

Bir Koster için Yardımcı Güç Kaynağı Olarak Katı Oksit Yakıt Pilinin Termodinamik, Ekonomik ve Çevresel Analizi

Engin Güler^{1,2}, Selma Ergin², Barış Barlas³

¹ Piri Reis Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Tuzla, İstanbul, Türkiye

^{2,3} İstanbul Teknik Üniversitesi, Gemi İnşaatı ve Deniz Bilimleri Fakültesi, Maslak, İstanbul, Türkiye

¹ eguler@pirireis.edu.tr, ORCID: 0000-0002-1553-4553

² (sorumlu yazar), ergin@itu.edu.tr, 0000-0001-8343-2455

³ barlas@itu.edu.tr, 0000-0002-5846-2369

ÖZET

Çevre ve dünya iklimleri açısından karbondioksit (CO₂) emisyonlarının azaltılması oldukça önemli olup Uluslararası Denizcilik Örgütü (IMO) de son yıllarda uluslararası denizcilik faaliyetlerinden kaynaklanan sera gazı emisyonlarının sınırlandırılması yönünde çalışmalarını hızlandırmıştır. Gemilerden salınan CO₂ emisyonlarının azaltılması için bugüne kadar çok çeşitli yöntemler ve teknolojiler önerilmiştir. Bu teknolojilerden birisi olan yakıt pilleri kullanılan yakıtla bağlı olarak CO₂ emisyonlarını sifıra kadar düşürebilmektedir. Bu çalışmada bir koster için yardımcı güç kaynağı olarak katı oksit yakıt pili (SOFC) kullanımının elektrokimyasal ve termodinamik olarak modellenmesi ve Aspen HYSYS yazılımında simülasyonu gerçekleştirilmiştir. Alternatif CO₂ emisyon azaltma yöntemleri ile fizibilite ve maliyet açısından daha etkin bir karşılaştırma yapabilmek için birim CO₂ azaltma maliyeti üzerinden sistemin ekonomik analizi gerçekleştirilmiştir. Ekonomik analiz, çalışmada kullanılan geminin referans yardımcı güç sisteminin bu çalışmada önerilen SOFC güç sistemi ile değiştirilmesinden kaynaklanan maliyet artışı ve azaltılan CO₂ emisyon miktarı değerlerinden yola çıkılarak yapılmıştır. Kurulan model üzerinden yakıt pilinin farklı çalışma sıcaklıkları ve akım yoğunluklarının sistemin maliyeti üzerine etkileri incelenmiştir. Ayrıca gemiler için yapılan çalışmalarda ilk defa yakıt pili kimyasal bozulmasının pil potansiyeli düşüşündeki etkisi bu çalışmada dikkate alınmıştır. Yapılan parametrik çalışma sonucunda incelenen koşullarda akım yoğunluğunun seçimi birim CO₂ azaltma maliyetini %10.0'a, sıcaklığın seçimi ise birim CO₂ azaltma maliyetini %26.1'e kadar azaltmıştır. Maliyeti minimize eden çalışma koşullarında sistemin kimyasal bozulma öncesi %51.1 gibi yüksek bir termal verime ve 302.2 USD/ton CO₂ azaltma maliyetine sahip olduğu hesaplanmıştır. Belirlenen koşulda SOFC güç sisteminin toplam maliyetinin %65'ini kullanılan yakıt olan hidrojenin oluşturduğu görülmüştür. Kimyasal bozulma etkisiyle verim yakıt pili ömrü sonunda ortalama %43.6 olarak elde edilmiş olup bu verim referans yardımcı güç sisteminden %20.7 daha fazladır. Referans koşullardaki gemiye göre CO₂ emisyonları çalışmada önerilen yardımcı güç sistemi ile %24.3 kadar azalmıştır.

Anahtar kelimeler: Katı oksit yakıt pili, gemi yardımcı güç sistemleri, temiz enerji, gemi emisyonları, CO₂ emisyonları

Makale geçmişi: Geliş 05/08/2021 – Kabul 02/12/2021

<https://doi.org/10.54926/gdt.979252>

Thermodynamic, Economic and Environmental Analysis of a Solid Oxide Fuel Cell as Auxiliary Power Source for a Coaster

Engin Güler ^{1,2}, Selma Ergin ², Barış Barlas ³

¹ Piri Reis University, Faculty of Engineering, Tuzla, Istanbul, Turkey

^{2,3} Istanbul Technical University, Faculty of Naval Architecture and Ocean Engineering, Maslak, Istanbul, Turkey

¹ eguler@pirireis.edu.tr, ORCID: 0000-0002-1553-4553

² (corresponding author), ergin@itu.edu.tr, 0000-0001-8343-2455

³ barlas@itu.edu.tr, 0000-0002-5846-2369

ABSTRACT

Reducing carbon dioxide (CO₂) emissions is crucial in terms of environment and world climates, and the International Maritime Organization (IMO) has accelerated its works to limit greenhouse gas emissions released from international maritime activities in recent years. Various methods and technologies have been proposed to reduce CO₂ emissions from ships until nowadays. Fuel cells are one of these technologies and they can reduce CO₂ emissions to zero, depending on the fuel used. In this study, electrochemical and thermodynamic modeling of the solid oxide fuel cell (SOFC) as an auxiliary power source for a coaster and simulation in Aspen HYSYS software is carried out. In order to make a more effective comparison in terms of feasibility and cost with alternative CO₂ emission reduction methods, an economic analysis of the system is made over unit CO₂ reduction cost. The economic analysis is carried out based on the cost increase and reduced CO₂ emission values resulting from the replacement of the reference auxiliary power system of the ship used with the SOFC power system proposed in this study. The effects of different operating temperatures and current densities of the fuel cell on the cost of the system are investigated using the model established. In addition, the effect of fuel cell degradation on cell potential reduction is taken into account in this study for the first time in studies conducted for ships. As a result of the parametric study, the selection of the current density in the conditions examined reduces the unit CO₂ reduction cost up to 10.0% and the selection of the temperature reduces the unit CO₂ reduction cost up to 26.1%. It has been calculated that the system has high thermal efficiency of 51.1% and a reduction cost of 302.2 USD/ton CO₂ under operating conditions that minimize costs. It has been calculated that 65% of the total cost of the SOFC power system under the specified condition is hydrogen as the fuel used. The efficiency with the degradation effect is calculated as 43.6% on average at the end of the fuel cell life, and this efficiency is 20.7% greater than the reference auxiliary power system. Compared to the ship in the reference conditions, CO₂ emissions decreased by 24.3% with the auxiliary power system proposed in the study.

Keywords: Solid oxide fuel cell, ship auxiliary power systems, clean energy, ship emissions, CO₂ emissions

Article history: Received 05/08/2021 – Accepted 02/12/2021

Sembol ve Kısaltma Listesi

A	: Alan	v	: Fuller hacmi
CAPEX	: Yıllık ilk yatırım maliyeti	V	: Potansiyel
ATC	: Yıllık toplam maliyet	W	: Güç
C	: Maliyet	δ	: Kalınlık
CAPEX	: İlk yatırım maliyeti	$\Delta\bar{g}$: Gibbs serbest enerjisi
CCS	: Karbon tutum ve depolama	ε	: Gözeneklilik
CO ₂	: Karbondioksit	€	: Avrupa Birliği para birimi
CRF	: Sermaye dönüşüm faktörü	ζ	: Dolaşıklık
CS	: Karbon çelik	η	: Verim
D	: Difüzyon katsayısı	ρ	: Özgül özdirenç
DE	: Dizel makine		
E ⁰	: Standart koşullardaki tersinir potansiyel		
f	: Maliyet faktörü		
F	: Faraday sabiti		
F _t	: Doğrulama faktörü		
GT	: Gaz türbini		
h	: Entalpi		
H ₂	: Hidrojen		
H ₂ O	: Su		
i	: Akım yoğunluğu		
i ₀	: Yer değiştirme akım yoğunluğu		
ir	: Faiz oranı		
IMO	: Uluslararası Denizcilik Örgütü		
LHV	: Alt ısı değer		
LTCS	: Düşük sıcaklıklı karbon çelik		
\dot{m}	: Debi		
M	: Moleküler ağırlık		
MCR	: Maksimum sürekli güç		
MEPC	: Deniz Çevresini Koruma Komitesi		
n	: Elektron sayısı		
N ₂	: Azot		
NH ₃	: Amonyak		
O ₂	: Oksijen		
P	: Basınç		
Q	: Isı		
r	: Gözenek çapı		
\bar{R}	: Evrensel molar gaz sabitini		
SFOC	: Özgül yakıt tüketimi		
SOFC	: Katı oksit yakıt pili		
SS	: Paslanmaz çelik		
T	: Sıcaklık		
U	: Toplam ısı transfer katsayısı		
USD	: ABD doları		

1. Giriş

Uluslararası Denizcilik Örgütü (IMO), 2008 yılından bu yana çalışmalarını önemli ölçüde hızlandırmış ve uluslararası deniz taşımacılığında kaynaklanan karbondioksit (CO₂) emisyonlarını sınırlandırmak için çeşitli fazlar halinde bir dizi kural ve düzenlemeleri yürürlüğe koymuştur. 2018 yılında yapılan 72. Deniz Çevresini Koruma Komitesi (MEPC) toplantısı sonucunda, 2050 yılına kadar CO₂ emisyonlarının 2008 yılına göre %50 azaltılacağı kabul edilmiştir (International Maritime Organization, 2018). 2019 ve 2020 yıllarında yapılan 74. ve 75. MEPC toplantıları sonucunda ise CO₂ emisyonlarının farklı gemi tipleri için çeşitli oranlarda %50'ye kadar azaltılması ve gemilerin yaydıkları CO₂ oranına göre sınıflandırılması kabul edilmiştir. Ayrıca, geçmişte CO₂ emisyon azaltımı için kabul edilen fazların uygulama tarihleri daha da öne alınmıştır (Marine Environment Protection Committee, 2020).

CO₂ emisyonlarını azaltmak için alınan kararlar, çevre ve dünya iklimleri açısından olumlu gelişmelerdir. Ancak karbon vergisi ve CO₂ emisyonlarını sınırlamak için kullanılacak yeni teknolojilerin getirdiği ekonomik yükümlülükler nedeniyle denizcilik sektörü ve dünya ticareti açısından olumsuz sonuçları vardır. CO₂ emisyonlarını azaltmak için bugüne kadar oldukça çeşitli teknolojiler ve yöntemler önerilmiş olup bu yöntemlerden yakıt olarak biyoyakıt, amonyak (NH₃) veya hidrojen (H₂) kullanımı, tahrik sistemlerinde yakıt pilleri, yenilenebilir enerji kaynakları, batarya ve elektrik kullanımı gibi yöntemler ne yazık ki yeterince ekonomik çözümler sunamamaktadırlar (Lloyd's Register, 2018). Karbon tutma ve depolama sistemi yüksek güverte alanına ve güç ihtiyacına sahip büyük gemiler için uygun bir çözüm olabilmekle birlikte küçük gemilerde kullanımı yeterince uygun olmayabilir (Güler ve Ergin, 2021). Gövde ve form tasarımını geliştirmek, güç ve sevk sistemlerini iyileştirmek ve bunun gibi enerji verimini artıran diğer yöntemlerin ise CO₂ emisyonlarını azaltma üzerinde etkileri sınırlıdır (Buhaug vd., 2009).

Yüksek maliyetlerine rağmen geleneksel içten yanmalı gemi makineleri ile karşılaştırıldığında yakıt pilleri daha verimli, daha temiz ve daha sessizdir. Bu nedenlerle yakıt pili kullanımı iklim değişikliği ile mücadelede umut vericidir ve son yıllarda dünya çapında ilgi görmeye başlamıştır (Bassam vd., 2017). Yakıt pillerinin gemilerde kullanımı ile ilgili ilk uygulamalar denizaltılar için gerçekleştirilmiş olup, 2000'li yıllardan itibaren araştırmacılar, yakıt pillerinin ticari gemilerde özellikle yardımcı sistemler olmak üzere güç sistemlerinde kullanımını incelemeye başlamışlardır (Armi vd., 2021; Choi vd., 2016; Evrin ve Dincer, 2019). Bugüne kadar gemilerde çeşitli tipte yakıt pilleri kullanımı uygulanmak ve önerilmekle birlikte pillerin performansları karşılaştırıldığında yüksek atık ısı değerlendirme potansiyeli ve yüksek verimleri dolayısıyla katı oksit yakıt pillerinin (SOFC) gemiler için daha iyi bir seçenek olacağı öngörülmüştür (Yan vd., 2019; Zhang vd., 2010). Bu bağlamda yapılan bir çalışmada, en yaygın kullanımı olan proton değişim membranlı yakıt pili tipinin hidrojen depolama yoğunluğunun düşük olması sebebiyle seyir süresinin 100 saatin biraz üzerinde olduğu ve bir güç üretim ekipmanı olarak uzun deniz yolculuklarını desteklemediği, bunun yerine SOFC güç sistemlerinin yakıt depolama yoğunluğunun 1.5-5 kat fazla olması sebebiyle çok daha uzun seyir süresi imkanı sağladığı ve emisyonları etkili bir şekilde azaltarak görev gereksinimlerini tatmin edici bir düzeyde gerçekleştirdiği gösterilmiştir (van Biert vd., 2016). Ayrıca SOFC güç sistemi, alt ısıl ve hibrit güç çevrimleri ile birlikte daha yüksek verimlere ulaşabilmektedir (Park vd., 2000). Büyük bir etan taşıyıcı geminin alternatif hibrit güç sistemleri için performansının belirlendiği bir çalışmada çift yakıtlı dizel elektrik makine ile alt ısıl çevriminde gaz türbini (GT) kullanan bir SOFC hibrit sisteminin IMO'nun istenilen emisyon azaltım gereksinimini karşılayan uygun bir çözüm olduğu tespit edilmiştir (Ahn vd., 2018). Gemiler için SOFC-GT güç çevrimi ile süperkritik CO₂, organik Rankine, NH₃-su absorpsiyon soğutması ve yüksek basınçlı ters osmoz su arıtma tesisi alt çevrimlerinin kullanıldığı bir kombine ısı ve güç sisteminin toplam veriminin %67'ye kadar çıkabileceği gösterilmiştir (Ouyang vd., 2020). Aframax tipi bir ham petrol tankeri için yapılan bir çalışmada ise SOFC ile gaz yakıtlı içten yanmalı makinelerin kullanıldığı hibrit bir

sistem ile, hibrit sistemin entegrasyon düzeyinin CO₂ emisyonları ve ekserjik verime etkisi incelenmiştir (Giap vd., 2020). Bir tanker ve cruise gemisinin incelendiği başka bir çalışmada ise dizel ve gaz yakıtlı makineler ile SOFC toplam güç üretimine çeşitli miktarlarda katkılarının sera gazı emisyonları ve güç üretim sistemi maliyetleri üzerine olan etkisi incelenmiştir (Baldi vd., 2020). Gemilerde gaz enjeksiyonlu makine ile SOFC kullanılan bir güç çevrimi ile ilgili başka bir çalışmada ise yakıt pilinden çıkan anot ve katot egzoz gazlarının bir kazanda yakılarak kullanılması yerine atık ısı sistemine ayrı ayrı entegrasyonu ve anottaki yanmamış hidrokarbonların içten yanmalı makede doğal gaz ile karıştırılarak birlikte enjeksiyonu önerilmiş ve önerilen sistemin emisyonlar üzerine etkileri incelenmiştir (Sapra vd., 2021).

Bu çalışmada yardımcı güç kaynağı olarak SOFC güç sisteminin bir koster için yakıt pilinin elektrokimyasal olarak, güç çevriminin ise Aspen HYSYS yazılımında termodinamik olarak modellenmesi ve simülasyonu gerçekleştirilmiştir (Aspentech Inc, 2015). Kurulan modelin ekonomik analizi yapılmış, yakıt pili çalışma sıcaklığı ve akım yoğunluğunun sistemin maliyeti ve ekserji verimi üzerine etkileri incelenmiştir. Ekonomik analiz sonuçlarına göre en uygun yakıt pili çalışma sıcaklığı ve akım yoğunluğu parametreleri belirlenmiş ve en uygun çalışma sıcaklığı koşulu için yakıt pilindeki kayıpların, akım yoğunluğu değişimine bağlı olarak etkisi incelenmiştir.

Bu çalışmada önceki çalışmalardan farklı olarak ekonomik analiz, sistemin toplam maliyeti ve sisteme sağlanan birim güç başına maliyet yerine atmosfere salınan birim CO₂ miktarı azaltma maliyeti üzerinden gerçekleştirilmiştir. Böylece elde edilen sonuçların diğer CO₂ emisyonu azaltma yöntemleri ile karşılaştırılması açısından daha gerçekçi bir yaklaşım yapılmıştır. Yine bu çalışmada, gemilerde yakıt pili kullanımı ile ilgili yapılan diğer çalışmalardan farklı olarak yakıt pili kimyasal bozulmanın voltaj düşüşündeki etkisi de dikkate alınmıştır. Ayrıca yazarların literatür taraması sırasında incelediği makalelerde gemilerde yakıt pili kullanımı ile ilgili akım yoğunluğu ve sıcaklığın sistemin maliyeti üzerindeki etkisinin incelenmediği görülmüştür. Bu incelemenin sonucunda çalışma akım yoğunluğunun seçiminin birim CO₂ azaltma maliyetini %10.0'a, sıcaklığın seçiminin ise birim CO₂ azaltma maliyetini %26.08'e kadar azalttığı hesaplanmıştır. SOFC güç sisteminin CO₂ azaltma maliyeti ise 302.2 usd/ton CO₂ olarak hesaplanmış olup literatürdeki gemilerde kullanılan yakıt pillerine göre çok daha uygun maliyetli olduğu görülmüştür. (Lloyd's Register, 2018).

2. Referans Gemi Seçimi

Günümüzde yakıt pillerinin güç kaynağı olarak kullanıldığı güç üretim tesislerinde 50 MW'ı aşan güç elde etmek mümkündür (Zhang vd., 2010). Gemiler ile ilgili yapılan çalışmalarda bugüne kadar test edilen en büyük kapasiteli yakıt pilinin gücü ise 2.5 MW'tır (Dall'Armi vd., 2021). Bu yakıt pilinin ise sadece yakıt dönüşüm ünitesi gemide test edilmiş olup yakıt pili karada test edilmiştir. Şu an Norveçte sürdürülen ve gelecekte tamamlanması beklenen ShipFC projesinde bir offshore destek gemisi için 2 MW güç üretim kapasitesine sahip bir SOFC olmak üzere 3.2 MW'a kadar çeşitli güç kapasitelerine sahip yakıt pillerinin gemilerde kullanımı gerçekleşecektir (Dall'Armi vd., 2021; De-Troya vd., 2016). Bu gelişmeler göz önüne alınarak seçilen geminin servis hızındaki yardımcı güç ihtiyacının burada verilen güç değerlerinin çok üstünde olmaması başta ekonomik analiz olmak üzere sonuçların doğruluğu açısından önemlidir. Diğer taraftan Avrupa Birliği Parlamentosu, 1 Ocak 2022'den itibaren uygulanmaya başlayacak şekilde 5.000 grostondan büyük gemilerin de kara tesislerinde olduğu gibi karbon vergisi ödemesi kararını almıştır (Marine Insight, 2020). Bu gelişme ise Avrupa Birliği karasularında çalışan ve 5.000 grostondan büyük gemiler için yakıt pili kullanımının diğer gemilere kıyasla daha uygun olabileceğini göstermektedir. Bütün bu veriler göz önüne alınarak seçilen referans geminin özellikleri Tablo 1'de verilmiştir (Bureau Veritas, 2021).

Tablo 1’de verilen referans geminin dizel ana makinesinin modeli 8DKM-28 olup özgül yakıt tüketimi %75 Maksimum sürekli güçte (MCR) 185 g/kWh olarak tespit edilmiştir (Woodyard, 2009). Dizel jeneratörlerin özgül yakıt tüketimi ise ortalama 206 g/kWh olarak kabul edilmiştir (MTU-solutions, 2019).

Tablo 1. Referans gemi özellikleri

Özellikler	Değer	Birim
Gemi adı	Breadbox Warthog	
Tip	Koster	
Dikmeler arası boy	116.2	m
Genişlik	18	m
Su çekimi	7	m
Servis hızı	15	kn
Gros tonaj	6494	
Ana makine güç ihtiyacı	2500	kW
Ana makine SFOC	185	g/kWh
Dizel jeneratör güç ihtiyacı	250x3	kW
Dizel jeneratör SFOC	206	g/kWh

3. Sistemin Modellenmesi

3.1. SOFC’nin elektrokimyasal olarak modellenmesi

Bu çalışmada CO₂ emisyonlarını en etkili düzeyde azaltmak ve yüksek maliyetine rağmen azaltılan birim CO₂ başına maliyeti düşürmek açısından yakıt olarak saf H₂ kullanılmıştır. Bu durumda SOFC’nin elektrokimyasal modelinde kullanılan tüm denklemler Tablo 2’de gösterilmiştir.

Denklem (1), (2), (3) sırasıyla anot ve katot tarafları ile toplam reaksiyonları göstermektedir. Yakıt pilinin net potansiyeli (V_{cell}) ise denklem (4) ile tespit edilmiştir. Burada V_{Nernst} , V_{act} , V_{ohm} , V_{con} sırasıyla Nernst potansiyelini, etkinleşme (aktivasyon) kayıplarını, direnç kayıplarını ve konsantrasyon kayıplarını temsil etmektedir. Nernst potansiyeli elektrokimyasal reaksiyonlar aracılığı ile elde edilebilecek teorik maksimum potansiyeldir.

Denklem (5)’te E^0 standart koşullardaki tersinir potansiyeli, \bar{R} evrensel molar gaz sabitini (J.mol⁻¹.K⁻¹), n H₂’nin elektron sayısını, F Faraday sabitini, P kısmi basıncı, an indisi anot tarafını, cat indisi katot tarafını ve T sıcaklığı (K) temsil etmektedir. E^0 , Gibbs serbest enerjisi ($\Delta\bar{g}$) ile tanımlanmakta olup denklem (6)’ya göre ifade edilir. Gibbs serbest enerjisi ise denklem (7)’de olduğu gibi sıcaklığın bir fonksiyonu olarak ifade edilebilir.

Nernst potansiyelini hesaplayabilmek için malzemelerin baca gazı çıkışındaki mol dağılımlarının bilinmesi gerekmektedir. Bunu belirleyebilmek için de yakıt ve havanın kullanım faktörlerinin bilinmesi gerekir. Yakıt için kullanım faktörü 0.85 hava içinse 0.50 seçilmiştir (Ahn vd., 2018; Ouyang vd., 2020). Ayrıca havanın %20.79 O₂, %78.21 N₂ ve %1 oranında su buharından oluştuğu kabul edilmiştir.

Etkinleşme kayıplarını hesaplamak için Tafel denklemi (8) kullanılır. Burada i seçilen akım yoğunluğu ve i_0 yer değiştirme akım yoğunluğu olup SOFC’nin katot ve anot için deneysel sonuçlardan elde edilen ampirik ifadeleri denklem (9) ve (10)’da gösterilmiştir.

Tablo 2. SOFC'nin elektrokimyasal modelinde kullanılan denklemler

Denklem	Referans	Denklem no
$2H_2 + 2O^{2-} \rightarrow 2 H_2O$	-	(1)
$O_2 + 4e^- \rightarrow 2O^{2-}$	-	(2)
$2H_2 + O_2 \rightarrow 2 H_2O$	-	(3)
$V_{cell} = V_{Nernst} - V_{act} - V_{ohm} - V_{con} [V]$	(Ahn vd., 2018)	(4)
$V_{Nernst} = E^0 - \frac{\bar{R}T}{nF} \ln \left(\frac{P_{H_2O,an}}{P_{H_2,an} \sqrt{P_{O_2,cat}}} \right) [V]$	(Ahn vd., 2018)	(5)
$E^0 = -\frac{\Delta\bar{g}}{nF} [V]$	(Ahn vd., 2018)	(6)
$\Delta\bar{g} = 0.002474T^2 + 48.996T - 243.730 [J. mol^{-1}]$	(Ahn vd., 2018)	(7)
$V_{act} = \frac{\bar{R}T}{nF} \ln \left(\frac{i^2}{i_{0,an}i_{0,cat}} \right) [V]$	(Wu ve Bucknall, 2020)	(8)
$i_{0,cat} = 3.3x10^5 \left(\frac{P_{O_2}}{P_{cat}} \right)^{0.3} \exp \left(\frac{-1.3x10^5}{\bar{R}T} \right) [A. cm^{-2}]$	(Yonekura vd., 2011)	(9)
$i_{0,an} = 3.5x10^2 \left(\frac{P_{H_2}}{P_{an}} \right)^{0.41} \left(\frac{P_{H_2O}}{P_{an}} \right)^{0.40} \exp \left(\frac{-6.2x10^5}{\bar{R}T} \right) [A. cm^{-2}]$	(Yonekura vd., 2011)	(10)
$V_{ohm} = i(\rho_{an}\delta_{an} + \rho_{cat}\delta_{cat} + \rho_{el}\delta_{el} + \rho_{int}\delta_{int}) [V]$	(Park vd., 2014)	(11)
$\rho_{an} = 2.98x10^{-5} \exp \left(\frac{-1.392}{T} \right) [\Omega. m]$	(Park vd., 2014)	(12)
$\rho_{cat} = 8.114x10^{-5} \exp \left(\frac{600}{T} \right) [\Omega. m]$	(Park vd., 2014)	(13)
$\rho_{el} = 2.94x10^{-5} \exp \left(\frac{10.350}{T} \right) [\Omega. m]$	(Park vd., 2014)	(14)
$\rho_{int} = 1.257x10^{-3} \exp \left(\frac{4.690}{T} \right) [\Omega. m]$	(Park vd., 2014)	(15)
$V_{con,cat} = -\frac{\bar{R}T}{4F} \ln \left(1 - \frac{i}{i_{O_2}} \right) [V]$	(Anyenya, 2017)	(16)
$V_{con,an} = -\frac{\bar{R}T}{2F} \left[\ln \left(1 - \frac{i}{i_{H_2}} \right) - \ln \left(1 + \frac{i}{i_{H_2O}} \right) \right] [V]$	(Anyenya, 2017)	(17)
$i_{O_2} = \frac{4FPD_{cat,eff}}{\bar{R}T\delta_{cat}} \ln \left(\frac{P}{P - P_{O_2}} \right) [A/m^2]$	(Anyenya, 2017)	(18)
$i_{H_2} = \frac{2FP_{H_2}D_{an,eff}}{\bar{R}T\delta_{an}} [A/m^2]$	(Anyenya, 2017)	(19)
$i_{H_2O} = \frac{2FP_{H_2O}D_{an,eff}}{\bar{R}T\delta_{an}} [A/m^2]$	(Anyenya, 2017)	(20)
$D_{O,j(eff.)} = \frac{1x10^{-7}T^{1.25} \varepsilon \left(\frac{1}{M_j} + \frac{1}{M_k} \right)^{0.5}}{P\zeta \left(v_j^{1/3} + v_k^{1/3} \right)} [m^2/s]$	(Park vd., 2014)	(21)
$D_{K,j(eff.)} = \frac{97r\varepsilon T^{0.5}}{\zeta M_j} [m^2/s]$	(Park vd., 2014)	(22)
$\frac{1}{D_{j(eff.)}} = \frac{1}{D_{O,j(eff.)}} + \frac{1}{D_{K,j(eff.)}} [m^2/s]$	(Park vd., 2014)	(23)
$D_{an,eff} = \left(\frac{P_{H_2}}{P_{an}} \right) D_{H_2O(eff.)} + \left(\frac{P_{H_2O}}{P_{an}} \right) D_{H(eff.)}$	(Park vd., 2014)	(24)
$D_{cat,eff} = D_{O_2(eff.)}$	(Park vd., 2014)	(25)

Direnç kayıpları elektrotların, elektrolitin ve ara bağlantı elemanlarının iç direncinden kaynaklanır ve (11-15) denklemlerinde olduğu gibi ifade edilir. Burada el ve int indisleri elektrolit ve arabağlantı elemanlarını, ρ özgül özdirenci, δ bileşenin kalınlığını temsil etmektedir. Bileşenlerin kalınlığı Tablo 3'te gösterilmiştir.

Tablo 3. Yakıt pili bileşenlerinin kalınlığı (Ahn vd., 2018)

Özellikler	Değer	Birim
δ_{an}	0.50	mm
δ_{cat}	0.05	mm
δ_{el}	0.01	mm
δ_{int}	0.01	mm

Konsantrasyon kayıpları özellikle akım yoğunluğunun çok yüksek olduğu bölgelerde baskın olup katot ve anot için denklem (16) ve (17)'deki gibi hesaplanmıştır. Burada i_{O_2} , i_{H_2} ve i_{H_2O} sırasıyla oksijen, hidrojen ve su için limit akım yoğunluklarını temsil etmektedir. Bu malzemeler için limit akım yoğunlukları ise (18-20) denklemleri yardımıyla tespit edilmektedir. Bu denklemlerde $D_{an,eff}$ ve $D_{cat,eff}$ sırasıyla anot ve katot tarafının ikili efektif difüzyon katsayılarını temsil etmektedir. Difüzyon katsayısı, adi ve Knudsen difüzyon katsayılarının tespit edilip iki katsayının harmonik ortalamasının alınması ile hesaplanır. Bu hesaplar sırasıyla (21-25) denklemleri arasında gösterilmiştir.

Burada O ve K alt indisleri adi ve Knudsen difüzyon katsayılarını, j ve k alt indisleri malzemeleri, M malzemelerin moleküler ağırlıklarını, ε anot ve katotun gözenekliliğini, ζ anot ve katotun dolaşıklığını (tortuosity), v Fuller difüzyon hacmini, r anot ve katotun gözenek çapını temsil etmektedir. Difüzyon katsayılarının hesabında kullanılan parametreler Tablo 4'te verilmiştir. Gözeneklilik ve dolaşıklık Şekil 1'de görüleceği gibi ifade edilmiştir.

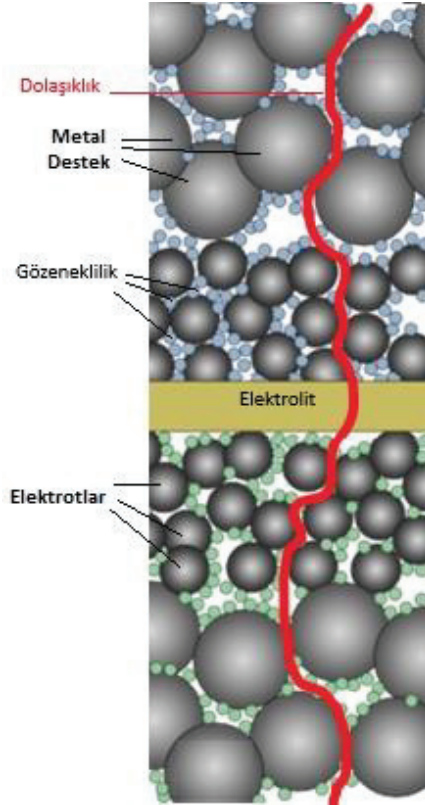
Tablo 4. SOFC'nin konsantrasyon kaybı hesabında kullanılan veriler (Park vd., 2014)

Özellikler	Değer	Birim
r	0.50	μm
ζ	6.00	-
ε_{an}	0.50	%
ε_{cat}	0.50	%
v_{O_2}	16.60	-
v_{N_2}	17.90	-
v_{H_2}	7.07	-
v_{H_2O}	12.70	-

3.2. Sistemin termodinamik olarak modellenmesi

SOFC güç sisteminin termodinamik modeli Aspen HYSYS yazılımı yardımıyla kurulmuş olup modelin şematik diyagramı Şekil 2'de gösterilmiştir (Aspentech Inc, 2015). Şekil 2'ye göre yakıt olarak kullanılan ve 350 bar basınçta depolanan saf H_2 , 1 numaralı akım olarak VLV-100 poz numaralı basınç regülatöründen 1 atm basınçta çıkış yapmıştır. Bu basınç değeri aynı zamanda yakıt pilinin hem anot hem de katot tarafındaki çalışma basıncıdır. 5 numaralı akımda ise 25 °C ve 1 atm basınçta hava temsil

edilmiştir. Yakıt ve hava daha sonra CRV-101 poz numaralı katalitik yakıcıdan çıkan egzoz gazları ile E-100 ve E-102 numaralı ön ısıtıcılardan geçerek bir miktar ısıtılmıştır. E-101 ve E-103 numaralı ısı değiştiricileri ise yakıt pilinin ısı değiştiricilerini temsil etmekte olup yakıt pilinde gerçekleşen tepkime sayesinde ön ısıtıcıdan geçen yakıt ve havayı yeniden ısıtmaktadır. Isınan hava ve yakıt, 4 ve 7 numaralı akımlar olup bir dönüşüm reaktörü olarak modellenen CRV-100 numaralı yakıt piline yakıt pili ortalama çalışma sıcaklığının 15 °C altında giriş yapmaktadırlar (Evrin ve Dincer, 2019). Burada denklem (1), (2) ve bunların toplamı olan denklem (3)'te görülen elektrokimyasal tepkimeler sonucunda güç elde edilmektedir. Yakıt pilinin anot ve katot tarafından çıkan egzoz gazları tek bir akım halinde temsil edilerek yakıt pili ortalama çalışma sıcaklığının 15 °C üstünde CRV-101 numaralı katalitik yakıcıya girmiş ve yakıt pilinden çıkan yanmamış H₂ de yakılarak tüketilmiştir. Yanan H₂ ile birlikte daha da ısınan baca gazı E-100 ve E-102 numaralı ön ısıtıcılardan geçerek atmosfere salınmaktadır. Atmosfere salınan bu gaz CO₂ içermemektedir. 14 numaralı akımda ise yakıt pilinden fazla ısıyı çekerek ısıl dengeyi sağlamak amacıyla deniz suyu P-100 numaralı pompaya giriş yapmaktadır.

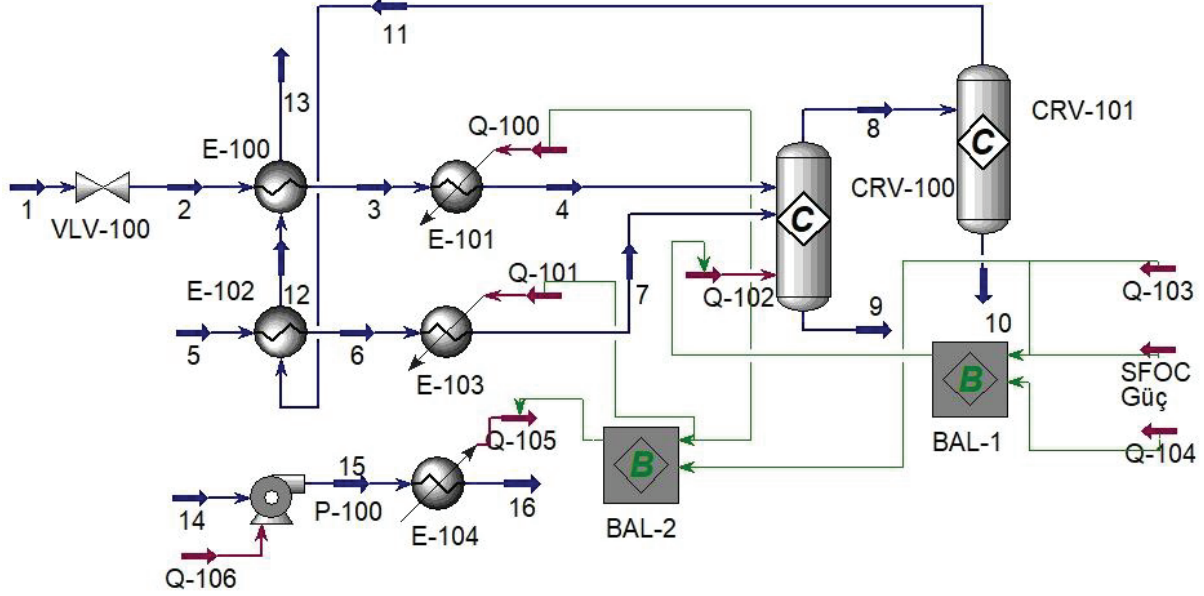


Şekil 1. Gözeneklilik ve dol aşıklığın yakıt pili yapısı üzerindeki gösterimi (Dogdibegovic vd., 2019)

Burada bütün ısı değiştiricileri, katalitik yakıcı ve yakıt pilindeki basınç kayıpları ihmal edilmiştir. Ayrıca ısı değiştiricileri ve katalitik yakıcıdaki ısı kayıpları da ihmal edilmiştir (Ahn vd., 2018). Yakıt pilindeki ısı kaybı ise yakıt pilinde elde edilen toplam enerjinin %5'i kabul edilmiştir (Anyenya, 2017). Yakıt pilinin ısı değiştiricilerinde pinç noktası sıcaklık farkı 30 K olup diğer ısı değiştiricilerinde minimum 15 K'dir (Evrin ve Dincer, 2019; Nordin ve Majid, 2016). Pompa için verim %90 alınmıştır (Park vd., 2014). Deniz suyu pompa giriş sıcaklığı en kritik sıcaklık olan 32 °C ve çıkış sıcaklığı 37 °C alınmıştır (Bureau Veritas, 2020). Malzemelerin termodinamik özelliklerinin belirlenmesinde Peng-Robinson denklem takımı kullanılmıştır (Peng ve Robinson, 1976).

Sistem elemanlarının güç ve termodinamik denklemleri ise Tablo 5'de gösterilmiştir. Burada *DC – AC, in, out, isen, loss, pump, HEX, a, b, net, th, sys* indisleri sırasıyla doğru akımdan alternatif akıma

dönüştürülmeyi, giren ve çıkan akımları, izentropik durum değişimini, kaybı, pompayı, ısı değiştiricisini, ısı değiştiricisinin sıcak ve soğuk taraflarını, toplamı termal verimi, ve sistemi temsil etmektedir. A_{cell} , η , \dot{m} , h , \dot{Q} , \dot{W} , LHV parametreleri ise sırasıyla toplam SOFC aktif hücre alanını, verimi, kütle debisini, entalpiyi, birim zamanda iletilen ısıyı, gücü ve alt ısı değeri temsil etmektedir.



Şekil 2. SOFC güç çevriminin şematik modeli

Tablo 5. SOFC güç çevriminin termodinamik modelinin denklemleri

Denklem	Denklem no
$\dot{W}_{SOFC} = i \cdot A_{cell} \cdot V_{cell} \cdot \eta_{DC-AC} [W]$	(26)
$\dot{W}_{SOFC} = (\dot{m}_{an,in} \cdot h_{an,in} - \dot{m}_{an,out} \cdot h_{an,out}) + (\dot{m}_{cat,in} \cdot h_{cat,in} - \dot{m}_{cat,out} \cdot h_{cat,out}) - \dot{Q}_{loss} [W]$	(27)
$\dot{W}_{pump} = \dot{m}(h_{out,ideal} - h_{in})\eta_{isen,pump} [W]$	(28)
$\dot{Q}_{HEX} = \dot{m}_a(h_{a,out,ideal} - h_{a,in}) = \dot{m}_b(h_{b,out,ideal} - h_{b,in}) [W]$	(29)
$\dot{W}_{net} = \dot{W}_{SOFC} - \dot{W}_{pump} [W]$	(30)
$\eta_{th,sys} = \dot{W}_{net} / (\dot{m}_{H_2} \cdot LHV_{H_2})$	(31)

4. Sistemin Ekonomik Analizi

Bu çalışmada sistemin ekonomik analizi gemiler için yapılan önceki çalışmalardan farklı olarak azaltılan birim CO₂ miktarına bağlı olacak şekilde gerçekleştirilmiştir. Böylece elde edilen sonuçlar diğer CO₂ emisyonu azaltma yöntemleriyle daha gerçekçi bir şekilde karşılaştırılabilecektir. Azaltılan birim CO₂ başına maliyet, belirlenen referans gemi ve güç kaynağı olarak buna uygun seçilen dizel yakıtlı jeneratörlerin değiştirilip yerine bu jeneratörlerin ortalama çalışma yükünü sağlayan SOFC güç sisteminin kullanılmasından kaynaklanan maliyet artışı ve atmosfere salınan CO₂ miktarının azalışı verilerinden tespit edilmiştir. Hem referans geminin önceki güç çevriminin hem de yeni güç çevriminin yıllık toplam maliyetleri, toplam yaşam döngüsü maliyetlerinin geminin çalışma ömrüne bölünmesiyle elde edilmiştir. Toplam yaşam döngüsünün maliyetlerini ise yakıt maliyetleri ve ilk yatırım maliyetleri

oluşturmaktadır. İşçilik maliyetlerinin her iki senaryoda da yakın değerlerde olacağı ve bakım-tutum-onarım maliyetlerinin toplam yaşam maliyeti üzerinde etkisinin küçük olacağı düşünülmüştür. Bu nedenle yakıt maliyetleri dışındaki, bakım-tutum-onarım maliyetleri ile işçilik maliyetleri gibi diğer işletme maliyetlerinin etkisi dikkate alınmamıştır (Park vd., 2014).

Yakıt pilleri malzeme faz değişimi, ürün ayrışması, mikroyapısal değişiklikler, kırılma, hücrede kompozit yapıda bulunan malzemelerin ayrışması, membrandaki zehirlenme, nemlilik, safsızlıklar, oksitlenme gibi sebeplerle zamanla kimyasal olarak bozulmaya uğrayabilir. Gemiler için yapılan önceki çalışmalardan farklı olarak bu çalışmada yakıt pilinin kimyasal bozulması sebebi ile potansiyelinin düşüşü de dikkate alınmıştır. Potansiyeldeki bu düşüş elde edilen gücü azaltacaktır. Bu durumun önüne geçmek için yakıt pili kaybolan gücü de temin edecek şekilde seçilmiştir. Dolayısıyla artan SOFC ilk yatırım ve yakıt maliyetleri de bu çalışmada göz önüne alınmıştır. Yakıt pili çalışma ömrü sonunda kimyasal bozulmadan kaynaklanan potansiyel kaybı aşağıdaki denklem yardımıyla tespit edilir:

$$Potansiyel\ kaybı = 100 \times \left(1 - \frac{r_d}{100}\right)^{t/1000} [\%] \quad (32)$$

Burada r_d SOFC yakıt pili için bin saatteki yüzdelik potansiyel kaybı, t ise seçilen SOFC çalışma ömrünü temsil etmekte olup bu değerler Tablo 6'da gösterilmiştir. Güç çevrimlerinin ilk yatırım maliyetleri ise ekipmanların satın alma maliyetlerinin bir faktör ile çarpılmasından tespit edilmiştir. Ayrıca ekipmanların ilk yatırım maliyeti hesaplanırken borçlanmadan kaynaklanacak faiz de dikkate alınmıştır. Vergiler ve sigorta ücretleri ise dikkate alınmamıştır. Ekonomik analiz ile ilgili kabuller Tablo 6'da, ekipman satın alma ücretlerinin literatürden tespit edilen denklemleri ise Tablo 7'de gösterilmiştir.

Tablo 6. Ekonomik analiz için yapılan kabuller

Özellikler	Değer	Birim	Referans
Potansiyel kaybı	0.75	%/1000 saat	(Sohal, 2009)
Seçilen SOFC çalışma ömrü	50,000	saat	(Zhang vd., 2010)
Dizel yakıt fiyatı	550	USD/ton	(Ship&Bunker, 2021)
H ₂ yakıt fiyatı	3,500*	USD/ton	(Wu ve Bucknall, 2020)
Gemi toplam yaşam ömrü	25	yıl	(Luo ve Wang, 2017)
Yıllık çalışma süresi	5000	saat	Bu çalışma
Dizel jeneratörlerin ortalama çalışma yükünün nominal yüke oranı	55	%	(Aijjou vd., 2019)
Ölçülen ortalama yakıt tüketiminin ürün kataloğundaki tüketime oranı	123.8	%	(Aijjou vd., 2019)
Toplam ilk yatırım maliyet faktörü	2.5		(Costa vd., 2011)
Faiz oranı (ir)	4	%/yıl	(Luo ve Wang, 2017)

* Hidrojen yakıt fiyatı başta üretim yöntemi olmak üzere arz-talep dengesi gibi etkenler sebebiyle büyük değişkenlikler gösterebilmektedir.

Tablo 7'de verilen $CEPCI_T$, f_M , f_P ve f_T sırasıyla kimya mühendisliği tesis maliyet indeksinin 2020'deki değerinin referans yıldaki değerine oranını, malzeme faktörünü, basınç faktörünü ve sıcaklık faktörünü temsil etmektedir. Bu faktörler Tablo 8'de verilmiş olup bütün ısı değiştiricilerinde düşük dereceli

paslanmaz çelik (SS) kullanılması öngörülmüştür (Hackl ve Harvey, 2013). $CEPCI_r$ değerleri referans yıllarına göre pompalar, ısı değiştiricileri, dizel jenaratör, dönüştürücü ve SOFC için sırasıyla 584, 391, 567 ve 394 olarak tespit edilmiştir (Shirmohammadi vd., 2021). $CEPCI$ değeri 2020 yılı için 594 olup bu bilgiler doğrultusunda $CEPCI_r$ değerleri her bir ekipman için ayrı ayrı tespit edilmiştir (Shirmohammadi vd., 2021). Dizayn basıncı çalışma basıncının 1.5 katı olarak kabul edilmiş, 500 °C'nin üstündeki sıcaklıklarda çalışan ısı değiştiricileri için de sıcaklık faktörü 2.1 olarak alınmıştır (Bureau Veritas, 2020). Yakıt depolama tankı ile katalitik yakıcının maliyetleri ise dikkate alınmamıştır.

Tablo 7. Ekipmanların satın alma maliyetleri

Ekipmanlar	Denklem	Referans	Denklem no
Pompa	$C_{pump} = 3.500\dot{W}_{pump}^{0.45} \cdot CEPCI_{r,pump}$	(Ganjehkaviri ve Jaafar, 2014)	(33)
Isı değiştiricisi	$C_{HEX} = 32.800 \left(\frac{A_{HEX}}{80} \right) \cdot CEPCI_{r,HEX} \cdot f_M \cdot f_P \cdot f_T$	(Hackl ve Harvey, 2013)	(34)
Dizel jeneratör	$C_{DE} = 1.013\dot{W}_{DE}^{0.8} \cdot CEPCI_{r,DE}$	(Fioriti vd., 2017)	(35)
Dönüştürücü (inverter)	$C_I = 10^5 (\dot{W}_{total}/500)^{0.7} \cdot CEPCI_{r,I}$	(Park vd., 2014)	(36)
SOFC	$C_{SOFC} = A_{cell} (2.96T_{SOFC} - 1.907) \cdot CEPCI_{r,SOFC}$	(Park vd., 2014)	(37)

Tablo 8. Isı değiştiricisi maliyet hesabında kullanılan malzeme, basınç, sıcaklık faktörleri (Hackl ve Harvey, 2013)

Malzeme	Faktör (f_M)	Basınç (bar)	Faktör (f_P)	Sıcaklık (°C)	Faktör (f_T)
CS	1.0	0.01-0.1	2.0	0-100	1.0
Düşük dereceli SS	2.1	0.1-0.5	1.3	100-300	1.6
Yüksek dereceli SS	3.2	0.5-7	1.0	300-500	2.1
Monel	3.6	7-50	1.5		
Inkomel	3.9	50-100	1.9		
Nikel	5.4				
Titanyum	7.7				
LTCS	1.5				

Tablo 7'ye göre ısı değiştiricilerinin maliyetini bulmak için ısı değiştiricilerinin yüzey alanlarının tespit edilmesi gerekmektedir. Yüzey alanları ise aşağıdaki denklemler yardımıyla tespit edilir (Hackl ve Harvey, 2013):

$$Q_{HEX} = U \cdot A_{HEX} \cdot \Delta T_m [W] \quad (38)$$

$$\Delta T_m = F_t \cdot \Delta T_{lm} [K] \quad (39)$$

$$\Delta T_{lm} = \frac{(T_1 - t_2) - (T_2 - t_1)}{\ln \left(\frac{T_1 - t_2}{T_2 - t_1} \right)} [K] \quad (40)$$

$$F_t = \frac{\sqrt{(R^2 + 1)} \ln \frac{(1 - S)}{(1 - R \cdot S)}}{(R - 1) \ln \frac{2 - S(R + 1 - \sqrt{(R^2 + 1)})}{2 - S(R + 1 + \sqrt{(R^2 + 1)})}} \quad (41)$$

$$S = \frac{(t_2 - t_1)}{(T_1 - t_1)} \quad (42)$$

$$R = \frac{(T_1 - T_2)}{(t_2 - t_1)} \quad (43)$$

Burada U , F_t , ΔT_{lm} , T_1 , T_2 , t_1 ve t_2 sırasıyla toplam ısı transfer katsayısını, gövde-boru tipli ve karşıt akışlı bir ısı değiştiricisi için doğrulama faktörünü, sıcaklık farkının logaritmik ortalamasını, ısı değiştiricisi girişindeki sıcak akışkanın sıcaklığını, çıkıştaki sıcak akışkanın sıcaklığını, girişteki soğuk akışkanın sıcaklığını ve çıkıştaki soğuk akışkanın sıcaklığını temsil etmektedir.

İlk yatırım maliyetinin (CAPEX) faiz etkisiyle yıllık ödeme miktarı, sermaye dönüşüm faktörü (CRF) yardımıyla hesaplanır. Yıllık ilk yatırım maliyeti miktarı (ACAPEX) ve CRF aşağıdaki denklemler yardımıyla hesaplanmıştır (Güler ve Ergin, 2021):

$$CRF = \frac{ir(ir + 1)^n}{(ir + 1)^n - 1} \quad (44)$$

$$ACAPEX = CAPEX \cdot CRF \text{ [milyon USD]} \quad (45)$$

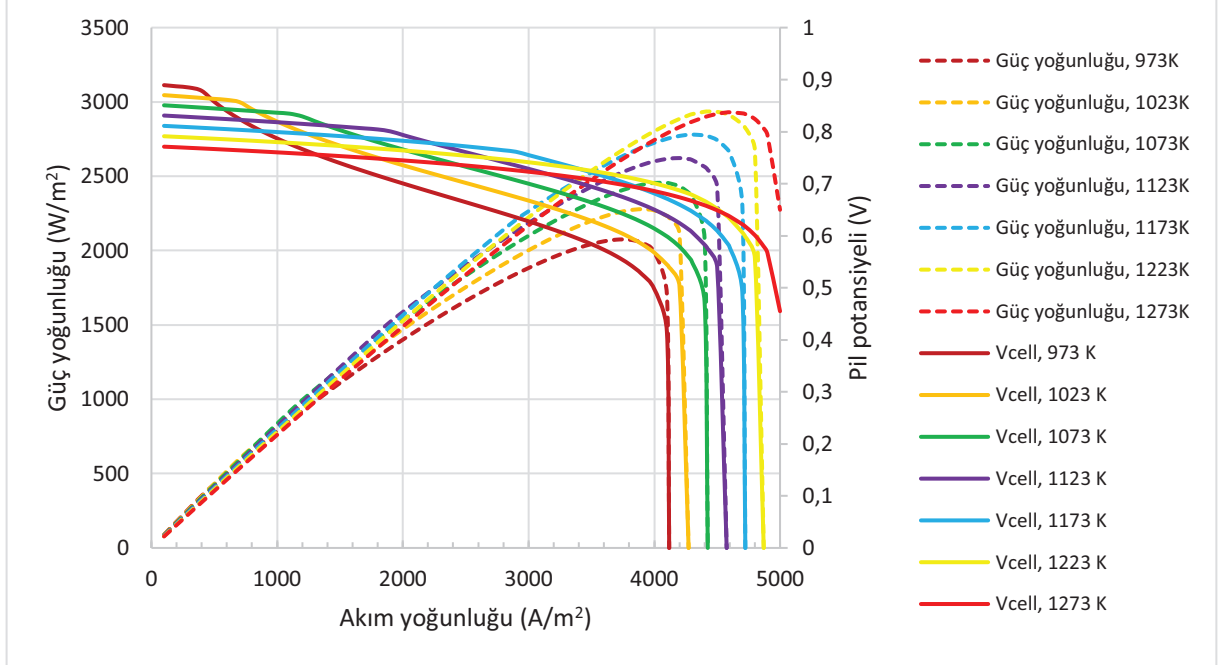
Burada n SOFC için pilin yıllık ömrü olup Tablo 6'da verilen saatlik çalışma ömrü ile yıllık çalışma süresi verilerinden 10 yıl olarak hesaplanmış ve diğer ekipmanlar için geminin çalışma ömrü olan 25 yıl olarak kabul edilmiştir.

5. Bulgular ve Tartışma

SOFC çalışma sıcaklığı ve akım yoğunluğunun pil potansiyeli ve güç yoğunluğu üzerine etkisi Şekil 3'te gösterilmiştir. Pil potansiyeli literatüre uygun bir şekilde direnç ve etkinleşme kayıplarının etkisiyle artan akım yoğunluğuna bağlı olarak giderek azalmış ve limit akım yoğunluğuna yaklaşıncaya aniden düşmüştür (Sohal, 2009). Düşük akım yoğunluklarında pil potansiyelinin değeri, düşük sıcaklık değerlerinde çalışan yakıt pilleri için daha yüksektir. Ancak akım yoğunluğu arttıkça yüksek sıcaklıkta çalışan yakıt pilleri, pil potansiyeli açısından daha avantajlıdır. Bu durum etkinleşme kayıplarının yüksek sıcaklarda etkili olabilmesi için düşük sıcaklıklara kıyasla daha yüksek akım yoğunluğu gerektirmesinden kaynaklanır. Örneğin çalışma sıcaklığı 1173 K olan yakıt pilinde etkinleşme kaybının etkili olmaya başladığı akım yoğunluğu 2,800-3,000 A/m² civarında iken 973 K çalışma sıcaklığında 300-500 A/m² civarındadır. Güç yoğunluğu ise artan akımla birlikte bütün sıcaklık değerlerinde konsantrasyon kaybının etkili olmaya başladığı bölgeye kadar pik yapar ve daha sonra pil potansiyelinde olduğu gibi aniden düşer.

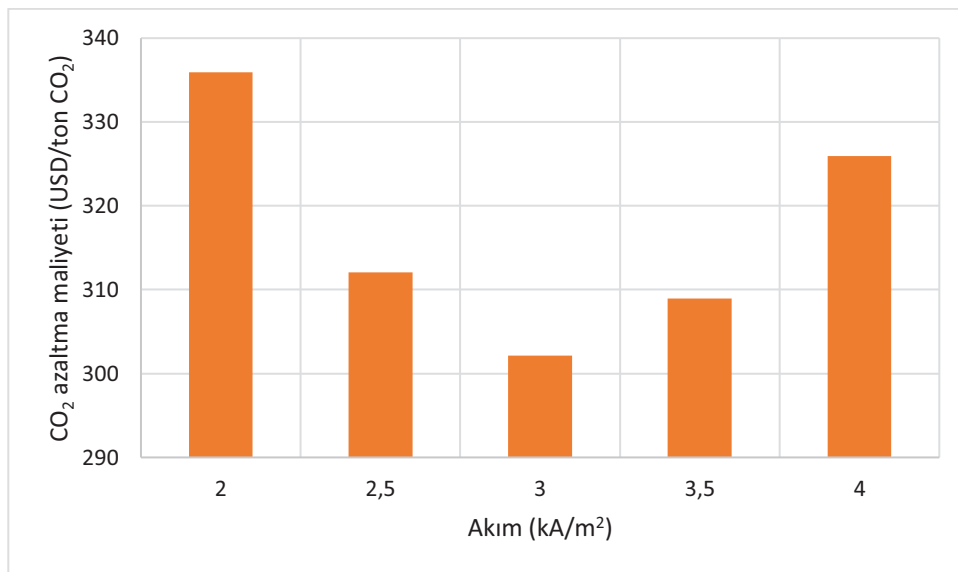
Pil potansiyeli sistemin verimini, dolayısıyla kullanılacak yakıt miktarı ve yakıt maliyetini etkiler. Güç yoğunluğu ise SOFC'nin alanını ve dolayısıyla ilk yatırım maliyetini belirler. Buna göre akım yoğunluğunun artışı yakıt maliyetini artırırken SOFC'nin ilk yatırım maliyetini azaltacaktır. Böylece seçilen çalışma sıcaklığı için maliyeti minimize eden bir akım değeri olacaktır. Sıcaklık için durum biraz daha farklı olup artan sıcaklık ile gereken pil alanı ve ilk yatırım maliyeti yine azalacak ancak kullanılan

malzemelerin sıcaklığa daha mukavim ve daha zor üretilebilir olması ilk yatırım maliyetini artıracaktır. Sıcaklığın ilk yatırım maliyeti üzerindeki etkisi denklem (36)'da gösterilmiştir. Ayrıca sıcaklığın elde edilebilecek potansiyel üzerindeki etkisi seçilen akım yoğunluğuna bağlı olarak da değişkenlik göstermektedir.



Şekil 3. SOFC çalışma sıcaklığı ve akım yoğunluğunun pil potansiyeli ve güç yoğunluğu üzerine etkisi

Bu bulgular sonucunda sistemin maliyetini minimize eden SOFC akım yoğunluğu ve sıcaklığı parametrik bir çalışma ile tespit edilmiştir. Akım yoğunluğunun ve sıcaklığın CO₂ azaltma maliyeti üzerine etkisi sırasıyla Şekil 4 ve 5'te gösterilmiştir.

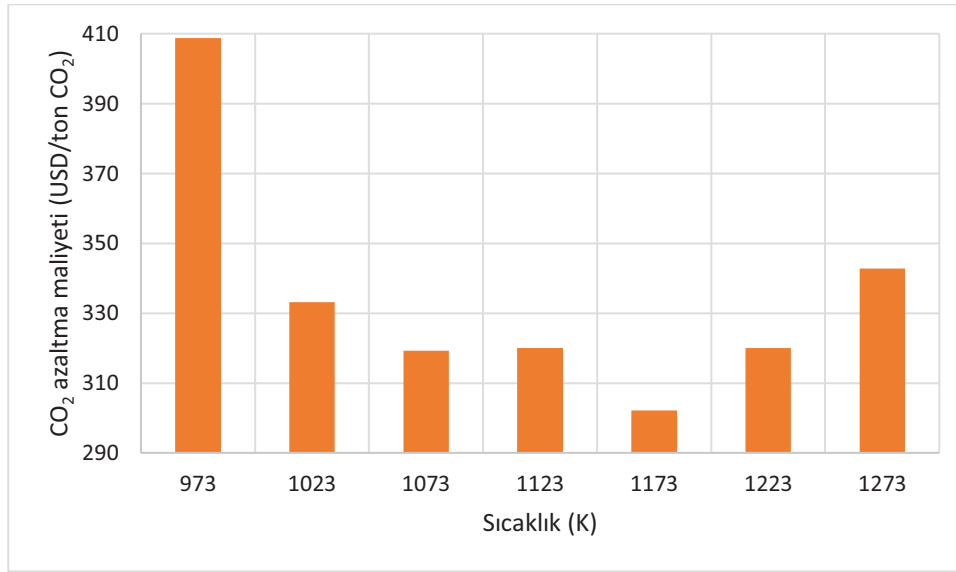


Şekil 4. SOFC akım yoğunluğunun CO₂ azaltma maliyeti üzerine etkisi

Akım yoğunluğu için 2-4 kA/m² aralığı incelenmiş olup Şekil 4'e göre maliyet açısından en uygun akım değeri 3 kA/m² değeri olmuştur. Literatürde seçilen çalışma akım yoğunlukları 3-5 kA/m² olup sonuç

literatürle uyumludur (Ahn vd., 2018; Anyenya, 2017; Park vd., 2014). Burada seçilen çalışma sıcaklığı ise 1173 K'dir.

Sıcaklık içinse 973-1273 K aralığı incelenmiş olup Şekil 5'e göre en uygun sıcaklık değeri 1173 K olarak bulunmuştur. Burada seçilen akım yoğunluğu ise 3 kA/m²'dir. Akım yoğunluğundan farklı olarak burada birim CO₂ azaltma maliyeti parabolik bir eğri yerine dalgalanma göstermiştir. Bu durum daha önce de belirtildiği üzere artan sıcaklık ile ihtiyaç duyulan SOFC yüzey alanının azalması, malzeme değerinin artması ve elde edilen potansiyelin değişkenlik göstermesinden kaynaklanır. Elde edilen potansiyel farklı sıcaklıklar için $V_{973K} < V_{1023K} < V_{1073K} < V_{1273K} < V_{1123K} < V_{1223K} < V_{1173K}$ şeklindedir. Sonuç olarak incelenen koşullarda akım yoğunluğunun seçimi birim CO₂ azaltma maliyetini %10.0'a, sıcaklığın seçimi ise birim CO₂ azaltma maliyetini %26.1'e kadar azaltmıştır.



Şekil 5. SOFC sıcaklığının CO₂ azaltma maliyeti üzerine etkisi

1173 K çalışma sıcaklığı ve 3kA/m² akım yoğunluğundaki SOFC güç sistemi için CO₂ azaltma maliyeti 302.2 USD/ton CO₂ olup literatürde çeşitli gemi tipleri için H₂ yakıtlı yakıt pilleri için bu değerler 1.000 USD/ton CO₂'in üstündedir (Lloyd's Register, 2018). Üstelik referans çalışmada ekipman maliyetinde önemli yere sahip olan faiz oranı yalnızca %1 kabul edilmiştir. Referans çalışmada seçilen yakıt pilinin tipi, çalışma koşulları vs. bilinmemekle birlikte bu çalışmada hesaplanan maliyet literatüre göre oldukça düşüktür. Yine aynı çalışmada yakıt olarak NH₃'ün kullanıldığı yakıt pilleri için bu maliyet 700-800 USD/ton CO₂ civarındadır. Referans olarak kullanılan çalışmada incelenen elektrik, tek başına veya hibrit H₂ yakıtlı içten yanmalı makine, tek başına veya hibrit NH₃ yakıtlı içten yanmalı makine, biyoyakıt gibi sıfır emisyonlu diğer teknoloji ve yöntemler arasında en ucuz maliyete sahip olduğu tespit edilen yöntem biyoyakıt kullanımı olup maliyeti hem %1 hem de %10 faiz oranları için 250 USD/ton CO₂ civarındadır. Bu çalışmadan elde edilen sonuçlar SOFC güç sisteminin biyoyakıt kullanımı hariç karşılaştırılan diğer karbondioksit emisyon azaltım yöntemlerinden daha ucuz olduğunu göstermektedir. 3,000 kW güce sahip sıvılaştırılmış doğal gaz yakıtlı bir makine için uygulanan ve %90 oranında tutum sağlayan bir karbon tutum ve depolama sisteminin (CCS) maliyeti ise 98 €/ton CO₂ olup bu çalışmada elde edilen sonuçlara göre maliyet açısından çok daha iyidir (Feenstra vd., 2019). Ayrıca CO₂ emisyonlarını azaltmada etkili bir diğer yöntem olan hız düşürme yöntemi IMO'nun gelecekteki CO₂ emisyonları hedeflerini sağlayabilmekte, hatta bazı gemi tipleri ile yakıt ve navlun koşulları için maliyet yerine kar bile getirebilmektedir (Güler ve Ergin, 2021). Avrupa'daki karbon vergisi fiyatları ise 2021 yılı şubat ayı itibari ile 40 €/ton CO₂'i geçmiştir (Buli ve Abnett, 2021). Gelecekte bu fiyatların daha

da artacağı öngörülse de bugünün fiyatlarıyla çalışmada önerilen güç sistemini kullanmak yerine karbon vergisi ödemek işletmeciler için maliyet açısından daha cazip görünmektedir (Lloyd's Register, 2018). Bu sonuçlarla birlikte değerlendirildiğinde yakıt pillerinin maliyetlerinin azaltılması yönünde daha fazla gelişime ihtiyaç duyulduğu görülmektedir.

1173 K çalışma sıcaklığı ve 3kA/m² akım yoğunluğundaki SOFC güç sisteminin toplam termal verimi, sistem sayesinde azaltılan CO₂ emisyon oranı, sistemin toplam yıllık maliyeti ile referans geminin güç sisteminin verimi ve toplam yıllık maliyeti (ATC) Tablo 9'da SOFC ömrü başlangıç (1 alt indisi) ve bitiş koşulları (2 alt indisi) için gösterilmiştir. Tabloda toplam yıllık maliyete daha önce de belirtildiği üzere kimyasal bozulmadan kaynaklı verim kaybını telafi eden ek yakıt maliyeti de dahil edilmiştir.

Literatürde kimyasal bozulmanın ihmal edildiği benzer çalışma koşullarına sahip bir SOFC-GT hibrit sisteminin toplam termal verimi %61.31 olup bu çalışmada kimyasal bozulmanın etkisinin olmadığı durumda ise toplam termal verim %51.05'tir (Ahn vd., 2018). Aradaki bu farkın temel sebebi bu çalışmada elde edilen atık ısının GT veya benzeri bir güç üretim sistemi ile atık ısının değerlendirilmemesidir. Koster oldukça küçük bir gemi tipi olup GT gibi ekipmanların güç üretim sistemlerine entegrasyonu hacim ve alan sınırlamaları nedeniyle oldukça güçtür. Ancak daha büyük tipteki gemilerin ana makinelerinin de dahil edildiği kombine güç sistemleri ile bu verim çok daha yüksek olacaktır. Referans çalışmanın koşulları ile gerçekleştirilen validasyon sonucunda hesaplanan güç yoğunluğu değeri referans çalışmadan %4.68 farklılık göstermekte olup bu fark kabul edilebilir düzeydedir. Tablo 9'a göre kimyasal bozulma etkisiyle sistemin toplam verimi %29.38 azalmıştır. SOFC güç sisteminin termal verimi her iki koşulun aritmetik ortalaması kabul edilecek olursa %43.58 olacaktır. Bu durumda sistemin verimi geminin referans yardımcı güç sisteminin veriminden %20.7 daha fazladır. Azaltılan CO₂ miktarı ise gemiden salınan toplam CO₂ miktarının %24.27'si kadar olmuştur. Sadece yardımcı güç sistemini SOFC olarak değiştirmek bile CO₂ emisyonlarının büyük ölçüde azalmasını sağlamıştır.

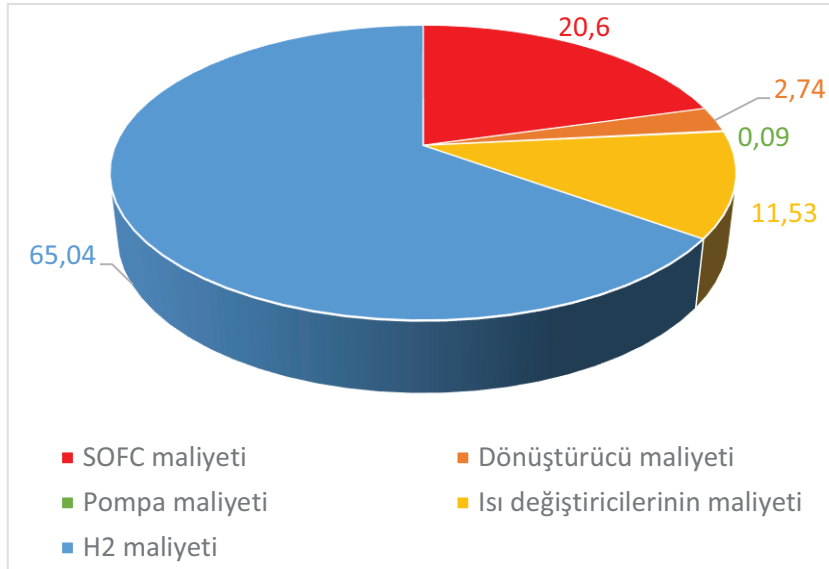
Tablo 9. 1173 K çalışma sıcaklığı ve 3kA/m² akım yoğunluğundaki SOFC ile referans güç sisteminin sonuçları

Özellikler	Değer	Birim
$\eta_{th,1}$	51.05	%
$\eta_{th,2}$	35.04	%
$\eta_{th,DE}$	36.11	%
CO ₂ azaltımı	24.27	%
ATC _{SOFC}	775.3	k USD
ATC _{DE}	321.3	k USD

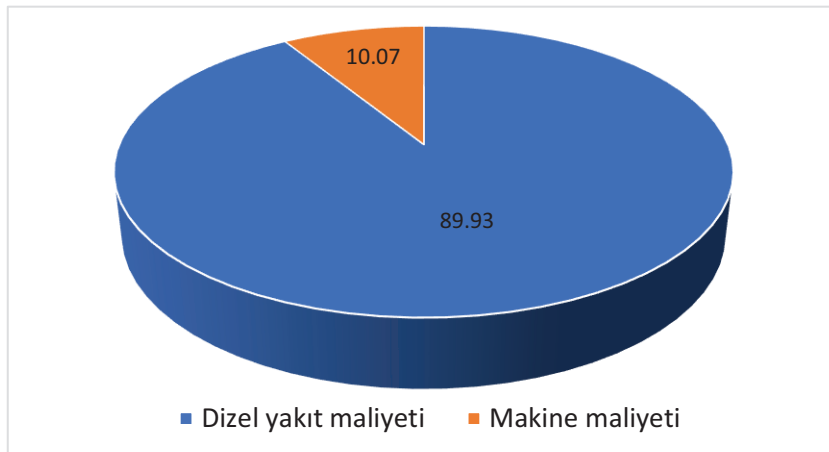
1173 K çalışma sıcaklığı ve 3kA/m² akım yoğunluğundaki SOFC güç sistemi ile geminin referans güç sisteminin maliyet bileşenleri yüzdelik olarak Şekil 6 ve Şekil 7'de gösterilmiştir. Her iki şekil için de maliyetin en büyük kaynağının yakıt olduğu görülmektedir. Şekil 6'ya göre H₂'nin maliyeti toplam maliyetin %65.28'ini oluşturmaktadır. Sistemin birim CO₂ azaltma miktarı başına maliyeti incelendiğinde ise yakıt maliyetinin toplam maliyetin %47.42'sini oluşturduğu hesaplanmıştır. Aradaki fark referans güç sistemindeki yakıt maliyetinin de yüksek olmasıyla ilgilidir.

H₂'nin maliyetini artıran en büyük unsurlardan birisi sıkıştırma, depolama ve dağıtım (CSD) maliyeti olup bu maliyet 850-1.350 kg/günlük kapasite koşullarında çeşitli taşıma araçları için 1.10-2.70 USD/kg

arasında değişmektedir (Parks vd., 2014). Bugünün koşullarında günlük taşıma kapasitesi düşük olup gelecekte kapasitenin artmasıyla maliyetin düşmesi beklenmektedir. H₂'nin üretim maliyeti ise üretim kaynağına bağlı olmakla birlikte günümüzde 0.95-3.5 USD/kg arasında değişkenlik göstermektedir (Biol, 2019; Gielen ve Taibi, 2019). Yapılabilecek yığın üretim ve ekipman maliyetlerindeki düşüş sayesinde elektroliz yöntemiyle 2040 yılına kadar sıfır CO₂ emisyonlu üretim maliyetinin 3.5'tan 1.4-1.5 USD/kg civarlarına kadar düşmesi beklenmektedir (Gielen ve Taibi, 2019; Giers vd., 2020). Maliyeti artıran en büyük ikinci faktör ise yakıt pili ilk yatırım maliyetidir. Bu maliyeti güç yoğunluğu, sıcaklığa göre seçilen malzeme değeri gibi faktörler etkilese de maliyetin en büyük kaynağı kimyasal bozulma dolayısıyla pilin çalışma ömrüdür. Üstelik bu kimyasal bozulmanın azalışı sistemin verimini artıracak, dolayısıyla güç telafisinde kullanılan dizel yakıtın maliyetini ve atmosfere salınan CO₂ emisyon miktarını da azaltacaktır. Bu çalışmada kullanılan SOFC'nin kimyasal bozulmadan kaynaklı kaybı 1.000 saatte 6 mV yerine yalnızca 1 mV ve buna göre seçilen SOFC ömrü gemi ile eşdeğer olsaydı SOFC güç sisteminin birim CO₂ azaltma maliyeti %14.08 daha az olacaktı.



Şekil 6. 1173 K çalışma sıcaklığı ve 3kA/m² akım yoğunluğundaki SOFC güç sisteminin yüzdeler olarak maliyet bileşenleri

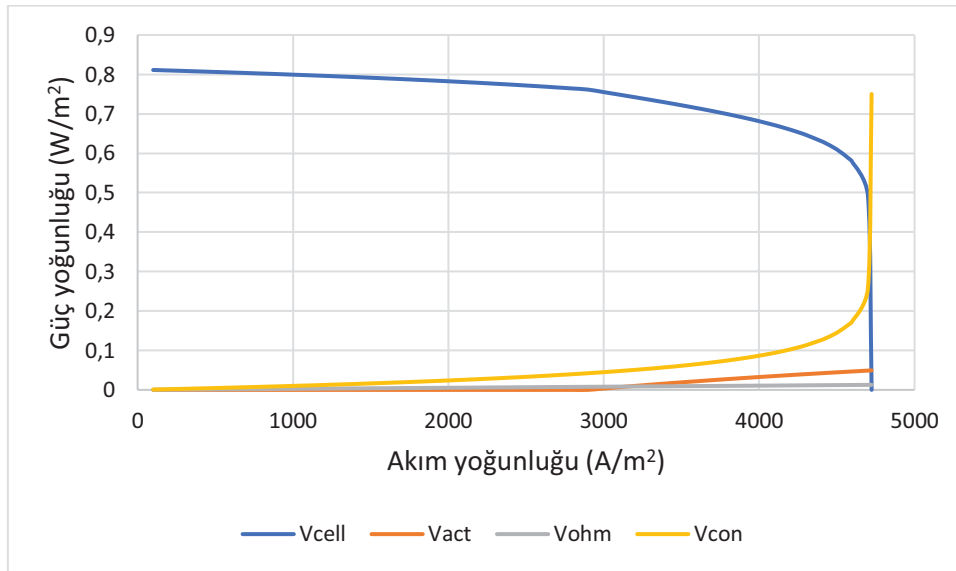


Şekil 7. Referans güç sisteminin yüzdeler olarak maliyet bileşenleri

Sistemin 1173 K sıcaklık ve 3kA/m^2 akım yoğunluğundaki çalışma koşullarının temel kayıp mekanizmaları ile net potansiyelinin akım yoğunluğuna bağlı değişimi ise Şekil 8’de gösterilmiştir. Şekil 8’e göre direnç ve etkinleşme kayıplarının etkisi oldukça küçük olup sistemin net potansiyelini konsantrasyon kayıpları belirlemektedir. Özellikle yüksek akım değerlerinde konsantrasyon kayıpları pil potansiyeli üzerinde daha baskın olmaktadır.

6. Sonuçlar

Bu çalışmada bir koster için SOFC güç sisteminin elektrokimyasal ve termodinamik olarak modellenmesi ve Aspen HYSYS yazılımında simülasyonu gerçekleştirilmiştir. Alternatif CO₂ emisyon azaltma yöntemleri ile fizibilite ve maliyet açısından daha etkin bir karşılaştırma yapabilmek için birim CO₂ azaltma maliyeti üzerinden sistemin ekonomik analizi gerçekleştirilmiştir. Ekonomik analiz, çalışmada kullanılan geminin referans güç sisteminin bu çalışmada önerilen güç sistemiyle değiştirilmesinden kaynaklanan maliyet artışı ve azaltılan CO₂ emisyon miktarı değerlerinden yola çıkılarak gerçekleştirilmiştir. Kurulan model üzerinden yakıt pilinin farklı çalışma sıcaklıkları ve akım yoğunluklarının ekonomik analiz üzerine etkileri incelenmiştir.



Şekil 8. Sistemin temel kayıp mekanizmaları ile net potansiyelinin akım yoğunluğuna bağlı değişimi

SOFC'nin çalışma akım yoğunluğunun artırılması güç yoğunluğunu artırıp, ihtiyaç duyulan pil yüzey alanını ve SOFC ilk yatırım maliyetini azaltır, ancak pil verimini düşürür. SOFC'nin çalışma sıcaklığının artırılması ise yine ihtiyaç duyulan pil yüzey alanını ve SOFC ilk yatırım maliyetini azaltırken, daha değerli malzeme kullanımını gerektirir, kayıp mekanizmalarına göre pil verimini etkiler. Sonuç olarak incelenen koşullarda akım yoğunluğunun seçimi birim CO₂ azaltma maliyetini %10.0'a, sıcaklığın seçimi ise birim CO₂ azaltma maliyetini %26.08'e kadar azaltmıştır.

Uygun çalışma koşullarında SOFC güç sistemi için CO₂ azaltma maliyeti 302.2 USD/ton CO₂ olarak hesaplanmış olup literatürdeki H₂ ve NH₃ yakıtlı, gemilerde kullanılan yakıt pillerine göre çok daha uygun maliyetlidir. Ayrıca yine literatürdeki elektrik, hibrit veya tek başına H₂ yakıtlı içten yanmalı makine, hibrit veya tek başına NH₃ yakıtlı içten yanmalı makine gibi sıfır emisyonlu diğer CO₂ azaltma teknoloji ve yöntemlerine göre daha uygun maliyetli olup, biyoyakıt kullanımı yöntemi ile rekabet edebilecek düzeydedir. Ancak benzer koşullardaki CCS ile hız düşürme yöntemlerine göre maliyeti çok daha yüksek olup sistemin ve SOFC maliyetlerinin düşürülmesi gerekmektedir.

Sistemin toplam maliyeti üzerindeki en büyük ve dominant etkiyi H₂ yakıt maliyeti oluşturmaktadır. Temiz enerjilere duyulan ihtiyaç doğrultusunda H₂'nin gelecekte yığın üretim ve tedarikinin maliyetleri ciddi ölçüde azaltacağı düşünülmektedir. Sistemin maliyeti üzerindeki en büyük ikinci etki ise SOFC ilk yatırım maliyeti olup özellikle kimyasal bozulmadan kaynaklanan kayıplar bu maliyet üzerinde etkilidir. SOFC'nin kimyasal bozulmadan kaynaklı kaybının 1.000 saatte 6 mV'dan 1 mV'a düşürülmesi SOFC güç sisteminin birim CO₂ azaltma maliyetini, incelenen koşullarda %14.08 azaltmaktadır.

SOFC güç sisteminin toplam termal verimi seçilen çalışma ve kimyasal bozulmanın olmadığı koşullarda %51.05 olup kimyasal bozulma etkisiyle verim %29.38 azalmıştır. Kimyasal bozulmaya rağmen sistemin yakıt pili ömrü sonunda toplam ortalama termal verimi %43.58'e düşmesine rağmen referans güç sisteminin veriminden yine de yüksektir.

Referanslar

Ahn, J., Park, S.H., Noh, Y., Choi, B. Il, Ryu, J., Chang, D. ve Brendstrup, K.L.M. (2018). Performance and availability of a marine generator-solid oxide fuel cell-gas turbine hybrid system in a very large ethane carrier. *Journal of Power Sources*, 399, 199–206.

Aijjou, A., Raihani, A., Mohammedia, E. De ve Grid, S. (2019). Study on container ship energy consumption. Paper presented at the 8th Energy and Sustainability conference, Coimbra, Portugal, July 3-5, 2019

Anyenya, G.A. (2017). Solid-Oxide Fuel Cells for Unconventional Oil and Gas Production, Colorado School of Mines, Mechanical Engineering, Doctor of Philosophy.

Armi, C.D., Micheli, D. ve Taccani, R. (2021). Comparison of different plant layouts and fuel storage solutions for fuel cells utilization on a small ferry. *International Journal of Hydrogen Energy*, 46(26), 13878-13897.

Aspentech Inc, (2015). Aspen HYSYS V8.8.

Baldi, F., Moret, S., Tammi, K. ve Maréchal, F. (2020). The role of solid oxide fuel cells in future ship energy systems. *Energy*, 194.

Bassam, A.M., Phillips, A.B., Turnock, S.R. ve Wilson, P.A. (2017). Development of a multi-scheme energy management strategy for a hybrid fuel cell driven passenger ship. *International Journal of Hydrogen Energy*, 42(1), 623–635.

Biol, F. (2019). The Future of Hydrogen: Seizing Today's Opportunities, IEA Report prepared for the G20.

Buhaug, Ø., Corbett, J.J., Endresen, O., Eyring, V., Faber, J., Hanayama, S., Lee, D.S., Lindstad, H., Markowska, A.Z., Mjelde, A., Nelissen, D., Nilsen, J., Pålsson, C., Winebrake, J.J., Wu, W. ve Yoshida, K. (2009). Second IMO GHG Study 2009.

Buli, N. ve Abnett, K. (2021). Europe's carbon price tops 40 euros for first time,. Reuters. <https://www.reuters.com/article/us-eu-carbontrading-idUSKBN2AB2BT> [Online] [Erişim 26.04.2021] Bureau Veritas, 2021. BV Fleet. <https://marine-offshore.bureauveritas.com/bv-fleet/#/bv-fleet/ship-adv> [Online] [Erişim 26.04.2021]

Bureau Veritas, (2020). Rules for the Classification of Steel Ships, Part C-Machinery, Electricity, Automation and Fire Protection, Paris.

Choi, C.H., Yu, S., Han, I.S., Kho, B.K., Kang, D.G., Lee, H.Y., Seo, M.S., Kong, J.W., Kim, G., Ahn, J.W., Park, S.K., Jang, D.W., Lee, J.H. ve Kim, M. (2016). Development and demonstration of PEM fuel-cell-battery hybrid system for propulsion of tourist boat. *International Journal of Hydrogen Energy*, 41(5), 3591–3599.

Costa, A.N., Neves, M.V.S., Cruz, M.E. ve Vieira, L.S. (2011). Maximum profit cogeneration plant - MPCP: System modeling, optimization problem formulation, and solution. *Journal of Brazilian Society Mechanical Sciences and Engineering*, 33(1), 58–66.

Dall'Armi, C., Micheli, D. ve Tacconi, R. (2021). Comparison of different plant layouts and fuel storage solutions for fuel cells utilization on a small ferry. *International Journal of Hydrogen Energy*, 46(26), 13878-13897.

De-Troya, J.J., Álvarez, C., Fernández-Garrido, C. ve Carral, L. (2016). Analysing the possibilities of using fuel cells in ships. *International Journal of Hydrogen Energy*, 41(4), 2853–2866.

Dogdibegovic, E., Wang, R., Lau, G. Y., ve Tucker, M. C. (2019). High performance metal-supported solid oxide fuel cells with infiltrated electrodes. *Journal of Power Sources*, 410, 91–98.

Evrin, R.A. ve Dincer, I. (2019). Thermodynamic analysis and assessment of an integrated hydrogen fuel cell system for ships. *International Journal of Hydrogen Energy*, 44(13), 6919–6928.

Feenstra, M., Monteiro, J., van den Akker, J.T., Abu-Zahra, M.R.M., Gilling, E. ve Goetheer, E. (2019). Ship-based carbon capture onboard of diesel or LNG-fuelled ships. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 85, 1–10.

Fioriti, D., Giglioli, R., Poli, D., Lutzemberger, G., Vanni, A. ve Salza, P. (2017). Optimal sizing of a mini-grid in developing countries, taking into account the operation of an electrochemical storage and a fuel tank, Paper presented at the 6th International Conference on Clean Electrical Power: Renewable Energy Resources Impact, June, 2017.

Ganjehkaviri, A. ve Jaafar, M.N.M. (2014). Energy analysis and multi-objective optimization of an internal combustion engine-based CHP system for heat recovery. *Entropy*, 16(11), 5633–5653.

Giap, V.T., Lee, Y.D., Kim, Y.S., Ahn, K.Y., Kim, D.H. ve Lee, J. Il (2020). System simulation and exergetic evaluation of hybrid propulsion system for crude oil tanker: A hybrid of solid-oxide fuel cell and gas engine. *Energy Conversion and Management*, 223, 113265.

Gielen, D. ve Taibi, E. (2019). Hydrogen's future: reducing costs, finding markets. <https://energypost.eu/hydrogens-future-reducing-costs-finding-markets/>[Online][Erişim 26.04.2021].

Giers, M., Jaworska, L. ve Antas, L. (2020). *Global Hydrogen Market Who Will Dominate the Game?* Warsaw.

Güler, E. ve Ergin, S. (2021). An Investigation on the Solvent Based Carbon Capture and Storage System by Process Modeling and Comparisons with Another Carbon Control Methods for Different Ships. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 110, September 2021, 103438.

Hackl, R. ve Harvey, S., (2013). Identification, cost estimation and economic performance of common heat recovery systems for the chemical cluster in Stenungsund, Chalmers University of Technology, Department of Energy and Environment, Project Report.

International Maritime Organization, (2018). Adoption of the initial IMO strategy on reduction of GHG emissions from ships and existing IMO activity related to reducing GHG emissions in the shipping sector.

Lloyd's Register ve UMAS, (2018). Zero-Emission Vessels 2030. How do we get there. Lloyd's Register Group Limited and UMAS.

Luo, X. ve Wang, M. (2017). Study of solvent-based carbon capture for cargo ships through process modelling and simulation. *Applied Energy*, 195, 402–413.

Man Energy Solutions, (2018). <https://marine.man-es.com/two-stroke/ceas> [Online] [Erişim 26.04.2021].

Marine Environment Protection Committee, (2020). Report of the Marine Environment Protection Committee on its Seventy Fifth Session.

Marine Insight, (2020). EU Parliament Votes To Make Shipping Pay For CO2 Emissions. <https://www.marineinsight.com/shipping-news/eu-parliament-votes-to-make-shipping-pay-for-co2-emissions/#:~:text=Shipping is the only sector,€24 billion a year.> [Online] [Erişim 26.04.2021].

MTU-solutions, 2019. Marine Diesel Engine S60 for vessels with unrestricted continuous operation. https://www.mtu-solutions.com/content/dam/mtu/products/defense/marine-and-offshore-service-and-supply/main-propulsion/mtu-series_60/3231191_Marine_spec_S60_1A.pdf. [Online] [Erişim 26.04.2021]

Nordin, A. ve Majid, M.A.A., (2016). Parametric study on the effects of pinch and approach points on heat recovery steam generator performance at a district cooling system. *Journal of Mechanical Engineering and Sciences*, 10 (2), 2134–2144.

Ouyang, T., Zhao, Z., Lu, J., Su, Z., Li, J. ve Huang, H. (2020). Waste heat cascade utilisation of solid oxide fuel cell for marine applications. *Journal of Cleaner Production*, 275, 124133.

Park, S., Vohs, J.M. ve Gorte, R.J. (2000). Direct oxidation of hydrocarbons in a solid-oxide fuel cell. *Nature*, 404 (6775), 265–267.

Park, S.H., Lee, Y.D. ve Ahn, K.Y. (2014). Performance analysis of an SOFC/HCCI engine hybrid system: System simulation and thermo-economic comparison. *International Journal of Hydrogen Energy*, 39 (4), 1799–1810.

Parks, G., Boyd, R., Cornish, J. ve Remick, R. (2014). Hydrogen Station Compression, Storage, and Dispensing Technical Status and Costs: Systems Integration, International Renewable Energy Laboratory, Technical Report.

Peng, D. ve Robinson, D.B. (1976). A New Two-Constant Equation of State. *Industrial & Engineering Chemistry Fundamentals*, 15(1), 59–64.

Sapra, H., Stam, J., Reurings, J., van Biert, L., van Sluijjs, W., de Vos, P., Visser, K., Vellayani, A.P. ve Hopman, H. (2021). Integration of solid oxide fuel cell and internal combustion engine for maritime applications. *Applied Energy*, 281, 115854.

Sohal, M.S. (2009). Degradation in solid oxide cells during high temperature electrolysis, Idaho National Laboratory, Technical Report.

Shirmohammadi, R., Aslani, A., Ghasempour, R., Romeo, L. M., ve Petrakopoulou, F. (2021). Process design and thermoeconomic evaluation of a CO₂ liquefaction process driven by waste exhaust heat recovery for an industrial CO₂ capture and utilization plant. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 145(3), 1585–1597.

Ship&Bunker, (2021). Rotterdam Bunker Prices. <https://shipandbunker.com/prices/emea/nwe/nl-rtm-rotterdam#ULSFO>. [Online] [Erişim 02.06.2021]

Van Biert, L., Godjevac, M., Visser, K. ve Aravind, P. V. (2016). A review of fuel cell systems for maritime applications. *Journal of Power Sources*, 327, 345–364.

Woodyard, D., (2009). *Pounder's marine diesel engines and gas turbines*. Butterworth-Heinemann.

Wu, P. ve Bucknall, R. (2020). Hybrid fuel cell and battery propulsion system modelling and multi-objective optimisation for a coastal ferry. *International Journal of Hydrogen Energy*, 45(4), 3193–3208.

Yan, Z., He, A., Hara, S. ve Shikazono, N. (2019). Modeling of solid oxide fuel cell (SOFC) electrodes from fabrication to operation: Microstructure optimization via artificial neural networks and multi-objective genetic algorithms. *Energy Conversion Management*, 198, 111916.

Yonekura, T., Yachikawa, Y., Yoshizuma, T., Shiratori, Y., Ito, K. ve Sasaki, K. (2011). Exchange Current Density of Solid Oxide Fuel Cell Electrodes. *ECS Transactions*, 35(1), 1007–1014.

Zhang, X., Chan, S.H., Li, G., Ho, H.K., Li, J. ve Feng, Z. (2010). A review of integration strategies for solid oxide fuel cells. *Journal of Power Sources*, 195(3), 685–702.