



SERPANTİN KANAL YAPISINA SAHİP SİLİNDİRİK BİR PEM YAKIT PİLİNİN SAYISAL OLARAK İNCELENMESİ

¹Tunahan GÜNDÜZ , ²Tolga DEMİRCAN 

Kırıkkale Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Kırıkkale, TÜRKİYE
¹tunahan.gunduz06@gmail.com, ²tolgademircan@kku.edu.tr

(Geliş/Received: 01.10.2021; Kabul/Accepted in Revised Form: 10.01.2022)

ÖZ: Bu çalışmada, serpantin kanala sahip tek hücreli silindirik bir yakıt pili sayısal olarak incelenmiştir. Bu amaçla bir kanallı serpantin (1S) gaz akış kanal yapısına sahip silindirik yakıt pili geometrisi oluşturulmuştur. Gaz akış kanalının performansa olan etkisinin daha iyi incelenebilmesi için serpantin kanalların dönüşleri arasındaki mesafe 2, 4, 6 ve 8 mm olacak şekilde değiştirilerek 4 farklı model geometrisi oluşturulmuştur. Bu model geometrilerinden model 3 için, anot ve katot giriş debileri değiştirilerek 3 farklı çalışma durumu ele alınmıştır. Tüm model geometrileri ve tüm çalışma durumları için, hücre voltajı 0.45V ile 0.90V aralığında değiştirilerek 10 farklı hücre voltajında sayısal analizler tekrarlanmıştır. Bu kapsamda 60 farklı simülasyon tamamlanmıştır. Yapılan analizlerin sonucunda, hücre voltajının azalması ile akım yoğunluğunun arttığı gözlemlenmiştir. Serpantin kanalın dönüşleri arasındaki mesafenin artmasıyla akım yoğunluğunun ve basınç düşüşünün azaldığı tespit edilmiştir. Yüksek hücre voltajlarında serpantin kanalın dönüşleri arasındaki mesafenin artmasıyla güç yoğunluğunun fazla değişmediği, düşük hücre voltajlarında ise azaldığı belirlenmiştir. Anot ve katot kanallarına giren gaz debilerinin artışı ile akım yoğunluğunun ve basınç düşüşünün arttığı gözlemlenmiştir. Ancak 0.7V'dan yüksek hücre voltajlarında, anot ve katot giriş debilerinin artmasıyla güç yoğunluğunun fazla değişmediği, 0.7V'dan düşük voltajlarda ise gaz giriş debisinin artışı ile arttığı belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Silindirik yakıt pili, PEM, 1S serpantin kanal, Kanal tasarımı

Numerical Analysis of a Cylindrical PEM Fuel Cell with Serpentine Channel Structure

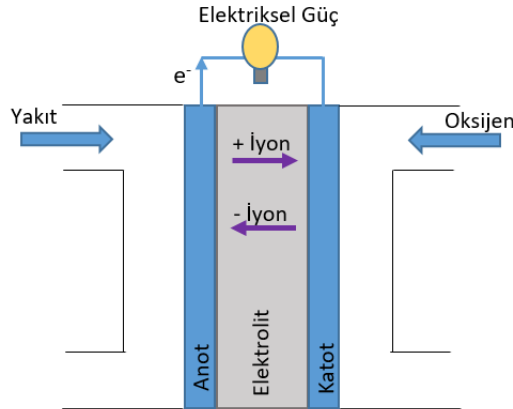
ABSTRACT: In this study, a cylindrical fuel cell with the serpentine channel is numerically investigated. For this purpose, a fuel cell geometry with cylindrical geometry and 1S serpentine gas flow channel structure is created. To better investigate the effect of the gas flow channel on the performance, the distance between serpentine channel turns are changed as 2, 4, 6 and 8 mm and 4 different model geometries are created. For Model 3 among these model geometries, the anode and cathode inlet flow rates are changed and 3 different operating states are considered. For all model geometries and all operating states, the cell voltage is changed in the 0.45V-0.90V range and numerical analysis are repeated for 10 different cell voltages. Accordingly, 60 different simulations are completed. It is found that the current density value increased with the decreased cell voltage. It is determined that the pressure difference and current density decreased with increased serpentine channel turning distances. It is found that for high cell voltages, the power density value is relatively unchanged for the increased distances between serpentine channel turns and this value increased for low cell voltages. As the gas inlet flow rate of the anode and cathode channels increased, it is found that the current density and the pressure difference increased. However, for cell voltages above 0.7V, it is determined that the power density value is relatively unchanged with increased anode and cathode gas inlet flows and increased with has inlet flow rate for values below this cell voltage.

Keywords: Cylindrical fuel cell, PEM, 1S serpentine channel, Channel design

GİRİŞ (INTRODUCTION)

Günümüz dünyasında enerjiye olan talep sürekli olarak artmaktadır. Bu artan talebin karşılanabilmesinde doğal enerji kaynaklarından faydalanılmaktadır. Enerji kaynakları, yenilenemez ve yenilenebilir olmak üzere iki ana başlıkta sınıflandırılabilir. Yenilenemez enerji kaynakları (fosil kaynaklar vb.) uzun yıllardır kullanılıyor olmasına rağmen kıt kaynaklardır. Bu kaynakların gelecek yıllarda tükeneceği ve sürekli artan enerji talebine yetişemeyeceği aşikârdır. Aynı zamanda yenilenemez enerji kaynaklarından enerji edilmesi sırasında açığa bir takım zararlı gazlar çıkmakta ve bu gazlar hava kirliliğine, küresel ısınmaya sebep olabilmektedir. Tüm bu sebeplerden dolayı, uzun yıllar tükenmeyen ve daha çevreci olan yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelim sürekli olarak artmaktadır. Güneş, rüzgar, hidrolik, biyokütle, jeotermal, dalga ve hidrojen enerjileri yenilenebilir enerji kaynakları olarak kabul edilebilmektedir. Bu çalışmada, hidrojen enerjisinin elektrik enerjisine dönüştürülebilmesi için kullanılan yakıt pilleri üzerine yoğunlaşmaktadır.

Yakıt pilleri, hidrojen veya hidrojen bakımından zengin olan yakıtların kimyasal enerjilerini kullanarak, hiçbir şekilde yanma reaksiyonu gerçekleştirilmeden elektrokimyasal bir reaksiyon sonucu direkt olarak elektrik enerjisi elde edilmesini sağlayan cihazlardır. Yakıt pillerinin birçok farklı çeşidi bulunmakla beraber, PEM (Proton Exchange Membrane) yakıt pilleri düşük sıcaklıkta çalışması, yüksek verimle çalışması, taşınabilir olması gibi özelliklerinden dolayı ön plana çıkmaktadır. Bir PEM yakıt pilinin çalışma prensibinin şematik gösterimi Şekil 1’de verilmiştir.



Şekil 1. PEM yakıt pilinin çalışma prensibinin şematik gösterimi.

Figure 1. Schematic representation of the working principle of the PEM fuel cell.

PEM yakıt pilini oluşturan parçalar; anot ve katot akım toplayıcı plakaları (bipolar plakalar), anot ve katot gaz akım kanalları, anot ve katot gaz difüzyon tabakaları, anot ve katot katalizörleri ve membrandır. Çalışma sıcaklığı, çalışma basıncı, giriş gazlarının debisi, giriş gazlarının nemliliği, bipolar plaka geometrisi, sıvı suyun uzaklaştırılması vb. parametreler olmak üzere, PEM yakıt pilinin performansını etkileyen birçok farklı parametre bulunmaktadır. Literatür incelendiğinde, bu parametrelerin yakıt pilinin performansı üzerindeki etkilerini inceleyen birçok çalışma bulunmaktadır. Bu kapsamda ilgili literatür detaylı bir şekilde incelenmiş, bazı önemli çalışmalar aşağıda açıklanmıştır.

Karacan (2019) PEM yakıt pili için düşük ağırlıklı akış plakası geliştirebilmek adına sayısal ve deneysel çalışmalar yapmıştır. Bu çalışmada akış alanı tasarımının maliyet ve üretilebilmesi gibi kriterlere bakılarak paslanmaz çelik (304L) kullanılması gerektiği sonucuna varmıştır. Elde etmiş olduğu sonuçlardan yola çıkarak sektörde kullanılan diğer ürünlere göre ağırlık ve hacimde önemli azalmalar olduğunu belirtmiştir. Daşdemirli (2019) PEM yakıt pillerinde çalışma parametrelerinin performansa olan etkisini sayısal olarak incelemiştir. Analizlerinde gaz akış alanına yerleştirilen farklı yarıçaplarda ki engellerin, sıcaklığın ve basıncın yakıt pili performansına olan etkisine yoğunlaşmıştır. Sonuç olarak, basıncın artmasıyla akım değerlerinin arttığını, düşük sıcaklıklarda ise akım değerlerinin düştüğünü ve gaz akış kanallarında engeller olan modelin engelsiz modele göre yaklaşık %7,2 oranında daha fazla

verimli olduğunu belirtmiştir. Dalğış (2019) PEM yakıt pilini deneysel olarak incelemiştir. Yapmış olduğu deneyde anot tarafından giren hidrojen ve katot tarafından giren oksijenin debisini ve sıcaklığını sabit tutarak nem oranlarını kademeli şekilde arttırarak ölçüm yapmıştır. Arttırılan nem değerine bağlı olarak performansın arttığını gözlemlemekle birlikte, belli bir değerden (%60) sonra sabit kalıp düşüşe geçtiğini gözlemlemiştir. Emiroğlu (2019) bir PEM yakıt pilinde, geometrinin değişiminin soğutma performansına olan etkisini sayısal ve deneysel olarak incelemiştir. Deneysel olarak elde ettiği sonuçları HAD analizi ile doğrulayarak deneyde kullanılan geometriden farklı geometriler tasarlamış ve analizlerini gerçekleştirmiştir. Deneysel verilerden yola çıkarak, katot kısmındaki ısı yükünü fazla olduğunu gözlemlemiş ve katot kısmına yapılacak soğutmanın daha etkili olacağı sonucuna varmıştır. Daha dar kanal kullanımının, daha yüksek soğutma performansına sahip olduğunu belirlemiştir.

Yılmaz (2018) bir PEM yakıt pilinin bipolar plakasındaki gaz akış kanalının desen tasarımının performansa olan etkisini sayısal ve deneysel olarak incelemiştir. Çalışmasında paralel serpantin tip (PS), pin tip (PN), paralel tip (PT), üç kanallı serpantin tip (3S) ve özel dalga tip (DT) gaz akış kanal desenleri olmak üzere beş farklı desen kullanmıştır. Elde edilen polarizasyon eğrilerine bakılarak en iyi performans sonucu 3S gaz akış kanalı desende iken en kötü performansı da PN tip akış kanalına sahip plaka verdiğini belirtmiştir. Özdoğan (2018) PEM yakıt pillerinde, çalışma parametrelerinin, kanal boyutlarının ve kanal kesit geometrilerinin pil performansı üzerindeki etkilerini sayısal olarak incelemiştir. Çalışmasının sonucunda, giriş basıncının artması ile pil performansının arttığını gözlemlemiştir. Hava debisinin artmasıyla (hidrojen debisi sabit tutularak) elde edilen güç miktarının arttığını belirtmiştir. Üçgen kesit geometrisine sahip kanalın performansının dörtgen, trapez ve yarım elips kesit geometrisine sahip kanalların performansından daha iyi olduğu çıkarımında bulunmuştur. Özdemir (2012) serpantin kanala sahip bir PEM yakıt hücresini sayısal olarak incelemiştir. Yapmış olduğu analizlerde membran kalınlığının artışının yakıt pili performansını azalttığını, sıcaklığın, basıncın, nemliliğin ve kanal genişliğinin artmasıyla yakıt pilinin performansının arttığını gözlemlemiştir. Aynı zamanda anot ve katot gazlarının zıt yönde akmasının yakıt pilinin performansı üzerinde olumlu etki bıraktığını belirtmiştir. Bilgili (2011) akış kanalları içerisinde bulunan yarı silindirik engellerin performansa olan etkisi üzerine çalışmıştır. Analizlerini iki farklı membran elektrot çifti (MEÇ), engel yerleştirilmemiş yakıt pili modeli ve akış kanalı içerisine yarı silindirik engellerin yerleştirildiği yakıt pili modelinde yapmıştır. Çalışmasının sonucunda daha ince katalizör tabakasına ve membrana sahip MEÇ-1 in yakıt pili performansına etkisinin daha iyi olduğunu tespit etmiştir. Blokların toplam kesit alanı sabit kalacak şekilde engel sayısı arttırıldığında, maksimum akım yoğunluğunun değerinde %14,5'e varan iyileşme elde edildiğini belirtmiştir. Carcadea ve diğ. (2021) geniş aktif alana sahip bir PEM yakıt hücresinde, akış kanallarının geometrik boyutlarının hücre performansı üzerindeki etkilerini sayısal olarak incelemiş ve yaptıkları deneyle doğrulamışlardır. Çalışmalarında 200 cm² aktif alana sahip serpantin kanallı yakıt pili için farklı gaz akış alanları ve kanal derinlikleri için incelemeler yapmışlardır. Analizler sonucunda en iyi akış alanına sahip modelin 14 kanallı serpantin tip olduğunu belirtmişlerdir. Ayrıca kanal derinliğinin azalmasıyla akım yoğunluğunun arttığını tespit etmişlerdir.

Susemdiran ve diğ. (2020) yarı silindirik katot akım toplayıcı bir silindirik PEM yakıt hücresinin geliştirilmesi üzerine deneysel çalışmalar yapmışlardır. Anot akım toplayıcı olarak pirinç tüp kullanmışlardır. Katot akım toplayıcı imalatı için ise pirinç boru kullanmışlardır. Pirinç boruya hava giriş kanalları işlendikten sonra ortadan ikiye kesilerek içi boş iki adet yarı silindirik parça elde etmişlerdir. Daha sonra anot tüpün üstüne membran elektron çiftini sararak katot boruları kapatmışlardır. Sonuç olarak silindirik PEM yakıt pillerinin geliştirilmesi adına olumlu sonuçlar elde etmişlerdir. Ersan ve diğ. (2010) gazların nemlendirilmesinin PEM yakıt hücresi yığının potansiyeline olan etkilerini deneysel olarak incelemişlerdir. Deneylerinde yakıt olarak hidrojen ve kuru havayı kullanmışlardır. Sonuç olarak, maksimum potansiyelin elde edilmesinde hem anot tarafının hem de katot tarafının nemlendirilmesi gerektiğini gözlemlemişler ve optimum hava/yakıt oranını 57/20 olarak belirlemişlerdir. Abdel-Rehim (2019) elektromanyetik alanın, düşük elektromanyetik alan yoğunluğunda PEM yakıt hücresi yığınının performansına olan etkilerini incelemek için deneysel çalışmalar yapmıştır. Bu kapsamda 25 cm² aktif alana sahip on tane özdeş yakıt hücresi yığınının oluştuğu bir PEM yakıt pili kullanmıştır. Yapmış olduğu

deneylerin sonucunda PEM yakıt pillerinin elektrik üretiminin manyetik alan uygulanarak arttırılabileceğini tespit etmiştir. Sonuç olarak, PEM yakıt pillerinde manyetik alan kuvveti arttıkça, çıkış volt değerinin arttığını gözlemlemiştir. Aynı zamanda yakıt pili manyetik alana maruz kaldığında verimliliğinin yaklaşık %10 oranında arttığını belirtmiştir. Arıç ve diğ. (2019) iki hücreli PEM yakıt pilini sayısal olarak incelemişlerdir. Bu amaçla 1S serpantin kanala sahip tek hücreli ve iki hücreli yakıt pili modeli oluşturmuşlardır. Analizlerinin sonucunda, yakıt pilinin hücre sayısının artmasıyla elde edilen gücünde arttığını ama bu artışın doğru orantılı olmadığını gözlemlemiştir. Bu durumu yakıt pilinin hücre sayısının artmasına paralel olarak, gerçekleşen kayıplarda da artış olmasından dolayı gerçekleştiğini belirtmişlerdir.

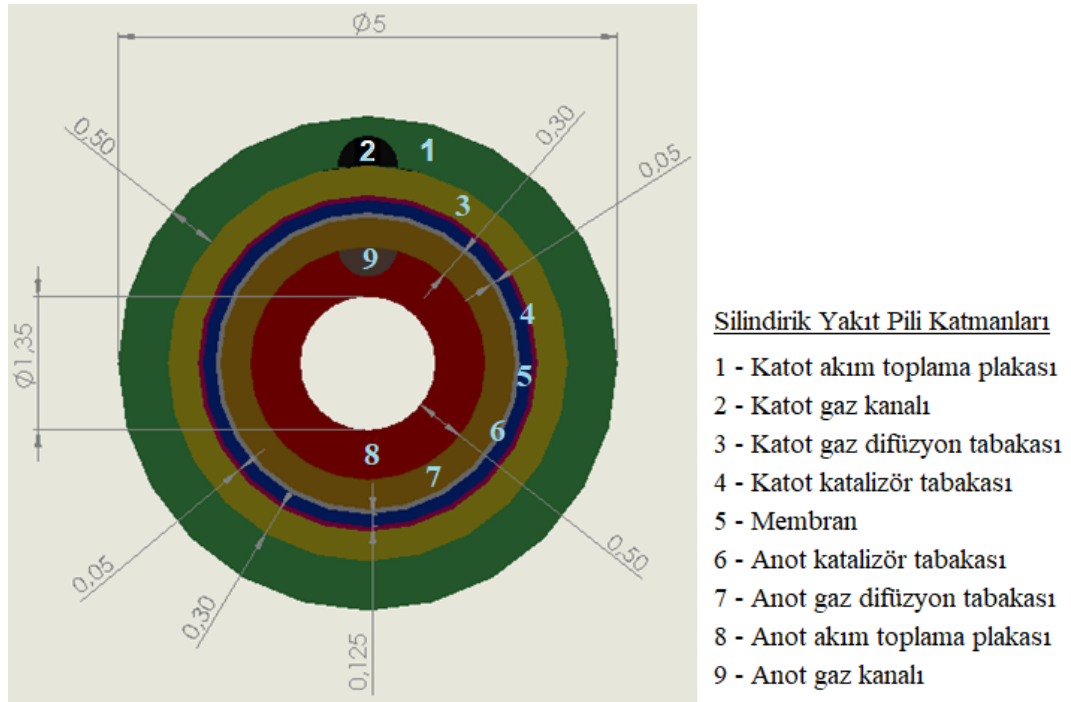
Park ve Li (2007) serpantin kanal yapısına sahip bir PEM yakıt pilinde çapraz akışın performans üzerindeki etkisini deneysel ve sayısal olarak incelemişlerdir. Çalışmalarının sonucunda, gaz difüzyon tabakasının geçirgenliği ve kalınlığının çapraz akışı etkilediğinin gözlemlemiştir. Bu durumun basınç düşüşümü üzerinde önemli etkisi olduğunu belirtmişlerdir. Kumar ve diğ. (2020) serpantin kanallı konik akış kanalına sahip bir PEM yakıt hücresinin performansını deneysel olarak incelemişlerdir. Çalışmalarında normal serpantin tip kanala sahip yakıt hücresi ve serpantin kanalın içerisinde koniklik oluşturulan yakıt hücresi için deneyler gerçekleştirmişlerdir. Çalışmalarının sonucunda, konik kanala sahip serpantin akış alanını kullanılan yakıt hücresinin akım değerinde, normal serpantin akış alanı kullanılan yakıt hücresinin akım değerine göre % 15'lik bir artış gözlemlemiştir. Nguyen ve diğ. (2004) serpantin gaz akış kanallarına sahip bir PEM yakıt hücresinin üç boyutlu hesaplamalı akışkanlar dinamiği modelini oluşturmuşlar ve sayısal olarak incelemişlerdir.

Karvelas ve diğ. (2016) anot yatağı geometrisinin PEM yakıt hücrelerinin hidrolik davranışına etkisini sayısal olarak incelemişlerdir. Bunun için iç-içe, paralel ve serpantin olmak üzere üç temel model oluşturmuşlar ve simülasyonlar yapmışlardır. Sonuç olarak, serpantin geometrideki basınç kaybının diğer iki modele göre daha fazla olduğunu tespit etmişlerdir. İç-içe ve paralel geometrilere akış hız dağılımının düzgün olmadığını ve Re sayısı arttıkça düzensizliklerin daha da arttığını belirtmişlerdir. Perng ve diğ. (2009) akış kanalına enlemesine olarak yerleştirilen dikdörtgen bir silindirin, PEM yakıt hücresi performansına olan etkilerini incelemek için sayısal çalışmalar yapmışlardır. Bu kapsamda boşluk oranını (a) 0.05-0.3 aralığında ve genişlik-yükseklik oranını (WR) ise 0.66-1.66 aralığında değiştirerek analizler yapmışlardır. Çalışmalarının sonucunda, dikdörtgen silindirin yakıt akış kanalına enine bir şekilde yerleştirilmesi ile, yakıt pilinin hücre performansının önemli ölçüde arttığını gözlemlemiştir. Silindir genişliğinin hücre performansı üzerinde önemli bir etkisinin olduğunu belirtmişlerdir. En iyi hücre performans artışının 0.2 boşluk oranında gerçekleştiğini belirtmişlerdir.

Literatürde bulunan PEM yakıt pili ile ilgili yapılan çalışmalar incelendiğinde, çalışmaların büyük bir kısmının düzlemsel geometriye sahip PEM yakıt pillerinin üzerine olduğu görülmektedir. Bu çalışmalarda, düzlemsel geometriye sahip PEM yakıt pillerinin çalışma sıcaklığının, çalışma basıncının, giriş gazlarının debilerinin, giriş gazlarının nemliliğinin, bipolar plaka geometrilerinin vb. birçok parametrenin, çalışma performansı üzerindeki etkilerine yoğunlaşıldığı gözlemlenmiştir. Ancak literatürde silindirik geometriye sahip PEM yakıt pilleri ile alakalı çalışma sayısının oldukça az olduğu görülmüştür. Bu sebeple bu çalışmada, silindirik bir yakıt pili için anot ve katot akım toplama plaka geometrileri ile serpantin gaz akış kanalı birlikte kullanılarak özgün modeller oluşturulmuştur. Bu sayede düzlemsel mimarideki yakıt pillerine alternatif olması ve ileride yapılabilecek silindirik mimarideki yakıt pillerinin gelişimine ve literatüre katkıda bulunulması amaçlanmıştır. Bundan dolayı bu çalışmada, silindirik geometriye sahip PEM yakıt pillerinin performansını etkileyen farklı parametreler birlikte ele alınmıştır. Silindirik serpantin gaz akış alanına sahip farklı model geometrileri oluşturularak, farklı debi ve voltajlar için analizler gerçekleştirilmiştir. Dolayısıyla, bu çalışmanın literatürdeki mevcut çalışmalardan en temel farkının, yaygın olarak kullanılan düzlemsel akım toplama plakaları yerine silindirik geometrideki akım toplama plakaların kullanılmasıdır. Ayrıca bu çalışma kapsamında, silindirik anot ve katot akım toplama plakaları ile serpantin kanal yapısının birlikte kullanılması çalışmanın diğer bir özgün yönü olduğu söylenebilir.

MODELLERİN TANITIMI VE MATEMATİKSEL FORMÜLASYON (MODEL DEFINITION AND MATHEMATICAL FORMULATION)

Bu çalışmada silindirik 1S serpantin akış kanallarına sahip bir PEM yakıt pili incelenmiştir. Bu kapsamda Şekil 2’de katmanları Çizelge 1’de ise geometrik özellikleri verilen değerler kullanılarak, silindirik PEM yakıt pili için ana model geometrisi oluşturulmuştur. Bu ana model geometride, serpantin kanalın dönüşleri arasında ki mesafe değiştirilerek 4 farklı model geometri belirlenmiştir. Bu model geometriler için farklı parametrelerin değişimi ele alınarak, incelenen PEM yakıt pilinin performansının artırılabilmesi, optimum çalışma parametrelerinin belirlenmesi amaçlanmıştır.



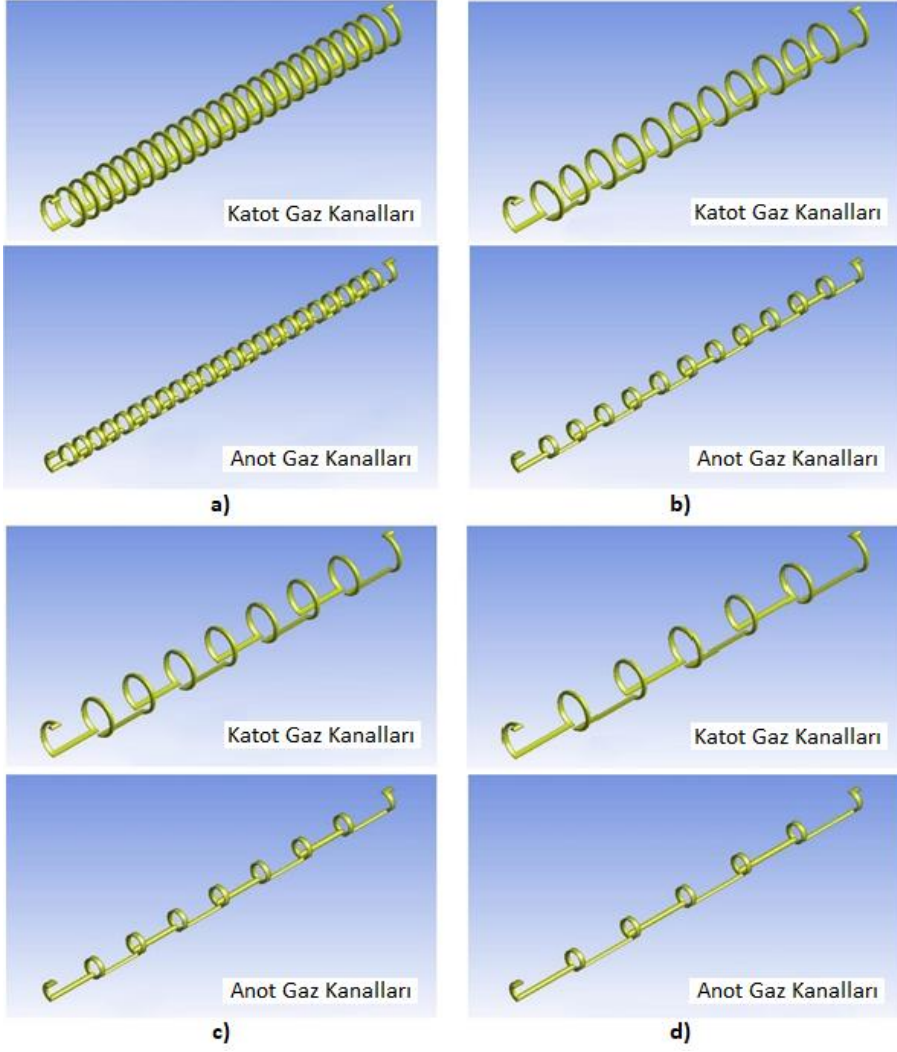
Şekil 2. Silindirik yakıt pilinin katmanları

Figure 2. Layers of a cylindrical fuel cell

Çizelge 1. Yakıt pilinin geometrik özellikleri

Table 1. Fuel cell geometric properties

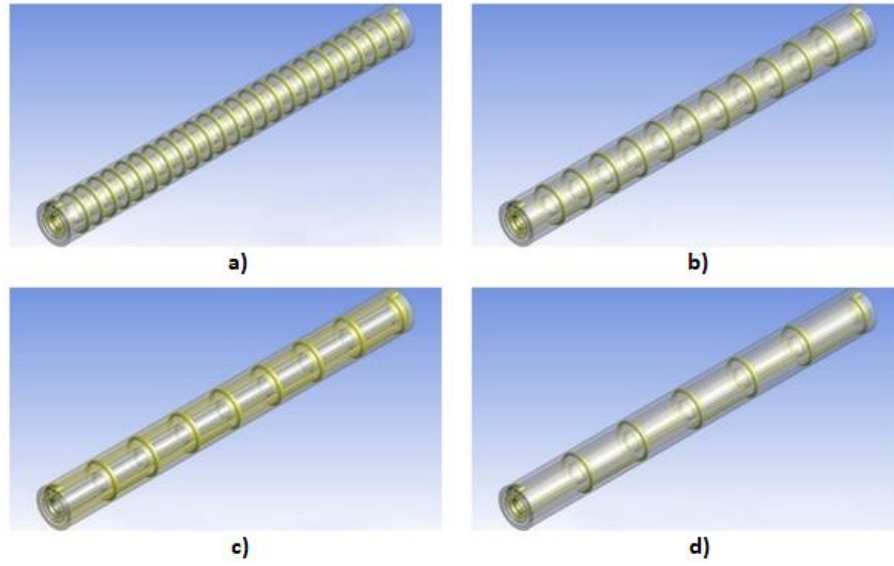
Boyutlar	1S Serpantin
Anot gaz kanalı kesit alanı (mm ²)	0,1337
Katot gaz kanalı kesit alanı (mm ²)	0,14587
Anot akım toplama plakası iç çapı (mm)	1,35
Anot akım toplama plaka kalınlığı (mm)	0,5
Katot akım toplama plakası dış çapı (mm)	5
Katot akım toplama plaka kalınlığı (mm)	0,5
Gaz difüzyon tabaka kalınlığı (mm)	0,3
Katalizör tabaka kalınlığı (mm)	0,05
Membran malzemenin kalınlığı (mm)	0,125
Yakıt pili uzunluğu (mm)	50



Şekil 3. Katot ve Anot gaz kanalları a) Model 1, b) Model 2, c) Model 3, d) Model 4.

Figure 3. Cathode and Anode gas channels a) Model 1 b) Model 2 c) Model 3 and d) Model 4.

Bu kapsamda silindirik PEM yakıt pilinin serpantin kanallarının dönüşleri arasında ki mesafe 2, 4, 6 ve 8 mm olacak şekilde değiştirilerek sırasıyla Model 1, Model 2, Model 3 ve Model 4 geometrileri oluşturulmuştur. Dönüşler arasındaki mesafenin değiştirilmesi, modellerin serpantin sarım sıklığının değişmesine sebep olmuştur. Oluşturulan bu 4 farklı modelin katot ve anot serpantin gaz kanalları Şekil 3'de, izometrik görünümü ise Şekil 4'de verilmektedir.



Şekil 4. Yakıt pilinin izometrik görünümü a) Model 1, b) Model 2, c) Model 3, d) Model 4.

Figure 4. Fuel cell isometric view a) Model 1, b) Model 2, c) Model 3, d) Model 4.

Bu silindirik PEM yakıt pili modelleri geliştirilirken, yakıt pilinin kararlı halde çalıştığı, reaksiyona giren reaktantların (hidrojen ve hava) ideal gaz davranışı gösterdiği, elektrokimyasal tepkimeler sonucu oluşan suyun tek fazlı ve gaz fazında olduğu, membranın tümüyle nemlendirildiği, protonik iletkenliğinin sabit olduğu, difüzyon tabakalarındaki ve akım toplayıcı plakalardaki ohmik kayıpların ise ihmal edildiği kabulleri yapılmıştır. PEM yakıt pilinin incelemesinde kullanılan akışkanların termofiziksel özellikleri Çizelge 2’de verilmiştir.

Çizelge 2. Termofiziksel özellikler (Bilgili, 2011)

Table 2. Thermophysical properties (Bilgili, 2011)

Fiziksel özellik	H ₂	O ₂	H ₂ O (su buharı)
Özgül ısı (J/kg.K)	14283	919,31	2014
Viskozite (kg/m.s)	8,411x10 ⁻⁶	1,919x10 ⁻⁵	1,34x10 ⁻⁵
Isı iletim katsayısı (W/m.K)	0,1672	0,0246	0,0261
Molekül ağırlığı	2,01594	31,9988	18,01534
Elektrik iletkenliği (ohm.m) ⁻¹	1x10 ⁻¹⁶	1x10 ⁻¹⁶	1x10 ⁻¹⁶

Diferansiyel Denklemler (Differential Equations)

Bu çalışma kapsamında incelenen problemin temel korunum denklemlerinin genel halleri aşağıda verilmiştir.

Kütle korunumu

$$\frac{\partial(\rho\varepsilon)}{\partial t} + \nabla \cdot (\varepsilon\rho\vec{v}) = S_m \quad (1)$$

Burada ρ , ε ve v sembolleri sırasıyla yoğunluğu, gözenekliliği ve akışkanın hızını temsil etmektedir. S_m kaynak terimi ise, sürekli faza ilave olan kütleği temsil etmektedir. (Özdoğan 2018, Bilgili 2011, Bilgili ve Sivrioğlu, 2016)

Momentum korunumu

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho\varepsilon\vec{v}) + \nabla \cdot (\rho\varepsilon\vec{v}\vec{v}) = -\varepsilon\nabla p + \nabla \cdot (\varepsilon\mu\nabla\vec{v}) + \vec{S}_u \quad (2)$$

Burada p , μ ve \vec{S}_u terimleri ise sırasıyla statik basıncı, moleküler viskoziteyi ve dış kuvvetleri temsil etmektedir. (Özdoğan 2018, Bilgili 2011, Bilgili ve Sivrioğlu, 2016)

Türlerin korunumu

$$\frac{\partial(\varepsilon C_i)}{\partial t} + \nabla(\varepsilon \vec{v} C_i) = \nabla(D_i \nabla C_i) + S_i \quad (3)$$

Burada C_i , D_i ve S_i sembolleri sırasıyla konsantrasyonu, difüzyon katsayısını ve kaynak terimini göstermektedir. (Özdoğan 2018, Celtek ve Bilgili, 2021, Bilgili ve Sivrioğlu, 2016)

Enerji korunumu

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon h) + \nabla \cdot (\rho \varepsilon \vec{v} h) = \nabla \cdot (k \nabla T) + S_h \quad (4)$$

Burada h entalpiyi, k etkin ısı iletim katsayısını, T sıcaklığı, S_h ise enerji kaynak terimini temsil etmektedir. (Bilgili ve Sivrioğlu, 2016)

Yüklerin korunumu

Elektronlar için yükün korunumu denklemi Eşitlik 5'de görülmektedir.

$$\nabla \cdot (\sigma_s^{eff} \nabla \phi_s) = S_e \quad (5)$$

Protonlar için yükün korunumu denklemi ise Eşitlik 6'da verilmektedir.

$$\nabla \cdot (\sigma_m^{eff} \nabla \phi_m) = S_i \quad (6)$$

Bu denklemlerde görülen ϕ_s katı faz potansiyelini, ϕ_m membran potansiyelini, σ_s^{eff} efektif elektrik iletkenliğini, σ_m^{eff} ise membranın iyonik iletkenliğini temsil etmektedir. (Özdoğan 2018, Celtek ve Bilgili, 2021)

Sınır Şartları (Boundary conditions)

Bu çalışmada, anot ve katot kanallarının girişlerinde kütle giriş (mass flow inlet), çıkışlarında ise basınç çıkış (pressure outlet) sınır şartı belirlenmiştir. Membran-katalizör tabakası, gaz difüzyon tabakası-katalizör tabakası ve gaz difüzyon tabakası-gaz kanalı tabakaları temas yüzeylerinde ise gözenekli tabaka geçiş (porous jump) sınır şartı tanımlanmıştır. Geri kalan tüm yüzeyler için duvar (wall) sınır şartı tanımlanmıştır. Anot ve katotun yüzeylerinin sabit sıcaklıkta tutulduğu düşünülmüştür. Bu kapsamda literatüre (Bilgili, 2011) uygun olarak belirlenen çalışma parametreleri Çizelge 3'te verilmektedir. Çizelgeden de görüldüğü üzere, anot giriş debisi 3×10^{-7} , 6×10^{-7} ve $1,2 \times 10^{-6}$ kg/s, katot giriş debisi ise $2,5 \times 10^{-6}$, 5×10^{-6} ve 1×10^{-5} kg/s olacak şekilde değiştirilerek, farklı giriş debileri için analizler yapılmıştır.

Çizelge 3. Çalışma parametreleri

Table 3. Operating parameters

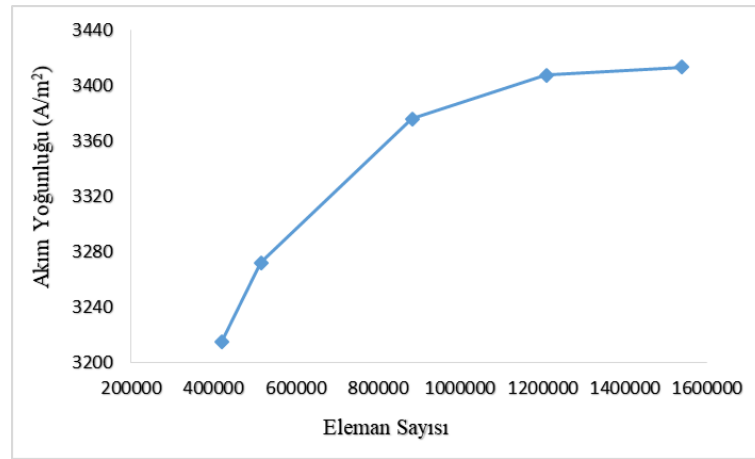
Parametre	Değer
Anot giriş debisi (kg/s)	3×10^{-7} , 6×10^{-7} ve $1,2 \times 10^{-6}$
Anot hidrojen kütle kesri (y_{H_2})	0,8
Anot su kütle kesri (y_{H_2O})	0,2
Katot giriş debisi (kg/s)	$2,5 \times 10^{-6}$, 5×10^{-6} ve 1×10^{-5}
Katot oksijen kütle kesri (y_{O_2})	0,2
Katot su kütle kesri (y_{H_2O})	0,1
Yakıt pili çalışma sıcaklığı (K)	353
Yakıt pili çalışma basıncı (kPa)	200

SAYISAL YÖNTEM (NUMERICAL METHOD)

Bu çalışma kapsamında incelenen PEM yakıt pili model geometrileri için, süreklilik, momentum, enerji, tür ve elektrokimyasal denklemleri belirlenen sınır şartları yardımı ile Fluent paket programının PEMFC modülü kullanılarak sayısal olarak çözülmüştür. Bu kapsamda, basınç denklemlerinin ayrıştırılmasında Standart yöntem, diğer denklemlerin ayrıştırılmasında ise Birinci Dereceden Upwind yöntemi kullanılmış ve SIMPLE algoritması yardımıyla sayısal analiz yapılmıştır.

Optimum Ağ Yapısının Belirlenmesi (Determining the Optimum Mesh Structure)

Yapılan sayısal analizlerden elde edilecek olan sonuçların, problemin ağ yapısından bağımsızlığını belirleyebilmek amacıyla farklı eleman sayılarına sahip 5 farklı ağ yapısı için analizler gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda, Model 3 geometrisinde 0.75V değeri için farklı ağ yapılarından elde edilen veriler Şekil 5’de örnek olarak verilmektedir.



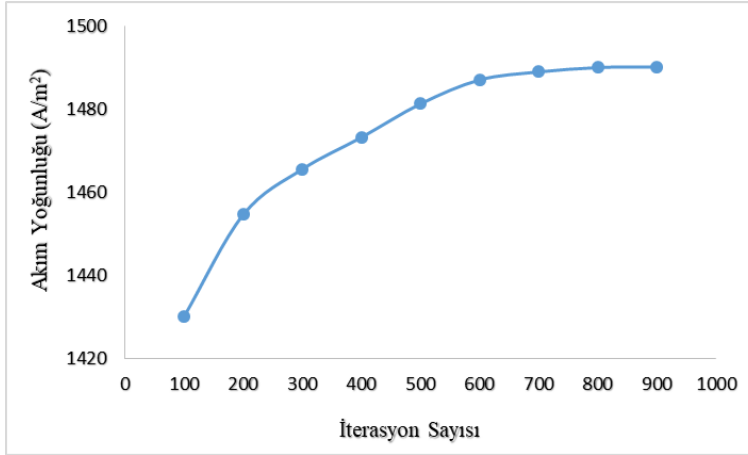
Şekil 5. Model 3 ve $V_{hücre}=0.75V$ için, akım yoğunluğunun ağ yapısındaki eleman sayısı ile değişimi

Figure 5. For Model 3 and $V_{cell}=0.75V$, the change of current density with the number of elements in the mesh structure

Şekil incelendiğinde, ağ yapısında bulunan eleman sayısının artışı ile akım yoğunluğunun hızla arttığı, ancak 1209791 eleman sayısından sonra artan eleman sayısı ile akım yoğunluğunun fazla değişmediği gözlemlenmiştir. Bundan dolayı, Model 3 geometrisi için ağ yapısının optimum eleman sayısı 1209791 olarak belirlenmiş ve bu geometri için yapılan tüm analizlerde kullanılmıştır. Benzer prosedür uygulanarak, Model 1, Model 2 ve Model 4 geometrileri için optimum eleman sayıları sırasıyla 1669104, 1415112 ve 1038893 olarak belirlenmiştir.

Optimum İterasyon Sayısının Belirlenmesi (Determining the Optimum Number of Iterations)

Bu çalışma kapsamında yapılacak olan analizlere başlamadan önce, örnek bir analiz yapılarak optimum iterasyon sayısı belirlenmeye çalışılmıştır. Bu amaçla, Model 3 geometrisinde 0.75V değeri için örnek bir analiz yapılmış ve farklı iterasyon sayıları için elde edilen sonuçlar Şekil 6’da birlikte verilmiştir. Şekilden de görüldüğü üzere, 600 iterasyon sayısından sonra akım yoğunluğunda anlamlı bir değişim olmadığı tespit edilmiştir. Bundan yararlanarak, bu çalışma kapsamında yapılan analizler eğer daha önce yakınsamadı ise 600 iterasyon sayısında kesilmiştir. Ek olarak giren ve çıkan kütlelerin birbirine eşit olup olmadığı kontrolü yapılarak, analiz sonuçları alınmıştır. Yapılan analizlerde, yakınsama kriteri enerji denklemi için 10^{-6} diğer denklemler için ise 10^{-3} olarak belirlenmiştir.

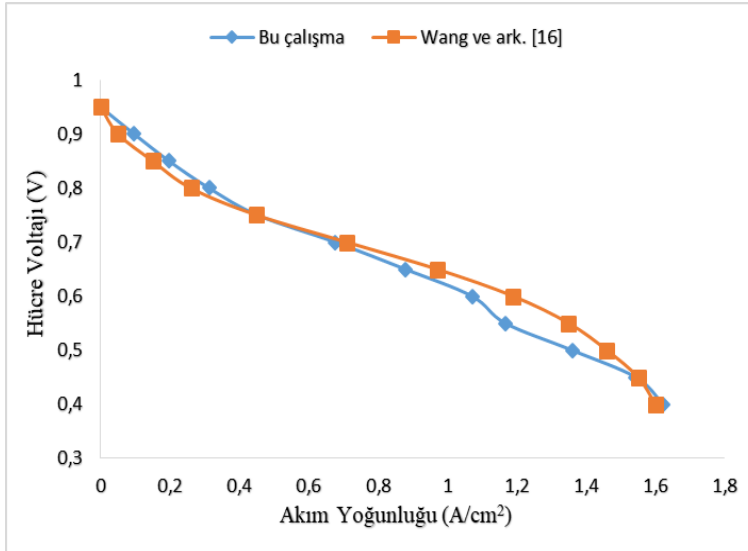


Şekil 6. Model 3 ve $V_{\text{hücre}}=0.75V$ için, akım yoğunluğunun iterasyon sayısı ile değişimi.

Figure 6. For Model 3 and $V_{\text{cell}}=0,75V$, the change of current density with the number of iterations.

Sayısal Yöntem ve Sonuçların Doğruluğunun Test Edilmesi (Validation of Numerical Method and Results)

Bu çalışmada kullanılan sayısal yöntemin ve yapılan analizlerden elde edilen sonuçların güvenilirliğinin test edilebilmesi amacı ile literatürde bulunan Wang ve diğ. (2003) tarafından yapılmış olan deneysel bir çalışma kullanılmıştır. Bu amaçla ilgili çalışmanın geometrisi ve sınır şartları aynen kullanılarak sayısal bir analiz yapılmış ve elde edilen sonuçlar birbirleri ile karşılaştırılmıştır. Bu çalışmadan elde edilen sayısal sonuçlar ile Wang ve diğ. (2003) tarafından yapılan deneysel çalışmanın sonuçları Şekil 7'de birlikte verilmektedir. Şekilden de görüldüğü üzere, her iki çalışmadan da elde edilen sonuçlar birbirleri ile uyumludur. Bundan dolayı bu çalışma kapsamında kullanılan sayısal yöntemin ve elde edilen sonuçların doğruluğunun kabul edilebilir bir seviyede olduğu söylenebilir.



Şekil 7. Bu çalışmadan elde edilen sonuçların Literatür (Wang ve diğ., 2003) ile karşılaştırılması.

Figure 7. Comparison of the results of this study with literature (Wang ve diğ., 2003).

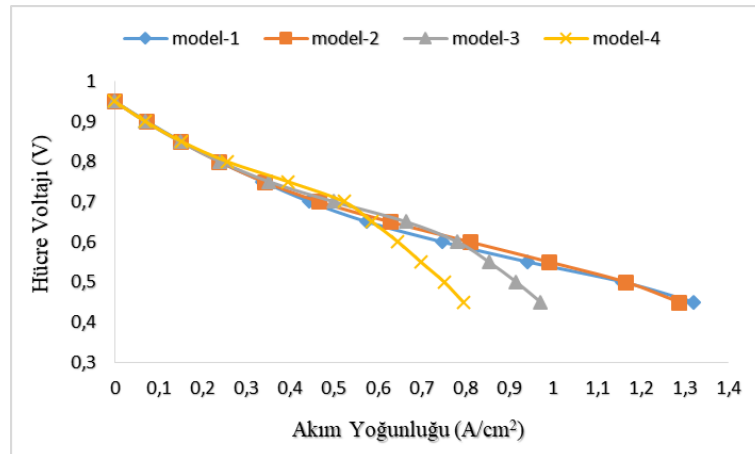
SONUÇLARIN İRDELENMESİ (DISCUSSIONS)

Bu çalışma kapsamında yapılan analizler yardımıyla, serpantin gaz kanallarının dönüşleri arasındaki mesafenin ya da başka bir ifade ile dönüş sayısının, silindirik yakıt pilinin performansı üzerinde ki etkileri

incelenmiştir. Bunlara ek olarak, model 3 geometrisi için, 3 farklı anot ve katot debisi kullanılarak sayısal analizler yapılmış ve giriş debisinin yakıt pili performansına olan etkileri belirlenmeye çalışılmıştır. Yapılan tüm bu analizlerden elde edilen grafiklerin bir kısmı, aşağıda iki farklı alt bölümde verilerek irdelenmiştir

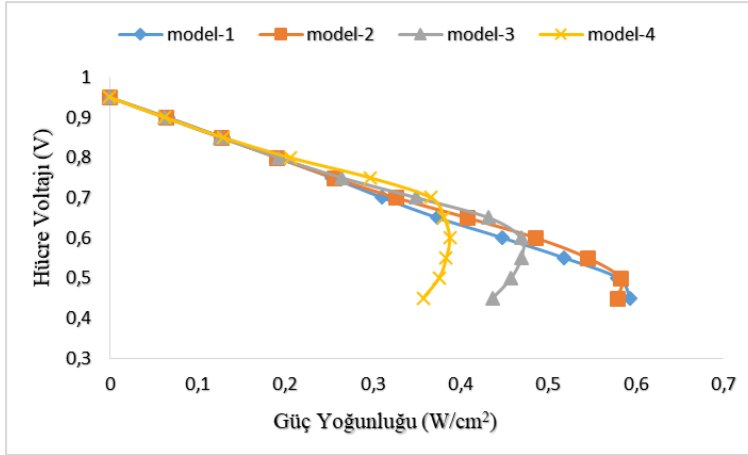
Serpantin Kanalın Dönüşleri Arasındaki Mesafenin Etkisi (The Effect of Distance Between Turns of Serpentine Channel)

Silindirik geometriye sahip bir PEM yakıt pilinde serpantin kanalın dönüşleri arasındaki mesafenin performans üzerindeki etkisi, oluşturulan 4 farklı model geometri yardımıyla irdelenmiştir. Yapılan analizlerden elde edilen veriler ışığında, farklı model geometrileri için hücre voltajının akım yoğunluğu ile değişimini gösteren polarizasyon eğrileri Şekil 8'de verilmektedir. Şekilden de görüldüğü üzere, her bir model geometrisi için çizilen eğriler benzer bir profil göstermektedir. Genel olarak incelenen tüm modellerde, artan hücre voltajı ile akım yoğunluğu azalmaktadır. Ancak tüm model geometrileri için çizilen eğriler birlikte değerlendirildiğinde, serpantin kanalın dönüşleri arasındaki mesafenin artmasıyla akım yoğunluğunda düşüş gerçekleştiği gözlenmiştir. Bu kapsamda, 0.45V hücre voltajı için en yüksek akım yoğunluğu Model 1'de 1.3197 A/cm² olarak, aynı voltaj değerinde en düşük akım yoğunluğu ise Model 4'de 0.7946 A/cm² olarak elde edilmiştir. Dolayısıyla 0.45V hücre voltajı için incelenen parametre aralığında, serpantin kanalın dönüşleri arasındaki mesafenin artmasıyla akım yoğunluğunun yaklaşık olarak % 39.7 azaldığı söylenebilir.



Şekil 8. Farklı model geometrileri için polarizasyon eğrileri

Figure 8. Polarization curves for different model geometries

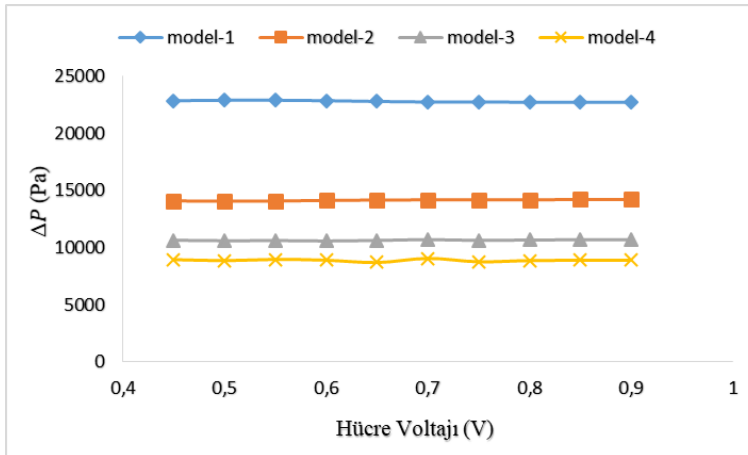


Şekil 9. Farklı model geometrileri için güç yoğunluğu eğrileri

Figure 9. Power density curves for different model geometries

Farklı model geometrileri için, hücre voltajının güç yoğunluğu ile değişimini gösteren eğriler ise Şekil 9'da verilmektedir. Şekil incelendiğinde, farklı modeller için çizilen güç yoğunluğu eğrilerinin genel olarak birbirine benzer bir yapıda olduğu görülmektedir. Yüksek Hücre voltaj değerlerinde, tüm modeller için çizilen güç yoğunluğu eğrileri birbirine yakın değer almaktadır. Ancak 0.45V hücre voltajı için, Model 1'de 0.5939 W/cm² güç yoğunluğu elde edilirken, aynı voltaj değerinde Model 4'te ise 0.3576 W/cm² güç yoğunluğu elde edilebilmiştir. Dolayısıyla yüksek hücre voltajlarında serpantin kanalın dönüşleri arasındaki mesafenin artmasıyla güç yoğunluğunun değerinin az değiştiği, düşük voltajlarda ise azaldığı söylenebilir.

Farklı model geometrileri için, gaz kanallarının girişi ile çıkış arasında ki basınç düşüşünün hücre voltajı ile değişimi Şekil 10'da verilmiştir. Şekil incelendiğinde hücre voltajı değişiminin basınç düşümü üzerindeki etkisinin önemsiz olduğu görülebilir. Modeller arasında karşılaştırılma yapıldığında ise, serpantin kanalının dönüşleri arasındaki mesafe azaldıkça basınç düşüşünün arttığı görülmektedir. Bu durum, dönüşler arasındaki mesafenin azalması ile serpantin kanalında bulunan dönüş sayısının artması kaynaklıdır. Kanalda bulunan dönüş sayısının artması yerel basınç kaybını arttırmıştır. Şekil 10'da, en yüksek basınç düşüşünün dönüşler arasındaki mesafenin en az olduğu Model 1'de gerçekleştiği görülmektedir.

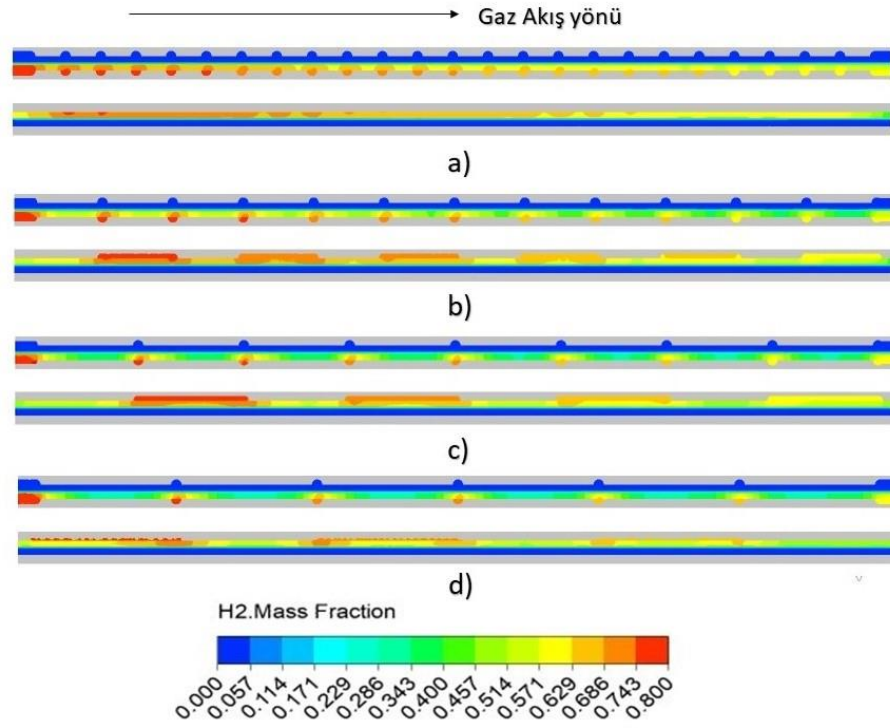


Şekil 10. Farklı model geometrileri için, basınç farkının hücre voltajı ile değişimi.

Figure 10. Change of pressure difference with cell voltage for different model geometries.

Hücre voltajı 0.45V olduğu durumda farklı model geometrileri için, hidrojen kütle kesri oranlarının akış yönü boyunca değişimi Şekil 11'de birlikte verilmiştir. Şekildeki dağılımlar incelendiğinde, tüm

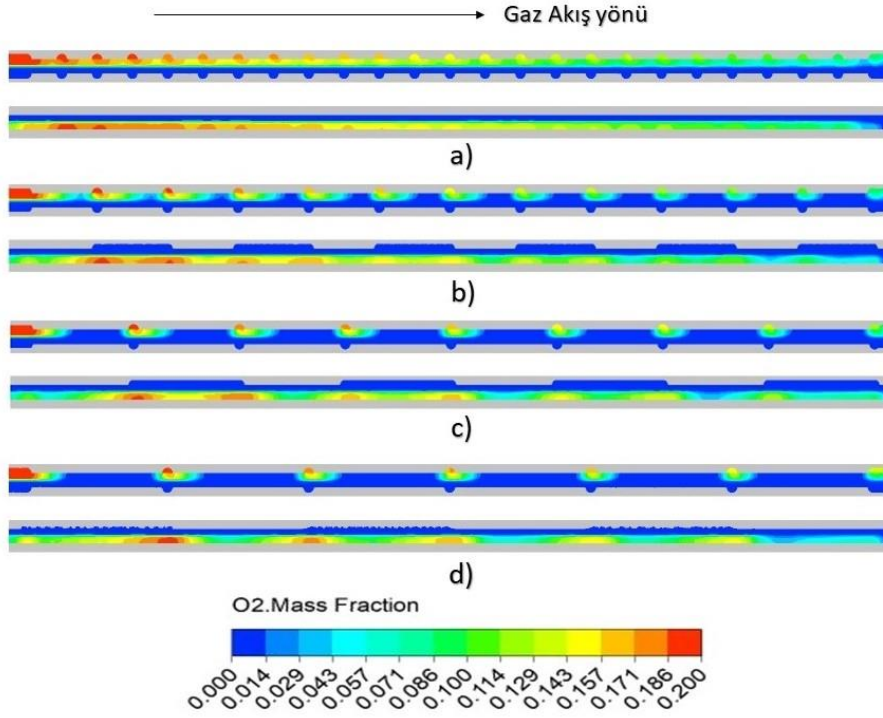
modellerde gaz kanalı boyunca akış yönünde hidrojen kütle kesrinin azalış gösterdiği gözlemlenmiştir. Bu durum, yakıt pilinde akış boyunca reaksiyon gerçekleşmesine bağlı olarak hidrojenin kullanıldığını göstermektedir. Tüm modellerin gaz kanalı girişindeki hidrojen kütle kesri oranı 0.8 olacak şekilde sabittir. Ancak modellerin gaz kanalı çıkışındaki hidrojen kütle kesri oranları ise Model 1, Model 2, Model 3 ve Model 4 için sırasıyla 0.594, 0.5972, 0.5982 ve 0.6199 olarak belirlenmiştir. Dolayısıyla, serpantin gaz kanalının dönüşleri arasındaki mesafe arttıkça hidrojen kullanımının azaldığı söylenebilir.



Şekil 11. Hücre voltajı 0.45V için hidrojen kütle kesrinin yakıt pili boyunca değişimi a) Model 1, b) Model 2, c) Model 3, d) Model 4.

Figure 11. For 0.45V cell voltage, hydrogen mass fraction change along the fuel cell a) Model 1, b) Model 2, c) Model 3, d) Model 4.

Hücre voltajı 0.45V olduğu durumda farklı model geometrileri için, oksijen kütle kesri oranlarının akış yönü boyunca değişimi ise Şekil 12'de birlikte verilmiştir. Şekil incelendiğinde, tüm model geometrilerinde benzer olarak oksijen kütle kesrinin gaz kanalı akış yönü boyunca azaldığı görülmektedir. Bu durum yakıt pilinde gerçekleşen reaksiyona bağlı olarak oksijenin kullanıldığının bir göstergesidir. Tüm model geometrileri için, gaz kanalı girişindeki oksijen kütle kesri oranı 0.2 olarak sabit bir değerdedir. Ancak gaz kanalı çıkışındaki oksijen kütle kesri oranı ise modellere göre farklılık göstermektedir. Bu değer Model 1, Model 2, Model 3 ve Model 4 için sırasıyla 0.0736, 0.0857, 0.1063 ve 0.1356 olarak belirlenmiştir. Dolayısıyla, serpantin gaz kanalının dönüşleri arasında ki mesafe arttıkça oksijen kullanımının azaldığı söylenebilir.



Şekil 12. Hücre voltajı 0.45V için oksijen kütle kesrinin yakıt pili boyunca değişimi a) Model 1, b) Model 2, c) Model 3, d) Model 4.

Figure 12. For 0.45V cell voltage, oxygen mass fraction change along the fuel cell a) Model 1, b) Model 2, c) Model 3, d) Model 4.

Debi Miktarının Etkisi (The Effect of the Flow Rate)

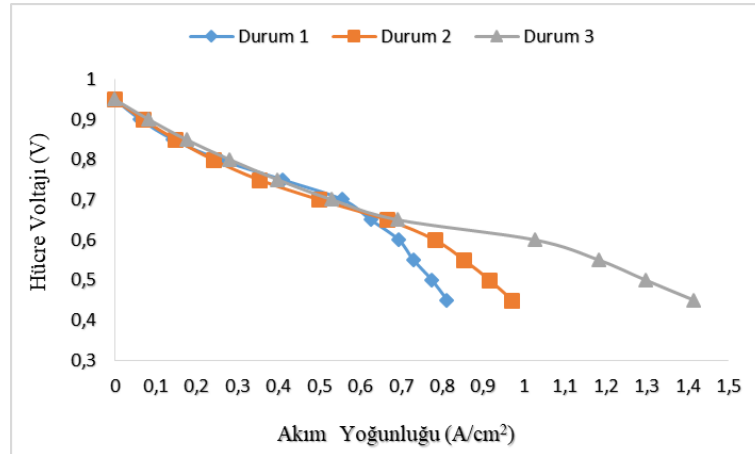
Silindirik geometriye sahip bir PEM yakıt pilinde giriş debilerinin, performans üzerindeki etkisi, Model 3 geometrisi yardımıyla irdelenmiştir. Bu kapsamda anot kanalına giren hidrojenin ve katot kanalına giren havanın debileri Çizelge 4'deki gibi ayarlanarak 3 farklı çalışma durumu belirlenmiştir.

Çizelge 4. Anot ve katot giriş debileri

Table 4. Anode and cathode inlet flow rates

Anot	Katot	Durum
3×10^{-7} kg/s	$2,5 \times 10^{-6}$ kg/s	Durum 1
6×10^{-7} kg/s	5×10^{-6} kg/s	Durum 2
$1,2 \times 10^{-6}$ kg/s	1×10^{-5} kg/s	Durum 3

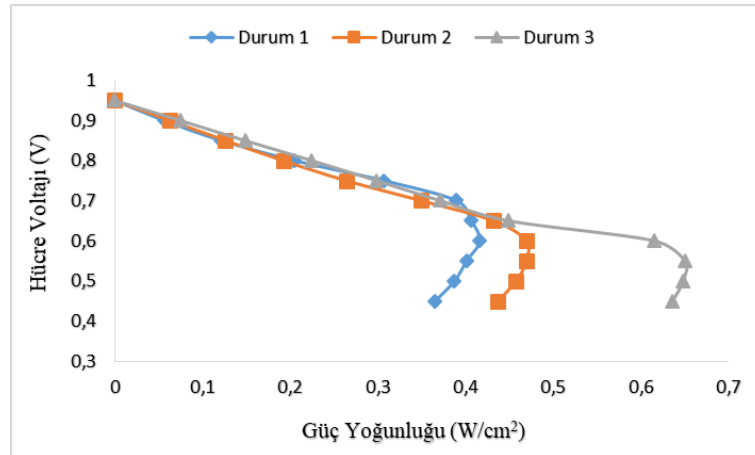
Farklı anot ve katot giriş debileri için hücre voltajının akım yoğunluğu ile değişimini gösteren polarizasyon eğrileri Şekil 13'de görülmektedir. Şekil incelendiğinde, her bir çalışma durumu için çizilen eğrilerin birbirine benzer bir profil oluşturduğu görülmektedir. Tüm durumlar için, hücre voltajının artması ile akım yoğunluğu azalmaktadır. Ancak anot ve katot kanallarına giren gaz debilerinin artışı ile akım yoğunluğu da artış göstermektedir. Bu kapsamda, 0.45V hücre voltajı için en yüksek akım yoğunluğu değeri Durum 3'de 1.414 A/cm^2 olarak, en düşük akım yoğunluğu değeri ise Durum 1'de 0.8121 A/cm^2 olarak gözlemlenmiştir. Dolayısıyla 0.45V hücre voltajı için incelenen parametre aralığında, katot ve anot kanallarına giren gaz debisinin artması ile akım yoğunluğunun yaklaşık olarak % 74.1 arttığı söylenebilir.



Şekil 13. Model 3 geometrisinde, farklı anot ve katot giriş debileri için polarizasyon eğrileri

Figure 13. Polarization curves for different anode and cathode inlet flow rates for Model 3 geometry

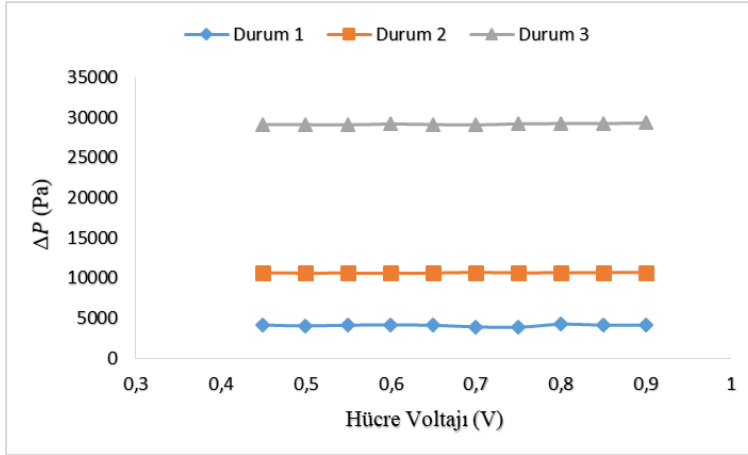
Farklı anot ve katot gaz giriş debileri için, hücre voltajının güç yoğunluğu ile değişimini gösteren eğriler ise Şekil 14'de birlikte görülmektedir. Farklı gaz giriş debileri için çizilen güç yoğunluğu eğrileri birbirine benzer bir yapı oluşturmaktadır. Hücre voltajı 0.7V ve üzeri değerlerinde tüm durumlar için çizilen güç yoğunluğu eğrileri birbirine yakın değer almaktadır. Ancak bu değerlerin altında ki voltajlarda birbirinden farklılık göstermektedir. Genel olarak tüm durumlarda, hücre voltaj değeri 0.6V civarına gelene kadar güç yoğunluğu artmakta, bu değerden sonra hücre voltajı arttıkça güç yoğunluğu azalmaktadır. Şekilden de görüldüğü üzere 0.45V hücre voltajı için, Durum 3'te 0.6363 W/cm² güç yoğunluğu elde edilirken, aynı voltajda Durum 1'de ise 0.3654 W/cm² güç yoğunluğu elde edilebilmiştir. Dolayısıyla 0.7V'dan yüksek hücre voltajlarında, anot ve katot gaz giriş debilerinin artmasıyla güç yoğunluğunun fazla değişmediği, 0.7V'dan düşük hücre voltajlarında ise gaz giriş debisinin artışı ile güç yoğunluğunun arttığı söylenebilir.



Şekil 14. Model 3 geometrisinde, farklı anot ve katot giriş debileri için güç yoğunluğu eğrileri

Figure 14. Power density curves for different anode and cathode inlet flow rates for Model 3 geometry

Farklı anot hidrojen giriş debileri ve katot hava giriş debileri için, gaz kanallarının girişi ile çıkışı arasında ki basınç düşüşünün hücre voltajı ile değişimi Şekil 15'de verilmiştir. Şekil incelendiğinde, diğer tüm parametreler sabit iken hücre voltajı değişiminin basınç düşümü üzerindeki etkisinin az olduğu görülebilir. Farklı çalışma durumları karşılaştırıldığında ise, anot ve katot kanallarına gaz giriş debileri arttıkça, basınç düşüşünün de arttığı görülmektedir.



Şekil 15. Model 3 geometrisinde, farklı anot ve katot giriş debileri için basınç düşüşünün hücre voltajı ile değişimi

Figure 15. Pressure difference change for different anode and cathode inlet flow rates with cell voltage for Model 3 geometry

SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu çalışmada 1S serpantin gaz akış kanallarına sahip silindirik bir PEM yakıt pili sayısal olarak incelenmiştir. Bu kapsamda, serpantin kanalların dönüşleri arasındaki mesafe değiştirilerek 4 farklı model geometri oluşturulmuştur. Bu model geometriler için, farklı hücre voltajları ve farklı gaz giriş debileri için analizler yapılarak, bu parametrelerin incelenen silindirik yakıt pilinin çalışma performansı üzerinde ki etkileri irdelenmiştir. Analizlerden elde edilen veriler ışığında, düşük hücre voltajlarında daha yüksek akım yoğunluğu elde edildiği görülmüştür. Diğer tüm parametreler sabit tutulurken, serpantin kanalın dönüşleri arasındaki mesafenin artmasıyla akım yoğunluğunun ve basınç düşüşünün azaldığı gözlemlenmiştir. Ayrıca, yüksek hücre voltajlarında serpantin kanalın dönüşleri arasındaki mesafenin artmasıyla güç yoğunluğunun fazla değişmediği, düşük hücre voltajlarında ise azaldığı belirlenmiştir. Diğer tüm parametreler sabit tutulurken, anot ve katot kanallarına giren gaz debilerinin artışı ile akım yoğunluğunun ve basınç düşüşünün arttığı belirlenmiştir. Ayrıca yaklaşık 0.7V'dan yüksek hücre voltajlarında, anot ve katot gaz giriş debilerinin artmasıyla güç yoğunluğunun az miktarda değiştiği, 0.7V'dan düşük hücre voltajlarında ise gaz giriş debisinin artışı ile arttığı gözlemlenmiştir.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- Abdel-Rehim, A.A., 2019, "The Influence of Electromagnetic Field on the Performance and Operation of a PEM Fuel Cell Stack Subjected to a Relatively Low Electromagnetic Field Intensity", *Energy Conversion and Management*, Cilt 198, 111906.
- Arıç, T., Bilgili, M., Özsunar, A.K., 2019, "İki Hücreli PEM Yakıt Pili Yığının Sayısal Analizi", *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji*, Cilt 7, Sayı 4, ss. 999-1011.
- Bilgili, M., 2011, *Akış Kanalları İçerisindeki Yarı Silindirik Blokların Pem Yakıt Pili Performansına Etkisinin Üç Boyutlu Analizi*, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi, Ankara.
- Bilgili, M., Sivrioğlu, M., 2016, "3D Numerical Analysis of PEM Fuel Cell at Different MEA Thicknesses and Operating Pressure Conditions", *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, Cilt 31, Sayı 1, ss. 51-63.
- Carcadea, E., Ismail, M.S., Ingham, D.B., Patularu, L., Schitea, D., Marinoiu, A., Lon-Ebrasu, D., Mocanu, D., Varlam, M., 2021, "Effects of Geometrical Dimensions of Flow Channels of a Large-Active-Area PEM Fuel Cell: A CFD Study", *International Journal of Hydrogen Energy*, Cilt 46, Sayı 25, ss. 13572-13582.

- Cellek, M.S., Bilgili, M., 2021, "Stokiyometri Oranının İki Hücreli Pem Yakıt Hücresi Yığını Performansına Etkisinin İncelenmesi", *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji*, Cilt 9, Sayı 1, ss. 134-147.
- Dalğış, B.F., 2019, *Pem Yakıt Hücresinde Hidrojen Gazındaki Nem Oranına Bağlı Olarak Elektrik Üretimindeki Değişimin İncelenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Batman Üni., Batman.
- Daşdemirli, Y., 2019, *Pem Yakıt Pillerinde Çalışma Parametrelerinin Performansa Etkisinin Sayısal Olarak İncelenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Karabük Üniversitesi, Karabük.
- Emiroğlu, Ü., 2019, *Hava Soğutmalı PEM Yakıt Pili'nin Plaka Geometrisinin Soğutma Performansına Etkisinin Deneysel ve Sayısal Araştırılması*, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Ankara.
- Ersan, K., Ar, İ., Tukek S., 2010, "Effect of Humidification of Gases on First Home Constructed PEM Fuel Cell Stack Potential", *G.U. Journal of Science*, Cilt 23, Sayı 1, ss. 61-69.
- Karacan, K., 2019, *Pem Yakıt Pilleri İçin Düşük Ağırlıklı Akış Plakası Geliştirilmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi, Niğde.
- Karvelas, E.G., Koubogiannis, D.G., Hatziaepostolou, A., Sarris, I.E., 2016, "The Effect of Anode Bed Geometry on the Hydraulic Behaviour of PEM Fuel Cells", *Renewable Energy*, Cilt 93, ss. 269-279.
- Kumar, R. R., Suresh, S., Suthakar, T., Singh, V. K., 2020, "Experimental Investigation on PEM Fuel Cell using Serpentine with Tapered Flow Channels", *International Journal of Hydrogen Energy*, Cilt 45, Sayı 31, ss. 15642-15649.
- Nguyen, P. T., Berning, T., Djilali, N., 2004, "Computational Model of a PEM Fuel Cell with Serpentine Gas Flow Channels", *Journal of Power Sources*, Cilt 130, ss. 149-157.
- Özdemir, B., 2012, *Serpantin Kanallı Pem Yakıt Hücresinin Sayısal Analizi*, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Ankara.
- Özdoğan, M., 2018, *Polimer Elektrolit Membran (Pem) Yakıt Pillerinin Performans Karakteristiklerinin Sayısal İncelenmesi*, Doktora Tezi, Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Samsun.
- Park, J., ve Li, X., 2007, "An Experimental and Numerical Investigation on the Cross Flow through Gas Diffusion Layer in a PEM Fuel Cell with a Serpentine Flow Channel", *Journal of Power Sources*, Cilt 163, Sayı 2, ss. 853-863.
- Perng, S., Wu, H., Jue, T., Cheng, K., 2009, "Numerical Predictions of a PEM Fuel Cell Performance Enhancement by a Rectangular Cylinder Installed Transversely in the Flow Channel", *Applied Energy*, Cilt 86, ss. 1541-1554.
- Suseendiran, S.R., Pearn-Rowe, S., Rengaswamy, R., 2020, "Development of Cylindrical Pem Fuel Cells With Semi-Cylindrical Cathode Current Collectors", *International Journal of Hydrogen Energy*, Cilt 45, Sayı 17, ss. 10549-10558.
- Wang, L., Husar, A., Zhou, T., Liu, H., 2003, "A Parametric Study of PEM Fuel Cell Performances", *International Journal of Hydrogen Energy*, Cilt 28, ss. 1263-1272.
- Yılmaz, C., 2018, *Bipolar Plaka Gaz Akış Kanalı Desen Tasarımının PEM Yakıt Pili Performansına Etkisi*, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Ankara.