Pamukkale Univ Muh Bilim Derg, 31(4), 588-600, 2025

Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi

Pamukkale University Journal of Engineering Sciences

Organik Rankine Çevriminin termo-ekonomik analizi ve optimizasyonu için açık kaynak kodlu yazılım geliştirilmesi

Development of open-source software for thermo-economic analysis and optimization of the Organic Rankine Cycle

Mehmet Berk Azdural[1*], *Ali Kahraman*[2], *Sadık Ata*[2]

[1]Makine Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Necmettin Erbakan Üniversitesi, Konya, Türkiye.
mazdural@gmail.com, akahraman@erbakan.edu.tr

[2]Makine Mühendisliği Bölümü, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, KTO Karatay Üniversitesi, Konya, Türkiye.
sadik.ata@karatay.edu.tr

Geliş Tarihi/Received: 21.02.2024 Düzeltme Tarihi/Revision: 15.08.2024 doi: 10.5505/pajes.2024.43883
Kabul Tarihi/Accepted: 21.10.2024 Araştırma Makalesi/Research Article

Öz

Organik Rankine Çevrimi (ORC), atık ısı geri kazanımı ve jeotermal enerji uygulamalarında yaygın kullanılan bir güç çevrimidir. Özellikle jeotermal enerji gibi düşük ısı kaynaklı uygulamalarda elektrik üretimini mümkün kılmaktadır. ORC sistemlerinin tasarımı çeşitli mühendislik zorlukları içermektedir. Bu sebeple hesaplamalar bilgisayar ortamında gerçekleştirilmeli, kolaylıkla tekrarlanabilir ve teyit edilebilir olmalıdır. Bu alandaki çalışmalar mühendislik yazılımlarının geliştirilmesine ihtiyaç duymaktadır. Mühendislik yazılımlarının geliştirilmesi zaman ve maddi kaynak gerektirdiği için yazılım firmaları tarafından geliştirilen bu tür araçlar ticari olarak kullanıma sunulmaktadır. Çalışmada, kullanıcı grafik arayüzüne sahip, kaynak kodu herkesin kullanımına açık olan, herhangi bir platforma bağlı olmayan ve ücretsiz indirilip dağıtılabilen, eğitim amaçlı bir basit Organik Rankine Çevrimi (ORC) hesaplayıcısı Python dili kullanılarak geliştirilmiştir. Geliştirilen yazılımın literatürdeki çalışmaların tasarım şartlarında çalıştırılmasıyla %10'un altında bir hata oranına ulaşılmıştır. Çalışma iki ana bölümden oluşmaktadır. İlk bölümde geliştirilen açık kaynaklı programdan bahsedilmiş olup. İkinci bölümde ise Pymoo açık-kaynaklı kütüphanesi kullanılarak çok amaçlı proses optimizasyonu çalışması yürütülmüştür. R245fa akışkanı için LCOE (Seviyelendirilmiş enerji maliyeti)- Wnet (Güç çıktısı) amaç fonksiyonları Tsup (Aşırı kızdırma sıcaklığı) ve ΔTpp,evap (Evaporatör pinch noktası sıcaklık farkı) parametrelerinin değişimine göre incelenmiştir. Ağırlık fonksiyonunun %30-%70; %50-%50; %70-%30 olması durumunda optimum ΔTpp,evap değerleri tespit edilmiştir. Bu çalışma sonucunda %50 minimum LCOE-%50 maksimum Wnet için optimum noktalar 79.8 °C türbin giriş sıcaklığı ve 6.84 °C ΔTpp,evap olarak tespit edilmiştir. Bu şartlarda 2213 kW net güce ulaşırken 0.07806 $/kWh LCOE değerine ulaşılmıştır.

Anahtar kelimeler: Açık kaynak kod, Çok amaçlı, Kullanıcı grafik arayüzü (GUI), NSGA-II, Optimizasyon, Organik rankine çevrimi (ORC).

Abstract

Organic Rankine Cycle (ORC) is a power cycle widely used in waste heat recovery and geothermal energy applications. It makes electricity generation possible, especially in low heat source applications such as geothermal energy. The design of ORC systems involves various engineering challenges. For this reason, calculations should be performed in a computer environment and should be easily repeatable and verifiable. Studies in this field require the development of engineering software. Since the development of engineering software requires time and financial resources, such tools developed by software companies are offered for commercial use. In the study, a simple educational Organic Rankine Cycle (ORC) calculator, which has a user graphical interface, whose source code is publicly available, is not dependent on any platform, and can be downloaded and distributed free of charge, was developed using the Python language. An error rate of less than 10% was achieved by running the developed software under the design conditions of the studies in the literature. The study consists of two main parts. In the first part, the open source program developed is mentioned. In the second part, a multi-purpose process optimization study was carried out using the Pymoo open-source library. LCOE (Levelized cost of energy)- Wnet (Power output) objective functions for R245fa fluid were examined according to the changes of Tsup (Superheating temperature) and Tpp,evap (Evaporator pinch point temperature difference) parameters. Optimum ΔTpp,evap values were determined when the weight function was 30%-70%, 50%-50% and 70%-30%. As a result of this study, the optimum points for 50% minimum LCOE-50% maximum Wnet were determined as 79.8 °C turbine inlet temperature and 6.84 °C ΔTpp,evap. Under these conditions, a net power of 2213 kW and an LCOE of 0.07806 $/kWh were achieved.

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

1 Giriş

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. Geleneksel Rankine çevriminde akışkan olarak su kullanırken, ORC'de ısı kaynağının sıcaklığına göre farklı kimyasal gruplardan çevreci akışkanlar kullanılır. ORC akışkanının seçiminde ısı kaynağı sıcaklığı, ısı transfer kapasitesi, viskozite, kimyasal stabilite ve güvenlik gibi çeşitli etkenler gözetilmektedir. Bu kriterlere uygun bir ORC akışkanı-nın seçilmesi ile, akışkanın özelliklerinden yararlanarak sistem performansının optimize edilmesi amaçlanır. Sistem performansını optimizasyonu iteratif ve karmaşık hesaplamalar gerektirmektedir. Yapılan hesaplamalar tekrar edilebilir ve teyit edilebilir olmalıdır. Bu sebeple, hesaplamalar kullanıcı dostu, görsel öğelerle desteklenmiş mühendislik

*Yazışılan yazar/Corresponding author

yazılımları ile gerçekleştirilmektedir. Mühendislik yazılımlarının geliştirilmesi zaman ve maddi kaynak gerektirmektedir. Bu sebeple yazılım firmaları tarafından geliştirilen bu tür araçlar ticari olarak kullanıma sunulmaktadır. Bu çalışmada ise, kullanıcı dostu bir grafik ara-yüzüne (GUI) sahip basit bir ORC hesaplayıcı programı 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 kullanılabilecektir. Ulusal olarak özgün, uluslararası olarak ise kısmi özgünlüğe sahip olan çalışma açık kaynak kodlu yazılım geliştirme topluluğuna katkıda bulunmayı amaçlamaktadır.

Bu çalışma ile:

- Geliştirilen programda kullanılan programlama dilleri, kütüphaneler materyal ve metot kısmında incelenmiştir,
- ORC için kullanılan matematiksel model irdelenmiş, çevrim hesaplamalarına ait net güç, verim ve ekserji verimi gibi temel parametreler detaylı olarak açıklanmıştır,
- Termo-ekonomik analiz kısmında ise yatırım maliyeti, geri ödeme süresi ve seviyelendirilmiş enerji maliyeti gibi önemli parametrelerden bahsedilmiştir,
- NSGA-II algoritması ile R245fa akışkanı için çok amaçlı optimizasyon çalışması gerçekleştirilmiştir.

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

- Uygun kaynama noktası sıcaklığına sahip olmalıdır [1],
- Evaporatör basıncının çok yüksek olması mekanik stresi arttıracağından alçak buharlaşma basıncına sahip akışkan seçilmelidir [2],
- 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 [3],
- Düşük yoğunluklu ve düşük özgül ısıya sahip akışkanlar pompalama maliyetini azaltmaktadır. Lakin, düşük yoğunluklu akışkanların kullanımı, yüksek yoğunluklu akışkanlara göre türbin boyutunu arttırmaktadır [1],
- 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 [4].

Yukarıda bahsedilen özellikler ve literatürdeki güncel çalışmalar dikkate alınarak parametrik çalışmada R245fa akışkanı incelenmiştir.

R245fa, R134a'ya kıyasla daha düşük doyma basıncına sahip olması sebebiyle Organik Rankine Çevrimi (ORC) sistemlerinde en yaygın kullanılan çalışma sıvısıdır. Ayrıca R245fa, mevcut Isıtma Havalandırma ve İklimlendirme (HVAC) ekipmanının küçük değişikliklerle ORC bileşenleri olarak işlev görmesi için kullanılmasına olanak tanır.[5]R245fa, inert davranışı nedeniyle güvenlik açısından da ilgi çekici bir sıvıdır.[6]

2 Literatür taraması

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

Peng ve diğ. [7], basit ve rejeneratif ORC 'de 106 farklı akışkan için yapay sinir ağları modeli geliştirilmiştir. Geliştirdiği sinir ağları modelini literatürdeki akışkan kütüphaneleri ile karşılaştırmış ve diğer araştırmacıların kullanabilmesi için paylaşmıştır. Çalışmasında Matlab yazılımını kullanmıştır.

Sun ve diğ. [8], 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. Engineering Equation Solver (EES) ve Matlab kullanılmıştır.

Mousavi ve diğ. [9], 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.

Wang ve diğ. [10], 120 ^{o}C jeotermal sıcaklığa sahip bir ısıl 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.

Hekmatshoar ve diğ. [11], 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.

Khoshgoftar Manesh ve diğ. [12], 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 ısıl, %28.21 ekserji verimine sahip olduğu ve günde 4.67 m^3 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.

Javed ve Tiwari [13], 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.

Zhou ve diğ. [14], Heptane ve Isopentane akışkanlarına sahip çift döngülü ORC sisteminin çalışma koşulları yapay sinir ağları ve lineer programlama kullanarak optimize edilmiştir. Isıl kaynak sıcaklığı 250 ^{o}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 ayrıştırma 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.

Lu ve diğ. [15], 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 ve diğ., 2023).

Njock ve diğ. [16], 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.

Rodriguez-Pastor ve diğ. [17], 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 ^{o}C olduğu durumlarda sırasıyla %4.10, %5.50 ve %5.53 ısıl verim değerlerine ulaşılmıştır.

Qiang Feng ve diğ. [18], 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 1 kW daha yüksek güç çıktısına ulaşılmıştır. 0.8 R245fa/0.2 pentan 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.

Zhang ve diğ. [19], kömürle çalışan güç santralleri için karbon dioksit yakalama teknolojilerine dikkat çekmişlerdir. Özgün bir süperkritik CO_2 Brayton (SCBC) ve ORC çevrimleri kullanarak eş zamanlı enerji üretimi ile baca gazından CO_2 yakalamayı önermişlerdir. Gerçekleştirilen çalışma sonucunda sistemin toplam ekserji verimliliğinin %39.74 olduğunu, baca gazından CO_2 yakalamanın ekserji verimliliğine maliyetinin ise %3.14 olduğu sonucuna varmışlardır. Önerilen kombine çevrim ile CO_2 yakalamanın birim ton başına maliyetinin 21.81$/t$CO_2$ olduğu, CO_2 üretiminden kaçınma maliyetinin ise 26.25$/t$CO_2$ olduğu belirtilmiştir.

L. Wang ve diğ. [20], 49.228 MW 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.

Karabuga ve diğ. [21], 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.

Xing ve diğ. [22], içten yanmalı araç motorlarına ORC sisteminin entegre edilerek egzoz gazlarından enerji eldesi araştırılmıştır. R245fa için maksimum %2.33 ısıl verim ve yol koşullarına bağlı olarak ısı transfer yüzeyi başına 0.55 kW/m^2'lik güç elde edilmiştir. Gt-suite programı ile yapay sinir ağları ve NSGA-II algoritması kullanılmıştır.

YQ. Feng ve diğ. [23], 3 kW'lık bir ORC sistem için makine öğrenmesi metodolojisi uygulanarak bir otomatik kontrol sistemi geliştirilmiştir. Elde edilen pareto optimal sonuçlara göre 120 ^{o}C'lık ısı kaynağı ile net güç çıktısı 2.87 kW ve ısıl verim ise %8.855 olarak bulunmuştur.

Chitgar ve diğ. [24], 135 ^{o}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.

Hajialigol ve diğ. [25], ORC'nin farklı bir versiyonu olan basit organik flaş çevrimi (SOFC) ve Brayton çeviriminin 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.

Ata ve diğ. [26], ORC performansını etkileyen ana parametrelerin incelenmesi ve bu parametrelerin etki seviyelerini belirlemeyi amaçlamaktadır. Performans üzerindeki etkiler farklı amaç fonksiyonları altında değerlendirilmiş ve $\Delta T_{PP,e}$ 'nin ısıl verimde %20.59, türbin gücünde %71.9 etkili olduğu bulunmuştur. Optimum parametre kombinasyonları Taguchi ANOVA ile belirlenirken, regresyon analizi sonucunda elde edilen ampirik denklemlerin ORC performans tahmininde etkili olduğu gösterilmiştir.

Atiz ve diğ. [27], düzlemsel güneş kolektörleri (DGK'lar) ve vakum tüplü güneş kolektörlerinin (VTGK'lar) termodinamik performansını, elektrik ve hidrojen üretimi açısından Adana iklim koşullarında numerik olarak karşılaştırmaktadır. Güneş enerjisinden ısı enerjisine dönüşüm sağlayan bu sistemler, Organik Rankine Çevrimi (ORC) aracılığıyla elektrik üretimi sağlamış ve elektroliz yoluyla hidrojen üretimine imkan tanımıştır. Termodinamik analiz sonuçlarına göre, güneş enerjisi ve ortam sıcaklığının artmasıyla sistemin termal ve elektrik üretim verimliliği artmış, Temmuz ayında VTGK'ların ısıl verimi %6.25, DGK'ların ise %5.46 olarak maksimuma ulaşmıştır.

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

Bilgiç [28], 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.

Aksoy [29], 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 ısıl verim %52.93 ekserji verimi, 58.08 kJ/kg net iş ve 8.64 kJ/kg pompa işi olarak bulunmuştur.

Bayraktar [30], 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.

Karadaş [31], 150 ton/saat debide ve 90 °C sıcaklıkta olan bu kaynaklardan yararlanarak ORC tabanlı bir santralın 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.

Kaplan [32], bu çalışmada, EES kullanılarak analiz edilen iki aşamalı bir Organik Rankine Döngüsü (ORC) 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 ısıl verimliliğin R23 + R23 çiftinde 425K'da elde edildiğini göstermektedir.

Konur [33], 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.

3 Materyal ve metot

3.1 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, nesnelerin interneti, veri madenciliği uygulamaları, görselleştirme ve oyun geliştirme gibi birçok alanda kullanılmaktadır. Çalışmanın ilerleyen aşamasında kütüphanelere kolay entegre edilmesi sebebiyle Python programlama dili kullanılmıştır.

3.2 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 kullanılabilmektedir. Çalışmada, kütüphanenin Python dilindeki modülü kullanılarak proje içerisine dahil edilmiştir. Kütüphanenin kullanımı Şekil 1'de paylaşılmıştır.

```
import CoolProp
import CoolProp.CoolProp as CP

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

print(Cp)
```

Şekil 1. CoolProp hesaplama örneği (80 °C -1 atm suyun c_p değeri).

Figure 1. CoolProp calculation example (c_p value of 80 °C-1 atm water).

Kütüphane CoolProp sitesinden indirilmelidir. İndirildikten sonra import satırları aşağıdaki örnekte görüldüğü gibi programın başında yazılmalıdır. Ulaşılması istenilen özellik CP.PropsSI fonksiyonu içerisinde sağ en başta yazılmalıdır. Akışkanın cinsi ise fonksiyonun içerisinde en sona yazılmalıdır. Ulaşılması 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. Ulaşılması istenen 'C' özgül ısı değerinini 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.

3.3 WxWidgets kütüphanesi

WxWidgets (eski adıyla wxWindows), C++ dilinde yazılmış bir grafik kullanıcı arayüzü kütüphanesidir. Widget adı verilen grafiksel nesneler kullanılarak masaüstü ve mobil uygulamalar geliştirilebilmektedir. Terminal üzerinde yazılmış programların aksine grafiksel programlarda oluşturulan nesneler 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.

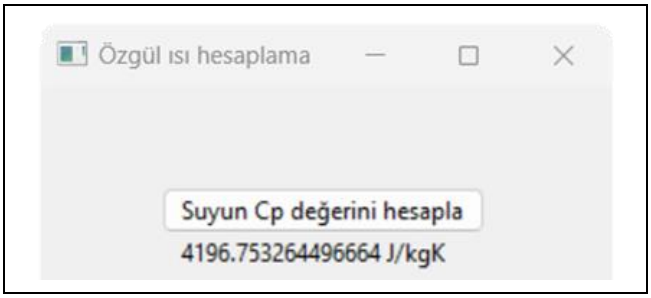
CoolProp kütüphanesinden alınmış olan bir verinin buton widgetına basıldığında ekrana yazdırılması uygulaması Şekil 2'de gösterilmiştir.

```
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()
```

Şekil 2. WxWidgets ile basit bir program.

Figure 2. A simple program with WxWidgets.

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 değerini hesaplayan CoolProp fonksiyonu ve alınan değeri ekran üzerinde koordinatları verilen bir yere yazdırmak için bir label tanımlanır. Böylelikle, alınan c_p değeri Şekil 3'te gösterildiği gibi ekrana yazdırılır.



Şekil 3. WxWidgets grafik çıktısı (80 °C-1atm suyun c_p değeri).

Figure 3. WxWidgets graphics output (c_p value of 80 °C -1 atm water).

3.4 Enerji analizi matematiksel denklemleri

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 4'te gösterilmiştir.

Hesaplamaya literatürde $\Delta T_{soğutma}$ olarak isimlendirilen sabit bir parametre ile başlanılır. Bu çalışmada $\Delta T_{soğutma}$ sabit 10 °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 (Denklem 1).

$$\Delta T_{soğutma} = T_1 - T_{c,i} \tag{1}$$

ε_{evap}, yüzde evaporatör etkenliğini, $\Delta T_{pp,evap}$, pinch noktası sıcaklık farkını, $T_{h,in}$, ısıl 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 (2), Denklem (3) formuna dönüştürülür. Denklem (3)'deki $\Delta T_{pp,evap}$ bilinmektedir. $\Delta T_{pp,evap}$, Denklem (3)'de yerine yazılarak $T_{3,f}$ değeri elde edilir. Denklem (4)'ten $T_{p,e}$ değeri hesaplanır.

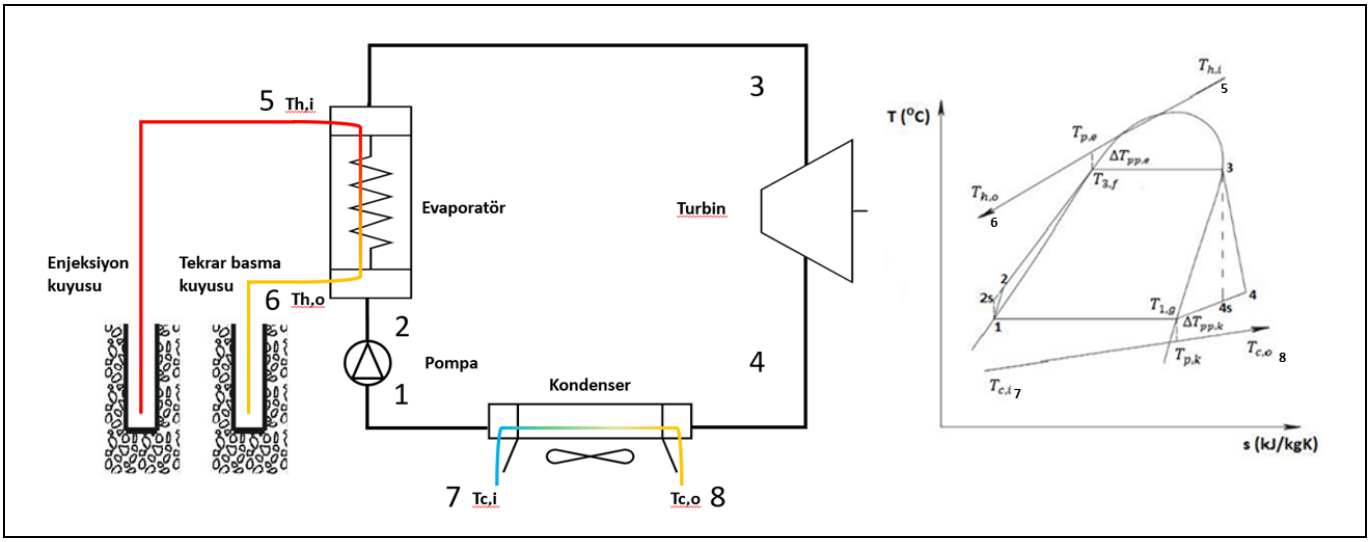
$$\varepsilon_{evap} = \frac{(T_{h,i} - T_{p,e})}{(T_{h,i} - T_{3,f})} \tag{2}$$

$$T_{3f} = T_{hi} - \frac{\Delta T_{pp,evap}}{1 - \varepsilon_{evap}} \tag{3}$$

$$\Delta T_{pp,evap} = T_{p,e} - T_{3,f} \tag{4}$$

Evaporatör etkenliği 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)
```



Şekil 4. Çevrime ait parametrelerin gösterimi.

Figure 4. Display of cycle parameters.

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.

```
dP = 0 #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)
```

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

```
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)
```

Daha sonra, kullanıcı tarafından girilen ısı kaynağı akışkanı kütlesel debisi m_h, ısı kaynağı akışkanı özgül ısı kapasitesi $c_{p,sıcak}$ ve Denklem 4'ten hesaplanan $T_{p,e}$ kullanılarak buharlaştırıcı ısısı $\dot{Q}_{buh}$ hesaplanır (Denklem 5).

$$\dot{Q}_{buh} = \dot{m}_h c_{p,sıcak}(T_{h,i} - T_{p,e}) \tag{5}$$

h_3 ve $h_{3,f}$ önceki hesaplamalardan bilinmektedir. Denklem 5'ten hesaplanan buharlaştırıcı ısısı da kullanılarak. Çevrim için gerekli organik akışkan kütlesel debisi m_{orc} belirlenir (Denklem 6)

$$\dot{m}_{orc} = \frac{\dot{Q}_{buh}}{(h_3 - h_{3,f})} \tag{6}$$

Çevrimin tüm noktaları bulunduktan sonra ön ısıtma ısısı, evaporatör kapasitesi $\dot{Q}_{evap}$ ve kondenser kapasitesi belirlenir (Denklem 7-9).

$$\dot{Q}_{önısıtma} = \dot{m}_{orc}(h_{3,fluid} - h_2) \tag{7}$$

$$\dot{Q}_{evap} = \dot{Q}_{önısıtma} + \dot{Q}_{buh} \tag{8}$$

$$\dot{Q}_{kond} = \dot{m}_{orc}(h_4 - h_1) \tag{9}$$

Daha sonra pompa gücü, türbinden elde edilen güç, net güç ve ısıl verim hesaplanır (Denklem 10-13).

$$\dot{W}_p = \dot{m}_{orc}(h_2 - h_1) \tag{10}$$

$$\dot{W}_T = \dot{m}_{orc}(h_3 - h_4) \tag{11}$$

$$\dot{W}_{Net} = \dot{W}_T - \dot{W}_P \tag{12}$$

$$\eta_{ısıl} = \dot{W}_{Net}/\dot{Q}_{evap} \tag{13}$$

Denklem (14)'te T_{1g} bulunduktan sonra sırasıyla Denklem (15), (16), (17) ve (18) kullanılarak $\dot{m}_{kond}$, $\dot{Q}_{kond}$, $T_{c,o}$ ve P_{ratio} parametreleri hesaplanır.

$$T_{pc} = T_{1g} - \Delta T_{pp,kond} \tag{14}$$

$$\dot{m}_{kond} = \frac{\dot{m}_{orc}(h_{1g} - h_1)}{C_p(T_{pc} - T_{c,i})} \tag{15}$$

$$\dot{Q}_{kond} = \dot{m}_{orc}(h_4 - h_1) \tag{16}$$

$$T_{c,o} = T_{c,i} + \frac{\dot{Q}_{kond}}{\dot{m}_{kond} C_p} \tag{17}$$

$$P_{ratio} = \frac{P_3}{P_4} \quad (18)$$

3.5 Ekserji analizi matematiksel denklemleri

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.

```
T0 = 298.15 #[K]
P0 = 100000 #[Pa]
#Çevre durumunda organik akışkan için
s0 = CP.PropsSI('S','T',T0,'P',P0,fluid)
h0 = CP.PropsSI('H','T',T0,'P',P0,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. Denklem (19)'da 1'den 8'e kadar olan değerler n yerine konularak hesaplanır.

$$e_n = (h_n - h_0) - \left((T_0)(s_n - s_0)\right) \quad [\text{kJ/kg}] \quad (19)$$

Daha sonra komponentlerin ekserji yıkımı ve ikinci yasa verimleri aşağıdaki denklemlerden hesaplanır (Denklem 20-27). Toplam ekserji yıkımı ise Denklem (28)'de hesaplanır.

$$I_e = \dot{m}_{kaynak}(e_5 - e_6) - \dot{m}_{orc}(e_3 - e_2) \quad [\text{W}] \quad (20)$$

$$\eta_{evap} = \frac{\dot{m}_{orc}(e_3 - e_2)}{\dot{m}_{kaynak}(e_5 - e_6)} 100 \quad (21)$$

$$I_c = \dot{m}_{orc}(e_4 - e_1) - \dot{m}_c(e_8 - e_7) \quad [\text{W}] \quad (22)$$

$$\eta_{cond} = \frac{\dot{m}_c(e_8 - e_7)}{\dot{m}_{orc}(e_4 - e_1)} 100 \quad (23)$$

$$I_t = \dot{m}_{orc}(e_3 - e_4) - \dot{W}_t \quad [\text{W}] \quad (24)$$

$$\eta_{tur} = \frac{\dot{W}_t}{\dot{m}_{orc}(e_3 - e_4)} 100 \quad (25)$$

$$I_p = \dot{m}_{orc}(e_1 - e_2) + \dot{W}_p \quad [\text{W}] \quad (26)$$

$$\eta_{pump} = \frac{\dot{m}_{orc}(e_2 - e_1)}{\dot{W}_p} 100 \quad (25)$$

$$I_{total} = I_e + I_c + I_t + I_p \quad [\text{W}] \quad (26)$$

Daha sonra sisteme sağlanan ekserji ve toplam sistem ikinci yasa verimi hesaplanır (Denklem 29-30).

$$\dot{E}x_{in} = \left(h_5 - h_6 - \left((T_0)(s_5 - s_6)\right)\right)\dot{m}_{kaynak} \quad (27)$$

$$\eta_{II} = \left(\frac{\dot{W}_{net}}{\dot{E}x_{in}}\right)100 \quad (28)$$

3.6 Ekonomi analizi matematiksel denklemleri

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 (Denklem 31-32).

$$\Delta T_{ln,eva} = \frac{(T_{hi} - T_3) - (T_{ho} - T_2)}{\ln\left(\frac{T_{hi} - T_3}{T_{ho} - T_2}\right)} \quad (29)$$

$$A_{evap} = \frac{\dot{Q}_{evap}}{U_{evap}\Delta T_{ln,eva}} \quad [m^2] \quad (30)$$

Yüzey alanı bulunduktan sonra Denklem (33) ve (34)'ten ısı değiştirici maliyetleri [34] hesaplanır. Evaporatör ve kondenser maliyetleri için;

$$C_{ICEva} = 1010(A_{eva})^{0.8} \quad [\$] \quad (31)$$

$$C_{ICKond} = 516.62(A_{kond})^{0.6} \quad [\$] \quad (32)$$

Aynı şekilde türbin ve pompa maliyetleri Denklem (35) ve (36)'dan hesaplanır [34].

$$C_{ICPo} = 200(\dot{W}_p)^{0.65} \quad [\$] \quad (33)$$

$$C_{ICTur} = 516.62(\dot{W}_{tur})^{0.75} \quad [\$] \quad (34)$$

Daha sonra bu değerlerin toplamı olan ekipman kurulum maliyeti (Equipment installation cost-EIC) bulunur. Ekipman maliyetleri 'Kimya Mühendisliği Tesis Maliyet İndeksi-Chemical Engineering Plant Cost Index (CEPCI)' kullanılmasıyla günümüze uyarlanır. $CEPCI_{güncel}$ 2023 yılı baz alınarak 803.4 [35] olarak alınmıştır. Tüm ekipman maliyetlerinde referans yıl 2017, buna karşılık gelen CEPCI değeri 567.5 [35] olarak belirtilmiştir. Buna göre Denklem (37) ile güncel ekipman kurulum maliyetine ulaşılır.

$$EIC_{güncel} = (C_{ICEva} + C_{ICKond} + C_{ICPo} + C_{ICTur}) * \left(\frac{CEPCI_{güncel}}{CEPCI_{referans}}\right) \quad [\$] \quad (35)$$

Güncel ekipman maliyetlerinin üstüne diğer maliyet kalemlerinin eklenmesiyle toplam yatırım maliyeti (Total Investment Cost-TIC) belirlenir. Bu maliyetler ve bu maliyetlerin ekipman kurulum maliyetlerinin ne kadarına karşılık geldiği Sohrabi ve diğ. [36], Zhang ve diğ. [34] ve Bejan ve diğ. [37]'nin çalışmaları baz alınarak aşağıda belirtilmiştir.

- Ekipman kurulum maliyeti (EIC'ın %20'si)
- Yapısal maliyet (EIC'ın %25'i)
- Servis maliyeti (EIC'ın %20'si)
- Arazi maliyeti (EIC'ın %10'u)
- Beklenmedik maliyet (EIC'ın %5'i)

Bu %80'lik artışa karşılık gelen maliyetlerin de eklenmesiyle toplam yatırım maliyeti elde edilmektedir (Denklem 38).

$$TIC = 1.8 * EIC_{güncel} \quad [\$] \tag{36}$$

3.7 Geliştirilen programın kullanımı

NeuORC programı sistem dizaynı bölümünde temel olarak 9 verinin kullanıcı tarafından girilmesine ihtiyaç duymaktadır. Bunlar çevrim akışkanının türü ısıl 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 5 ve Şekil 6'da gösterilmişti. Programda Coolprop kütüphanesinde tanımlı 123 farklı akışkan kullanıcı tarafından seçilebilmekte ve hesaplamalarda kullanılabilmektedir. 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.

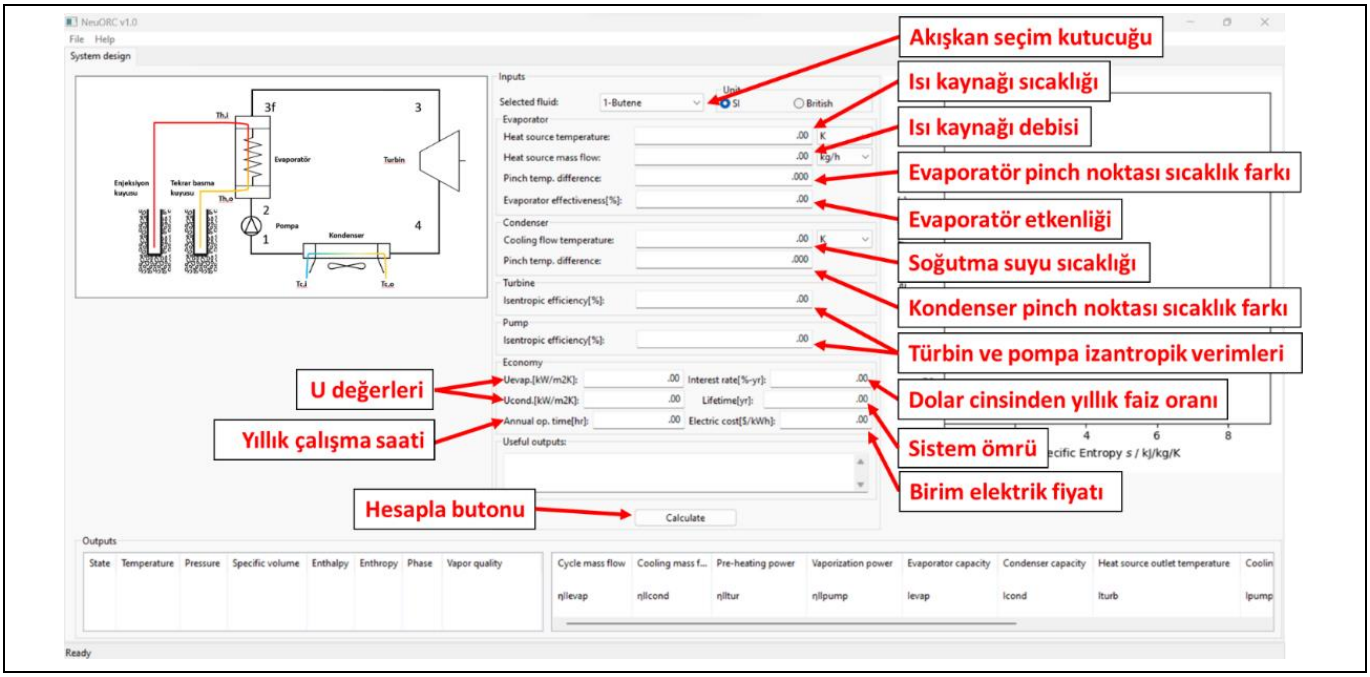
4 Araştırma sonuçları ve tartışma

Bu bölümde araştırma sonuçları sunulmuştur. Fakat öncesinde sonuçların güvenilirliği bakımından model doğrulanması yapılmıştır. Model doğrulanması geliştirilen yazılımın aşağıdaki çalışmanın tasarım şartlarında çalıştırılmasıyla yapılmıştır. Isıl verimin mukayese edilmesiyle %10'un altında bir hata oranı tespit edilmiştir (Tablo 1).

Tablo 1. Model doğrulanması
Table 1. Model validation

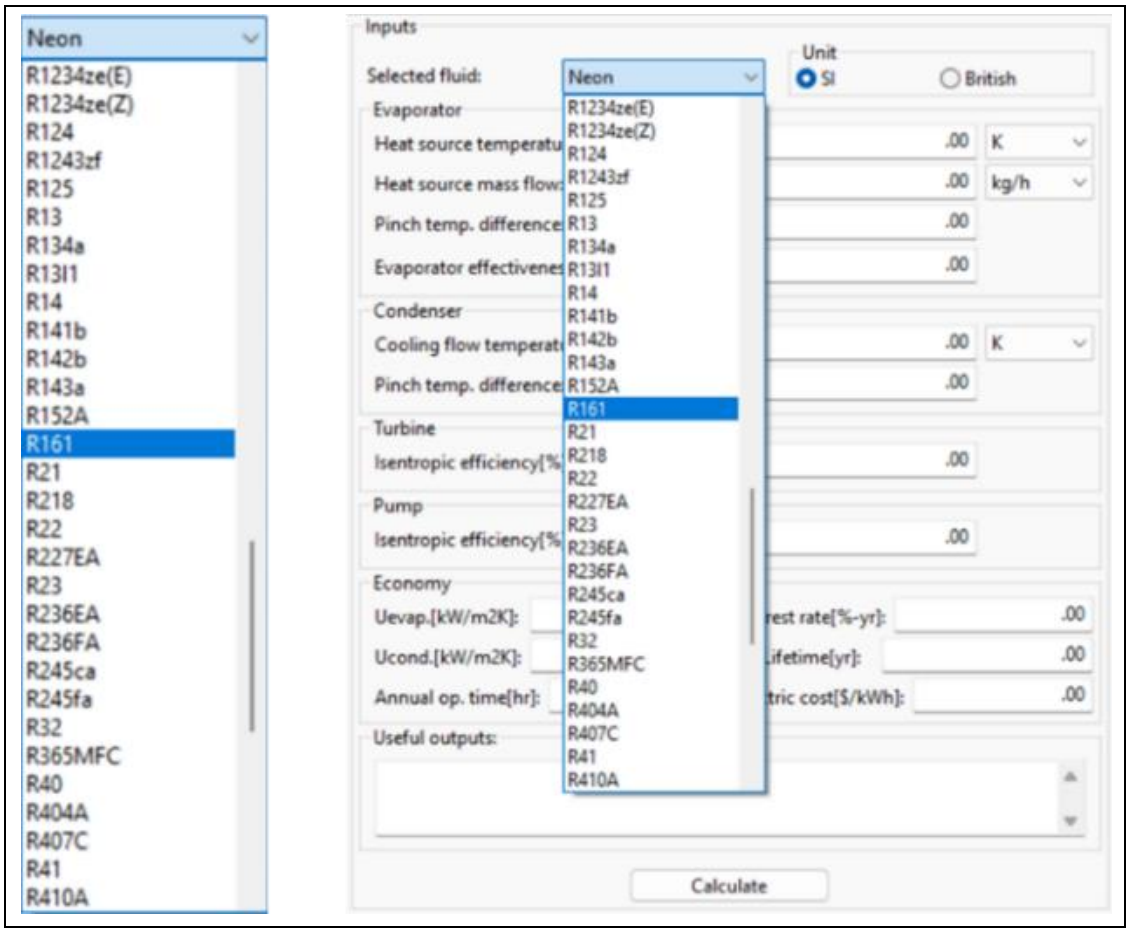
Tasarım Parametreleri	Isı kaynağı sıcaklığı: 95.7 °C Türbin giriş basıncı: 995 kPa; Türbin giriş sıcaklığı: 89.7 °C, Organik akışkan: R245fa	
Isıl Verim (%)	Mevcut çalışma	Galloni ve diğ. [38]
	9.93	9.28
Hata Oranı (%)	7.0	

Parametrik çalışma bölümünde 100 °C ısı kaynağı sıcaklığında R245fa akışkanının sırasıyla, W_{net}, $\eta_{ısıl}$, η_{II}, LCOE parametreleri $\Delta T_{pp,evap}$ değişkenine bağlı olarak incelenmiştir. Sabit tutulan parametreler ve problem kısıtları aşağıda 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. Elde edilen sonuçlar Şekil 7, Şekil 8, Şekil 9 ve Şekil 10'da gösterilmiştir.



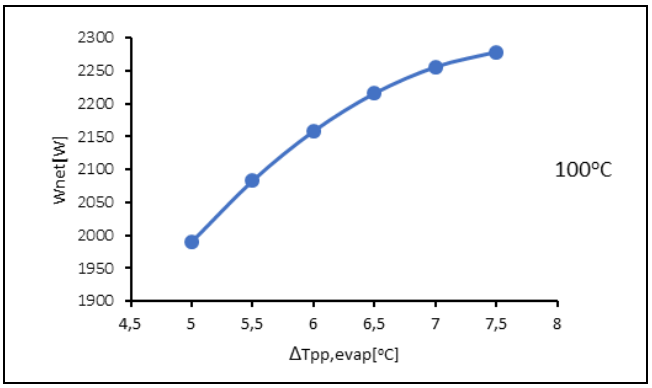
Şekil 5. NeuORC programı sistem dizaynı genel görünümü.

Figure 5. NeuORC program system design overview.



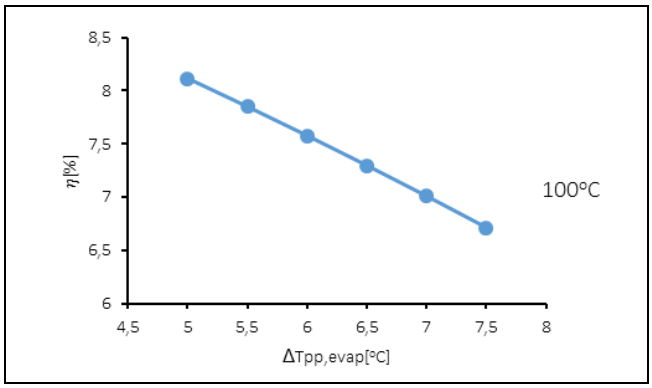
Şekil 6. Girdiler ekranı ve akışkan listesi.

Figure 6. Inputs screen and fluid list.



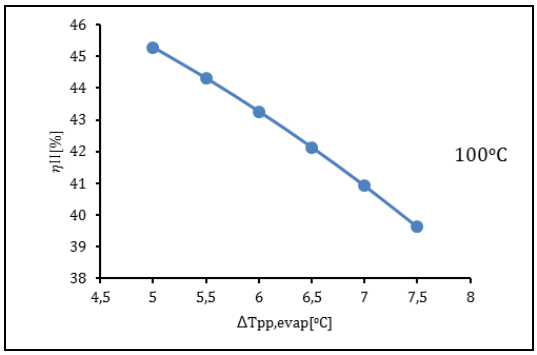
Şekil 7. R245fa akışkanı için $\Delta T_{pp,evap}$ değişimine göre Wnet değerleri.

Figure 7. Wnet values according to $\Delta T_{pp,evap}$change for R245fa fluid.



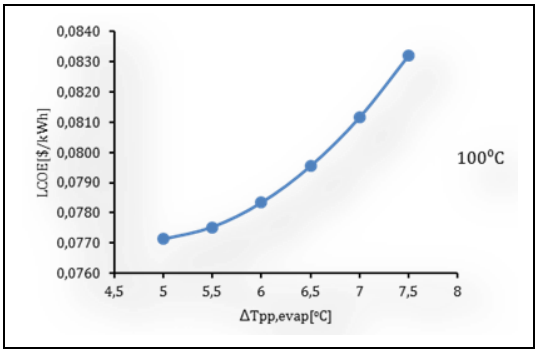
Şekil 8. R245fa akışkanı için $\Delta T_{pp,evap}$değişimine göre , η değerleri.

Figure 8. η values according to $\Delta T_{pp,evap}$change for R245fa fluid.



Şekil 9. R245fa akışkanı için $\Delta T_{pp,evap}$ değişimine göre , η_{II} değerleri.

Figure 9. η_{II} values according to $\Delta T_{pp,evap}$ change for R245fa fluid.



Şekil 10. R245fa akışkanı için $\Delta T_{pp,evap}$ değişimine göre LCOE değerleri.

Figure 10. LCOE values according to $\Delta T_{pp,evap}$ change for R245fa fluid.

Bu çalışmada evaporatör ve kondenserin ısı transfer katsayıları için Zhang ve diğ. [34]'nin 2023 yılına ait olan ORC çalışması esas alınmıştır. Evaporatör ve kondenser için ısı transfer katsayıları sırasıyla 0.88 ve 0.15 kW/m²K olarak alınmıştır.

Düşük sıcaklıklı ısı kaynağından (100-150 °C) verimli bir şekilde elektrik üretilmesinde ORC'nin kullanılabildiği belirtilmiştir [39]. Ayrıca, Li ve diğ. [40], kritik altı ORC için (sub-critical) ısı kaynağı sıcaklığının 160 °C'nin altında daha iyi performans gösterdiğini belirtmiştir. Bundan dolayı bu çalışmada 100, 130 ve 160 °C olmak üzere üç farklı ısı kaynağı sıcaklığı incelenmiştir. Ekonomik analiz için faiz oranı (i) %15, yıllık çalışma saati (n) 8200 sa. sistem ömrü (N) 20 yıl ve elektrik fiyatı (cel) 0.1 $/kWh olarak alınmıştır [41-42].

Çalışmada diğer sabit ve değişkenler aşağıda belirtilmiştir [43-45].

- 5°C < $\Delta T_{pp,evap}$ <20 °C , ε_{evap} = %75
- m_{kaynak} = 1000 kg/h
- $T_{c,i}$ = 25 °C, $\Delta T_{pp,kond}$ = 5 °C
- η_{tur} = %75 , η_{po} = %75
- T_3 > 65 °C , $T_{c,o}$ > 70 °C

İncelenen akışkanlara ait önemli termodinamik parametreler Tablo 2'de paylaşılmıştır.

Bulgular aşağıdaki gibidir:

- W_{net}'in $\Delta T_{pp,evap}$ değerinin artmasıyla sürekli bir artış kaydetmediği ve belirli bir noktadan sonra azalma yaklaşımı gösterdiği görülmüştür.
- Isıl verimin (η) akışkan türü ve sıcaklıktan bağımsız olarak $\Delta T_{pp,evap}$ değerinin artmasıyla sürekli olarak azaldığı görülmüştür.
- 100 °C sıcaklık için W_{net}'in maksimum olduğu $\Delta T_{pp,evap}$ değerleri sırasıyla 7,5 °C olduğu bulunmuştur. Bu pinch noktası değerlerinde güç çıktısı ise 2277,95 W'tır.
- 100 °C için LCOE, PB ve SIC değerlerinin minimum olduğu $\Delta T_{pp,evap}$ değerlerinin sırasıyla 5 °C olduğu bulunmuştur.
- En düşük LCOE değeri 0,0771 $/kWh, PB değeri ise 8,83 yıl, SIC değeri ise 2010,55 $/kW olarak bulunmuştur.

Tablo 2. Akışkan özellikleri tablosu (Bell ve diğ.[46], Call ve diğ. [47]).

Table 2. Fluid properties table.

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

4.1 NSGA-II çok amaçlı 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 akışkanı için 100 °C'de hesaplamalar gerçekleştirilmiştir. Amaç fonksiyonu olarak LCOE - W_{net} çiftleri kullanılmıştır. LCOE parametresinin minimizasyonu W_{net} parametresinin ise maksimizasyonu amaçlanmıştır. Parametrik çalışma bölümündeki sınır koşullarına ek olarak T_3 üzerine aşırı kızdırma uygulanmıştır. Uygulanan aşırı kızdırma sıcaklık farkı T_{sup} olarak tanımlamıştır. 0 °C < T_{sup} < 10 °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 °C
- ε_{evap} = %75
- $\dot{m}_{kaynak}$ = 1000 kg/h
- $T_{c,i}$ = 25 °C, $\Delta T_{pp,kond}$ = 5 °C
- η_{tur} = %75, η_{po} = %75
- i = %15 , N = 20 yıl , n = 8200 sa., c_{el} =0.1 $/kWh

Değişkenler:

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

Kısıtlar:

- T_3 > 65 °C, $T_{c,o}$ > 70 °C

NSGA-II algoritmasına ait girdi değerleri ise aşağıda paylaşılmıştır. Çalışma sonucunda elde edilen pareto eğrileri ve tablolar alt bölümlerde detaylı bir şekilde incelenmiştir. Optimizasyon sonucunda çıkan en iyi değerler ağırlık fonksiyonuna bağlı olarak Pymoo kütüphanesi-Compromise programming ile belirlenmiştir.

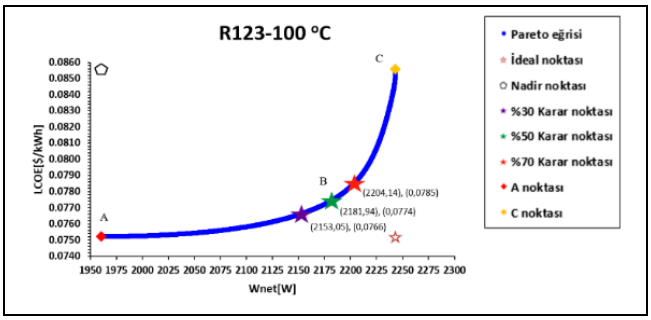
- A noktaları y eksenindeki değişkenin diğer değişkene bağlı olmaksızın minimum olduğu noktayı,
- B değişkeni %50 ağırlıklı karar noktasını,

- C noktası ise x eksenindeki eksenindeki değişkenin diğer değişkene bağlı olmaksızın maksimum olduğu noktayı temsil etmektedir.
- %30 karar noktası x eksenindeki maksimize edilmek istenen değerin %30 öneme sahip olduğu, y eksenindeki minimize edilmek istenen değerin 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.

NSGA-II algoritmasına ait girdileri aşağıdaki gibidir.

- 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

C noktası sadece W_{net}'in maksimize edildiği noktayı temsil etmektedir. C noktasına doğru ilerler iken $\Delta T_{pp,evap}$ artış göstermektedir. Bu sebeple $\Delta T_{pp,evap}$ parametresinin W_{net}'i arttırmaya etki ettiği söylenebilir. T_{sup} parametresi ise C noktasında alabileceği minimum değeri almaktadır. Şekil 11'de gösterilen A ve B noktalarındaki değerler ile de karşılaştırıldığında W_{net}'i arttırmada etkisinin olmadığı lakin LCOE parametresinin minimizasyonuna etki ettiği görülmektedir.



Şekil 11. 100 °C R245fa için pareto eğrisi.

Figure 11. Pareto curve for 100 °C R245fa.

B noktası ise W_{net} amaç fonksiyonu maksimize edilirken, LCOE amaç fonksiyonunun minimize edildiği ve her iki amaç fonksiyonunun aynı (%50-%50) öneme sahip olduğu konfigürasyonu temsil etmektedir. A noktası ise sadece LCOE amaç fonksiyonunun minimize edildiği noktayı temsil etmektedir. Tablo 3'te üç noktaya ait performans çıktı parametreleri sunulmuştur. Tablo 4'te geliştirilen yazılımla elde edilen sonucun güvenilirliği verilmiştir.

Tablo 3. 100 °C LCOE-Wnet çıktıları tablosu.

Table 3. 100 °C LCOE-Wnet outputs table.

	A Noktası	B Noktası	C Noktası
	R245fa	R245fa	R245fa
ΔTpp,evap [°C]	5.21	6.84	7.76
Tsup [°C]	6.50	7,15	0,01
T3 [°C]	85.67	79,80	68.98
P3[Pa]	772725	653575	592767
$\dot{W}_{net}$ [W]	2001.75	2213.02	2283.02
$\eta_{ısıl}$ [%]	7.99	7.09	6.56
η_{II} [%]	44.73	41.13	38.92
LCOE [$/kWh]	0,07594	0,07806	0,08444
PB [yıl]	8,55	9,06	10.88
SIC [$/kW]	1979.60	2034.87	2201.22

Tablo 4. Geliştirilen yazılımla elde edilen sonucun güvenilirliği.

Table 4. Reliability of the result obtained with the developed software.

Tasarım Parametreleri	B noktası tasarım şartları (Tablo 3)	
Isıl Verim (%)	Mevcut çalışma Geliştirilen yazılım	EES yazılımı [48]
	7.09	7.107
Hata Oranı (%)	0.23	

5 Sonuçlar

Bu çalışmada ORC'nin analizi için Python dili kullanılarak açık kaynak kodlu yazılım geliştirilmiştir. ORC'de maksimum ekserji verimi ve minimum maliyet altında Pymoo açık kaynaklı kütüphanesi kullanılarak çok amaçlı proses optimizasyonu çalışması yapılmıştır. Ayrıca, bu çalışmada;

- 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 termo-ekonomik model açıklanmıştır,
- Bu yazılımla gerçekleştirilen örnek parametrik çalışma tez içerisinde paylaşılmıştır,
- Ek-A 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 akışkanı için karar noktaları elde edilmiştir.

6 Conclusions

In this study, open source software has been developed using Python language for the analysis of ORC. In ORC, a multi-objective process optimisation study was carried out using Pymoo open source library under maximum exergy efficiency and minimum cost. Also, in this study;

- Free libraries such as Coolprop, Wxwidgets and Pymoo, which will assist researchers in thermodynamics studies, were examined,
- Sample uses of these libraries are explained in detail in the materials and methods section,
- NeuORC, an easy-to-use desktop software with a graphical interface, was developed using completely free and open source libraries,
- The features of the software, the mathematical model used and the thermoeconomic model are explained.
- Sample parametric study performed with this software is shared in the thesis,
- In Appendix-A, the source codes are made available openly and for the use of researchers working in the field of ORC.

In the last section, process optimization study was carried out with NSGA-II, a multi-objective optimization algorithm, independent of the NeuORC program. As a result of the study carried out using the Pymoo library, decision points for R245fa fluid were obtained.

7 Yazar katkı beyanı

Mehmet Berk Azdural programlama, analizlerin gerçekleştirilmesi, kaynak ve malzemelerin temini; Ali Kahraman fikrin oluşturulması, elde edilen sonuçların değerlendirilmesi, yazım ve eleştirel inceleme; Sadık Ata tasarımın yapılması, analizlerin gerçekleştirilmesi, literatür taraması konularında katkı sunmuşlardır.

8 Etik kurul onayı ve çıkar çatışması beyanı

"Hazırlanan makalede etik kurul izni alınmasına gerek yoktur". "Hazırlanan makalede herhangi bir kişi/kurum ile çıkar çatışması bulunmamaktadır".

9 Kaynaklar

[1] Hoang AT. "Waste heat recovery from diesel engines based on Organic Rankine Cycle". *Applied Energy*, 231, 138-166, 2018.

[2] Tchanche B. Heat conversion into power using small scale organic Rankine cycles. PhD Thesis, Athens University, Athens, Greece, 2010.

[3] Yılmaz F. Güneş çanaklı organik rankine çevriminin Isparta şartlarında incelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Isparta, Türkiye, 2013.

[4] Bao J, Zhao L. "A review of working fluid and expander selections for organic Rankine cycle". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 24(1), 325-342, 2013.

[5] Datla BV, Brasz JJ. "Comparing R1233zd And R245fa For LowTemperature ORC Applications". *15th International Refrigeration and Air Conditioning Conference,* Purdue, USA, 14-17 July 2014.

[6] Sánchez D, Muñoz De Escalona JM, Monje B, Chacartegui R, Sánchez T. "Preliminary analysis of compound systems based on high temperature fuel cell, gas turbine and Organic Rankine Cycle". *Journal of Power Sources*, 196(9), 4355-4363, 2021.

[7] Peng Y, Lin X, Liu J, Su W, Zhou N. "Machine learning prediction of ORC performance based on properties of working fluid". *Applied Thermal Engineering*, 195, 117-184, 2021.

[8] Sun Q, Lin D, Khayatnezhad M, Taghavi M. "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, 2021.

[9] Mousavi SA, Mehrpooya M, Delpisheh M. "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, 2022.

[10] Wang S, Liu C, Zhang S, Li Q, Huo E. "Multi-objective optimization and fluid selection of organic Rankine cycle (ORC) system based on economic-environmental-sustainable analysis". *Energy Conversion and Management*, 254, 115238, 2022.

[11] Hekmatshoar M, Deymi DM, Gholizadeh M, Dadpour D, Delpisheh M. "Thermoeconomic analysis and optimization of a geothermal-driven multi-generation system producing power, freshwater, and hydrogen". *Energy*, 247, 123434, 2022.

[12] Khoshgoftar MH, Mousavi SA, Nourpour M, Said Z. "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, 101861, 2022.

[13] Javed S, Tiwari AK. "Performance assessment of different Organic Rankine Cycle (ORC) configurations driven by solar energy". *Process Safety and Environmental Protection*, 171, 655–666, 2023.

[14] Zhou J, Chu YT, Ren J, Shen W, He C. "Integrating machine learning and mathematical programming for efficient optimization of operating conditions in organic Rankine cycle (ORC) based combined systems". *Energy*, 281, 128218, 2023.

[15] Lu X, Du B, Zhu W, Yang Y, Xie C, Tu Z, Zhao B, Zhang L, Wang J, Yang Z. "Multi-criteria assessment of an auxiliary energy system for desalination plant based on PEMFC-ORC combined heat and power." *Energy*, 290, 130163, 2023.

[16] Njock JP, Ngangué MN, Sosso OT, Nzengwa R. "Highlighting the effect of the lower operating limit of the condenser on ORC working fluids selection". *Results in Engineering*, 19, 101369, 2023.

[17] Rodriguez DA, Becerra JA, Chacartegui R. "Adaptation of residential solar systems for domestic hot water (DHW) to hybrid organic Rankine Cycle (ORC) distributed generation". *Energy*, 263, 125901, 2023.

[18] Feng YQ, Zhang Q, Xu KJ, Wang CM, He ZX, Hung TC. "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, 125670, 2023.

[19] Zhang X, Zhang Z, Wang G. "Thermodynamic and economic investigation of a novel combined cycle in coal-fired power plant with CO2 capture via Ca-looping". *Energy*, 263, 125795, 2023.

[20] Wang L, Xia L, Li C, Tian Y, Teng J, Sun X, Xiang S. "Exergy, economic, and exergoenvironmental analyses of new combined heat and power process based on mechanism analysis of working fluid screening". *Energy*, 262, 125308, 2023.

[21] Karabuga A, Yakut MZ, Utlu Z. "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, 2023.

[22] Xing C. "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, 120904, 2023.

[23] Feng YQ, Zhang Q, Xu KJ, Wang CM, He ZX, Hung TC. "Operation characteristics and performance prediction of a 3 kW organic Rankine cycle (ORC) with automatic control system based on machine learning methodology". *Energy*, 263, 125857, 2023.

[24] Chitgar N, Hemmati A, Sadrzadeh M. "A comparative performance analysis, working fluid selection, and machine learning optimization of ORC systems driven by geothermal energy". *Energy Conversion and Management,* 286, 117072, 2023.

[25] Hajialigol N, Fattahi A, Karimi N, Jamali M, Keighobadi S. "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*, 290, 130166, 2023.

[26] Ata S, Kahraman A, Şahin R. "Çok değişkenli optimizasyon ile organik Rankine çevrim verimini etkileyen parametrelerin hassasiyet ve katkı oranlarının tespiti". *Pamukkale University Journal of Engineering Sciences*, 29(1), 94–103, 2023.

[27] Atiz A, Karakilcik M. "Adana iklim koşullarında Organik Rankine Çevrimi ile bütünleşik düzlem-plakalı ve vakum tüplü kolektörlerin ısıl verimlerinin karşılaştırılması". *Pamukkale University Journal of Engineering Sciences*, 26(1), 106–112, 2020.

[28] Bilgiç M. Development of Thermofluidic Design Tool for Organic Ranknie Cycle Axial and Radial İnflow. PhD Thesis, Middle East Technical University, Ankara, Türkiye, 2023.

[29] Aksoy M. Yeni-Nesil ve Zeotropik Akışkanlar Kullanılarak Tasarlanmış Rejeneratif Reküperatörlü Organik Rankine Çevriminin Performansının Belirlenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Necmettin Erbakan Üniversitesi, Konya, Türkiye, 2023.

[30] Bayraktar B. Mikro Skala Organik Rankine Çevrimi Sistemi Tasarımı, Üretimi ve Testi. Yüksek Lisans Tezi, Boğaziçi Üniversitesi, İstanbul, Türkiye, 2022.

[31] Karadaş M. Designing of an Organic Rankine Cycle Power Plant by Using Low Enthalpy Geothermal Resources. PhD Thesis, Aydın Adnan Menderes University, Aydın, Türkiye, 2022.

[32] Kaplan A. Farklı Soğutucu Akışkanlar Kullanılarak İki Aşamalı Organik Rankine Çevriminin Termodinamik ve Eksergoekonomik Analizi. Yüksek Lisans Tezi, Çukurova Üniversitesi, Adana, Türkiye, 2022.

[33] Konur O. Applicatıon of Organic Rankine Cycle (Orc) System To Marine Vessels. PhD Thesis, Dokuz Eylül University, İzmir, Türkiye, 2021.

[34] Zhang H, Liu X, Hao R, Ba, X, Liu C, Liu Y, Duan C, Qiao M, Qin J. "Thermodynamic and thermoeconomic analyses of the energy segmented stepped utilization of medium- and low-temperature steam based on a dual-stage organic Rankine cycle". *Applied Thermal Engineering*, 219, 119488 2023.

[35] Maxwell C. "Chemical Engineering Plant Cost Index (CEPCI)". https://toweringskills.com/financial-analysis/cost-indices/ (01.06 2023).

[36] Sohrabi A, Behbahaninia A, Sayadi S. "Thermodynamic optimization and comparative economic analysis of four organic Rankine cycle configurations with a zeotropic mixture". *Energy Conversion and Management*, 250, 114872, 2021.

[37] Bejan A, Tsatsaronis G, Moran MJ. *Wiley Editing Services*. *Economic Analysis*. Editors: Wiley Editing Services. Thermal Design and Optimization. 348-420, Danvers, ABD,Wiley MA, 1996.

[38] Galloni E, Fontana G, Staccone S. "Design and experimental analysis of a mini ORC (organic Rankine cycle) power plant based on R245fa working fluid". *Energy,* 90, 768-775, 2015.

[39] Lukawski MZ, Ronald DP, Jefferson WT. "Molecularroperty methods for assessing efficiency of organic Rankine cycles". *Energy*, 142, 108-120, 2018.

[40] Li J, Liu Q, Ge Z, Duan Y, Yang Z. "Thermodynamic performance analyses and optimization of subcritical and transcritical organic Rankine cycles using R1234ze(E) for 100–200 °C heat sources". *Energy Conversion and Management*, 149, 140-154, 2017.

[41] Zhar R, Allouhi A, Jamil A, Lahrech K. "A comparative study and sensitivity analysis of different ORC configurations for waste heat recovery". *Case Studies in Thermal Engineering*, 28, 101608, 2021.

[42] Aksar M, Yağlı H, Koç Y, Koç A, Sohani A, Yumrutaş R. "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, 115739, 2022.

[43] Jankowski M, Borsukiewicz A, Szopik-Depczynska K, Ioppolo G. "Determination of an optimal pinch point temperature difference interval in ORC power plant using multi-objective approach". *Journal of Cleaner Production*, 217, 798-807, 2019.

[44] Scagnolatto G, Cabezas-Gomez L, Tibiriça CB. "Analytical model for thermal efficiency of organic Rankine cycles, considering superheating, heat recovery, pump and expander efficiencies". *Energy Conversion and Management*, 246, 114628, 2021.

[45] Jubori AA, Daabo A, Al-Dadah RK, Mahmoud S, Ennil AB. "Development of micro-scale axial and radial turbines for low-temperature heat source driven organic Rankine cycle". *Energy Conversion and Management*, 130, 141-155, 2016.

[46] Bell IH, Wronski J, Quoilin S, Lemort V. "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, 2014.

[47] Calm JM, Hourahan GC. "Refrigerant Data Update". *HPAC Engineering*, 79(1), 50-64, 2007.

[48] f-Chart Software "Mastering EES". https://fchart.com/assets/downloads/Mastering-EES-TOC.pdf (01.06 2023).

Ek A

Programa aşağıdaki link üzerinden ulaşılabilir. https://github.com/arcilyes/NeuORC/tree/605d4d46fbb164a07799741f5d7b68f0d696ede