

Araç Uygulamalarında Kullanılan Hibrit Sistemler için PEM Yakıt Pillerinin Elektrokimyasal Modellenmesi

Bulut HÜNER^{1*} 

Öz

Bu makale, Proton Değişim Membranlı Yakıt Hücresini (Proton Exchange Membrane Fuel Cell - PEMFC) ve araç dinamiği modeli kullanan hibrit sisteme dayalı olarak yakıt hücreli araca enerji sağlayan hibrit güç sisteminin matematiksel modellenmesine odaklanmaktadır. PEMFC'nin performansı; sıcaklık, membran kalınlığı, basınç ve nem gibi birçok farklı çalışma parametrelerinden büyük ölçüde etkilenir. Bu çalışmada, araç uygulamaları için önerilen hibrit sistemlerde 150 hücreli PEMFC yığınının elektrokimyasal modellenmesi ele alınmıştır. PEMFC'nin matematiksel modeli basitleştirilmiş varsayımlara ve yarı ampirik denklemlere dayanmaktadır. Ancak bu yaklaşımlar PEMFC'de meydana gelen temel kimyasal ve fiziksel etkileşimlere dayanarak kullanılmaktadır. Hibrit sistemler için PEMFC'nin polarizasyon eğrileri tartışılmış ve matematiksel modelin sonuçları farklı parametreler ile karşılaştırılmıştır. Önerilen elektrokimyasal modelde, sabit basınçta çalışma sıcaklığının artması ve membran kalınlığının azalmasıyla birlikte PEMFC yığının performansında bir iyileşme olduğu belirlenmiştir. Geliştirilen matematiksel model, bu koşullar altında PEMFC yığın performansını makul bir doğrulukla tahmin ederek hibrit araçların enerji yönetim sistemlerinin daha etkin ve verimli bir şekilde tasarlanmasına yardımcı olabilir.

Anahtar Kelimeler: Yakıt hücresi, Hibrit sistemler, Modelleme.

Electrochemical Modeling of PEM Fuel Cells for Hybrid Systems Used in Vehicle Applications

Abstract

This manuscript focuses on the mathematical modeling of fuel cell vehicles based on a hybrid power system using Proton Exchange Membrane Fuel Cell (PEMFC) and vehicle dynamics model. The performance of a PEMFC is greatly affected by many different operating parameters such as temperature, membrane thickness, pressure, and humidity. This study addresses the electrochemical modeling of a 150-cell PEMFC stack in hybrid systems proposed for vehicle applications. The mathematical model of PEMFCs depends on simplified assumptions and semi-empirical equations. However, these approaches are used depending on the basic chemical and physical interactions occurring in PEMFC. Polarization curves of PEMFC for hybrid systems are discussed and the results of the mathematical model are compared with different parameters. In the proposed electrochemical model, it is observed that there is an advancement in the performance of the PEMFC stack with an increase in operating temperature at constant pressure and a decrease in membrane thickness. The developed mathematical model can predict the performance of the PEMFC stack under these conditions with reasonable accuracy, helping to design energy management systems for hybrid vehicles more effectively and efficiently.

Keywords: Fuel cell, Hybrid systems, Modeling.

¹Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi, Araştırma ve Yenilikçilik Direktörlüğü, Osmaniye, Türkiye, buluthuner@osmaniye.edu.tr

¹Erciyes Üniversitesi, H2FC Hidrojen Enerjisi Araştırma Grubu, Kayseri, Türkiye

*Sorumlu Yazar/Corresponding Author

Geliş/Received: 28.08.2024

Kabul/Accepted: 12.11.2024

Yayın/Published: 15.12.2024

1. Giriş

Dünyada nüfus artışı ile gelişen teknolojilere bağlı olarak enerji güvenliği konusundaki farkındalığın artması, enerji taleplerinin artması, fosil tabanlı yakıtların tükenmesi ve çevre sorunlarına ilişkin önemli endişelerin olması nedeniyle temiz ve çevre dostu yenilenebilir veya alternatif enerji kaynaklarına olan ilgi dünya çapında artmaktadır. Fosil tabanlı yakıtların aksine, bu enerji kaynakları sürdürülebilir ve çevreye çok az zarar veren seçenek sunar. Fakat, yenilenebilir enerji kaynakları enerji sistemlerine dahil edildiğinde, enerji kaynaklarında meydana gelen güç dalgalanmaları ve elektrik iletimindeki kısıtlamalar nedeniyle çeşitli engeller ortaya çıkmaktadır (Asiaban, Bozalakov, & Vandeveld, 2024). Bu zorluklar elektrik şebekesinin voltaj, frekans, güvenilirlik ve güç kalitesi gibi birçok özelliğini olumsuz yönde etkilemektedir. Son yıllarda yeşil enerji kullanımı bu sorunu çözenin bir yolu olarak karşımıza çıkmıştır. Yeşil enerji dönüşümleri arasında enerji kaynağı olarak güneş enerjisi, rüzgâr enerjisi, hidroelektrik, jeotermal enerji ve biyokütle enerjisi gibi çeşitli teknolojiler kullanılmaktadır (Hassan et al., 2024; Paraschiv & Paraschiv, 2023). Güneş enerjisi, fotovoltaiik paneller aracılığıyla güneş ışığını doğrudan elektrik enerjisine dönüştürürken; rüzgâr enerjisi, rüzgâr türbinleri ile kinetik enerjiyi elektrik enerjisine dönüştürür. Bu teknolojilerin her biri enerji arzının çeşitlendirilmesi ve fosil yakıtlara olan bağımlılığın azaltılması açısından kritik öneme sahiptir. Ancak, bu teknolojilerin kullanımı sırasında karşılaşılan teknik zorluklar enerji sistemlerinin sürdürülebilirliğini ve verimliliğini artırmak için yenilikçi çözümlerin ve ileri teknolojilerin geliştirilmesini gerektirmektedir (Hüner & Telli, 2023). Günümüzde araçlarda ve enerji santrallerinde geleneksel yanmaya dayalı teknolojiler yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu teknolojiler fosil yakıtların (petrol, doğal gaz, kömür gibi) yanması sonucu enerji üretimini temel alır. Öte yandan, fosil tabanlı yakıtların yanması sonucu ortaya çıkan karbon emisyonları, hava kirliliğine ve küresel ısınmaya önemli katkıda bulunur (Dreizler, Pitsch, Scherer, Schulz, & Janicka, 2021). Bu nedenle çevreci ve sürdürülebilir enerji çözümleri giderek daha fazla önem kazanmaktadır. Özellikle, ulaşım ve enerji üretim sistemlerinde sürdürülebilirlik açısından yakıt hücrelerin kullanılması son zamanlarda önemli ölçüde artmıştır. Petrole olan bağımlılık, çevre kirliliği ve elektrikli araçların mevcut düşük enerji verimliliği sorunları, ulaşımında elektrikli veya yakıt hücreli araçlar için yeni bir fırsattır (F. Jiang et al., 2024). Yakıt hücresi teknolojisindeki son gelişmeler, elektrikli araçların piyasaya sürülmesinin yanı sıra ulaşım araçlarının gelecek senaryosunda da devrim yaratabilir. Çünkü, ulaşım sektöründe yakıt hücreli araçlar (özellikle hidrojen yakıt hücreli arabalar) fosil tabanlı yakıtlı araçlara kıyasla çok daha çevreci ve sürdürülebilir bir alternatif olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu araçlar, uzun menzil sunmaları ve hızlı dolun süreleri dikkate alındığı zaman egzozlarından zararlı gaz salınmadığı için özellikle şehir içi hava kalitesinin iyileştirilmesi açısından büyük bir avantaj sağlar. Öte yandan, elektrikli araçların önemli bileşenleri

arasında yer alan batarya, elektrik motorları ve diğer bileşenler hem çevresel etkiye hem de yüksek karbon ayak izine neden olabilir. Bu nedenle, yakıt hücreli araçlar hidrojen ekonomisinde düşük karbonlu taşımacılığın sağlanması ve hidrojen üretmek için yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanılmasının sera gazı emisyonlarını önemli ölçüde azaltması için hayati öneme sahiptir (Kahveci & Kaya, 2022a). Yakıt hücreleri, hidrojen ve oksijenin kimyasal reaksiyonu sonucu elektrik üretir ve bu süreçte yalnızca su buharı gibi zararsız yan ürün ortaya çıkar. Bu nedenle, yakıt hücreleri karbon emisyonlarını sıfırlamaya yönelik büyük bir potansiyele sahiptir. Yakıt hücrelerinin birçok türü olmasına rağmen, özellikle PEMFC'ler; düşük emisyon, yüksek verimlilik ve düşük çalışma sıcaklıkları ile son zamanlarda otomotiv sektörü için potansiyel bir güç kaynağı olarak popülerlik kazanmıştır. Bir PEMFC, hidrojen ve oksijenin (havadan) reaksiyona girerek elektrik, su ve ısı ürettiği bir elektrokimyasal dönüşüm süreci yoluyla çalışır (Ijaodola et al., 2019; Ogungbemi et al., 2019; Olabi, Wilberforce, & Abdelkareem, 2021). PEMFC'ler kimyasal enerjiyi yüksek verimlilikle (%60 - %77) enerji dönüşümünü sağlayan teknolojilerdir. PEMFC'lerin verimlilikleri ile ilgili olarak hem deneysel çalışmaların hem de matematiksel modellerin bir arada kullanılması, bu teknolojinin geliştirilmesi ve optimize edilmesinde önemlidir (Hou et al., 2024; Kahveci, 2022). Bu sürecin verimli bir şekilde işlemesi için çeşitli destek sistemleri ve bileşenleri gereklidir. Bileşenler ve çevre arasındaki reaksiyon ve enerji etkileşiminin karmaşıklığı ve deneysel çalışmaların yüksek maliyetleri simülasyon modellerinin geliştirilmesini teşvik etmektedir. Bu sistemler PEMFC'nin verimli bir şekilde çalışmasına, güvenilir bir reaktan kaynağı sağlanmasına, en uygun çalışma koşullarının sürdürülmesine ve yan ürünlerin güvenli bir şekilde yönetilmesine olanak tanır (Baroutaji et al., 2021). Her ne kadar yakıt hücreli araçlar yakın zamanda yollarda olsa da PEMFC'lerin uzun süreli çalışması sırasında voltaj veya güçte kalıcı bir düşüş anlamına gelen performans düşüşüyle ilişkili dayanıklılık sorunu hâlâ temel sorunlardan biri olarak görülmektedir. Bu sorunların üstesinden gelinmesi için yakıt hücresi sistemlerinin matematiksel modellenmesi, performans optimizasyonu ve maliyet etkinliği açısından büyük avantajlar sunar. Yığın sıcaklığı, basınç, reaktan nemi ve hava stokiyometrisi gibi yakıt hücresi performansını ve verimliliğini etkileyen çeşitli parametrelerin detaylı analizi, yakıt hücresi sistemlerinin daha verimli ve ekonomik bir şekilde geliştirilmesine olanak tanır (Omran et al., 2021; Özdoğan et al., 2023). Matematiksel modeller bu parametrelerin yakıt hücresi içindeki davranışlarını ortaya çıkarır ve sistemin optimal çalışma koşullarını belirleyerek performans düşüşünü minimize edilebilir. PEMFC'nin matematiksel modellenmesi mekanik ve ampirik yaklaşım olmak üzere iki sınıfa ayrılabilir. (i) mekanik yaklaşım kütle transferini, ısı transferini ve elektrokimyasal reaksiyonları simüle eder. (ii) ampirik yaklaşım ise ısı-kütle transferi ve elektrokimyasal olayın ayrıntılı analizi olmadan PEMFC performansını tahmin etmek için kullanılır. PEMFC yığın sıcaklığı ve basınç kontrolü, membran nemlendirme stratejileri ve hava stokiyometrisinin optimizasyonu gibi faktörler yakıt hücresi performansını önemli ölçüde

etkileyebilir. Bu faktörlerin optimize edilmesi yakıt hücrelerinin dayanıklılığını artırarak uzun vadeli performans düşüşlerini önleyerek daha güvenilir ve daha ekonomik sistem sunar. Modelleme çalışmaları deneysel çalışmalar yapmadan önce fikir sahibi olmak için uygun bir alternatif olabilir (Igourzal, Auger, Olivier, & Retière, 2024; Kahveci & Kaya, 2022b). Şimdiye kadar otomotiv ve diğer uygulamalar için PEMFC performansının modellenmesindeki gelişmeler üzerine çok sayıda modelleme araştırılması yapılmıştır (Tzelepis, Kavadias, Marnellos, & Xydis, 2021; Vichard, Steiner, Zerhouni, & Hissel, 2021; J. Zhao, Li, Shum, & McPhee, 2021). Örneğin; Mert vd. (Mert, Dincer, & Ozcelik, 2012), ulaşım uygulamaları için kullanılan bir PEMFC motor sisteminin kapsamlı bir performans analizini gerçekleştirerek sistem performansının çalışma sıcaklığı ve basıncı, membran kalınlığı, anot stokiyometrisi, katot stokiyometrisi, nem ve referans sıcaklık ve basınç gibi parametrelerinden nasıl etkilendiğini incelemişlerdir. Yapılan analiz sonuçlarında artan çalışma sıcaklığı ile çalışma basıncının PEMFC sisteminin performansını arttırdığı ve bağıl nem ile referans sıcaklığının artmasının verim ve güç üretim değerlerine olumlu bir etkiye sahip olduğunu belirlemişlerdir. Ayrıca, katot stokiyometrisindeki artışın sistemin ekserji verimliliğinde küçük bir düşüşe yol açtığını belirtmişler ve anot stokiyometrisinin verimlilik üzerinde büyük bir etkisi olduğunu yorumlamışlardır. Hosseinzadeh vd. (Hosseinzadeh, Rokni, Rabbani, & Mortensen, 2013), kamyon uygulamaları için sıfır boyutlu PEMFC modelini incelemişlerdir. PEMFC için geliştirilen model hücrelerdeki basınç kayıplarının, su geçişlerinin, nem özelliklerinin ve aşırı voltaj potansiyellerinin etkilerini dikkate alarak analiz edilmiş ve PEMFC yığını ile analiz verileri doğrulanmıştır. Modelleme sonuçlarında, katot tarafında su basmasını önlemek amacıyla üretilen suyun PEMFC yığından uzaklaştırılması için hava stokiyometrik oranının birden büyük olması gerektiğini belirlemişlerdir. Ayrıca, PEMFC sisteminin çalışma sıcaklığının hücre performansını önemli ölçüde etkilediği ve daha yüksek sıcaklıklarda PEMFC için nemlendirme ihtiyacının arttığını yorumlamışlardır. Akroot vd. (Akroot, Ekici, & Köksal, 2019), otomotiv uygulamalarında kullanılmak üzere hazırlanan PEMFC için termodinamik modelini MATLAB'da geliştirmişler ve uygulanmışlardır. PEMFC modelini, başlıca kompresör, pompa, fan, ısıtıcı, nemlendirici gibi yardımcı bileşenlerden oluşturmuşlardır. PEMFC yığın modelini ise 3 atm çalışma basıncında 90 kW güce sahip 230 hücreli olarak tasarlamışlardır. PEMFC modelinde membran kalınlığının azaltılmasının ve iyonik iletkenliğin artırılmasının daha yüksek araç hızlarında sistem verimliliğini arttırdığı ve genel olarak araç hızının artırılmasının hem sistem verimliliği hem de yığın verimliliği üzerinde olumsuz bir etkiye sahip olduğunu yorumlamışlardır. Ayrıca, PEMFC sistemi modelinde geçici koşullar altında sistem performansı üzerinde yığın tasarımının ve yakıt hücresi bileşenlerinin daha ayrıntılı bir araştırması dikkate alınarak çeşitli iyileştirmeler yapılabileceğini vurgulamışlardır. PEMFC'lerde yüksek verimli termal yönetimi, bileşenlerin ve sistemlerin hem çeşitliliği hem de karmaşıklığı nedeniyle yakıt hücreli araçlar için en büyük zorluklardan biri olarak görülmektedir.

Çünkü, termal yönetim sistemleri ve ilgili kontrol stratejileri bileşenlerin performansını, dayanıklılığını ve güvenilirliğini, aracın sürüş performansını, yakıt ekonomisini etkileyebilir. Bu durumlar göz önüne alarak Yang vd. (Yang et al., 2023), PEMFC sistemin çalışma mekanizmasını ve termal performans analizini modelleme yaparak incelemişler ve yakıt hücreli araç termal yönetim sisteminin simülasyon analizini gerçekleştirmişlerdir. Onlar 65 kW güce sahip PEMFC yığını ve 15 kWh kapasiteli Li-ion batarya ile çalışan yakıt hücreli araç prototipini ele alarak, farklı kontrol stratejilerine sahip bir termal yönetim sistem modeli önermişlerdir. Yapılan analiz sonuçlarında her bir alt sistemin kritik sıcaklığının, PEMFC'nin bataryayı şarj etmek için deşarj etme moduna göre yaklaşık %136,6 daha fazla termal güç ürettiği ve batarya şarj modunda bile makul bir aralıkta termal kontrolün sağlandığını göstermiştir. Ayrıca, simülasyon sonuçlarının yakıt hücreli araç termal yönetim sistemi modelinin geçerliliğini ve yüksek sıcaklık koşulları altında soğutma kontrol stratejisinin rasyonelliğini göstermiştir. Gelecekte daha temiz ulaşımaya yönelik umut verici çözümlerden biri olan PEMFC'li elektrikli araçlar hem akademide hem de endüstride yaygın olarak ilgi çekici bir teknoloji olarak kabul edilmektedir. Kaya vd. (Kaya & Hames, 2019), tarafından hidrojen yakıt tüketimini en aza indirmek ve hidrojen yakıt hücreli araç teknolojisinin sistem bileşenlerinin ömrünü uzatmak için yeni kontrol stratejileri önermektedir. Yapılan çalışmanın simülasyon sonuçlarında, geliştirilen kontrol stratejilerinin hidrojen yakıt ekonomisi sağladığını ve sistem teknolojilerinin ömrünü uzattığını doğrulamıştır. Ayrıca, simülasyondaki parametrelerinin basitliği nedeniyle kontrol stratejisinin de farklı tipteki hidrojen yakıt hücreli araçlarda küçük değişiklikler ile kolaylıkla uygulanabileceğini yorumlamışlardır. Yakıt ekonomisi ve batarya şarjını sürdürme kapasitesi, küçük kapasiteli bir batarya grubuyla donatılmış tam güçlü yakıt hücreli hibrit aracın enerji yönetimi için iki temel kriter olarak yer almaktadır. Önerilen stratejilerle yakıt ekonomisini garanti etmek için öngörülen güce göre yerel optimizasyon süreci yoluyla optimal eşdeğer faktörü periyodik olarak güncellenir (Zeng et al., 2021).

PEMFC'li elektrikli araçlar, yaygın olarak sürdürülebilir ulaşım alanında gelecek vaat eden teknoloji olarak kabul edilebilmelerine rağmen yüksek maliyetli olmaları, onları çağdaş otomobil pazarında rekabetçi olmaktan uzak kılmaktadır. Tipik olarak otomobili tasarlarken PEMFC sistemi bileşenlerinin gerekli kapasite ve boyutunu, çalışma sırasındaki su ve ısı dengesini, yakıt tüketimini ve aracın hızına bağlı verimliliğini tahmin edebilmek çok önemlidir. Bu nedenle bu makalenin amacı, araç uygulamalarında kullanılmak üzere hibrit sistemler için PEMFC'lerde enerji tüketiminin analizini tahmin etmek ve bu amaçla elektrokimyasal bir model geliştirmektir. Ayrıca, PEMFC'nin iç olayları arasındaki etkileşimleri dikkate alarak otomotiv uygulamaları için kontrol odaklı bir matematiksel modelleme oluşturmaktır. Sistem dinamiği eşdeğer bir matematiksel formülasyona dönüştürülmüş doğrusal olmayan diferansiyel denklemlerle temsil edilir. Bu gösterim, simülasyon için güçlü bir araç olmanın yanı sıra analiz, kontrol ve optimizasyonda da büyük avantajlar sergiler.

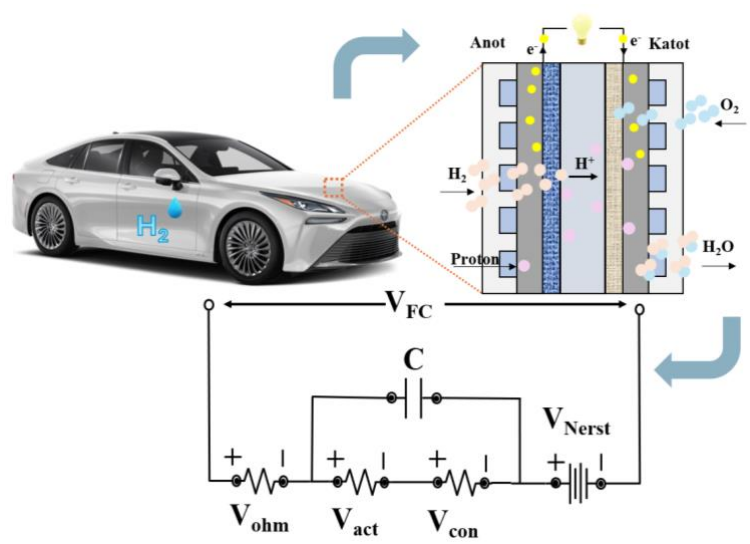
Sıcaklık, basınç ve membran kalınlığı gibi değişkenlerin incelenmesi verilen çalışma değişkenleri altında PEMFC davranışını anlamak için çok önemlidir. Bu çalışmada, araç dinamiği ve PEMFC yığını simülasyonlarını içeren yeni bir yakıt hücreli hibrit aracın elektrokimyasal modeli sunulmuştur. Bir PEMFC'nin performansı polarizasyon eğrisinden ve dolayısıyla denge ile elektrot potansiyeli arasındaki farktan analiz edilmiştir.

2. Yakıt Hücreli Hibrit Sistemin Tanımı ve Elektrokimyasal Modeli

Yakıt hücreli araçlar için tam yakıt hücreli araç, yakıt hücreli ve bataryalı hibrit araç, yakıt hücreli ve ultra kapasitörlü hibrit araç ve yakıt hücreli, bataryalı ve ultra kapasitörlü karma araç olma üzere dört enerji konfigürasyonu vardır. Bu enerji konfigürasyonları, yakıt hücreli araçların performans, maliyet ve çevresel etkiler açısından optimize edilmesi için farklı seçenekler sunar ve her konfigürasyon kullanım amacına göre en uygun çözüm için seçilebilir (S. Ahmadi, Bathaee, & Hosseinpour, 2018).

2.1. Hibrit Araç Modeli

Hibrit aracın modeli; dinamik sistem, kontrol sistemi, yakıt hücresi sistemi, araç dinamiği ve motor gibi birkaç alt sistemin modellenmesini içermektedir. Yakıt hücreli hibrit araç modelinin şematik görünümü Şekil 1'de görülmektedir.



Şekil 1. Araç uygulamalarında PEMFC'nin şematik görünümü (Mulach, 2024)

Yakıt hücreli hibrit araçlarda yakıt besleme sistemi, hidrojen ve havayı aracın ana güç kaynağı olan yakıt hücresine iletir. Yakıt hücresi, hidrojen ve oksijenin elektrokimyasal reaksiyonu ile elektrik

üretir. Bu süreçte hidrojen anottan, oksijen ise katottan yakıt hücresine girer ve proton değişim membranı (PEM) aracılığıyla reaksiyon gerçekleşir. Elektrik üretimi, aracın elektrik motorunu besleyerek hareket sağlar. Bu reaksiyonun yan ürünü olarak sadece su ve ısı açığa çıkar ve su buharı olarak dışarı atılır. Yakıt hücreli araçlarda, sürüş koşulu, aracın hızlanma oranı, ortalama hızı ve maksimum hızı gibi önemli parametrelerin zamana ve araç hızına bağlı bir fonksiyonu olarak düşünülebilir. Bu fonksiyonlar, zaman ve araç hızını temel alarak sürüş sırasında karşılaşılan koşulları ve performans parametrelerini değerlendirmek için kullanılır. Önerilen bu hibrit modelde, sürüş çevriminden gelen hızlanma ve hız talebi göz önüne alındığında tahrik aksının açılma hızını ve torkunu hesaplamayı amaçlamaktadır. Aracın dinamik modelinde lastik-yer temasındaki toplam çekiş kuvveti, tüm direnç kuvvetlerinin ve ivmeden kaynaklanan atalet kuvvetinin toplamıdır. Öncelikle boylamasına harekette aracın çekiş lastiklerine etki eden direnç kuvvetleri hesaplanmalıdır. Aracın çalışması, motor torku T_m tarafından sağlanan itici kuvvet F_d 'ye bağlıdır. İtici kuvvetin, yuvarlanma direnci F_f , eğim direnci F_i , hava sürtünmesi F_w ve hızlanma direnci F_a 'dan oluşan sürüş direncini aşması gerekir (Denklem (1)-(5)).

$$F_d = \frac{T_m i_0 \eta_T}{r} \quad (1)$$

$$F_f = m_{arac} f \cos(\alpha) \quad (2)$$

$$F_i = m_{arac} g \sin(\alpha) \quad (3)$$

$$F_w = \frac{C_D A_{arac}}{21.15} V_{arac}^2 \quad (4)$$

$$F_a = m_{arac} g \sin(\alpha) \quad (5)$$

burada g , V_{arac} , A_{arac} , C_D , f , m_{arac} ve α sırasıyla yer çekim ivmesi (m/s^2), aracın hızı (m/s), aracın ön yüzey alanı (m^2), aerodinamik sürüklenme katsayısı, yuvarlanma direnç katsayısı, hibrit aracın tam yükte toplam kütlesi (kg) ve derece cinsinden yolun eğimidir. Boyuna güç aktarma sistemi modelinde (i) araç yalnızca boylamasına yönde hareket eder, (ii) lastik kaymaları göz ardı edilir, (iii) lastik yarıçapındaki değişiklik ihmal edilir ve sistem titreşimi göz ardı edilir. Elektrik motorunun çalışma noktasını belirlemek için tahrik milindeki tork ve hız gerekli olduğundan PEMFC'li hibrit aracın dinamik modeline için fiziksel parametreleri (ağırlık ve boyut) tanımlamak gereklidir. Daha sonra direnç kuvveti değerleri ile elektrik motorunun ihtiyaç duyduğu güç hesaplanır. Hesaplanan bu güç değeri elektrikli araçlardaki batarya gücüne eşittir. Seri ve paralel hibrit araç konfigürasyonlarında

elektrik motorunun ihtiyaç duyduğu güç PEMFC tarafından sağlanmaktadır. Önerilen araç modeli sadece aracın sürüş yönündeki kuvvetine bağlı olarak Newton'un dinamik denklemlerine dayanmaktadır ve yanal dinamiklerin etkisi dikkate alınmaz. Dönen parçaların ataletinden kaynaklanan ilave tork için aracın her bir parçası ayrı ayrı dikkate alınır ve ilgili parçanın önerilen matematiksel modeline dahil edilir. Tekerleğin yuvarlanma direnci katsayısı sürüş hızına bağlı olduğundan, sürüş hızı arttığında lastiğin yuvarlanma direnci azalır. Yuvarlanma direnci katsayısı aynı zamanda lastiğin malzemesine ve yol yüzeyine de bağlıdır. Aracın itici gücü, yuvarlanma direnci, hava sürüklenme direnci, eğim direnci ve atalet direncinin toplamıdır.

$$n = \frac{60i_0V_{arac}}{2\pi r} \quad (6)$$

$$P_m = \frac{T_m n}{9550\eta_m} \quad (7)$$

burada η_m , n ve P_m sırasıyla motorun verimi, motorun hızı ve elektrik gücüdür. Önerilen matematiksel modelde kullanılacak olan Toyota Mirai model aracın özellikleri Tablo 1'de listelenmiştir.

Tablo 1. Toyota Mirai aracına ait parametreler (Usmanov, Ruzimov, Tonoli, & Mukhitdinov, 2023)

Parametreler	Birim	Değer
Aracın toplam kütlesi	m_{arac}	1852 kg
Aerodinamik sürüklenme katsayısı	C_D	0.29 Ns^2m^2
Aracın ön yüzey alanı	A_{arac}	2.23 m^2
Yuvarlanma direnci	f	0.01
Tekerlek yarıçapı	r	0.316 m
Tekerleğin eylemsizlik momenti	J_{wh}	0.32 kgm^2
Elektrik motorunun eylemsizlik momenti	J_{em}	0.008 kgm^2
Azalma oranı	i_0	9.09
Hız düşürücü verimi	η_m	0.90
Yardımcı güç	P_{aux}	440 W
Maksimum güç	P_{max}	113 kW
Maksimum tork	T_{max}	335
Hava yoğunluğu	ρ	1.2 kg/m^3

Toyota Mirai, ticari olarak satılan ilk hidrojen yakıt hücreli araçlardan biridir. Bu araç, tek vitesli şanzıman sistemi ile donatılmış olup, torku artıracak ve elektrik motorunun hızını azaltacak şekilde tasarlanmıştır. Ayrıca, bu araç 113 kW gücünde ve maksimum 335 Nm torka sahip elektrik

motoru ile farklı koşullarda çalışmaktadır. Toyota Mirai araç modeline ait sürüş modellerinin hız profilleri göz önüne alındığında, hidrojenli yakıt hücreli araç ömrünün 12,000 saat olduğu veya bozulma sonrasında hücre voltajının 0,5 V'tan az olduğu düşünülmektedir. Ayrıca, bu araç modelinde hız profillerinde sürüş çevrimlerinin sıfır yol açısına sahip düz bir yüzeyde olduğu varsayılmıştır (P. Ahmadi et al., 2020).

2.2. PEM Yakıt Pilinin Elektrokimyasal Modeli

Pratik uygulamalarda, PEMFC yığınının çıkış voltajı yakıt hücrelerindeki çeşitli kayıplardan dolayı ideal tersinir elektromotor kuvvetten daha düşüktür. PEMFC yığınlarının tasarımı hibrit araçların performansı ve verimliliği için kritik öneme sahiptir. PEMFC'nin genel yapısı elektrot, gaz difüzyon katmanı, proton değişim membranı ve katalizör katmanlarından oluşur. PEMFC'nin anot (negatif elektrot) tarafına giren hidrojen gazı (H_2) katalizör tabaka sayesinde proton ve elektronlara ayrışır. Bu ayrışma sonucu oluşan protonlar membrandan geçerek katot tarafa (pozitif elektrot) doğru hareket eder. Elektronlar ise harici bir devre üzerinden katot tarafa doğru akar ve katot tarafa giren oksijen gazı (O_2), protonlar ve elektronlarla reaksiyona girerek elektrik ve su (H_2O) elde edilir. Bu süreç sonucunda yakıt pilinden sürekli olarak elektrik enerjisi elde edilir ve yan ürün olarak sadece su açığa çıkar (Denklem (8)-(10)) (Ayyarao, Polumahanthi, & Khan, 2024).



Bir PEMFC yığın voltajı, akım-gerilim (I-V) ilişkisi ile açıklanabilen polarizasyon eğrisinden (hücre voltajına karşı hücre akım yoğunluğu) yığın akımının bir fonksiyonu olarak hesaplanabilir. PEMFC çalışırken, hücre voltajı genellikle hücrenin akım yoğunluğuna (yığın akım) bağlı olarak değişir. Polarizasyon eğrisi, hücrenin belirli bir elektriksel yük altında nasıl davrandığını ve verimliliğini ifade ederek PEMFC'nin çalışma durumunu anlamak için önemli bir araçtır ve hücre performansının analiz edilmesinde kullanılır. PEMFC yığını, seri olarak bağlanan birden fazla yakıt hücresinden oluşur ve yığın voltajı hücre voltajlarının toplamı olarak alınır (G. Sun, Park, & Lin, 2019; Xing, Xiang, Zhu, & Tu, 2022). Bu çalışmada, tüm hücrelerin aynı olduğunu varsayıp yığın voltajı aşağıdaki denklemler kullanılarak hesaplanmıştır. PEMFC yığın modelini oluşturmak için yığın gücü, ısı üretimi ve çeşitli parametreler arasındaki matematiksel ilişki ile elde edilebilir.

PEMFC'nin kararlı durum davranışı Amphlett vd. (Mann et al., 2000), tarafından önerilen bir elektrokimyasal model kullanılarak elde edilmiştir. Kullanılan elektrokimyasal modelin genel matematiksel ifadeleri aşağıdaki detaylı olarak verilmiş olup, PEMFC'nin çıkış voltajı ile termal gücü Denklem (11) ve Denklem (12)'den hesaplanabilir:

$$V_{hücre} = V_{Nernst} - V_{aktivasyon} - V_{omik} - V_{konsantrasyon} \quad (11)$$

$$P_{ısı} = N_{hücre} (V_{Nernst} - V_{hücre})i \quad (12)$$

burada V_{Nernst} , Nernst açık devre voltajıdır (V). $V_{aktivasyon}$, V_{omik} ve $V_{konsantrasyon}$ sırasıyla aktivasyon, omik ve konsantrasyon aşırı kaybıdır (V). $P_{ısı}$ ise PEMFC yığını tarafından üretilen ısıdır (W). $N_{hücre}$ ise PEMFC hücrelerinin sayısıdır. Nernst voltaj değeri (V_{Nernst}), çalışma sıcaklığı, H_2 ve O_2 basıncı gibi bazı parametrelere bağlı olup yakıt hücresi akımı sıfıra eşit olduğunda açık devre gerilimini tanımlar ve PEMFC'nin elektriksel özelliklerindeki maksimum değeri gösterir. V_{Nernst} geriliminin matematiksel olarak ifadesi Denklem (13)'te verilmiştir:

$$V_{Nernst} = 1.229 - 8.5 \times 10^{-4} (T_{hücre} - 298.15) + 4.30 \times 10^{-5} T_{hücre} \left[\ln(P_{H_2}) + 0.5 \ln(P_{O_2}) \right] \quad (13)$$

$$P_{O_2} = P_{katot} - (RH_{katot} P_{H_2O,doy}) - \frac{0.79}{0.21} P_{O_2} \exp \left(\frac{0.219 \left(\frac{i}{A_{hücre}} \right)}{T_{hücre}^{0.832}} \right) \quad (14)$$

$$P_{H_2} = 0.5 RH_{anot} * P_{H_2O,doy} \left[\left(\exp \left(\frac{1.635 \left(\frac{i}{A_{hücre}} \right)}{T_{hücre}^{1.334}} \right) \frac{RH_{katot} P_{H_2O,doy}}{P_{anot}} \right)^{-1} - 1 \right] \quad (15)$$

$$\log(P_{H_2O,doy}) = 2.95 \times 10^{-2} (T_{hücre} - 273.15) - 9.18 \times 10^{-5} (T_{hücre} - 273.15)^2 + 1.44 \times 10^{-7} (T_{hücre} - 273.15)^3 - 2.1794 \quad (16)$$

burada $T_{hücre}$, P_{H_2} , P_{O_2} , $P_{H_2O,doy}$, P_{anot} ve P_{katot} sırasıyla yakıt hücresinin çalışma sıcaklığını, hidrojenin kısmi basıncını (atm), oksijenin kısmi basıncını (atm), suyun doyma basıncı (atm), anot kısmi basıncını (atm) ve katot kısmi basıncını (atm), temsil etmektedir. RH_{anot} ve RH_{katot} sırasıyla anot ve katot elektrottaki buharın bağıl nemidir ve genellikle 1 olarak alınır (Chen & Wang, 2019). Yakıt

hücresinin giriş tarafındaki akış kanallarında reaktan kısmi basınçları, giriş akışlarının nemlenme düzeyine ve oksijen/hidrojen tüketim oranlarına göre değişebilir (Kandidayeni, Macias, Khalatbarisoltani, Boulon, & Kelouwani, 2019). Yakıt hücresinin potansiyeli (akım sıfırdan farklı olduğunda) aktivasyon, omik ve konsantrasyon kayıpları nedeniyle her zaman Nernst voltajından küçüktür. Bu kayıpların her biri yakıt hücresinin gerçek çalışma şartları altında Nernst potansiyelinden daha düşük bir çalışma voltajına yol açar. Nernst potansiyeli, sadece elektrokimyasal reaksiyonların termodinamik potansiyelini belirtmesine rağmen, gerçek sistemlerde bu kayıplar da göz önünde bulundurulmalıdır. Aktivasyon aşırı potansiyeli esas olarak PEMFC elektrotunun yüzeyinde aktive edilen elektrokimyasal reaksiyonun yavaş hızından kaynaklanır ve elektrot reaksiyonlarının başlaması için gereken ek voltaj olarak bilinir. Bu kayıp, özellikle düşük akım yoğunluğu bölgelerinde belirgin olup, elektrot reaksiyonlarının kinetiği ile ilişkilidir ve Denklem (17)'de verildiği gibi hesaplanır:

$$V_{aktivasyon} = - \left[\xi_1 + \xi_2 T_c + \xi_3 T_c \ln \left(\left(\frac{P_{O_2}}{5.08} \right) \times 10^6 \exp \left(\frac{-498}{T_c} \right) \right) + \xi_4 T_c \ln(i) \right] \quad (17)$$

burada ξ_1 , ξ_2 , ξ_3 ve ξ_4 sırasıyla kinetik, termodinamik ve elektrokimyasal temellere sahip teorik denklemlere dayanan yarı ampirik katsayılarıdır. Bu parametreler transfer katsayısı, değişken akım yoğunluğu, evrensel gaz sabiti, Faraday sabiti ve aktarılan elektron sayısına dayalı bir termodinamik ilişki olan Butler-Volmer denkleminin çözülmesiyle hem anot hem de katot tarafı için elde edilir (Y. Jiang, Zhang, & Huang, 2023; Niya & Hoorfar, 2014). Omik aşırı potansiyeli, elektronların ve protonların hücre bileşenleri aracılığıyla taşınmasından kaynaklanır. Taşınması sırasında elektronların hareketi belirli bir dirençle karşılaşır. Bu direnç, malzemenin türüne, yapısına ve kalınlığına bağlıdır. Daha yüksek direnç, elektronların geçişini zorlaştırır ve bu da daha büyük bir aşırı potansiyele neden olur. Önerilen bu matematiksel modelde membranın tüm önemli parametrelerini içerecek şekilde direnç için genel bir ifade tanımlanmıştır.

$$V_{omik} = i(R_{membran} + R_c) \quad (18)$$

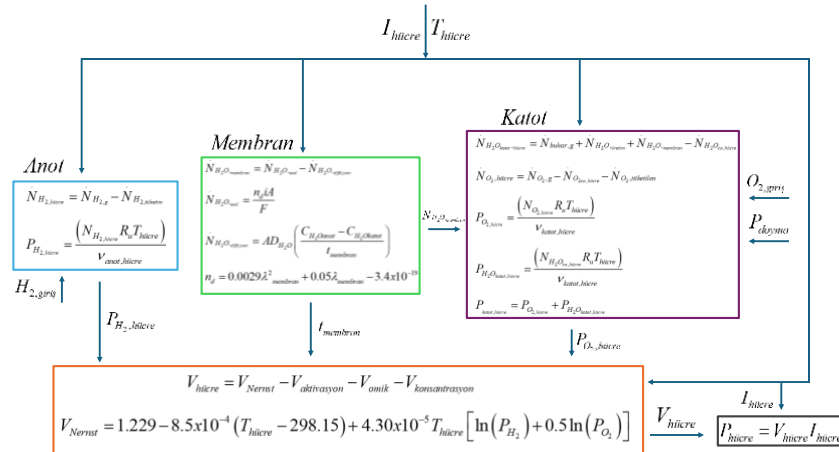
$$R_{membran} = \frac{\rho_{membran} t_{membran}}{A} \quad (19)$$

$$\rho_{membran} = \frac{181.6 \left[1 + 0.03 \left(\frac{i}{A_{hücre}} \right) + 0.062 \left(\frac{T_{hücre}}{303} \right)^2 \left(\frac{i}{A_{hücre}} \right)^{2.5} \right]}{\left[\lambda_{membran} - 0.634 - 3 \left(\frac{i}{A_{hücre}} \right) \right] * \exp \left[4.18 \left(\frac{T_{hücre} - 303}{T_{hücre}} \right) \right]} \quad (20)$$

burada, $R_{membran}$ membranın direncidir (Ω). R_c ise protonların membrandan transferine karşı dirençtir ve genellikle sabit kabul edilir (Ω). $\rho_{membran}$, $t_{membran}$, $A_{hücre}$ ve $\lambda_{membran}$ sırasıyla elektron akışı için membranın spesifik direncini (Ωcm), membranın kalınlığını (cm), hücrenin aktif yüzey alanını (cm^2) ve membranın hazırlanma prosedüründen etkilenen anot gazının bağıl nem ve stokiometri ilişkisinin bir fonksiyonunu temsil etmektedir (Chugh et al., 2020). PEMFC'den çekilen akım miktarına ve diğer fiziksel parametrelere bağlı olarak yakıt hücresinin çıkış voltajı düşer. Bu kayıp, kütle taşınımı veya konsantrasyon kaybı olarak hesaplanır. Konsantrasyon aşırı kayıpları, reaktanın zamanla reaksiyon yüzeyine hareket edememesi durumunda yüksek yük akım yoğunluğunun neden olduğu voltaj kaybını ifade eder. Bu kayıplar kütle taşınımı sırasında hidrojen ve oksijen konsantrasyonlarını etkiler. Bu durumda gazların kısmi basınçlarının azalmasına neden olur. Kütle taşınımına bağlı konsantrasyon aşırı potansiyeli Denklem (21)'de verildiği gibi hesaplanır:

$$V_{konsantrasyon} = -b \ln \left(1 - \frac{I_{hücre}}{I_{max}} \right) \quad (21)$$

burada b , hücreye ve çalışma durumuna bağlı olan parametrik bir katsayıdır (V). I ise hücrenin gerçek akım yoğunluğunu (A/cm^2) temsil eder. Önerilen bu modelde kullanılan PEMFC'nin alt sistemleri için hesaplama sürecinin basitleştirilmiş akış diyagramını Şekil 2'de verilmiştir.



Şekil 2. PEMFC'nin alt sistem modellemesi için akış diyagramının şematik görünümü

PEMFC verimliliği, hücre çıkış voltajı ile teorik hücre voltajı arasındaki oran olarak tanımlanabilir. Bu aynı zamanda üretilen elektriğin üretilen hidrojene oranı olarak da tanımlanabilir.

$$\eta_{PEMFC} = \frac{V_{hücre} I_{hücre}}{W_{H_2}} \quad (22)$$

$$N_{H_2} = \frac{I_{hücre}}{nF} \quad (23)$$

$$W_{H_2} = \Delta H \frac{I_{hücre}}{nF} \quad (24)$$

burada W_{H_2} tüketilen hidrojenin watt cinsinden enerji değeridir. Faraday yasasına göre tüketilen hidrojen (N_{H_2}) üretilen akımla orantılıdır. ΔH , hidrojenin yüksek ısıtma değeridir (HHV) (286 kJ/mol). Denklem (23) ve Denklem (24)'teki değerler Denklem (22)'de yerine konularak, PEMFC'nin verimliliği için oluşturulan matematiksel ifade Denklem (25)'e dönüştürülür (Mogorosi, Oladiran, & Rakgati, 2020):

$$\eta_{PEMFC} = \frac{V_{hücre}}{1.482} \quad (25)$$

Bu denklemler, bir PEMFC'nin performansını modellemek için temel bileşenlerdir. PEMFC'li araçların matematiksel modellenmesi yakıt hücresinin, elektrik motorunun, bataryanın ve araç dinamiklerinin detaylı bir şekilde modellenmesini gerektirir. Bu modeller, enerji yönetim stratejilerinin optimizasyonu ve aracın performansının iyileştirilmesi için kullanılır. Genellikle sayısal simülasyonlar ve kontrol algoritmaları dahil edilerek geliştirilir. Böylece, yukarıda ayrıntılı olarak açıklanan denklemlere dayanarak PEMFC'nin matematiksel modeli oluşturulabilir. Önerilen bu matematiksel modelde PEMFC yığınının parametreleri ve çalışma koşulları Tablo 2'de listelenmiştir.

Tablo 2. PEMFC modeline ait elektrokimyasal parametreler

Parametreler	Değer	Referans
$N_{hücre}$	150	Bu çalışma
$A_{hücre}$	180 cm ²	Bu çalışma
$T_{hücre}$	40 °C, 60 °C ve 80 °C	Bu çalışma
$t_{membran}$	Nafion 115 ve Nafion 117	Bu çalışma
P_{anot}	1 atm	(Qin, Du, Fan, Chang, & Yin, 2017)
P_{katot}	1.6 atm	(Qin et al., 2017)
b	-0.016 V	(Jia, Li, Wang, Cham, & Han, 2009)
ξ_1	-0.948	(Mann et al., 2000)
ξ_2	0.00304	(Mann et al., 2000)
ξ_3	7.6x10 ⁻⁵	(Mann et al., 2000)
ξ_4	-1.93x10 ⁻⁴	(Mann et al., 2000)
I_{max}	1.5 A/cm ²	(Outeiro, Chibante, Carvalho, & De Almeida, 2008)
$\lambda_{membran}$	20	(Rezk, Olabi, Ferahtia, & Sayed, 2022)
R_c	1x10 ⁻⁴ Ω	(Rezk et al., 2022)
RH_{anot}	1	(Miao, Chen, Zhao, & Demsas, 2020)
RH_{katot}	1	(Miao et al., 2020)

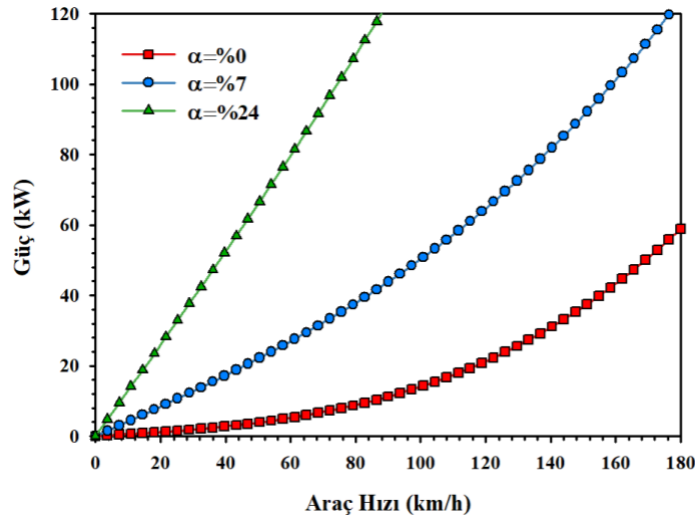
Bir PEMFC'nin çalışması için yardımcı ekipmanlara ihtiyacı vardır. Bu ekipmanlar, reaktanların beslenmesine ve nemlendirilmesine, yığının ve reaktanların sıcaklık regülasyonuna olanak tanır. Ayrıca, elektrik motorları, bataryalar, DC/DC dönüştürücüler, genel sistem soğutma devresi ve diğer birçok bileşen de gereklidir. Hibrit bir sistemde DC/DC dönüştürücü, yük gücü gereksinimlerini karşılamak ve DC bara voltajını beklenen değerde sabit tutmak için güç kaynaklarının güç akışını koordine etmede önemli bir bileşendir. PEMFC ve lityum piller, aracı sürmek için elektrik motoruna enerji sağlamak üzere enerji yönetim sistemi tarafından kontrol edilir. Araç için talep edilen güç ise hava direnci, araç ivmesi ve yuvarlanma sürtünmesi ile belirlenir. PEMFC tek yönlü bir DC-DC aracılığıyla yüksek voltaj veri yoluna bağlanır ve batarya, en yüksek enerjiyi sağlamak ve frenleme enerjisini geri kazanmak için kullanılabilir. PEMFC ve lityum bataryanın toplam çıkış gücü Denklem (26) ile belirlenebilir:

$$P_{PEMFC} = \frac{1}{\eta_{DC}} (P_m + P_{batarya}) \quad (26)$$

burada PEMFC yakıt hücresinin çıkış gücü iken, $P_{batarya}$ bataryanın çıkış gücüdür. $P_{batarya} > 0$ batarya deşarjını, $P_{batarya} < 0$ ise batarya şarjını temsil eder (Z. Sun, Wang, & Chen, 2023).

3. Bulgular ve Tartışma

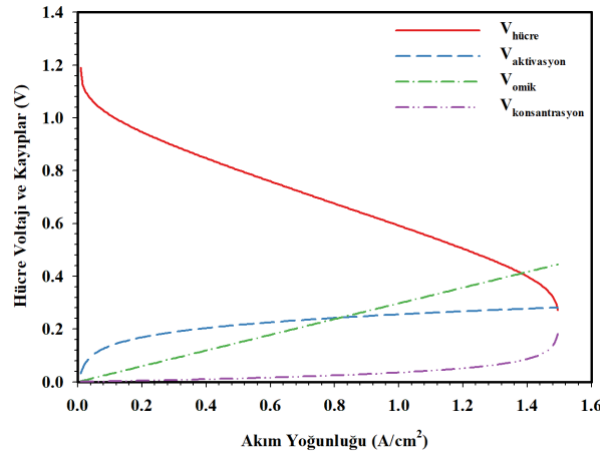
Araçlarda güç ünitesi seçerken elektrik motorunun ihtiyaç duyduğu maksimum gücü hesaplamak önemlidir. Bu güç, maksimum hız, hızlanma, eğim ve aracın diğer özellikleri veya sürüş koşulları ile ilişkili parametrelerle sınırlıdır. Bu çalışmada önerilen modellemede aracın düz bir yol, üst geçit ve eğimli yollara karşılık gelen eğimler dikkate alınarak sırasıyla %0, %7 ve %24'lük eğim oranlarında güç ihtiyaçlarını belirlenmiştir. Şekil 3'te bir aracın farklı eğimlerde hıza karşı elektrik gücü talebi görülmektedir.



Şekil 3. Farklı eğimlerde aracın hızına karşı güç değerlerinin karşılaştırılması

Şekil 3 incelendiği zaman, düz bir yolda 180 km/saat hızla hareket etmek için tekerleğin 58 kW güce ihtiyaç duyduğu görülmektedir. Düz yolda hareket ederken aracın güce olan ihtiyacı büyük ölçüde hızın karesi ile artan aerodinamik direnç tarafından belirlenir. Bu durum, enerji verimliliği çalışmalarında ve hız sınırlarının belirlenmesinde dikkate alınması gereken önemli bir faktördür. Benzer şekilde maksimum motor gücünde (113 kW) %24 eğim ve %7 eğimde 77 km/h ve 158 km/h hıza ulaşılır. Veerendra vd.'nin yaptığı çalışmada %0, %4, %7 ve %24'lük eğimli yollara karşılık gelen eğimler ile araç düz bir yolda 177 km/h hızla hareket edebilmek için aracın 71 kW'lık güce sahip olmasını belirtmişlerdir. Düz yolda yüksek hızların elde edilmesinin motor açısından daha az enerji tüketimi gerektirdiği anlamına gelir. Maksimum motor gücünde %24 eğimde 75 km/h ve %7

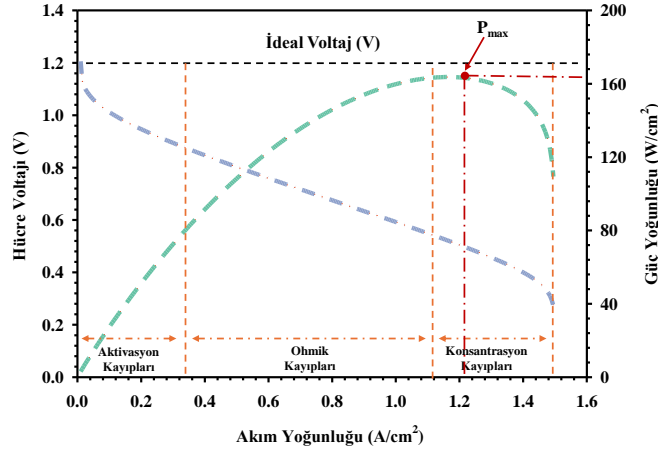
eğiminde 155 km/h hıza ulaşmıştır. Ancak eğim arttıkça, motorun hız kaybını önlemek ve araç yükünü taşımak için daha fazla çalışması gerekir. Yüksek eğimler, motorun daha fazla güç üretmesini gerektirdiği için enerji tüketimini de önemli ölçüde artırır (S. Jiang, Wang, Zhang, Bai, & Xu, 2019; Veerendra, Mohamed, Leung, & Shah, 2021). Çünkü, eğim arttıkça yerçekimi kuvvetinin etkisiyle aracın daha fazla güç tükettiğini ve %24 gibi yüksek bir eğimde aracın güç ihtiyacı yerçekimine karşı yapılan işin artması ile hızla artar. Ayrıca, daha düşük eğimlerde aynı güçle daha yüksek hızlara ulaşılabileceğini ve yerçekiminin etkisi ile %24 eğime göre daha az bir hıza sahip olduğu belirlenmiştir. Bu durum, daha düşük eğimli yollarda enerji tüketiminin ve aracın performansının daha verimli olacağını gösterir (Donkers, Yang, & Viktorović, 2020). PEMFC’li hibrit araçlar eğimli yollarda daha az enerji tükettiklerinden dolayı motor gücü doğrudan mekanik harekete dönüşmemektedir. Çünkü elektrik motorlarıyla hareket sağlanmaktadır ve bu motorlar eğimli yollarda yerçekimi etkisini aşmak için daha az güç harcamaktadır. Aynı zamanda düz yolda aerodinamik dirençten dolayı harcanan enerjiyi minimize edebilir ve bu da daha uzun menzil ve daha yüksek enerji verimliliği sağlar. Bu çalışmada PEMFC'nin çıkış gerilimi ampirik bir model kullanılarak hesaplanmıştır. Bu model sağlam, basit ve esnek özelliklere sahip yakıt hücresinin gerçek dünya çalışma koşullarındaki performansını tahmin edebilecek şekilde ele alınmıştır. Şekil 4, PEMFC'nin 1 atm çalışma basıncında performansını ve farklı hücre kayıplarını akım yoğunluğunun bir fonksiyonu olarak gösteren genel bir polarizasyon eğrisini temsil etmektedir.



Şekil 4. PEMFC modeline ait aşırı potansiyeller

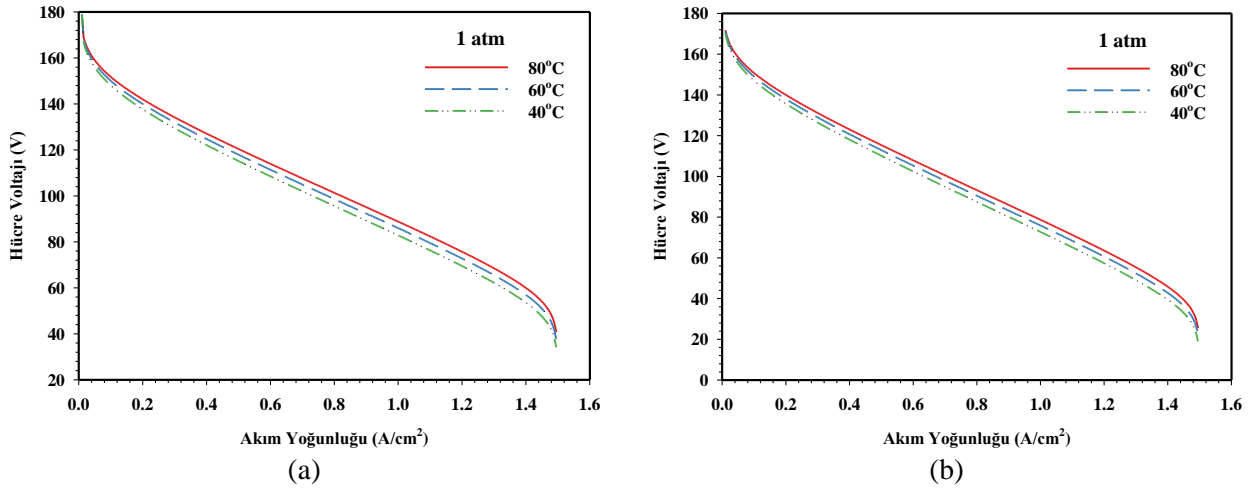
Şekil 4'te yakıt hücresinden daha fazla akım çekildikçe gerilim kayıplarının arttığı görülmektedir. Sonuçlara göre en önemli katkılar aktivasyon ve omik aşırı potansiyellerde görülmektedir. Bu bulgular elektrottaki kimyasal azalmaların yavaş kinetiği ve iyon transfer kısıtlamaları ile ilişkilidir. Öte yandan, konsantrasyon aşırı potansiyeli hücre polarizasyonu üzerinde en küçük etkiye sahiptir. Bu durum, hücre performansının daha çok aktivasyon ve omik kayıplardan etkilendiğini ve konsantrasyon kayıplarının ihmal edilebilir düzeyde olduğunu ortaya koyar. Genel

olarak düşük güç yoğunluğa sahip bölgelerde aktivasyon aşırı kayıplarından dolayı hücre potansiyelinde bir düşüş meydana gelirken, omik bölgede ise orta güç yoğunluğunda hücre potansiyelinde doğrusal bir düşüş vardır. Ayrıca, akım yoğunluğunun yüksek olduğu bölgede kütle kayıplarından dolayı polarizasyon eğrisinde ani bir düşüş olduğu görülmektedir. Polarizasyon eğrisinin oluşumunun ardındaki temel prensip, yakıt hücresindeki elektrokimyasal reaksiyonun kinetik yasasıdır. Şekil 5'te PEMFC modeline ait akım-voltaj (I-V) ve güç-voltaj (P-V) eğrisinin genel görünümü verilmiştir.



Şekil 5. PEMFC modeline polarizasyon ve güç eğrisi

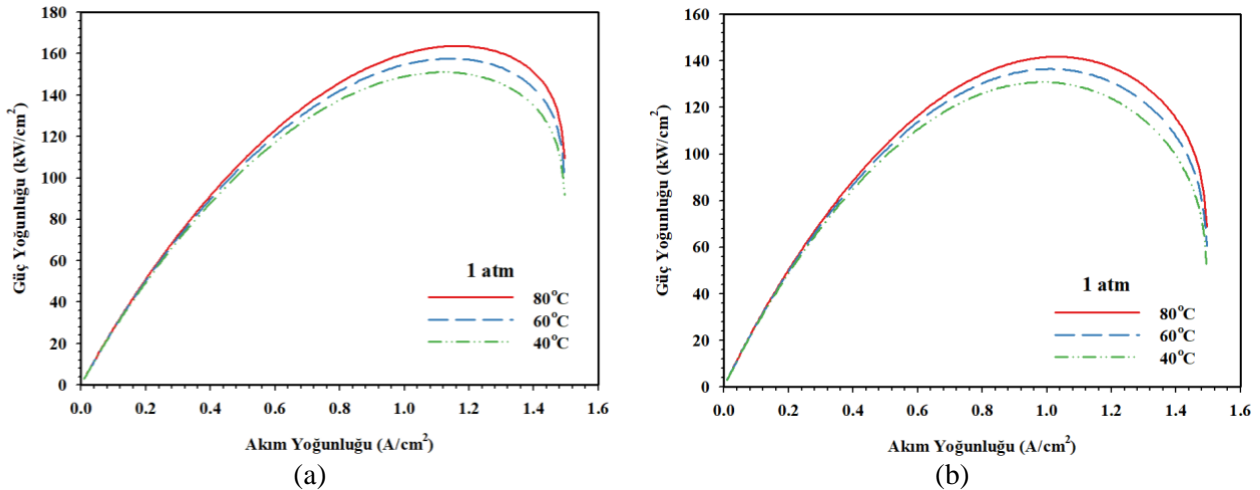
Hücre voltajını akım yoğunluğuna göre gösteren polarizasyon ve güç eğrisi PEMFC'leri karakterize etmek için kullanılmaktadır. Akım yoğunluğu arttıkça açık devre voltajı azalmaktadır. Açık devre voltajı, hücrenin yakıt ve oksidan sağlandığında herhangi bir yük bağlı olmadığında elde edilen maksimum gerilimi ifade eder (yaklaşık 1,2 V). Şekil 5'te gösterildiği gibi PEMFC tarafından sağlanan akım, hidrojen akış hızının doğrusal bir fonksiyonu olan difüzyon sınır akımına yakın veya eşittir. Hücreden akım çekilmediğinde (açık devre voltajı) gerilim en yüksek değerinde olmasına rağmen, güç değeri sıfırdır. Akım arttıkça hücre voltajı düşmeye başlar, fakat güç artar. Belli bir noktada PEMFC maksimum güce (P_{max}) ulaşır ve bu nokta hem hücre tasarımı hem de çalışma koşulları için optimize edilmesi gereken kritik bir nokta olarak adlandırılır. PEMFC çalışma sıcaklığı, reaktanların bağıl nemi ve hava beslemesindeki aşırı stokiometri gibi diğer çalışma koşulları da mevcut güç potansiyel aralığının belirlenmesine katkıda buldukları sürece çok önemlidir. PEMFC'lerde membranlarının kalınlıkları geniş bir aralıkta değişebilmektedir ve membran kalınlığının seçimi esas olarak membran boyunca basınç farkına bağlıdır. Çünkü, yakıt hücresi membranlarının iyonik iletkenliği kalınlık ve malzeme özelliklerinin bir fonksiyonudur. Farklı membran kalınlığına sahip PEMFC yığın modelin sıcaklığın polarizasyon eğrisi üzerindeki etkisi de incelenmiş ve sonuçlar Şekil 6'da gösterilmiştir. Şekil 6'da önerilen matematiksel model tarafından tahmin edilen PEMFC yığını için sıcaklığın etkisini karşılaştırmaktadır.



Şekil 6. Farklı membran kalınlığına sahip PEMFC yığın modelinde sıcaklığın etkisi a) Nafion 115
b) Nafion 117

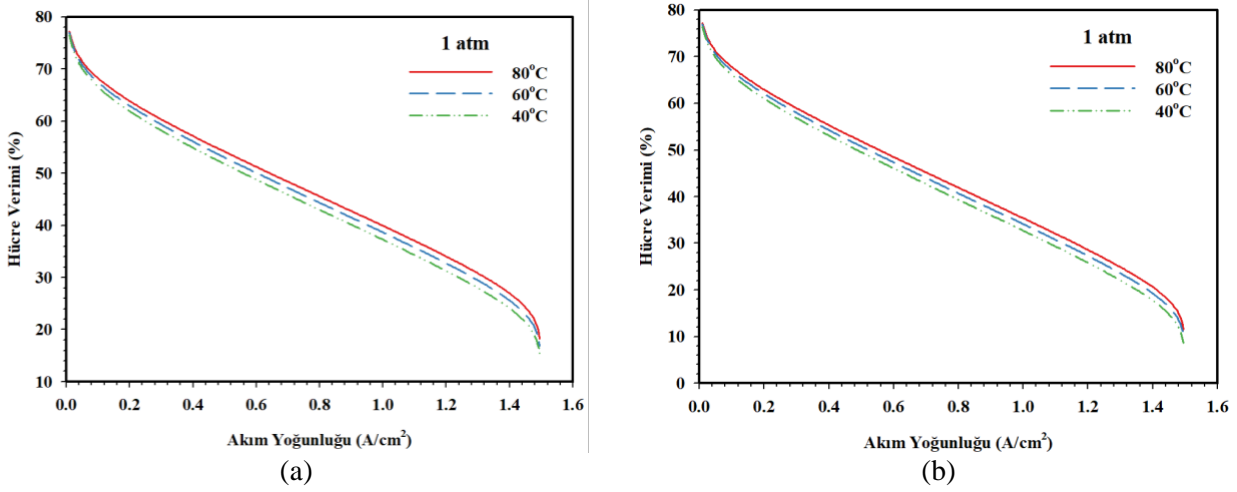
Şekil 6 incelendiği zaman, PEMFC yığının performansı diğer sıcaklıklarla karşılaştırıldığında akım yoğunluğunun daha yüksek değerleri için istikrarlı bir şekilde artar. PEMFC modelinde kullanılan Nafion 115 membranı için sıcaklık değişimi (80°C, 60°C ve 40°C) hücre voltajı ve akım yoğunluğuna bağlı olarak düşmektedir (Şekil 6(a)). En yüksek hücre voltajının düşük akım yoğunluğunda ve yüksek sıcaklıkta (80°C) olduğu belirlenmesine rağmen, 60°C ve 40°C’de ise hücre voltajında düşüş görülmektedir. Özellikle, daha yüksek sıcaklıklarda hücre voltajı daha yüksek seviyelerde olduğundan sıcaklığın hücre performansını olumlu etkilediğini göstermektedir. PEMFC yığının performansı diğer sıcaklıklarla karşılaştırıldığında, akım yoğunluğunun daha yüksek değerleri için artmaktadır. Öte yandan, modelde kullanılan Nafion 117 membranı için de benzer bir eğilim gözlenmektedir. Yine üç farklı sıcaklıkta (80°C, 60°C ve 40°C) ölçülen hücre voltajları akım yoğunluğunun artmasıyla azalmaktadır. 80°C sıcaklıkta hücre voltajı en yüksek değerdedir ve daha düşük sıcaklıklarda (60°C ve 40°C) bu değer azalmaktadır. Sıcaklığın 40°C’den 80°C’ye yükselmesiyle yığın voltajındaki artışın 1,2 A/cm² akım yoğunluğunda yaklaşık %20 olduğu belirlenmiştir. Öte yandan PEMFC yığının 0,4-1,0 A/cm² akım yoğunluğunda çalıştırıldığında yığın gerilimindeki artış yaklaşık olarak %15-19 civarındadır. Omik ve konsantrasyon kayıplarının önemsiz olduğu düşük akım yoğunluklarında ($i < 0,2$ A/cm²), PEMFC’nin çalışma basıncının aynı olduğu durumlarda hücrenin çalışma sıcaklığındaki farklılığa rağmen hücre performansları benzer şekilde davranır. Bu durum, farklı membran kalınlıklarına sahip PEMFC’lerin aynı sıcaklıkta benzer reaksiyon kinetiğine sahip olmasından kaynaklanmaktadır. Dolayısıyla, bu koşullar altında aktivasyon aşırı kayıplarının karşılaştırılabilir ve benzer aktivasyon aşırı kayıplarına yol açar. Öte yandan, daha büyük akım yoğunluklarında (yani $i > 0,6$ A/cm²), yakıt hücresi daha yüksek sıcaklıklarda daha iyi performans gösterir ve bu da konsantrasyon kaybını azaltır. Aynı zamanda bu

durum, daha düşük aktivasyon aşırı potansiyeline yol açan daha hızlı reaksiyon kinetiğine atfedilir. Akım yoğunluğunun artmasına bağlı olarak hidrojen geçişinin neden olduğu voltaj kaybının PEMFC modeli üzerindeki etkisi ihmal edilebilir. Omik aşırı polarizasyon bölgesinde, PEMFC yığın modelinde polarizasyon eğrisi yığının direncini temsil eden eğim ile yaklaşık olarak doğrusal bir ilişkiye sahiptir (Y. Zhao, Luo, Yang, Chen, & Sui, 2024). Düşük akım yoğunluğu ve yüksek sıcaklıkta üretilen su, membranı difüzyonu sayesinde etkili bir şekilde nemlendiremediğinden omik direnç artabilir ve net voltaj düşebilir. Fakat, yüksek akım yoğunluğunda katotta su üretim hızı artarak, membranın su içeriğinin iyileştirilmesine ve hücrenin performansının yükselmesine yardımcı olur. PEMFC yığın sıcaklığının daha fazla artırılması membranın dehidrasyonuna da yol açabilir. Bu durumda proton iletkenliğinin azalmasına ve dolayısıyla PEMFC'nin performansının düşmesine neden olabilir. Araç uygulamalarında özellikle hibrit araçlarda, optimum sıcaklık aralığında çalışmanın hem performans hem de uzun ömür açısından kritik olduğu göz önünde bulundurulmalıdır. Aynı zamanda sıcaklığa ve membran kalınlığına bağlı olarak basıncın optimize edilmesi sistemin verimliliğini ve ekonomik olarak uygulanabilirliğini dengelemede önemlidir. Aynı çalışma koşulları altında PEMFC modelin negatif yük artışlarının, pozitif yük artışlarının çalışmalarına kıyasla yakıt hücresinin daha iyi performans (yani belirli bir akım yoğunluğu için daha yüksek hücre voltajı) sergilediği fark edilmiştir. Bu durum, PEMFC'lerde kütle kaybının ihmal edilebilecek düzeyde olduğu bir bölgede çalıştırılmasını veya hücre yığınlarının, sınırlayıcı akım yoğunluğundan çok daha küçük akım yoğunlukları altında çalıştırılmasını sağlar. 80°C'de PEMFC'nin performansındaki artışın yüksek sıcaklıklarda gaz difüzyonunun ve membran iletkenliğinin artmasıyla açıklanabilir. Ancak yüksek sıcaklıklarda membran iletkenliği reaktan gazların bağıl neminin ve membrandaki su içeriğinin azalması nedeniyle azalır. Şekil 7'de farklı membran kalınlığına sahip PEMFC yığını modeline ait güç yoğunluğu (kW/cm^2) ile akım yoğunluğu (A/cm^2) arasındaki P-V eğrileri verilmiştir.



Şekil 7. Farklı membran kalınlığına sahip PEMFC yığını modeline ait P-V eğrileri a) Nafion 115
b) Nafion 117

Şekil 7 incelendiğinde, güç eğrilerinden yüksek akım yoğunluğunda maksimum güç çıkışının daha yüksek olmasına rağmen, güç çıkışındaki artışın maksimum akım yoğunluğunun artışı kadar doğrusal olmadığı görülmektedir. Ayrıca, her iki membran türü için de sıcaklığın performansa etkisi açıkça görülmektedir. Hem Nafion 115 hem de Nafion 117 membran için 80°C’de en yüksek güç yoğunluğu elde edilmiştir. Bu durum önerilen hibrit aracın PEMFC sisteminin en verimli şekilde çalışması için bu sıcaklıkta tutulması gerektiğini gösterir. Sıcaklık azaldıkça güç yoğunluğunda belirgin bir azalmanın olması yüksek sıcaklığın elektrokimyasal reaksiyonları hızlandırması ve membranın proton iletkenliğini artırmasıyla açıklanabilir. Sıcaklık arttıkça elektrokimyasal reaksiyonlar daha hızlı gerçekleşir ve elektrot yüzeyinde daha fazla reaksiyonun olmasına ve daha yüksek bir akım yoğunluğunun elde edilmesine olanak tanır. Aynı zamanda, membran sıcaklığı arttıkça, proton iletkenliği de artar. Bu durum protonların membran boyunca daha hızlı hareket etmesini sağlar ve omik kayıpları azaltır. Şekil 7’de görüldüğü gibi akım yoğunluğu arttıkça güç yoğunluğu başlangıçta artmasına rağmen, belirli bir noktadan sonra güç yoğunluğu düşmeye başlamaktadır. Bu, yüksek akım yoğunluklarında membran direncinin artması ve reaktantların difüzyon limitlerine ulaşılması gibi nedenlerle açıklanabilir. Belirli bir akım yoğunluğuna ulaşıldığında membran direnci ve reaktantların difüzyon limitlerine ulaşılması gibi nedenlerden dolayı güç yoğunluğu düşmeye başlar. Hibrit araçlarda bu düşüş yüksek güç taleplerinde performans kaybına yol açabilir. Bu nedenle, yakıt hücresinin optimum çalışma noktasının iyi belirlenmesi ve bu noktanın üzerinde çalışmaktan kaçınılması önemlidir. Çünkü, membran boyunca proton hareketinin yavaşlamasına ve elektrot yüzeyinde reaktant eksikliğine yol açar. Ayrıca, modelde kullanılan Nafion 115 membranın (daha ince membran) daha yüksek güç yoğunluğu sağladığını ve daha ince bir membranın daha düşük iç direnç sunarak daha yüksek performans elde edilmesine neden olduğu belirlenmiştir. Tüm bu durumlar göz önüne alındığında, hibrit araçlar için PEMFC’nin optimum akım yoğunluğu ve güç yoğunluğu aralığında çalıştırılması önemlidir. Bu, sistemin en verimli şekilde çalışmasını sağlar ve yüksek performans ile uzun ömürlülüğü sağlayabilir. Çalışma sıcaklığının artmasıyla maksimum güç çıkışının artmasına ek olarak, yüksek yük koşullarında çalışma verimliliği de artmaktadır. Hibrit sistemler için önerilen matematiksel modelde sıcaklık değişimlerine bağlı olarak verimlilikler farklılık gösterebilir (Şekil 8).



Şekil 8. Farklı membran kalınlığına sahip PEMFC yığın modeline ait verimleri a) Nafion 115
b) Nafion 117

Şekil 8’de verilen sonuçlara göre, maksimum akım yoğunluğunun artmasıyla tepe güç noktasındaki verimlerin belirgin bir şekilde azaldığı görülmektedir. Termodinamik ve Faraday verimlilikleri göz önüne alındığında, Nafion 115 membranın daha ince bir membran olması nedeniyle proton iletkenliği daha yüksektir. Bu durum, protonların daha hızlı ve verimli bir şekilde hareket etmesini sağlayarak omik aşırı kayıpları azaltır ve verimliliğini artırır. Şekil 7 ve 8’de sunulduğu gibi maksimum güç çıkış noktasındaki verimlilik (160,1 kW, 152,2 kW ve 141,3 kW) sırasıyla yaklaşık olarak %38,35, %34,16 ve %31,49’dir. Bu sonuçlar, maksimum akım yoğunluğunun artmasıyla tepe güç noktasındaki verimlerin azaldığını göstermektedir. Önerilen modelde 80°C’de Nafion 115 membranın verimliliği artmaktadır. Çünkü yüksek sıcaklıklar proton iletkenliğini ve elektrokimyasal reaksiyon hızını artırır. Önerilen modelde Nafion 117 membranın daha kalın bir membran olmasından dolayı iç direncin artmasıyla (yani omik kayıpların artışı) güç yoğunluğu nispeten düşük kaldığı gözlemlenmiştir. Tüm bu durumlar göz önüne alındığında, hibrit araçlar için PEMFC’nin optimum akım yoğunluğu ve güç yoğunluğu aralığında çalıştırılması önemlidir. Bu, sistemin en verimli şekilde çalışmasını sağlar ve yüksek performans ile uzun ömürlülüğü sağlayabilir. Çalışma sıcaklığının artmasıyla maksimum güç çıkışının artmasına ek olarak, yüksek yük koşullarında çalışma verimliliği de artmaktadır. Hibrit sistemler için önerilen matematiksel modelde kullanılan Nafion 115 ve Nafion 117 membranlarının verimlilikleri sıcaklık değişimlerine bağlı olarak farklılık göstermektedir. Şekil 8’de verilen sonuçlara göre, maksimum akım yoğunluğunun artmasıyla tepe güç noktasındaki verimlerin belirgin bir şekilde azaldığı görülmektedir. Yüksek sıcaklıklarda Nafion 117 membranın performansı artmasına rağmen, bu artış Nafion 115 membran kadar belirgin değildir. Düşük sıcaklıklarda (örneğin: 40°C) her iki membran türü de daha düşük verimliliğe sahiptir. Çünkü düşük sıcaklıklarda elektrokimyasal reaksiyonlar yavaşlar ve proton iletkenliği azalır. Ancak, Nafion 115 membranın ince yapısı düşük sıcaklıklarda bile daha yüksek verimlilik sağlar. Genel olarak, yüksek sıcaklıklarda her iki membran da daha yüksek verimlilik ve güç yoğunluğu sergilediği ve güç

yoğunluğu arttıkça başlangıçtaki verimlilik değerlerinin de arttığı gözlemlenmiştir. Ancak çok yüksek akım yoğunluklarında membran direnci ve reaktant difüzyon limitleri nedeniyle verimlilik düşmeye başlar. Hibrit araçlar yüksek verimlilik ve performans gerektirdiğinden dolayı, Nafion 115 membran yüksek proton iletkenliği ve daha düşük omik aşırı kayıplar sayesinde hibrit araçlar için daha uygun bir seçim olabilir. Hibrit araçlarda kullanılan PEMFC'nin performansı sıcaklık yönetimi ile doğrudan ilişkilidir. Araçlarda sıcaklık kontrol sistemleri optimize edilerek yakıt hücresinin ideal çalışma sıcaklığına (örneğin: 80°C) ulaşması sağlanmalıdır. Tablo 3'te modelleme türüne ve farklı parametrelere bağlı olarak otomotiv uygulamalarında PEMFC'lerin karşılaştırılması listelenmiştir.

Tablo 3. Literatürde bulunan çeşitli otomotiv uygulamalarında PEMFC'lerin temel parametrelerinin karşılaştırılması

Modelleme Türü	Yığın Sayısı	Sıcaklık (°C)	Yığın Gücü (kW)	Referans
Matematiksel	150	40, 60 ve 80	160	Bu çalışma
Matlab/Simulink	-	60	70	(Dakurah, Solmaz, & Kocakulak, 2024)
Matlab/Simulink	-	60	70	(Dakurah et al., 2024)
MPPT Algoritma	280	57	72.1	(İnci, 2024)
Matematiksel	336	80	51	(Z. Sun et al., 2023)
Matlab/Simulink	200	25	157	(Boyacıoğlu, Kocakulak, Batar, Uyumaz, & Solmaz, 2023)
Matematiksel	220	77	30	(Xing et al., 2022)
Matlab/Simulink	300	-	50	(Luciani & Tonoli, 2022)
Matlab/Simulink	370	55	31.2	(Veerendra et al., 2021)
Matlab/Simulink	381	25	75	(Işıklı, Sürmen, & Gelen, 2021)
Matlab/Simulink	230	60	90	(Biberci & Celik, 2020)
VITM Algoritma	240	75	36	(Xu et al., 2020)
Matlab/Simulink	230	80	90	(Akroot et al., 2019)
Matlab/Simulink	210	80	45	(G. Sun et al., 2019)
Matematiksel	80	-	7	(Waloyo, Nizam, & Saidi, 2018)
Matlab/Simulink	-	80	85	(Andari, Ghozzi, Allagui, & Mami, 2017)
Matlab/Simulink	8	40	50	(Haddad, Mannah, & Bazzi, 2015)

Tablo 3'te görüldüğü gibi otomotiv uygulamalarında PEMFC modelleri için ideal olan parametreler genellikle yığın hücre sayısı, sıcaklık ve güç gibi temel özellikleri içerir. Bu parametreler PEMFC'lerin performansını belirlemede kritik rol oynar ve farklı uygulamalara göre değişiklik gösterebilir. Farklı hücre sayıları ve sıcaklıklarla yapılan modellemeler PEMFC'lerin otomotiv uygulamalarındaki performansının çok çeşitli olabileceğini ve spesifik uygulamalar için optimize edilebileceğini göstermektedir. Ayrıca, hücre sayısı arttıkça elde edilen güç de genel olarak artma

eğiliminde olmasına rağmen, bu durum her modelde geçerli değildir. Bu nedenle otomotiv sektörü gibi yüksek verimlilik ve güvenilirlik gerektiren uygulamalarda optimum çalışma koşullarının belirlenmesi için parametrelerin birlikte ele alınması gerekir.

4. Sonuçlar ve Öneriler

Bu çalışmada, sıcaklık, basınç ve membran kalınlığı gibi farklı çalışma koşulları için araç uygulamalarında PEMFC yığın performansının matematiksel olarak oluşturulan elektrokimyasal model çalışmasını ele almaktadır. Önerilen bu model PEMFC tasarımı ve optimize edilmesinde kritik rol oynadığı için enerji verimliliğini artırmak ve uygulama koşullarına göre performansı maksimize etmek için önemlidir. Öte yandan, aracın %24 ve %7 eğimlerdeki hızı motorun maksimum gücüyle ilişkilidir ve böylece daha yüksek eğimlerde daha fazla güç harcamak gereklidir. Bu durum, eğimli yollarda motorun daha fazla çalışmasını ve dolayısıyla yakıt verimliliğinin düşmesini sağlar. Oluşturulan matematiksel modele göre PEMFC yığının çalışma sıcaklığının 40°C'den 80°C'ye çıkarılmasının aktivasyon aşırı potansiyelinin ve omik direncin düşmesi nedeniyle PEMFC yığın gerilimini yaklaşık olarak %20 arttırdığı belirlenmiştir. Bu durum, hibrit araçlar için daha yüksek verimlilik anlamına gelmektedir. Aynı zamanda yüksek verimlilik ise enerjinin daha verimli kullanılmasını sağlar. Ayrıca, çalışma sıcaklığının daha da artması membranın dehidrasyonuna neden olabilir. Çalışma basıncı, membranın mekanik mukavemeti ve yakıt hücresi sisteminin güç çıkışındaki net artış/azalış ile sınırlıdır. PEMFC'lerin uzun ömürlülüğü ve güvenilirliği açısından da dikkate alınması gereken bir konudur. 0,2 A/cm²'den düşük akım yoğunluklarında omik ve konsantrasyon kayıpları önemli olmadığından hücre sıcaklığındaki değişiklikler performansı fazla etkilememektedir. Ancak, daha yüksek akım yoğunluklarında özellikle 0,4-1,0 A/cm² aralığında sıcaklığın 40°C'den 80°C'ye yükselmesi yığın voltajında %15-19 civarında bir artış sağlamıştır. Bu durum, sıcaklığın hücre verimliliği üzerinde kritik bir parametre olduğunu ve yüksek akım yoğunluklarında çalışma esnasında daha verimli bir performans elde etmek için sıcaklığın artırılması gerektiğini işaret eder. Bu nedenle, optimum sıcaklık aralığının belirlenmesi ve korunması önemlidir. Geliştirilen bu matematiksel model sayesinde, test edilen çalışma koşulları alanı dahilinde PEMFC yığın performansını makul bir doğrulukla tahmin etmeye yardımcı olacaktır. Bu durumda bilinen çalışma koşulları için PEMFC sisteminden elde edilen net güç çıkışının tahmin edilmesinde faydalı olacaktır. Aynı zamanda hibrit araç tasarımcılarına, belirli çalışma koşulları altında optimum performansı elde etmek için gerekli ayarlamaları yapma imkânı sağlayarak, bu tür modellerin prototip testleri öncesinde maliyet ve zaman tasarrufu sağlayabilir.

Tesekkür

Bulut HÜNER bu yayını Türkiye Cumhuriyeti'nin 100. yılına ithaf etmiştir.

Kaynaklar

- Ahmadi, P., Torabi, S. H., Afsaneh, H., Sadegheih, Y., Ganjehsarabi, H., and Ashjaee, M. (2020). The effects of driving patterns and PEM fuel cell degradation on the lifecycle assessment of hydrogen fuel cell vehicles. *International Journal of Hydrogen Energy*, 45(5), 3595-3608.
- Ahmadi, S., Bathaee, S., and Hosseinpour, A. H. (2018). Improving fuel economy and performance of a fuel-cell hybrid electric vehicle (fuel-cell, battery, and ultra-capacitor) using optimized energy management strategy. *Energy Conversion and Management*, 160, 74-84.
- Akroot, A., Ekici, Ö., and Köksal, M. (2019). Process modeling of an automotive pem fuel cell system. *International Journal of Green Energy*, 16(10), 778-788.
- Andari, W., Ghozzi, S., Allagui, H., and Mami, A. (2017). Design, modeling and energy management of a PEM fuel cell/supercapacitor hybrid vehicle. *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, 8(1), 273-278.
- Asiaban, S., Bozalakov, D., and Vandeveld, L. (2024). Development of a dynamic mathematical model of PEM electrolyser for integration into large-scale power systems. *Energy Conversion and Management: X*, 23, 100610.
- Ayyarao, T. S., Polumahanthi, N., and Khan, B. (2024). An accurate parameter estimation of PEM fuel cell using war strategy optimization. *Energy*, 290, 130235.
- Baroutaji, A., Arjunan, A., Ramadan, M., Robinson, J., Alaswad, A., Abdelkareem, M. A., and Olabi, A.-G. (2021). Advancements and prospects of thermal management and waste heat recovery of PEMFC. *International Journal of Thermofluids*, 9, 100064.
- Biberci, M. A., and Celik, M. B. (2020). Dynamic Modeling and Simulation of a PEM Fuel Cell (PEMFC) during an Automotive Vehicle's Driving Cycle. *Engineering, Technology & Applied Science Research*, 10(3), 5796-5802.
- Boyacıoğlu, N. M., Kocakulak, T., Batar, M., Uyumaz, A., and Solmaz, H. (2023). Modeling and Control of a PEM Fuel Cell Hybrid Energy System Used in a Vehicle with Fuzzy Logic Method. *International Journal of Automotive Science And Technology*, 7(4), 295-308.
- Chen, Y., and Wang, N. (2019). Cuckoo search algorithm with explosion operator for modeling proton exchange membrane fuel cells. *International Journal of Hydrogen Energy*, 44(5), 3075-3087.
- Chugh, S., Chaudhari, C., Sonkar, K., Sharma, A., Kapur, G., and Ramakumar, S. (2020). Experimental and modelling studies of low temperature PEMFC performance. *International Journal of Hydrogen Energy*, 45(15), 8866-8874.
- Dakurah, J. E., Solmaz, H., and Kocakulak, T. (2024). Modeling of a PEM Fuel Cell Electric Bus with MATLAB/Simulink. *Automotive Experiences*, 7(2).
- Donkers, A., Yang, D., and Viktorović, M. (2020). Influence of driving style, infrastructure, weather and traffic on electric vehicle performance. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 88, 102569.
- Dreizler, A., Pitsch, H., Scherer, V., Schulz, C., and Janicka, J. (2021). The role of combustion science and technology in low and zero impact energy transformation processes. *Applications in Energy and Combustion Science*, 7, 100040.
- Haddad, A., Mannah, M., & Bazzi, H. (2015). Nonlinear time-variant model of the PEM type fuel cell for automotive applications. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 51, 31-44.
- Hassan, Q., Viktor, P., Al-Musawi, T. J., Ali, B. M., Algburi, S., Alzoubi, H. M., Al-Jiboory, A. K., Sameen, A. Z., Salman, H. M., and Jaszczur, M. (2024). The renewable energy role in the global energy transformations. *Renewable Energy Focus*, 48, 100545.
- Hosseinzadeh, E., Rokni, M., Rabbani, A., and Mortensen, H. H. (2013). Thermal and water management of low temperature proton exchange membrane fuel cell in fork-lift truck power system. *Applied Energy*, 104, 434-444.

- Hou, X., Sun, R., Huang, J., Geng, W., Li, X., Wang, L., and Zhang, X. (2024). Energy, economic, and environmental analysis: A study of operational strategies for combined heat and power system based on PEM fuel cell in the East China region. *Renewable Energy*, 223, 120023.
- Hüner, B., and Telli, E. (2023). Design and performance analysis of a green house based on hybrid and passive energy systems: A case study. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 45(4), 12859-12879.
- Igourzal, A., Auger, F., Olivier, J.-C., and Retière, C. (2024). Electrical, thermal and degradation modelling of PEMFCs for naval applications. *Mathematics and Computers in Simulation*, 224, 34-49.
- Ijaodola, O., El-Hassan, Z., Ogungbemi, E., Khatib, F., Wilberforce, T., Thompson, J., and Olabi, A. (2019). Energy efficiency improvements by investigating the water flooding management on proton exchange membrane fuel cell (PEMFC). *Energy*, 179, 246-267.
- İnci, M. (2024). Connecting multiple vehicular PEM fuel cells to electrical power grid as alternative energy sources: A Case Study. *International Journal of Hydrogen Energy*, 52, 1035-1051.
- İşikli, F., Sürmen, A., and Gelen, A. (2021). Modelling and performance analysis of an electric vehicle powered by a PEM fuel cell on New European Driving Cycle (NEDC). *Arabian Journal for Science and Engineering*, 46(8), 7597-7609.
- Jia, J., Li, Q., Wang, Y., Cham, Y., and Han, M. (2009). Modeling and dynamic characteristic simulation of a proton exchange membrane fuel cell. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 24(1), 283-291.
- Jiang, F., Yuan, X., Hu, L., Xie, G., Zhang, Z., Li, X., Hu, J., Wang, C., and Wang, H. (2024). A comprehensive review of energy storage technology development and application for pure electric vehicles. *Journal of Energy Storage*, 86, 111159.
- Jiang, S., Wang, C., Zhang, C., Bai, H., and Xu, L. (2019). Adaptive estimation of road slope and vehicle mass of fuel cell vehicle. *ETransportation*, 2, 100023.
- Jiang, Y., Zhang, X., and Huang, L. (2023). Analysis on pressure anomaly within PEMFC stack based on semi-empirical and flow network models. *International Journal of Hydrogen Energy*, 48(8), 3188-3203.
- Kahveci, O. (2022). Antimony and boron support to aluminum's hydrolysis performance and an application of PEM fuel cell. *Fuel*, 324, 124782.
- Kahveci, O., and Kaya, M. F. (2022a). Hydrogen production from Al–Cu alloy using electric vehicle's waste DC motor coils. *International Journal of Hydrogen Energy*, 47(24), 12179-12188.
- Kahveci, O., and Kaya, M. F. (2022b). W-Ir Alaşım Schottky Engel Diyotların Performansının Sonlu Elemanlar Metoduyla İncelenmesi. *Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fen Bilimleri Dergisi*, 38(2), 357-370.
- Kandidayeni, M., Macias, A., Khalatbarisoltani, A., Boulon, L., and Kelouwani, S. (2019). Benchmark of proton exchange membrane fuel cell parameters extraction with metaheuristic optimization algorithms. *Energy*, 183, 912-925.
- Kaya, K., and Hames, Y. (2019). Two new control strategies: For hydrogen fuel saving and extend the life cycle in the hydrogen fuel cell vehicles. *International Journal of Hydrogen Energy*, 44(34), 18967-18980.
- Luciani, S., and Tonoli, A. (2022). Control strategy assessment for improving PEM fuel cell system efficiency in fuel cell hybrid vehicles. *Energies*, 15(6), 2004.
- Mann, R. F., Amphlett, J. C., Hooper, M. A., Jensen, H. M., Peppley, B. A., and Roberge, P. R. (2000). Development and application of a generalised steady-state electrochemical model for a PEM fuel cell. *Journal of Power Sources*, 86(1-2), 173-180.
- Mert, S., Dincer, I., and Ozcelik, Z. (2012). Performance investigation of a transportation PEM fuel cell system. *International Journal of Hydrogen Energy*, 37(1), 623-633.
- Miao, D., Chen, W., Zhao, W., and Demsas, T. (2020). Parameter estimation of PEM fuel cells employing the hybrid grey wolf optimization method. *Energy*, 193, 116616.
- Mogorosi, K., Oladiran, M. T., and Rakgati, E. (2020). Mathematical modelling and experimental investigation of a low temperature proton exchange membrane fuel cell. *Energy and Power Engineering*, 12(11), 653.
- Mulach, J. (2024). Toyota Mirai price cut by 60 per cent as hydrogen demand dies. Retrieved from <https://www.canberratimes.com.au/story/8539771/toyota-mirai-price-cut-by-60-per-cent-as-hydrogen-demand-dies/>
- Niya, S. M. R., and Hoorfar, M. (2014, July). Determination of Activation losses in proton exchange membrane fuel cells. *International Conference on Fuel Cell Science, Engineering and Technology* (s. 1-4). Boston, USA.
- Ogungbemi, E., Ijaodola, O., Khatib, F. N., Wilberforce, T., El Hassan, Z., Thompson, J., Ramadan, M., and Olabi, A. G. (2019). Fuel cell membranes—Pros and cons. *Energy*, 172, 155-172.

- Olabi, A. G., Wilberforce, T., and Abdelkareem, M. A. (2021). Fuel cell application in the automotive industry and future perspective. *Energy*, 214, 118955.
- Omran, A., Lucchesi, A., Smith, D., Alaswad, A., Amiri, A., Wilberforce, T., Sodre J. R., and Olabi, A. (2021). Mathematical model of a proton-exchange membrane (PEM) fuel cell. *International Journal of Thermofluids*, 11, 100110.
- Outeiro, M., Chibante, R., Carvalho, A., and De Almeida, A. (2008). A parameter optimized model of a proton exchange membrane fuel cell including temperature effects. *Journal of Power Sources*, 185(2), 952-960.
- Özdoğan, E., Hüner, B., Süzen, Y. O., Eşiyok, T., Uzgören, İ. N., Kıstı, M., Uysal, S., Selçuklu, S. B., Demir, N., and Kaya, M. F. (2023). Effects of tank heating on hydrogen release from metal hydride system in VoltaFCEV Fuel Cell Electric Vehicle. *International Journal of Hydrogen Energy*, 48(18), 6811-6823.
- Paraschiv, L. S., and Paraschiv, S. (2023). Contribution of renewable energy (hydro, wind, solar and biomass) to decarbonization and transformation of the electricity generation sector for sustainable development. *Energy Reports*, 9, 535-544.
- Qin, Y., Du, Q., Fan, M., Chang, Y., and Yin, Y. (2017). Study on the operating pressure effect on the performance of a proton exchange membrane fuel cell power system. *Energy Conversion and Management*, 142, 357-365.
- Rezk, H., Olabi, A., Ferahtia, S., and Sayed, E. T. (2022). Accurate parameter estimation methodology applied to model proton exchange membrane fuel cell. *Energy*, 255, 124454.
- Sun, G., Park, S., and Lin, Z. (2019). Modeling and Simulation of PEM Fuel Cell/Battery Hybrid Vehicle. *Journal of System Simulation*, 30(12), 4816-4824.
- Sun, Z., Wang, Y., and Chen, Z. (2023). Coordination control strategy for PEM fuel cell system considering vehicle velocity prediction information. *ETransportation*, 18, 100287.
- Tzelepis, S., Kavadias, K. A., Marnellos, G. E., and Xydis, G. (2021). A review study on proton exchange membrane fuel cell electrochemical performance focusing on anode and cathode catalyst layer modelling at macroscopic level. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 151, 111543.
- Usmanov, U., Ruzimov, S., Tonoli, A., and Mukhitdinov, A. (2023). Modeling, simulation and control strategy optimization of fuel cell hybrid electric vehicle. *Vehicles*, 5(2), 464-481.
- Veerendra, A. S., Mohamed, M. R., Leung, P. K., and Shah, A. A. (2021). Hybrid power management for fuel cell/supercapacitor series hybrid electric vehicle. *International Journal of Green Energy*, 18(2), 128-143.
- Vichard, L., Steiner, N. Y., Zerhouni, N., and Hissel, D. (2021). Hybrid fuel cell system degradation modeling methods: A comprehensive review. *Journal of Power Sources*, 506, 230071.
- Waloyo, H. T., Nizam, M., and Saidi, H. (2018, October). Model-based simulation for hybrid fuel cell/battery/ultracapacitor electric vehicle. *5th International Conference on Electric Vehicular Technology (ICEVT)* (s. 112-115). Surakarta, Indonesia.
- Xing, L., Xiang, W., Zhu, R., and Tu, Z. (2022). Modeling and thermal management of proton exchange membrane fuel cell for fuel cell/battery hybrid automotive vehicle. *International Journal of Hydrogen Energy*, 47(3), 1888-1900.
- Xu, J., Zhang, C., Fan, R., Bao, H., Wang, Y., Huang, S., Chin, C. S., and Li, C. (2020). Modelling and control of vehicle integrated thermal management system of PEM fuel cell vehicle. *Energy*, 199, 117495.
- Yang, Q., Zeng, T., Zhang, C., Zhou, W., Xu, L., Zhou, J., Jiang, P., and Jiang, S. (2023). Modeling and simulation of vehicle integrated thermal management system for a fuel cell hybrid vehicle. *Energy Conversion and Management*, 278, 116745.
- Zeng, T., Zhang, C., Zhang, Y., Deng, C., Hao, D., Zhu, Z., Ran, H., and Cao, D. (2021). Optimization-oriented adaptive equivalent consumption minimization strategy based on short-term demand power prediction for fuel cell hybrid vehicle. *Energy*, 227, 120305.
- Zhao, J., Li, X., Shum, C., and McPhee, J. (2021). A review of physics-based and data-driven models for real-time control of polymer electrolyte membrane fuel cells. *Energy and AI*, 6, 100114.
- Zhao, Y., Luo, M., Yang, J., Chen, B., and Sui, P.-C. (2024). Numerical analysis of PEMFC stack performance degradation using an empirical approach. *International Journal of Hydrogen Energy*, 56, 147-163.