KABİN ISITMASI VE ORGANİK RANKİNE ÇEVRİMİ YOLUYLA YAKIT HÜCRELİ HİBRİT ELEKTRİKLİ OTOBÜSLERİN ATIK ISI GERİ KAZANIM POTANSİYELİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ

Sılanur YILMAZ[1] , Özgür Berfin KÖYBAŞI[2], Şeref SOYLU[3]

[1]Otokar Otomotiv Ve Savunma Sanayi A. Ş., Sakarya, Türkiye,
[2,3]Kocaeli Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Kocaeli, Türkiye,
silyilmaz@otokar.com.tr, berfin.koybasi@kocaeli.edu.tr, , seref.soylu@kocaeli.edu.tr

ÖZET

Son yıllarda küresel ısınma ve çevre kirliliğinin artan etkileri, sıfır emisyonlu ulaşım teknolojilerinin geliştirilmesini hızlandırmıştır. Yakıt hücreli elektrikli araçlar, yüksek verimlilikleri ve zararlı emisyon üretmemeleri nedeniyle umut verici bir alternatif olarak öne çıkmaktadır. Ancak, yakıt hücreleri tarafından üretilen enerjinin yaklaşık %40–50'si atık ısı olarak kaybedilmektedir**.** Bu çalışmanın amacı, yakıt hücresi soğutma sisteminde oluşan atık ısının kabin ısıtması ve Organik Rankine Çevrimi (ORÇ) yoluyla geri kazanımı sayesinde genel enerji verimliliğini arttırılması hedeflenmektedir. Bu kapsamda Siemens Simcenter Amesim yazılımında oluşturulan bir boyutlu PEM yakıt hücreli otobüs modeli, FTP-72 ve EPA Highway sürüş çevrimleri altında analiz edilmiştir. Yapılan simülasyon analizleri, yakıt hücresi verimliliğinin %45–50 aralığında olduğunu göstermiştir. Şehir içi sürüş koşullarında yakıt hücresi ortalama 39 kW güç üreterek bataryayı beslemiş ve Şarj Durumu'nu (SOC) %19 artırmıştır. Otoyol sürüş koşullarında ise 59 kW ortalama güçte batarya ile paralel çalışmış ve SOC seviyesi %28,66 azalmıştır. Her iki senaryoda da ORÇ'ye aktarılan ısı miktarı benzer bulunmuş; çevrim verimleri sırasıyla %7.7 ve %6.8 olarak hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlar, ORÇ entegrasyonunun sıfır emisyonlu şehir otobüslerinde enerji geri kazanımı ve ısıtma verimliliğini artırma potansiyelini ortaya koymaktadır. Kabin ısıtma senaryolarında, atık ısının kullanımı, ortam sıcaklığına bağlı olarak %40–50 enerji tasarrufu sağlamış ve bu durum elektrikli ısıtıcılara olan ihtiyacın önemli ölçüde azalmasına işaret etmektedir. FTP-72 sürüş çevriminde (1370 saniyelik çevrim yaklaşık 22.3 dakika) yakıt hücresi soğutma sistemi 10 kWh enerjiyi çevreye bırakmıştır. Bir otobüs kış şartlarında ısıtma için saatlik ortalama 12 kwh'lik enerjiye ihtiyaç duymaktadır ve soğutma yoluyla

çevreye bırakılan enerji bu koşullar altında kabin ısıtma ihtiyacının tamamını fazlasıyla karşılamaktadır. Sonuç olarak önemli ölçüde enerji tasarrufu sağlanabilmektedir .
Anahtar kelimeler: Yakıt Hücreli Elektrikli Otobüs, Organik Rankine Çevrimi, Atık Isı Geri Kazanımı, Enerji Verimliliği.

ABSTRACT

In recent years, the increasing impacts of global warming and environmental pollution have accelerated the development of zero-emission transportation technologies. Fuel Cell Electric Vehicles (FCEVs) are emerging as a promising alternative due to their high efficiency and lack of harmful emissions. However, approximately 40–50% of the energy produced by fuel cells is lost as waste heat. %. The aim of this study is to enhance overall energy efficiency by recovering waste heat generated in the fuel cell cooling system through cabin heating and Organic Rankine Cycle (ORC).In this study, a one-dimensional Proton Exchange Membrane (PEM) fuel cell bus model created using Siemens Simcenter Amesim software was analyzed under EPA Highway and FTP-72 (UDDS) driving cycles. Simulation analyses revealed that the fuel cell efficiency ranged between 45–50%. Under urban driving conditions, the fuel cell produced an average power of 39 kW, feeding the battery and increasing the State Of Charge (SOC) by 19%. In highway driving conditions, it operated in parallel with the battery at an average power of 59 kW, resulting in a SOC decrease of 28.66 In both scenarios, similar amounts of heat were transferred to ORC; cycle efficiencies were calculated as 7.7% and 6.8%, respectively. The results obtained demonstrate the potential for ORC integration to enhance energy recovery and heating efficiency in zero-emission city buses. In cabin heating scenarios, using waste heat resulted in 40–50% energy savings depending on ambient temperature, significantly reducing the need for electric heaters. During the FTP-72 driving cycle (a 1,370-second cycle corresponding to approximately 22.3 minutes), the fuel cell cooling system released 10 kWh of energy to the environment. Under winter operating conditions, this bus requires an average of 12 kWh of thermal energy per hour for cabin heating, and the energy discharged through cooling is more than sufficient to meet this heating demand. Consequently, substantial energy savings can be achieved.
Keywords: Fuel Cell Electric Bus, Organic Rankine Cycle, Waste Heat Recovery, Energy Efficiency.

GİRİŞ

Küresel ısınmanın artan etkileri, enerji verimliliği ve çevresel sürdürülebilirlik kavramlarını küresel araştırma ve politika gündemlerinin ön saflarına taşımıştır. Dünya genelinde toplam sera gazı emisyonlarının yaklaşık %25'inden sorumlu olan ulaştırma sektörü, iklim değişikliğiyle mücadelede kritik bir rol oynamaktadır (IEA, 2024). Avrupa Birliği'nin 2019 yılında açıkladığı Avrupa Yeşil Anlaşması çerçevesinde, 2050 yılına kadar karbon nötr ulaşım sistemlerine geçiş hedeflenmiştir (Avrupa Komisyonu, 2019). Benzer şekilde, Birleşmiş Milletler Sürdürülebilir Kalkınma Hedefleri (SKH), özellikle "Uygun Fiyatlı ve Temiz Enerji" (SKH 7) ve "İklim Eylemi" (SKH 13), alternatif enerji kaynaklarının geliştirilmesini stratejik bir öncelik haline getirmiştir (Birleşmiş Milletler, 2023). Avrupa'da yürütülen ZEMO Ortaklığı raporuna göre, sıfır emisyonlu ulaşım stratejileri kapsamında, yakıt hücreli otobüslerin 2030 yılına kadar toplam kentsel toplu taşıma filosunun %25'ini oluşturması hedeflenmektedir (ZEMO Ortaklığı, 2024). Bu tür girişimler, akademik araştırmaların pratik uygulamalarla entegre edilmesinin önemini vurgulamaktadır. Yakıt hücreli elektrikli araçlar, yüksek enerji dönüşüm verimliliği, sessiz çalışması ve sıfır emisyon özellikleri nedeniyle sürdürülebilir ulaşım için giderek daha umut verici bir çözüm olarak görülmektedir. Çeşitli yakıt hücresi türleri arasında, Proton Değişim Membranlı (PEM) yakıt hücreleri, düşük çalışma sıcaklığı, kompakt yapısı ve hızlı dinamik tepkisi nedeniyle araç uygulamalarında öne çıkmaktadır. Bununla birlikte PEM yakıt hücreleri, doğal olarak bir miktar enerji kaybı sergiler: üretilen enerjinin yaklaşık %30–50'si soğutucu devresi ve egzoz gazı akışı yoluyla atık ısı olarak salınır (Yakubu, 2024; Wu et al., 2025). Literatürde, bu atık ısının çoğunun soğutma devresi aracılığıyla dağıldığı ve toplam ısı kaybının %60–90'ını oluşturduğu belirtilmektedir (Yakubu, 2024). Egzoz akışının payı ise çalışma sıcaklığı, nem oranı ve ürün suyun buharlaşması gibi faktörlere bağlı olarak %3–30 arasında değişebilmektedir (Lan, 2023; Thiyagarajan et al., 2020). Bu farklılıklar, soğutma tasarımı (hava veya sıvı bazlı) ve analizde gizli ısının dikkate alınıp alınmaması gibi unsurlardan kaynaklanmaktadır.

Literatürde, soğutma sıvısı devresinin ısı gideriminde baskın bir ortam olduğu, egzoz akışının ise daha küçük ancak termodinamik açıdan anlamlı bir paya sahip olduğu sürekli olarak belirtilmektedir. Atık ısının uygun şekilde geri kazanılması, özellikle düşük sıcaklıklı kaynaklardan faydalanmak üzere geliştirilen Organik Rankine Çevrimi (ORÇ) sistemleri sayesinde, araçların genel enerji verimliliğini artırmak için önemli fırsatlar sunmaktadır (Mousavi Ajarostaghi et al., 2018; Kim et al., 2021). Son yıllarda hibrit ısı pompası-ORÇ (HP-ORÇ) konfigürasyonları da

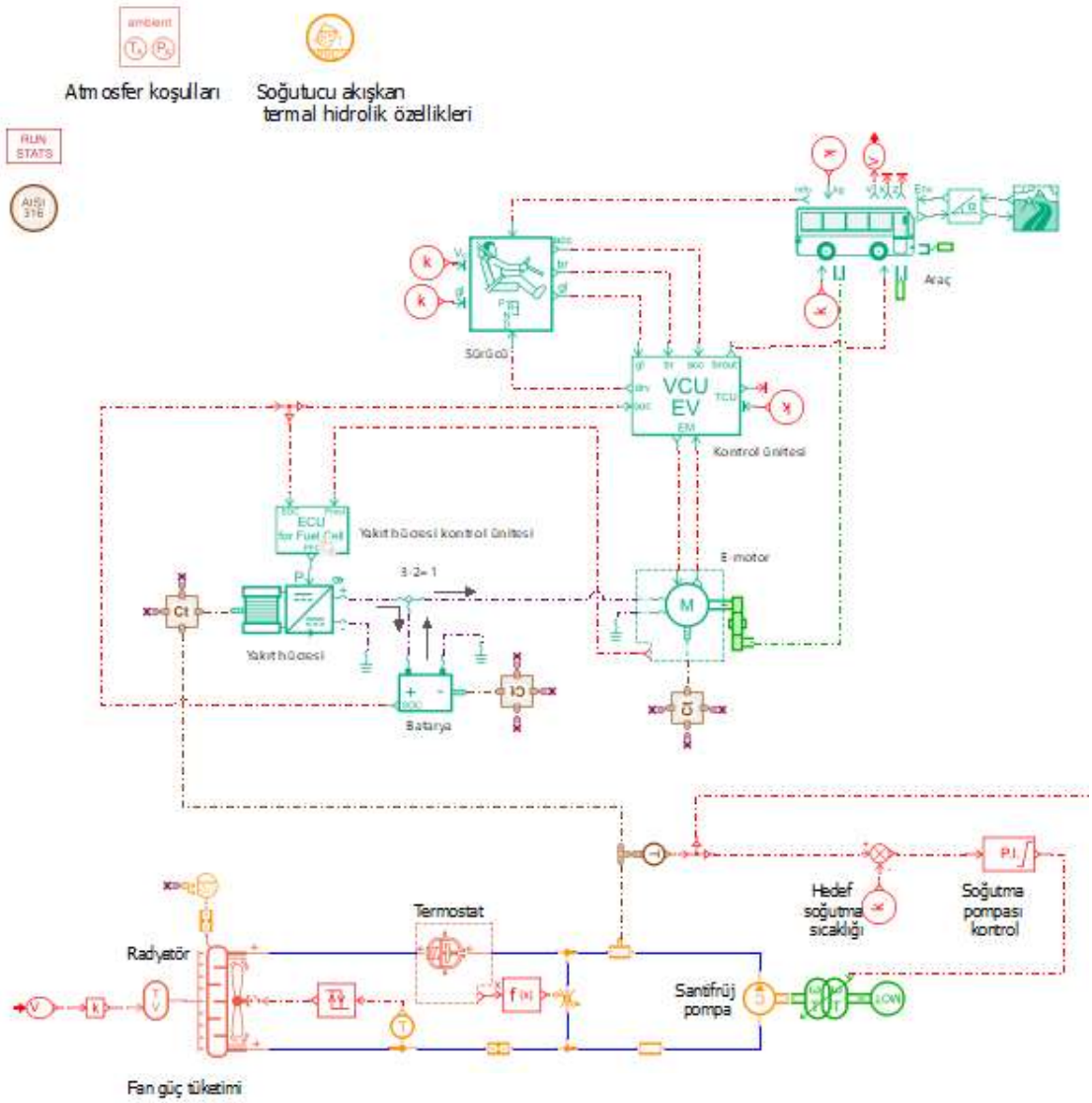
geliştirilmiş; bu sistemlerin kabin ısıtma enerji tüketimini önemli ölçüde azaltabileceği ve düşük sıcaklık kaynaklarında birkaç kW düzeyinde net elektrik üretimi sağlayabileceği gösterilmiştir (Gao & Chen, 2024; Alvi et al., 2024). Ayrıca, düşük küresel ısınma potansiyeline (GWP) sahip yeni nesil akışkanların (ör. R1234yf, R1233zd(E)) kullanımı, geleneksel R245fa akışkanına benzer termodinamik performans sağlarken çevresel etkiyi azaltmaktadır (Kim & Lee, 2024).

Türkiye'de yakıt hücresi sistemleri ve atık ısı geri kazanımı üzerine yapılan araştırmalar da son yıllarda ivme kazanmıştır. TÜBİTAK MAM Enerji Enstitüsü tarafından yürütülen Hidrojen Yakıt Hücresi Şehir Otobüsü Projesi kapsamında, Siemens Simcenter Amesim tabanlı tek boyutlu modelleme çalışmaları, ORÇ sistemlerinin entegrasyonunun toplam verimliliği yaklaşık %10 oranında artırabileceğini göstermiştir (TÜBİTAK MAM Energy Institute, 2023). Benzer şekilde, yerli araştırmalarda düşük sıcaklıklı ORÇ sistemlerinin 70 °C kaynak sıcaklığında %4–5 çevrim verimi elde edebildiği bildirilmiştir (Kaya, Demir & Erden, 2024). Bu çalışmalar, Türkiye ve dünya çapında sıfır emisyonlu ulaşım araştırmalarının, sadece PEM yakıt hücresi tasarımının ötesine geçerek, enerji kayıplarını geri kazanıp yeniden kullanan yardımcı alt sistemleri de içerecek şekilde geliştiğini göstermektedir. Bu nedenle, atık ısı geri kazanımı, sadece araçların enerji verimliliğini artırmakla kalmayıp, özellikle ısıtma yüklerinin yüksek olduğu kış koşullarında yardımcı sistemler veya akü şarjı için ek elektrik gücü sağlama fırsatı da sunmaktadır. Bu bulgulara dayanarak, bu çalışma Siemens Simcenter Amesim yazılımını kullanarak PEM yakıt hücreli hibrit otobüsün tek boyutlu dinamik sistem modelini geliştirmeyi amaçlamaktadır. Model, iki temsili sürüş çevrimi altında; FTP-72 (UDDS) (şehiriçi) ve EPA Highway (şehirlerarası) aracın enerji dağılımını ve geri kazanılabilir atık ısı potansiyelini analiz etmek için kullanılacaktır. Ayrıca, bu çalışma, kış koşullarında kabin ısıtması için yüksek enerji tüketme eğiliminde olan elektrikli araçlarda, yakıt hücresi atık ısısının soğutma sistemi aracılığıyla kabin ısıtması için kullanılma potansiyelini ve yakıt hücresi soğutma sistemine ORÇ sistemini entegre ederek, bataryayı şarj etmek veya yardımcı sistemlere güç sağlamak için elektriğe dönüştürülebilen ek mekanik enerji üretme potansiyelini araştıracaktır. Nihai olarak, bu araştırma, kentsel yakıt hücreli otobüsler için uygun, yüksek verimli, maliyet açısından rekabetçi bir atık ısı geri kazanım yaklaşımı göstererek, sıfır emisyonlu toplu taşımanın daha yaygın olarak benimsenmesine katkıda bulunmayı amaçlamaktadır.

METODOLOJI

Bu çalışmada, atık ısı geri kazanım potansiyelini araştırmak için Siemens Simcenter Amesim'de Şekil 1'de gösterilen tek boyutlu (1D) dinamik bir yakıt hücresi hibrit elektrikli otobüs modeli geliştirilmiştir. Analiz, önerilen konfigürasyonun sürüş çevrimleri ve sürüş koşullarının enerji dengesi, verimlilik artışı ve termal yönetim performansını değerlendirmeye odaklanmaktadır.

Alt modüller arasında yakıt hücresi yığını, akü paketi, elektrik motoru, güç elektroniği, araç dinamiği ve hem soğutma devresi hem de ORÇ entegrasyon yolunu içeren termal yönetim alt sistemi bulunmaktadır.



Şekil 1. Yakıt hücreli hibrit araç modeli

Modelleme çerçevesi dört ana aşamadan oluşmaktadır:

1. Yakıt hücresi hibrit otobüs için kapsamlı bir 1D sistem modelinin geliştirilmesi.
2. İki sürüş çevrimi altında sistem performansının simülasyonu FTP-72 (Şehir içi) ve EPA Highway (Şehirlerarası).
3. Kabin ısıtması için atık ısı kullanımının değerlendirilmesi.
4. ORÇ alt sisteminin entegrasyonu ve termodinamik davranışının değerlendirilmesi.

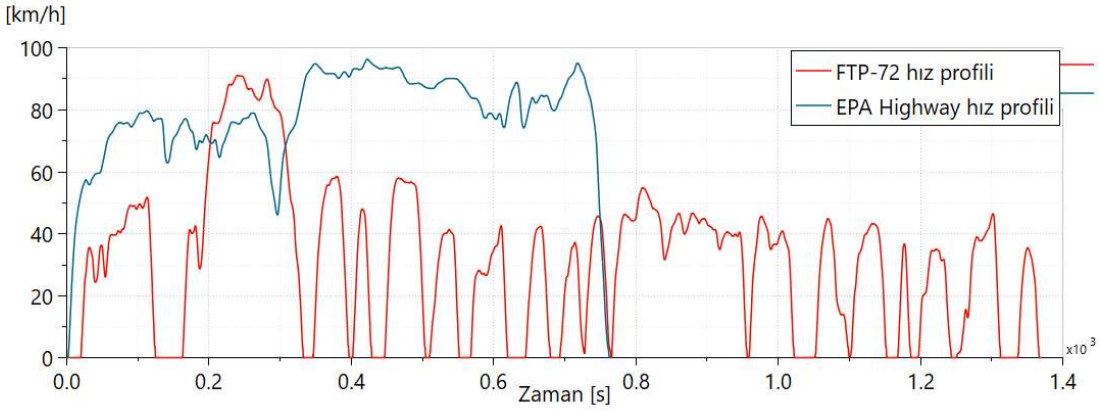
Referans araç olarak 12 metrelik bir şehir içi yakıt hücreli otobüs seçilmiştir. Teknik veriler ve bileşen parametreleri, ZEMO Ortaklığı'nın toplu taşıma çalışmalarından elde edilmiş ve literatür kaynakları aracılığıyla doğrulanmıştır. Aracın temel özellikleri Tablo 1'de sunulmuştur.

Tablo 1. Araç özellikleri

Parametre	**Değer**	**Birim**
Ağırlık	14210	Kg
C_D aerodinamik sürtünme katsayısı.	0.55	-
S_x ön alan	7.9	m^2
Tekerlek ataleti	9.5	Kgm^2
Coulomb sürtünme katsayısı (Yuvarlanma direnci katsayısı)	0.0098	-
Lastik boyutu	275x70x22.5	mm / % / in
Ön aksta maksimum frenleme torku	15950	Nm
Arka aksta maksimum frenleme torku	1000	Nm
Dişli oranı	9	-

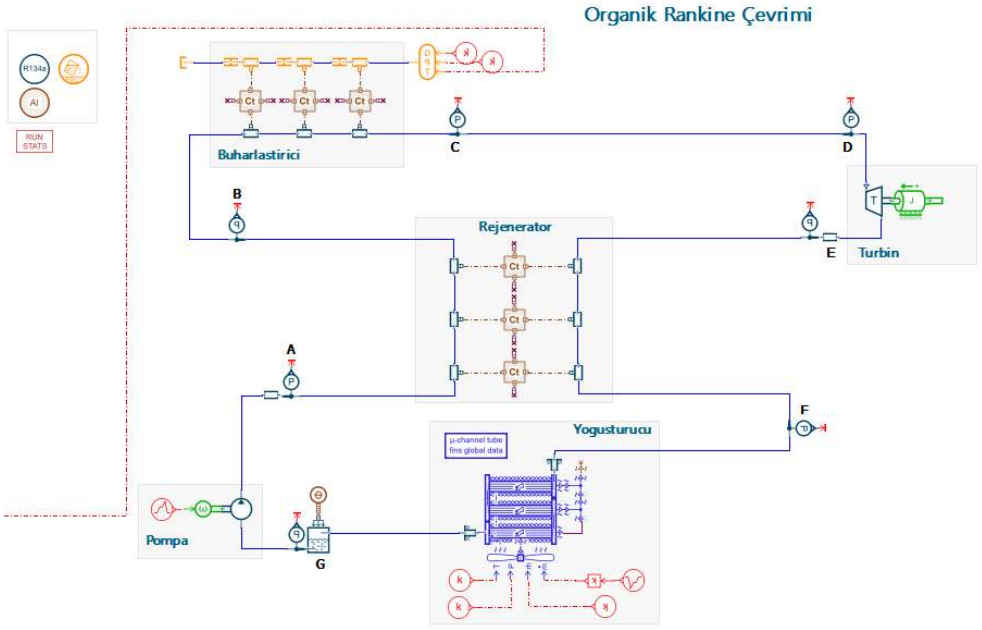
FTP-72 (Şehir İçi Dinamometre Sürüş Programı, UDDS) sürüş çevrimi Amesim kütüphanesinden elde edilmiştir ve Şekil 2.'de görüldüğü üzere sık sık hızlanma, yavaşlama ile karakterize edilen şehir içi dur-kalk trafik koşullarını temsil eder. Rejeneratif frenleme ve enerji yönetimi performansını değerlendirmek için yaygın olarak kullanılır. FTP-72 çevrimi, maksimum hızı 90 km/s olan yaklaşık 12 km'lik bir şehir içi rotayı temsil eden toplam 1307 saniyelik bir süreyi kapsar. Aynı grafikteki EPA Highway sürüş çevrimi de Amesim kütüphanesinden elde edilmiştir. Şekilden görüldüğü üzere FTP-72'ye göre nispeten daha durgun sürüş koşullarını temsil eder ve daha yüksek ortalama hızlarda seyretmektedir. Bu çevrim otoyol rotasını ve FTP-72 şehir içi sürüş

çevriminden çok daha kararlı ve sabit hızlı bir sürüş çevrimini temsil eder. Toplam simülasyon süresi 765 saniye olup, 16,6 km'ye karşılık gelir ve azami hız 95 km/saattir.



Şekil 2. FT-72 ve EPA Highway sürüş çevrimi hız profilleri

Şekil 3.'te görüldüğü gibi bu çalışmada geliştirilen ORÇ alt sistemi, kompresör, kondansatör, türbin, evaporatör ve rejeneratif ısı eşanjöründen oluşmaktadır.



Şekil 3. ORÇ devre şeması

Çevrimde kullanılan çalışma akışkanı, yakıt hücresinin soğutma sıcaklığı aralığı ile termodinamik uyumluluğu ve düşük sıcaklıkta ısı geri kazanım sistemlerinde istikrarlı performansı nedeniyle

R134a'dır. Bu akışkan Amesim kütüphanesinden seçilmiştir ve akışkanın termodinamik özellikleri Tablo 2'de gösterilmektedir.

Tablo 2. Soğutucu akışkan özellikleri

Akışkan Karakteristikleri	
Tanım	R134a – HELMHOLTZ Korelasyonu
Kritik Basınç [barA]	40.59
Kritik Sıcaklık [degC]	101.06
Kritik Yoğunluk [kg/m3]	511.95
Maksimum Basınç [barA]	700
Maksimum Sıcaklık [degC]	181.85
Minimum Sıcaklık [degC]	-103
Maksimum Yoğunluk [kg/m3]	1591.7
Mol Kütlesi [g/mol]	102.03

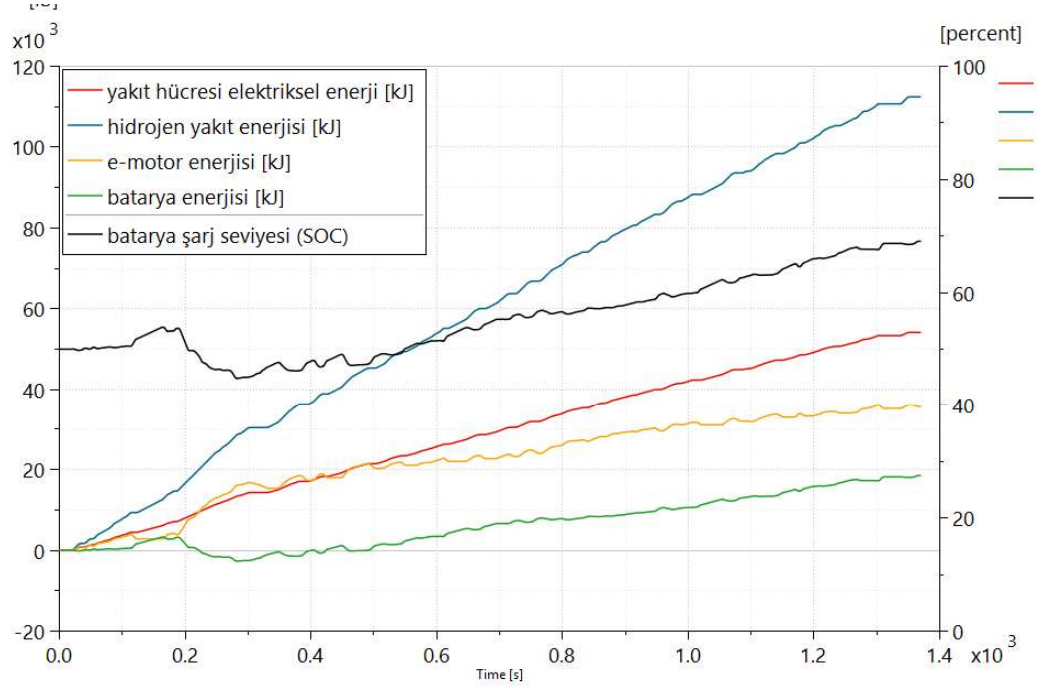
Mevcut konfigürasyonda, termal-hidrolik çevrim yakıt hücresi soğutma devresinden geri kazanılan atık ısıyı ORÇ evaporatörüne aktarır. Doğrudan ısı akışı bağlantısı yerine, sistem dinamik simülasyon ortamında geçici termal davranışı daha doğru bir şekilde temsil etmek için yakıt hücresinden gelen sıcaklık geri beslemesini kullanır.

ANALİZ VE TARTIŞMA

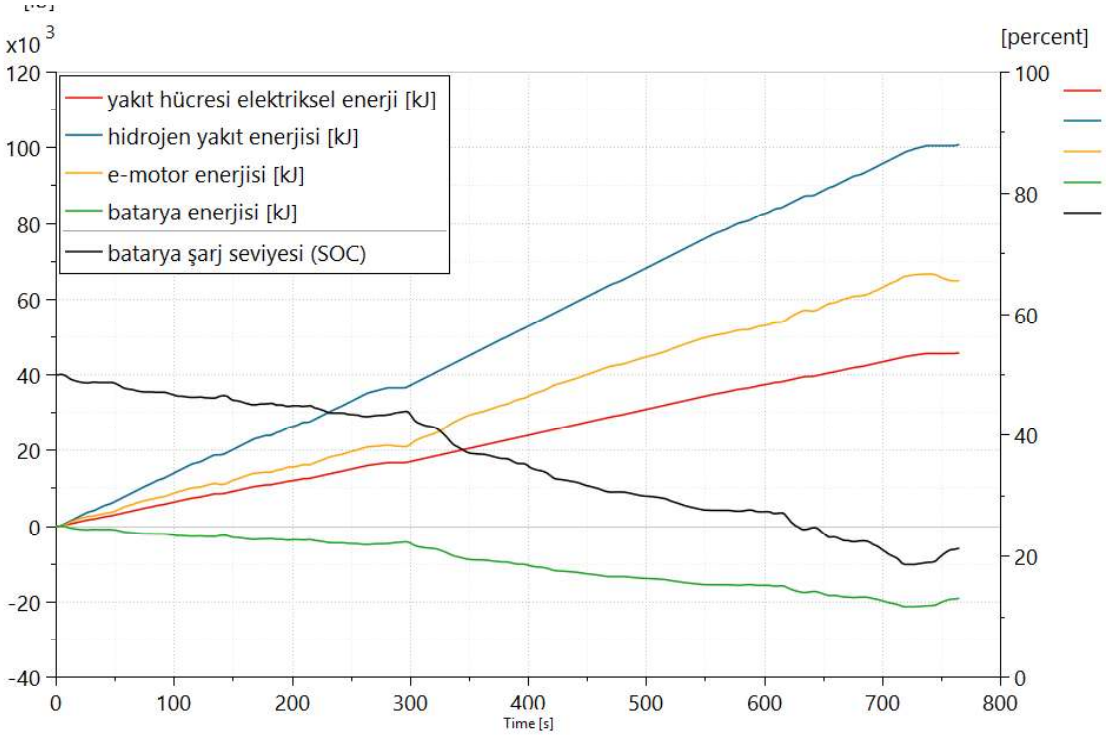
Bu çalışmada, yakıt hücreli hibrit elektrikli otobüsün FTP-72 ve EPA Highway sürüş çevrimleri altında enerji dağılımı incelenmiştir. Şekil 4.'te görüldüğü gibi 1370 sn'lik FTP-72 sürüş çevrimi için kullanılan 0.94 kg'lık hidrojenden toplam 112 MJ enerji sağlanmıştır ve bu enerjinin 54 MJ 'ü elektrik enerjisine dönüşmüştür. Bu süreçte e-motor 35.6 MJ'lük elektrik enerjisi kullanmış ve yakıt hücresinin ürettiği enerjiden kalan 18.5 MJ'lük elektrik enerjisi bataryayı şarj etmekte kullanılmıştır. Batarya şarj seviyesindeki artış şekilden de görülmektedir.

Şekil 5.'te görüldüğü gibi 765 sn'lik EPA Highway sürüş çevrimi için kullanılan 0.84 kg'lık hidrojenden toplam 101 MJ enerji sağlanmıştır. Hidrojenin verdiği enerjinin 46 MJ'ü elektrik enerjisine dönüştürülmüştür ve bu enerjinin tamamı e-motorda kullanılmıştır. Fakat bu enerji sürüş çevrimi için yeterli olmamış geri kalan 18 MJ 'lük enerji bataryadan sağlanmıştır. Batarya şarj seviyesindeki düşüş şekilden de görülmektedir. Sistemin ana enerji kaynağını oluşturan yakıt hücresi hidrojenden üretilen enerjiden kalan enerji soğutma devresi ve egzoz hattı aracılığıyla atık ısı olarak kaybedilir. Bu atık ısının sıcaklık aralığı simülasyon sonuçlarına göre 70–85 °C'dir ve

ORÇ sisteminin çalışması için uygun bir termal seviye sağlamaktadır. Bu süreçte PEM yakıt hücresinin verimi FTP-72 sürüş çevriminde yaklaşık %48 ve EPA Highway sürüş çevriminde ise yaklaşık %46 olarak hesaplanmıştır.

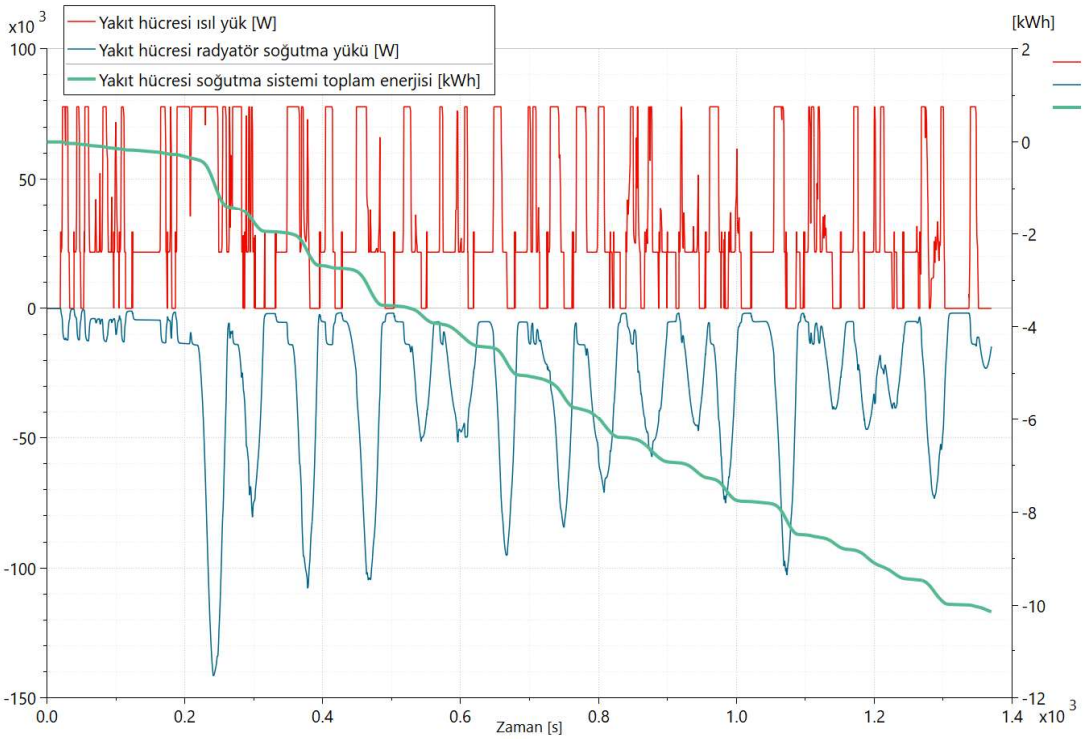


Şekil 4. FTP 72- Enerji dağılımı ve batarya şarj durumu



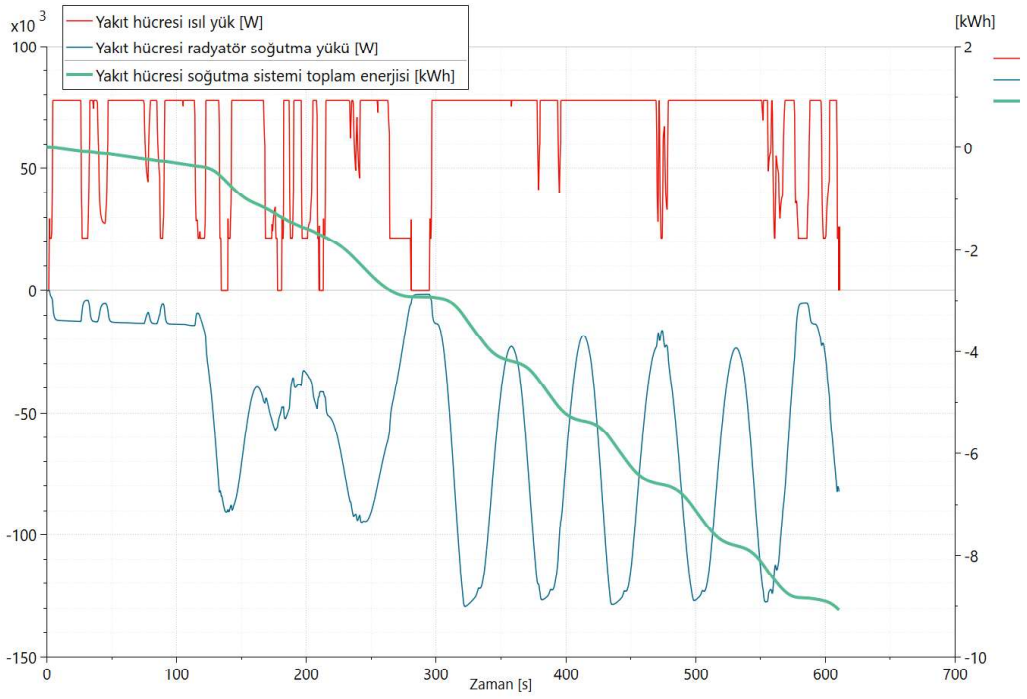
Şekil 5. EPA Highway-Enerji dağılımı ve batarya şarj durumu

Şekil 6. ve Şekil 7. FTP-72 ve EPA Highway sürüş çevrimi boyunca yakıt hücresi ve soğutma sistemi ısıl yüklerini göstermektedir. Şekil 6.'dan görülebileceği üzere FTP-72 sürüş çevrimi boyunca yakıt hücresi ısıl yükü 8 kW'a kadar yükselmekte fakat ortalama 4-5 kW mertebesindedir. Sürüş çevriminin ilk 400 saniyesinde yakıt hücresi kendini ısıtmakta olduğundan soğutma sistemi devreye girmemiş olup bu nedenle herhangi bir soğutma yükü oluşmamıştır. Soğutma sistemi yakıt hücresi sıcaklığını 80 °C'nin üzerine çıkarmamak üzerine tasarlanmıştır. Yakıt hücresinin her devreye girişi ve sıcaklık kontrolü nedeni ile ısıtma ve soğutma ısıl yükleri dalgalı olarak seyretmektedir.



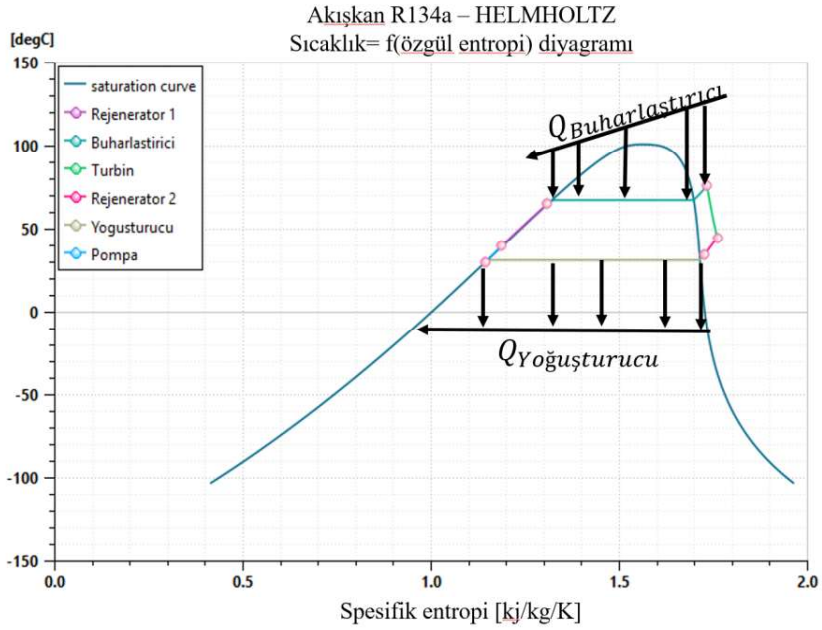
Şekil 6. FTP-72 Yakıt hücresi ısı atımı ve radyatör soğutma performansı

Şekil 7.'de EPA Highway sürüş çevriminde ise yakıt hücresi ısıl yükü 8 kW'a kadar yükselmekte fakat ortalama 5-6 kW mertebesindedir. FTP-72'ye kıyasla sürüş çevriminin ilk 250 saniyesinde yakıt hücresi kendini ısıtmıştır ve sonrasında soğutma sistemi devreye girmiştir. EPA Highway sürüş çevriminde yakıt hücresi elektriksel gücü FTP-72'ye göre daha yüksek ve kararlı olduğu için soğutma yükü de benzer bir eğilim göstermektedir.

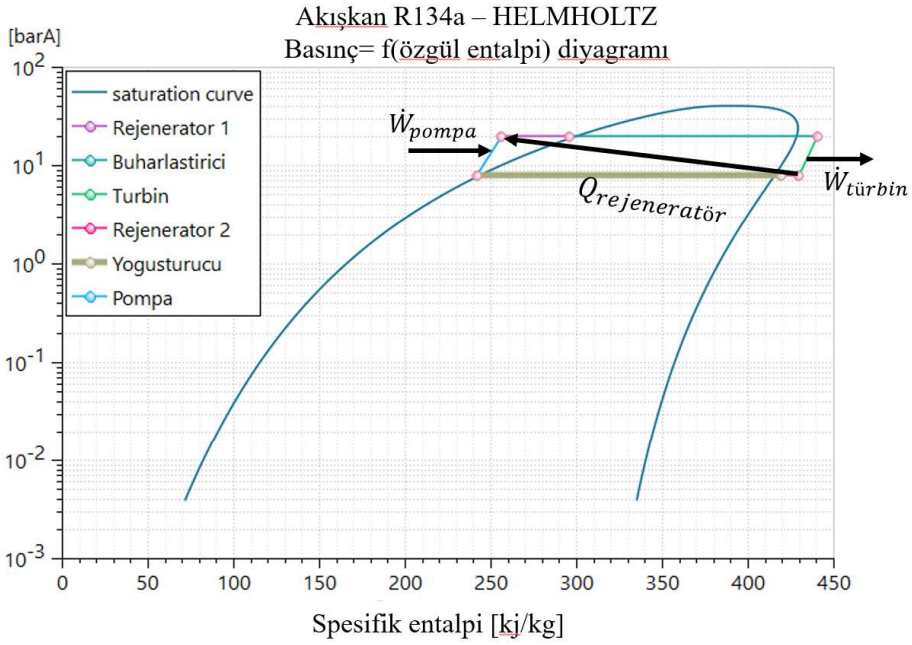


Şekil 7. EPA Highway Yakıt hücresi ısı atımı ve radyatör soğutma performansı

Şekil 8. ve Şekil 9. da ORÇ çevriminin T–s ve log(P–h) diyagramlarını içeren termodinamik analiz sonuçları gösterilmiştir ve bu sonuçlar R134a 'nın buharlaşma, genleşme ve yoğuşma süreçlerini göstermektedir.



Şekil 8. ORÇ sistemi T-s diyagramı



Şekil 9. ORÇ sistemi Log(P)-h diyagramı

Çevrimde kullanılan akışkanın kütlesel debisi 250 g/s olup düşük basınçtan yüksek basınca pompalanmaktadır. Pompa çıkışında basınç artışı ΔP=12 bar olarak hesaplanmıştır. Buharlaştırıcıda, akışkan yaklaşık 11 °C sıcaklık artışıyla Δh=170.4 kJ/kg entalpi kazanmaktadır. Bu, sistemin atık ısı kaynağından aldığı toplam ısıl enerjiyi temsil etmektedir. Türbinde ise akışkan genleşmekte ve sıcaklığı 31 °C azalırken, entalpisi de 13.2 kJ/kg azalmıştır. Türbinde FTP-72 sürüş çevriminde 3.3 kW ve EPA Highway sürüş çevriminde ise 3.2 kW mekanik iş üretilmektedir. Bu güç, sistemin net elektriksel üretimine katkı sağlayacak temel çıktı olarak değerlendirilebilir. Rejeneratif ısı değiştirici türbinden çıkan akışkandaki enerjinin bir kısmını pompadan sonra akışkana tekrar aktararak çevrimin ısıl verimliliğini artırıp yoğuşturucu yükünü azaltır. Yoğuşturucuda akışkanın yoğunlaşması sırasında entalpide 177.65 kJ/kg azalma ve sıcaklıkta 10 °C düşüş gözlenmiştir. Türbin çıkışı ve pompa girişi dikkate alındığında, ORÇ net mekanik güç üretimi yaklaşık 3.3 kW, sistemin ortalama ısıl verimi ise %6-8 aralığında hesaplanmıştır. Bu değer, düşük sıcaklıklı atık ısı geri kazanım uygulamaları için literatürde bildirilen aralıkla uyumludur. Sonuç olarak, analiz edilen ORÇ sistemi düşük sıcaklık seviyelerinde (yaklaşık 60–80 °C) çalışan PEM yakıt hücreli araçlarda atık ısının geri kazanılması açısından oldukça verimli bir çözüm sunmaktadır. İki kademeli rejeneratif yapı, buharlaştırıcıdan sağlanan ısının daha etkin kullanılmasını sağlayarak hem ısıtma sistemi yükünü azaltmakta hem de ek elektrik enerjisi üretimi potansiyelini artırmaktadır.

SONUÇLAR

Bu çalışmanın bulguları, kabin ısıtma amacıyla atık ısı geri kazanımının yakıt hücreli otobüs platformlarında enerji verimliliğini artırma ve işletme maliyetlerini azaltma potansiyelini desteklemektedir. ORÇ ile mekanik enerji üretimi ise sınırlı kalmasına rağmen gelişme potansiyeli bulunmaktadır.

Elde edilen başlıca sonuçlar aşağıda özetlenmiştir:

- Yakıt hücresi sistemi, ortalama %45–50 aralığında elektriksel verimlilik göstermiştir.
- Yakıt hücresi soğutma devresinden çıkan atık ısının sıcaklık profili 60–80 °C dir. Kabin ısıtması için uygun bir aralıktır fakat ORÇ uygulamaları için sınırlı bir uygulama imkanı sağlamaktadır.
- Kabin ısıtma senaryolarında örnek olarak FTP-72 sürüş çevriminde (1370 saniyelik yaklaşık 22.3 dakika) yakıt hücresi soğutma sisteminden 10 kWh enerji çevreye bırakılmaktadır. Bu enerji kabin ısıtma enerji ihtiyacı saatlik ortalama 12 kWh olan bir senaryoda tüm enerji ihtiyacını fazlasıyla karşılamaktadır.
- ORÇ entegrasyonu sayesinde ortalama 3.3 kW elektrik gücü üretilmiş, bu da atık ısı geri kazanımında %10–20 artışa ve genel sistem verimliliğinde yaklaşık %6-8 iyileşmeye katkıda bulunmuştur.

Bu bulgular literatürde bildirilen deneysel ve modelleme sonuçlarıyla tutarlıdır.

KAYNAKLAR

Alvi, J. Z., Guan, Z., & Imran, M. (2024). Thermoeconomic evaluation and sustainability insights of hybrid organic Rankine cycle systems. Aston University Publications.

European Commission. (2019, December 11). The European Green Deal (COM (2019) 640 final). Brussels: European Union Publications.

International Energy Agency (IEA). (2025). Global energy review 2025: CO_2 emissions from fuel combustion – overview. Paris: IEA Publications.

Kaya, B., Demir, Ö., & Erden, S. (2024). Düşük sıcaklıklı organik Rankine çevrimi (ORÇ) sistemlerinin atık ısı geri kazanımında kullanılabilirliğinin deneysel incelenmesi. Enerji Teknolojileri Dergisi, 17(1), 45–56.

Kim, Y.-M., Negash, A., Shamsi, S. S. M., Shin, D.-G., & Cho, G. (2021). Experimental study of a lab-scale organic Rankine cycle system for heat and water recovery from flue gas. Energies, 14(14), 4328.

Kim, S., & Lee, J. (2024). Comparative thermodynamic assessment of low-GWP working fluids for ORC-based fuel cell heat recovery. Energy, 298, 127482.

Lan, Y. (2023). Waste heat recovery from exhaust gas of a proton exchange membrane fuel cell. Applied Energy, 341, 120891.

Mousavi Ajarostaghi, S. S., Nazari, N., & Rashidi, R. (2018). Waste heat recovery from a 1180 kW PEMFC system by recuperative organic Rankine cycle. Energy, 157, 388–400.

TÜBİTAK MAM Energy Institute. (2023). Hydrogen fuel cell urban bus project: Final technical report (TÜBİTAK 1505). Gebze, Turkey.

United Nations (UN). (2023). The Sustainable Development Goals Report 2023. New York: United Nations Publications.

Wu, Q., Dong, Z., Zhang, X., Zhang, C., Iqbal, A., & Chen, J. (2025). Towards more efficient PEM fuel cells through advanced thermal management: From mechanisms to applications. Sustainability, 17(3), 943.

Yakubu, A. U. (2024). A comprehensive review of primary cooling techniques and thermal management strategies for polymer electrolyte membrane fuel cells (PEMFC). Heliyon, 12(3), e14587.

Zemo Partnership. (2024). Zero emission bus market monitoring report 2024. London: Zemo Partnership.