4.8 incelendiğinde aşağıdaki bulgulara ulaşılmıştır.

- Sıcaklığın artması ile üretilen güç değerleri 8-9 kW aralığına çıkmıştır.
- R245fa, B noktasında en düşük kızdırma sıcaklığına sahiptir. Bunun aksine P3 değeri diğer akışkanlara göre yaklaşık 1,8 kat daha fazladır.
- Diğer grafiklerde de olduğu gibi C noktasında tüm T_{sup} değerleri minimum noktaya ulaşmıştır. Sadece W_{net} 'in maksimize edilmesi senaryosunda T_{sup} 'nin etkisinin olmadığı ve kızdırmaya ihtiyaç duyulmadığı çıkarımı yapılabilir.
- B noktasında verim değerleri sırasıyla %11,59, %11,62 ve %11,89 olarak bulunmuştur.
- Isı kaynağı sıcaklığının artması ile LCOE değeri 0,0330 bandına inerek, analizler içerisindeki en düşük değerlere ulaşmıştır. Aynı şekilde geri ödeme süresi yaklaşık olarak 2,5 yıl ve SIC değerleri 850 \$/kW değerlerine düşmüştür.

Çizelge 4.8 160 °C LCOE- W_{net} çıktıları tablosu

	A noktası			B noktası			C noktası		
	R245fa	R123	R141b	R245fa	R123	R141b	R245fa	R123	R141b
T_{pp} [°C]	10,22	10,35	10,32	11,74	13,21	13,51	13,30	14,66	15,07
T_{sup} [°C]	10,00	10,00	10,00	4,17	8,33	10,00	0,01	0,01	0,01
T_3 [°C]	129,11	128,59	128,71	117,19	115,49	115,97	106,81	101,38	99,71
P3 [Pa]	1896160	1165326	1006680	1673734	918819	772106	1467774	809769	672780
W_{net} [W]	8468,07	7778,10	7458,91	8984,60	8388,84	8139,94	9245,70	8625,20	8335,05
$\eta_{ısıl}$ [%]	12,09	12,72	13,22	11,59	11,62	11,89	11,04	11,00	11,13
η_{II} [%]	45,41	46,37	47,46	44,67	43,96	44,40	43,52	42,53	42,49
LCOE [\$/kWh]	0,03331	0,03275	0,03284	0,03396	0,03354	0,03367	0,03525	0,03559	0,03659
PB [yıl]	2,49	2,44	2,45	2,55	2,52	2,53	2,68	2,71	2,80
SIC [\$/kW]	868,30	853,80	856,08	885,29	874,45	877,81	918,87	927,97	953,88

- C noktasında $\Delta T_{pp, evap}$ değerleri minimum 5 °C değerine ulaşmıştır. A noktasında ise 5 °C değerine ulaşmıştır. Alınan sonuçların 100 °C ve 130 °C 'lerdeki sonuçlarla tekrarlayan örüntüler içerdiği görülmektedir.

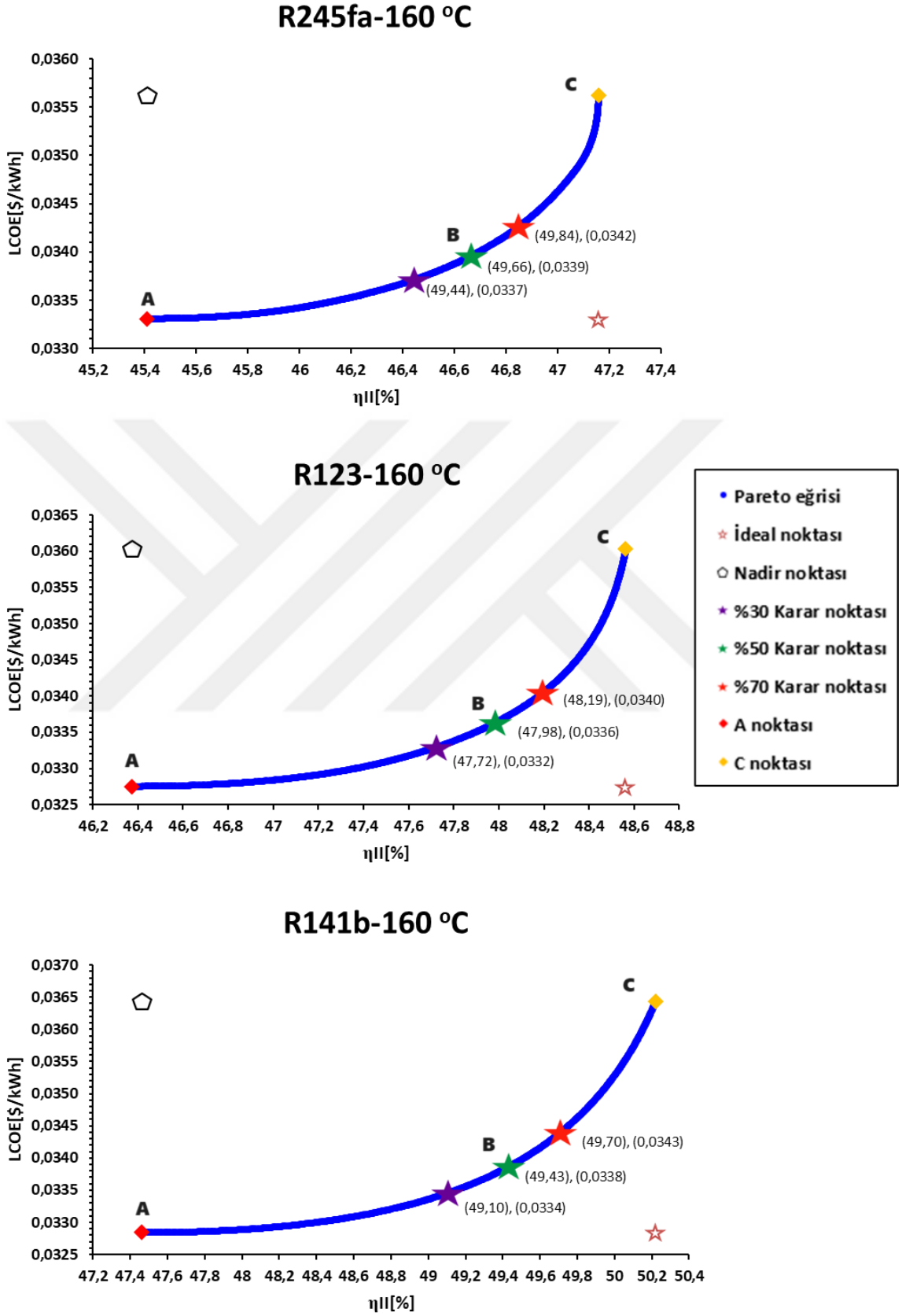


Şekil 4.8 130 °C LCOE- W_{net} için elde edilen pareto eğrileri

160 °C için C noktasında en yüksek verim olan %15,08 değerine ulaşılmıştır.

Çizelge 4.9 160 °C LCOE- η_{II} çıktıları tablosu

	A noktası			B noktası			C noktası		
	R245fa	R123	R141b	R245fa	R123	R141b	R245fa	R123	R141b
T _{pp} [°C]	10,22	10,36	10,32	7,83	7,41	7,16	5,94	5,00	5,00
T _{sup} [°C]	10,00	10,00	10,00	5,17	7,16	10,00	0,01	3,21	10,00
T ₃ [°C]	129,13	128,57	128,71	133,86	137,51	141,37	136,24	143,21	150,00
P ₃ [Pa]	1896724	1165083	1006704	2290800	1467787	1287860	2644320	1756257	1510057
W _{net} [W]	8467,21	7778,87	7458,81	7976,85	6641,33	6093,94	7563,00	5227,79	4734,72
$\eta_{ısıl}$ [%]	12,09	12,72	13,22	12,74	13,70	14,38	13,07	14,38	15,08
η_{II} [%]	45,41	46,37	47,46	46,67	47,98	49,43	47,16	48,56	50,22
LCOE [\$/kWh]	0,03331	0,03275	0,03284	0,03396	0,03362	0,03387	0,03562	0,03603	0,03643
PB [yıl]	2,49	2,44	2,45	2,55	2,52	2,55	2,71	2,75	2,79
SIC [\$/kW]	868,30	853,80	856,08	885,29	876,60	882,89	928,57	939,27	949,81



5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

5.1. Sonuçlar

- Termodinamik çalışmalarında araştırmacılara yardımcı olacak Coolprop, Wxwidgets, Pymoo gibi ücretsiz kütüphaneler incelenmiştir.
- Bu kütüphanelerin örnek kullanımları materyal ve metot bölümünde detaylı açıklanmıştır.
- Tamamen ücretsiz ve açık kaynak kodlu kütüphaneler kullanılarak grafik arayüzüne sahip, kullanımı kolay bir masaüstü yazılımı olan NeuORC geliştirilmiştir.
- Yazılıma dair özellikler, kullanılan matematiksel model ve termoeconomik model açıklanmıştır.
- Bu yazılımla gerçekleştirilen örnek parametrik çalışma tez içerisinde paylaşılmıştır.
- Ek-1 bölümünde kaynak kodları açık şekilde ve ORC alanında çalışan araştırmacıların kullanımına sunulmuştur.
- Son bölümde, NeuORC programından bağımsız olarak çok amaçlı optimizasyon algoritması olan NSGA-II ile proses optimizasyonu çalışması gerçekleştirilmiştir. Pymoo kütüphanesi kullanılarak gerçekleştirilen çalışma sonucunda R245fa, R123 ve R141b akışkanları için farklı sıcaklıklarda Pareto eğrileri elde edilmiştir.
- Bulgulara göre R245fa'nın maksimum güç elde edilmesi noktasında en avantajlı akışkan olduğu görülmüştür. R245fa akışkanı kullanımı ile 160 °C'de 9245,70W, 130 °C'de 5036,80 W, 100 °C'de ise 2283,02 W maksimum güç elde edilmektedir.
- Geri ödeme ve elde edilen güç unsurlarının dengesinin gözetildiği durumda ise R123 akışkanın ön plana çıktığı görülmüştür. En erken geri ödeme süreleri R123 akışkanı ile 160 °C'de 2,44 yıl, 130 °C'de 3,74 yıl, 100 °C'de ise 8,39 yıl olarak bulunmuştur.
- En düşük evaporatör basıncı ise R141b akışkanının kullanıldığı durumlarda 160 °C'de 672 kPa, 130 °C'de 456kPa, 100 °C'de ise 304 kPa olarak elde edilmiştir.

5.2. Öneriler

NeuORC programı sadece basit ORC için geliştirilmiştir. Programın isteğe göre değiştirilmesi ve farklı çevrim özelliklerinin kaynak koda eklenebilmesi mümkündür. Lakin program yazımında kütüphaneler özelinde obje tabanlı programlama öğeleri kullanılsa da matematiksel modelin bulunduğu fonksiyonlar imperatif şekilde yazılmıştır.

PEP-8, Python kodunun nasıl yazılacağını dair ipuçları ve ilkeleri barındıran bir rehberdir. Geliştirilen kod PEP-8 uyumlu ve temiz bir kod haline getirilememiştir. İlerleyen aşamalarda PyQt5 tabanlı daha gelişmiş bir GUI kütüphanesi kullanılarak obje tabanlı programlama kurallarına ve PEP-8 konvansiyonuna uyarak yeniden yazılması önerilmektedir.

6. KAYNAKLAR

- Aksar, M., Yağlı, H., Koç, Y., Koç, A., Sohani, A., & Yumrutaş, R., 2022, Why Kalina (Ammonia-Water) cycle rather than steam Rankine cycle and pure ammonia cycle: A comparative and comprehensive case study for a cogeneration system. *Energy Conversion and Management*, 265. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2022.115739>
- Aksoy, M., 2023, Yeni-nesil ve zeotropik akışkanlar kullanılarak tasarlanmış rejeneratif reküperatörlü organik rankine çevriminin performansının belirlenmesi, Yüksek lisans tezi, Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
- 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
- Bao, J., & Zhao, L., 2013, A review of working fluid and expander selections for organic Rankine cycle, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.03.040>
- Bayraktar, B., 2022, Mikro skala organik rankine çevrimi sistemi tasarımı, üretimi ve testi, Yüksek lisans tezi, Boğaziçi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
- Bejan, A., Tsatsaronis, G. (George), & Moran, M. J., 1996, *Thermal design and optimization*, Wiley
- Bell, I. H., Wronski, J., Quoilin, S., & Lemort, V., 2014, Pure and pseudo-pure fluid thermophysical property evaluation and the open-source thermophysical property library coolprop. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 53(6), 2498–2508. <https://doi.org/10.1021/ie4033999>
- Bilgiç, M., 2023, Organik Rankine çevrimi eksenel ve radyal girişli türbin için termofluidik tasarım aracının geliştirilmesi, Doktora tezi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
- Blank, J., & Deb, K., 2020, Pymoo: Multi-Objective Optimization in Python. *IEEE Access*, 8, 89497–89509. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2990567>
- Bonolo de Campos, G., Bringhenti, C., Traverso, A., & Takachi Tomita, J., 2020, Thermoeconomic comparison between the organic flash cycle and the novel

- organic Rankine flash cycle (ORFC). *Energy Conversion and Management*, 215. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.112926>
- Castro Oliveira, M., Iten, M., & Matos, H. A., 2022, Simulation and assessment of an integrated thermal processes and Organic Rankine Cycle (ORC) system with Modelica. *Energy Reports*, 8, 764–770. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2022.10.268>
- Chitgar, N., Hemmati, A., & Sadrzadeh, M., 2023, A comparative performance analysis, working fluid selection, and machine learning optimization of ORC systems driven by geothermal energy. *Energy Conversion and Management*, 286. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2023.117072>
- Dong, S., Habib, B., Zheng, H., Abbas, H., Chen, L., Heinzl, H., Lie, M., & Yu, W., 2016, Software Integration in the Development of Expert Design Tool. *Proceedings 38th New Zealand Geothermal Workshop*, November.
- Fanelli, E., Pinto, G., Cornacchia, G., & Braccio, G., 2018, Parameters identification for scroll expander semi-empirical model by using genetic algorithm. *Energy Procedia*, 148, 736–743. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2018.08.140>
- Feng, Y. Q., Zhang, Q., Xu, K. J., Wang, C. M., He, Z. X., & Hung, T. C., 2023, Operation characteristics and performance prediction of a 3 kW organic Rankine cycle (ORC) with automatic control system based on machine learning methodology. *Energy*, 263. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.125857>
- Feng, Y. qiang, Wang, Y., Yao, L., Xu, J. wei, Zhang, F. yang, He, Z. xia, Wang, Q., & Ma, J. long., 2023, Parametric analysis and thermal-economical optimization of a parallel dual pressure evaporation and two stage regenerative organic Rankine cycle using mixture working fluids. *Energy*, 263(PA), 125670. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.125670>
- Hajjaligol, N., Fattahi, A., Karimi, N., Jamali, M., & Keighobadi, S., 2023, Hybridized power-hydrogen generation using various configurations of Brayton-organic flash Rankine cycles fed by a sustainable fuel: Exergy and exergoeconomic analyses with ANN prediction. *Energy*, 130166. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.130166>
- Hekmatshoar, M., Deymi-Dashtebayaz, M., Gholizadeh, M., Dadpour, D., & Delpisheh, M., 2022, Thermo-economic analysis and optimization of a geothermal-driven multi-generation system producing power, freshwater, and hydrogen. *Energy*, 247. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.123434>
- Hoang, A. T., 2018, Waste heat recovery from diesel engines based on Organic Rankine Cycle. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.09.022>
- Hung, T. C., Shai, + T Y, & Wang, S. K., 1997, A review of organic rankine cycles (ORCs) for the recovery of low-grade waste heat (Vol. 22, Issue 7).
- Javed, S., & Tiwari, A. K., 2023, Performance assessment of different Organic Rankine Cycle (ORC) configurations driven by solar energy. *Process Safety and*

- Environmental Protection, 171, 655–666.
<https://doi.org/10.1016/j.psep.2023.01.039>
- JM Calm., 2007, Calm JM, Hourahan GC, 2007. Refrigerant Data Update. HPAC Engineering, 79(1)50-64.
- Kaplan, A., 2022, Farklı soğutucu akışkanlar kullanılarak iki aşamalı organik rankine çevriminin termodinamik ve eksergoekonomik analizi, Yüksek lisans tezi, Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
- Karabuga, A., Yakut, M. Z., & Utlı, Z., 2023, Assessment of thermodynamic performance of a novelty solar-ORC configuration based hydrogen production: An experimental study. International Journal of Hydrogen Energy, 48(99), 39154–39168. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.05.093>
- Karadaş, M., 2022, Düşük entalpili jeotermal kaynakları kullanarak organik Rankine çevrimi elektrik santrali tasarımı, Doktora tezi, Aydın Adnan Menderes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
- Khoshgoftar Manesh, M. H., Mousavi Rabeti, S. A., Nourpour, M., & Said, Z., 2022, Energy, exergy, exergoeconomic, and exergoenvironmental analysis of an innovative solar-geothermal-gas driven polygeneration system for combined power, hydrogen, hot water, and freshwater production. Sustainable Energy Technologies and Assessments, 51. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2021.101861>
- Konur, O., 2021, Deniz taşıtlarında organik Rankine çevrimi (ORC) sistemi uygulaması, Doktora tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
- Köse, Ö., Koç, Y., & Yağlı, H., 2022, Is Kalina cycle or organic Rankine cycle for industrial waste heat recovery applications? A detailed performance, economic and environment based comprehensive analysis. Process Safety and Environmental Protection, 163, 421–437. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2022.05.041>
- Lecompte, S., Huisseune, H., Van Den Broek, M., Vanslambrouck, B., & De Paepe, M., 2015, Review of organic Rankine cycle (ORC) architectures for waste heat recovery. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.03.089>
- Lu, X., Du, B., Zhu, W., Yang, Y., Xie, C., Tu, Z., Zhao, B., Zhang, L., Wang, J., & Yang, Z., 2023, Multi-criteria assessment of an auxiliary energy system for desalination plant based on PEMFC-ORC combined heat and power. Energy, 130163. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.130163>
- Motamed, M. A., & Nord, L. O., 2022, Part-load efficiency boost in offshore organic Rankine cycles with a cooling water flow rate control strategy. Energy, 257. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.124713>
- Mousavi, S. A., Mehrpooya, M., & Delpisheh, M., 2022, Development and life cycle assessment of a novel solar-based cogeneration configuration comprised of diffusion-absorption refrigeration and organic Rankine cycle in remote areas.

- Process Safety and Environmental Protection, 159, 1019–1038.
<https://doi.org/10.1016/j.psep.2022.01.067>
- Njock, J. P., Nangué, M. N., Sosso, O. T., & Nzengwa, R., 2023, Highlighting the effect of the lower operating limit of the condenser on ORC working fluids selection. Results in Engineering, 19. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2023.101369>
- Olsson, M. 2012, A working fluid selection program for Organic Rankine Cycle. <https://lup.lub.lu.se/student-papers/record/3054940/file/3054947.docx>
- Peng, Y., Lin, X., Liu, J., Su, W., & Zhou, N., 2021, Machine learning prediction of ORC performance based on properties of working fluid. Applied Thermal Engineering, 195. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2021.117184>
- Pramodana, E. D., & Aufari, S. H., 2018, Simulator of Organic Rankine Cycle. Jurnal Otomasi Kontrol Dan Instrumentasi, 9(1), 47. <https://doi.org/10.5614/joki.2017.9.1.5>
- Quoilin, S., Van Den Broek, M., Bastien Declaye, S., Dewallef, P., & Lemort, V., 2013, Techno-economic survey of Organic Rankine Cycle (ORC) systems. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.01.028>
- Rodriguez-Pastor, D. A., Becerra, J. A., & Chacartegui, R., 2023, Adaptation of residential solar systems for domestic hot water (DHW) to hybrid organic Rankine Cycle (ORC) distributed generation. Energy, 263. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.125901>
- Sun, Q., Lin, D., Khayatnezhad, M., & Taghavi, M., 2021, Investigation of phosphoric acid fuel cell, linear Fresnel solar reflector and Organic Rankine Cycle polygeneration energy system in different climatic conditions. Process Safety and Environmental Protection, 147, 993–1008. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2021.01.035>
- Tchanche, B., 2012, Heat conversion into power using small scale organic Rankine cycles. <https://www.researchgate.net/publication/256496874>
- Tillmanns, D., Gertig, C., Schilling, J., Gibelhaus, A., Bau, U., Lanzerath, F., & Bardow, A., 2017, Integrated design of ORC process and working fluid using PC-SAFT and Modelica. Energy Procedia, 129, 97–104. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.09.169>
- Valencia, G. E., Obregon, L. G., & Duarte, J., 2018, First-law-based thermodynamic study of reheat and regeneration Rankine cycles using an educational software. Contemporary Engineering Sciences, 11(26), 1253–1260. <https://doi.org/10.12988/ces.2018.83104>
- Wang, L., Xia, L., Li, C., Tian, Y., Teng, J., Sun, X., & Xiang, S., 2023, Exergy, economic, and exergoenvironmental analyses of new combined heat and power

- process based on mechanism analysis of working fluid screening. *Energy*, 262(PA), 125308. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.125308>
- Wang, S., Liu, C., Zhang, S., Li, Q., & Huo, E., 2022, Multi-objective optimization and fluid selection of organic Rankine cycle (ORC) system based on economic-environmental-sustainable analysis. *Energy Conversion and Management*, 254. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2022.115238>
- Xing, C., Ping, X., Guo, R., Zhang, H., Yang, F., Yu, M., Yang, A., & Wang, Y., 2023, Machine learning-based multi-objective optimization and thermodynamic evaluation of organic Rankine cycle (ORC) system for vehicle engine under road condition. *Applied Thermal Engineering*, 231. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2023.120904>
- 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
- Yılmaz, F., 2013, Güneş çanaklı organik rankine çevriminin Isparta şartlarında incelenmesi, Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
- Zhang, X., Zhang, Z., & Wang, G. ,2023, Thermodynamic and economic investigation of a novel combined cycle in coal-fired power plant with CO₂ capture via Ca-looping. *Energy*, 263(PB), 125795. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.125795>
- Zheng, X., Li, Y., Zhang, J., Zhang, Z., Guo, C., & Mei, N. ,2024, Design and multi-objective optimization of combined air separation and ORC system for harnessing LNG cold energy considering variable regasification rates. *International Journal of Hydrogen Energy*, 57, 210–223. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2024.01.033>
- Zhou, J., Chu, Y. T., Ren, J., Shen, W., & He, C., 2023, Integrating machine learning and mathematical programming for efficient optimization of operating conditions in organic Rankine cycle (ORC) based combined systems. *Energy*, 281. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.128218>
- Ziviani, D., Woodland, B. J., Georges, E., Groll, E. a., Braun, J. E., Horton, W. T., Paepe, M. De, & Broek, M. Van Den., 2015, ORCSIM : A generalised organic Rankine cycle Simulation tool. *Proceedings of the 3rd International Seminar on ORC Power Systems*, 1–10.

EKLER

EK-1

Programa aşağıdaki link üzerinden ulaşılabilir.

<https://github.com/arcilyes/NeuORC/tree/605d4d46fbb164a07799741f5d7b68f0d696edeb>