

Investigation Of Performance Of An ORC System With Different Working Fluids And Turbine Isentropic Efficiencies

Fatih Yiğit^{1*} 

Abstract: The Organic Rankine Cycle (ORC) is the thermodynamic cycle commonly used to convert low-grade heat sources into useful work. To maximize the efficiency of the ORC system, it is important to select a suitable working fluid and turbine. This study aims to investigate the effect of turbine isentropic efficiency and different coolants on the overall performance and efficiency of ORC. In this context, a thermodynamic analysis including various parametric studies has been carried out to compare the coolant performance under different operating conditions. In line with the findings, the parametric studies revealed that the highest efficiency was 13.79% when R123 was used at 85% turbine isentropic efficiency and the lowest efficiency was 8.42% when R365mcf was used at 60% turbine isentropic efficiency. However, the highest turbine power was calculated to be 5.506 kW at 85% turbine isentropic efficiency using R1233zd(E) fluid. In addition, the highest and lowest exergy dissipation is 4.065 kW at 60% turbine isentropic efficiency using R1233zd(E) fluid and 2.196 kW at 85% R123 fluid, respectively.

Keywords: Organic Rankine Cycle, working fluid, thermodynamic analysis, efficiency.

Farklı Çalışma Akışkanları Ve Türbin İzentropik Verimleri İle Bir ORC Sisteminin Performansının İncelenmesi

Özet: Organik Rankine Çevrimi (ORC), düşük dereceli ısı kaynaklarını faydalı işe dönüştürmek için yaygın olarak kullanılan termodinamik çevrimdir. ORC sisteminin verimliliğini en üst düzeye çıkarmak için uygun bir çalışma akışkanı ve türbinin seçimi önemlidir. Bu çalışmada, türbin izentropik verimliliğinin ve farklı soğutucu akışkanlarının ORC'nin genel performansı ve verimliliği üzerindeki etkisini araştırmayı amaçlanmaktadır. Bu kapsamda farklı çalışma koşulları altında soğutucu performansını karşılaştırmak için çeşitli parametrik çalışmalar içeren bir termodinamik analiz gerçekleştirilmiştir. Elde edilen bulgular doğrultusunda, yapılan parametrik çalışmalarda en yüksek verimin %13.79 ile R123 akışkanının %85 türbin izantropik veriminde kullanıldığı durumda, en düşük verim ise %8.42 ile %60 türbin izantropik veriminde R365mcf akışkanının kullanıldığı durumda gerçekleştiği ortaya koyulmuştur. Bununla birlikte en yüksek türbin gücünün R1233zd(E) akışkanın kullanıldığı %85 türbin izantropik veriminin olduğu durumda 5.506 kW hesap edilmiştir. Ayrıca en yüksek ve en düşük ekserji yıkımı sırasıyla %60 türbin izantropik veriminde R1233zd(E) akışkanını kullanıldığı durumda 4.065kW, %85 R123 akışkanın kullanıldığı durumda 2.196 kW olduğu belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Organik Rankine Çevrimi, çalışma sıvısı, termodinamik analiz, verimlilik.

¹**Address:** Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Isparta/Türkiye

***Sorumlu Yazar:** fatihyigit@isparta.edu.tr

Atıf: Yiğit, F., (2023). Farklı Çalışma Akışkanları Ve Türbin İzentropik Verimleri İle Bir ORC Sisteminin Performansının İncelenmesi. 21. Yüzyılda Fen ve Teknik Dergisi, 10(20): 80-87

1. GİRİŞ

Sürdürülebilir enerji çözümlerine yönelik artan talep, enerji üretimi için düşük dereceli ısı kaynaklarının kullanılmasına yönelik ilginin artmasına neden olmuştur (Thangavel vd., 2021). Organik Rankine Çevrimi (ORC), düşük sıcaklık ısı kaynaklarından elektrik üretimi için kullanılan bir termodinamik süreçtir. Geleneksel Rankine Çevrimi'nden farklı olarak, ORC'de etkili çalışma akışkanı olarak su yerine organik bileşikler kullanılır. Organik akışkanlar, daha düşük kaynama noktalarına ve daha yüksek moleküler ağırlıklara sahiptir, bu da ORC'nin daha düşük sıcaklık farklarıyla çalışabilmesini ve daha basit ve uygun maliyetli türbinlere kullanılabilmesini sağlar (Quoilin vd., 2011). ORC teknolojisi, atık ısı geri kazanımı, jeotermal enerji, güneş enerjisi ve biyokütle gibi yenilenebilir ve sürdürülebilir enerji kaynakları için uygun bir seçenektir.

ORC sistemlerinde çalışma akışkanının seçimi kritiktir ve kullanılan akışkan ORC'nin termodinamik verimliliği, net güç çıkışı, ekserji kaybı ve çevresel etki üzerinde doğrudan etkilidir (Tümen Özdil vd., 2016). ORC için çalışma akışkanının seçimi, tasarım ve işletme parametreleri ile uyumlu olmalıdır. Birçok organik bileşik çalışma akışkanı olarak kullanılabilir, ancak bunlar farklı termodinamik, fiziksel, kimyasal ve çevresel özelliklere sahiptir. ORC için en uygun çalışma akışkanını belirlemek için çok kriterli bir optimizasyon yaklaşımını benimsemek gereklidir (Özdemir ve Kılıç, 2017). Bir ORC sisteminde, uygun bir çalışma akışkanının seçimi ve türbinin verimliliği, sistemin genel performansını ve verimliliğini önemli ölçüde etkileyen kritik faktörlerdir.

Literatürde, ORC sisteminin performansını ve verimliliğini etkileyen çeşitli faktörlerin analizi için farklı yöntemler ve modeller kullanılmıştır. Örneğin, Wang ve ark. (2010) ORC sisteminin verimliliğini artırmak için R245fa çalışma akışkanının deneysel termodinamik analizini yapmışlardır. Chen ve ark. (2010) 35 farklı çalışma akışkanı özelliklerinin ORC sisteminin performansını üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Ayrıca termodinamik ve fiziksel özellikler, kararlılık, çevresel etkiler, güvenlik ve uyumluluk ile bulunabilirlik ve maliyet gibi bir çalışma akışkanı seçerken dikkate alınması gereken önemli ortaya koymuşlardır. Zhang ve ark. (2011) ORC sisteminin verimliliğini artırmak için farklı soğutucu akışkanlarının etkisini araştırmışlardır. Araştırmacılar, farklı sıcaklık aralıklarına ve ısı kaynaklarına uygunluklarını değerlendirmek için çeşitli çalışma akışkanlarının kaynama noktası, kritik sıcaklık ve özgül ısı kapasitesi gibi termodinamik özelliklerini değerlendirmişlerdir. Hu vd., (2022) Düşük sıcaklıklı jeotermal enerji santralinde kullanılan organik Rankine çevrimi için çalışma sıvısı seçimi konusunda çalışmıştır. Ge vd., (2022) ise Düşük dereceli atık ısı geri kazanımı için farklı akışkanlara sahip iki organik Rankine çevriminin performans analizi ve çok amaçlı optimizasyonu konusunda araştırmalar yapmıştır. Thangavel vd., (2021) ve Méndez-Cruz vd., (2022) farklı çalışma akışkanlarının termal verimlilik, net güç çıkışı ve ısı transferi özellikleri açısından performansı analiz edilmiştir. Ayrıca türbin izantropik verimimin sistem performansı üzerine etkilerini inceleyen çeşitli çalışmalar mevcuttur. İbrahim ve Rahman 2015 yılında yapmış oldukları çalışmada, izentropik verimlerin

kombine çevrim enerji santrallerinin performansı üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Çalışmalarında İzentropik verimliliklerin gerçek bir kombine çevrim enerji santralinin (CCGT) performansı üzerindeki etkisini ortaya koymuşlardır. Rahman ve arkadaşları (2011), gaz türbinli güç santralının termodinamik performans analizi konusunda yaptıkları çalışmada sıkıştırma oranı ve izentropik türbin verimliliğindeki artışın, ısı verimliliğinde artışa neden olduğunu ifade etmişlerdir. Sarkar (2009) yaptığı çalışmada, izentropik verim, reküperatör etkinliği ve bileşen basınç düşüşünün ikinci yasa verimi üzerindeki etkisini ortaya koymuştur. Elde ettiği sonuçlara göre, türbinin izentropik verimliliğinin etkisinin kompresörlere göre ikinci yasa verimliliğine yaklaşık 2,5 kat daha fazla etkilediğini ifade etmiştir. Zang ve arkadaşları (2018) düşük sıcaklıklı jeotermal kaynak için hava soğutmalı bir organik Rankine sisteminin türbin izentropik verimliliğinin etkilerini dikkate alarak parametrik optimizasyonu ve performans analizini yapmışlardır. Sistem ekserji verimliliğini R245fa ve iki çevre dostu çalışma sıvısı R1234ze(E) ve R1234ze(Z) ile karşılaştırmışlardır. Türbin izantropik verimleri için türbin boyut parametresi ve hacim oranı kavramlarını içeren bir izantropik verim grafiği ortaya koymuşlardır. R1234ze(E) akışkanının izantropik verimliliğinin R245fa'dan daha yüksek olduğunu tespit etmişlerdir.

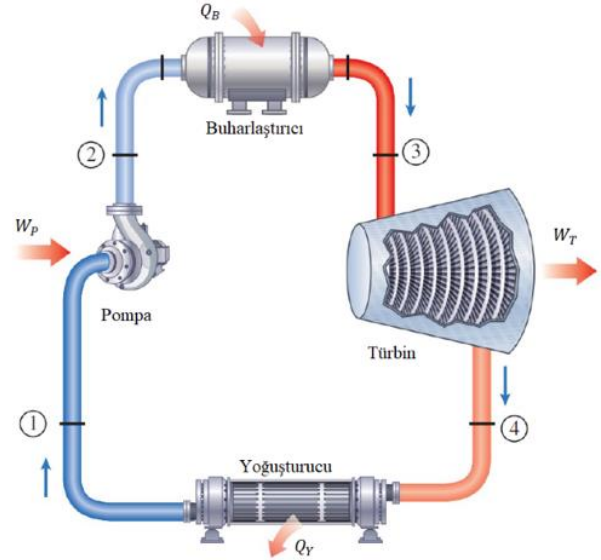
Önceki çalışmalar incelendiğinde farklı çalışma akışkanları ve türbinin izentropik verimliliğinin, ORC'nin performansını doğrudan etkilediği görülmektedir. Ancak literatürde yer alan çalışmaların çoğunlukla sabit bir izantropik verim kabulü ile yapıldığı, yada akışkan türüne göre farklı izantropik verimlerin etkisinin ortaya koyulduğu görülmüştür. Türbinin izentropik verimliliği, türbinin gerçek ve ideal durumları arasındaki farkı ölçen bir parametredir ve türbin tasarımı, boyutu, hızı, basınç oranı ve çalışma akışkanı özellikleri gibi faktörlere bağlıdır. Pan ve Wang (2013) yılında Radyal akış türbinine dayalı Organik Rankine Çevriminin geliştirilmiş analizi konusunda çalışmışlardır ve ORC analizinde genleştiricinin (veya türbinin) sabit bir izentropik verim yerine hesaplamalı optimum verimin uygulanması önemini ifade etmiştir. Bu bağlamda incelenen literatürde türbin izentropik verimliliğinin ORC sisteminin performansını etkilediği bilinmekle birlikte, farklı çalışma akışkanları ile birleşik etkisi sınırlı ilgi görmüştür. Türbin izentropik verimliliği ile çalışma sıvısı özellikleri arasındaki etkileşimi araştıran az sayıda çalışma vardır ve bu alanda daha fazla araştırma yapılması gerektiğinin altı çizilmektedir (Li vd., 2019). Ancak, ORC sisteminin performansını ve verimliliğini etkileyen faktörlerin kapsamlı bir şekilde incelenmesi ve optimize edilmesi için daha fazla çalışmaya ihtiyaç vardır.

Bu çalışmanın amacı, Pan ve Wang'ın önerdiği gibi sabit bir izantropik verim yerine farklı izantropik verimlerde çalışma durumunu ortaya koyabilmek için ORC türbininin farklı izantropik verimlerdeki performansı incelemektir. Ayrıca farklı izantropik verime sahip türbinin kullanıldığı ORC için R245fa, R123, R365mfc ve R1233zd (E) akışkanların performansı araştırılmıştır. Bu amaçla, farklı türbin izantropik verimlerinde akışkanların ORC sistemindeki elemanların kapasiteleri, sistemin ısı verimi, entropi üretimi, ekserji yıkımı ve ikinci yasa verimleri üzerindeki etkileri ortaya koyulmuştur.

2. MATERYAL VE METOT

Bu çalışmada farklı çalışma akışkanları ve farklı türbin izantropik verimlerinde ORC sisteminin genel performansını ve verimini belirlemek için termodinamik analiz gerçekleştirilmiştir. ORC sisteminin elemanları ve sistemin genel gösterimi Şekil 1.'de verilmiştir. ORC sisteminde temelde pompa, buharlaştırıcı, türbin ve yoğurturucu olmak üzere dört eleman bulunmaktadır. Yoğurturucudan gelen sıvı halde ve düşük basınçtaki soğutucu akışkan (1 noktası) pompa ile yüksek basınçta çıkarılarak (2 noktası) buharlaştırıcıya sevk edilir. Soğutucu akışkan, buharlaştırıcıda atık ısı veya başka bir kaynaktan alınan düşük sıcaklıklı ısı ile buharlaştırılarak kızgın buhar fazında (3 noktası) türbine gönderilir. Türbinde genişleyerek iş yapan soğutucu akışkan düşük basınç ve sıcaklıkta tekrar sıvı forma döndürülmek üzere yoğurturucuya aktarılır (4 noktası). Yoğurturucuda ısı atarak sıvı hale gelen akışkan yeniden pompaya gönderilerek çevrim sürekli olarak devam ettirilir.

Yapılan çalışmada, farklı çalışma sıvılarının ORC performansı üzerindeki etkisini değerlendirmek için R123, R245fa, R365mcf, R1233zd(E), olmak üzere dört farklı sıvı seçilmiştir. Akışkanların tercih edilmesindeki temel olarak düşük GWP ve düşük ODP özelliklerine sahip olmalarının yanı sıra termodinamik özelliklerine, çevresel etkilerine, kullanılabilirliklerine ve güvenlik hususlarına önem verilmiştir. Çizelge 1'de tercih edilen çalışma sıvılarına ilişkin özellikler verilmiştir.



Şekil 1. ORC Çevrimi genel gösterimi (Çengel ve Boles, 2015)

Sistemin termodinamik analiz gerçekleştirmek amacıyla ORC sisteminin matematiksel modelini oluşturmak için Çizelge 2'de yer alan denklemler kullanılmıştır. Bu çalışmada, sistemdeki her bir bileşen için enerji denklemleri ve termodinamik denklemler kullanılarak ORC sistemi modellenmiştir. Termodinamik analiz için, Mühendislik Denklem Çözücü (EES) yazılımından faydalanılmıştır (Klein, 2013). Bu yazılımda, ORC sisteminin matematiksel modelini çözmek ve performans parametrelerini hesaplamak amacıyla, çalışma sıvılarının termodinamik özelliklerini içeren literatürden elde edilen veriler, simülasyon ve analiz için giriş parametreleri olarak kullanılmıştır.

Sistemin analizini gerçekleştirmek amacıyla Çizelge 3'de gösterilen türbin giriş-çıkış sıcaklığı, türbin giriş basıncı, çalışma akışkanının kütleli debisi, türbin izantropik verim ve yoğurturucu basıncı gibi ORC sisteminin performansını etkileyen önemli parametreler belirlenmiştir.

Çizelge 1. Kullanılan akışkanlar ve özellikleri (Pan vd., 2013, Tchance vd., 2009, Klein 2013)

Akışkan	Moleküler Ağırlık	Kritik Sıcaklık	Kritik Basıncı	GWP	ODP	Atmosferik ömür* (yıl)	Güvenlik (ASHREA 34)
R245fa	134.05	426	3610	950	0	7.2	B1
R123	152.93	456	3660	77	0.02	1.3	B1
R365mfc	148.07	459.9	3266	895	0	8.7	-
R1233zd (E)	130.5	438.8	3573	1	0	0.11	A1

Atmosferik ömür* söz konusu akışkanın atmosferdeki konsantrasyonunda ani bir artış veya azalmanın ardından atmosferdeki dengenin yeniden sağlanması için gereken süreyi ölçer.

Çizelge 2. ORC Termodinamik analiz denklemleri

	Kütle Dengesi	Enerji Dengesi	Entropi Üretimi	Ekserji Yıkımı
Genel Denklemler	$\dot{m}_g - \dot{m}_ç = 0$	$E_g - E_ç = 0$	$S_g - S_ç + S_{ür} = 0$	$Ex_g - Ex_ç - Ex_y = 0$
Pompa	$\dot{m}_1 - \dot{m}_2 = 0$	$\dot{m}_1 h_1 + W_p - \dot{m}_2 h_2 = 0$	$\dot{m}_1 s_1 - \dot{m}_2 s_2 + S_{ür,P} = 0$	$\dot{m}_1 h - \dot{m}_2 h_2 + W_p - Ex_{y,P} = 0$
Buharlaştırıcı	$\dot{m}_2 - \dot{m}_3 = 0$	$\dot{m}_2 h_2 + Q_B - \dot{m}_3 h_3 = 0$	$\dot{m}_2 s_2 + \frac{Q_B}{T_B} - \dot{m}_3 s_3 + S_{ür,B} = 0$	$\dot{m}_2 h_2 + Q_B \left(1 - \frac{T_0}{T_B}\right) - \dot{m}_3 h_3 + Ex_{y,B} = 0$
Türbin	$\dot{m}_3 - \dot{m}_4 = 0$	$\dot{m}_3 h_3 - W_T - \dot{m}_4 h_4 = 0$	$\dot{m}_3 s_3 - \dot{m}_4 s_4 + S_{ür,T} = 0$	$\dot{m}_3 h_3 - W_T - \dot{m}_4 h_4 - Ex_{y,T} = 0$
Yoğuşturucu	$\dot{m}_4 - \dot{m}_1 = 0$	$\dot{m}_4 h_4 - Q_Y - \dot{m}_1 h_1 = 0$	$\dot{m}_4 s_4 - \frac{Q_Y}{T_Y} - \dot{m}_1 s_1 + S_{ür,Y} = 0$	$\dot{m}_4 h_4 - Q_Y \left(1 - \frac{T_0}{T_Y}\right) - \dot{m}_1 h_1 - Ex_{y,Y} = 0$

Çizelge 3. ORC termodinamik analizi için kabul edilen parametreler

Parametre	Kabuller
Kütleli Debi (kg/s)	0.167
Türbin Giriş Basıncı (kPa)	1800
Türbin Çıkış Basıncı (kPa)	250
*Türbin Giriş Sıcaklığı (°C)	$T_{doyma} + 5$ °C
Türbin İzentropik Verimi (%)	%80
Yoğuşturucu çıkışı kuruluk değeri (-)	0

*Türbin giriş sıcaklığı, Türbin giriş basıncındaki doyma sıcaklığının 5 °C aşırı kızdırması olarak kabul edilmiştir.

ORC sisteminin performansı, termal verimlilik, net güç çıkışı ve ısı transferi özellikleri dahil olmak üzere temel termodinamik parametreler kullanılarak değerlendirilmiştir. Değişen türbin izentropik verimlerinde farklı çalışma sıvıları için genel sistem performansı üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Çalışma sıvıları ve türbin izentropik verim arasındaki etkileşimi değerlendirmek için farklı senaryolar simüle edilmiş ve sonuçlar karşılaştırılmıştır.

3. BULGULAR

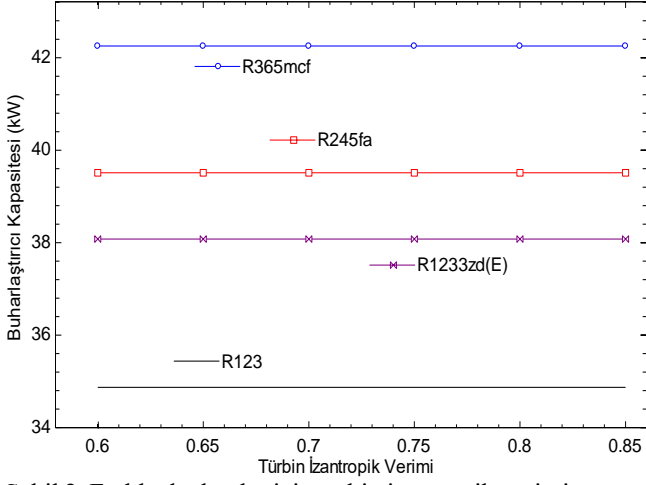
Çalışma akışkanı seçimi ve türbinin izentropik verimliliği, Organik Rankine Çevrimi (ORC) sisteminin performansını en üst düzeye çıkarmada önemli faktörlerdir. Bu çalışmada, türbin izentropik verimliliğinin ve farklı çalışma akışkanlarının ORC performansı üzerindeki birleşik etkisinin analizi yapılmıştır. Çalışmada Çizelge 3'te yer alan çalışma parametreler kullanılarak ve Çizelge 2'de verilen denklemlerin mühendislik denklem çözücü yazılımında çözümlenmiş ve her bir akışkan için elde edilen sonuçlar Çizelge 4'te gösterilmiştir. Kabul edilen çalışma şartları altında en yüksek güç üretimi 5.182 kW ile R1233zd(E) akışkanının kullanıldığı durumda gerçekleşirken, en düşük güç üretimi 4.703 kW ile R123 akışkanının kullanıldığı durumda gerçekleşmiştir. Öte yandan en yüksek verim R123 akışkanının kullanıldığı durumda meydana gelmiştir. Benzer şekilde en yüksek ikinci yasa verimi, R123 akışkanında gerçekleşmiştir.

Yapılan hesaplar sonucunda aynı çalışma şartları altında yapılan incelemede R365mfc akışkanının kullanıldığı durumda buharlaştırıcı ve yoğuşturucu kapasitesinin diğer akışkanlara kıyasla daha yüksek ve ekserji yıkımının en fazla olduğu ortaya koyulmuştur.

Çizelge 4. Farklı akışkanlar için kabul edilen şartlar altında termodinamik sonuçlar

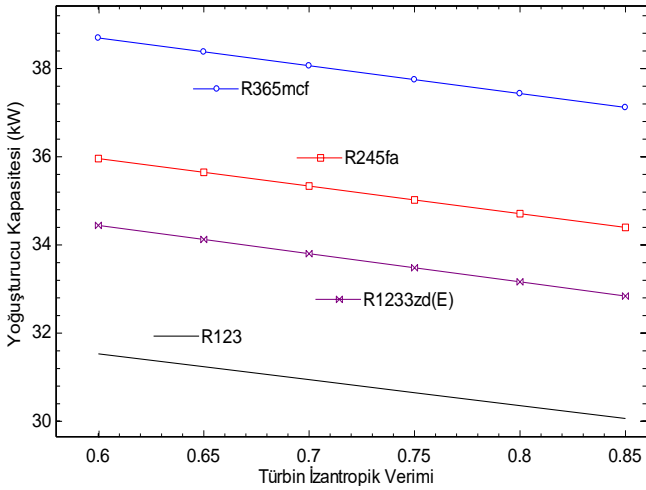
	R245fa	R123	R365mfc	R1233zd(E)
Kütleli Debi (kg/s)	0.167	0.167	0.167	0.167
Türbin Giriş Basıncı (kPa)	1800	1800	1800	1800
Türbin Çıkış Basıncı (kPa)	250	250	250	250
Türbin Giriş Sıcaklığı (°C)	121.5	146.2	158.3	131.9
Yoğuşturucu Sıcaklığı (°C)	40	55.4	67.9	44.7
Pompa Gücü (kW)	0.1996	0.1872	0.2231	0.2133
Buharlaştırıcı Kapasitesi (kW)	39.51	34.87	42.25	38.96
Türbin Gücü (kW)	4.999	4.703	5.042	5.182
Yoğuşturucu Kapasitesi (kW)	34.71	30.36	37.43	33.99
Toplam Ekserji Yıkımı (kW)	2.816	2.463	3.18	2.85
Toplam Entropi Üretimi (kJ/K)	0.009449	0.008266	0.01067	0.009562
Isıl Verim (-)	0.1215	0.1295	0.114	0.1275
II. Yasa Verimi (-)	0.5882	0.5974	0.5446	0.5923

Şekil 2'de farklı akışkanlar için türbin izentropik veriminin 0.6 – 0.85 arasında değiştiği parametrik çalışmada buharlaştırıcı kapasitelerinin değişimi verilmiştir. En yüksek buharlaştırıcı kapasitesi ihtiyacı R365fc akışkanının kullanıldığı durumda gerekirken, en düşük buharlaştırıcı kapasitesi ihtiyacı R123 akışkanında olduğu belirlenmiştir.



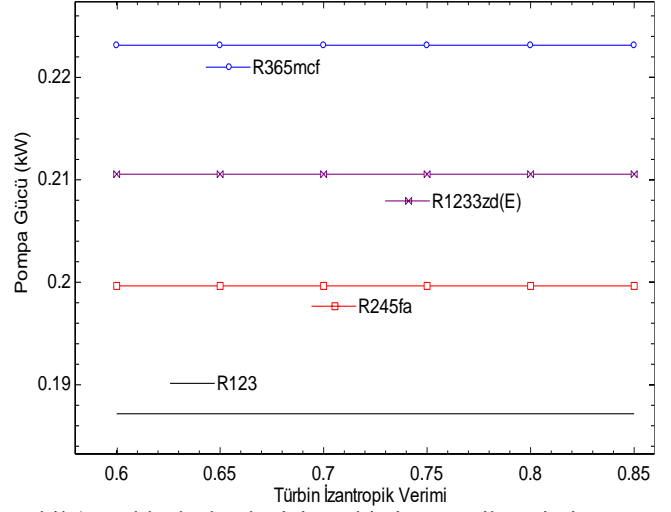
Şekil 2. Farklı akışkanlar için türbin izantropik verimine göre buharlaştırıcı kapasitesinin değişimi

Şekil 3'te farklı türbin izantropik verimlerinde akışkan türüne göre sistemde ihtiyaç duyulan yoğuşturucu kapasiteleri görülmektedir. Türbin izantropik verimi arttıkça ihtiyaç duyulan yoğuşturucu kapasitesinin incelenen tüm akışkanlar için azalmakta olduğu anlaşılmaktadır. Bu durumun türbin izantropik veriminin artmasıyla akışkanın enerjisinin daha büyük bir kısmının işe dönüşmesinden kaynaklı olduğu düşünülmektedir. Türbin girişinde sahip olduğu enerjinin daha büyük bölümünün işe dönüşmesi ile daha düşük bir yoğuşturucu kapasitesine ihtiyaç duyulmaktadır. Bununla birlikte yine en yüksek yoğuşturucu kapasitesi ihtiyacının R365mcf akışkanının kullanıldığı durumda, en düşük yoğuşturucu kapasitesi ihtiyacının ise R123 akışkanında olduğu görülmektedir.



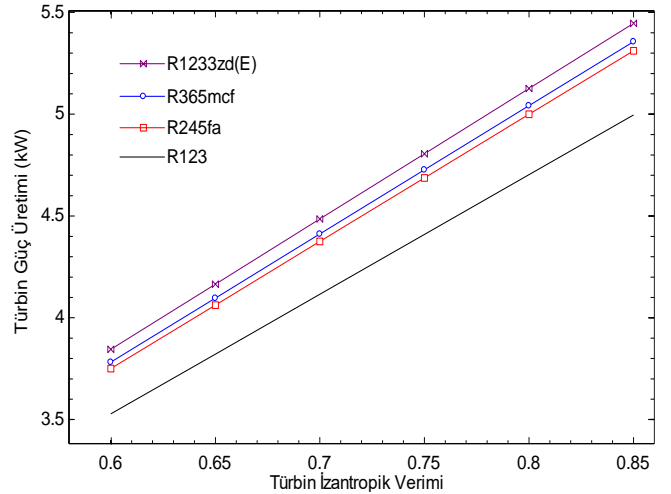
Şekil 3. Farklı akışkanlar için türbin izantropik verimine göre yoğuşturucu kapasitesinin değişimi

Şekil 4'te farklı akışkanlar için ihtiyaç duyulan pompa kapasiteleri verilmiştir. Akışkan türüne göre ihtiyaç duyulan pompa gücünün büyükten küçüğe doğru sırasıyla R365mcf, R1233zd(E), R245fa ve R123 olduğu görülmektedir.



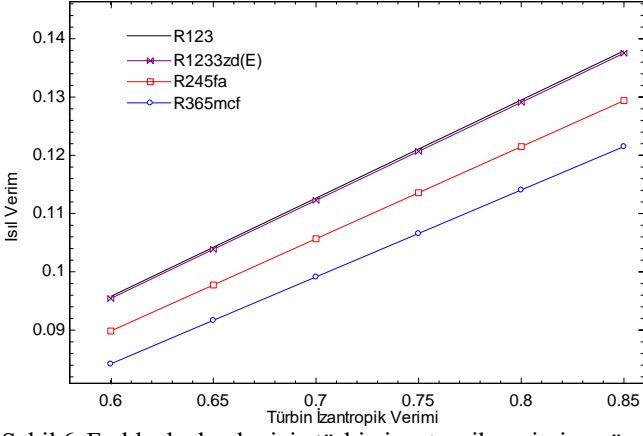
Şekil 4. Farklı akışkanlar için türbin izantropik verimine göre pompa gücünün değişimi

Türbin izantropik veriminin değişimine göre farklı akışkanların türbin güç üretimi Şekil 5'te verilmiştir. İncelenen tüm akışkan türleri için türbin izantropik veriminin artmasıyla türbin güç üretiminin de arttığı görülmektedir. İzantropik verim türbinin Akışkan türüne göre türbin gücü kapasitesi büyükten küçüğe sırasıyla R1233zd(E), R365mcf, R245fa ve R123 olarak hesap edilmiştir.



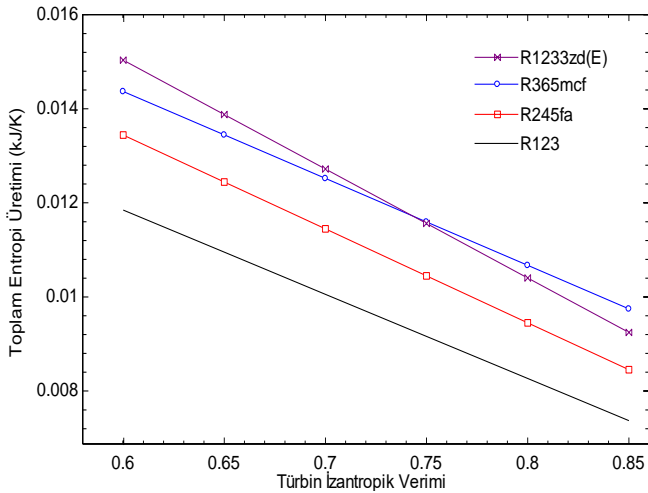
Şekil 5. Farklı akışkanlar için türbin izantropik verimine göre türbin güç üretiminin değişimi

Farklı akışkan türlerinin kullanıldığı durumlar için değişen türbin izantropik verimlerinde sistemin verim değişimi Şekil 6'da gösterilmiştir. Rahman ve arkadaşlarının (2011) çalışmalarında ifade ettiğine benzer şekilde türbin izantropik verimindeki artışın sistemin ısı verimini arttırdığı gözlemlenmiştir. İncelenen akışkanlar için ORC sisteminin verimi türbin izantropik verimin artışı ile yükselmektedir. Bu durumun temel sebebinin artan izantropik verim sayesinde türbinde üretilen güç miktarının artması (Şekil 5'te ifade edildiği gibi) olduğu düşünülmektedir. İncelenen akışkanlar arasında en yüksek verim R123 akışkanını kullanıldığı durumda ortaya çıkmaktadır. Ancak R1233zd(E) akışkanı, R123 akışkanına oldukça yakın bir verime sahiptir. En düşük verim R365mcf akışkanının kullanıldığı durumda ortaya çıkmaktadır.

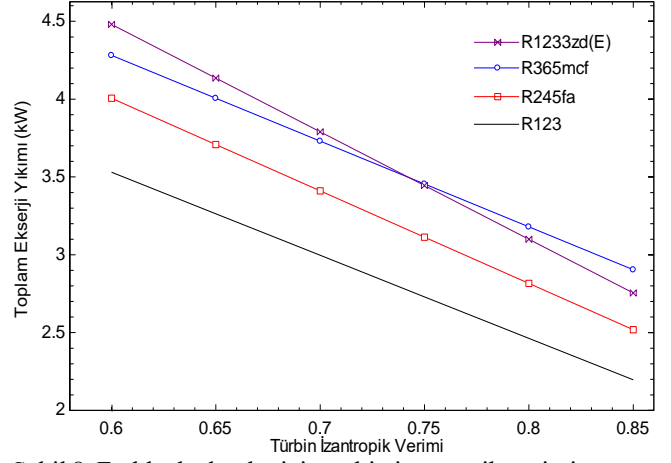


Şekil 6. Farklı akışkanlar için türbin izantropik verimine göre ORC sistemi ısı veriminin değişimi

Akışkan türleri ver türbin izantropik verimine göre sistemin toplam entropi üretimi ve ekserji yıkımı sırasıyla Şekil 7 ve Şekil 8'de verilmiştir. Yapılan hesaplamalar sonucunda türbin izantropik verimi artışı ile toplam entropi üretimi ve ekserji yıkımının azaldığı ortaya konulmuştur. Bunun yanı sıra türbin izantropik veriminin 0.6'dan 0.75'e kadar artışı incelendiğinde en yüksek toplam entropi üretimi ve ekserji yıkımının R1233zd(E) akışkanında olduğu gözlenirken, 0.75'ten sonra R365mcf akışkanının en yüksek toplam entropi üretimi ve ekserji yıkımına sahip olduğu anlaşılmaktadır. Bu durumun temel nedeninin R365mcf akışkanın aynı basınçta daha yüksek buharlaşma sıcaklığına sahip olması olduğu düşünülmektedir. Tüm türbin izantropik verimi durumlarında en düşük toplam entropi üretimi ve ekserji yıkımı R123 akışkanının kullanıldığı durumda gerçekleşmiştir.

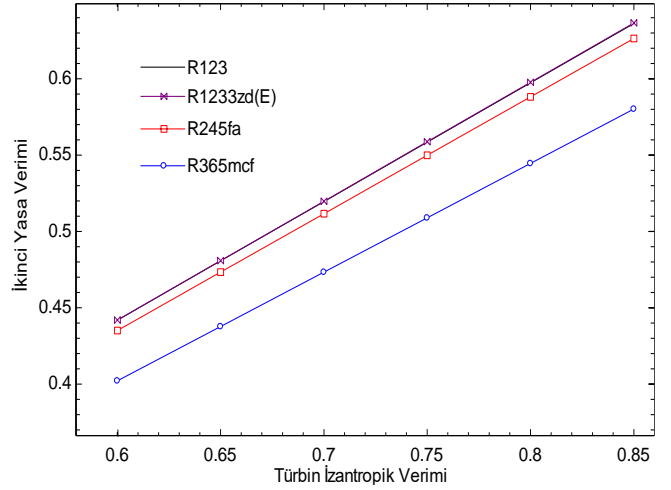


Şekil 7. Farklı akışkanlar için türbin izantropik verimine göre toplam entropi üretiminin değişimi



Şekil 8. Farklı akışkanlar için türbin izantropik verimine göre toplam ekserji yıkımının değişimi

ORC sisteminin ikinci yasa verimi farklı akışkanlar için türbin izantropik verimine göre hesap edilmiş ve Şekil 9'da gösterilmiştir. R123 ve R1233zd(E) akışkanlarının kullanıldığında ORC'nin en yüksek ikinci yasa verimine sahip olduğu durum ortaya çıkmaktadır. Şekil 9'da türbin izantropik veriminin artışı ile R123 ve R1233zd(E) akışkanlarının ikinci yasa verimi değişimi çakışık olarak görülmektedir. En düşük ikinci yasa verimini R365mcf akışkanının kullanıldığı ORC sisteminde olduğu belirlenmiştir.



Şekil 9. Farklı akışkanlar için türbin izantropik verimine göre ORC sisteminin II. Yasa verimi değişimi

4. TARTIŞMA VE SONUÇLAR

Organik Rankine Çevrimi (ORC) sisteminin verimliliğini en üst düzeye çıkarmak için uygun bir çalışma akışkanının seçimi çok önemlidir. Bu çalışma, ORC sistemlerindeki farklı çalışma akışkanlarının kapsamlı bir termodinamik analizini sunmaktadır. Bulgular, çalışma sıvısı özelliklerinin ORC'nin genel performansı ve verimliliği üzerindeki önemli etkisini ortaya koymaktadır. Bununla birlikte ORC'de kullanılan türbinin izantropik veriminin sistemin genel performansı ve her bir elemanın kapasiteleri üzerindeki etkisi detaylıca incelenmiştir. Sonuçlar, ORC uygulamaları için çalışma akışkanları ile türbin izantropik veriminin bileşik etkisini ortaya koymuştur.

İncelenen çalışma akışkanları arasında en yüksek verim %13.79 ile R123 akışkanının %85 türbin izantropik veriminde kullanıldığı durumda ortaya çıkmıştır. En düşük verim ise %8.42 ile %60 türbin izantropik veriminde R365mcf akışkanının kullanıldığı durumda gerçekleşmiştir.

Yapılan parametrik çalışmalarda, incelenen aralık ve şartlar için en yüksek türbin gücünün R123zd(E) akışkanın kullanıldığı %85 türbin izantropik veriminin olduğu durumda 5.506 kW, en düşük türbin gücünün ise R123 akışkanın kullanıldığı türbin izantropik veriminin %60 olduğu durumda 3.527 kW olduğu belirlenmiştir.

Parametrik çalışmalarda türbin izantropik veriminin değişiminin buharlaştırıcı ve pompa kapasitelerini etkilemediği görülmüştür. Ayrıca yoğunlaştırıcı kapasitesinin en yüksek ve en düşük olduğu durumların sırasıyla %60 türbin izantropik veriminde R365mcf için 38.69 kW ve %85 türbin izantropik veriminde R123 için 30.06 kW olduğu tespit edilmiştir.

Sistemde en yüksek ve en düşük ekserji yıkımı sırasıyla %60 türbin izantropik veriminde R123zd(E) akışkanını kullanıldığı durumda 4.065kW, %85 R123 akışkanını kullanıldığı durumda 2.196 kW olarak hesap edilmiştir.

Sistemin ikinci yasa verimi değişimleri incelendiğinde en yüksek ikinci yasa veriminin %63.62 ile R123 akışkanın kullanıldığı ve türbin izantropik veriminin %85 olduğu durumda, en düşük ikinci yasa veriminin ise %40.21 ile R365mcf akışkanın için türbin izantropik veriminin % 60 olduğu durumda gerçekleştiği görülmüştür.

Yapılan çalışmada termodinamik analiz sonuçları, türbin izentropik verimliliğinin ve çalışma sıvısı özelliklerinin ORC performansı üzerindeki birbirine bağlı etkisini göstermektedir. Daha yüksek türbin izentropik verimlilik seviyelerinin ORC sisteminin genel verimliliğini ve güç çıkışını iyileştirdiği tespit edilmiştir. Çalışma akışkanının seçimi, sistem verimi ve güç üretimi üzerinde önemli rol oynamaktadır. Elde edilen bulgular, yüksek türbin izentropik verimliliği ve uygun bir çalışma sıvısı kombinasyonunun ORC performansını ve verimliliğini artırdığını göstermektedir. Ortaya koyulan tüm sonuçlar ORC sistemleri için en uygun soğutucu akışkan ve türbin seçiminde araştırmacılar ve mühendisler için referans görevi görmekte ve düşük dereceli ısı kaynaklarından sürdürülebilir enerji üretiminin ilerlemesine katkıda bulunmaktadır.

KAYNAKLAR

Badr, O., Probert, S. D., & O'callaghan, P. W. (1985). Selecting a working fluid for a Rankine-cycle engine. *Applied Energy*, 21(1), 1-42.

Chen, H., Goswami, D. Y., & Stefanakos, E. K. (2010). A review of thermodynamic cycles and working fluids for the conversion of low-grade heat. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(9), 513059-3067.

Çengel Y. A., Boles A. M., (2015). *Thermodynamics: An Engineering Approach*, Eighth Edition. McGraw-Hill Education, New York.

Ge, Y., Han, J., & Zhu, X. (2022). Performance analysis and multi-objective optimization of two organic Rankine cycles with different fluids for low grade waste heat recovery. *Journal of Thermal Science*, 31(3), 650-662.

Hu, B., Guo, J., Yang, Y., & Shao, Y. (2022). Selection of working fluid for organic Rankine cycle used in low temperature geothermal power plant. *Energy Reports*, 8, 179-186.

Ibrahim, T. K., & Rahman, M. M. (2013). Effects of isentropic efficiency and enhancing strategies on gas turbine performance. *Journal of Mechanical Engineering and Sciences*, 4, 383-396.

Klein, S. (2013). *Engineering equation solver: F-chart Software*.

Li, P., Han, Z., Jia, X., Mei, Z., Han, X., & Wang, Z. (2019). Comparative analysis of an organic Rankine cycle with different turbine efficiency models based on multi-objective optimization. *Energy Conversion and Management*, 185, 130-142.

Méndez-Cruz, L. E., Gutiérrez-Limón, M. Á., Lugo-Méndez, H., Lugo-Leyte, R., Lopez-Arenas, T., & Sales-Cruz, M. (2022). Comparative Thermodynamic Analysis of the Performance of an Organic Rankine Cycle Using Different Working Fluids. *Energies*, 15(7), 2588.

Özdemir, E., & Kılıç, M. (2017). Energy and exergy analysis of an organic Rankine Cycle Using different working Fluids from Waste Heat Recovery. *International Journal of Environmental Trends (IJENT)*, 1(1), 32-45.

Özdil, N. F., Tantekin, A., & Seğmen, M. R. (2016). Investigation of different working fluid effects on exergy analysis for Organic Rankine Cycle (ORC). *Çukurova University Journal of the Faculty of Engineering and Architecture*, 31(1), 441-449.

Pan, L. & H. Wang (2013). Improved analysis of Organic Rankine Cycle based on radial flow turbine. *Applied Thermal Engineering* 61(2): 606-615.

Quoilin, S., Declaye, S., Tchanche, B. F., & Lemort, V. (2011). Thermo-economic optimization of waste heat recovery Organic Rankine Cycles. *Applied thermal engineering*, 31(14-15), 2885-2893.

Rahman, M. M., Ibrahim, T. K., & Abdalla, A. N. (2011). Thermodynamic performance analysis of gas-turbine power-plant. *International journal of the physical sciences*, 6(14), 3539-3550.

Sarkar, J. (2009). Second law analysis of supercritical CO2 recompression Brayton cycle. *Energy*, 34(9), 1172-1178.

- Tchanche, B. F., Lambrinos, G., Frangoudakis, A., & Papadakis, G. (2011). Low-grade heat conversion into power using organic Rankine cycles—A review of various applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(8), 3963-3979.
- Thangavel, S., Verma, V., Tarodiya, R., & Kaliyaperumal, P. (2021). Comparative analysis and evaluation of different working fluids for the organic rankine cycle performance. *Materials Today: Proceedings*, 47, 2580-2584.
- Wang, X., Zhao, L., Wang, J., Zhang, W., Zhao, X., & Wu, W. (2010). Performance evaluation of a low-temperature solar Rankine cycle system utilizing R245fa. *Solar Energy*, 84(3), 353-364.
- Zhang, C., Fu, J., Kang, J., & Fu, W. (2018). Performance optimization of low-temperature geothermal organic Rankine cycles using axial turbine isentropic efficiency correlation. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 40, 1-11.
- Zhang, S., Wang H., & Gou, T., (2011). Performance comparison and parametric optimization of subcritical Organic Rankine Cycle (ORC) and transcritical power cycle system for low-temperature geothermal power generation. *Applied Energy*, 88 (8), 2740-2754.