

TESİS İÇİ ELEKTRİKLİ ULAŞIM ARAÇLARINDA YAKIT PİLİ UYGULAMASININ İNCELENMESİ

Application Of Fuel Cell In Facility Electric Transportation Vehicles

Zeynep Sude İşleyen
Mustafa Umut Karaoğlan

ÖZET

Gelişen teknolojik olanaklar ve endüstrileşme sebebiyle çevre kirliliğinin ciddi boyutlara ulaşması, kişi ve kurumları elektrikli araçlara yöneltmiştir. Fakat elektrikli araçlarda yaşanan uzun şarj süreleri ve yetersiz kullanım menzili gibi sorunların önüne geçmek için verimli, çevre dostu ve uzun sürüş süresine sahip yakıt pilleri, sürdürülebilirlik açısından en güçlü seçenek konumundadır. Yakıt pillerinin konutlarda hem elektrik üretimi hem de ısınma amacıyla kullanımı, giderek artan bir önem taşımaktadır. Bu çalışmada, tesis içi ulaşımında kullanılan elektrikli araçların yakıt pili entegrasyonunun araç performansı, çevresel ve ekonomik etkileri incelenmiştir. Ayrıca konutsal uygulamalarda kullanılan kojenerasyon sistemleri ele alınmıştır. Bu kapsamda, taşıt modeli, batarya ve yakıt pili modeli Matlab/Simulink ortamında oluşturulmuş ve tesis içi aracın elektrikli ve yakıt pilli olması durumları için sürüş simülasyonları gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar, tesis içi araçlarda yakıt pili kullanımının, özellikle kullanılan araçlarda uzun menzile olanak vermesi ve buna bağlı olarak elektrikli araçlardaki uzun şarj süresi ihtiyacını önlemesi nedeniyle performans, maliyet ve iş gücü olarak önemli avantajlar sunacağını göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: *Yakıt pili, batarya, sürüş simülasyonu, tesis içi ulaşım, konutsal uygulamalar*

ABSTRACT

Due to developing technological opportunities and industrialization, environmental pollution has reached serious levels and has directed individuals and institutions to electric vehicles. However, in order to prevent problems such as long charging times and insufficient usage range experienced in electric vehicles, efficient, environmentally friendly and long driving time fuel cell is the strongest option in terms of sustainability. The use of fuel cells for both electricity generation and heating in residential buildings is becoming increasingly important. In this study, vehicle performance, environmental and economic effects of fuel cell integration of electric vehicles used in facility transportation were examined. In addition, cogeneration systems used in residential applications were discussed. In this context, vehicle model, battery and fuel cell model were created in Matlab/Simulink environment and driving simulations were performed for the on-site vehicle being electric and fuel cell. The obtained results show that the use of fuel cells in on-site vehicles will offer significant advantages in terms of performance, cost and labor, especially because it causes long range in used vehicles and prevents the need for long charging times in electric vehicles.

Key Words: *Fuel cell, battery, driving simulation, facility transportation, residential applications*

1. GİRİŞ

Yakıt hücreli araçlar, elektrikli araçların bir türü olup, bu araçlar, yakıt hücresinden elde edilen elektrik enerjisiyle çalışarak motorlarını besler ve sıfır emisyonu hedefler. Yakıt hücreli araçlar, elektrik motorunu çalıştırmak veya bataryayı beslemek amacıyla gereken enerji ihtiyacını yakıt hücresi

içerisinde gerçekleşen elektrokimyasal reaksiyonlarla sağlamaktadır. Araç yüksek basınçlı hidrojen tanklarında depolanan hidrojen gazı ile çalışmaktadır. Tanktan yakıt hücresine bir hidrojen akışı başlar. Hidrojen, yakıt hücresine ulaştığında anot ve katot denilen iki düz plakadan anot üzerine yönlendirilir ve aynı anda filtrelenmiş dış havadaki oksijen de katoda iletilir. Anot ve katotta meydana gelen kimyasal reaksiyon sonucunda su (H_2O), elektrik ve ısı açığa çıkar. Üretilen bu elektrik, araçtaki elektrik motorunu çalıştırır. Motor da aracı hareket ettirir. Reaksiyon sonucu ortaya çıkan su buharı da atık olarak egzoz benzer kısımdan dışarı atılır. Bu yüzden çoğu yakıt hücreli araç, yalnızca su ve ısı yayan sıfır emisyonlu araçlar olarak sınıflandırılmaktadır.

İçten yanmalı motorların emisyonları, çevre kirliliğine sebep olduğu için içten yanmalı motorlara bir alternatif bulunması zorunlu halde gelmiştir. Günümüzde hidrojen enerjili taşıtların ticarileştirilmesindeki yarış, ABD, Çin, Almanya, Japonya gibi otomotiv sektöründe öncü ülkeler arasında güçlü bir rekabeti ortaya çıkarmıştır. Otomotiv sektörü, çeşitli araçlar için çekiş gücü sağlayacak yakıt pili sistemlerini geliştirmektedirler [1]. Birçok büyük ve tanınmış şirket, alternatif yakıt arayışlarında hidrojenin potansiyelini fark edip çalışmalarında hidrojeni kullanmıştır. BMW'nin Toyota ile iş birliği içinde ortaya koyduğu "Hydrogen Next" projesi ve Honda'nın "Clarity Fuel Cell" projesi bu çalışmalara örnektir [2].

Örnek olarak incelenen çalışmada, bir PEM yakıt hücresi aracının enerji performansının sayısal simülasyonu yapılmıştır. Simülasyonlar, FTP sürüş referans döngüsü üzerinden gerçekleştirilmiş ve Matlab ortamında Advisor simülasyon aracı kullanılmıştır. Batarya gücü, yakıt hücresi gücü ve bataryanın termal durumu ile ilgili sonuçlar, bu aracın geleneksel motorların yerini alma konusunda güçlü bir aday olduğunu göstermektedir [3]. Düşük güçlü yakıt hücreli araçlar üzerine yapılmış bir çalışmada 500 kg ağırlığındaki bir kara taşıtı için yakıt hücresi, batarya ve süperkapasitörün tahrik sisteminde kullanım alternatiflerine göre 4 farklı tahrik sistemi alternatifi için ECE-15, JPN-10 ve WLTP profilleri kullanılarak sürüş çevrimi simülasyonları gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre hibrit araçlarda istenen güç aktarma organı performansı ve verimliliğinin uygun güç aktarma organı bileşeninin seçilmesiyle elde edilebileceği görülmüştür [4]. Örnek olarak incelenen diğer bir çalışmada ise PEM yakıt hücresinin geliştirilmesi ve 9-12 kişiyi taşıyabilen bir mini-trene entegrasyonu açıklanmaktadır. Yakıt hücresi güç sistemi, 200 W'lık bir PEMFC, düşük basınçlı dört metal hidrojen depolama tankı, kurşun-asit akü grubu ve etkili bir şekilde tasarlanmış bir elektronik enerji kontrol sistemi içermektedir. Yakıt hücreleri ve kurşun-asit akülerinin paralel bağlantısı güç sağlayabilmektedir. Bu mini-tren 2000 saatten fazla çalışmış ve 70,000'den fazla yolcu taşımıştır. Sonuçlar, PEM yakıt hücresinin yüksek sıcaklık ve neme dayanabildiğini ve gücü istikrarlı bir şekilde sağlayabildiğini göstermektedir. Bu yakıt hücresi güç tedarik sistemi, mini-trene kurşun-asit aküleriyle aynı gücü sağlayabilmektedir [5].

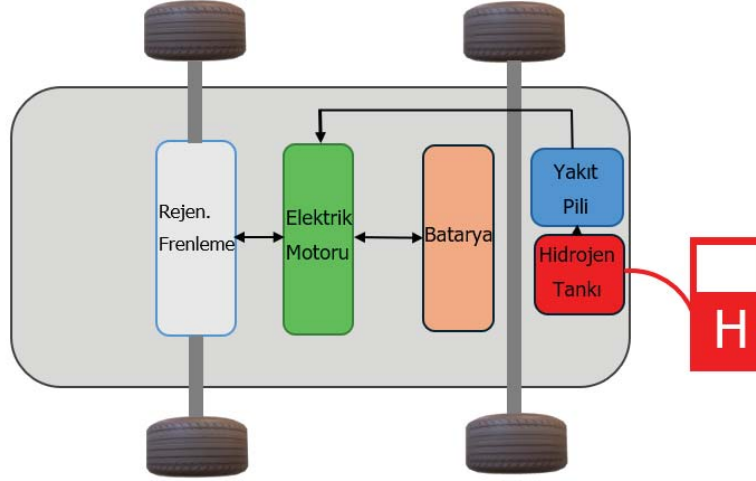
İncelenen bu çalışmada, tesis içi ulaşım aracı olarak golf arabaları öngörülmüştür. İçten yanmalı motora sahip olan golf arabaları yüksek gürültü seviyeleri, egzoz emisyonları ve yüksek yakıt maliyetleri gibi dezavantajlara sahiptir. Öte yandan, elektrikli Golf arabalarının sınırlı menzil ve uzun şarj süresi gibi sorunları bulunmaktadır. Bu bağlamda, Golf arabalarında yakıt pili kullanımı uzun menzil sağlamak ve elektrikli araçların uzun şarj sürelerinden kaynaklanan sorunları ortadan kaldırmaktadır. Bu çalışmada da yakıt pilli hibrit elektrikli araçlarda bulunan komponentler modellenerek incelenen aracın sürüş çevrimi simülasyonu yapılmış ve yakıt pili teknolojisinin kullanımı, performans, maliyet ve iş gücü açısından önemli avantajları sunulmuştur. Ayrıca yakıt pillerinin konutlarda hem elektrik üretimi hem de ısınma amaçlı kullanımı, çevresel zararlı etkilerinin olmaması ve yüksek verimli enerji sistemleri kurulabilmesine olanak sağlaması nedeniyle giderek daha fazla önem kazanan bir konudur.

2. MODELLEME METODOLOJİSİ

Yakıt hücreli araç enerji aktarım sistemi bileşenleri, boyuna taşıt dinamiği denklemleri ve enerji yönetim sistemlerine dayalı enerji aktarma sistemi simülasyonları kullanılarak tasarlanıp modellenmiştir. Araçların ideal sürüş performansı ve menziline uygun simülasyon sonuçlarına göre boyutlandırılan güç/enerji iletim komponentlerinin teorik hesaplamaları için batarya, elektrik motoru, yakıt hücresi ve hidrojen tankından oluşan elemanları Matlab/Simulink ortamında modellenmiştir.

2.1 Taşıt Modeli

Öncelikle, tesis içi yakıt hücreli elektrikli aracın performansını ve dinamiklerini teorik ortamda incelemek amacıyla kullanılan bir matematiksel ve fiziksel model oluşturulmuştur. Çalışmada, sürüş çevrimi simülasyonu kullanılarak, tesis içi yakıt hücreli elektrikli aracın elektrik motorunun gerekli gücü, torku, hızı; ayrıca yakıt hücresinin gücü, tükettiği hidrojen miktarı ve bataryanın batarya doluluk oranı (State of Charge- SOC) hesaplanmıştır. Şekil 1’de yakıt hücreli aracın yapısı görülmektedir.



Şekil 1 Yakıt Pili Aracın Yapısı

Aracın tahrikini sağlamak için, sürüş sırasında elektrik motorunun ihtiyaç duyduğu güç miktarının hesaplanması gerekmektedir. Bu güç gereksiminin doğru bir şekilde belirlenmesi, aracın hareketi sırasında araca etki eden toplam kuvvetlerin bilinmesini gerektirir. Bu kuvvetler aracın hareketini, stabilitesini etkileyen çeşitli fiziksel güçlerdir ve aracın dinamik performansını anlayıp optimize etmek için önemlidir. F_R tekerleklerin yol üzerinde yuvarlanması sırasında meydana gelen şekil değişiminden kaynaklanan yuvarlanma direnç kuvvetidir. F_L hareket ederken hava akışından kaynaklanan hava direnç kuvvetidir. F_a aracın hızlanma veya yavaşlama sırasında karşılaştığı ivmelenme direnç kuvvetidir. F_a^- ise frenleme sırasında enerjiyi geri kazanarak bataryayı şarj etme amacı taşıyan rejeneratif frenleme kuvvetidir. Denklemler (1-4)'te gösterilmiştir.

$$F_R = m \cdot g \cdot f_R \quad (1)$$

$$F_L = \frac{1}{2} \cdot c_W \cdot A \cdot \rho_L \cdot V^2 \quad (2)$$

$$F_a = m \cdot a \quad (3)$$

$$F_a^- = m \cdot a^- \quad (4)$$

Burada V , aracın hızı [m/s], a pozitif ivme[m/s²], a^- negatif ivme[m/s²], c_W aerodinamik direnç katsayısı ve f_R ise yuvarlanma direnç katsayısıdır.

Ek olarak araç dinamik modelinin matematiksel tanımları bazı varsayımlara dayanmaktadır. Bunlar şöyledir;

- Aracın hareketinin yalnızca uzunlamasına yönde olduğu varsayılmaktadır. Bu nedenle, lastiklere etki eden direksiyon kaynaklı yanal kayma açıları ve yanal kuvvetler dikkate alınmamaktadır.
- Yuvarlanma direnci kuvveti, aracın hızına bağlı olarak değişmez.
- Dinamik lastik yarıçapı, tüm hızlarda sabit kabul edilir.
- Lastik kaymaları dikkate alınmaz.
- Sistem titreşimleri ve sönümlenme etkilerinin çekiş kuvveti üzerindeki etkileri göz ardı edilir [4].

Yukarıda belirtilen toplam hareket direnç kuvvetlerinin araç hızına bağlı olarak zamana göre çarpılması ile elektrik motorunun güç çıkışı hesaplanır. Güç çıkışı formülü Denklem (5)'te gösterilmiştir.

$$P_{EM} = \frac{(F_R + F_L + F_a + F_a^-)}{\eta_M} \cdot V \quad (5)$$

Denklemdaki η_m mekanik verimdir.

Elektrik motorunun torku, motorun dönerken uyguladığı kuvvetin ölçüsüdür. Araçlarda bu, güç iletim sürecindeki dairesel hareketlerin gücünü yani dönme kuvvetini ifade eder. Elektrik motorunun güç gereksiniminin hesaplanmasının ardından, modeldeki elektrik motorunda üretilen tork [Nm] hesaplanmaktadır. Elektrik motorunun (T_{EM}) moment (tork) gereksinimi, Denklem (6) ve Denklem (7)'deki gibi hesaplanmaktadır.

$$T_{EM} = \frac{(P_{EM} \cdot 9549)}{\eta_{EM}} \quad (6)$$

$$\eta_{EM} = \frac{V}{3.6} \cdot \frac{60}{2\pi} \cdot \frac{i_g}{r_{dyn}} \quad (7)$$

Bu denklemden, i_g tekerlek ile elektrik motoru arasındaki genel dişli oranını, r_{dyn} ise dinamik tekerlek çapını [mm] ifade etmektedir [6].

2.2 Batarya Modeli

Bataryalar, elektrokimyasal redoks tepkimesi aracılığıyla depo ettikleri kimyasal enerjiyi elektrik enerjisine dönüştürebilen bir çalışma sistemine sahiptir. Basit olarak bir batarya sistemi, istenilen çıkış gerilimini ve kapasiteyi elde edebilmek için seri, paralel veya hem seri hem de paralel kompleks bir şekilde bağlanmış, bir veya daha çok hücreden meydana gelmektedir. Her bir hücre ise; anot, katot ve elektrolit olmak üzere üç ana bileşenden oluşmaktadır [7].

SOC, bataryada geri kalan enerjiyi tanımlar ve çoğunlukla yüzde cinsinden ifade edilen bir terimdir. Yani batarya tamamen şarj edilince SOC nominal kapasitesi %100 olarak kabul edilmekte ve tamamen boşalınca, SOC %0 olarak kabul edilmektedir [8]. Belirli bir zaman için SOC Denklem (8) kullanılarak bulunur.

Batarya ile yakıt hücresi arasındaki temel fark, yakıt hücreleri elektrik yayarken bataryalar elektriği depolar. Bilindiği gibi bataryalarda, enerji verici kimyasallar sistemde bulunmaktadır. Bataryanın devresi kapatılıp enerji kullanımı gerçekleştiğinde bataryanın potansiyeli harcanmaya başlar ve sonunda batarya bitir [9].

$$SOC(t) = SOC(0) - \frac{1}{C_{bat}} \cdot \int_0^t P_{bat} \cdot dt \quad (8)$$

Burada Q_{Bat} batarya kapasitesidir. $SOC(t)$, her simülasyon periyodu için pilin şarj seviyesini belirtir ve SOC_i , başlangıçtaki pil şarjını temsil eder. Burada batarya iç direncinin SOC (şarj durumu) ve sıcaklığa bağlı değişimi ihmal edilmiştir.

2.3 Yakıt Pili ve Modeli

Proton değişim membran (PEM) yakıt hücreleri yakıtta depolanan kimyasal enerjiyi doğrudan ve verimli bir şekilde elektrik enerjisine dönüştüren, tek yan ürün olarak suyun oluştuğu; enerji kullanımını, kirlenici emisyonları ve fosil yakıtlara bağımlılığı azaltma potansiyeline sahip bir teknolojidir [10]. Tipik olarak bir PEM yakıt pili, bir polimer elektrolit membran, elektrik iletken gözenekli gaz difüzyon katmanı, membran ve difüzyon katmanı arasında sandviç şeklinde bulunan katalizör, akış kanalları vasıtası ile yakıt ve oksitleyiciyi reaksiyon bölgesine ulaştıran grafit yapıları akış alanı plakalarından oluşmaktadır [11]. Bu çalışmada yakıt pili çeşidi olarak PEM yakıt pili tercih edilmiştir. PEM yakıt pili modeli Matlab/Simulink ortamı üzerinde modellenmiştir. Girdi olarak akım (A) kullanılarak gerilim (V), güç (W), hidrojen tüketimi (L/dk), oksijen tüketimi (L/dk) ve su üretimi (L/dk) değerleri çıktı olarak alınmıştır. Şekil 2'de PEM yakıt pilinin Matlab/Simulink modeli görülmektedir.

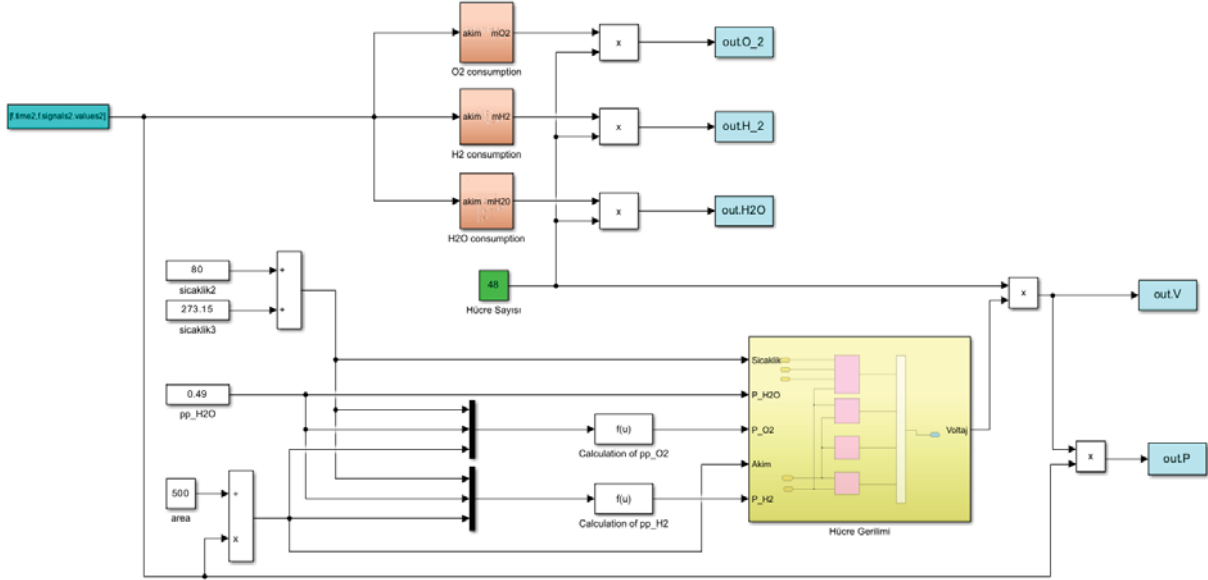
Sistem giriş parametrelerini kullanarak hesaplama yapar ve çıkış değerlerini bir sonraki adıma aktarır. Yakıt hücrelerinde gerilim akım artımıyla azalmaktadır. Denklem (9) kullanılarak hücre gerilimi (V_{cell})

bulunur. Bir hücre yüke güç verildiğinde Nerst Voltajı (E_{Nerst}), aktivasyon (V_{act}), ohmik (V_{ohm}) ve konsantrasyon (V_{conc}) kayıpları tarafından azaltılır.

$$V = E_{Nerst} - V_{act} - V_{ohmic} - V_{conc} \quad (9)$$

Denklem (10)'da Nerst Gerilimi görülmektedir.

$$E_{Nerst} = -\frac{G_{f,liq}}{2 \times F} - \frac{R \times T_k}{2 \times F} \times \ln\left(\frac{P_{H_2O}}{P_{H_2} \times P_{O_2}^{1/2}}\right) \quad (10)$$



Şekil 2 PEM Yakıt Pili Matlab/Simulink Modeli

Denklem (10)'da verilen eşitlikte; $G_{f,liq}$ sıvı formda Gibbs fonksiyonu, R üniversal gaz sabiti ve F ise Faraday sabitidir. P_{H_2} , P_{O_2} ve P_{H_2O} ; hidrojen, oksijen ve su buharı basınçlarıdır. İlgili parametreler tablo 1'de verilmiştir.

Aktivasyon kaybı denklemi aşağıdaki şekilde Denklem (11) Tafel denklemi ile ifade edilir.

$$V_{act} = b \times \log\left(\frac{i_1}{i_0}\right) \quad , \quad b = \frac{R \times T}{2 \times \alpha \times F} \quad (11)$$

Bu eşitlikte i_1 sınırlanan akım yoğunluğu, i_0 akım yoğunluğu değişimi ve a transfer katsayısıdır.

Ortalama akım yoğunluğunda gerilim düşümü yaklaşık olarak doğrusaldır ve doğal durumda ohmiktir. Ohmik kayıp Denklem (12)'de görülmektedir.

$$V_{ohmic} = (i \times R_o) \quad (12)$$

Bu denklemde i akımı R_o ise membran direncini gösterir.

Daha yüksek akım yoğunluklarında, hücre potansiyeli kütle-geçiş sınırlamalarından dolayı hızla düşmeye başlar. Bu doğrusal olmayan konsantrasyon olarak adlandırılmaktadır. Konsantrasyon kaybı Denklem (13)'de görülmektedir.

$$V_{cons} = \frac{R \times T}{2 \times F} \times \ln\left(\frac{i_L}{i_L - i}\right) \quad (13)$$

Bu eşitlikte i_L , sınırlanan akım yoğunluğudur. Şekil 2'deki Matlab/Simulink modelinde, girdi olarak akım kullanılmıştır. Sıcaklık, sabit bir değer olarak Kelvin cinsinden belirlenmiştir. Hücre gerilimi bloğunda, Denklem (9-13) temel alınarak alt bloklar oluşturulmuştur. Hesaplama adımlarına uygun olarak alt sistemlere ayrılan sistem, uygulanan giriş değerlerini hesaplayarak elde edilen çıkış değerlerini bir

sonraki adıma aktarmaktadır [12]. Girdilere uygun matematiksel işlemler, öncelik sırasına göre uygulanarak güç, voltaj, hidrojen tüketimi, oksijen tüketimi ve su üretimi çıktıları elde edilmiştir.

3. SÜRÜŞ ÇEVİRİMİ SIMULASYONU

Çalışmada incelenen yakıt pilli hibrit elektrikli araca ait taşıt parametreleri Tablo 1’de gösterilmektedir. Bu parametreler Matlab/Simulink ortamında oluşturulan matematiksel modele tanımlanmış ve istenilen çıktı sonuçları hesaplanmıştır. Sonuçlar, bulgular bölümünde grafik üzerinde gösterilmiştir.

Sürüş çevrimi, bir aracın motorunun bir yakıt döngüsü süresince gerçekleştirdiği işlemleri ve bu işlemlerin enerji dönüşümüne nasıl katkıda bulunduğunu açıklamaktadır. Diğer bir deyişle sürüş çevrimi bir aracın hızını zamana göre gösteren bir dizi veri noktasına verilen isimdir. Sürüş çevrimi araç simülasyonlarında zaman bağılı olarak araç performansını ve menzilin hesaplamak için kullanılmaktadır. Bu çalışmada elektrikli tahrik sisteminin, bataryanın ve yakıt pilinin performansını saptamak için WLTC sınıf 1 sürüş çevrimi (Tablo 2) simülasyonundan yararlanılmıştır.

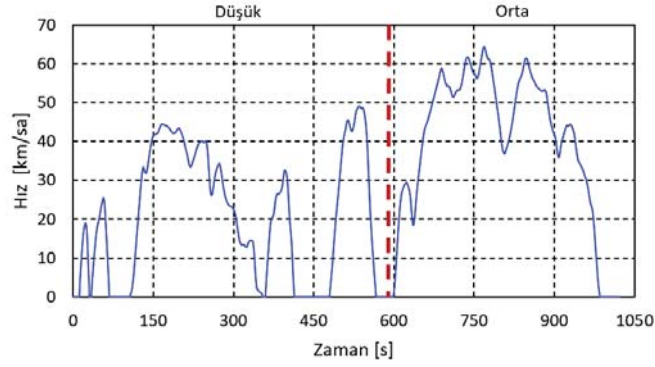
Tablo 1 Taşıt Parametreleri

Sembol	Parametre	Değer	Birim
m	Araç Kütle	800	kg
g	Yer Çekimi İvmesi	9.81	m/s ²
F_R	Yuvarlanma Direnç Kuvveti	0.012	-
ρ_L	Havanın Yoğunluğu	1.2	kg/m ³
A	Araç Alanı	2.66	m ²
C_w	Aerodinamik Direnç Katsayısı	0.5	-
Q_{bat}	Batarya Kapasitesi	3.3	kWh
η_B	Batarya Verimi	0.92	-
η_{EM}	Elektrik Motor Verimi	0.84	-
η_M	Mekanik Verim	0.9	-
R	Universal Gaz Sabiti	8.314	J·mol ⁻¹ ·K ⁻¹
F	Faraday Sabiti	96485	C·mol ⁻¹
T_K	Sıcaklık	353	K
$G_{f,liq}$	Gibbs Fonksiyonu	-226100	J/mol
i_0	Akım Yoğunluğu Değişimi	10 ^{-6.912}	A/cm ²
a	Transfer Katsayısı	0.29	-
R_o	Elektrolit Direnci	1.69	ohm
i_L	Sınırlanan Akım Yoğunluğu	0.079	A/cm ²
r_{dyn}	Tekerlek Dinamik Yarıçapı	0.3	m
i	Çevrim Sayısı	7.2	-

Tablo 2. Sürüş Çevrimi Özellikleri

	Süre (s)	Durma Süresi (s)	Mesafe (m)	v_{max} (km/sa)	a_{min} m/s ²	a_{max} m/s ²
Düşük	589	155	3324	49.1	-1.00	0.76
Orta	433	48	4767	64.4	-0.57	0.63

Tablo 2’deki parametreler kullanılarak düşük ve orta düzeye göre Şekil 3.’deki hız-zaman grafiği çizdirilmiştir. 0-589 saniye arası düşük, 589-1022 arası ise orta hızlı olarak belirlenmiştir.

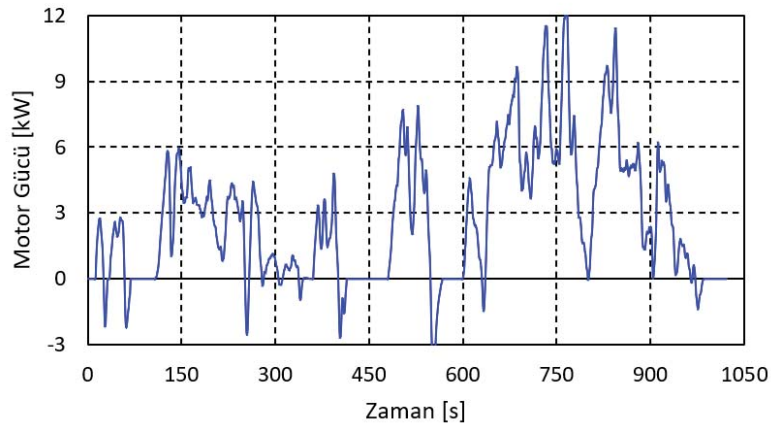


Şekil 3 Hız-Zaman Grafiği

4. BULGULAR

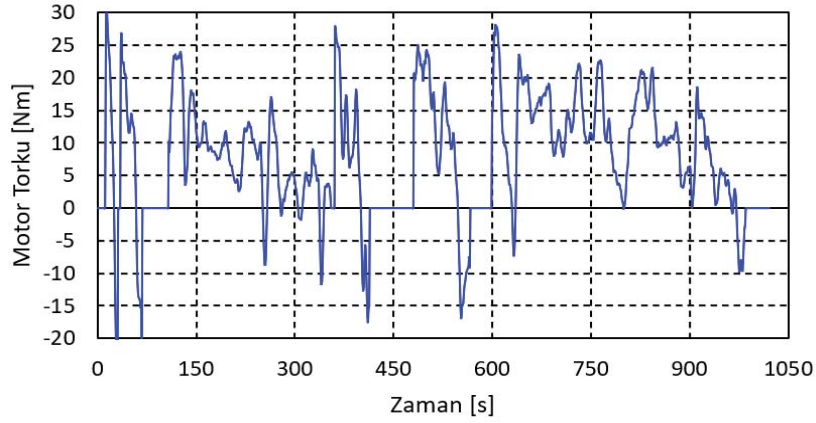
PEM yakıt hücresi kullanılacak olan ve mini araç kategorisinde değerlendirilen golf araçları için oluşturulan taşıt modelinde, Tablo 2'de verilen girdi değerlerinden yararlanılarak zamana bağlı sürüş çevrimi hız girdilerine göre taşıt komponentlerinde ihtiyaç olan güç, tork ve akım değerleri hesaplanmıştır.

Motor gücü, bir motorun belirli bir süre içinde gerçekleştirebileceği iş miktarını veya sağladığı enerjiyi ölçen bir parametredir. Başka bir deyişle, motorun enerji üretme kapasitesini ve bu enerjiyi ne kadar hızla sağlayabileceğini ifade eder. Şekil 4'te motor gücünün zamanla nasıl değiştiği gösterilmektedir. 1050 saniyelik periyotta güç değerleri 12 ile -3 kW arasında değişmektedir. Ortalama güç değeri ise 2.64 kW'tır.



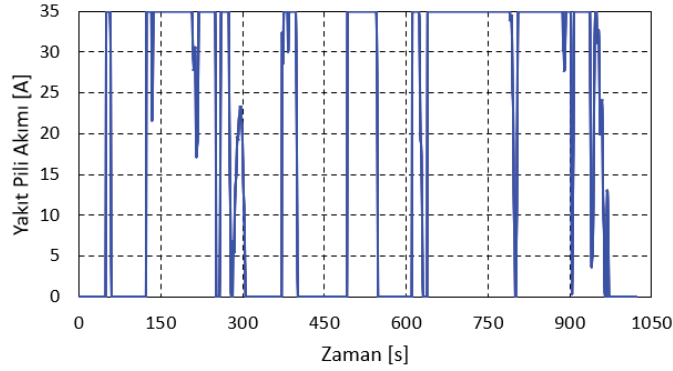
Şekil 4 Motor Gücü-Zaman Grafiği

Motor torku, bir motorun dönme kuvvetini veya döndürme kapasitesini ölçen bir parametredir. Tork, motorun üretebileceği güç miktarını ve bu gücün etkin kullanımını belirler. Ayrıca, tork aracın çekiş gücünü değerlendirmede önemli bir rol oynar. Şekil 5'te motor gücünün zamana bağlı değişimi verilmiştir. Motor torkunun pik değeri 30 Nm iken dip değeri -20 Nm kadardır.



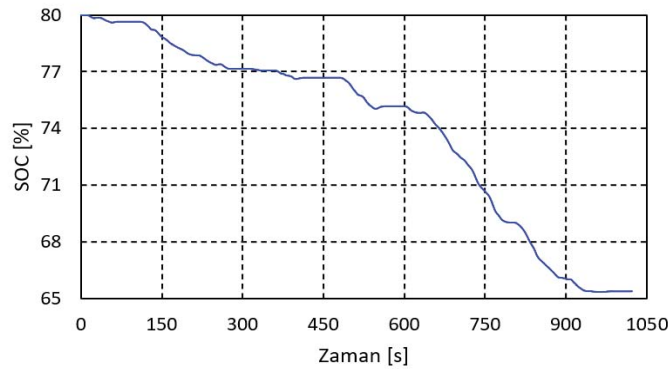
Şekil 5 Motor Torku-Zaman Grafiği

Yakıt pili akımı [A], hücrenin ne kadar elektrik enerjisi üretebileceğini gösterir. Yakıt pili akımının zamana bağlı değişim grafiği Şekil 6'da gösterilmiştir.



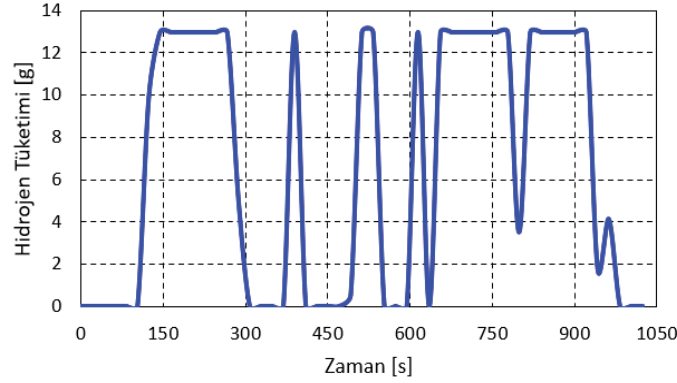
Şekil 6 Yakıt Pili Akım-Zaman Grafiği

Batarya doluluk oranı (SOC), bir bataryanın mevcut enerji seviyesini veya ne kadar şarj olduğunu gösteren bir parametredir. Diğer deyişle, bataryada mevcut olan kalan enerjiyi tanımlamak için kullanılan ve genellikle yüzde cinsinden ifade edilen bir terimdir. Şekil 7'de batarya doluluk oranının zamana bağlı azalması gösterilmiştir. Ayrıca batarya doluluk oranı başlangıçta %80 olarak alınmıştır. 1050 saniyelik zaman diliminde bu değer %65'e kadar inmiştir.



Şekil 7 Batarya Doluluk Oranı-Zaman Grafiği

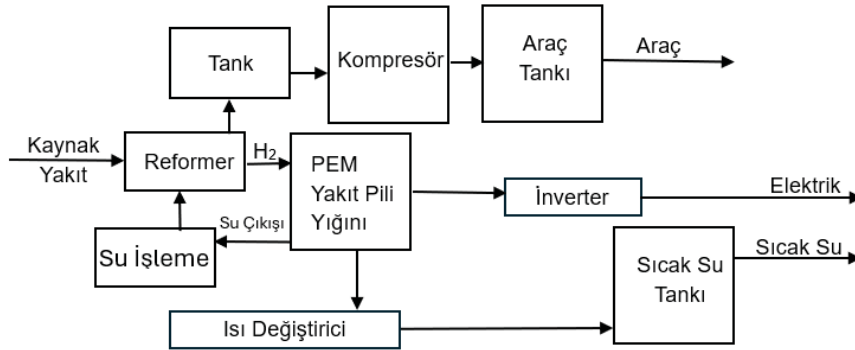
Hidrojen tüketimi genellikle kilometre başına tüketilen hidrojen miktarıyla ifade edilir. Bu durum, aracın performansını ve verimliliğini değerlendirmek için oldukça önemlidir. Şekil 8'de golf aracının hidrojen tüketiminin zamana bağlı değişimi görülmektedir. Hidrojen tüketimi, 1050 saniyelik periyotta 0-12 gram arasında değişmektedir.



Şekil 8 Hidrojen Tüketimi-Zaman Grafiği

Yakıt pillerinin kullanımı ve geliştirilmesinde otomotiv sektörü başta rol oynamasının yanı sıra son yıllarda Amerika ve kısıtlı doğal enerji kaynaklarına sahip Almanya ve Japonya'da da ticari binalar için geliştirilmiş yakıt pili uygulamaları hayata geçirilmiştir [13]. Birkaç konut için kurulan yakıt pillerinden üretilen elektrik, bir şebeke ile bağlantılı olarak kullanılabilir. Bu durum aslında, yakıt pillerinin konutlar arasında paylaşıldığı anlamına gelir. Bir konutun enerji tüketimi genellikle, elektriksel ve termal olarak iki şekilde kategorize edilebilir. Hidrojen üretim ve kullanım sisteminin tasarımı için en uygun senaryo kojenerasyon sistemlerinin kullanılmasıdır. Kojenerasyon sistemleri, aynı anda hem elektrik enerjisi hem de ısı enerjisi üreten enerji üretim sistemleridir. Kojenerasyon sistemleri şebekeden bağımsız olarak doğal gaz veya petrolden elektrik üretirler.

Şekil 9'da PEM Yakıt pillerini kullanan, bir kojenerasyon sistemiyle araç şarj sisteminin birlikte bulunduğu hibrit bir sistem gösterilmektedir. Konutsal yakıt pili sistemleri genel olarak bir PEM yakıt pili yığını, fosil bir yakıttan (doğal gaz, LPG veya gaz yağı) hidrojen üretmek için yakıt reformer, sıcak su tankı ve yedek su ısıtıcısından oluşurlar [14]. Yakıt pili yığını yakıttaki kimyasal enerjiyi elektrik ve ısı enerjisine dönüştürmektedir [15]. Yakıt işleyicisi hidrokarbon yakıtları hidrojene dönüştürür. Isı değiştirici ısıyı uzaklaştırmak, çeşitli sistem bileşenleri arasında ısı transferi yapmak, dış ısı yükleri sağlamak için kullanılmaktadır. İnverter (dönüştürücü), elektrik enerjisinin bir biçimden diğerine dönüştürülmesini sağlamaktadır. Kompresör, tanktaki hidrojeni araç için kullanılabilir hale getirir.



Şekil 9. Konutlarda Yakıt Pili Kullanımı Şematik Gösterimi

Ayrıca, Şekil 9'a ek olarak, binalarda kojenerasyon sistemlerine FAYP (Fosforik Asit Yakıt Pilleri) ve KOYP (Katı Oksit Yakıt Pilleri) gibi yakıt pilleri de entegre edilebilmektedir. Bu bağlamda, FAYP sistemine dayalı kojenerasyon uygulamalarının en verimli örneklerinden biri, konutların ısıtılması, elektrik enerjisi sağlanması ve sıcak su temininde etkin bir çözüm sunan Octagon Projesi'dir. Bu projede, New York City'deki bir apartman binasına entegre edilen 400 kW kapasiteli FAYP tabanlı kombine ısı ve güç sistemi, konut sektöründeki orta ölçekli sistemlerin ekonomik ve çevresel potansiyelini kapsamlı bir şekilde değerlendirmiştir [16].

Ayrıca, KOYP teknolojisi ile sıkıştırılmış hava ve turbo şarjın bir kombinasyonuna dayanan yeni bir bütünleşik sistem de geliştirilmiştir. Bu sistem, binalarda eşzamanlı sıcak su kullanımı ve güç üretimi için optimize edilmiştir [17]. PEM yakıt pili de kojenerasyon sistemlerinde kullanılmaktadır fakat bu sistemlerin toplam verimleri %30'un altında kalmaktadır. Buna ek olarak, PEM yakıt pilinin düşük

çalışma sıcaklığı, hidrojen gibi iyi geliştirilmiş yakıtların kullanımını zorunlu hale getirmekte; bu da emilim veya su ısıtma teknolojileri için harcanan ısının etkili bir şekilde kullanılmasını engellemektedir.

Yakıt pili teknolojisi, çevre ile dost bir biçimde ve performans avantajları ile, elektrik üretimi ve kojenerasyon uygulamalarının her ikisi için uygun potansiyelli bir teknolojidir. Konutlardaki mikro kojenerasyon sistemleri, birincil enerji tüketimini ve kirlenici emisyonu azaltmaktadır. Ayrıca çevresel yararları ile enerji verimliliğini de sağlamaktadır. Bu sistemler sayesinde elektrik enerjisinin iletim ve dağıtımındaki kayıpları ve pik yük sorunlarını azaltma imkânı olmaktadır. Ek olarak kojenerasyon sistemleri, düşük gürültü seviyesini, düşük bakım potansiyelini sağlamaktadır. Bu tür inovatif yaklaşımlar, enerji verimliliğini artırırken, çevresel etkileri de minimize etmeyi hedeflemektedir. Bu gelişmeler, sürdürülebilir inşaat ve enerji yönetimi alanında önemli bir adım olarak değerlendirilmektedir.

SONUÇ

Yakıt hücreli golf aracının güç iletim bileşenlerinin sürüş çevrimi simülasyonları, araç performansının, motor torkunun, batarya ve yakıt hücresi güçlerinin, batarya doluluk oranının (SOC) ve çalışma voltajının, hidrojen tüketimi gibi yakıt hücresi çıktılarının incelenmesi için uygulanmıştır. Simülasyon verileri, sürüş çevrimi sırasında etkin bir enerji yönetim stratejisiyle kontrol altına alınan tesis içi yakıt hücreli bir araç kullanılarak sağlanmıştır. Simülasyon, araç performansı, motor torku, batarya doluluk oranı (SOC), çalışma voltajı, batarya ve yakıt hücresi güçleri ve yakıt hücresinde tüketilen hidrojen miktarı gibi çıktıları araştırmayı hedeflemiştir. Sürüş simülasyonu "WLTC sınıf 1" sürüş çevrimini kullanmıştır.

WLTC sınıf 1 sürüş çevrimi ile yapılan simülasyon sonuçlarına göre, grafiklerde yakıt hücresinin gücünün 1 kW ile sınırlı olduğu görülmektedir. Buna karşın, bataryanın gücü 12 kW'a kadar çıkabilmektedir. Ayrıca batarya doluluk oranının (SOC) %80 ile başlayıp 1050 saniye içerisinde %65'e düştüğü görülmüştür.

Yakıt hücreli araçların hidrojen tüketimi, sürüş koşulları, araç ağırlığı, tasarımı ve hava koşullarına bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Bu çalışmada incelenen golf aracının hidrojen tüketimi ise Matlab/Simulink'ten elde edilen verilere göre 1050 saniye içinde 0 ile 12 gram arasında değişmektedir.

Konvansiyonel ve yakıt hücreli araçlarda yakıt ikmal süresi, elektrikli ve hibrit araçlara kıyasla oldukça kısa bir süre içerisinde gerçekleşmektedir. Ancak konvansiyonel araçların hızlı yakıt ikmaline rağmen, içten yanmalı motora sahip ortalama bir binek aracın her 1 mil (yaklaşık 1,6 km) başına yaklaşık 404 gram CO₂ salınımı yapması, bu araçları çevresel açıdan dezavantajlı hale getirmektedir. Öte yandan, PEM yakıt pilli araçlar hem hızlı yakıt ikmal sağlamları hem de sıfır emisyon sunmaları nedeniyle çevresel açıdan önemli avantajlar taşımaktadır. Ayrıca Doğrudan Metanollü Yakıt Pili (DMYP) tipi yakıt pilinin anot hücresinde gerçekleşen metanol oksidasyonu sonucunda karbondioksit (CO₂) açığa çıkmaktadır. DMYP, CO₂ emisyonu bakımından sıfır emisyon sağlamamaktadır. Bu durum, DMYP'nin PEM yakıt pillerine göre çevresel açıdan dezavantajlı kılmaktadır. Fakat yakıt pillerinin kullanımı için gerekli olan yakıtın depolanması, güvenlik ve verimlilik açısından zorluklar içermektedir. Özellikle hidrojen gibi gazların depolanması, yüksek basınç gereksinimleri ve soğutma gereksinimleri nedeniyle karmaşık ve maliyetli olabilmektedir.

Bu bulgular, araç performansını optimize etme ve menzil kapasitelerini artırma hedeflerine ulaşmada yakıt hücresi teknolojilerinin entegrasyonunun kritik rolünü ve stratejik önemini ortaya koymaktadır. Her iki teknoloji de sürdürülebilirlik ve enerji verimliliği açısından önemli avantajlar sunmaktadır ancak her biri farklı koşul ve uygulamalara göre avantajlar ve dezavantajlar taşır. Yakıt hücreli golf arabası hızlı yakıt doldurma konusunda zamandan tasarruf sağlar. Ayrıca yüksek enerji yoğunluğuna sahip hidrojen yakıtı sebebiyle daha uzun menzil sunma kapasitesini etkili bir şekilde gerçekleştirir. Bu sayede, sürücüler daha geniş bir hareket serbestliği elde edip uzun mesafeli yolculuklarda daha seyrek yakıt ikmal yapma gereksinimi duymaktadırlar. Elektrikli araçlar ise daha yaygın bir şarj altyapısına sahip ve batarya teknolojilerindeki ilerlemelerle menzil ve şarj sürelerini sürekli olarak geliştirmektedir. Hangi teknolojinin daha uygun olduğu, kullanım alışkanlıklarına, mevcut altyapı durumuna ve kişisel tercihlere bağlı olarak değişebilir. Ayrıca kojenerasyon sistemlerinde yer alan yakıt pili teknolojisi, binalarda enerji verimliliğini önemli ölçüde artırmaktadır. Bu nedenle, bu alanda devlet teşvik ve yatırımlarının artırılması,

çevresel sorunlarla ve enerji dışı bağımlılığıyla mücadelede olumlu bir katkı sağlayacağı düşünülmektedir.

KAYNAKLAR

- [1] Şenol, R., Üçgül, İ., & Acar, M. (2006). Yakıt Pili Teknolojisindeki Gelişmeler ve Taşıtlara Uygulanabilirliğinin İncelenmesi.
- [2] Veziroğlu, A. (2021). Hidrojen neden potansiyel bir ulaşım yakıtı olarak seçilmelidir? *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 10(1), 404-411.
- [3] Mebarki, B., Allaoua, B., Draoui, B., & Belatrache, D. (2017). Study of the energy performance of a PEM fuel cell vehicle. *International Journal of Renewable Energy Research (IJRER)*, 7(3), 1395-1402.
- [4] Alpaslan, E., Karaoğlan, M. U., & Colpan, C. O. (2023). Investigation of drive cycle simulation performance for electric, hybrid, and fuel cell powertrains of a small-sized vehicle. *International Journal of Hydrogen Energy*, 48(99), 39497-39513.
- [5] Hsiao, D. R., Huang, B. W., & Shih, N. C. (2012). Development and dynamic characteristics of hybrid fuel cell-powered mini-train system. *International journal of hydrogen energy*, 37(1), 1058-1066.
- [6] Karaoğlan, M. Paralel Hibrit Araçlarda Vites Kutusu Konumunun Taşıt Performansı ve Komponent Verimine Etkisinin Sürüş Çevrimi Simülasyonu ile İncelenmesi. *Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi*, 25(74), 381-393.
- [7] Çetin, M. S., Karakaya, B., & Gençoğlu, M. (2021). Elektrikli araçlar için lityum iyon bataryaların modellenmesi. *Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 33(2), 755-763.
- [8] E. İ., & Okumuş, H. İ. (2018). Batarya modelleri ve şarj durumu (SoC) belirleme. *EMO Bilimsel Dergi*, 8(1), 21-25.
- [9] Tavman, A. (2004). Bor Esaslı Yakıt Hücreleri ve Bataryalar. *Sigma*, 2.
- [10] Karanfil, G. (2020). Proton değişim membran yakıt hücreleri: Termodinamiği, bileşenleri ve uygulama Alanları. *Mühendis ve Makina*, 61(698), 57-76.
- [11] Aydın, M. (2007). PEM yakıt pilinin iki boyutlu modellemesi.
- [12] Şefkat, G., & Özel, M. A. (2018). Pem yakıt pilinin simulink modeli ve analizi. *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 23(2), 351-366.
- [13] Başyazıcı, U. İ. (2010). Yakıt Pili Teknolojisinin Ticari Binalarda Kullanılabilirliğinin Sürdürülebilirlik Perspektifiyle Değerlendirilmesi. *IX. Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi*, 173.
- [14] Zehra, U. R. A. L., & Gençoğlu, M. T. Yakıt Pillerinin Konutsal Uygulamalarda Kullanımı.
- [15] Öztöp, H. F., & Çıtak, A. (2004). Yakıt Pili Kojenerasyon Sistemlerinin Evsel ve Ticari Binalarda Uygulamaları. *Tesisat Mühendisliği Dergisi*, 82, 42-44.
- [16] Yılmazoğlu, M., Timoçin, A., Şenlik, A., Al, K., & Ünver, Ü. (2021). Enerji Verimli Binalar İçin Yakıt Pili Kojenerasyon Sistemlerinin İncelenmesi. *El-Cezeri*, 8(2), 766-781.
- [17] Roushenas, R., Razmi, A. R., Soltani, M., Torabi, M., Dusseault, M. B. Jatin Nathwani, Thermo-environmental Analysis of a Novel Cogeneration System Based on Solid Oxide Fuel Cell (SOFC) and Compressed air Energy Storage (CAES) Coupled with Turbocharger Applied Thermal Engineering, 2020, 181, 25, 115978.

ÖZGEÇMİŞ

Zeynep Sude İŞLEYEN

2001 yılı Erzurum doğumludur. Dokuz Eylül Üniversitesi Makine Mühendisliği bölümü lisans son sınıf öğrencisidir. Akabinde Anadolu Üniversitesi Açık öğretim İş Sağlığı ve Güvenliği okumaktadır. PEM Yakıt Pili Matlab/Simulink ortamında modellenmesi ve optimize edilmesi üzerine ayrıca lisans bitirme tezi olarak "Sabit Kanatlı Bir İnsansız Hava Aracının Kompozit Gövde Üretimi, Aerodinamik Analizi ve Kontrolü" projesinde çalışmaktadır. Ayrıca üniversite bünyesinde Enerji Uygulama ve Araştırma Merkezi'nde (EUAM) öğrenci komitesindedir.



Mustafa Umut KARAOĞLAN

1988 yılı Muğla doğumludur. 2011 yılında Yıldız Teknik Üniversitesi Makine Mühendisliğini bitirmiştir. Dokuz Eylül Üniversitesinde 2014 yılında yüksek lisans, 2019 yılında doktora eğitimini tamamlamıştır. 2012-2021 Yılları arasında Araştırma Görevlisi, 2021-2022 yıllarında Dr. Öğr. Üyesi olarak görev yapmıştır. 2022 yılından beri Dokuz Eylül Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Otomotiv Anabilim Dalı'nda Doç. Dr. Olarak görev yapmaktadır. Ayrıca aynı üniversite bünyesinde Enerji Uygulama ve Araştırma Merkezi'nde (EUAM) Müdür Yardımcısı olarak görev yapmaktadır. Elektrikli taşıtlar, hibrit tahrik sistemleri, taşıtlarda yakıt hücresi ve hidrojen sistemleri uygulamaları, taşıt tahrik sistemlerinde tasarım, modelleme ve simülasyon çalışmaları konularında BAP ve TÜBİTAK destekli projelerde araştırmacı olarak görev almıştır. Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı, TÜBİTAK ve KOSGEB destekli çeşitli projelerde hakem, panelist ve izleyici olarak görev almaktadır.