

PEME-PDMYH Sistemi Kaynaklı Oluşan Isı Kaynağının ORÇ Birleşeni ile Verimlilik ve Ekonomik Analizi

Sefa Salim ÖRNEK^{1*}, Burak KURŞUN², Korhan ÖKTEN³, Levent UĞUR⁴

¹. Amasya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yenilebilir Enerji ve Uygulamaları Anabilim Dalı, 05000, Amasya

^{2,3,4} Amasya Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü, 05000, Amasya

¹<https://orcid.org/0009-0002-7337-2596>

²<https://orcid.org/0000-0001-5878-3894>

³<https://orcid.org/0000-0002-8728-8785>

⁴<https://orcid.org/0000-0003-3447-3191>

*Sorumlu yazar: sefasalim@hotmail.com

Araştırma Makalesi

ÖZ

Makale Tarihiçesi:

Geliş tarihi: 29.02.2024

Kabul tarihi: 29.08.2024

Online Yayınlanma: 12.03.2025

Anahtar Kelimeler:

Hidrojen

Proton elektrolit membranlı elektrolizör

Proton değişim membranlı yakıt hücresi

Organik rankine çevrimi

Fosil yakıtların çevresel zararlarından dolayı temiz enerji dönüşüm sistemleri ve enerji depolama alanındaki çalışmalar yaygın hale gelmiştir. Enerji dönüşüm ve depolama sistemleri arasında en çok kullanılan sistemlerden biri de hidrojen temelli, Proton Elektrolit Membranlı Elektrolizör (PEME) ve Proton Değişim Membranlı Yakıt Hücresi (PDMYH) birleşimidir. Bu birleşimde PEME hidrojen üretiminde, PDMYH ise hidrojenden elektrik üretiminde kullanılan sistemlerdir. Bu çalışmada PEME-PDMYH birleşimine ek olarak PDMYH'den elde edilen atık ısı ile Organik Rankine Çevrimi (ORÇ) çevriminden de elektrik eldesi araştırılmıştır. Bu araştırma için PEME-PDMYH ve PEME-PDMYH-ORÇ sistemleri parametrik olarak karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma parametreleri olarak PEME hücre sayısı, şarj süresi, deşarj süresi ve ORÇ evaporatör basıncı seçilmiştir. Bu parametrelere bağlı olarak PEME'de tüketilen, PDMYH ve ORÇ'de üretilen elektrik, çevrim verimi, Seviyelendirilmiş Elektrik Maliyeti (SEM) değerleri sistem çıktısı olarak seçilmiştir. Çalışma sonucunda en etkin parametre olan PEME hücre sayısına bağlı olarak PDMYH ve ORÇ'de üretilen elektrik, yaklaşık 3 kat artmıştır. Bunun yanında ORÇ kullanımı ile çevrim veriminin %1-2,5 arasında arttığı saptanmıştır. Son olarak ORÇ'li ve ORÇ'siz sistemler arasında SEM değerleri arasında büyük farklar olmadığı görülmüştür.

Efficiency and Economic Analysis of the Heat Source Originated from the PEME-PDMYH System with the ORC Component

Research Article

ABSTRACT

Article History:

Received: 29.02.2024

Accepted: 29.08.2024

Published online: 12.03.2025

Keywords:

Hydrogen

Proton exchange membrane electrolyzer

Proton exchange membrane fuel cell

Organic rankine cycle

Due to the environmental damage of fossil fuels, studies in the field of clean energy production systems and energy storage have become widespread. One of the most used systems among energy production and storage systems is the combination of hydrogen-based, Proton Exchange Membrane Electrolyzer (PEME) and Proton Exchange Membrane Fuel Cell (PEMFC). In this combination, PEME is the system used in hydrogen production and PEMFC is the system used in the production of electricity from hydrogen. In this study, in addition to the PEME-PEMFC compound, the generation of electricity from the ORC (Organic Rankine cycle) with the waste heat obtained from PEMFC was investigated. For this research, PEME-PEMFC and PEME-PEMFC-ORC systems were compared parametrically. Number of PEME cells, charging time, discharge time and ORC evaporator pressure were selected as comparison parameters. Depending on these parameters, the electricity consumed in PEME and produced in PEMYH and ORC, cycle efficiency and Levelized Cost of Electricity (LCOS) values were selected as system output. As a result of the

study, depending on the number of PEME cells, which is the most effective parameter, the electricity production produced in PEMFC and ORC increased approximately 3 times, and it was determined that the cycle efficiency increased by 1-2,5% with the use of ORC. Finally, it has been observed that there are no major differences in LCOS values between systems with and without ORC.

To Cite: Örnek SS., Kurşun B., Ökten K., Uğur L. PEME-PDMYH Sistemi Kaynaklı Oluşan Isı Kaynağının ORÇ Birleşeni ile Verimlilik ve Ekonomik Analizi. *Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi* 2025; 8(2): 773-793.

1.Giriş

Dünyada meydana gelen nüfus artışı ve endüstriyel gelişmelere bağlı olarak enerji ihtiyacının sürekli artması sonucunda bu ihtiyacın büyük kısmını karşılayan petrol, doğalgaz ve kömür gibi fosil enerji kaynakları da hızla tükenmektedir (Turan ve ark., 2013; Ozen ve ark., 2016). Bu petrol türevi hidrokarbon kökenli yakıtların yaygın kullanımı, enerji ihtiyacını karşılamasına rağmen beraberinde hava kirliliğini de getirmektedir. Bu durum, atmosferdeki sera gazlarının birikmesine ve küresel ortalama sıcaklıklarda artışa yol açarak iklim değişikliği sorununu derinleştirmektedir (Mahabunphachai ve ark., 2010; Turan ve ark., 2011). Fosil yakıtların oluşturduğu bu sorunlardan dolayı araştırmacılar temiz ve sürdürülebilir enerji kaynaklarına ve çevrim sistemlerine yönelmişlerdir. Bu yönelim sonucunda kirletici salınımı yapmadan elektrik üretebilen hidrojen destekli yakıt hücreleri en ön plana çıkan araştırma konuları arasında yer almaktadır (Midilli ve ark., 2005; Momirlan ve Veziroglu, 2005; Satterthwaite, 2008; Nel ve Cooper, 2009). Yakıt hücreleri herhangi bir yanma meydana gelmeden, sadece kimyasal reaksiyonların gerçekleştiği ve sonucunda yüksek güç, ısı ve suyun ortaya çıktığı oldukça verimli sistemlerdir (Sazali, 2020). Bu sistemlerin; güç santralleri, otomobiller, dizüstü bilgisayarlar, cep telefonları gibi birçok uygulama sahası da mevcuttur (Singla ve ark., 2021).

Çeşitli yakıt hücresi türleri arasında, PDMYH, düşük çalışma sıcaklığı, hızlı başlama, hızlı tepki verme yeteneği ve yüksek performans gibi bazı önemli avantajlarından dolayı taşınabilir ve sabit uygulamalar için en popüler olanıdır (Chen ve ark., 2011). PDMYH yakıt olarak hidrojen kullandığından bu sisteme destek sağlayacak bir hidrojen üretim sistemine de ihtiyaç vardır. Bu amaçla da literatürde yaygın olarak, elektrik enerjisi ve su girdisi ile çalışan PEME kullanılmaktadır (Larminie, 2003; Kunusch ve ark., 2012). Literatürde bu iki birleşeni ayrı ayrı veya birlikte içeren birçok çalışma mevcuttur. Zuliani ve Taccani (Zuliani ve Taccani, 2012), doğal gaz kullanan 1 kW'lık yüksek sıcaklık PDM yakıt hücreli kojenerasyon sisteminin performansını değerlendirmişlerdir. Simülasyon modeli ve deneysel veriler, seçilen tasarım parametrelerinde, %26 elektrik ve %78 genel enerji verimliliği sağlamıştır. Çalışmada, yüksek sıcaklıklı PDMYH kojenerasyonunun içten yanmalı motorlara veya gaz türbinlerine kıyasla daha yüksek enerji verimliliğine sahip ve sürdürülebilir enerji alternatifleri açısından önemli olduğu kaydedilmiştir. Liu ve diğerleri, yeni bir PDMYH-ORÇ sistemi tasarımı ile PDMYH; giriş sıcaklığı, doyma basıncı, akım yoğunluğu, aşırı ısınma sıcaklığı ve ORÇ çalışma akışkanının sistemin performansı üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Çalışmada, incelenen beş organik çalışma sıvısı arasında tasarlanan ORÇ sistemi için R245fa'nın en iyi performansı sergilediği belirlenmiştir. Ayrıca, ekserji açısından değerlendirildiğinde, PDMYH'nin sistemindeki en büyük ekserji kaybına sahip olduğu ortaya çıkmıştır

(Liu ve ark., 2020). Razmi ve arkadaşları yeni enerji üretimi ve yeşil hidrojen üretimi için parabolik oluk toplayıcı, proton elektrolit membranlı elektrolizör ve PDMYH'nin entegrasyonunu incelemişlerdir. Sinir ağı ve gri kurt algoritmalarının birleşimiyle yapılan hassasiyet analizi ve çok amaçlı optimizasyon, güneş ünitesinin en uygun çalışma sıvısını ve ideal koşullarını belirlemişlerdir. Çalışma sonucu, önerilen sistemin 9, 14.9 ve 20.1 MW güç üretme kapasitesine sahip olduğu ve optimal koşullarda %17.6 ekserji verimliliği ile 49.2 \$/saat maliyet oranına ulaştığı görülmüştür (Razmi ve ark., 2022). Taner, hidrojen yakıtlı bir PDM yakıt hücresinin farklı basınç, akış hızı ve voltaj değerlerinde enerji ve ekserji performansı araştırmıştır. Çalışmanın sonuçları, ekserji ve enerji verimliliğinin sırasıyla %50.4 ve %47.6 olduğunu ortaya koymuştur. Ayrıca, optimizasyon sonuçları, daha düşük su üretiminin, daha düşük PEM yakıt hücresi ömrü ile birlikte daha yüksek ekserji verimliliğine yol açtığını göstermiştir (Taner, 2018). Nasser ve Hassan yapmış olduğu çalışmada, atık ısıdan hidrojen üretimi için proton elektrolit membranı elektrolizörü ve katı oksit elektrolizör hücresi (KOEH) entegre edilen iki farklı hibrit sistem incelenmiştir. Her iki sistem de aynı enerji girişiyle çalışmakta olup, çimento atık ısılarının farklı sıcaklıklarında işlem yapılmıştır. PEM sistemi için atık ısı, Rankine döngüsünü çalıştırmak için kullanılırken, KOEH sistemi için bir kısmı elektrolizöre buhar sağlamak için kullanılmıştır. Parametreler belirlendikten sonra, her iki sistemin performansı (verimlilik, hidrojen üretim hızı, ekonomik faktörler ve CO₂ azaltımı) karşılaştırılmıştır. Çalışmanın sonuçları incelendiğinde, buharlı Rankine sisteminin daha yüksek performans gösterdiği, KOEH sisteminin ise PEM sistemine göre daha yüksek hidrojen üretim hızı ve verimliliği sağladığı göstermektedir. Entegre sistemlerin minimum hidrojen üretim maliyeti ve CO₂ azaltımı da değerlendirilmiştir, bu da yıllık 3077 ton CO₂ emisyonunun azaltılması anlamına gelmektedir (Nasser ve Hassan, 2023). Wang ve arkadaşları, enerji, ekserji, ekonomik ve ekserji-ekonomik açılarından incelenen yeni bir çoklu üretim sistemini önermişlerdir. Önerilen konfigürasyonda, atık ısı PDM yakıt hücreleri tarafından üretilirken, geri kazanılan ısı ORÇ ve bir sıvılaştırılmış doğal gaz (SDG) alt sistemi tarafından kullanılmıştır. Ayrıca, PDM yakıt hücreleri çıkış gücünü sağlarken, ORÇ ve SDG alt sistemi çıkış gücü ise trans-kritik CO₂ sıkıştırılmalı soğutma alt sistemi ve tuzdan arındırma ünitesine iletilmiştir. Hassasiyet analizi ile tasarım değişkenlerinin çıkış parametreleri üzerindeki etkisi değerlendirilmiş ve iki amaçlı optimizasyon sonuçları, ekserji verimliliği ve net bugünkü değer sırasıyla %22.67 ve 56.61 milyon dolar olduğu ortaya koyulmuştur. Önerilen sistem, optimum noktada 1214 kW güç, 1116 kW soğutma, 161.1 kW ısıtma ve 6 kg/s tatlı su sağlayabilmiştir (Wang ve ark., 2023). Sabbaghi ve arkadaşları, binalarının enerji ihtiyaçlarını karşılamak için yenilikçi bir çoklu üretim sistemi önerilmektedir. Bu sistem, PEME ve PEMFC'yi entegre ederek güneş ve biyokütle enerjileri ile çalışan bir güç, ısıtma ve soğutma sistemi sunar. TCO₂ çevriminde üretilen enerji, PEME aracılığıyla hidrojen üretmek için kullanılır ve bu hidrojen daha sonra PEMFC'de elektrik üretmek için tüketilir. PEME'nin hidrojen üretimindeki etkinliği ve PEMFC'nin bu hidrojeni elektriğe dönüştürmedeki performansı, sistemin enerji verimliliğini ve çevresel sürdürülebilirliğini artıran anahtar bileşenler olarak vurgulanmaktadır. Sonuçlar, bu sistemin yüksek

enerji verimliliği sağladığını ve özellikle PEMFC'nin, ekserji yıkımı açısından en büyük etkilerden birine sahip olduğunu göstermektedir (Sabbaghi ve ark., 2024). Rahimi ve arkadaşları, yenilenebilir enerji kaynaklarına dayalı bir hibrit enerji sistemi sunulmuştur ve bu sistem, hidrojen üretimi için optimize edilmiştir. PEME, sistemin hidrojen üretim kapasitesini artırmak için kilit rol oynamaktadır ve bu hidrojen daha sonra PEMFC aracılığıyla elektriğe dönüştürülmektedir. Termodinamik analizler, PEME ve PEMFC'nin entegrasyonunun sistem verimliliğini önemli ölçüde artırdığını göstermektedir. Ayrıca, çevresel analizler, bu teknolojilerin çevresel ayak izini azaltmada etkili olduğunu ve ekonomik analizler, uzun vadeli maliyet etkinliğini ortaya koymaktadır (Rahimi-Esbo ve ark., 2024). Ayrıca, Bedakhanian ve arkadaşları, şebeke dışı uygulamalar için PEME ve PEMFC'nin entegrasyonu ile güneş enerjisi tabanlı bir enerji sistemi incelenmiştir. PEME, sistemin enerji depolama kapasitesini artırmak için hidrojen üretiminde kullanılırken, PEMFC bu hidrojeni sürekli bir elektrik kaynağı olarak kullanmaktadır. Analizler, bu teknolojilerin enerji verimliliği ve ekonomik fizibilite üzerindeki olumlu etkilerini vurgulamakta ve özellikle off-grid (şebeke dışı) uygulamalarda enerji güvenliğini sağlamak için kritik öneme sahip olduklarını göstermektedir (Bedakhanian ve Assareh, 2024).

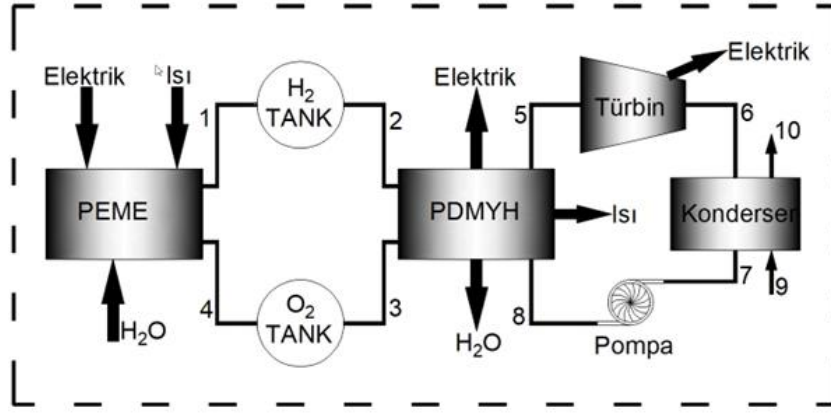
Literatür çalışmaları incelendiğinde PEME ile PDM'nin birlikte incelendiği ve bu sistemin atık ısı kaynaklı ORÇ çevriminden elektrik ürettiği çalışmalar mevcuttur. Ayrıca bu birleşenleri içinde barındıran çoklu üretim sistemleri de mevcuttur. Ancak PEME-PDM birleşimi özelinde ORÇ sisteminin elektriksel ve ekonomik katkılarını inceleyen çalışma sayısı oldukça kısıtlıdır. Bu amaçla bu çalışmada PEME-PDM birleşimi, ORÇ'li ve ORÇ'siz olarak elektriksel ve ekonomik olarak kıyaslanmıştır. Bu makalede parametrik bir çalışma gerçekleştirilmiştir. Parametre olarak şarj süresi, deşarj süresi, PEME hücre sayısı ve ORÇ evaporatör basıncı seçilmiştir. Bu parametrelere bağlı olarak PDMYH ve ORÇ'de elektrik üretimi, çevrim verimi ve ekonomik çıktılar incelenmiştir.

2. Materyal ve Metot

Çalışma kapsamında PEME, PDMYH ve ORÇ sistemi analiz edilmiştir. İlk olarak sistem tanıtımı yapılmaktadır.

2.1. Sistem Tanıtımı

Şekil 1'de PEME-PDMYH ve PEME-PDMYH-ORÇ sistemleri görülmektedir. Buna göre ilk olarak PEME-PDMYH sistemi incelendiğinde, PEME'ye ısı, elektrik ve H₂O girdisi sağlanır. Sonucunda H₂ ile O₂ elde edilir ve tankta depolanır. Bu sürecin tamamlanmasıyla sistemin şarj prosesi gerçekleşmiş olur. Sonrasında, elektrik ihtiyacı doğduğunda deşarj prosesi başlar. Depolanan H₂ ve O₂ kullanılarak PDMYH aracılığı ile elektrik üretimi gerçekleştirilir. Bu sırada ısı, elektrik ve H₂O açığa çıkar. Ayrıca çalışma kapsamında bu bileşenlere ORÇ eklenerek PDMYH'den elde edilen ısı ORÇ evaporatörüne bağlanılarak ek elektrik üretimi amaçlanmıştır.



Şekil 1. PEME-PDMYH VE ORÇ konfigürasyonu

3. Termodinamik Bağlımlar

Şekil 1’de görülen sistem üç ana bölüme ayrılmıştır. Bunlar; PEME, PDMYH ve ORÇ’ dir. İlk olarak PEME’ ye ait hesaplamalar aşağıdaki gibi gerçekleştirilmiştir.

3.1. PEME Termodinamik Bağlımları

Elektrolizörler, H₂O’yu H₂ ve O₂ olarak ayıran cihazlardır.

Bu işlemin gerçekleşmesi için elektrolizöre H₂O, ısı ve elektrik enerjisi girişi sağlanması gerekmektedir. Bu prosesi anlatan kimyasal reaksiyonlar aşağıdaki gibi olmaktadır (Marshall ve ark., 2007; Ni ve ark., 2008).



Bu reaksiyonlardan hareketle, PEME’ de üretilen toplam H₂ ve O₂ miktarının, ısı ve su girdisinin hesaplanabilmesi için toplam potansiyelin belirlenmesi gerekmektedir. Bu amaçla Eşitlik 4 kullanılarak toplam potansiyel hesaplanmıştır (Marshall ve ark., 2007).

$$V_e = V_{o,e} + V_{akt,a} + V_{akt,k} + V_{ohm} \quad (4)$$

Eşitlik 4’te görülen $V_{o,e}$, tersinir potansiyel, $V_{akt,a}$, anot aktivasyonu, $V_{akt,k}$, katot aktivasyonu ve V_{ohm} ohmik potansiyeldir. İlk olarak $V_{o,e}$ Eşitlik 5’te görüldüğü gibi hesaplanmıştır (Alirahmi ve ark., 2020).

$$V_{o,e} = 1,229 - (8,5 \times 10^{-4} (T_{PEME} - 298)) \quad (5)$$

Eşitlik 5’te görülen T_{PEME} , PEME sıcaklığını ifade etmektedir. Aktivasyon potansiyeli ise anot ve katot olmak üzere iki kısımda incelenmektedir. Her iki bölüm içinde hesaplama Eşitlik 6’da görüldüğü gerçekleştirilmiştir (Alirahmi ve ark., 2020).

$$V_{akt} = \frac{R_u T_{PEME}}{F} \ln \left[\left(\frac{J}{2J_o} \right) + \sqrt{\left(\left(\frac{J}{2J_o} \right)^2 + 1 \right)} \right] \quad (6)$$

Eşitlikte görülen R_u , universal gaz sabitini, F , Faraday sabitini, J , akım yoğunluğu temsil etmektedir. Eşitlik 6’da görülen J_o değişken akım yoğunluğu ifadesi aşağıdaki gibi tanımlanmıştır.

$$J_o = J^{ref} \exp \left(- \frac{E_{act}}{R_u T_{PEME}} \right) \quad (7)$$

Son olarak ohmik potansiyel aşağıda görülmektedir (Marshall ve ark., 2007; Ni ve ark., 2008).

$$V_{ohm} = J R_{PEME} \quad (8)$$

Eşitlik 8’de görülen R_{PEME} , PEME direnci ifadesi 80 °C deki PEME için $0,478 \times 10^{-5}$ olarak alınmıştır (Ni ve ark., 2008).

Bu hesaplamalar sonucunda elektrolizörde hidrojen üretimi için gerekli elektrik, H₂O miktarı ve buna bağlı olarak üretilen H₂ miktarı ve gerekli elektrik enerjisi aşağıdaki gibi hesaplanır (Alirahmi ve ark., 2020).

$$\dot{N}_{H_2, s\tilde{t}k\tilde{i}\tilde{s}} = \frac{J}{2F} = \dot{N}_{H_2 O, g\tilde{i}r\tilde{i}\tilde{s}} \quad (9)$$

$$E_{el} = JxV \quad (10)$$

Tablo 1. PEME’ye ait sabit parametre değerleri (Razmi ve ark., 2022)

Parametre	Değer
Anot Aktivasyon Enerjisi ($E_{act,a}$), kJ/mol	76
Katot Aktivasyon Enerjisi ($E_{act,k}$), kJ/mol	18
Faraday Sabiti (F), C/mol	96846
Membran Kalınlığı (D), µm	100
H ₂ ’nin kısmi basıncı (P_{H_2}), kPa	101,325
O ₂ ’nin kısmi basıncı (P_{H_2}), kPa	101,325
PEME sıcaklığı (T_{PEME}), °C	80
Anot için ön üstel faktör (J_a^{ref}), A/m ²	$1,7 \times 10^5$
Katot için ön üstel faktör (J_k^{ref}), A/m ²	$4,6 \times 10^3$
J, A/m ²	10000

3.2.PDMYH Termodinamik Bağıntıları

PDMYH, hidrojen ve oksijen kullanarak elektrik üreten cihazlardır. İşlem sonunda bir miktar ısı ve su açığa çıkar. Proses sırasında meydana gelen kimyasal reaksiyonlar aşağıdaki gibidir (Azad ve ark., 2022).



Bu reaksiyonlar sırasında kullanılan H_2 , O_2 miktarı, üretilen H_2O ve ısı miktarının, son olarak elektrik üretim miktarının belirlenebilmesi için yakıt hücresi potansiyeli aşağıdaki gibi hesaplanmıştır.

$$V_{FC} = E_{Nernst} - V_{akt} - V_{kon} - V_{ohm} \quad (14)$$

Eşitlikte görülen E_{Nernst} , maksimum Nernst voltajını, V_{akt} , aktivasyon kayıplarını, V_{kon} konsantrasyon kayıplarını ve V_{ohm} , ohmik kayıpları göstermektedir. İlk olarak E_{Nernst} ifadesi aşağıdaki gibi hesaplanmıştır (Saeed ve Warkozek, 2015).

$$E_{Nernst} = 1,229 - (0,85 \times 10^{-3} (T_{YH} - 298,15)) + \left(\frac{R_u T_{YH}}{NF} \left(\ln \frac{P_{O_2}^{0,5} P_{H_2}}{P_{H_2O}} \right) \right) \quad (15)$$

Eşitlikte görülen T_{YH} , yakıt hücresi sıcaklığını, R_u , universal gaz sabitini, N , yakıt hücresi sayısını, F , Faraday sabitini, P_{O_2} , oksijen kısmi basıncını, P_{H_2} , hidrojen kısmi basıncını, P_{H_2O} suyun kısmi basıncını göstermektedir. PDMYH'de meydana gelen aktivasyon kayıpları aşağıdaki gibi tanımlanmıştır (Sarma ve Ganguly, 2018; Keshavarzzadeh ve ark., 2019).

$$V_{akt} = 0,948 - \xi - (0,000076 T_{YH} \ln(C_{O_2})) + (0,000193 T_{YH} \ln(I_{YH})) \quad (16)$$

Eşitlikte görülen C_{O_2} oksijen konsantrasyonunu ve I_{YH} yakıt hücresi akım yoğunluğunu göstermektedir. Eşitlik 16'da görülen ξ ifadesi aşağıdaki gibi tanımlanmıştır (Sarma ve Ganguly, 2018; Keshavarzzadeh ve ark., 2019).

$$\xi = 4,38386 + 0,0002 \ln(A_{YH}) - 5 \ln(C_{H_2}) \quad (17)$$

Eşitlik 17'de görülen A_{YH} , yakıt hücresi alanını, C_{H_2} , hidrojen konsantrasyonunu göstermektedir. Eşitlik 16 ve 17'de görülen I_{YH} , C_{O_2} ve C_{H_2} ifadeleri ise Eşitlik 18,19 ve 20'de görülmektedir (Sarma ve Ganguly, 2018; Keshavarzzadeh ve ark., 2019).

$$I_{FC} = iA_{FC} \quad (18)$$

$$C_{O_2} = \frac{P_{O_2}}{5,08 \times 10^6 \exp\left(\frac{-498}{T_{YH}}\right)} \quad (19)$$

$$C_{H_2} = 9,174 \times 10^{-7} \exp\left(-\frac{77}{T_{YH}}\right) \quad (20)$$

Eşitlik 19' da görülen P_{O_2} , oksijenin kısmi basıncını göstermektedir. Eşitlik 21'de konsantrasyon kayıpları görülmektedir (Chitsaz ve ark., 2019).

$$V_{kon} = \frac{R_u T_{YH}}{nF} \exp\left(-\frac{i_l}{i_l - i}\right) \quad (21)$$

Eşitlik 21'de görülen i_l maksimum akım yoğunluğunu göstermektedir. Son olarak ohmik kayıplar aşağıdaki gibi hesaplanır (Zhao ve ark., 2012; Baniasadi ve ark., 2017).

$$V_{ohm} = I_{YH}(R_m + R_c) \quad (22)$$

Eşitlik 22'de görülen R_c ve R_m sırasıyla sabit ve iç hücre direncini göstermektedir. R_m ifadesi aşağıdaki gibi tanımlanmıştır.

$$R_m = \frac{\rho_m l_m}{A_{YH}} \quad (23)$$

Eşitlikte görülen l_m , membran kalınlığıdır. ρ_m , hidratlanmış protonların akışına karşı membrana özgü dirençtir ve aşağıdaki gibi tanımlanmıştır.

$$\rho_m = \frac{181,6 \left(1 + 0,03 \left(\frac{i_{YH}}{A_{YH}} \right) + \left(0,062 \left(\frac{T_{YH}}{303} \right)^2 \left(\frac{i_{YH}}{A_{FC}} \right)^{2,5} \right) \right)}{\left(\psi - 0,6343 - \frac{3i_{YH}}{A_{YH}} \right) \exp\left(\frac{4,18(T_{YH}-303)}{T_{YH}}\right)} \quad (24)$$

Eşitlik 24'te görülen ψ ampirik bir sabittir. Yakıt hücresinden elde edilen elektrik çıktısı aşağıdaki gibi hesaplanmıştır.

$$W_{YH} = N_{hüc} V_{FC} I \quad (25)$$

Eşitlik 25'te görülen $N_{hüc}$, PDM hücre sayısını göstermektedir. Ayrıca süreçte kullanılan hidrojen, azot ve oksijen miktarları ve süreç sonunda ortaya çıkan su miktarları aşağıdaki gibi hesaplanmıştır (Chitsaz ve ark., 2019).

$$\dot{n}_{H_2,gir} = \frac{Z_z}{U_F} \quad (26)$$

$$\dot{n}_{H_2,çık} = \dot{n}_{H_2,gir} - Z_z \quad (27)$$

$$\dot{n}_{H_2,kul} = \dot{n}_{H_2,gir} - \dot{n}_{H_2,çık} \quad (28)$$

$$\dot{n}_{O_2,gir} = \frac{Z_z}{2U_o} \quad (29)$$

$$\dot{n}_{O_2,out} = \dot{n}_{O_2,in} - \frac{Z_z}{2} \quad (30)$$

$$\dot{n}_{N_2,in} = \dot{n}_{O_2,out} = \frac{79}{21} \dot{n}_{O_2,in} \quad (31)$$

$$Z = \frac{N_{hüc} i_{AFC}}{2F} \quad (32)$$

$$\dot{n}_{H_2O,üretilen} = N_{hüc} \frac{I}{2F} \quad (33)$$

Eşitliklerde görülen Z_z PDMYH'nin molar dönüşüm oranını, U_F ve U_o sırasıyla yakıt ve kullanım oranıdır. Yakıt hücresinde oluşan kimyasal reaksiyon sonucunda bir miktar ısıda açığa çıkmaktadır. Oluşan ısının belirlenebilmesi için Eşitlik 34'te görülen enerji korunum denklemi kullanılmıştır.

$$\dot{Q}_{net} = \dot{Q}_{ch} - W_{YH} - \dot{Q}_{sl} \quad (34)$$

Eşitlik 34'te görülen \dot{Q}_{ch} , kimyasal enerji üretimi, \dot{Q}_{sl} , gizli enerjiyi ve W_{YH} yakıt hücresinden elde edilen elektriksel gücü ifade etmektedir. Eşitlikte görülen \dot{Q}_{ch} ve \dot{Q}_{sl} ifadeleri aşağıdaki gibi tanımlanmıştır.

$$\dot{Q}_{ch} = \dot{n}_{H_2,kul} x HHV \quad (35)$$

$$\begin{aligned} \dot{Q}_{sl} = & C p_{H_2} (\dot{n}_{H_2,çık} T_{YH} - \dot{n}_{H_2,gir} T_o) + C p_{O_2} (\dot{n}_{O_2,çık} T_{YH} - \dot{n}_{O_2,gir} T_o) \\ & + C p_{N_2} (\dot{n}_{N_2,çık} T_{YH} - \dot{n}_{N_2,gir} T_o) + C p_{H_2O} \dot{n}_{H_2O,çık} (T_{YH} - T_o) \\ & + \dot{n}_{H_2O,ür} H_v \end{aligned} \quad (36)$$

Tablo 2. PDMYH'ye ait sabit parametre değerleri (Razmi ve ark., 2022)

Parametre	Değer
Sabit Direnç değeri (R_c), Ω	0,0003
Ampirik sabit (ψ)	22
Suyun Buharlaşma ısısı (H_v), J/mol	40644
Yakıt Kullanım Faktörü (U_f)	0,85
H_2 'nin üst ısı değeri (HHV_{H_2}), kJ/mol	285,55
Limitli akım yoğunluğu (I_{FC}), A/cm ²	1,5
Membran kalınlığı (l_m), cm	0,0178
Elektron sayısı (n)	2
PDMFC çalışma sıcaklığı (T_{YH}), °C	85
PDMFC yüzey alanı (A_{PEMYH}), cm ²	232
H_2 özgül ısısı ($C p_{H_2}$), J/mol°C	28,86
N_2 özgül ısısı ($C p_{H_2}$), J/mol°C	28,39
O_2 özgül ısısı ($C p_{H_2}$), J/mol°C	29,72
H_2O özgül ısısı ($C p_{H_2}$), J/mol°C	75,95
Universal Gaz Sabiti (R_u), kJ/kmol	8,314

Eşitliklerde görülen $Cp_{H_2}, Cp_{O_2}, Cp_{N_2}$ ve Cp_{H_2O} sırasıyla oksijen, hidrojen, su ve nitrojenin spesifik ısı kapasitesini ve h_v , suyun buharlaşma ısısını gösterir. Yakıt hücresi verimi Eşitlik 37’de görüldüğü gibi hesaplanmıştır.

$$n_{YH} = \frac{W_{FC}}{\dot{n}_{H_2, kul} \times HHV} \quad (37)$$

3.3. ORÇ Termodinamik Bağlılıkları

Bu bölümde PDMYH’den elde edilen ısı kaynaklı ORÇ’den elde edilen elektrik miktarının hesaplanması amaçlanmıştır. Bilindiği üzere bir Rankine çevrimi evaporatör, kondenser, türbin ve pompa bileşenlerinden oluşmaktadır. Tablo 3’te her bir bileşene ait termodinamik bağıntılar görülmektedir.

Tablo 3. ORÇ’ ye ait bileşenlerin enerji eşitlikleri (Kurşun ve Ökten, 2019)

Birleşen	Enerji Eşitlikleri	
EVA(PDMFC)	$\dot{Q}_{net} = \dot{m}_{ORÇ}(h_8 - h_5)$	(38)
Türbin	$\dot{W}_T = \dot{m}_{ORÇ}(h_6 - h_5)$	(39)
Kondenser	$\dot{m}_{ORC}(h_6 - h_7) = \dot{m}_w(h_{10} - h_9)$	(40)
Pompa	$\dot{W}_p = \dot{m}_{ORÇ}(h_8 - h_7)$	(41)

Çalışmada ORÇ iş akışkanı olarak çevreye olan zararlı etkilerinin düşük olması ve yüksek performans sağlaması sebepleri ile R1233zd kullanılmıştır (Hassan ve ark., 2020). ORÇ çevriminde kullanılan sabit ifadeler aşağıdaki tabloda görülmektedir. Burada hesaplamalar yapılırken PDMYH’den elde edilen ısı kaynağı 80 °C olduğundan ve sıcaklık farkımız 5 °C olduğundan Şekil 1’de görülen T_5 sıcaklığı 75 °C olarak elde edilmiş ve Tablo 4’te görüldüğü gibi T_8 sıcaklığı 40 °C olarak seçildiğinden ORÇ çevrimi kütleli debisi Eşitlik 38’den kolaylıkla belirlenebilmektedir. Parametrelere bağlı olarak PDMYH den elde edilen ısı miktarı değişeceğinden ORÇ kütleli debisi değişiklik göstermektedir.

Tablo 4. ORÇ’ ye ait sabit değerler (Kurşun ve Ökten, 2019)

Parametre	Değer
Türbin verimi (η_T)	0,85
Pompa verimi (η_p)	0,7
Jeneratör verimi (η_j)	0,98
EVA ve KON minimum sıcaklık farkı (°C)	5
T_8 (°C)	40
T_9 (°C)(su)	20

PEME, PDMFC ve ORÇ termodinamik bağıntıları yukarıda incelenmiştir. Performans kriteri olarak incelenen çevrim verimi aşağıdaki gibi hesaplanmıştır. Hem ORÇ'li hem ORÇ'siz sistemler için çevrim verimleri aşağıdaki gibi hesaplanmıştır.

$$\eta_{\text{çv,ORÇsiz}} = \frac{W_{PEMYH}}{W_{PEME}} \quad (42)$$

$$\eta_{\text{çv,ORÇli}} = \frac{W_{PEMYH} + W_T}{W_{PEME}} \quad (43)$$

3.4. Ekonomik Model

Ekonomik modelin oluşturulmasında elektrik üretim sistemleri için ekonomik analiz göstergesi olarak yaygın kullanılan seviyelendirilmiş elektrik maliyeti (SEM) kullanılmıştır. SEM aşağıda verilen denklem ile bulunmuştur (Ayou ve Evely, 2020).

$$SEM = \frac{M_{top} + \sum_{i=1}^{i_0} \frac{M_{yillik}}{(1+r)^i}}{\sum_{i=1}^{i_0} \frac{M_{net,yillik}}{(1+r)^i}} \quad (44)$$

Denklemden M_{top} sistem bileşenlerinin toplam yatırım maliyetini, M_{yillik} yıllık maliyetleri, $\dot{W}_{net,yillik}$ yıllık üretilen hidrojen miktarını, i_0 işletme ömrünü ve r faiz oranını ifade etmektedir. İşletme ömrü 30 yıl ve faiz oranı %5 olarak hesaplamalara dahil edilmiştir. Yıllık maliyetler ise Eşitlik 45 ile hesaplanmıştır.

$$M_{yillik} = M_{BO} + (BF_{elektrik} \cdot \dot{W}_{PEM,yillik}) \quad (45)$$

Burada M_{BO} yıllık bakım onarım maliyetidir ve toplam maliyetin %1.5'i olarak alınmıştır. $BF_{elektrik}$ elektriğin birim fiyatıdır ve 0.05 \$/kWh alınmıştır. $\dot{W}_{PEM,yillik}$ ise PEM'e yıllık verilen toplam elektrik enerjisidir. Sistem bileşenlerinin toplam yatırım maliyetlerinin bulunmasında Tablo 5'de verilen maliyet fonksiyonlarından faydalanılmıştır.

Tablo 5. Sistem Bileşenlerinin Maliyet Fonksiyonları

Bileşen	Maliyet Fonksiyonları (M)*	Referans Yılı	Referans
Pompa	$1120(\dot{W}_{pompa})^{0,8}$	2005	(Ayou ve Evely, 2020)
Isı Değiştiricileri (ID)	$2143A_{ID}^{0,514}$	1986	(Ayou ve Evely, 2020)
Elektrik Jeneratörü	$10^7(\dot{W}_j/1,6 \times 10^5)^{0,7}$	1998	(Ayou ve Evely, 2020)
Türbin	$4405(\dot{W}_{türbin})^{0,8}$	2005	(Ayou ve Evely, 2020)
H ₂ ve O ₂ Tankları	$575\$/kg(H_2 \text{ yada } O_2)$	2015	(Razmi ve ark., 2022)
PEME	$1000\$/kW$	2009	(Razmi ve ark., 2022)
PDMYH	$2500\$/kW$	2009	(Razmi ve ark., 2022)

* \dot{W} (kW) ve A (m²)

Tablo 5’de görüldüğü gibi sistem bileşenlerinin maliyetleri farklı yıllar için geçerlidir. SEM’in hesaplanmasında tüm maliyet fonksiyonlarının aynı yıl için değerlendirilmesi ekonomik modelin daha gerçekçi sonuçlar vermesini sağlamaktadır. Bu nedenle SEM hesaplanırken sistem bileşenlerinin maliyetleri $CEPCI_{2021}$ indikatörü kullanılarak 2021 yılı maliyetlerine uyarlanmıştır. $CEPCI_{2021}$ baz alınarak maliyetlerin uyarlanmasında kullanılan eşitlik aşağıda verilmiştir (Ayou ve Evely, 2020).

$$M_{bileşen} = M_{ref.yılı} (CEPCI_{2021} / CEPCI_{ref.yılı}); M_{top} = \sum M_{bileşen} \quad (46)$$

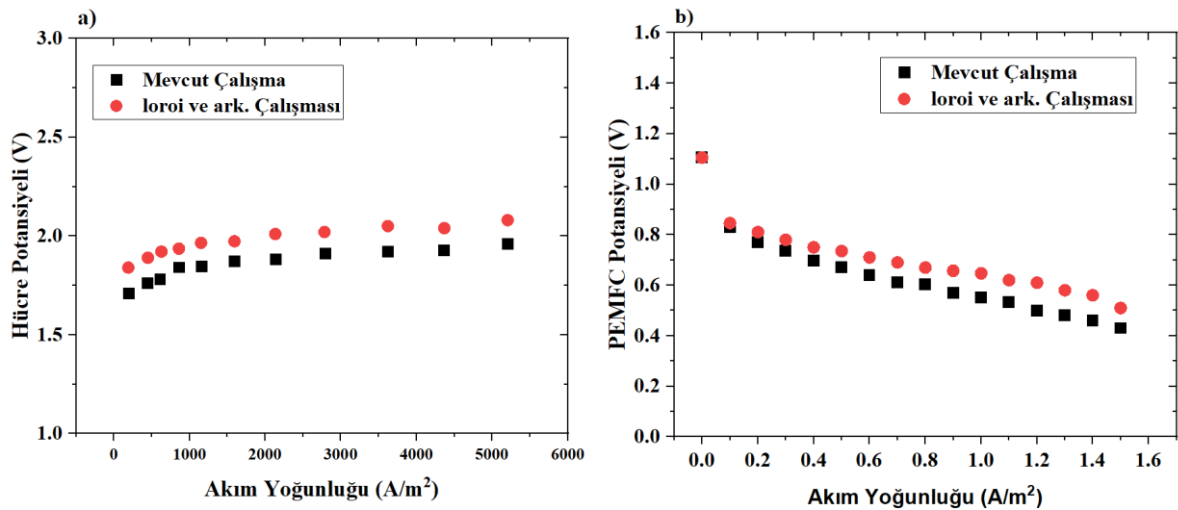
Burada $M_{ref.yılı}$ her bir bileşenin Tablo 5’de verilen referans yıla göre maliyetini ve $CEPCI_{ref.yılı}$ ise Tablo 5’de verilen referans yılları için geçerli CEPCI değerlerini ifade etmektedir.

4. Bulgular ve Tartışma

Bu bölümde matematiksel model ile elde edilen sonuçların PEME, PDMFC ve ORÇ için doğrulaması gerçekleştirilmiş ve sonrasında sistem çıktıları detaylı olarak incelenmiştir. Öncelikli olarak sistemlerin ayrı ayrı doğrulaması gerçekleştirilmiştir.

4.1. Sistem Doğrulaması

Bu bölümde ilk olarak Şekil 2’de görüldüğü gibi PEME ve PDMFC için kullanılan teorik model ile literatürde yapılan çalışma karşılaştırılmıştır. Doğrulama için Ioroi ve ark. yapmış olduğu deneysel çalışma kullanılmıştır (Ioroi ve ark., 2002). Kıyaslama sonuçları incelendiğinde PEME için ortalama %6, PDMFC için ortalama %10 sapmalar olduğu belirlenmiştir. Bu sonuçlar teorik modellerin parametrik çalışma için kullanılabilir olduğunu göstermektedir.



Şekil 2. PEME-PDMFC için Teorik Model ve Literatür Çalışması Kıyaslanması

İkinci olarak Tablo 6’da R245fa iş akışkanı için oluşturulan teorik ORÇ modeli ile literatür çalışmasından elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır (Kosmadakis ve ark., 2011). Tablo incelendiğinde

simülasyon ve literatürden elde edilen değerlerin birbirine oldukça yakın olduğu görülmektedir. Bu nedenle ORÇ modelinin de parametrik çalışmalarda kullanılabileceği anlaşılmaktadır.

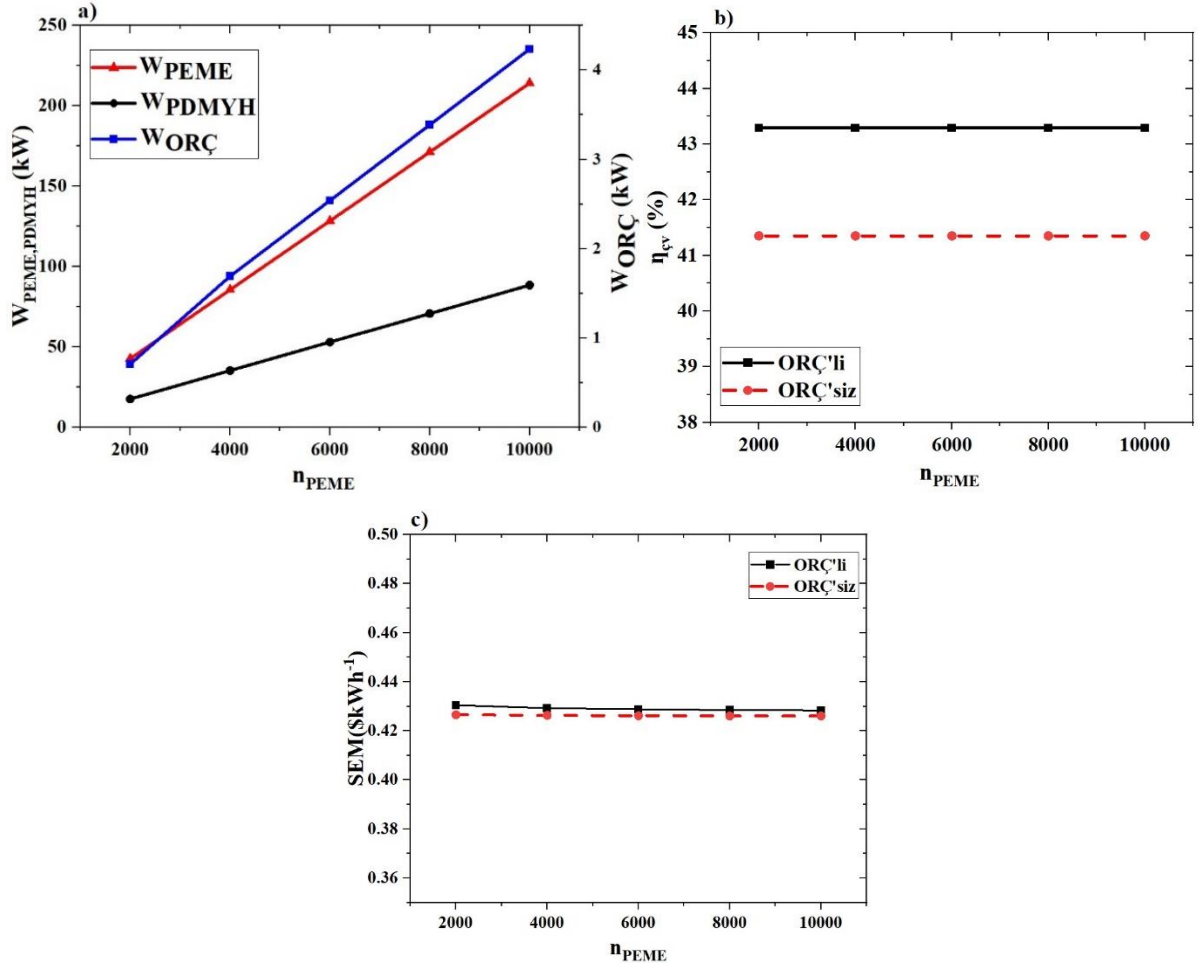
Tablo 6. ORÇ için teorik model ve literatür çalışması kıyaslanması

No	Faz	Sıcaklık (°C)	Basınç (bar)	Entalpi (kJ/kg)		Entropi (kJ/kgK)	
				Simülasyon	Ref.(Kosmadakis ve ark., 2011)	Simülasyon	Ref.(Kosmadakis ve ark., 2011)
5	Doymuş Buhar	90	10,044	468,2	470,48	1,135	1,1372
6	Kızgın Buhar	49	1,7904	444,8	444,501	1,812	1,8137
7	Doymuş Sıvı	30	1,7904	239,1	239,6	1,135	1,1372
8	Sıkıştırılmış sıvı	30,4	10,044	239,9	239,6	1,135	1,1372

4.2. Parametrik Analiz

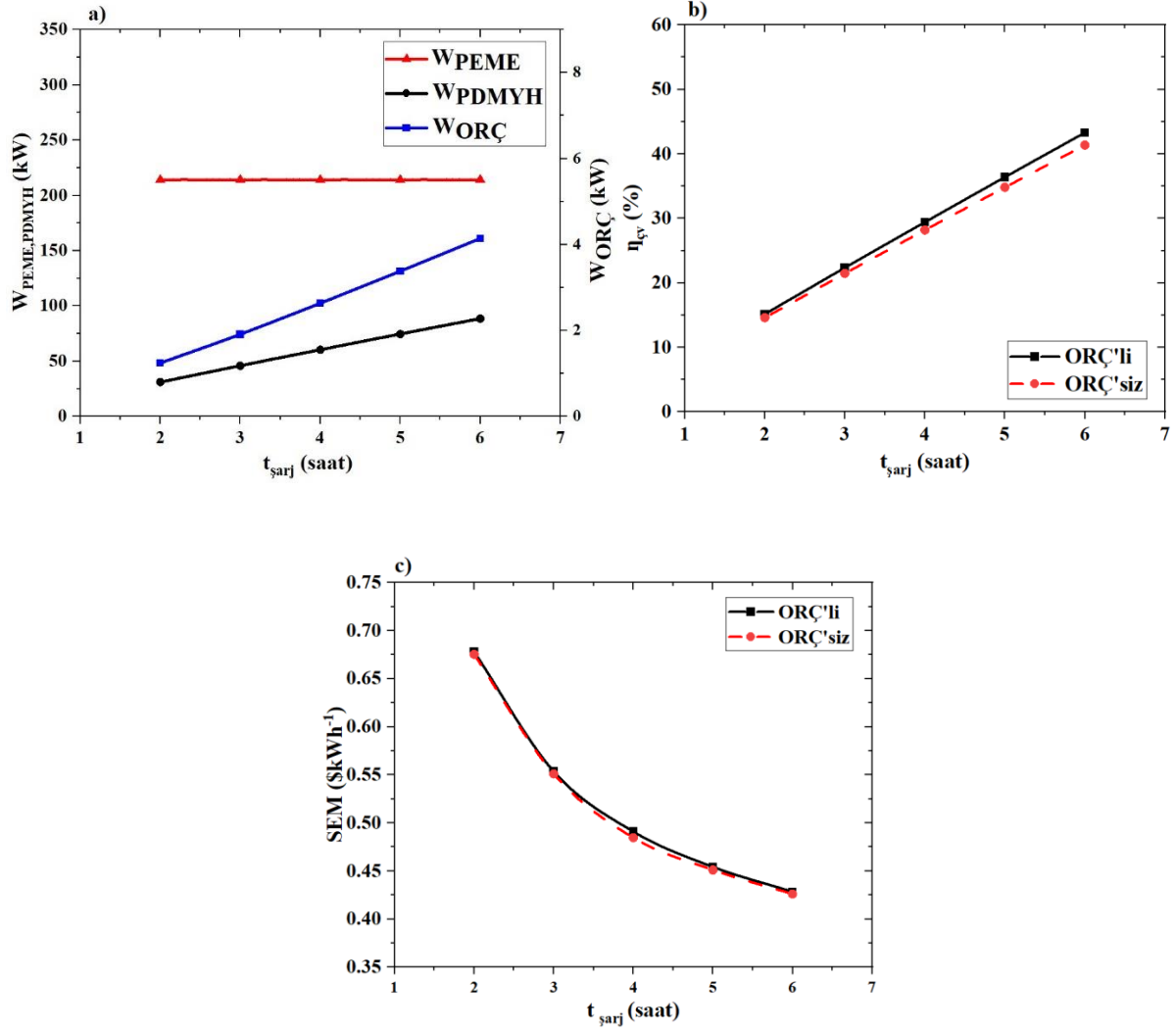
Bu bölümde PEME/PDMYH ve PEME/PDMYH/ORÇ sistemlerinin çıktıları kıyaslamalı olarak incelenmiştir. İnceleme için gerçekleştirilen parametrik çalışmada PEME hücre sayısı, şarj, deşarj süresi ve ORÇ'nin evaporatör basıncı değerleri değişken olarak kabul edilmiş ve çalışma çıktısı olarak ise PEME elektrik tüketimi, PDMYH ve ORÇ'nin elektrik üretimi, çevrim verimi ve seviyelendirilmiş elektrik maliyeti ifadeleri kullanılmıştır. Aşağıda gerçekleştirilecek olan incelemede üç farklı tür grafik kullanılmıştır. a, olarak sınıflandırılan bölümde PEME' de tüketilen elektrik miktarı, PDMYH ve ORÇ' de üretilen elektrik miktarı görülmektedir. b, olarak sınıflandırılan ORÇ'li ve ORÇ'siz sistemlerin çevrim verimleri ve son olarak c, olarak sınıflandırılan bölümde ORÇ'li ve ORÇ'siz sistemlerin seviyelendirilmiş elektrik maliyeti incelenmiştir. İlk bölümde görülen ORÇ'den elde edilen elektriğin sadece ORÇ'li sistemler için geçerli olduğu unutulmamalıdır.

Şekil 3'te PEME hücre sayısına bağlı olarak sistem çıktılarındaki değişimler görülmektedir. Şekil 3a incelendiğinde PEME hücresi sayısının artışının, PEME' de tüketilen, PDMYH ve ORÇ'de üretilen elektrik miktarını lineer olarak artırdığı görülmektedir. PDMYH ve ORÇ'den elde edilen elektrik miktarı karşılaştırıldığında ORÇ'den elde edilen elektriğin PDMYH' den elde edilen elektriğin ortalama %6'sı kadar olduğu belirlenmiştir. Ayrıca sisteme ORÇ entegre etmenin çevrim verimini %2 seviyelerinde artırmış olduğu saptanan bir diğer durumdur. Seviyelendirilmiş elektrik maliyetine (SEM) bakıldığında ise ORÇ'li ve ve ORÇ 'siz sistemlerin birbirine çok yakın değerler aldığı görülmektedir.



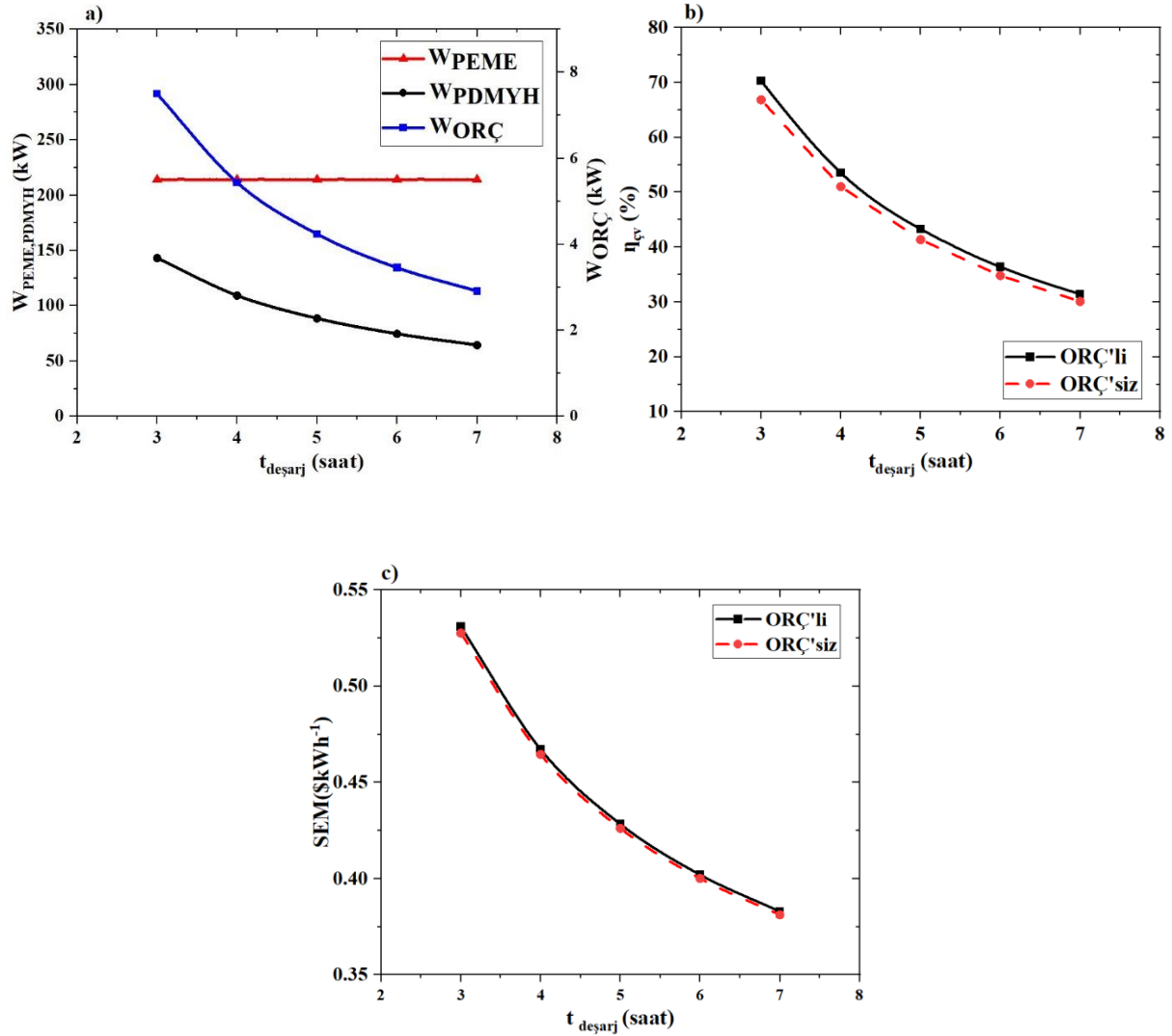
Şekil 3. PEME hücre sayısına Bağlı a) W_{PEME} , W_{PDMYH} , $W_{ORÇ}$ b) η_{cv} c) SEM Değerleri

Şekil 4 ve Şekil 5'te şarj ve deşarj süresine bağlı olarak sistem çıktıları görülmektedir. Her iki parametre değişimi de yalnızca PDMYH akım yoğunluğunu değiştireceğinden, bu durum sadece PDMYH ve ORÇ sistemleri çıktıları üzerinde etkili olmuştur. Öncelikle Şekil 4'te şarj süresine bağlı olarak sistem çıktıları görülmektedir. Buna göre şarj süresinin 2 saatten 6 saate artmasıyla PDMYH ve ORÇ' den elde edilen elektrik üretimi yaklaşık 2 kat artmıştır. Çevrim verimine bakıldığında ise ORÇ'li ve ORÇ'siz sistemleri arasındaki ortalama farkın %1 olduğu görülmüştür. Ayrıca bu iki sistemin SEM değerleri arasında önemli bir fark olmadığı da saptanan bir diğer durumdur.



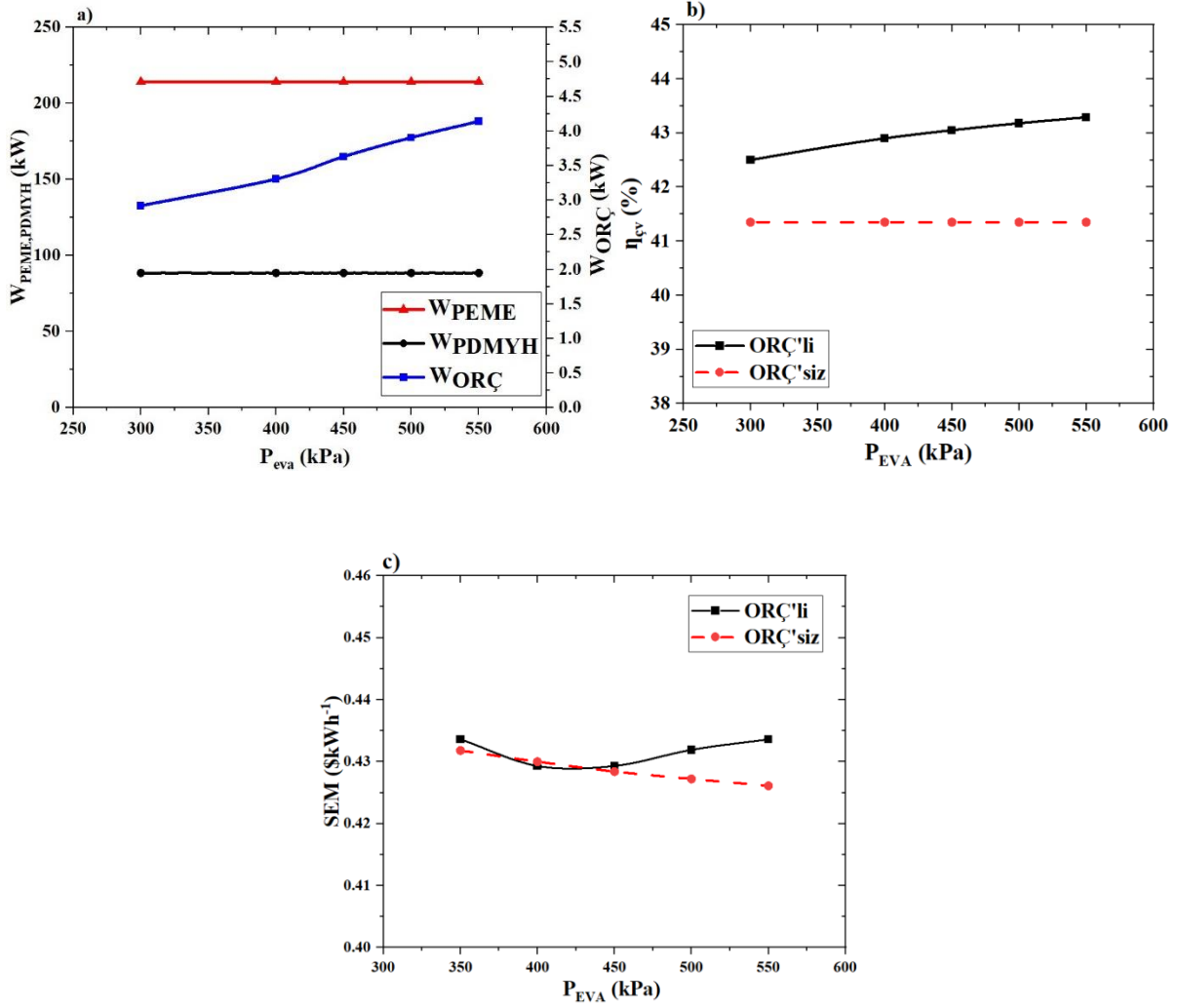
Şekil 4. $t_{şarj}$ Süresine Bağlı a) W_{PEME} , W_{PDMYH} , $W_{ORÇ}$ b) $\eta_{şv}$ c) SEM Değerleri

Şekil 5' te deşarj süresine bağlı sistem çıktıları görülmektedir. Şarj süresinin aksine, deşarj süresi artışı, elektrik üretimini ve çevrim verimini düşürmüştür. Buna göre deşarj süresinin artması ile PDMYH'de üretilen elektrik yaklaşık yarıya düşerken, ORÇ'de üretilen elektrik 3 kat azalmıştır. Çevrim verimine bakıldığında ise ORÇ' li sistemin verimi ortalama %2 artırdığı belirlenmiştir. Diğer parametrelere paralel olarak, SEM değerleri incelendiğinde hem ORÇ'li hem ORÇ'siz sistemlerde benzer değerler elde edilmiştir.



Şekil 5. $t_{deşarj}$ Süresine Bağlı a) W_{PEME} , W_{PDMYH} , $W_{ORÇ}$ b) η_{gv} c) SEM Değerleri

Son olarak Şekil 6'da evaporatör basıncına bağlı olarak sonuçlar görülmektedir. Evaporatör basıncındaki değişim yalnızca ORÇ'nin elektrik üretimini değiştirdiğinden diğer sonuçlarda değişiklik görülmemiştir. Şekil 6a incelendiğinde evaporatör basıncının artışı ile ORÇ'den elde edilen elektrik P_{eva} 'nın maksimum ve minimum değerleri arasında, 1,7 kat artış göstermiştir. Buna bağlı olarak çevrim verimi de ORÇ kullanımı ile % 2-2,5 aralığında artmıştır. SEM değerinde ise her iki sistem 450 kPa evaporatör verimine kadar benzer değerler alırken, 450 kPa değerinden sonra ORÇ li sistem 0,07-0,12 $\$/kWh$ aralığında artış göstermiştir.



Şekil 6. P_{EVA} Süresine Bağlı a) W_{PEME} , W_{PDMYH} , $W_{ORÇ}$ b) η_{ev} c) SEM Değerleri

5.Sonuçlar

Bu çalışmada temiz enerji olan hidrojen ile elektrik üretimi prosesi çıktıları ve ekonomik değerlendirilmesi yapılmıştır. Bu inceleme için PEME ve PDMYH bileşenleri kullanılmıştır. Ek olarak bu elektrik üretim sistemine, PDMYH'den elde edilen ısıyı kullanan bir ORÇ eklenerek sistem çıktıları incelenmiştir. Bu değerlendirme için sistem çıktıları olarak W_{PEME} , W_{PDMYH} , $W_{ORÇ}$, η_{ev} ve SEM değerleri seçilmiştir. Bu parametreler ışığında elde edilen en önemli sonuçlar aşağıda sıralanmıştır.

- Oluşturulan teorik model doğrulanarak, bu modelin PEME-PDMYH-ORÇ için kullanılabilirliği ortaya konmuştur.
- Bu çalışmada kullanılan parametreler arasında en etken olanın PEME hücre sayısı olduğu ortaya çıkmıştır. Buna göre PDMYH ve ORÇ de üretilen elektrik üretimi yaklaşık 3 kat artarken, elektrolizördeki hidrojen üretimi yaklaşık 4 kat artmıştır.
- ORÇ kullanımı ile çevrim veriminde yaklaşık olarak %1-2,5 oranında artış görülmüştür.

- SEM değerlerine bakıldığında ise parametre değişimine bağlı ORÇ'li ve ORÇ'siz sistemlerde birbirine çok yakın sonuçlar elde edildiği anlaşılmıştır. Bu durum her ne kadar ORÇ kullanımının, maliyeti önemli ölçüde düşürmediğini gösterse de toplam elektrik üretimini artırması sebebiyle önemli katkı sağlamıştır.

Kaynaklar

- Alirahmi SM., Rostami M., Farajollahi AH. Multi-criteria design optimization and thermodynamic analysis of a novel multi-generation energy system for hydrogen, cooling, heating, power, and freshwater. *International Journal of Hydrogen Energy* 2020; 45(30): 15047-15062.
- Ayou DS., Eveloy V. Energy, exergy and exergoeconomic analysis of an ultra low-grade heat-driven ammonia-water combined absorption power-cooling cycle for district space cooling, sub-zero refrigeration, power and LNG regasification. *Energy Conversion and Management* 2020; 213(112790): 1-25.
- Azad A., Fakhari I., Ahmadi P., Javani N. Analysis and optimization of a fuel cell integrated with series two-stage organic Rankine cycle with zeotropic mixtures. *International Journal of Hydrogen Energy* 2022; 47(5): 3449-3472.
- Baniasadi E., Toghyani S., Afshari E. Exergetic and exergoeconomic evaluation of a trigeneration system based on natural gas-PEM fuel cell. *International Journal of Hydrogen Energy* 2017; 42(8): 5327-5339.
- Bedakhanian A., Assareh E. Exploring an innovative approach to hydrogen generation for fuel cell energy production by integrating a dual organic Rankine system with an absorption chiller powered by geothermal energy. *Energy Nexus* 2024;13(100267): 1-19.
- Chen X., Chen L., Guo J., Chen J. An available method exploiting the waste heat in a proton exchange membrane fuel cell system. *International Journal of Hydrogen Energy* 2011; 36(10): 6099-6104.
- Chitsaz A., Haghghi MA., Hosseinpour J. Thermodynamic and exergoeconomic analyses of a proton exchange membrane fuel cell (PEMFC) system and the feasibility evaluation of integrating with a proton exchange membrane electrolyzer (PEME). *Energy Conversion and Management* 2019; 186: 487-499.
- Hassan AH., O'Donoghue L., Sánchez-Canales V., Corberán JM., Payá J., Jockenhöfer H. Thermodynamic analysis of high-temperature pumped thermal energy storage systems: Refrigerant selection, performance and limitations. *Energy Reports* 2020; 6: 147-159.
- Ioroi T., Yasuda K., Siroma Z., Fujiwara N., Miyazaki Y. Thin film electrocatalyst layer for unitized regenerative polymer electrolyte fuel cells. *Journal of Power Sources* 2002; 112(2): 583-587.
- Keshavarzadeh AH., Ahmadi P., Safaei MR. Assessment and optimization of an integrated energy system with electrolysis and fuel cells for electricity, cooling and hydrogen production using

- various optimization techniques. *International Journal of Hydrogen Energy* 2019; 44(39): 21379-21396.
- Kosmadakis G., Manolakos D., Papadakis G. Simulation and economic analysis of a CPV/thermal system coupled with an organic Rankine cycle for increased power generation. *Solar Energy* 2011; 85(2): 308-324.
- Kunusch C., Puleston P., Mayosky M. Sliding-mode control of PEM fuel cells. Springer Science ve Business Media 2012.
- Kurşun B., Ökten K. Thermodynamic analysis of a Rankine cycle coupled with a concentrated photovoltaic thermal system for hydrogen production by a proton exchange membrane electrolyzer plant. *International Journal of Hydrogen Energy* 2019; 44(41): 22863-22875.
- Larminie J., Dicks A. Fuel cell systems explained. John Wiley 2003; 3: 61-69.
- Liu G., Qin Y., Wang J., Liu C., Yin Y., Zhao J., Yin Y., Zhang J., Otoo ON. Thermodynamic modeling and analysis of a novel PEMFC-ORC combined power system. *Energy Conversion and Management* 2020; 217(112998): 1-25.
- Mahabunphachai S., Cora ÖN., Koç M. Effect of manufacturing processes on formability and surface topography of proton exchange membrane fuel cell metallic bipolar plates. *Journal of Power Sources* 2010; 195(16): 5269-5277.
- Marshall A., Børresen B., Hagen G., Tsypkin M., Tunold R. Hydrogen production by advanced proton exchange membrane (PEM) water electrolyzers-Reduced energy consumption by improved electrocatalysis. *Energy* 2007; 32(4): 431-436.
- Midilli A., Ay M., Dincer I., Rosen MA. On hydrogen and hydrogen energy strategies: I: current status and needs. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2005; 9(3): 255-271.
- Momirlan M., Veziroglu TN. The properties of hydrogen as fuel tomorrow in sustainable energy system for a cleaner planet. *International Journal of Hydrogen Energy* 2005; 30(7): 795-802.
- Nasser M., Hassan H. Assessment of hydrogen production from waste heat using hybrid systems of Rankine cycle with proton exchange membrane/solid oxide electrolyzer. *International Journal of Hydrogen Energy* 2023; 48(20): 7135-7153.
- Nel WP., Cooper CJ. Implications of fossil fuel constraints on economic growth and global warming. *Energy Policy* 2009; 37(1): 166-180.
- Ni M., Leung MK., Leung DY. Energy and exergy analysis of hydrogen production by a proton exchange membrane (PEM) electrolyzer plant. *Energy Conversion and Management* 2008; 49(10): 2748-2756.
- Ozen DN., Timurkutluk B., Altinisik K. Effects of operation temperature and reactant gas humidity levels on performance of PEM fuel cells. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2016; 59: 1298-1306.

- Rahimi-Esbo M., Firouzjaee MR., Farahabadi HB., Alizadeh E. Performance investigation of a standalone renewable energy system using response surface methodology (RSM): 4E analysis and multi-objective optimization. *Energy Conversion and Management* 2024; 299(117752): 1-15.
- Razmi AR., Alirahmi SM., Nabat MH., Assareh E., Shahbakhti M. A green hydrogen energy storage concept based on parabolic trough collector and proton exchange membrane electrolyzer/fuel cell: thermodynamic and exergoeconomic analyses with multi-objective optimization. *International Journal of Hydrogen Energy* 2022; 47(62): 26468-26489.
- Sabbaghi MA., Soltani M., Fraser R., Dusseault M. Energy-based exergoeconomic and exergoenvironmental assessment of a novel CCHP system integrated with PEME and PEMFC for a residential building. *Energy* 2024; 305(132301): 1-17.
- Saeed EW., Warkozek EG. Modeling and analysis of renewable PEM fuel cell system. *Energy Procedia* 2015; 74: 87-101.
- Sarma U., Ganguly S. Determination of the component sizing for the PEM fuel cell-battery hybrid energy system for locomotive application using particle swarm optimization. *Journal of Energy Storage* 2018; 19: 247-259.
- Satterthwaite D. Cities' contribution to global warming: notes on the allocation of greenhouse gas emissions. *Environment and Urbanization* 2008; 20(2): 539-549.
- Sazali N. Emerging technologies by hydrogen: A review. *International Journal of Hydrogen Energy* 2020; 45(38): 18753-18771.
- Singla MK., Nijhawan P., Oberoi AS. Hydrogen fuel and fuel cell technology for cleaner future: a review. *Environmental Science and Pollution Research* 2021; 28: 15607-15626.
- Taner T. Energy and exergy analyze of PEM fuel cell: A case study of modeling and simulations. *Energy* 2018; 143: 284-294.
- Turan C., Cora ÖN., Koç M. Effect of manufacturing processes on contact resistance characteristics of metallic bipolar plates in PEM fuel cells. *International Journal of Hydrogen Energy* 2011; 36(19): 12370-12380.
- Turan C., Cora ÖN., Koç M. Investigation of the effects of process sequence on the contact resistance characteristics of coated metallic bipolar plates for polymer electrolyte membrane fuel cells. *Journal of Power Sources* 2013; 243: 925-934.
- Wang D., Dhahad HA., Ali MA., Almojil, SF., Almohana AI., Alali AF., Alyousuf FQA., Almoalimi K. T. Environmental/Economic assessment and multi-aspect optimization of a poly-generation system based on waste heat recovery of PEM fuel cells. *Applied Thermal Engineering* 2023; 223 (119946):1-14.

Zhao P., Wang J., Gao L., Dai Y. Parametric analysis of a hybrid power system using organic Rankine cycle to recover waste heat from proton exchange membrane fuel cell. *International Journal of Hydrogen Energy* 2012; 37(4): 3382-3391.

Zuliani N., Taccani R. Microgeneration system based on HTPEM fuel cell fueled with natural gas: Performance analysis. *Applied Energy* 2012; 97: 802-808.