Pamukkale Univ Muh Bilim Derg, 29(1), 94-103, 2023

Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi

Pamukkale University Journal of Engineering Sciences

Çok değişkenli optimizasyon ile organik Rankine çevrim verimini etkileyen parametrelerin hassasiyet ve katkı oranlarının tespiti

Determination of sensitivity and contribution ratios of parameters affecting organic Rankine cycle efficiency with multivariant optimization

Sadık ATA[1*], *Ali KAHRAMAN*[2], *Remzi ŞAHİN*[1]

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

[2]Makine Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Necmettin Erbakan Üniversitesi, Konya, Türkiye.
akahraman@erbakan.edu.tr

Geliş Tarihi/Received: 27.01.2022 Düzeltme Tarihi/Revision: 06.04.2022 doi: 10.5505/pajes.2022.35094
Kabul Tarihi/Accepted: 09.05.2022 Araştırma Makalesi/Research Article

Öz

Bu çalışmada, Organik Rankine Çevrimi (ORÇ) üze rinde etkisi olan performans parametrelerinin hassasiyet seviyeleri ve katkı oranları belirlenmiştir. Performans parametreleri evaporatör-kondenser pinch point sıcaklık farkı ($\Delta T_{PP,e}$, $\Delta T_{PP,k}$), soğutma suyu giriş sıcaklığı ($T_{c,i}$), aşırı kızdırma sıcaklığı (T_{ak}), türbin-pompa izantropik verimleri (η_t ve η_p) olarak seçilmiştir. Bu parametrelerin ORÇ sistemi üzerindeki etkisi farklı amaç fonksiyonları altında değerlendirilmiştir. İncelenen amaç fonksiyonları; ısıl verim, net güç ve ekserji verimi maksimizasyonu ile toplam tersinmezlik, hacimsel debi oranı (VFR) ve çevresel etki faktör (EEF) minimizasyonudur. Böylece enerji-ekserji analizi ile termodinamik performans, türbin ekonomisinde önemli etkisi olan VFR ve termodinamik sürdürülebilirlik indeksleri ile çevresel faktör incelenmiştir. Amaç fonksiyonlarının değişmesiyle performans parametrelerinin etkisinin büyük bir oranda değişkenlik gösterdiği tespit edilmiştir. $\Delta T_{PP,e}$'nin etkisi maksimum ısıl verimin elde edilmesinde %20.59 etkili iken, maksimum türbin gücünün elde edilmesinde %71.9 etkili olduğu tespit edilmiştir. Çalışmada Taguchi-ANOVA'dan yararlanılmıştır. L25 ortogonal dizilim kullanılmasıyla amaç fonksiyonlarına ulaşılmasında optimum ortogonal dizilimler ve parametrelerin hassasiyet seviye sıralaması tespit edilmiştir. Tüm amaç fonksiyonlarının eşit oranda etkilediği bir ağırlık fonksiyonu tanımlanmasıyla ORÇ performansı üzerinde %42.85 $\Delta T_{PP,e}$ ve %25.71 ise $T_{c,i}$'nin etkisinin olduğu belirlenmiştir. Son olarak; regresyon analizi ile her bir amaç fonksiyonu için performans parametrelerine bağlı olarak denklemler çıkarılmıştır. Ampirik denklem ile tahmin edilen sonuçlar ile nümerik analiz sonuçları arasındaki hata oranları çıkartılmıştır. Bu oranlara bakıldığında ampirik denklemlerin ORÇ performansının belirlenmesinde başarılı bir şekilde kullanılabileceği tespit edilmiştir.

Anahtar kelimeler: Çoklu amaç fonksiyonu, Hassasiyet seviyesi, Organik Rankine çevrimi (ORÇ), Ortogonal dizilim, Pinch point sıcaklığı.

Abstract

In this study, the sensitivity levels and contribution rates of the performance parameters that have an effect on the Organic Rankine Cycle (ORC) were determined. Performance parameters were chosen as evaporator-condenser pinch point temperature difference ($\Delta T_{PP,e}$, $\Delta T_{PP,k}$), cooling water inlet temperature ($T_{c,i}$), superheating temperature (T_{ak}), turbine-pump isentropic efficiencies (η_t ve η_p). The effects of these parameters on the ORC system were evaluated under different objective functions. Examined objective functions; thermal efficiency, net power, and exergy efficiency maximization; total irreversibility, volumetric flow rate (VFR) and environmental impact factor (EEF) minimization. Thus, thermodynamic performance with energy-exergy analysis; VFR, which has a significant impact on turbine economy; thermodynamic sustainability indices and environmental factor were examined. It has been determined that the effect of performance parameters varies greatly with the change of objective functions. While the effect of $\Delta T_{PP,e}$ was 20.59% effective in obtaining maximum thermal efficiency, it was determined that it was 71.9% effective in obtaining maximum turbine power. Taguchi-ANOVA was used in the study. By using the L25 orthogonal array, the optimum orthogonal arrays and the sensitivity level order of the parameters have been determined to reach the objective functions. By defining a weight function that affects all objective functions equally, it was determined that 42.85% $\Delta T_{PP,e}$ and 25.71% $T_{c,i}$ had an effect on ORC performance. Finally; with regression analysis, equations are derived for each objective function depending on the performance parameters. The error rates between the results estimated by the empirical equation and the numerical analysis results were extracted. Considering these ratios, it has been determined that empirical equations can be used successfully in determining ORC performance..

Keywords: Multi-Objective function, Sensitivity level, Organic Rankine cycle (ORC), Orthogonal array, Pinch point temperature.

1 Giriş

Bu çalışmada, düşük sıcaklıktaki kaynaklardan elektrik üretmek için kullanılan Organik Rankine Çevrimi (ORÇ) teknolojisi incelenmiştir. Klasik Rankine çevriminden farkı çalışma sıvısı olarak su (buhar) yerine organik akışkanın kullanılmasıdır. Organik akışkan, sudan daha düşük bir kaynama noktasına ve daha yüksek bir buhar basıncına sahiptir ve bu nedenle, elektrik üretmek için düşük sıcaklıklı ısı kaynaklarında kullanılabilmektedir. Bu çalışmada, 32 °C kaynama sıcaklığına sahip R141b akışkanı ile tasarlanan ORÇ sistemi ele alınmıştır.

ORÇ'de sistem performansına etkiyen çok fazla parametrenin olduğu bilinmektedir. Bu çalışmada bu parametrelerin hassasiyet seviyeleri ve yüzdesel etki oranları belirlenmiştir. Fakat bu parametrelerin hassasiyet seviyelerinin de amaç fonksiyonlarına bağlı olarak değiştiği görülmüştür. Bundan dolayı bu çalışmada 6 farklı amaç fonksiyonu altında ORÇ sisteminin Taguchi-ANOVA ile hassasiyet analizi yapılmıştır.

*Yazışılan yazar/Corresponding author

Literatür incelendiğinde bu alan ile ilgili çalışmalar aşağıda özetlenmiştir. Wang ve diğ., jeotermal kaynaklı ORÇ'nin parametrik optimizasyonu ve hassasiyet seviyesi üzerinde çalışma yapmışlardır. Amaç fonksiyonunu termodinamik ve ekonomik performans olarak belirlemişlerdir. Performans parametreleri, net güç, ısıl verim, türbin boyut parametresi, geri iş oranı ve toplam ısı transfer kapasitesi olarak belirlenmiştir. Optimum ortogonal tasarım sonuçlarına R245fa akışkanı ile aşırı kızdırma sıcaklığının 10 °C, evaporatör pinch noktası sıcaklık farkı ($\Delta T_{PP,e}$) ile kondenser pinch noktası sıcaklık farkı ($\Delta T_{PP,k}$)'nin 5 °C, buharlaşma sıcaklığının ise 65 °C, pompa ve türbin izantropik veriminin sırasıyla %75 ve %85 olduğu durumda ulaşıldığını tespit etmişlerdir. R245fa akışkanı kullanılarak tasarlanan ORÇ sisteminin hassasiyet seviye değerlerinde ilk sırada buharlaşma sıcaklığının olduğunu belirtmişlerdir [1].

Liu ve diğ., jeotermal kaynaklı ORÇ'nin farklı parametreler üzerindeki hassasiyet seviye değerlerini belirlemişlerdir. Sistem parametreleri, organik akışkan, aşırı kızdırma sıcaklığı, $\Delta T_{PP,e}$ ile $\Delta T_{PP,k}$, buharlaşma sıcaklığı ve türbin ile pompanın izantropik verimidir. Farklı jeotermal ısı kaynağı sıcaklıklarında sistemin performansı ayrı ayrı belirlenmiştir. Jeotermal ısı kaynağı sıcaklığının değişiminin net güç, türbin boyut parametresi ve toplam ısı transfer katsayısı üzerinde etkisi olmasına rağmen ısıl verim üzerinde bir etkisinin olmadığını belirtmişlerdir. 100 °C'nin altındaki ısı kaynağı sıcaklıklarında $\Delta T_{PP,e}$'nin net güç üzerindeki en önemli faktör olmasına rağmen 100 °C'nin üstündeki ısı kaynağı sıcaklıklarında ise buharlaşma sıcaklığının en etkili parametre olduğu tespit edilmiştir [2].

Feng ve diğ. genetik algoritma tekniği ile klasik ve rejeneratif ORÇ'nin hassasiyet analizi ve termoekonomik karşılaştırmasını yapmışlardır. Ekserji verimi ve net güç başına ısı transfer alanını amaç fonksiyonu olarak belirlemişlerdir. Net güç artışının aşırı kızdırma sıcaklığının artışı ile fakat ısıl verim ve ekserji verim artışının buharlaştırıcı çıkış sıcaklığının artışı ile gerçekleştiğini tespit etmişlerdir [3].

Kumar ve diğ. Taguchi metodunu kullanarak ORÇ sisteminin termodinamik optimizasyonu üzerinde çalışmışlardır. Taguchi'de faktör değerleri olarak farklı organik akışkan, türbin giriş sıcaklığı, kondenser sıcaklığı ve kütlesel debi; performans parametreleri olarak ise ısıl verim, net güç ve toplam tersinmezlik belirlenmiştir. L9 ortogonal dizi kullanılmıştır. Isıl verim ve net güç üzerinde en fazla etkiye sahip parametrenin türbin giriş sıcaklığı iken; toplam tersinmezlik için ise organik akışkan ve kütlesel debi olduğunu tespit etmişlerdir [4].

Yılmaz ve diğ. R410a ve R407c akışkanları kullanılarak tasarladıkları reküperatörlü ORÇ'nin verimini yapay sinir ağları ile belirlenmesi üzerine çalışma yapmışlardır. Buharlaşma sıcaklığı, yoğuşma sıcaklığı, soğutma ve aşırı kızdırma sıcaklıklarına bağlı olarak ısıl verim tahmin edilmiştir. Gerçek değerler ile yapay sinir ağlarından elde edilen sonuçlar karşılaştırıldığında her iki akışkan için de R^2 değerinin %99 çıktığını tespit etmişlerdir. Herhangi bir hazır yazılıma gerek olmadan sistemin ısıl veriminin belirlenmesinde yapay sinir ağlarının kullanılabileceğini belirtmişlerdir [5].

Bademlioğlu ve diğ. reküperatörlü ORÇ'de ısıl verime etkileyen parametreleri Taguchi ve ANOVA yöntemlerini kullanarak incelemişlerdir. Bu parametreleri, organik akışkan, $\Delta T_{PP,e}$, $\Delta T_{PP,k}$, buharlaşma ve yoğuşma sıcaklığı, aşırı kızdırma sıcaklığı, reküperatör etkenliği ve türbin ile pompa izantropik verimi olarak belirlemişlerdir. Taguchi'de $L27$ ortogonal tasarımı kullanarak ısıl verim değerlerini elde etmişlerdir. Isıl verim üzerinde parametrelerin katkı oranlarını belirlemişlerdir. Isıl verimi %70 oranında buharlaşma ve yoğuşma sıcaklığı ile türbin izantropik veriminin etkilediğini tespit etmişlerdir. Ayrıca, ısıl verim yönünden en iyi ve en kötü sonucun elde edildiği ortogonal dizilimler elde edilmiştir [6].

Zhi ve diğ., R1234ze akışkanı kullanılarak tasarlanan ORÇ için yapay sinir ağları yöntemi ile çoklu parametrik analiz, optimizasyon ve verim tahmini üzerinde çalışmışlardır. Performans parametrelerinin ısıl verim ve ekserji verimi üzerindeki hassasiyet analizlerini yapmışlardır. ORÇ üzerinde türbin izantropik verimi ve ısı kaynağı sıcaklığının en çok etkiye sahip olduklarını belirtmişlerdir. Yüksek basınçlı çevrimlerde parametrelerin sistem verimi üzerindeki etkisi değiştiğinden dolayı optimum yüksek basınç değerinin tahmin edildiği bir model geliştirmişlerdir [7].

Kılıç ve Arabacı, yapay sinir ağları ve uyarlamalı sinirsel bulanık çıkarım sistemi kullanılarak ORÇ'nin performansını belirlemişlerdir. Organik akışkan olarak, R123, R125, R227, R365mfc, SES36'yı kullanmışlardır. Performans parametreleri, buharlaşma sıcaklığı, kondenser sıcaklığı, soğutma ve aşırı kızdırma sıcaklıkları olarak belirlenmiştir. Yapay sinir ağlarının ORÇ ısıl veriminin tahmin edilmesinde başarılı sonuçlara ulaştığı tespit edilmiştir. Gerçek değerler ile yapay sinir ağlarından elde edilen sonuçlar karşılaştırıldığında tüm akışkanlar için R^2 değerinin yaklaşık %99 çıktığını tespit etmişlerdir [8].

Zhao ve diğ. ORÇ sisteminin performansının hızlı bir şekilde tahmin edilmesi için optimum ampirik korelasyon üzerine çalışma yapmışlardır. Isıl verim, ekserji verimi ve net gücün ısı kaynağı özelliklerine bağlı olarak ifade edilebileceğini belirtmişlerdir. Bunlar ısı kaynağı sıcaklığı ve organik akışkanın kritik sıcaklığı ile doyma basıncına bağlı olarak elde edilen bir faktör değeridir. Ampirik korelasyonun nümerik hesaplamalar ile elde edilen sonuçlar ile karşılaştırılması sonucunda R^2 değerinin %97 olduğunu tespit etmişlerdir [9].

Çelik ve Kabul, Isparta ilinde kurulması düşünülen parabolik güneş kolektörlü ORÇ modellemesini ve sistemin termodinamik analizini yapmışlardır. İncelenen kojenerasyon sisteminde kolektör verimini %21, ORÇ ısıl verimini ise %6 olarak tespit etmişlerdir. En yüksek ekserji kaybının %44 ile parabolik güneş kolektöründe meydana geldiğini belirtmişlerdir [10].

Atız ve Karakılçık, çalışmalarında Adana iklim koşullarında ORÇ ile bütünleşik düzlem-plakalı ve vakum tüplü kolektörlerin ısıl verimlerinin karşılaştırmışlardır. Vakum tüplü ve düzlemsel güneş kolektörleri, ORÇ ve elektroliz sistemi analiz edilmiştir. ORÇ' de üretilen elektriğin elektroliz sistemine aktarılması ve suyun elektrolizi ile hidrojen üretildiğini belirtmişlerdir. Güneş enerjisi ve ortam sıcaklığının artışıyla net güç ve ısıl verimin arttığını tespit etmişlerdir [11].

Bademlioğlu ve diğ., ORÇ sisteminin performansını çok amaçlı optimizasyon ile belirlemişlerdir. Bu çalışmalarında ısıl verimin yanı sıra ekserji verimini de incelemişlerdir. Sistem optimizasyonu için Taguchi-ANOVA yöntemlerine ek olarak Grey ilişkisel analizini kullanmışlardır. Sistem performansını buharlaşma sıcaklığı, türbin izantropik verimi, reküperatör etkenliği ve yoğuşma sıcaklığının sırasıyla %31.37, %19.53, %16.64 ve %16.61 oranında etkilediğini tespit etmişlerdir [12].

Pan ve diğ. birleşik ısı-güç sistemlerinde atık ısı geri dönüşümünde ORÇ sisteminin termodinamik ve eksergo-ekonomik optimizasyonunu yapmışlardır. Sistemde en uygun akışkanların bütan ve amonyak olduğunu tespit etmişlerdir. Yatırım maliyeti üzerinde buharlaştırıcı basıncının ve aşırı kızdırma sıcaklığının etkisi olduğunu belirtmişlerdir [13].

Nondy ve Gogoi, farklı ORÇ konfigürasyonları (klasik, reküparatör, rejeneratif ve reküparatörlü rejeneratif) ile eksergo-ekonomik analiz ve optimizayon çalışması yapmışlardır. Buharlaştırıcı, kondenser ve pinch point sıcaklığını performans parametresi olarak seçmişlerdir. Optimum koşullarda reküperatörlü rejeneratif ORÇ'nin en iyi performansa sahip olduğunu tespit etmişlerdir. Tüm konfigürasyonlarda yaklaşık toplam maliyetin %60'ının bileşenlerdeki tersinmezliklerden meydana geldiğini belirtmişlerdir [14].

Yilmaz ve Koyuncu, Afyon'da bulunan ORÇ jeotermal güç santrali üzerinde termo-ekonomik analiz ve yapay sinir ağları ile optimizasyon çalışması yapmışlardır. Ekserji verimi ve maliyeti amaç fonksiyonu olarak belirlemişlerdir. Genetik algoritma ile birlikte yapılan optimizasyon çalışması ile net güç üretiminde %24.2 gelişme sağlanabileceğini belirtmişlerdir [15].

Jankowski, ORÇ boyutunun minimize edilmesinde ısı değiştiricisi ve türbin tasarımına bağlı olarak sistem boyut indeksi (SSI-System Size Index) parametresini geliştirdiklerini belirtmiştir. SSI ve net güç parametrelerini amaç fonksiyonu olarak belirleyerek optimizasyon çalışması yapmıştır [16].

Literatür incelendiğinde özellikle son yıllarda ORÇ sistem performans parametrelerini inceleyen çalışmaların arttığı görülmektedir. Fakat, çoğu çalışmanın ısıl verim ve ekserji verimi çıktıları üzerinde yoğunlaştığı tespit edilmiştir. Maksimum net güce ulaşılan şartlar altında her zaman maksimum ısıl verim elde edilemediği için net güç maksimizasyonunun ayrı incelenmesi gerektiği açıktır.

$\Delta T_{PP,e}$ değerinin artmasıyla evaporatörde çekilen ısı ve bunun sonucunda ORC debisi artmaktadır. $\Delta T_{PP,e}$'nin artmasıyla evaporatör basıncı azaldığı için türbindeki entalpi farkı azalır. Debi artış oranı ve entalpi farkı azalma oranı birlikte değerlendirilmelidir. Düşük $\Delta T_{PP,e}$değerlerinde debi artış oranı yüksek iken, belli bir değerden sonra entalpi farkı azalma oranı daha yüksek olmaktadır. Bu nedenle $\Delta T_{PP,e}$'nin artmasıyla ısıl verim azalırken net güç ilkönce artış gösterir, belli bir değerden sonra ise azalmaya başlar. Bu değer ise organik akışkana ve ısı kaynağı sıcaklığına bağlı olarak değişkenlik gösterir.

Bundan dolayı ısıl verim maksimizasyonu ve türbin gücü maksimizasyonu için yapılan çalışmalarda iki ayrı organik akışkanın önerildiği görülmüştür. Bu çalışmada da hassasiyet seviyelerinin belirlenmesinde ayrı olarak ele alınmıştır.

Bunun yanında çevresel faktörlerin de termodinamik performans kadar önemli olması nedeniyle termodinamik sürdürülebilirlik indekslerinin de incelenmesi gerekmektedir. Bu nedenlerden dolayı bu çalışmada 6 farklı amaç fonksiyonu belirlenmiştir. Bunlar, ısıl verim, net güç ve ekserji verimi maksimizasyonu ile toplam tersinmezlik, hacimsel debi oranı ve çevresel etki faktör minimizasyonudur.

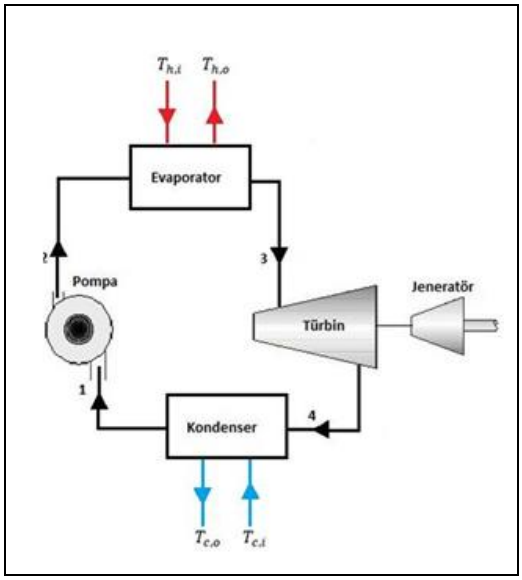
Literatürdeki son çalışmalar incelendiğinde ORÇ sistem performansını etkileyen en önemli parametrelerden birisinin $\Delta T_{PP,e}$ olduğu görülmektedir. Fakat hassasiyet seviyesi üzerine olan çalışmalarda bu değerin sabit olarak kabul edildiği görülmektedir. Bu çalışmada $\Delta T_{PP,e}$ faktör değerlerinden birisi olarak belirlenmiş olup farklı amaç fonksiyonları altında ORÇ sistemini nasıl etkilediği tespit edilmiştir.

Bu çalışmada ayrıca, faktör değerleri altında amaç fonksiyonlarına bağlı olarak sistem performansının tahmin edilmesi üzerine regresyon analizi ile ampirik denklem türetilmiştir. Bu türetilen denklemlerin güvenilirliği 3 farklı istatistiksel yöntem kullanılarak nümerik analiz sonuçları ile karşılaştırılmasıyla sağlanmıştır.

Bu çalışma ile ORÇ sistemini etkileyen performans parametrelerinin farklı amaç fonksiyonları altındaki eğiliminin tespit edilmesi ve türetilen ampirik denklem ile tahmin edilmesi amaçlanmıştır.

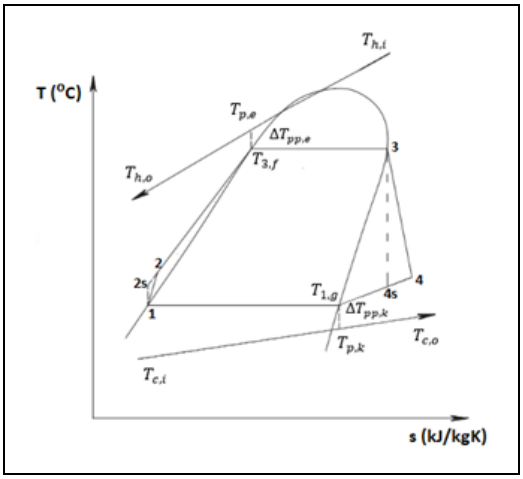
2 Materyal ve metot

Bu çalışmada R141b akışkanı ile tasarlanmış ORÇ sisteminin termodinamik analizi Engineering Equation Solver (EES) ile belirlenmiştir. Bunun için tanımlanan denklemler aşağıda belirtilmiştir (Denklem 1-27). ORÇ çalışma prensibi Şekil 1'de, T-s diyagramı Şekil 2'de verilmiştir.



Şekil 1. ORÇ çalışma prensibi.

Figure 1. ORC working principle.



Şekil 2. ORÇ T-s diyagramı.

Figure 2. ORC T-s diagram.

Deneysel çalışmalarda R245fa akışkanı çok fazla kullanıldığı ve bu çalışmada da Taguchi model doğrulanmasının R245fa içeren bir çalışma ile yapıldığı için her iki akışkanın termofiziksel özellikleri Tablo 1'de verilmiştir. Her iki akışkan da yakın termofiziksel özellikler göstermektedir, izantropik akışkan grubunda yer alırlar, R141b'nin kritik sıcaklığı daha yüksektir.

Tablo 1. R141b ve R245fa'nın termofiziksel özellikleri [17].

Table 1. Thermophysical properties of R141b and R245fa [17].

Organik Akışkan	Akış Türü (dT/ds)	Mol. Ağırlık (g/mol)	Kaynama Noktası $(°C)$	Kritik Sıc. Değeri $(°C)$	Kritik Basınç Değeri (MPa)
R141b	$dT/ds = 0$	116.9	32.0	204.4	4.21
R245fa	$dT/ds = 0$	134	15.1	154	3.65

Çalışma kapsamında performans parametresi olarak incelenecek olan $\Delta T_{PP,e}$ ve $\Delta T_{PP,k}$ parametreleri Şekil 2'de belirtilmiştir.

2.1 ORÇ termodinamik performans

Amaç fonksiyonlarından ısıl verim, türbin gücü, ekserji verim maksimizasyonu ile tersinmezlik minimizasyonu kapsamında gerekli denklemler aşağıda tanımlanmıştır (Denklem 1-19) [18],[19].

Kütle dengesi (Toplam Kütle Girişi = Toplam Kütle Çıkışı);

$$\sum \dot{m}_g = \sum \dot{m}_ç \tag{1}$$

Enerji dengesi (Toplam Enerji Girişi = Toplam Enerji Çıkışı);

$$\sum E_g = \sum E_ç \tag{2}$$

$$\dot{Q} - \dot{W} = \dot{m} * (h_ç - h_g) \tag{3}$$

Ekserji dengesi (Toplam Ekserji girişi = Son Ekserji + Ekserji Tüketimi + Ekserji Yıkımı);

$$\dot{E}x_g = \dot{E}x_s + \dot{E}x_t + \dot{E}x_y \tag{4}$$

Sistemdeki bileşenlerin enerji analizinde pompa işi (5), buharlaştırıcı ısı girdisi (6), türbin işi (7), yoğuşturucudan atılan ısı miktarı (8), için kullanılan denklemler aşağıda verilmiştir.

$$W_p = (h_2 - h_1) = (h_{2s} - h_1)/\eta_p \tag{5}$$

$$Q_b = (h_3 - h_2) \tag{6}$$

$$W_t = (h_3 - h_4) = (h_3 - h_{4s})\eta_t \tag{7}$$

$$Q_y = (h_4 - h_1) \tag{8}$$

Sistemdeki net iş (9) ve ısıl verim (10) için kullanılan denklemler aşağıdaki verilmiştir.

$$W_{net} = W_t - W_p \tag{9}$$

$$\eta_{Isıl} = W_{net}/Q_b \tag{10}$$

Sistemdeki bileşenlerin ekserji analizinde pompa (11), buharlaştırıcı (12), türbin (13) ve yoğuşturucu (14) için kullanılan tersinmezlik denklemleri aşağıda verilmiştir.

Taguchi parametre seviyelerinin belirlenip ortogonal tasarıma geçildiğinde tüm bileşenlerin tersinmezlik değerleri belirlenmiş, termodinamiğin ikinci yasasına uygunluğu kontrol edilmiştir.

$$i_p = T_0(s_2 - s_1) \tag{11}$$

$$i_b = T_0[(s_3 - s_2) - (h_3 - h_2)/T_h] \tag{12}$$

$$i_t = T_0(s_4 - s_3) \tag{13}$$

$$i_y = T_0[(s_1 - s_4) + (h_4 - h_1)/T_c] \tag{14}$$

Sistemdeki toplam tersinmezlik (15), harcanan ekserji (16) ve ekserji verimi (17) için kullanılan denklemler aşağıda verilmiştir.

$$i_{Toplam} = i_p + i_b + i_t + i_y \tag{15}$$

$$e_{harcanan} = [1 - T_0/T_H]Q_b + W_p \tag{16}$$

$$\eta_{II} = 1 - i_{Toplam}/e_{harcanan} \tag{17}$$

Yukarıda verilen denklemlerde; η_t ve η_p sırasıyla türbin ve pompanın izantropik verimleri, $T_{h,i}$ ve $T_{h,o}$ sırasıyla ısı kaynağı giriş-çıkış; $T_{c,i}$ ve $T_{c,o}$ ise sırasıyla soğutma suyu giriş-çıkış sıcaklıklarıdır. T_h ve T_h ise denklem (18) ve (19)'de tanımlanmıştır.

$$T_h = (T_{h,i} - T_{h,o})/Ln\,(T_{h,i} - T_{h,o}) \tag{18}$$

$$T_c = (T_{c,i} - T_{c,o})/Ln\,(T_{c,i} - T_{c,o}) \tag{19}$$

2.2 ORÇ türbin performansı

ORÇ performansında önemli bir yere sahip olan türbinin tasarım parametreleri ayrıca incelenmiştir. Bu parametreler, hacimsel debi oranı (Volumetric Flow Ratio-VFR), türbin boyut parametresi (Size Parameter-SP), türbin basınç oranı (Pressure Ratio-PR)'dır. Bu değerlere ilişkin bağıntılar aşağıda tanımlanmıştır (Denklem 20-24). Düşük VFR sahip ORÇ sistemleri yüksek türbin verim değerlerine ulaşabilmektedir. Ayrıca yüksek SP değerleri ise yüksek türbin boyutu gerektirmektedir.

$$\dot{m}_{ORC} = \rho_3 \dot{V}_3 \tag{20}$$

$$\dot{m}_{ORC} = \rho_4 \dot{V}_4 \tag{21}$$

$$VFR = \dot{V}_4/\dot{V}_3 \tag{22}$$

$$SP = \frac{\sqrt{\dot{V}_4}}{[(h_3 - h_{4S})\eta_+]^{\frac{1}{4}}} \tag{23}$$

$$PR = P_3/P_4 \tag{24}$$

2.3 ORÇ Termodinamik Sürdürülebilirlik İndeksleri

ORÇ sisteminde akışkanın termodinamik performansı kadar o akışkanın kullanılması durumundaki çevresel etkisi de önemli bir yer tutmaktadır. Bu kapsamda atık ekserji oranı (Waste Exergy Ratio-WER), çevresel etki faktörü (Environmental Effect Factor-EEF), ekserji sürdürülebilirlik indeksi (Exergy Sustainability Index-ESI) incelenmiştir. Bu değerlere ilişkin bağıntılar aşağıda tanımlanmıştır (Denklem 25-27).

$$WER = I_{toplam}/E_{harcanan} \quad (25)$$

$$EEF = WER/\eta_{ul} \quad (26)$$

$$ESI = 1/EEF \quad (27)$$

ORÇ'nin düşük sıcaklıklı uygulamaları kapsamında ısı kaynağı sıcaklığı 90 °C olarak sabit belirlenmiştir. Soğutma suyu sıcaklığı ise 25 °C, türbin ve pompa izantropik verimleri de %75 olarak ele alınmıştır. Ölü nokta basıncı ve sıcaklığı sırasıyla 100 kPa ve 25 °C olarak kabul edilmiştir. Tablo 2'de R141b'nin çevrim içindeki termodinamik özellikleri verilmiştir.

Tablo 2. R141b'nin çevrim içindeki termodinamik özellikleri.

Table 2. Thermodynamic properties of R141b in cycle.

Organik Akışkan: R141b; 90 °C Isı kaynağı sıcaklığı				
Durum	$P\ (kPa)$	$T\ (°C)$	$h\ (kJ/kg)$	$s\ (kJ/kgK)$
1	112,2	35	79,13	0,2924
2	443,6	35,31	79,49	0,2935
3	443,6	82	333	1,018
4	112,2	46,4	310,3	1,042

Bütün prosesler kararlı şartlardadır.

Buharlaştırıcı ve yoğuşturucudaki basınç kayıpları ihmal edilmiştir. Boru hatlarındaki kayıplar ihmal edilmiştir.

Analizde kullanılan tüm bileşenler adyabatik olarak kabul edilmiş ve yüzey ile çevre arasında bir ısı transferinin olmadığı varsayılmıştır. Potansiyel ve kinetik enerji değişimleri ihmal edilmiştir.

3 TAGUCHI-ANOVA ile hassasiyet analizi

ORÇ'nin farklı amaç fonksiyonları altında performans parametrelerinin daha verimli bir şekilde seçilmesini sağlamak ve simülasyon için harcanan zamanı ve parametrelerin etki oranını belirlemek adına Taguchi yönteminden yararlanılmıştır.

Temel olarak Taguchi yöntemi yüksek kalite sistemleri için güçlü bir yöntemdir. Maliyet, kalite ve performans tasarımlarını optimize etmek için basit verimli ve sistematik bir yaklaşım sunmaktadır. Son yıllarda çok geniş bir kullanım alanı bulmaktadır. Taguchi yöntemi, bir ürün ya da prosesin mühendislik optimizasyonunu; sistem tasarımı, parametre tasarımı ve tolerans tasarımı gibi üç adımlık bir yaklaşım içerisinde çözebilmeyi amaçlamaktadır.

Taguchi yönteminde, analiz değişkeni ya da performans ölçütü olarak kullanılması için, sisteme ait varyasyonu azaltmak için S/N oranı olarak belirtilen istatistik geliştirilmiştir. Bu tasarımda ölçülmek istenen sinyalin (Signal-S) gürültü faktörüne (Noise-N) oranıdır ve burada S sistemin verdiği gerçek değeri, N ise ölçülen değer içerisindeki istenmeyen faktörlerin payını temsil eder ve bu oranının birimi dB (desibel) olarak ifade edilir. Bu yöntem ile hedeflenen; ürünün karakteristik değerlerini mümkün olduğunca hedef değerlere yaklaştırmak ve minimum sapmayı sağlamaktır [20].

S/N oranlarına ilişkin ilgili bağıntılar Denklem 28-30 ile verilmiştir [21].

En küçük en iyi olduğu durumda:

$$S/_N = -10\ log\left(\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} y_i^2)\right) \quad (28)$$

En büyük en iyi olduğu durumda:

$$S/_N = -10\ log\left(\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\frac{1}{y_i^2}\right) \quad (29)$$

Nominal en iyi olduğu durumda:

$$S/_N = 10log\left(\frac{\bar{y}^2}{S^2}\right) \quad (30)$$

$$\bar{y} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} y_i \quad (31)$$

$$S^2 = \frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^{n}(y_i - \bar{y})^2 \quad (32)$$

(Eşitliklerde y_i: Performans yanıtının i. gözlem değeri, n: bir denemedeki test sayısı, $\bar{y}$: Gözlem değerinin ortalaması ve S^2: Gözlem değerlerinin varyansını ifade etmektedir).

Bu çalışmada 6 farklı amaç fonksiyonu bakımından sistem incelenmiştir. Buna göre, ısıl verim, türbin gücü ve ekserji verimi maksimizasyonu için 'en büyük en iyidir' prensibi; toplam tersinmezlik, hacimsel debi oranı ve çevresel etki faktörü minimizasyonunda ise 'en küçük en iyidir' prensibi uygulanmıştır.

Son olarak, farklı amaç fonksiyonları için Taguchi ve ANOVA ile elde edilen veriler kullanılarak regresyon denklemleri türetilmiştir. Bu denklemlerin güvenilirliği 3 farklı istatiksel yöntem kullanılarak elde edilen hata oranları ile belirlenmiştir.

Bu bağıntılar Denklem 33-35 ile verilmiştir [22].

Ortalama Mutlak Yüzde Hata (Mean Absolute Percentage Error-$MAPE$)

$$MAPE = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\left(\left|\frac{\gamma_{i,pred} - \gamma_{i,act}}{\gamma_{i,act}}\right|\right) \times 100 \quad (33)$$

Oransal Hata Kareleri Ortalamasının Karekökü (Relative Root Mean Squared Error-$RRMSE$)

$$RRMSE = \frac{\sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\left(\gamma_{i,pred} - \gamma_{i,act}\right)^2}}{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\gamma_{i,act}} \times 100 \quad (34)$$

Düzeltilmiş Belirleme Katsayısı (Determination of Coefficient-R^2).

$$R^2 = \left(\frac{\sum_{i=1}^{n}\left(\gamma_{i,pred} - \bar{\gamma}_{i,pred}\right)^2 \times \sum_{i=1}^{n}\left(\gamma_{i,act} - \bar{\gamma}_{i,act}\right)^2}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}\left(\gamma_{i,pred} - \bar{\gamma}_{i,pred}\right)^2} \times \sqrt{\sum_{i=1}^{n}\left(\gamma_{i,act} - \bar{\gamma}_{i,act}\right)^2}}\right)^2 \quad (35)$$

Taguchi ile yapılan hassasiyet analizi 6 farklı amaç fonksiyonu altında ayrı ayrı yapılmıştır. Bu amaç fonksiyonları;

$f_1(x)$: $maks\ (\eta_{ısıl})$; Isıl verim maksimizasyonu,

$f_2(x)$: $maks\ (W_T)$; Türbin gücü maksimizasyonu,

$f_3(x)$: $maks\ (\eta_{ul})$; Ekserji verimi maksimizasyonu,

$f_4(x)$: $\min(IT)$; Toplam tersinmezlik minimizasyonu,

$f_5(x)$: $\min(VFR)$; Hacimsel debi oranı minimizasyonu,

$f_6(x)$: $\min(EEF)$; Çevresel etki değeri minimizasyonu.

Bu amaç fonksiyonlarına bağlı olarak belirlenen faktör değerleri ise, $\Delta T_{PP,e}$, $\Delta T_{PP,k}$, $T_{c,i}$, $T_{a,k}$, η_t ve η_p olarak belirlenmiştir. 6 farklı faktör değerinin 6 farklı amaç fonksiyonu altında hassasiyet seviyesi ve yüzdesel etki oranları belirlenmiştir. Taguchi'de 6 farklı faktör 5 farklı seviye değerinde ele alınarak $L25$ (5^6) ortogonal dizi tasarımı kullanılmıştır. Amaç fonksiyonları için belirlenen faktör ve seviye değerleri Tablo 3'te verilmiştir. Bu seviye değerlerine

ilişkin L25 (5^6) ortogonal dizilim kullanarak oluşturulan tasarım Tablo 4'te verilmiştir.

Tablo 3. Taguchi parametre seviyeleri.

Table 3. Taguchi parameter levels.

Faktörler/Seviye Değerleri	Birim	1	2	3	4	5
$\Delta T_{PP,e}$ (A)	(^oC)	2	4	6	8	10
$\Delta T_{PP,k}$ (B)	(^oC)	2	4	6	8	10
$T_{c,i}$ (C)	(^oC)	10	15	20	25	30
$T_{a,k}$ (D)	(^oC)	0	5	10	15	20
η_t (E)	-	0.65	0.70	0.75	0.80	0.85
η_p (F)	-	0.65	0.70	0.75	0.80	0.85

Tablo 4. $L25$ (5^6) ortogonal dizi tasarımı.

Table 4. $L25$ (5^6) orthogonal array design.

Durum	A	B	C	D	E	F
1	1	1	1	1	1	1
2	1	2	2	2	2	2
3	1	3	3	3	3	3
4	1	4	4	4	4	4
5	1	5	5	5	5	5
6	2	1	2	3	4	5
7	2	2	3	4	5	1
8	2	3	4	5	1	2
9	2	4	5	1	2	3
10	2	5	1	2	3	4
11	3	1	3	5	2	4
12	3	2	4	1	3	5
13	3	3	5	2	4	1
14	3	4	1	3	5	2
15	3	5	2	4	1	3
16	4	1	4	2	5	3
17	4	2	5	3	1	4
18	4	3	1	4	2	5
19	4	4	2	5	3	1
20	4	5	3	1	4	2
21	5	1	5	4	3	2
22	5	2	1	5	4	3
23	5	3	2	1	5	4
24	5	4	3	2	1	5
25	5	5	4	3	2	1

4 Model doğrulanması

Taguchi modelinin doğruluğunun tespiti açısından literatürden deneysel çalışmalar ele alınmıştır. Bu kapsamda çalışma şartlarına yakın olan iki deneysel çalışmanın sonuçları Taguchi modeli ile karşılaştırılmıştır. Literatürde incelenen deneysel çalışmalarda organik akışkan olarak R245fa kullanıldığı için Taguchi modeli R245fa şartları altında çalıştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar ile deneysel çalışma sonuçları MAPE istatistiksel yöntemi kullanılarak karşılaştırılmıştır.

Tablo 5'te aynı tasarım parametreleri altında Taguchi modelinin tahmin ettiği ısıl verim değeri ile iki farklı deneysel çalışma sonucunda tespit edilen değerler karşılaştırılmıştır. Deneysel çalışmada meydana gelen basınç kayıpları dikkate alındığında hata oranlarının kabul edilebilir bir seviyede olduğu görülmektedir.

5 Bulgular

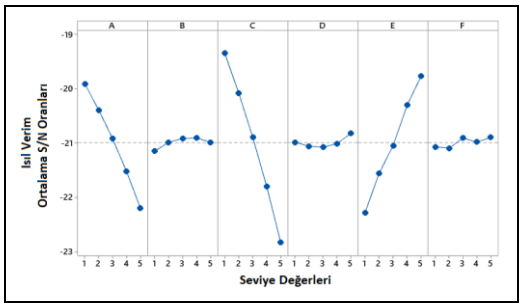
Bu kısımda sırasıyla R141b akışkanı kullanılarak tasarlanmış ORÇ'nin Taguchi-ANOVA ile farklı amaç fonksiyonları altındaki hassasiyet seviye sıralaması, yüzdesel etki oranları, regresyon analizi ile türetilen ampirik denklem ve bu denklemlerin güvenilirlik sonuçları belirtilmiştir.

Şekil 3-8'te R141b'nin sırasıyla ısıl verim, türbin gücü, ekserji verimi maksimizasyonu; toplam tersinmezlik, VFR ve EEF minimizasyonu olmak üzere 6 farklı amaç fonksiyonu altında belirlenen faktör seviyelerinin grafikleri verilmiştir. Faktör seviyeleri; $\Delta T_{PP,e}$ (A), $\Delta T_{PP,k}$ (B), $T_{c,i}$ (C), $T_{a,k}$ (D), η_t (E), η_p (F) olarak belirtilmiştir.

Tablo 5. Aynı tasarım parametreleri altında Taguchi modelinin tahmini ile deneysel çalışma sonucunun karşılaştırılması

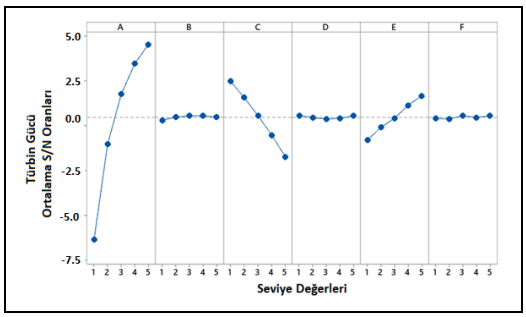
Table 5. Comparison of the estimation of the Taguchi model with the experimental results under the same design parameters.

Tasarım Parametreleri	Yoğuşma sıcaklığı: 33.8 °C; Türbin giriş basıncı: 995 kPa; Türbin giriş sıcaklığı: 89.7 °C, Türbin ve pompa izantropik verimi: %80		Yoğuşma sıcaklığı: 30 °C; Türbin giriş basıncı: 1250 kPa; Türbin giriş sıcaklığı: 102.5 °C, Türbin ve pompa izantropik verimi: %80	
Organik Akışkanlar	R245fa		R245fa	
Performans Parametreleri	Mevcut Çalışma Taguchi Tahmin Değeri	Galloni ve diğ. (2015) Deney. Çalışma	Mevcut Çalışma Taguchi Tahmin Değeri	Muhammad ve diğ.(2015) Deneysel Çalışma
Isıl Verim (%)	9.64	9.28	8.5	7.8
MAPE (%)	9.6		9.1	



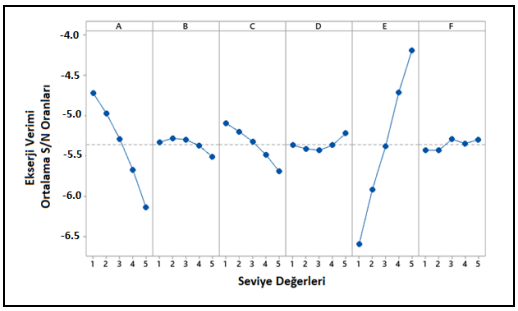
Şekil 3. R141b'li ORÇ'nin ısıl veriminin 'en büyük en iyi S/N' oranına göre faktör seviyelerinin grafiği.

Figure 3. Graph of factor levels of thermal efficiency of ORC with R141b according to 'largest best S/N' ratio.



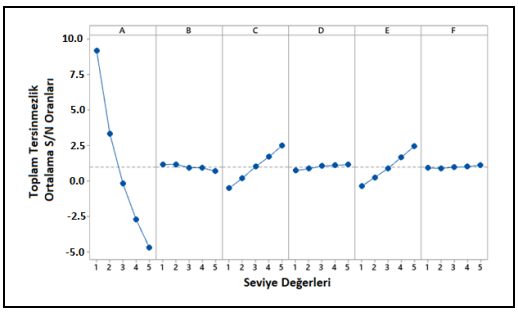
Şekil 4. R141b'li ORÇ'nin türbin gücünün 'en büyük en iyi S/N' oranına göre faktör seviyelerinin grafiği.

Figure 4. Graph of factor levels of turbine power of ORC with R141b according to 'largest best S/N' ratio.



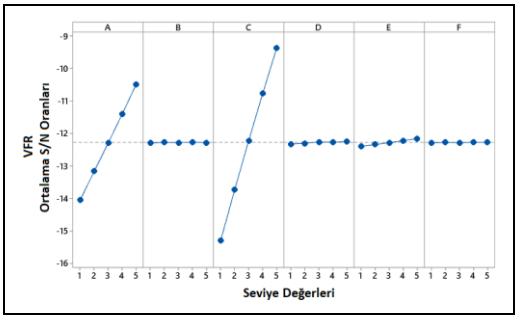
Şekil 5. R141b'li ORÇ'nin ekserji veriminin 'en büyük en iyi S/N' oranına göre faktör seviyelerinin grafiği.

Figure 5. Graph of factor levels of exergy efficiency of ORC with R141b according to 'largest best S/N' ratio.



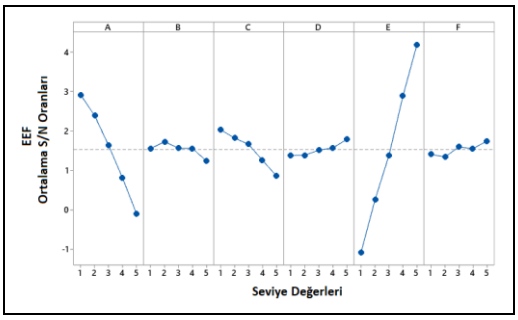
Şekil 6. R141b'li ORÇ'nin toplam tersinmezliğinin 'en küçük en iyi S/N' oranına göre faktör seviyelerinin grafiği.

Figure 6. Graph of factor levels of total irreversibility of ORC with R141b according to 'smallest best S/N' ratio.



Şekil 7. R141b'li ORÇ'nin VFR değerinin 'en küçük en iyi S/N' oranına göre faktör seviyelerinin grafiği.

Figure 7. Graph of factor levels of VFR of ORC with R141b according to 'smallest best S/N' ratio.



Şekil 8. R141b'li ORÇ'nin EEF değerinin 'en küçük en iyi S/N' oranına göre faktör seviyelerinin grafiği.

Figure 8. Graph of factor levels of EEF of ORC with R141b according to 'smallest best S/N' ratio.

Şekildeki parametrelerin S/N oranlarından maksimum ve minimum değerleri arasındaki farktan önem sırası anlaşılabilmektedir. S/N oranlarından ısıl verim maksimizasyonunda en önemli parametrenin soğutma suyu sıcaklığı olduğu görülmektedir. Fakat türbin gücü maksimizasyonunda ise diğer parametrelere kıyasla $\Delta T_{PP,e}$'nin çok önemli bir yerde olduğu belirtilmiştir.

Ekserji verim maksimizasyonunda türbin izantropik verimi önemli olmasına rağmen toplam tersinmezlik minimizasyonunda ise en büyük S/N değişimi $\Delta T_{PP,e}$'de gerçekleşmiştir. VFR ve EEF minimizasyonunda ise sırasıyla soğutma suyu sıcaklığı ve türbin izantropik veriminin önemli olduğu belirtilmiştir. S/N oran tablosu ve parametrelerin hassasiyet seviyeleri Tablo 6-11'de 6 amaç fonksiyonu için verilmiştir.

Tablo 6. $f_1(x)$: $maks$ $(\eta_{ısıl})$ için S/N oranları ve hassasiyet sıralaması.

Table 6. S/N ratios and sensitivity rank for $f_1(x)$: $maks$ $(\eta_{ısıl})$.

$T_{h,i} = 90\ °C$; R141b – Isıl Verim Maksimizasyonu						
Seviye	$\Delta T_{PP,e}$ (A)	$\Delta T_{PP,k}$ (B)	$T_{c,i}$ (C)	$T_{a,k}$ (D)	η_t (E)	η_p (F)
1	-19.9	-21.1	-19.3	-20.9	-22.2	-21.0
2	-20.4	-20.9	-20.0	-21.0	-21.5	-21.1
3	-20.9	-20.9	-20.8	-21.0	-21.0	-20.9
4	-21.5	20.91	-21.8	-21.0	-20.3	-20.9
5	-22.2	-20.9	-22.8	-20.8	-19.7	-20.9
$\Delta_{maks-min}$	2.28	0.25	3.48	0.26	2.51	0.20
Hassasiyet Seviyesi	3	5	1	4	2	6

Tablo 7. $f_2(x)$: $maks$ (W_T) için S/N oranları ve hassasiyet sıralaması.

Table 7. S/N ratios and sensitivity rank for $f_2(x)$: $maks$ (W_T).

$T_{h,i} = 90\ °C$; R141b – Türbin Gücü Maksimizasyonu						
Seviye	$\Delta T_{PP,e}$ (A)	$\Delta T_{PP,k}$ (B)	$T_{c,i}$ (C)	$T_{a,k}$ (D)	η_t (E)	η_p (F)
1	-6.37	0.30	2.47	0.55	-0.80	0.40
2	-1.03	0.46	1.55	0.43	-0.09	0.36
3	1.74	0.53	0.55	0.37	0.40	0.54
4	3.45	0.54	-0.53	0.39	1.13	0.45
5	4.52	0.46	-1.74	0.54	1.66	0.54
$\Delta_{maks-min}$	10.8	0.23	4.21	0.18	2.46	0.17
Hassasiyet Seviyesi	1	4	2	5	3	6

Tablo 8. $f_3(x)$: $maks$ $(\eta_{ıı})$ için S/N oranları ve hassasiyet sıralaması.

Table 8. S/N ratios and sensitivity rank for $f_3(x)$: $maks$ $(\eta_{ıı})$.

$T_{h,i} = 90\ °C$; R141b – Ekserji Verimi Maksimizasyonu						
Seviye	$\Delta T_{PP,e}$ (A)	$\Delta T_{PP,k}$ (B)	$T_{c,i}$ (C)	$T_{a,k}$ (D)	η_t (E)	η_p (F)
1	-4.72	-5.33	-5.09	-5.39	-6.59	-5.42
2	-4.97	-5.28	-5.19	-5.41	-5.91	-5.43
3	-5.28	-5.29	-5.32	-5.43	-5.38	-5.29
4	-5.67	-5.37	-5.48	-5.36	-4.71	-5.34
5	-6.14	-5.51	-5.69	-5.21	-4.18	-5.29
$\Delta_{maks-min}$	1.42	0.23	0.59	0.21	2.40	0.13
Hassasiyet Seviyesi	2	4	3	5	1	6

Tablo 9. $f_4(x)$: min(IT) için S/N oranları ve hassasiyet sıralaması.

Table 9. S/N ratios and sensitivity rank for $f_4(x)$: min(IT).

$T_{h,i} = 90\ °C$; R141b – Toplam Tersinmezlik Minimizasyonu						
Seviye	$\Delta T_{PP,e}$ (A)	$\Delta T_{PP,k}$ (B)	$T_{c,i}$ (C)	$T_{a,k}$ (D)	η_t (E)	η_p (F)
1	9.19	1.16	-0.51	0.73	-0.37	0.91
2	3.33	1.17	0.18	0.86	0.25	0.89
3	-0.20	0.94	1.01	1.05	0.88	0.96
4	-2.72	0.92	1.70	1.09	1.66	1.00
5	-4.70	0.69	2.50	1.15	2.45	1.11
$\Delta_{maks-min}$	13.8	0.48	3.02	0.42	2.82	0.22
Hassasiyet Seviyesi	1	4	2	5	3	6

Tablo 10. $f_5(x)$: min(VFR) için S/N oranları ve hassasiyet sıralaması.

Table 10. S/N ratios and sensitivity rank for $f_5(x)$: min(VFR).

$T_{h,i} = 90\ °C$; R141b – *VFR* Minimizasyonu						
Seviye	$\Delta T_{PP,e}$ (A)	$\Delta T_{PP,k}$ (B)	$T_{c,i}$ (C)	$T_{a,k}$ (D)	η_t (E)	η_p (F)
1	-14.0	-12.28	-15.2	-12.3	-12.3	-12.2
2	-13.1	-12.26	-13.7	-12.2	-12.3	-12.2
3	-12.2	-12.27	-12.2	-12.2	-12.2	-12.2
4	-11.3	-12.26	-10.7	-12.2	-12.2	-12.2
5	-10.4	-12.27	-9.3	-12.2	-12.1	-12.2
$\Delta_{maks-min}$	3.57	0.028	5.94	0.07	0.24	0.02
Hassasiyet Seviyesi	2	5	1	4	3	6

Tablo 11. $f_6(x)$: min(EEF) için S/N oranları ve hassasiyet sıralaması.

Table 11. S/N ratios and sensitivity rank for $f_6(x)$: min(EEF).

$T_{h,i} = 90\ °C$; R141b – *EEF* Minimizasyonu						
Seviye	$\Delta T_{PP,e}$ (A)	$\Delta T_{PP,k}$ (B)	$T_{c,i}$ (C)	$T_{a,k}$ (D)	η_t (E)	η_p (F)
1	2.91	1.55	2.03	1.38	-1.07	1.40
2	2.39	1.73	1.82	1.38	0.25	1.34
3	1.63	1.56	1.66	1.51	1.38	1.59
4	0.80	1.55	1.26	1.57	2.89	1.55
5	-0.10	1.24	0.86	1.79	4.19	1.74
$\Delta_{maks-min}$	3.0177	0.48	1.17	0.41	5.27	0.40
Hassasiyet Seviyesi	2	4	3	5	1	6

Tablo 5-10 incelendiğinde; 6 farklı amaç fonksiyonu için optimum ortogonal dizilimler aşağıda belirtilmiştir.

$f_1(x)$: $maks$ $(\eta_{ısıl})$; $A1\ B4\ C1\ D5\ E5\ F5$

$f_2(x)$: $maks$ (W_T); $A5\ B4\ C1\ D1\ E5\ F3$

$f_3(x)$: $maks$ $(\eta_{ıı})$; $A1\ B2\ C1\ D5\ E5\ F3$

$f_4(x)$: min(IT) ; $A1\ B2\ C5\ D5\ E5\ F5$

$f_5(x)$: min(VFR) ; $A5\ B4\ C5\ D5\ E5\ F4$

$f_6(x)$: min(EEF) ; $A1\ B2\ C1\ D5\ E5\ F5$

R141b kullanılarak tasarlanarak ORÇ'nin performans parametrelerinin 6 farklı amaç fonksiyonu üzerindeki hassasiyet seviyeleri ise aşağıda özetlenmiştir.

$f_1(x)$: $maks$ $(\eta_{ısıl})$; $C > E > A > D > B > F$

$f_2(x)$: $maks$ (W_T); $A > C > E > B > D > F$

$f_3(x)$: $maks$ $(\eta_{ıı})$; $E > A > C > B > D > F$

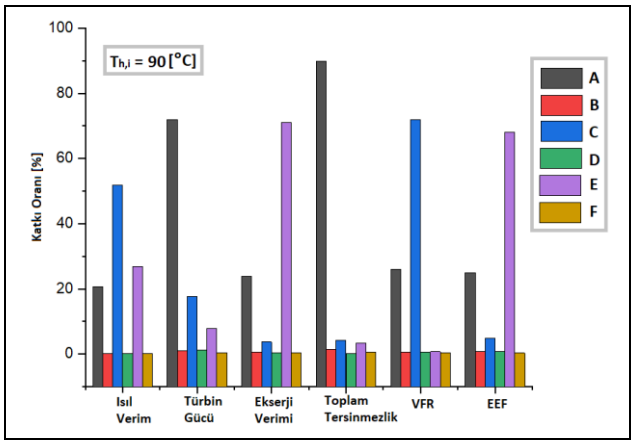
$f_4(x)$: min(IT) ; $A > C > E > B > D > F$

$f_5(x)$: min(VFR) ; $C > A > E > D > B > F$

$f_6(x)$: min(EEF) ; $E > A > C > B > D > F$

Taguchi metodu ile elde edilen S/N oranından amaç fonksiyonları optimum parametreler belirlenirken, ANOVA ile de performans parametreleri arasındaki ilişki tespit edilmiştir. Performans parametrelerinin amaç fonksiyonları üstündeki katkı oranı yüzdeleri tespit edilmiştir. ANOVA sonuçlarına göre $p < 0.01$ veya $p < 0.05$ anlamlılık düzeyinde olması gerekir.

90 °C ısı kaynağı sıcaklığında tasarlanan ORÇ'nin faktör değerlerinin amaç fonksiyonları üzerindeki katkı oranları Şekil 9'da verilmiştir.



Şekil 9. 90 °C ısı kaynağı sıcaklığında tasarlanan ORÇ'nin faktör değerlerinin amaç fonksiyonları üzerindeki katkı oranları.

Figure 9. The contribution ratios of the factor values of the ORC designed at 90 °C heat source temperature to the objective functions.

Şekil 9 incelendiğinde;

- $\Delta T_{PP,e}$'nin toplam tersinmezlik ve türbin gücündeki etkisinin sırasıyla %89.83 ve %71.9 olduğu ayrıca diğer parametreler üzerindeki etkisinin de en az %20 olduğu tespit edilmiştir,
- Soğutma suyu sıcaklığının ısıl verim ve hacimsel debi oranını sırasıyla %51.83 ve %71.82 oranda etkilediği, diğer parametreler üzerindeki etkisinin az olduğu görülmektedir,
- Aşırı kızdırma sıcaklığı ve $\Delta T_{PP,k}$'nın sistem performans parametreleri üzerinde belirgin bir etkisinin olmadığı belirtilmiştir. Aşırı kızdırma sıcaklığı en fazla %1.13 oranında türbin gücünü, $\Delta T_{PP,k}$'da en fazla %1.56 ile toplam tersinmezlik değerini etkilemektedir,
- Türbin izantropik veriminin en yüksek %71.02 ile ekserji verimini etkilediği görülmektedir.
- Pompa izantropik veriminin performans parametreleri üzerindeki etkisinin %1'den az olduğu belirtilmiştir.

6 farklı amaç fonksiyonu altında hassasiyet seviyelerine göre katkı oranları en fazla olan iki parametre ve katkı oranları Tablo 12'de özetlenmiştir. Tüm amaç fonksiyonlarının eşit oranda etkilediği bir ağırlık fonksiyonu tanımlanmasıyla ORÇ performansında ortalama olarak %42.85 $\Delta T_{PP,e}$ ve %25.71 $T_{c,i}$'nin etkilediği tespit edilmiştir.

Tablo 12. Amaç fonksiyonlarına bağlı olarak katkı oranı en fazla olan iki parametre.

Table 12. Depending on the objective functions, the two parameters with the highest contribution rate.

Amaç Fonksiyonları	Katkı Oranı En Fazla Olan İki Parametre
$f_1(x)$: $maks$ ($\eta_{ısıl}$);	%51.83; $T_{c,i}$ %26.90; η_t
$f_2(x)$: $maks$ (W_T);	%71.9; $\Delta T_{PP,e}$ %17.68; $T_{c,i}$
$f_3(x)$: $maks$ ($\eta_{ıı}$);	%71.02; η_t %23.9; $\Delta T_{PP,e}$
$f_4(x)$: min(IT) ;	%89.83; $\Delta T_{PP,e}$ %4.29; $T_{c,i}$
$f_5(x)$: min(VFR) ;	%71.82; $T_{c,i}$ %25.97; $\Delta T_{PP,e}$
$f_6(x)$: min(EEF) ;	%67.99; η_t %24.95; $\Delta T_{PP,e}$
$G(x)$: Ağırlık Fonksiyonu	%42.85; $\Delta T_{PP,e}$ %25.71; $T_{c,i}$

Çalışmanın son kısmında faktör değerlerine bağlı olarak her bir amaç fonksiyonu için regresyon analizi ile ampirik denklemler türetilmiştir. Bu denklemler Tablo 13'te verilmiştir. Faktör değerlerinin geçerlilik aralıkları; $\Delta T_{PP,e}$ ve $\Delta T_{PP,k}$: 1 °C–10 °C; $T_{c,i}$: 10 °C–30 °C; $T_{a,k}$: 0 °C–20 °C ve $\eta_t - \eta_p$: %65–85 şeklindedir.

EES yazılımı kullanılarak hesaplanan nümerik değerler ile ampirik denklem ile tahmin edilen değerler üç farklı istatistiksel yöntem kullanılarak karşılaştırılmıştır. Bunlar; $MAPE$, $RRMSE$ ve R^2'dir. Tablo 14'te hata yüzdeleri belirtilmiştir. Tablo incelendiğinde R^2 değerinin %96.2 olduğu görülmektedir, bu da türetilen denklemlerin ORÇ performansının belirlenmesinde başarılı bir şekilde kullanılabileceğini göstermektedir.

6 Sonuçlar

Bu makalede, ORÇ sisteminin performansını etkileyen parametrelerin hassasiyet seviyelerinin belirlenmesi üzerine çalışma yapılmıştır. Bunun için Taguchi-ANOVA metodundan yararlanılmıştır. Hassasiyet seviyeleri farklı amaç fonksiyonları altında değerlendirilmiştir. Bunlar; $f_1(x)$: $maks$ ($\eta_{ısıl}$); $f_2(x)$: $maks$ (W_T); $f_3(x)$: $maks$ ($\eta_{ıı}$); $f_4(x)$: min(IT); $f_5(x)$: min(VFR); $f_6(x)$: min(EEF).

Amaç fonksiyonlarına göre hassasiyet seviye sıralamalarının değişkenlik gösterdiği görülmektedir. Isıl verim maksimizasyonunda $T_{c,i}$ en hassas parametre iken türbin gücü maksimizasyonunda $\Delta T_{PP,e}$ parametresinin en hassas olduğu tespit edilmiştir. Amaç fonksiyonlarına ulaşılmasında en yüksek yüzdesel katkı oranına sahip iki parametre belirlenmiştir. Tüm amaç fonksiyonlarının eşit oranda etkilediği bir ağırlık fonksiyonu tanımlanmasıyla ortalama olarak %42.85 $\Delta T_{PP,e}$, ve %25.71 ise $T_{c,i}$'nin ORÇ performansı üzerinde etkisi olduğu belirlenmiştir. Ağırlık fonksiyonu sonucuna göre hassasiyet sıralaması $\Delta T_{PP,e} > T_{c,i} > \eta_t > \Delta T_{PP,k} > T_{a,k} > \eta_p$ şeklinde belirlenmiştir. $\Delta T_{PP,e}$'nin tüm amaç fonksiyonları üzerinde ciddi bir etkisinin olduğu görülmektedir. Isıl verim üzerindeki etkisi %20.59 iken türbin gücü üzerindeki etkisi %71.9 olarak tespit edilmiştir. Bundan dolayı çalışmalarda optimum koşullara ulaşılmasında ısı kaynağı sıcaklığı ve organik akışkana bağlı olarak en ideal $\Delta T_{PP,e}$ değerinin seçilmesi gerekmektedir.

Hassasiyet sonuçlarına göre türetilen ampirik denklemler incelendiğinde nümerik hesap değerlerine yakın sonuçlar elde edildiği belirlenmiştir. %95.6 R^2 değerine ulaşılmıştır.

7 Conclusions

In this article, a study has been carried out to determine the sensitivity levels of the parameters that affect the performance of the ORC system. For this, the Taguchi-ANOVA method was used. Sensitivity levels were evaluated under different objective functions. These are; $f_1(x)$: $maks$ ($\eta_{ısıl}$); $f_2(x)$: $maks$ (W_T); $f_3(x)$: $maks$ ($\eta_{ıı}$); $f_4(x)$: min(IT); $f_5(x)$: min(VFR); $f_6(x)$: min(EEF). It is seen that the order of sensitivity levels varies according to the objective functions. It was determined that while $T_{c,i}$ was the most sensitive parameter in thermal efficiency maximization, $\Delta T_{PP,e}$ parameter was the most sensitive in turbine power maximization. Two parameters with the highest percentage contribution were determined to reach the objective functions. By defining a weight function that affects all objective functions equally, it was determined that on average 42.85% $\Delta T_{PP,e}$ and 25.71% $T_{c,i}$ had an effect on ORC performance. According to the weight function result, the order of sensitivity was determined as $\Delta T_{PP,e} > T_{c,i} > \eta_t > \Delta T_{PP,k} > T_{a,k} > \eta_p$. $\Delta T_{PP,e}$ appears to have a significant impact on all objective functions. While the effect on thermal efficiency was 20.59%, the effect on turbine power was determined as 71.9%. Therefore, in order to reach optimum conditions in studies, the most ideal $\Delta T_{PP,e}$ value should be selected depending on the heat source temperature and organic fluid.

Tablo 13. Farklı amaç fonksiyonları altında ORÇ'de faktör değerlerine bağlı olarak belirlenen ampirik denklemler.

Table 13. Empirical equations determined depending on factor values in ORC under different objective functions.

$T_{h,i}$	Performans Parametreleri	Regresyon Denklemi-Optimum Akışkan: R141b
90 °C	$\eta_{ısıl}$	$0.04087 - 0.005457 * \Delta T_{pp,e} + 0.000306 * \Delta T_{pp,k} - 0.001737 * T_{c,i} + 0.000079 * T_{ak} + 0.12513 * \eta_+ + 0.00748 * \eta_p$
	WT (kW)	$-0.917 + 0.3129 * \Delta T_{pp,e} + 0.0131 * \Delta T_{pp,k} - 0.03124 * T_{c,i} + 0.0016 * T_{ak} + 2.059 * \eta_+ + 0.244 * \eta_p$
	$\eta_{ıı}$	$0.0468 - 0.021524 * \Delta T_{pp,e} - 0.00234 * \Delta T_{pp,k} - 0.001675 * T_{c,i} + 0.000531 * T_{ak} + 0.745 * \eta_+ + 0.0501 * \eta_p$
	I_{toplam} (kW)	$0.827 + 0.3443 * \Delta T_{pp,e} + 0.04447 * \Delta T_{pp,k} - 0.01495 * T_{c,i} + 0.00301 * T_{ak} - 1.339 * \eta_+ + 0.426 * \eta_p$
	VFR	$10.413 - 0.4399 * \Delta T_{pp,e} - 0.0386 * \Delta T_{pp,k} - 0.14544 * T_{c,i} - 0.01112 * T_{ak} - 1.416 * \eta_+ - 0.827 * \eta_p$
	EEF	$2.508 + 0.07814 * \Delta T_{pp,e} + 0.01164 * \Delta T_{pp,k} + 0.00699 * T_{c,i} - 0.00113 * T_{ak} - 2.601 * \eta_+ - 0.117 * \eta_p$

Tablo 14. ORÇ performansının tahmin edilmesinde istatistiksel karşılaştırma sonuçları.

Table 14. Statistical comparison results in estimating ORC performance.

$T_{h,i}$	$MAPE$ (%)	$RRMSE$ (%)	R^2 (%)
90 °C	3.51	3.82	95.6

When the empirical equations derived according to the sensitivity results were examined, it was determined that results close to the numerical calculation values were obtained. 95.6% R^2 value has been reached.

8 Yazar katkı beyanı

Gerçekleştirilen çalışmada Sadık ATA fikrin oluşması, literatür taraması, analiz ve modelleme ve bulgular başlıklarında; Ali KAHRAMAN ve Remzi ŞAHİN bulgularda elde edilen sonuçların değerlendirilmesi başlıklarında katkı sunmuşlardır.

9 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.

10 Kaynaklar

[1] Wang X, Liu X, Zhang C. "Parametric optimization and range analysis of Organic Rankine Cycle for binary-cycle geothermal plant". *Energy Conversion and Management*, 80, 256-265, 2014.

[2] Liu X, Wang X, Zhang C. "Sensitivity analysis of system parameters on the performance of the Organic Rankine Cycle system for binary-cycle geothermal power plants". *Applied Thermal Engineering*, 71, 175-183, 2014.

[3] Feng Y, Zhang Y, Li B, Yang J, Shi Y. "Sensitivity analysis and thermoeconomic comparison of ORCs (organic Rankine cycles) for low temperature waste heat recovery". *Energy*, 82, 664-677, 2015.

[4] Kumar U, Karimi MN, Asjad M. "Parametric optimisation of the organic Rankine cycle for power generation from low-grade waste heat". *International Journal of Sustainable Energy*, 35, 774-792, 2016.

[5] Yılmaz F, Selbaş R, Şahin AŞ. "Efficiency analysis of organic Rankine cycle with internal heat exchanger using neural network". *Heat Mass Transfer*, 52, 351-359, 2016.

[6] Bademlioglu AH, Canbolat AS, Yamankaradeniz N, Kaynakli O. "Investigation of parameters affecting Organic Rankine Cycle efficiency by using Taguchi and ANOVA methods". *Applied Thermal Engineering*, 145, 221-228, 2018.

[7] Zhi LH, et al. "Multiple parametric analysis, optimization and efficiency prediction of transcritical organic Rankine cycle using trans-1,3,3,3-tetrafluoropropene (R1234ze(E)) for low grade waste heat recovery". *Energy Conversion and Management*, 180, 44-59, 2019.

[8] Kılıc B, Arabacı E. "Alternative approach in performance analysis of organic rankine cycle (ORC)". *Enviromental Progress & Sustainable Energy*, 38, 54-259, 2019.

[9] Zhao J, et al. "How to rapidly predict the performance of ORC: Optimal empirical correlation based on cycle separation". *Energy Conversion and Management*, 188, 86-93, 2019.

[10] Çelik S, Kabul A. "Parabolik güneş kolektörlü organik rankine çevriminin enerji ve ekserji analizi". *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 25(4), 410-416, 2019.

[11] Atız A, Karakılçık M. "Adana iklim koşullarında Organik Rankine Çevrimi ile bütünleşik düzlem-plakalı ve vakum tüplü kolektörlerin ısıl verimlerinin karşılaştırılması". *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 26 (1), 106-112, 2020.

[12] Bademlioglu AH, Canbolat AS, Kaynakli O. "Multi-objective optimization of parameters affecting Organic Rankine Cycle performance characteristics with Taguchi-Grey Relational Analysis". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2020. https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109483.

[13] Pan M, Lu F, Zhu Y, Huang G, Yin J, Huang F, Chen G, Chen Z. "Thermodynamic, exergoeconomic and multi-objective optimization analysis of new ORC and heat pump system for waste heat recovery in waste-toenergy combined heat and power plant". *Energy Conversion and Management*, 2020. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.113200.

[14] Nondy J, Gogoi TK. "Exergoeconomic investigation and multi-objective optimization of different ORC configurations for waste heat recovery: A comparative study". *Energy Conversion and Management*, 2021. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2021.114593.

[15] Yilmaz C, Koyuncu I. "Thermoeconomic modeling and artificial neural network optimization of Afyon geothermal power plant". *Renewable Energy*, 163, 1166-1181, 2021.

[16] Jankowski M. "A new indicator for minimizing size of an ORC power plant based on heat exchanger and turbine design parameters". *Applied Thermal Engineering*, 2022. https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2021.117750.

[17] Calm JM, Hourahan GC. "Refrigerant data update". *HPAC Heating, Piping, AirConditioning Engineering*, 79(1), 50-64, 2007.

[18] Cengel Y, Boles M. *Thermodynamics an Engineering Approach*. 8nd ed. Asia, McGraw- Hill, 2014.

[19] Safarian S, Aramoun F. "Energy and exergy assessments of modified organic Rankine cycles (ORCs)". *Energy Reports*, 1, 1–7, 2015.

[20] Tuğral N. CNC Makinesinde Gerçek Mermerlerin Kesme Genişliğinin Yüzey Kalitesine Etkisinin Taguchı Yöntemiyle İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Afyonkarahisar, Türkiye, 2019.

[21] Yıldırım S. Ürün Tasarımı Geliştirilmesi: Taguchi Tasarımı, Yüksek Lisans Tezi, Başkent Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, Türkiye, 2011.

[22] Ayodele TR, Ogunjuyigbe ASO, Amedu A, Munda JL. "Prediction of global solar irradiation using hybridized k-means and support vector regression algorithms". *Renewable Energy Focus*, 29, 78-93, 2019.