

SERPANTİN AKIŞ KANALLI BİR PEM YAKIT PİLİNİN ÜÇ BOYUTLU MODELLENMESİ VE PARAMETRİK ANALİZİ

THREE DIMENSIONEL MODELLING AND PARAMETRIC ANALYSIS OF A PEM
FUEL CELL WITH A SERPENTINE FLOW CHANNEL

Seda KÜPELİ

Uludağ Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü,
Bursa, Turkey

Erman ÇELİK

Fırat Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Elazığ, Turkey

Irfan KARAGOZ

Uludağ Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü,
Bursa, Turkey

(Sorumlu Yazar)

Özet

Bu çalışmada, yakıt hücresindeki kimyasal reaksiyonların yanı sıra ısı ve akışkan akışı için matematiksel bir model oluşturulmuş ve bu model doğrulama amacıyla bilinen bir serpantin tipi yakıt hücresine uygulanmıştır. Akış ve transfer işlemleri sürekli rejimde, faz değişimi olmadığı ve üç boyutlu kabul edilmiş, membran, katalizör ve gaz difüzyon katmanları izotropik materyaller olarak alınmıştır. Doğrulan model ve ağ yapısı daha sonra parametrik analiz için kullanılmıştır. Modelin sayısal çözümü Fluent CFD yazılımı kullanılarak farklı sınır ve işletme koşullarında gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar, bileşenlerin konsantrasyon dağılımları, hız ve sıcaklık değişimleri ve yakıt hücresi karakteristik eğrisi açısından sunulmuştur. Çalışma basıncı, değişim katsayısı ve stokiyometrik akış oranının yakıt hücresi performansına etkileri incelenmiştir.

Anahtar Kelimeler: PEM yakıt pili, Yakıt pili modellemesi, Yakıt pili performansı, HAD

Abstract

In this study, a mathematical model was created for chemical reactions in the fuel cell as well as heat and fluid flow and this model was applied to a known serpentine type fuel cell for verification purposes. The flow and transfer processes were assumed as steady, three-dimensional without phase change and the membrane, the catalyst as well as the gas diffusion layers were taken as isotropic materials. The verified model and mesh structure were then used for a parametric analysis. Numerical solution of the model was performed under different boundary and operational conditions by using Fluent CFD software. The results obtained are presented in terms of concentration distributions of species, velocity and temperature variations and fuel cell characteristic curve. The effects operating pressure, exchange coefficient and stoichiometric flow ratio on the fuel cell performance were investigated.

Keywords: PEM fuel cell, Fuel cell modelling, Fuel cell performance, CFD

I. GİRİŞ

Fosil yakıtların tüketimi, gelişmekte olan ülkelerin sanayileşmesi ve dünya nüfusunun artması nedeniyle son yıllarda fazlaca artmaktadır [1]. Fosil yakıt rezervleri sonludur ve tüketilecektir, ayrıca fosil yakıtların kullanılmaya devam edilmesi küresel ısınma ve iklim değişikliğine neden olacaktır [2]. Gelecekteki güç sistemi olarak yakıt hücresinin önemi tartışılmaktadır çünkü yakıt hücresi sistemi sürdürülebilir, temiz ve çevre dostu bir gelecek için gelişmiş bir güç sistemidir [2].

Yakıt hücresi elektrokimyasal bir dönüştürücüdür [3]. Kimyasal enerjiyi elektrik enerjisine dönüştürür, uygun yakıt ve oksidan sağlandığı sürece çalışmaya devam eder [3].

Proton değişim membranlı yakıt hücreleri (PEMFC'ler) yüksek güç yoğunluğu, hızlı başlangıç ve yüksek verimlilik özellikleri nedeniyle ticari güç kaynakları için en umut verici adaylardan biridir [4]. Literatür incelendiğinde deneysel, analitik yöntemler ve hesaplamalı akışkanlar mekaniği çözümleri ile karşılaşılmakta ve yakıt hücresi sisteminin verimliliği, dayanıklılığı ve güvenilirliğini arttırmak için çalışmalar yapılmaktadır.

Su ve ark. [4] termal-hidrolik denklemlerden ve elektrokimyasal denklemlerden oluşan üç boyutlu izotermal olmayan yakıt hücresi modelini CFD kullanarak incelemişlerdir. Farklı çalışma koşullarının yüksek sıcaklıktaki proton değişim membranı yakıt hücresinin performansı üzerindeki etkileri araştırılmıştır. İncelenen parametreler giriş gazı sıcaklığı, sistem basıncı ve giriş gazı akış hızıdır. Yakıt hücresi performansı giriş sıcaklığı, sistem basıncı ve akış hızındaki artış ile artar. Modelin doğruluğunu değerlendirmek için yapılan deneylerin, performans eğrileri ile uyumlu olduğu görülmüştür. Hesaplama sonuçlarına dayanarak akış kanalındaki yakıt dağılımı, sıvı su doygunluğu dağılımı, membran iletkenliği, sıcaklık değişimi vb. özellikler simüle edilebilir. Al-Baghdadi ve Al-Janabi [5] tek fazlı, izotermal olmayan, üç boyutlu, kapsamlı bir CFD modeli geliştirmişlerdir. Sıcaklık, basınç, stokiyometrik akış oranı, gaz kanallarının genişliği, GDL kalınlığı, membran kalınlığı, GDL porozitesi, GDL termal iletkenliği parametrelerinin yakıt hücresi performansı üzerindeki etkileri detaylı şekilde incelenmiştir. Modelde yerel akım yoğunluğu dağılımının daha iyi tahmin edilmesi için, bir akım-voltaj algoritması uygulanmıştır. Analiz deneysel olarak çalışılmayan karmaşık elektrokimyasal ve taşınım olayının anlaşılmasına ve sınırlayıcı adımlar ile bileşenlerin tanımlanmasına yardımcı olmuştur. Yuan ve ark. [6] çalışma parametrelerinin performans üzerindeki etkilerini incelemek için üç boyutlu çok fazlı tipik bir dokuz katmanlı yakıt hücresi modeli geliştirmişlerdir. Sonuçlar polarizasyon eğrileri şeklinde verilmiştir. Yüksek çalışma basıncının yüksek performans elde etmeye yardımcı olduğu ancak özellikle mühendislik uygulamalarında yüksek basınçlı operasyon seçerken işletme maliyeti, sistem hacmi gibi önemli konuların dikkate alınması gerektiği, çalışma sıcaklığının artmasının hücre performansının artmasına sebep olduğu çünkü yüksek sıcaklığın su yönetimini iyileştirerek elektro-kimyasal reaksiyon hızını arttırdığı, ancak anot ve katot nemlendirilmesi düzgün yapılmadığı takdirde elektrotta su eksikliğine sebep olacağı, anot nemlendirilmesinin katot nemlendirilmesinden daha önemli olduğu, en iyi performansın hidrojen tamamen nemlendirilirken orta havadaki bağıl nemde ortaya çıktığı, hava stokiyometrik oranının artmasıyla performansın iyileştiği ancak membran dehidrasyonuna sebep olunmaması için optimum bir hava stokiyometrik oran değeri olması gerektiği sonuçlarına varılmıştır. Wang ve

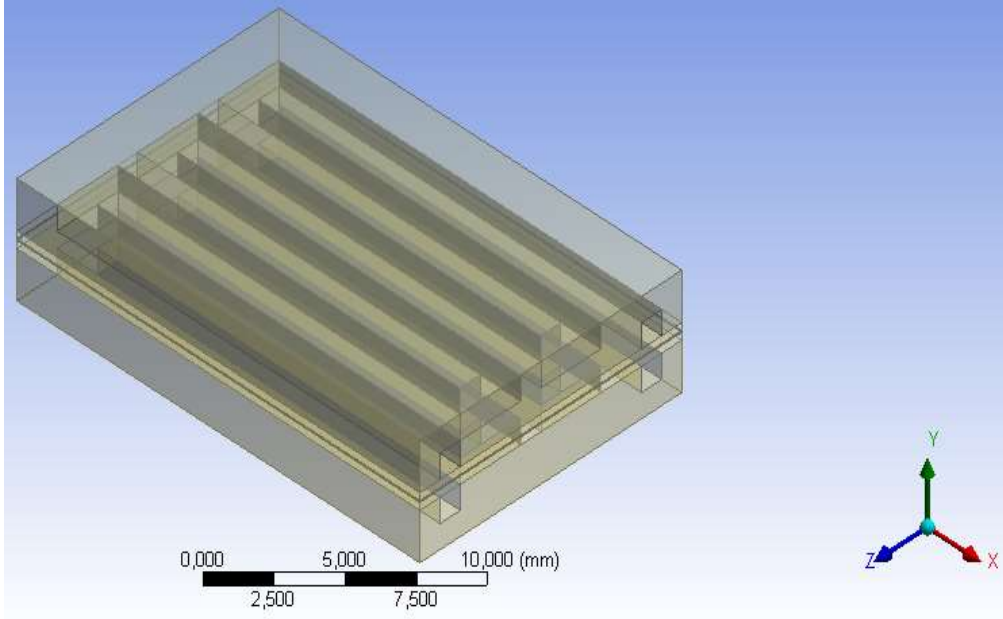
ark. [7] PEM yakıt hücresi performansı üzerinde farklı çalışma parametrelerinin etkilerini deneysel olarak incelemişlerdir. Anot tarafında saf hidrojen ve katot tarafında hava kullanılmıştır. Performans üzerindeki etkilerin gösterildiği polarizasyon eğrileri ile deneysel sonuçlar sunulmuştur. Ek olarak bir üç boyutlu yakıt hücresi modeli sunulmuş ve sonuçlar deney sonuçları ile kıyaslanmıştır. PEM yakıt hücresi performansının yeterli nemlendirme sağlandığında çalışma sıcaklığının artmasıyla arttığı gözlemlenmiştir. Anot nemlendirme sıcaklığının performans için önemli bir etken olduğu ve düşük akım yoğunluğu bölgesinde nemlendirme derecesi ne kadar düşük olursa performansın o kadar düştüğü, yüksek akım yoğunluklarında etkisinin önemli olmadığı sonucuna varılmıştır. Katot nemlendirme sıcaklığının da özellikle yüksek akım yoğunluklarında performans üzerinde önemli bir etkisi görülmemiştir. Basınç artışıyla performansın arttığı gözlemlenmiştir. Modelleme sonuçları deneysel verilerle karşılaştırıldığında farklı yakıt hücresi sıcaklıklarında uyumlu sonuçlar, farklı çalışma basınçlarında ise düşük ve orta akım yoğunluklarında uyumlu sonuçlar gözlenirken, yüksek akım yoğunluklarında ise sonuçlar arasında farkın arttığı görülmüştür. Askaripour [8] PEM yakıt hücresi için iki fazlı bir akış modeli geliştirmiştir. Model türlerin taşınması, enerji ve elektrokimyasal denklemlere dayanmaktadır. Çalışmada sıcaklık, basınç, nem ve stokiyometrik oranların etkileri araştırılmıştır. Çalışma koşullarının performansa etkisi incelenmiştir. Hücre performansı, stokiyometrik orandaki ve katot tarafının giriş nemindeki değişikliklerle değişmektedir. Anot giriş neminin artırılması performansı önemli ölçüde arttırmıştır. Yüksek hücre basınçları düşük akım yoğunluklarında hücre performansını arttırırken, orta ve yüksek akım yoğunluklarında performansı azaltmıştır. Anot stokiyometrik oranının artırılması orta ve yüksek akım yoğunluklarında performansı iyileştirmektedir. Hücre sıcaklığının artırılması orta ve yüksek akım yoğunluklarında performansı önemli ölçüde arttırmıştır. Kahveci ve Taymaz [9] proton değişim membranı yakıt hücresinin (PEMFC) performansını araştırmak için üç boyutlu, tek fazlı bir model kurmuşlardır. Model 333-353 K sıcaklık aralığında, 1-3 atm basınç aralığında, gaz difüzyon tabakası (GDL) gözenekliliği 0.3-0.6 aralığında, hem anot hem de katot bağıl nemi 10-100% aralığında çalıştırılmıştır. Akım yoğunluğu ve güç yoğunluğu bu değişken işlem parametrelerine göre ölçülmüştür. Sayısal simülasyon FLUENT hesaplamalı akışkanlar dinamiği (CFD) yazılımına dayanan bir PEM yakıt hücresi modeli ile gerçekleştirilmiştir. Genel polarizasyon eğrileri artan basınçla pozitif bir artış göstermektedir. İyileştirilmiş performansların bir başka nedeni de, artan çalışma basıncına sahip reaktif gazların kısmi basınç artışıdır. Bir PEM yakıt hücresi performansının, kısmi basınç ve reaktif gazların yayılmasından dolayı işletme basıncının artmasıyla arttığı ve kütle taşıma direncinin azalmasına neden olduğu bulunmuştur. Çalışma sıcaklığı, yakıt hücresi performansını arttırmak için yararlıdır ancak zarın aşırı ısınması nedeniyle çalışma sıcaklığı 363 K'den yüksek olmamalıdır. GDL gözenekliliği arttıkça hücre performansının da arttığı gözlemlenmiştir. Sonuçlar maksimum güç yoğunluğuna 0.6 GDL gözenekliliği, 3 atm basınç, 100% anot bağıl nemi ve 10% katot bağıl neminde ulaşıldığını göstermiştir. Ayrıca simülasyon sonuçları literatürde bildirilen deneysel veriler ile karşılaştırılmış ve model ile deneysel sonuçlar arasında iyi bir uyum sağlanmıştır.

Bu çalışmada çeşitli çalışma koşullarında hücre performansını incelemek için Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) yöntemi kullanılmıştır. Çalışma parametrelerinin yakıt hücresi performansı üzerindeki etkilerini çözmek için üç boyutlu, serpantin kanallı PEM yakıt hücresi,

kararlı halde ve tek fazlı analiz edilmiştir. Modelleme sonuçları yakıt hücrelerinde performans karakterizasyonunu gösteren polarizasyon eğrileri şeklinde verilmiştir ve bulgular sunulmuştur.

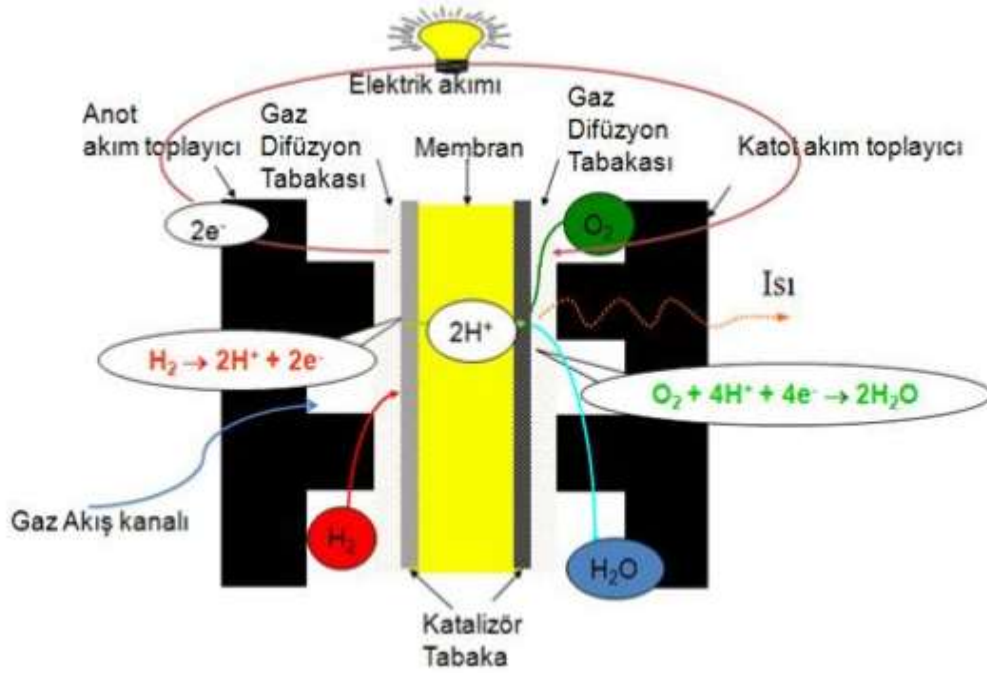
II. MATEMATİKSEL MODEL

Yakıt hücresi modeli, bilgisayar destekli çizim programı 'Ansys Design Modeler' katı model çizim programı vasıtasıyla oluşturulmuştur, **Şekil 1**'de sunulmaktadır. Fiziksel model membran, katalizör tabakaları, gaz difüzyon tabakaları, gaz kanalları ve akım toplayıcı plakalardan oluşmaktadır.



Şek. 1. PEM yakıt hücresi fiziksel modeli

Yakıt pili biri negatif (anot) ve diğeri pozitif (katot) olmak üzere iki elektrottan oluşmaktadır. Hidrojen yakıt pilinin anot kısmına oksijen ise katot kısmına giriş yapmaktadır. Katalizörün etkisiyle hidrojen atomları proton ve elektronlarına ayrılmaktadır. Ayrılan elektronlar bir elektrik devresinin içerisinde geçerek elektrik akımı oluşturmaktadır. Protonlar ise, elektrolit arasından katoda doğru hareket etmektedirler. Devresini tamamlayan elektronlar tekrar hidrojenin protonuna bağlanır ve oksijenle birleşerek saf su buharı ve ısı meydana getirirler [10]. PEM yakıt hücresinin temel yapısı ve çalışma prensipleri **Şekil 2**'de verilmiştir [11].



Şek. 2. PEM yakıt hücresinin çalışma prensibinin şematik gösterimi [11]

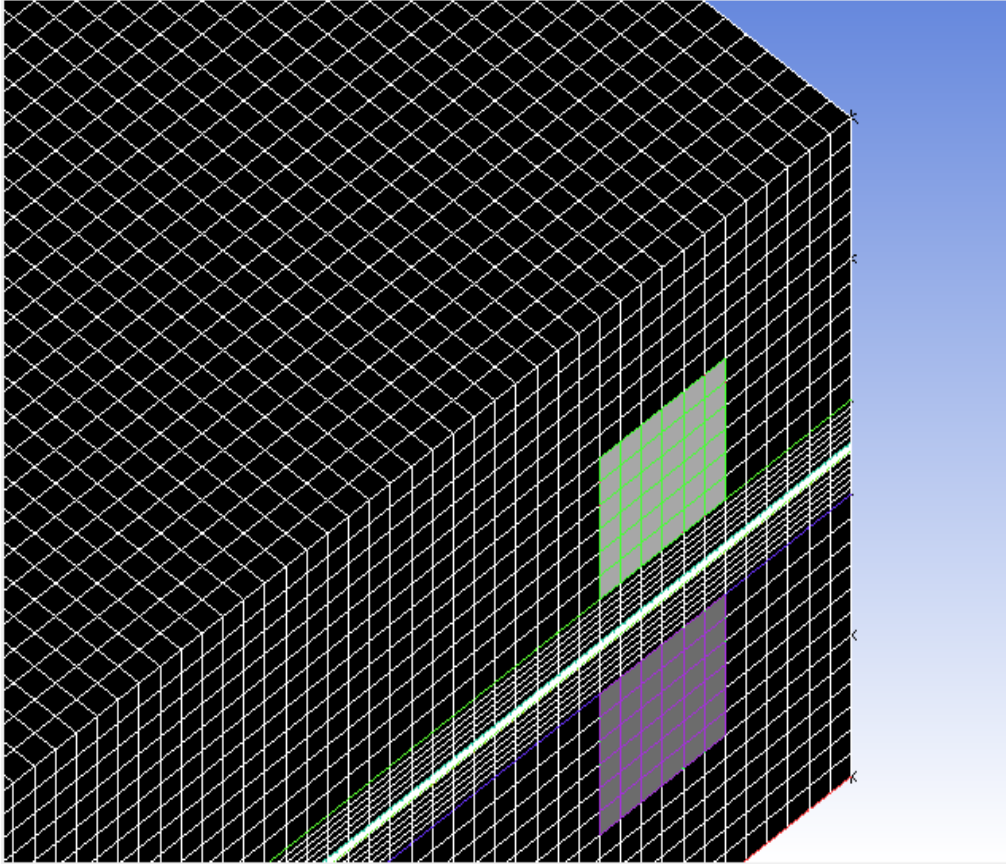
Çalışmada analiz edilen PEM yakıt hücresinin boyutları, Le ve Zhou [12]'nin yapmış oldukları sayısal çalışmadan alınmıştır, **Tablo 1**'de verilmiştir.

Tablo 1. PEM yakıt hücresinin geometrik boyutları [12]

Parça Adı	Yükseklik (mm)	Genişlik (mm)	Uzunluk (mm)
Gaz Akış Kanalları	1	1	115
Gaz Difüzyon Tabakaları	0,3	13	20
Katalizör Tabakaları	0,01	13	20
Membran	0,05	13	20
Akım Toplayıcı Plaka	2	13	20
Toplam Hücre	4,67	13	20

Oluşturulan yakıt hücresi 9 hacim bölgesinden meydana gelmiş, anot ve katot akım toplayıcı plakalar katı (solid), membran, katalizör tabakaları, gaz difüzyon tabakaları ve gaz akış kanalları akışkan (fluid) olarak modellenmiştir.

Çalışmada PEM yakıt hücresine ait ağ yapısı 'Ansys ICEM CFD' aracılığıyla gerçekleştirilmiş, elde edilen ağ yapısı **Şekil 3**'te gösterilmiştir. Ağ yapısı 635888 elemandan oluşmaktadır.



Şek. 3. PEM yakıt hücresine ait ağ yapısı

1. Model Varsayımları

1. PEM yakıt hücresinin kararlı halde çalıştığı.
2. Akış rejiminin laminar olduğu.
3. Reaksiyona giren reaktantların ideal gaz davranışı gösterdiği.
4. Üretilen tüm suların gaz fazı olarak mevcut olduğu ve faz değişimi olmadığı.
5. Membranın tümüyle nemlendirildiği ve protonik iletkenliğin sabit olduğu.
6. Membran, katalizör tabakaları ve gaz difüzyon tabakalarının izotropik geçirgen olduğu.
7. Membranın gazlara karşı geçirgen olmadığı ve reaktan gazların çapraz geçişinin ihmal edildiği.

Tablo 2. Çalışma koşulları [13]

Anot Girişi		
Basınç	3	atm
Sıcaklık	343,15	K
Bağıl Nem	100%	-
Stokiyometrik Akış Oranı	2	
Kütle Akış Oranı	$1,1 \times 10^{-7}$	kg s^{-1}
H_2 Kütle Kesri	0,495	-
H_2O Kütle Kesri	0,505	-
Katot Girişi		
Basınç	3	atm
Sıcaklık	343,15	K
Bağıl Nem	100%	-
Stokiyometrik Akış Oranı	2	
Kütle Akış Oranı	$1,99 \times 10^{-6}$	kg s^{-1}
O_2 Kütle Kesri	0,217	-
H_2O Kütle Kesri	0,0664	-
Çalışma Basıncı	1	atm
Anot Terminal Sıcaklığı	343,15	K
Katot Terminal Sıcaklığı	343,15	K
Referans Akım Yoğunluğu	1	A/cm^2

2. Sınır Şartları

Ağ ve sınır şartları tanımı ICEM CFD kullanılarak yapıldı ve FLUENT'e verildi. Ayarlanması gereken sınır koşulları anot ve katot akış kanalları için girişler, anot ve katot akış kanalları için çıkışlar ve anot ve katot terminalleridir. Bu çalışmada anot ve katot gaz akış kanalları giriş yüzeylerinde 'kütleli debi giriş' sınır şartı tanımlanmıştır. Anot ve katot gaz kanalları çıkışında 'basınç tanımlı çıkış' sınır şartı kullanılmıştır. Anot terminaline sıfır elektrik potansiyel değeri, katot terminaline sabit bir hücre potansiyel değeri tanımlanmıştır.

3. Çalışma Koşulları

Modelde kullanılan çalışma koşulları ve elektrokimyasal parametreler **Tablo 2** ve **Tablo 3**'de listelenmiştir [13].

4. Çözüm Prosedürü

Model ANSYS/FLUENT yazılımı ile çözülmüştür. FLUENT süreklilik, momentum ve enerji korunum denklemlerini çözer. PEM yakıt hücrelerinde meydana gelen akış, ısı transferi, elektrokimyasal reaksiyonlar ve diğer etkilerin (membran su taşıma ve sıvı suyun oluşumu için modeller dahil) hesaplanması PEM Yakıt Hücresi Modülü kullanılarak yapılır. PEM yakıt hücresi modülü kullanıcı ara yüzüne (define/models/addon-module) komutu kullanılarak yüklenir. Yakıt hücreleri ve elektroliz modülünden PEMFC seçilir [14]. Basınç-hız eşleşmesi için çözüm prosedürü SIMPLE algoritmasına dayandırılmıştır. Uygun sınır koşulları ile korunum denklemleri sonlu hacim yöntemi kullanılarak çözülmüştür [13].

III. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Çalışma basıncı, dönüşüm katsayısı ve stokiyometrik akış oranı parametrelerini içeren çalışma koşullarındaki değişikliklerin PEM yakıt hücresi performansı üzerindeki etkileri polarizasyon eğrileri ile değerlendirilmiştir.

1. Doğrulama Çalışması

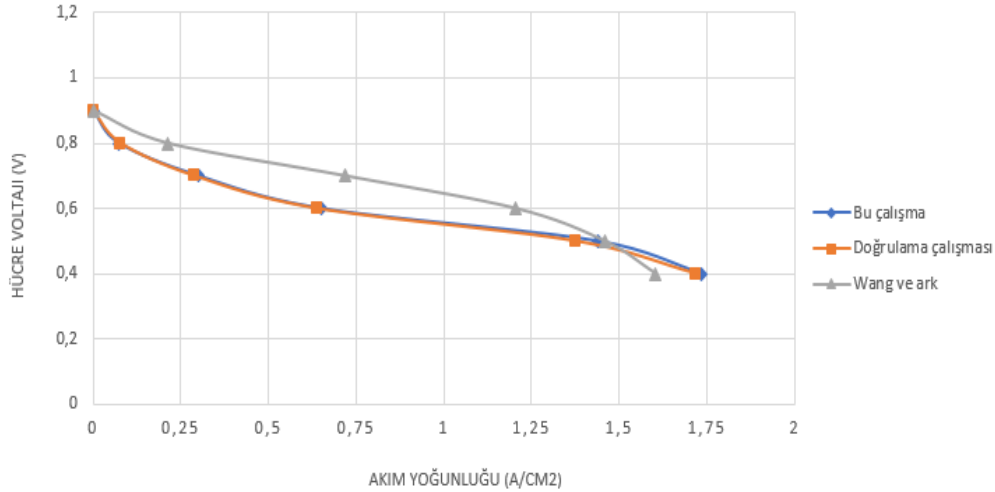
Bu çalışmada geliştirilen modeli doğrulamak için, simülasyon sonuçları daha önce elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma çalışması için **Tablo 2** ve **Tablo 3**'teki çalışma koşulları ve elektrokimyasal parametreler kullanılmıştır. Sınır şartı olarak katot terminaline uygulanan hücre voltajı sırasıyla 0,4-0,5-0,6-0,7-0,8 ve 0,9 V olarak değiştirilerek hücre karakteristiğini ifade eden polarizasyon eğrileri elde edilmiştir. Sonuçlar arasındaki uyum **Şekil 4**'teki polarizasyon eğrilerinde görülmektedir.

Tablo 3. Elektrokimyasal parametreler [13]

Parametre	Değer	Birim
Anot		
Referans Akım Yoğunluğu	2465,598	A/m^2
Referans Mol Konsantrasyonu	0,5465	$Kmol/m^3$
Konsantrasyon Üssü	0,5	
Dönüşüm Katsayısı	2	
Katot		
Referans Akım Yoğunluğu	$1,8081 \times 10^{-3}$	A/m^2
Referans Mol Konsantrasyonu	0,00339	$Kmol/m^3$
Konsantrasyon Üssü	1	
Dönüşüm Katsayısı	2	

Diğer Parametreler		
Hidrojen Referans Diffüzitesi	11×10^{-5}	$m^2 s^{-1}$
Oksijen Referans Diffüzitesi	$3,2 \times 10^{-5}$	$m^2 s^{-1}$
Su Referans Diffüzitesi	$7,35 \times 10^{-5}$	$m^2 s^{-1}$
Diğer Türlerin Referans Diffüzitesi	$1,1 \times 10^{-5}$	$m^2 s^{-1}$
Açık Devre Voltajı	1	V
Membran Gözenekliliği	0,5	
GDL Gözenekliliği	0,5	
Katalizör Gözenekliliği	0,5	
GDL Geçirgenliği	$1,76 \times 10^{-11}$	
Membran Geçirgenliği	$1,76 \times 10^{-11}$	
Eşdeğer Membran Ağırlığı	$1,1 \times 10^3$	kg/kmol
Membran protonik iletim katsayısı	1	
Membran protonik iletim üssü	1	
Gaz Difüzyon Tabaka viskoz direnci	1×10^{12}	m^{-2}
Katalizör Tabaka viskoz direnci	1×10^{12}	m^{-2}

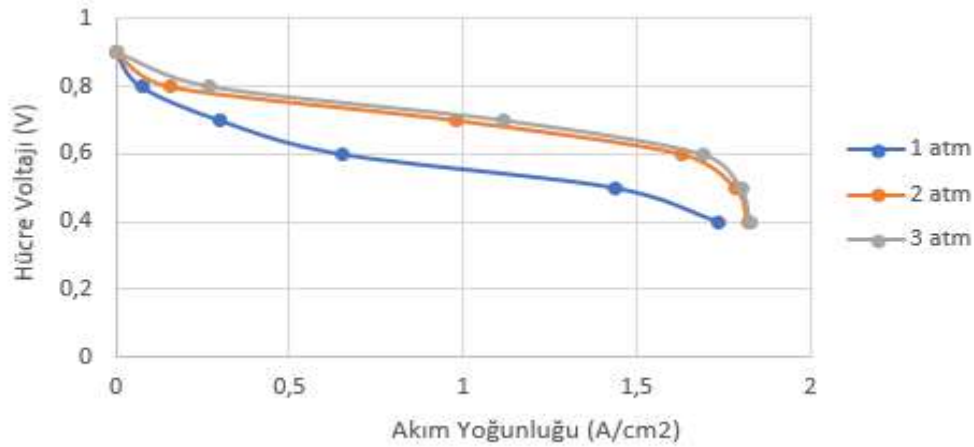
Ayrıca sonuçlar Wang ve ark. [7] elde ettikleri deneysel sonuçlarla da karşılaştırılmış ve özellikle düşük hücre voltaj değerlerinde sonuçlar arasında farklılıklar görülmüştür. Wang ve ark. yapmış oldukları deneysel çalışma 70°C çalışma sıcaklığı, 3 atm basınç altında tamamen nemlendirilmiş reaktanlar kullanılarak elde edilmiş olup, özellikle ohmik kayıp ve konsantrasyon kayıp bölgelerinde çalışmadaki sonuçlardan sapmalar göstermiştir. Bu oluşan farklılıkların, deneylerde kullanılan yakıt hücresinin parçalarına ait yoğunluk, özgül ısı, ısı iletkenlik gibi fiziksel özelliklerin bilinmemesi ve sayısal analizlerin tek fazlı olarak yapılmasından kaynaklanmaktadır [13].



Şek. 4. Polarizasyon eğrilerinin karşılaştırılması

2. Çalışma Basıncının Etkisi

PEM yakıt pilleri ile ilgili literatür incelendiğinde görülmektedir ki çalışma basıncının hücre performansı üzerindeki etkisi önemli bir husustur. Burada hücre çalışma basıncı 1 atm, 2 atm ve 3 atm olarak değiştirilerek parametrenin yakıt hücresi performansı üzerindeki etkileri incelenmiştir. Çalışmada basıncın performans üzerindeki etkileri incelenirken diğer parametreler sabit tutulmuştur. Elde edilen polarizasyon eğrileri Şekil 5'te verilmiştir.



Şek. 5. Çalışma basıncının polarizasyon eğrisi üzerine etkisi

Şekilde görüldüğü gibi çalışma basıncının artması hücre performansını arttırmıştır. Literatür incelemelerinde de görülür ki genel polarizasyon eğrileri, basınç arttıkça pozitif olarak değişir. Çalışma basıncının artması nedeniyle hücre performansındaki iyileşme, reaktif gazların yayılımını arttırarak, kütle taşınım direnci probleminin azaltılmasıyla açıklanabilir [9]. Temel olarak daha yüksek basınçlar oksijeni ve hidrojeni elektrolitle temasa geçmeye zorlar ve bu da kütle taşınımı kaybını azaltır [5]. İyileştirilmiş performansların bir başka nedeni de, artan çalışma basıncına sahip reaktif gazların kısmi basınç artışıdır [7]. Bununla birlikte PEM

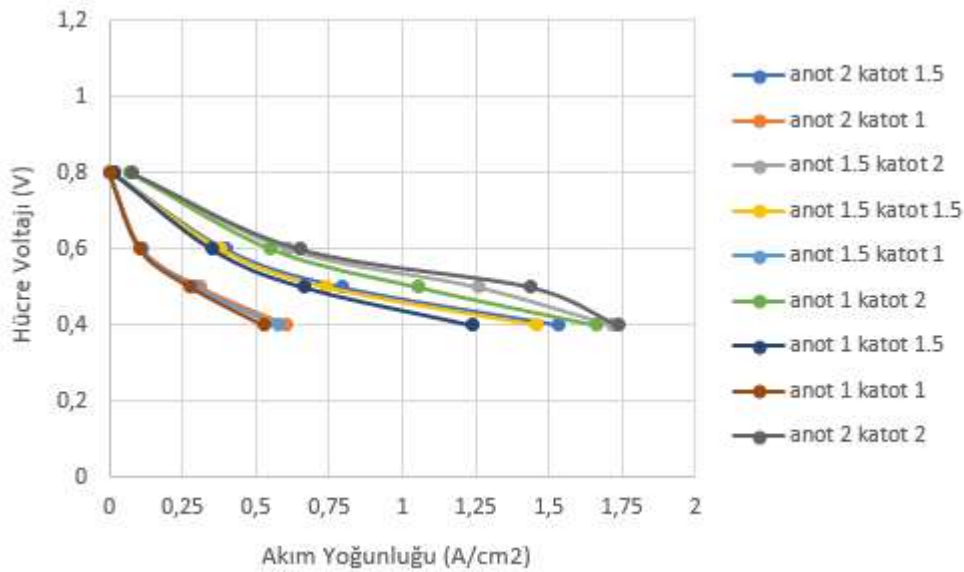
yakıt hücresi sistemi için, daha yüksek çalışma basıncı seviyelerinde yüksek performans elde edildiği ancak özellikle mühendislik uygulamalarında yüksek basınçlı operasyon seçerken işletme maliyeti, sistem hacmi gibi önemli konuların dikkate alınması gerektiği vurgulanmıştır. Gerçekte birçok PEM yakıt hücresi normal atmosfer basıncında çalışır. Yüksek basınçlı işlem kesinlikle yüksek hücre performansına yol açmaz, aslında yakıt hücresi sisteminin çalışma ihtiyacına bağlıdır [6].

3. Dönüşüm Katsayısının Etkisi

Bu çalışmada **Tablo 3**'teki anotta ve katotta 2 olan dönüşüm katsayısı değeri değiştirilerek parametrenin yakıt hücresi performansı üzerindeki etkisi incelenmiştir. Dönüşüm katsayısının performans üzerindeki etkileri incelenirken diğer parametreler sabit tutulmuştur. Sınır şartı olarak katot terminaline uygulanan hücre voltajı sırasıyla 0,4-0,5-0,6 ve 0,8 olarak değiştirilerek hücre karakteristiğini ifade eden polarizasyon eğrileri elde edilmiştir. Dönüşüm katsayısının etkisini incelerken anotta ve katotta alınan değerler **Tablo 4**'te verilmiştir. Elde edilen polarizasyon eğrileri **Şekil 6**'da verilmiştir.

Tablo 4. Dönüşüm katsayısı etkisi çalışmasında kullanılan değerler

Anot	Katot
2	1,5
2	1
1,5	2
1,5	1,5
1,5	1
1	2
1	1,5
1	1



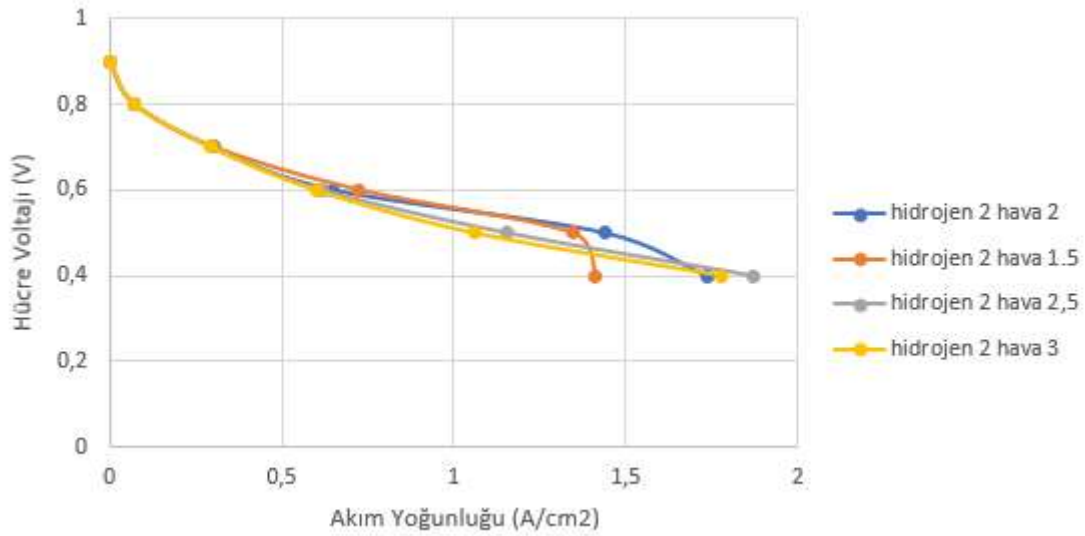
Şek. 6. Dönüşüm katsayısının polarizasyon eğrisi üzerine etkisi

Şekil 6’da görüldüğü gibi dönüşüm katsayısı değeri hücre performansını önemli ölçüde etkilemektedir. $0,718783 \text{ W/cm}^2$ değerindeki maksimum güç yoğunluğuna sınır şartı olarak katot terminaline uygulanan hücre voltajı $0,5 \text{ V}$ iken ve anotta ve katotta dönüşüm katsayısı değeri 2 iken ulaşılmıştır.

4. Stokiyometrik Akış Oranının Etkisi

Stokiyometrik akış oranının etkisi PEM yakıt hücrelerinin performansını etkileyen önemli bir parametredir. Bu çalışmada sadece hava stokiyometrik akış oranının etkisi incelenmiştir. Hidrojen stokiyometrik akış oranı 2 alınmış ve hava stokiyometrik akış oranı sırasıyla 1,5-2-2,5-3 alınarak hesaplama için kullanılmıştır. Stokiyometrik akış oranının performans üzerindeki etkileri incelenirken diğer parametreler sabit tutulmuştur.

Stokiyometrik akış oranı, hücrede su yönetimi üzerinde önemli bir etkiye sahiptir [5]. Hava stokiyometrik akış oranının hücre performansı üzerine etkisinin iki açıklaması vardır. İlk olarak, daha yüksek bir hava akış hızı daha yüksek bir oksijen konsantrasyonuna yol açar ve daha sonra reaksiyon hızını artırır. İkincisi, daha yüksek bir hava akış hızı, katotta su basmasına neden olabilecek aşırı suyun giderilmesine yardımcı olur. Bu iki faktör, hücre performansını verimli bir şekilde geliştirmek için birleşir. Bununla birlikte, eğer hava nemlendirilmesi iyi yapılmazsa, ikinci faktörün daha yüksek bir su uzaklaştırma oranına neden olabileceği ve membranın yavaş yavaş kuruyabileceğinden bahsetmekte fayda vardır. Bu nedenle, çalışma koşullarının optimizasyonu için hava stokiyometrik akış oranının optimum bir değeri sağlanmalıdır [6]. Elde edilen polarizasyon eğrileri Şekil 7’de verilmiştir.



Şek. 7. Stokiyometrik akış oranının polarizasyon eğrisi üzerine etkisi

Hücre performansında düşük akım yoğunluklarında çok az değişiklik gözlenirken yüksek akım yoğunluklarında belirgin şekilde değişiklik gözlenmiştir. $0,7479798 \text{ W/cm}^2$ değerindeki maksimum güç yoğunluğuna sınır şartı olarak katot terminaline uygulanan hücre voltajı 0,4 V iken ve hava stokiyometrik akış oranı 2,5 iken ulaşılmıştır.

Özetle, artan oksijen akış hızı, oksijenin mevcudiyetinin pozitif etkisi membran dehidrasyonunun negatif etkisini telafi ederse hücre performansını iyileştirmek için faydalıdır [6].

IV. SONUÇ

Farklı çalışma koşullarının PEM yakıt hücresi performansı üzerindeki etkisini sayısal olarak incelemek için bu çalışmada üç boyutlu, serpantin kanallı PEM yakıt hücresi, kararlı halde ve tek fazlı analiz edilmiştir. Analizde Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) yöntemi kullanılmıştır. Çalışılan çalışma koşulları sırasıyla farklı çalışma basıncı, dönüşüm katsayısı ve stokiyometrik akış oranını içerir. Bu çalışmaya dayanarak, aşağıdaki sonuçlar çıkarılabilir:

1. Yapılan doğrulama çalışmasında analiz sonuçlarıyla uyum polarizasyon eğrilerinde gösterilmiştir. Deneysel verilerle sonuçlar arasındaki farklılıkların da deneylerde kullanılan yakıt hücresinin parçalarına ait yoğunluk, özgül ısı, ısı iletkenlik gibi fiziksel özelliklerin bilinmemesi ve sayısal analizlerin tek fazlı olarak yapılmasından kaynaklandığı sonucuna varılmıştır.
2. PEM yakıt hücresinin performansı çalışma basıncının artmasıyla artar. Bunun sebebi artan kısmi basınç ve reaksiyon alanındaki reaktif gazların yayınımla kütle taşınım direnci probleminin azalmasıdır.
3. Hücre performansı, dönüşüm katsayısı değeri ile önemli ölçüde etkilenir. $0,718783 \text{ W/cm}^2$ değerindeki maksimum güç yoğunluğuna sınır şartı olarak katot terminaline uygulanan hücre voltajı 0,5 V iken ve anotta ve katotta dönüşüm katsayısı değeri 2 iken ulaşılmıştır.

4. Hava stokiyometrik akış oranının etkisiyle hücre performansında düşük akım yoğunluklarında çok az değişiklik gözlenirken yüksek akım yoğunluklarında belirgin şekilde değişiklik gözlenmiştir. PEM yakıt hücrelerinde pratik çalışmayı kolaylaştırmak için optimum bir hava stokiyometrik akış oranı değeri olmalıdır.

KAYNAKLAR

- [1] **Macedo-Valencia, J., Sierra, J.M., Figueroa-Ramirez, S.J., Diaz, S.E., Meza, M. 2016.** 3D CFD modeling of a PEM fuel cell stack. *International Journal of Hydrogen Energy*, 41: 23425-23433.
- [2] **Sopian, K., Daud, W.R.W. 2006.** Challenges and future developments in proton exchange membrane fuel cells. *Renewable Energy*, 31: 719-727.
- [3] **Baca, C.M., Travis, R., Bang, M. 2008.** Three-dimensional, single-phase, non-isothermal CFD model of a PEM fuel cell. *Journal of Power Sources*, 178: 269-281.
- [4] **Su, A., Ferng, Y.M., Shih, J.C. 2010.** CFD investigating the effects of different operating conditions on the performance and the characteristics of a high-temperature PEMFC. *Energy*, 35: 16-27.
- [5] **Al-Baghdadi, M.A.R.S., Al-Janabi, H.A.K.S. 2007.** Parametric and optimization study of a PEM fuel cell performance using three-dimensional computational fluid dynamics model. *Renewable Energy*, 32: 1077-1101.
- [6] **Yuan, W., Tang, Y., Pan, M., Li, Z., Tang, B. 2010.** Model prediction of effects of operating parameters on proton exchange membrane fuel cell performance. *Renewable Energy*, 35: 656-666.
- [7] **Wang, L., Husar, A., Zhou, T., Liu, H. 2003.** A parametric study of PEM fuel cell performances. *International Journal of Hydrogen Energy*, 28: 1263-1272.
- [8] **Askaripour, H. 2019.** Effect of operating conditions on the performance of a PEM fuel cell. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 144: 118705.
- [9] **Kahveci, E.E., Taymaz, I. 2018.** Assessment of single-serpentine PEM fuel cell model developed by computational fluid dynamics. *Fuel*, 217: 51-58.
- [10] **Alkaya, L., Behçet, R., İlkılıç, C. 2008.** Yakıt pilleri ve uygulama alanları. *Doğu Anadolu Bölgesi Araştırmaları Dergisi*, 7(1): 67-71.
- [11] **Kwac, L.K., Kim, H.G. 2008.** Investigation of gas flow characteristics in proton exchange membrane fuel cell. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 22: 1561-1567.
- [12] **Le, A.D., Zhou, B. 2008.** A general model of proton exchange membrane fuel cell. *Journal of Power Sources*, 182: 197-222.
- [13] **Özdemir, B. 2012.** Serpantin kanallı PEM yakıt hücresinin sayısal analizi. *Yüksek Lisans Tezi*, G.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Ankara.
- [14] **Anonim, 2009.** ANSYS FLUENT 12.0 fuel cell modules manual. http://www.afs.enea.it/project/neptunius/docs/fluent/html/fuelcells/main_pre.htm-(Erişim tarihi: 20.03.2019).