

# PEM YAKIT PİLİNİN DEĞİŞİK MEMBRAN ELEKTROT ÇİFTİ KALINLIKLARINDA VE FARKLI ÇALIŞMA BASINCI KOŞULLARINDA ÜÇ BOYUTLU SAYISAL ANALİZİ

**Muhittin BİLGİLİ, Mecit SİVRİOĞLU**

Gazi Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Maltepe, 06570 Ankara  
[bilgili@gazi.edu.tr](mailto:bilgili@gazi.edu.tr) , [mecits@gazi.edu.tr](mailto:mecits@gazi.edu.tr)

(Geliş/Received: 15.05.2014; Kabul/Accepted: 24.11.2015)

## ÖZET

İki farklı boyuttaki MEÇ'in (Membran Elektrot Çiftinin) kullanıldığı, tek bir hücreden oluşan proton aktaran membran yakıt pilinin (PEMFC) ANSYS-FLUENT yardımı ile üç boyutlu sayısal analizi yapılmıştır. İki farklı kalınlıktaki MEÇ ile hazırlanan PEM yakıt pilinin sayısal analizi farklı çalışma koşullarında yapılmıştır. Birinci MEÇ'de difüzyon tabakası, katalizör tabakası ve membran kalınlıkları sırasıyla, 0,400 mm, 0,005 mm ve 0,035 mm olarak belirlenmiştir. İkinci MEÇ için bu kalınlıklar 0,300 mm, 0,050 mm ve 0,125 mm olarak kabul edilip sayısal çözümler alınmıştır. Bu iki MEÇ kullanılarak polarizasyon eğrileri elde edilip karşılaştırılmıştır. İnce bir katalizör tabakası kalınlığına sahip MEÇ-1 için elde edilen çözümler neticesinde konsantrasyon kayıplarının olduğu kısım polarizasyon eğrisinde görülebilmektedir. MEÇ-1 ile hazırlanan yakıt pili modelinin çözümünden elde edilen akım yoğunluğu değerleri MEÇ-2 ile hazırlanan duruma göre daha iyi çıkmıştır. PEM yakıt pili modeli için çalışma basıncının akım yoğunluğuna etkileri bu iki farklı kalınlıktaki MEÇ (MEÇ-1 ve MEÇ-2) kullanılarak analiz edilmiştir. Çalışma basıncı 150 kPa, 200 kPa, 300 kPa ve 400 kPa olarak belirlenip her bir basınç değerindeki polarizasyon eğrileri her iki MEÇ için grafikler halinde sunulmuştur. Bu problemin çözümü için, kütle, momentum, enerji, türler ve faz potansiyelinin korunumu dikkate alınmıştır. ANSYS FLUENT PEMFC modülünde yakıt pili içindeki elektrokimyasal eşitlikler, hidrojenin oksidasyonu ve oksijenin indirgenme hızına bağlı olarak çözülmüştür. Hidrojen ve oksijenin kütle kesri dağılımları ile ilgili sonuçlar, ana gaz akış yönünde iki boyutlu olarak sunulmuştur. Ayrıca hidrojenin kütle kesri değişimleri ana akışa dik kesitlerde (giriş, orta ve çıkış) alınan dağılımlarla iki boyutlu olarak incelenmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** PEM yakıt pili, membran elektrot çifti (MEÇ), sayısal analiz

## 3D NUMERICAL ANALYSIS OF PEM FUEL CELL AT DIFFERENT MEA THICKNESSES AND OPERATING PRESSURE CONDITIONS

### ABSTRACT

This study covers the three dimensional analysis of a single-cell proton exchange membrane fuel cell (PEMFC) by using ANSYS-FLUENT program for two different dimensioned of Membrane Electrode Assembly (MEA). Two prepared MEA with different thickness dimensions were implemented to PEM fuel cell and analyzed numerically by using ANSYS-FLUENT. In the first MEA, the thicknesses of gas diffusion layer, catalyst layer and membrane were selected as 0.400 mm, 0.005 mm and 0.035 mm, respectively. For the second MEA these thicknesses were selected for gas diffusion layer as 0.300 mm, for catalyst layer as 0.050 mm. and for membrane as 0.125 mm and numerically analyzed by using dimensional properties of second MEA. For these two different MEAs which have different thicknesses, were used in PEM fuel cell model, polarization curves obtained and compared. As a result of solutions were obtained for MEA-1 having a catalyst layer with a thin thickness, the region corresponding to concentration losses occurs in the polarization curve can be seen. The current density values obtained from the solution of the prepared fuel cell models with MEA-1 were significantly better than the case derived with MEA-2. for PEM fuel cell model, the effect of operating pressure on the current density was analyzed by using these two different thicknesses MEAs (MEA-1 and MEA-2). Operating pressures were

determined as 150 kPa, 200 kPa, 300 kPa and 400 kPa. For each operating pressure value determined polarization curves are presented in graphs for both MEA. For the solution of the problem, basic principles such as conservation of mass, momentum, energy, species, and phase potential are considered. In ANSYS FLUENT PEMFC module, electrochemical equations depending on hydrogen oxidation and oxygen reduction rates are solved. The results of hydrogen and oxygen mass fraction distributions are presented along the gas flow main direction. Furthermore, hydrogen mass fraction distributions are analyzed at the cross sections (inlet, mid-way, outlet) perpendicular to the main flow direction.

**Keywords:** PEM fuel cell, membrane electrolyte assembly (MEA), numerical analysis

## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Elektrik, ısı ve mekanik enerji üretiminde kullanılan hidrokarbon bileşiklerinin (petrol, doğalgaz vb.) yanması sırasında ortaya çıkan ve sera etkisine sebep verici gaz olan karbondioksit atıklarının azaltılması dünyanın en büyük sorunları arasındadır. Bu çevresel sorunlardan dolayı temiz enerji üretimi için büyük bir ihtiyaç ortaya çıkmıştır. Bu azaltılma iki şekilde yapılabilir; ya faydalı enerji dönüştürücüleri daha verimli hale getirilir ya da fosil yakıt türlerinin enerji üretiminde kullanımı azaltılır. Bu noktada çözüm olacak seçeneklerden birisi hidrojen olabilir. Bu ihtiyacı karşılayacak alternatif teknolojilerden birisi olan yakıt pilleri ise temiz enerji dönüştürücüsü olarak kullanılmak üzere artan bir şekilde ilgi çekmektedir. Yakıt pili, hidrojen ve hidrojen zengin yakıtların kimyasal enerjisini doğrudan elektrik enerjisine dönüştürmektedir [1]. Yakıt pillerinin modellenmesine bakıldığında literatürde yakıt pili modellerinin birçok tipi yer almaktadır. Bazı hallerde modeller su yönetimi ve akış gibi özel olayları incelemeyi hedefler. Diğer durumlarda modeller mümkün olduğunca geniş kapsamlı olarak pil içindeki tüm ilgili aktarım mekanizmalarını tanımlar. Yakıt pilini doğru bir şekilde modellemek için kesin fiziksel özelliklere ihtiyaç duyulur. Bu özellikler, akım yoğunluğu değişimleri ve birim hacim için katalizör yüzey alanı gibi kinetik değişkenleri, yoğunluk, özgül ısı, ısı iletim katsayısı gibi fiziksel özellikleri, geçirgenlik gibi yapısal bilgiyi, ve iyonik iletkenlik ve su difüzyonu gibi polimer özellikleri içerir [2]. Bıykoğlu ve Alpat çalışmalarında düz gaz akış kanallı tek hücreli yakıt pili modelini üç boyutlu koordinat sisteminde çözmüşlerdir. Çalışma basıncının, anot ve katot gaz akış oranlarının yakıt pili karakteristiğine etkisini parametrik olarak incelemişlerdir. Katot gazlarının aksine, akım yoğunluğunun anot gazlarının kütle debisindeki değişikliklere duyarlı olmadığını gözlemlemişlerdir. Akım kısıtlamalarında hidrojenin ziyade suyun daha baskın olduğunu göstermişlerdir [2, 3].

Baschuk ve Li çalışmalarında korunum prensibini temel alan kapsamlı yakıt hücresi modeli için genel bir formülasyon geliştirmişlerdir. Model üç faz içermektedir. Bu fazlar reaksiyon gazları, sıvı su ve katıdır. Katı ve sıvı fazlar arasındaki reaksiyonlar ve ilişkiler Darcy-Forchheimer terimi ile açıklanmıştır.  $H_2$  ve  $CO_2$  in elektro oksidasyonu  $O_2$  indirgenmesi,

heterojen oksidasyonu katalizör tabakada düşünülmüştür. Membran hücresinin ince gözenekli yapısı göz önüne alınarak gözeneklerdeki taşınım Stefan-Maxwell eşitlikleri ile tanımlanmıştır. Gaz akış kanallarında akış homojen kabulü ele alınarak, su taşınımı Darcy-Schlögl denklemleri kullanılarak, elektrot arkası ve membrandaki kabuller tanımlanmıştır. Bu iki tip denklem (birincisi karışım ikincisi katı faz için) PEM yakıt pilindeki işleyişi geniş bir şekilde açıklamış ve bu denklemlerin çözümü CFD kullanılarak yapılmıştır [4].

Aydın ve Şişman PEM yakıt hücreleri için iki boyutlu, sürekli şartlarda matematiksel bir model geliştirmişlerdir. Konveksiyon-difüzyon, Darcy ve iletken alan eşitlikleri birleştirilmiş ve sonlu elemanlar metodu kullanılarak çözülmüştür. Hidrojen, oksijen ve su buhar konsantrasyonlarının dağılımları, voltaj- akım yoğunluğu ve voltaj-güç yoğunluğu bağıntıları farklı çalışma voltajları için belirlenmiştir [5].

Park ve Li PEM yakıt pili yığın performansını analiz ve optimize etmek için izotermal olmayan bir yığın modeli geliştirmişlerdir. Model, incelenen yığın akış konfigürasyonunda reaktif akımların fiziksel ve ısı davranışları için akış ağ modeli (flow network model) içermektedir. Çalışma ayrıca yığın boyunca sıcaklık dağılımı için ısı model (thermal model) her bir pil performansı için Baschuk ve Li modelini baz alan bir yakıt pili modeli içermektedir [6]. Yığın performansı farklı yığın tasarım ve çalışma koşullarında değerlendirilmiştir [7].

Liu ve arkadaşları çalışmalarında; üç boyutlu düz kanallı PEM yakıt hücresindeki membranda akım yoğunluğu dağılımının tahmini için, bütünleştirilmiş akış ve akım yoğunluğu geliştirmişler ve PEM yakıt hücresinde, üç boyutlu akış modellemesine duyulan ihtiyacı incelemişlerdir. Sonuçlar; akım yoğunluğu ve su transferinin eksenel dağılımında, membran kalınlığının ve hücre voltajının önemli etkisi olduğunu göstermiştir [8].

Um, Wang ve Chen çalışmalarında, PEM yakıt hücresini simüle etmek için çok yönlü bir model geliştirmişlerdir. Bu model, aynı zamanda elektrokimyasal hareket, akım dağılımı, hidrodinamik kuvvet ve çok bileşenli aktarımları içermektedir. Sayısal modelin literatürdeki deneysel sonuçlarla

kabul edilebilir yakınlıkta sonuçlar verdiğini gözlemişlerdir. Detaylı iki boyutlu elektrokimyasal ve akış simülasyonu sonucu elde edilen bulgular şunlardır: Yakıt akışı içerisinde hidrojen çözeltisinin bulunması durumunda, hidrojen reaksiyon yüzeyinde tükenir ve aşamalı olarak anot kütle taşınım polarizasyonuna neden olur. Bundan dolayı, daha düşük bir akış yoğunluğu, yakıt akışından reaksiyon bölgesine doğru hidrojen aktarımı ile sınırlanır [9].

Dutta ve arkadaşları ise bir PEM yakıt hücresinin kanalları arasındaki kütle akımını tahmin edebilmek için serpantin şeklindeki kanalları olan bir model geliştirmişlerdir. Üç boyutlu Navier-Stokes eşitliklerini çözmüşlerdir. Su aktarımı kontrol altında tutulmuştur. Bununla birlikte komple basınç düşümünün, düzenli doğrusal akış kanalı için beklenenden daha düşük olduğu gözlenmiştir [10].

Sivertsen ve Djilali PEM yakıt hücreleri için, karşılaştırmalı sabit sıcaklıkta olmayan üç boyutlu sayısal bir model geliştirmiş ve bu modeli Fluent paket programı kullanarak çözmüşlerdir. Model konvektif ve difüzyon transferleri için hesaplama yapmaktadır ve türlerin konsantrasyonlarının tahminine izin vermektedir. Parametrik analiz sonucunda, toplam akım yoğunluğu ve polarizasyon eğrisinde değişim oluşturmadan sadece asimetri parametresinin değiştirilerek farklı dağılımların elde edilebileceği görülmüştür [11].

Wang ve arkadaşları ise değişik çalışma parametrelerinin PEM yakıt hücresi performansı üzerine etkisini, katot tarafında hava ve anot tarafında saf hidrojen kullanarak, deneysel olarak araştırmışlardır. Literatürdeki modelleme sonuçları, bu çalışmadaki deneysel verilerle karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma; deneysel veriler ve modelleme sonuçlarının uyum içinde olduğunu göstermiştir [12].

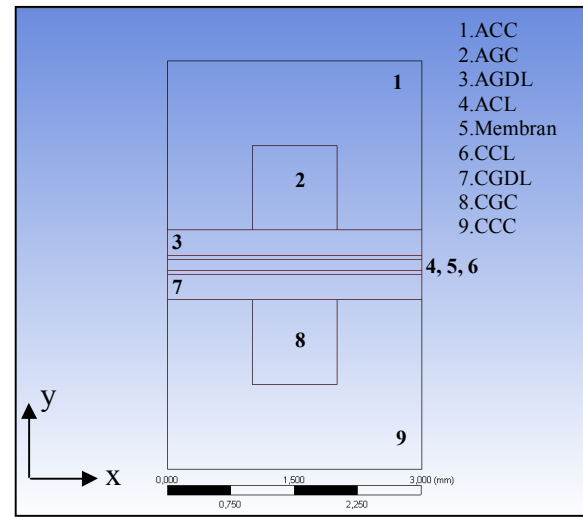
PEMFC simülasyonu için üç boyutlu, iki fazlı CFD modeli Li ve arkadaşları tarafından geliştirilmiş ve FLUENT'e adapte edilmiştir. Sayısal performansa ilave olarak, modelin fiziksel geçerliliği, Meng ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada elde edilen kutuplaşma eğrileri ve bölgesel akım yoğunluğu dağılımlarının deneysel verileri ile karşılaştırma yapılarak test edilmiştir [13]. Bunun yanı sıra, türlerin molar konsantrasyonları ile kütle kesri arasındaki bağıntıyı veren bir analitik bağıntı elde edilmiştir [14].

Bu çalışmanın amacı, PEM yakıt pillerinin kalbi niteliğindeki MEÇ'lerin farklı çalışma basınçlarında yakıt pili performansına etkisini incelemektir. Bu amaçla literatürdeki benzer çalışmalardan alınan iki farklı kalınlık setine sahip MEÇ ile hazırlanan, yakıt pili modellerinin analizleri yapılmıştır. İnce bir katalizör tabakasına sahip MEÇ-1 ile yapılan analizlerde konsantrasyon kayıpları bölgesi

polarizasyon eğrisi üzerinde görülebilmektedir. Bu iki MEÇ için, farklı çalışma basınç değerlerinde analizler yaparak herbir durum için polarizasyon eğrileri grafikler halinde elde edilmiştir.

## 2. YAKIT PİLİ MODELİ (FUEL CELL MODEL)

Gaz kanalları, akışkanların yakıt hücresine girip, sistemde dolaşıp, sonra da sistemi terk ettikleri kanallardır. Yakıt hücresinin geometrisine uygun olarak farklı yapıda (düz, serpantin, sipiral v.b.) olabilirler. Gaz akış kanalları, anot veya katot gaz kanalları olarak ikiye ayrılabilir. Anot gaz kanalından, hidrojen bakımından zengin yakıt girmektedir. Katot gaz kanalından ise, oksijen içeriği fazla olan akışkan girmektedir. Bu çalışmada yakıt pili modeli, sayısal akışkanlar dinamiği programı FLUENT'in PEMFC modülü kullanılarak çözülmüştür. Analizi yapılan yakıt piline ait önden görünüm Şekil 1'de verilmiştir.



Şekil 1. Düz (engelsiz) yakıt hücresinin önden görünümü (Front view of straight fuel cell)

Gaz akış kanalları 1mm x 1mm kare kesitli düz bir kanaldan oluşturulmuştur. Yapılan çalışmada kullanılacak bipolar plaka ve diğer katmanlara ait geometrik özellikler Tablo 1'de verilmiştir. Membran, anot ve katot katalizör tabakaları, anot ve katot gaz difüzyon tabakalarından oluşan beş adet katman Membran Elektrot Çifti (MEÇ) olarak adlandırılmıştır. Yapılan bu çalışmada yakıt pili için seçilen Membran Elektrot Çiftleri literatürdeki çalışmalardan alınarak belirlenmiştir. Burada iki farklı ölçüde MEÇ kalınlığı belirlenmiştir. MEÇ-1'de membran ve katalizör tabakaları MEÇ-2'ye göre daha incedir.

PEMFC'deki tabakaların elektrokimyasal ve fiziksel özellikleri Tablo 2 ve Tablo 3'de gösterildiği gibi tanımlanmıştır. Bu değerler akım toplama plakası, gaz-difüzyon tabakası, katalizör tabakası ve membrandan oluşan tabakalar için katı malzemeler kısmından tanımlanmıştır.

**Tablo 1.** Yakıt pili modelinin geometrik özellikleri (Geometric properties of the fuel cell model)

Boyutlar	MEÇ-1	MEÇ-2
Kanal uzunluğu (mm)	50	50
Kanal kalınlığı (mm)	1	1
Kanal genişliği (mm)	1	1
Kanal kesit alanı (mm <sup>2</sup> )	1	1
Kanal sayısı	1	1
Yakıt hücresi aktif alanı (mm <sup>2</sup> )	150	150
Akım toplama plakası kalınlığı (mm)	2	2
Difüzyon tabaka kalınlığı (mm)	0,400	0,300
Katalizör tabakası kalınlığı (mm)	0,005	0,050
Membran kalınlığı (mm)	0,035	0,125
MEÇ kalınlığı (mm)	0,845	0,825
Toplam yakıt hücresi kalınlığı (mm)	4,845	4,825

Yakıt pili modeli geliştirilirken kullanılan kabuller aşağıda sıralanmıştır.

1. Gaz akışı sürekli halde, üç farklı türün bulunduğu, üç boyutlu yakıt pili modeli olarak incelenecektir.
2. Bütün elektrokimyasal reaksiyonlarda, su tek fazlı, yani, gaz fazında kabul edilmektedir.
3. Katalizör tabakası sadece akım geçiren yüzeyler oldukları ve hesaplamalarda ihmal edilebilecek kadar ince oldukları için katalizör tabakaların ve membranın tek bir tabaka gibi hareket edecekleri kabul edilmiştir.
4. Membran su ile tamamen doyurulmuştur ve homojen bir yapıya sahip olduğu,
5. Gazlar, gaz difüzyon tabakası ve katalizör tabakaları boyunca yalnızca difüzyon yoluyla aktarıldığı,
6. Reaksiyona giren türlerin ideal gaz özelliği gösterdiği,
7. Gaz difüzyon tabakaları ve akım toplayıcı tabakalardaki ohmik kayıpların ihmal edildiği kabul edilmiştir.

**Tablo 2.** Modelde kullanılan referans elektrokimyasal parametreler (Reference electrochemical parameters used in the model)

Elektrokimyasal parametreler	Değerler
Anot Referans Akım Yoğunluğu [A.m <sup>-3</sup> ]	1,5x10 <sup>9</sup>
Anot Referans Mol Konsantrasyonu [kmol.m <sup>-3</sup> ]	1
Anot Konsantrasyon Üssü	0,5
Anot Transfer Katsayısı	2
Katot Referans Akım Yoğunluğu [A.m <sup>-3</sup> ]	4x10 <sup>6</sup>
Katot Referans Mol Konsantrasyonu [kmol.m <sup>-3</sup> ]	1
Katot Konsantrasyon Üssü	1
Katot Transfer Katsayısı	2
Açık Devre Voltajı [V]	0,95
Hidrojen Referans Diffüzivitesi [m <sup>2</sup> .s <sup>-1</sup> ]	9,15x10 <sup>-5</sup>
Oksijen Referans Diffüzivitesi [m <sup>2</sup> .s <sup>-1</sup> ]	2,20x10 <sup>-5</sup>
Su Referans Diffüzivitesi [m <sup>2</sup> .s <sup>-1</sup> ]	2,56x10 <sup>-5</sup>
Diğer Türlerin Referans Diffüzivitesi [m <sup>2</sup> .s <sup>-1</sup> ]	3x10 <sup>-5</sup>

**Tablo 3.** PEMFC tabakalarının fiziksel özellikleri (Physical properties of PEMFC layers)

Fiziksel Özellik	CC	GDL	CL	M
Yoğunluk (kg m <sup>-3</sup> )	2100	450	1240	2000
Özgül ısı (J kg <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> )	1100	730	500	0,225
Isıl iletkenlik (W m <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> )	20	1,674	70	0,24
Elektrik iletkenliği (Ohm.m) <sup>-1</sup>	10 <sup>4</sup>	1250	1250	1x10 <sup>-16</sup>
Gözeneklilik	-	0,5	0,5	-
Viskoz direnç (m <sup>-2</sup> )	-	1x10 <sup>12</sup>	1x10 <sup>12</sup>	-
Yüzey/hacim oranı (1/m)			200 000	
Geçirgenlik (m <sup>2</sup> )	-	1,76x10 <sup>-11</sup>	1x10 <sup>-14</sup>	1,13x10 <sup>-9</sup>
Eşdeğer ağırlık (kg kmol <sup>-1</sup> )	-	-	-	1100
Proton iletim katsayısı	-	-	-	1
Proton iletim üssü				1

CC-Current Collector, GDL-Gas Difusion Layer, CL-Catalyst Layer, M-Membrane.

Modelin çözümünde kullanılan denklemler [15], [16] aşağıda verilmiştir. Kütle korunumu denklemi Eş.(1)'de gösterilmiştir.

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

Bu denklem, kütle korunum eşitliğinin genel halidir ve hem sıkıştırılmaz hem de sıkıştırılabilir akışlar için geçerlidir. Burada kaynak terimi  $S_m$ , sürekli faza ilave olan kütleyi göstermektedir. Diğer terimler  $\rho$  yoğunluğu,  $\varepsilon$  gözenekliliği ve  $v$  akışkanın hızını göstermektedir.

Momentumun korunumu denklemi Eş.(2)'de verilmiştir.

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

Burada  $p$  statik basıncı,  $\mu$  moleküler viskoziteyi,  $\vec{S}_u$  dış kuvvetleri göstermektedir.

Türlerin korunumu,

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

şeklinde yazılabilir. Burada  $C_i$   $i$  türünün konsantrasyonunu,  $D_i$   $i$  türünün difüzyon katsayısını ve  $S_i$  türlere ait kaynak terimini ifade etmektedir.

Gaz fazındaki türlerin diffüzyon hızı (dilute approximation method) kullanılarak hesaplanmıştır.

$$D_i = \varepsilon^{1.5} (1-s)^{r_s} D_i^0 \left( \frac{P_o}{P} \right)^{\gamma_p} \left( \frac{T}{T_o} \right)^{\gamma_t} \quad (4)$$

Burada  $D_i^0$ , i türünün referans sıcaklık ve basınçta ( $P_o, T_o$ ) kütle difüzyonunu göstermektedir. Kullanılan referans değerler, üs değerleri ( $\gamma_p, \gamma_t$ ) ve gözenek tıkanıklık üssü  $r_s$ , kullanıcı tanımlı fonksiyonlar kısmından [15] aşağıdaki gibi alınmıştır.

$$(P_o = 101325 \frac{N}{m^2}, T_o = 300K, \gamma_p = 1.0, \gamma_t = 1.5, r_s = 2.5)$$

Enerjinin korunumu h (entalpi) değerlerine bağlı olarak Eş.5'de verilmiştir.

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \varepsilon h) + \nabla \cdot (\rho \varepsilon \vec{v} h) = \nabla \cdot (k \nabla T) + S_h \quad (5)$$

Enerjinin korunumu denklemindeki  $S_h$  terimi ( $W m^{-3}$ ) ise, ohmik ısınma, suyun oluşum ısısı, elektrik işi ve suyun gizli ısısını içeren hacimsel kaynak terimlerini ifade etmektedir ve Eş.(6)'daki gibi tanımlanır.

$$S_h = I^2 R_{ohm} + h_{reaction} - \eta_{an,cat} R_{an,cat} + h_{phase} \quad (6)$$

Burada  $R_{ohm}$  iletimin olduğu ortamdaki ohmik direnci,  $h_{reaction}$  elektrokimyasal reaksiyondan dolayı net entalpi değişimini ifade etmektedir.  $\eta_{an,cat} R_{an,cat}$  anode ve katot katalizör tabakalarındaki aşırı potansiyel ile transfer edilen akımın çarpımını ifade etmektedir.  $h_{phase}$  suyun yoğunlaşma/buharlaştırma yüzünden entalpidaki değişimi göstermektedir.

Yüklerin korunumu Eş.(7)'de verilmiştir.

$$\nabla \cdot (\sigma_e^{eff} \nabla \Phi_e) + S_\Phi = 0 \quad (7)$$

Burada  $\Phi_e$  membranın ya da katı fazın potansiyelini,  $\sigma_e^{eff}$  elektriksel iletkenliği göstermektedir. Eş.7'deki kaynak terimi  $S_\Phi$ , değişim akım yoğunluğu ( $A m^{-3}$ ) olarak tanımlanır. Burada  $\sigma_e^{eff}$ , efektif elektriksel iletkenlik değerini temsil etmektedir ve membran fazı yük eşitliğinde, elektrot gözenekliliğinin etkisini de hesaba katmak için Bruggman korelasyonu kullanılarak aşağıdaki şekilde ifade edilir.

$$\sigma_e^{eff} = \varepsilon_m^{1.5} \sigma_e \quad (8)$$

Burada  $\varepsilon_m$  membran faz potansiyeli için elektrot gözeneklilik değerini temsil etmektedir. Korunum denklemlerindeki her bir kaynak terimi yakıt

hücresindeki her bir tabakada farklı bir şekil alır. Her bir katmanda çözülen denklemler ve bu katmanlardaki kaynak terimlerinin aldığı eşitlikler tablolar halinde Bilgili'nin [1] tezinde detaylı olarak görülebilir.

## 2.1 Sınır Şartları (Boundary Conditions)

Anot ve katot gaz akış kanallarının girişinde kütle giriş (mass flow inlet) sınır şartı ve kanal çıkışlarında ise basınç tanımlı çıkış (pressure outlet) şartı kullanılmıştır. Analizlerde, anot gaz akış kanalında kütle debisi  $6 \times 10^{-7}$  kg/s ve katot gaz akış kanalında kütle debisi  $5 \times 10^{-6}$  kg/s olarak hesaba katılmıştır. Akım toplama plakasının (ATP) dış yüzeyleri ve gaz akış kanalı içerisine bakan yüzeylerinde duvar sınır şartı kullanılmıştır. Anot ve katot terminal yüzeylerinde sabit sıcaklık ( $T=353$  K) sınır şartı kullanılmıştır. PEM yakıt pili anot ve katot tabakalarında çözülen eşitlikler ve sınır şartı terimleri detaylı olarak [1]'de verilmiştir.

## 2.2 Polarizasyon Eğrileri ve Yakıt Pillerindeki Kayıplar (Polarization Curves and Losses in Fuel Cells)

Yakıt pillerinde performans karakterizasyonu genellikle polarizasyon eğrisi üzerinden görülebilir. Polarizasyon eğrileri, hücre voltajı ile akım arasındaki ilişkiyi gösteren ve yakıt pili performansının değerlendirilmesi için standart bir eğridir. Voltaj değerleri, elektrot alanının geometrik boyutları ile ölçeklendirilmiş akım yoğunluğuna karşı çizilir. Böylelikle sonuçlar farklı boyuttaki hücreler ile karşılaştırılabilirler. Polarizasyon eğrisi üzerinde üç ana kayıp bölgesi vardır (Örneğin bakınız Şekil 4). Birinci bölgedeki kayıplar aktivasyon (kinetik) bölgesi kayıpları, ikinci ohmik kayıplar ve üçüncü olarak konsantrasyon polarizasyonu nedeniyle oluşan kayıplardır. Bunların yanısıra akım toplama plakasında ve elektrotta elektron kaybı, proton değişim membranında proton kaybı gibi kayıplarda söz konusu olabilmektedir. Katalizör katmanında aktivasyon kayıpları, çift kutuplu plakalarda ve elektrotta elektron kaybı, proton değişim membranında proton kaybı, direnç kayıpları ve konsantrasyon kayıpları gibi kayıplar sebebiyle gerçek performans, ideal performanstan farklı bir eğri çizer [17].

## 3. SAYISAL YÖNTEM (NUMERICAL METHOD)

Ayrık çözücü, FLUENT'in kullandığı çözüm algoritmasıdır [16]. Bu yaklaşım kullanılarak, korunum denklemleri, birbirinden ayrık, ardışık olarak çözümlenir. Modeli oluşturan denklemler non-lineer (ve birbirine bağlı-eşleşmiş) oldukları için, yakınsak çözüm elde edilmeden önce, çözüm çevriminin birkaç iterasyonu gerçekleştirilmelidir. Çalışmada denklemlerin diskritizasyonu için birinci dereceden ayrıklaştırma yöntemi kullanılmıştır. Modellenen yakıt pili çözümlerinde ayrıklaştırılmış

eşitliklerin çözüm algoritması olarak SIMPLE çözüm algoritması kullanılmıştır. STANDART Basınç ve Laminer akış için çözüm yapılmıştır. Sayısal analizlerde, farklı potansiyel farklarında çözümler elde edilerek akım yoğunluğunun potansiyel farkı ile değişimi (polarizasyon eğrileri) bulunmuştur. Bu polarizasyon eğrileri için yedi farklı potansiyel fark değeri kullanılmıştır. Buradan her bir polarizasyon eğrisinin elde edilmesi gereken süre yaklaşık 147 dakika olarak hesaplanmıştır. Sayısal analizler 2 GHz hızında çift işlemcili her biri 4 çekirdekli 24 GB RAM hafızası olan bilgisayar kullanılarak yapılmıştır.

### 3.1 Sonuçların Grid Sayısından Bağımsızlık Testi (Grid Independence Test of Results)

Tasarım parametrelerine bağlı olarak PEMFC geometrisinin minimum eleman sayısı, ANSYS Mesh kısmında atılan ağ yapısı ile 36300 olarak elde edilmiştir. Sonuçların eleman sayısından bağımsızlığını test etmek amacıyla, bu eleman sayısına ilaveten dört farklı ağ yapısı daha hazırlanmıştır. Farklı sayılarda hazırlanan ağ yapılarına ait ANSYS'de çözümler yapıp ardından toplam beş farklı ağ yapısı için akım yoğunluğu sonuçları elde edilmiştir (Tablo 4). Bu elde edilen akım yoğunluğu değerleri hücre voltajı 0,75V olan MEÇ-2 için elde edilmiştir.

**Tablo 4.** 2 GHz 24 GB RAM kapasiteli bilgisayar ile elde edilen sayısal çözüm sonuçları (Numerical results obtained by using a computer with a capacity 2 GHz and 24GB Ram)

Toplam eleman sayısı	Akım yoğunluğu ( $A/m^2$ )	Çözüm süresi (dk)	Ortalama görünüm oranı (average aspect ratio)
36 300	3286,310	6,5	53,37
72 600	3283,582	11,0	26,68
145 200	3280,855	21,0	13,34
290 400	3280,294	59,5	6,67
435 600	3279,463	89,0	4,58

Tablo-4 incelendiğinde, birbirini takip eden sonuçlardaki % değişim miktarının % 0,02'den az olduğu durum, 145200 elemanın kullanıldığı ağ yapısıdır. Bu eleman sayısına ait sonuçların eleman sayısından etkilenmediği sonucuna varılabilir.

### 3.2 Yakınsama Kriteri (Convergence Criteria)

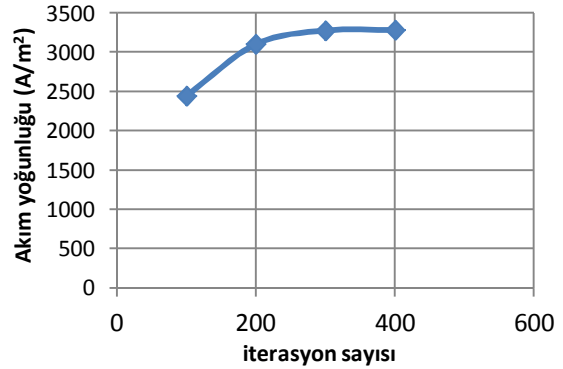
Çözümün, 400.iterasyondan sonra kalıntıları  $10^{-6}$  değerinin altında olduğundan bu iterasyon sayısının çözüm için yeterli olduğu görülmüştür.

MEÇ-2'nin kullanıldığı (Durum-6) 0,75 V hücre voltajında, çözüm alanının 145 200 adet elemana bölüldüğü çözüm için 400. iterasyon sonucunda kalıntılardan en yüksek olanının değeri  $10^{-4}$ 'ün altına düşmüştür. 400.iterasyondan sonra akım yoğunluğunun aldığı değer, iterasyon sayısı ile

değişmemektedir (Şekil 2). Buradan 400.iterasyon sonucunda yakınsak çözüme ulaşıldığı kabul edilmiştir.

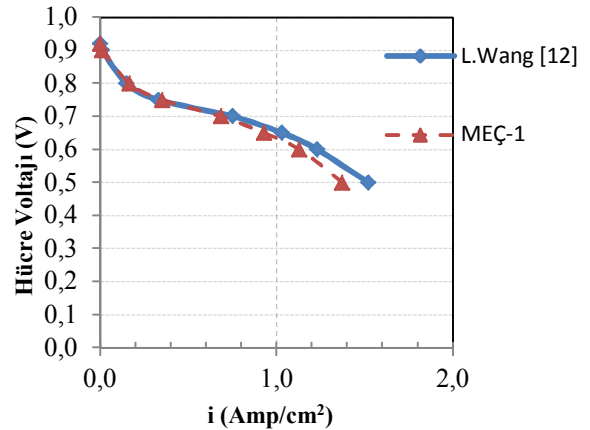
### 3.3 Literatürle Karşılaştırma (Comparison with literature)

Analizlerden elde edilen sonuçların Wang ve arkadaşlarının deneysel çalışmasına ait sonuçlarla [12] ile karşılaştırılması yapılmıştır. Bu karşılaştırmayı yapmak için Wang ve arkadaşlarının çalıştığı modelin geometrik ve elektrokimyasal özellikleri kullanılmıştır.



**Şekil 2.** Akım yoğunluğunun iterasyon sayısı ile değişimi (Durum-6, 145200 eleman) (Change of current density with iteration number, (case-6 145200 elements))

Açık devre voltajı değeri 0,90 V olarak belirlenip farklı hücre gerilim farklarında çözümler alınmış ve akım yoğunluğu değerleri hesaplanmıştır. ANSYS12.1'de oluşturulan model ile yapılan analizlerin ardından elde edilen sayısal sonuçlar, Wang ve arkadaşlarının sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Analiz sonuçları ve Wang'ın sonuçları arasında küçük bazı farklar olsa da sonuçların birbirine yakın olduğu görülmektedir (Şekil 3).



**Şekil 3.** Polarizasyon eğrilerinin Wang ve ark. [12]'nin modeli ile karşılaştırılması (Comparison of polarization curves with model of Wang et al.[12])

#### 4. SONUÇLAR VE TARTIŞMA (RESULTS AND DISCUSSION)

Tek hücreli, iki farklı boyuttaki MEÇ kullanılarak oluşturulan, PEM yakıt pili modelinin çözümleri Tablo 5'te gösterilen farklı çalışma durumlarda yapılmıştır. İlk olarak, MEÇ-1'in kullanıldığı ve farklı çalışma basınçlarındaki (150kPa, 200kPa, 300kPa, 400kPa ve 500kPa) yakıt pili modeli, ilk 5 durum için çözülmüştür. Daha sonra Durum-6, Durum-7, Durum-8 ve Durum-9 için MEÇ-2'nin özellikleri kullanılarak, farklı yakıt pili çalışma basınçlarında (150 kPa, 200 kPa, 300 kPa ve 400 kPa) çözümler yapılmıştır. Böylelikle iki farklı MEÇ kalınlığındaki yakıt pili modellerinin polarizasyon eğrileri farklı basınçlarda karşılaştırılmıştır. Durum-10'da ise, hidrojen ve oksijen gazının kütle debileri değiştirilerek akım yoğunluğuna etkileri incelenmiştir. İncelemede iki farklı hidrojen ve oksijen debisi kullanılarak elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır.

##### 4.1 MEÇ Kalınlığının Etkisi (Effect of MEA Thickness)

Yakıt pili için kullanılan Membran Elektrot Çiftleri literatürdeki çalışmalardan araştırılarak belirlenmiştir [18], [19]. Tablo 6'dan görüleceği üzere MEÇ'ler iki farklı kalınlık setinde seçilmiştir. MEÇ-1'de membran ve katalizör tabakaları MEÇ-2'ye göre daha ince bir yapıdadır.

İki farklı MEÇ ile hazırlanan 300 kPa çalışma basıncında, belirlenen anot ve katot kütle debisinde ( $\dot{m}_{an} = 6e-07$  kg/s ;  $\dot{m}_{cat} = 5e-06$  kg/s) yakıt pili modelleri için elde edilen polarizasyon eğrileri Şekil 4'de gösterilmiştir. Daha ince bir yapıda olan

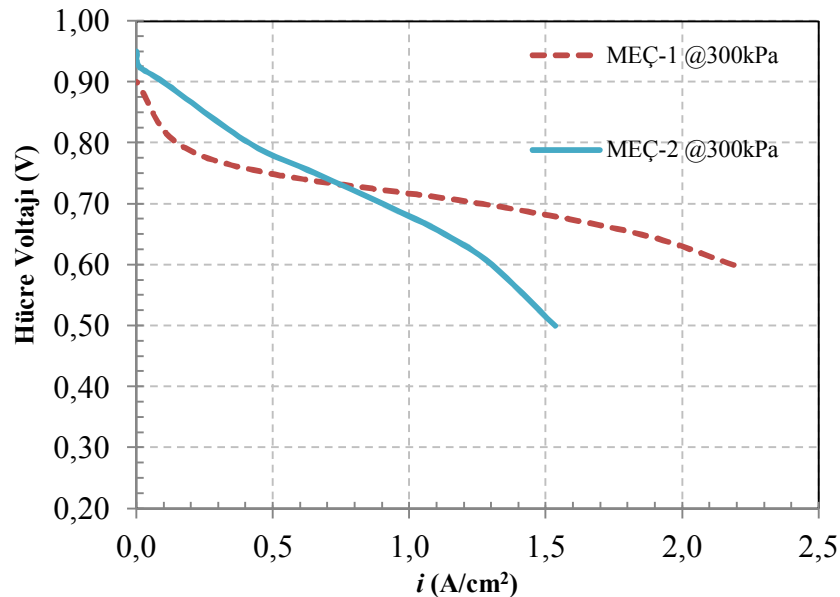
MEÇ-1 ile hazırlanan modelde elde edilen akım yoğunluğu değerleri 0,72 V hücre geriliminden daha düşük değerlerde MEÇ-2'ye göre daha yüksek çıkmıştır. MEÇ-2'deki membran ve katalizör tabakasının daha kalın olması yakıt pili içerisindeki ohmik dirençlerin artmasına neden olmuş ve kayıplardan dolayı akım yoğunluğu azalmıştır. Akım yoğunluğu değerlerindeki düşüş özellikle düşük gerilim farklarında görülmektedir.

**Tablo 5.** İncelenen durumlara ait geometrik ve parametrik özellikler (Geometric and parametric properties of investigated cases)

Durum	MEÇ tipi	Çalışma Basıncı (kPa)	Anot kütle debisi (kg/s)	Katot kütle debisi (kg/s)
1	MEÇ-1	150	6e-07	5e-06
2	MEÇ-1	200	6e-07	5e-06
3	MEÇ-1	300	6e-07	5e-06
4	MEÇ-1	400	6e-07	5e-06
5	MEÇ-1	500	6e-07	5e-06
6	MEÇ-2	200	6e-07	5e-06
7	MEÇ-2	150	6e-07	5e-06
8	MEÇ-2	300	6e-07	5e-06
9	MEÇ-2	400	6e-07	5e-06
10	MEÇ-1	200	1,2e-06	1e-05

**Tablo 6.** Seçilen iki farklı MEÇ için boyutlar (Dimensions of two different selected MEA)

Tabakalar	MEÇ-1	MEÇ-2
Difüzyon tabakası kalınlığı (mm)	0,400	0,300
Katalizör tabakası kalınlığı (mm)	0,005	0,050
Membran kalınlığı (mm)	0,035	0,125
MEÇ kalınlığı (mm)	0,845	0,825



**Şekil 4.** İki farklı kalınlıktaki MEÇ için 300 kPa çalışma basıncı ve  $\dot{m}_{an} = 6e-07$  kg/s ;  $\dot{m}_{cat} = 5e-06$  kg/s kütle debilerindeki polarizasyon eğrileri (Durum-3 ve Durum-8) (Polarization curves for MEAs with two different thicknesses at the operating pressure 300 kPa and mass flow rates  $\dot{m}_{an} = 6e-07$  kg/s ;  $\dot{m}_{cat} = 5e-06$  kg/s ( case-3 and case-8))

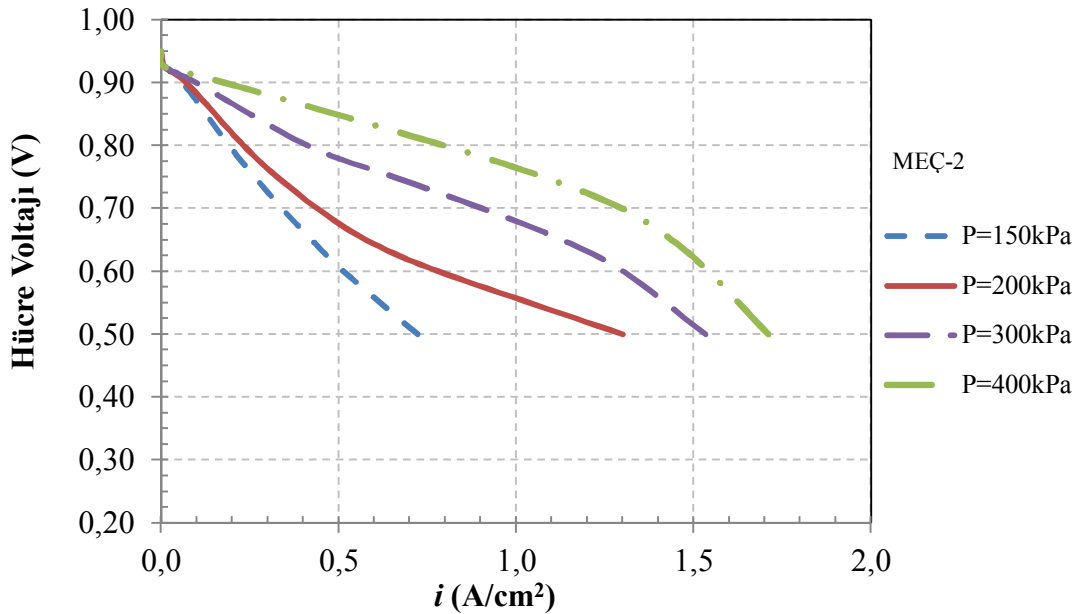
#### 4.2 Çalışma Basıncı Etkisi (Effect of Operating Pressure)

PEM yakıt pilinin MEÇ-2 kullanılarak yapılan modellemesinde; farklı çalışma basınçlarında yapılan analizler sonucunda elde edilen hücre geriliminin, akım yoğunluğu ile değişimleri Şekil 5’de gösterilmiştir. Yakıt pili çalışma basıncının etkisi dört farklı basınç değerinde analiz edilmiştir. Çalışma basınçları sırasıyla 150 kPa, 200 kPa, 300 kPa ve 400 kPa alınarak, her bir basınç için hücre voltaj değerleri değiştirilerek çözümler yapılmıştır. Polarizasyon eğrileri basıncın artmasıyla pozitif olarak sağa doğru kaymıştır. Bu eğrilerdeki artışın bir nedeni reaktiflerin kısmi basınçlarının artması sonucunda yakıt pilinin performansındaki artıştır. En yüksek çalışma basıncı olan 400 kPa’da en yüksek akım yoğunluğu değerleri elde edilmiştir. Düşük basınçlarda (150 kPa ve 200 kPa) yapılan analizler sonucunda aktivasyon enerjisi kaybı, konsantrasyon kayıpları bölgesinin oluşmasına engel olmuştur. Yüksek basınçlarda yapılan analiz sonuçları incelendiğinde ise (300 kPa, 400 kPa) konsantrasyon kayıpları bölgesinin oluştuğu görülmektedir. Düşük basınçlarda konsantrasyon kayıpları oluşmamakla beraber, her ne kadar bu basınçlardaki polarizasyon eğrileri yüksek basınçtaki polarizasyon eğrilerini kesecekmiş gibi görünse de, bu eğrilerin birbirini kesmemesi gerektiği bilinmektedir [12]. MEÇ-1 ile çalışan yakıt pili için, farklı çalışma basınçlarında yapılan analizler sonucunda elde edilen polarizasyon eğrileri Şekil 6’da gösterilmiştir. Seçilen

herbir çalışma basıncı için 150 kPa, 200 kPa, 300 kPa, 400 kPa ve 500 kPa için çözümler, hücre voltajları 0,60 V, 0,65 V, 0,70 V, 0,75 V, 0,80 V ve 0,90 V için yapılmıştır. Maksimum akım yoğunluğu değeri, 150 kPa çalışma basıncından 200 kPa çalışma basıncına çıktığında, % 10,45 artış göstermiştir. Yakıt pilinin 300 kPa, 400 kPa ve 500 kPa’da yapılan analizlerde yüksek çalışma basıncındaki i-V eğrileri birbirine daha yakın şekilde değişim göstermişlerdir. Maksimum akım yoğunluğu değeri 300 kPa çalışma basıncından 400 kPa’ya çıktığında % 3,20 artış, 400 kPa’dan 500 kPa çıktığında ise % 2,31 artış olmuştur. Maksimum akım yoğunluğu değerinde kayıt edilen en büyük artış 200 kPa’dan 300 kPa basınca çıktığında kayıt edilmiştir. Bu artış % 117,44 olarak hesaplanmıştır.

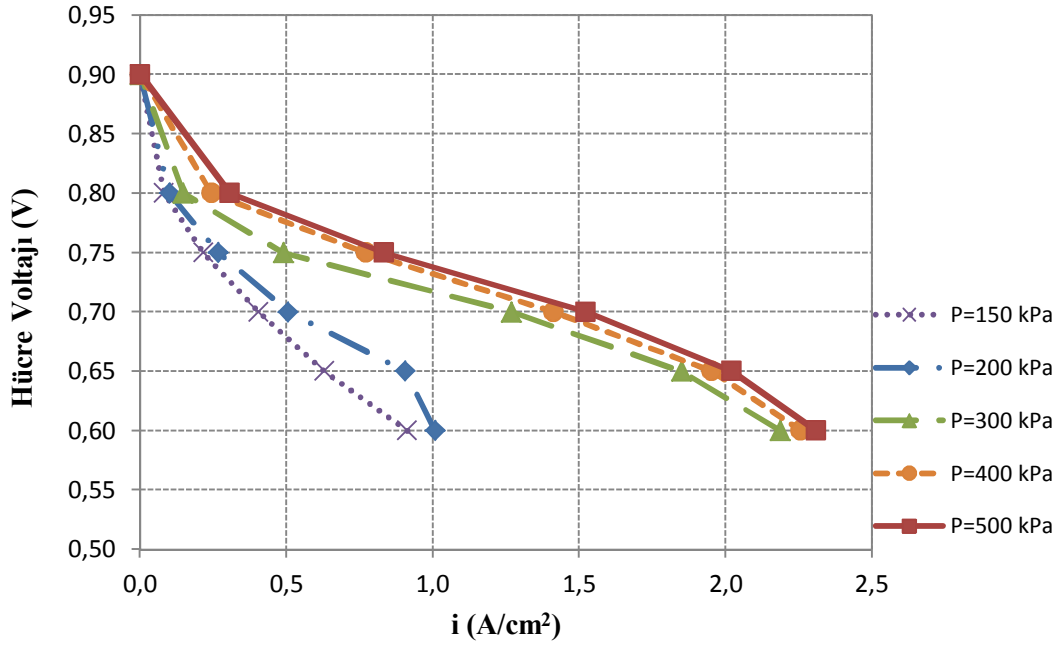
#### 4.3 Gaz Debilerinin Etkisi (Effect of mass flow rates )

Membran elektrot çifti olarak MEÇ-1’in geometrik özellikleri kullanılarak hazırlanan modelde anot ve katot tarafından akan gaz akış miktarları değiştirilerek çözümler yapılmıştır (Durum-10). Yapılan analizler sonucunda elde edilen akım yoğunluğu değerlerinin fazla değişmediği gözlemlenmiştir (Tablo 7). İlk olarak hidrojenin gaz akış miktarı  $6 \times 10^{-7}$  kg/s ve oksijen gaz akış miktarı  $5 \times 10^{-6}$  kg/s olarak yapılan çözümlerde elde edilen akım yoğunluğu değerleri 0,60 V hücre voltajında  $1,8377 \text{ amp/cm}^2$  olarak hesaplanmıştır.



Şekil 5. MEÇ-2’yi kullanan yakıt pili için farklı çalışma basınçlarındaki polarizasyon eğrileri ( $\dot{m}_{an} = 6 \times 10^{-7}$  kg/s;  $\dot{m}_{cat} = 5 \times 10^{-6}$  kg/s) (Polarization curves at different operating pressures for the fuel cell using MEA-2)





Şekil 6. MEÇ-1'i kullanan yakıt pili için farklı çalışma basınçlarındaki polarizasyon eğrileri ( $\dot{m}_{an} = 6e-07$  kg/s ;  $\dot{m}_{cat} = 5e-06$  kg/s) (Polarization curves at different operating pressures for the fuel cell using MEA-1)

Tablo 7. Gaz akış miktarlarındaki değişimin akım yoğunluğuna etkisi (Effect of the change of mass flow rates on the current density)

$V_{hücre}$ [V]	$i^*$ (amp/cm <sup>2</sup> )	$i^{**}$ (amp/cm <sup>2</sup> )	Fark $i$ (amp/cm <sup>2</sup> )
0,60	1,8377	1,7954	0,0423
0,65	0,9062	0,8441	0,0621
0,70	0,5062	0,4985	0,0077
0,75	0,2682	0,2662	0,0020
0,80	0,1008	0,1009	0,0001
0,90	0,0006	0,0006	0

\* giriş-a  $H_2 = 6,0 \times 10^{-7}$  kg/s , giriş-k  $O_2 = 5 \times 10^{-6}$  kg/s

\*\* giriş-a  $H_2 = 1,2 \times 10^{-6}$  kg/s , giriş-k  $O_2 = 1 \times 10^{-5}$  kg/s

Gaz akış miktarları hem anot tarafında hem de katot tarafında iki katına çıkartılıp yapılan analizler sonrasında ise, 0,60 V hücre voltajı için hesaplanan akım yoğunluğu değeri, 1,7954 amp/cm<sup>2</sup> olarak elde edilmiştir. Farklı hücre voltajlarında yapılan çözümler sonucunda elde edilen değerler Tablo 7'de gösterilmiştir.

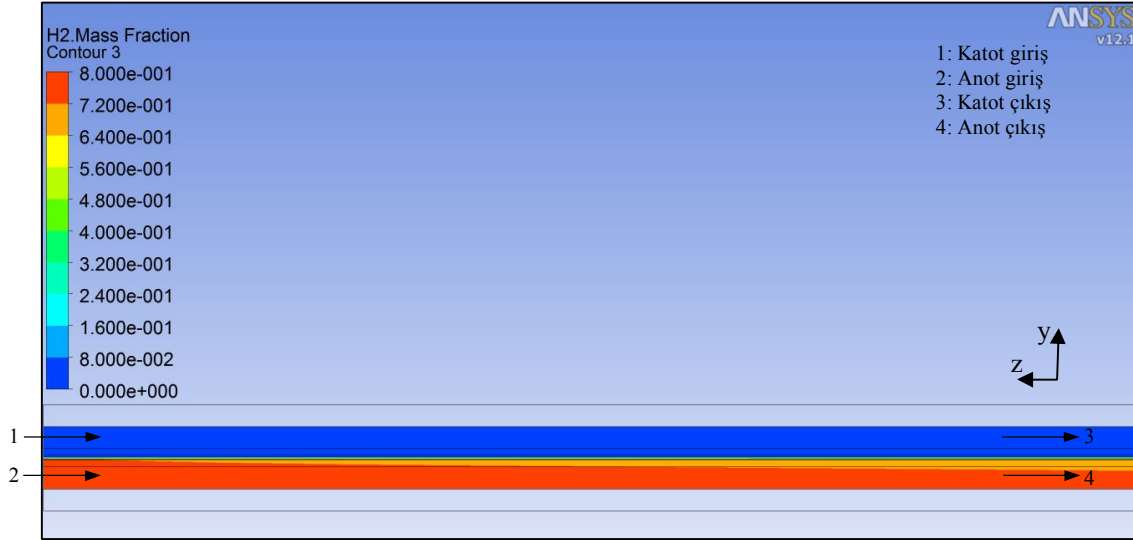
Bu çözümler yapılırken anot ve katot gaz difüzyon tabakası ve katalizör tabakasındaki gözeneklilik değerleri 0,5 alınmıştır. Akım yoğunlukları bakımından en yüksek değişim 0,65 V hücre voltajında elde edilmiştir. Hücre voltajı arttıkça akım yoğunluklarındaki değişimler azalmıştır. Buna neden olarak yüksek hücre voltajlarında konsantrasyon kayıplarının etkisinin azalması gösterilebilir.

#### 4.4 Kütle Kesri Dağılımları (Distributions of Mass Fraction)

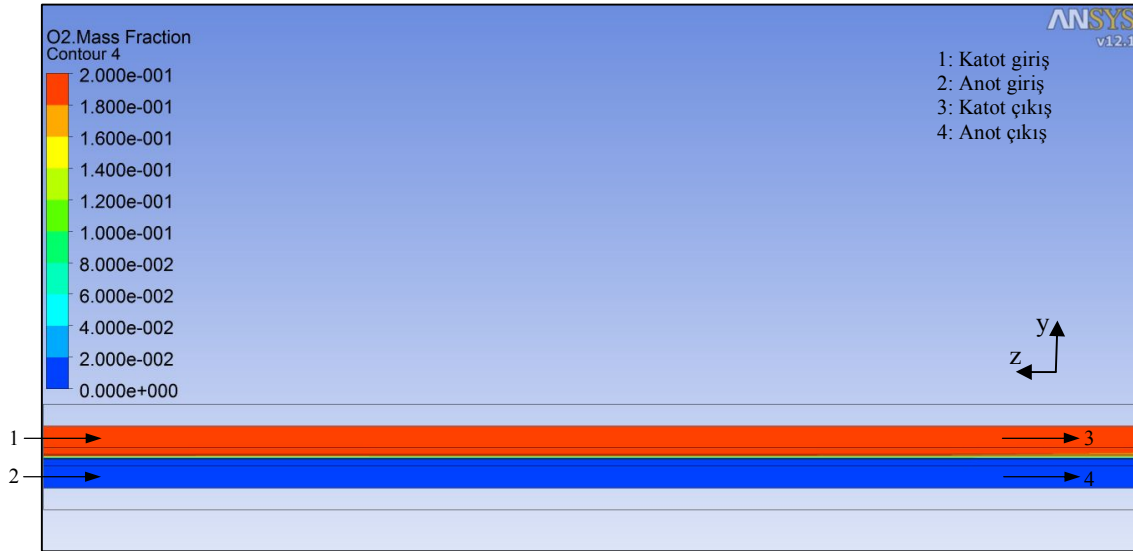
MEÇ-2'nin kullanıldığı, 0,75 V hücre voltajında Durum-6 için yakıt pili içindeki kütle kesir dağılımları aşağıda gösterilmiştir. Şekil 7'de hidrojen gazının kütle kesri anot gaz akış kanalı boyunca 0,8-0,72 arasında değişmektedir. Hidrojen kütle kesri anot gaz kanalı girişinde 0,8 iken çıkışta anot gaz difüzyon tabakası civarında 0,72'ye düşmektedir.

Hidrojen gazı yakıt pili içerisinde reaksiyona girdikçe konsantrasyonunun gaz akış kanalı çıkışına doğru azalmaktadır. Kanal çıkışına doğru 0,72 oranındaki hidrojen kütle kesrine sahip bölgenin kalınlığı artmaktadır. Böylelikle kanal çıkışındaki hidrojen konsantrasyonunun azalması Şekil 5'deki polarizasyon eğrilerinde konsantrasyon kayıpları bölgesi ortaya çıkmaksına neden olmaktadır.

Şekil 8'de oksijen gazının kütle kesri katot gaz akış kanalı boyunca 0,2 civarında sabit kalmıştır. Oksijen kütle kesri katot gaz kanalı girişinde 0,2 iken çıkışta katot gaz difüzyon tabakası civarında 0,18'e düşmektedir. Oksijen gazı yakıt pili içerisinde reaksiyona girdikçe konsantrasyonu gaz akış kanalı çıkışına doğru azalması beklenen bir durumdur. Kanal çıkışına doğru 0,18 oranındaki oksijen kütle kesrine sahip bölge sadece yakıt pili çıkışındaki çok küçük bir alanda görülmektedir. Burada oksijen konsantrasyonundaki azalışın çok az olduğu söylenebilir.



**Şekil 7.** Hidrojen kütle kesrinin kanal boyunca değişimi  $V_{hücre}=0,75V$  (Durum-6) (Change of hydrogen mass fraction along the channel  $V_{cell}=0.75V$  for case-6)



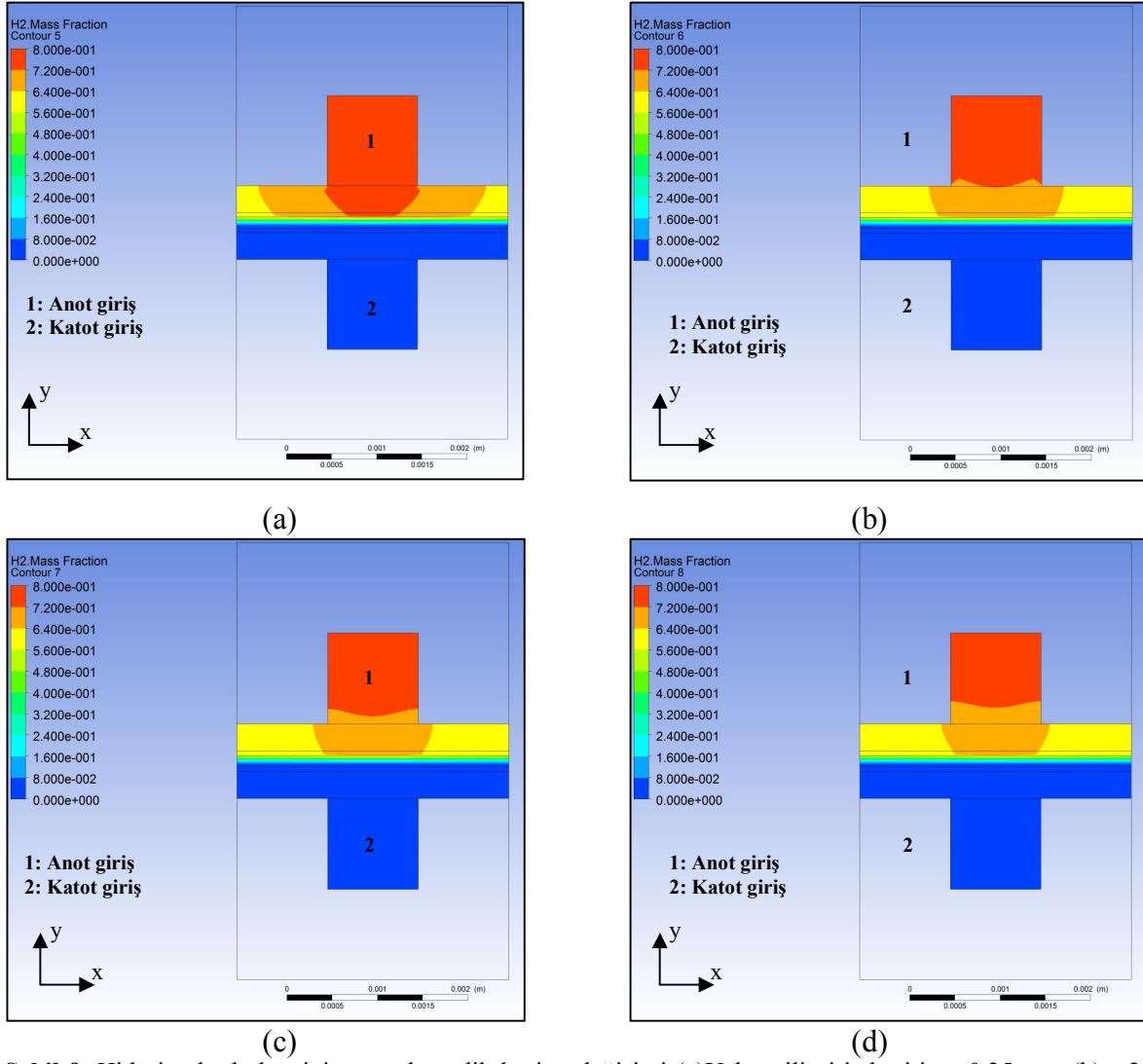
**Şekil 8.** Oksijen kütle kesrinin yakıt pili boyunca değişimi  $V_{hücre}=0,75V$  (Durum-6) (Change of oxygen mass fraction along the channel  $V_{cell}=0.75V$  for case-6)

Şekil 9'da hidrojen gazı kütle kesri dağılımları sırasıyla, (a) yakıt pili giriş kesitinde  $z=0,25$  mm, (b) yakıt pili orta kesitinde  $z=25$  mm, (c) yakıt pilinin  $z=37,5$  mm kesitinde ve (d) yakıt pili çıkış kesitinde  $z=49,5$  mm görülmektedir. Burada gaz akışına dik olarak alınan dört farklı kesitteki hidrojen dağılımları detaylı olarak incelenmiştir.

Örneğin, gaz akış kanalı girişine en yakın kesitteki hidrojen kütle kesri dağılımı Şekil 9(a) ve kanal çıkışına en yakın kesit olan dağılım Şekil 9(d)'de görülmektedir. Görüleceği üzere hidrojen kütle kesri dağılımları kanal çıkışına doğru azalmaktadır. Ana akışa göre dik olarak belirlenen bu dört farklı kesitteki dağılımda, hidrojenin reaksiyona girmesiyle birlikte hidrojen kütle kesri değerlerindeki azalma Şekil 9'da dağılımlarda açıkça görülmektedir. Ancak hidrojenin

kütle kesrinin azalması sonucunda oluşan konsantrasyon kayıpları katot tarafı ile karşılaştırıldığında önemsenmeyecek boyutta olmamaktadır. Çünkü anot tarafında oluşan hidrojen iyonu membrandan geçip geldiği gaz akış kanalına dönmediği için anot tarafında bu kayıp önemsenmeyecek boyutta olmamaktadır.

Polarizasyon eğrilerinde konsantrasyon kayıplarının asıl nedenleri ise 1. Gaz fazındaki difüzyon kısıtlamaları, 2. Sıvı faz birikimi ve gözenek bloklama kısıtlamaları 3. Asal gazların birikmesi (Özellikle katot tarafında havadaki oksijen tüketildiğinde azotun mol oranı artmaktadır ve reaksiyonu engelleyen azotun gazının oluşturduğu bir sınır tabaka meydana gelmektedir.) 4. Yabancı maddeler kaplaması ile yüzey blokajı ana nedenler arasında gösterilebilir.



**Şekil 9.** Hidrojen kütle kesrinin ana akışa dik kesitte değişimi (a)Yakıt pili giriş kesiti,  $z=0,25$  mm (b) $z=25$  mm (c) $z=37,5$  mm, (d)çıkış kesiti,  $z=49,5$  mm (Durum-6) (Change of hydrogen mass fractions at the sections vertical to main flow direction (a)entrance section of fuel cell,  $z=0.25$ mm (b) $z=25$  mm (c) $z=37.5$  mm, (d)exit section,  $z=49.5$  mm for case-6)

## 5. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Düz gaz akış kanalına sahip PEM yakıt pili modeli, hazırlanan 10 farklı durum için sayısal olarak analizi edilmiştir. Durum-1'den Durum-5'e kadar MEÇ-1 kullanılarak hazırlanan koşullarda farklı çalışma basınçlarında çözümler elde edilmiştir. Düşük basınçlarda (Durum-1 ve Durum-2) gerçekleşen aktivasyon enerjisi kaybı, polarizasyon eğrilerinde konsantrasyon kaybı bölgesinin oluşmasını engellemiştir. 300 kPa ve üstü çalışma basınçlarında (Durum-3, 4 ve 5) elde edilen polarizasyon eğrilerinde yüksek akım yoğunluğu değerleri hesaplanmıştır. Durum-6'dan Durum-9'a kadar olan kısımda MEÇ-2 nin özellikleri kullanılarak farklı çalışma basınçlarında analizler yapılmıştır.

Burada da 300 kPa ve 400 kPa'da yapılan analizlerde MEÇ-2'ye ait polarizasyon eğrileri elde edilmiş ve çalışma basıncı arttıkça akım yoğunluklarındaki değerler de artmıştır. İki farklı kalınlıkta MEÇ

oluşturulup bunların polarizasyon eğrileri karşılaştırılmış ve MEÇ-1'in kullanıldığı durumun 0,72V hücre voltajından daha düşük değerlerdeki hücre voltajları için daha yüksek akım yoğunluğu değerleri elde edilmiştir (Şekil 4). Bunun nedeni daha kalın yapıda olan MEÇ-2'nin ohmik kayıpların MEÇ-1'i göre fazla olmasıdır. Kütle debilerindeki değişimin etkisinin incelendiği Durum-10'da anot ve katot gaz akış kanallarına giren gazların debileri iki katına çıkartıldığında akım yoğunluğu değerlerindeki değişim izlenmiş ve 0,65 V hücre voltajında bu azalış 0,0621 A/m<sup>2</sup> olarak hesap edilmiştir. Diğer hücre voltajlarında ise bu değişim daha az olarak hesaplanmıştır. Kütle debilerindeki değişimin yakıt pili performansına etkisinin kısıtlı olduğu görülmüştür. Yukarıdaki sonuçlar, düz gaz akış kanalı durumu için elde edilmiştir. Gaz akış kanalına engel konulması durumunda yakıt pili performansının iyileşebileceği bilinmektedir [18]. Bu nedenle burada ele alınan durumların engelli akış kanalına sahip PEM yakıt pili modellerinde denenmesinde yarar vardır.

**SEMBOLLER (SYMBOLS)**

$C_i$	$i$ türünün konsantrasyonu
$D$	Difüzyon katsayısı ( $m^2/s$ )
$h$	Entalpi
$h_{\text{reaction}}$	Elektrokimyasal reaksiyondan dolayı net entalpi değişimi
$h_{\text{phase}}$	Suyun yoğuşma/buharlaşma yüzünden entalpi değişimi
$i$	Akım yoğunluğu ( $A/m^2$ )
$k$	Isıl iletkenlik ( $W/mK$ )
$R$	Evrinsel gaz sabiti ( $8314 J/kmol.K$ )
$R$	Hacimsel taşınım akımı ( $A/m^3$ )
$R_{\text{ohmic}}$	Ohmik direnç
$S$	Hacimsel kaynak terimi
$S_m$	Kütle kaynak terimi
$S_u$	Dış kuvvetlere ait kaynak terimi
$S_i$	Türlere ait kaynak terimi
$S_h$	Isınmaya ait kaynak terimi
$S_{\phi}$	Değişim akım yoğunluğu
$T$	Sıcaklık (K)
$v$	Hız (m/s)
$t$	Zaman (saniye)
$\varepsilon$	Gözeneklilik
$\rho$	Yoğunluk ( $kg/m^3$ )
$\mu$	Dinamik viskozite ( $Pa.s$ )
$\sigma$	Elektriksel iletkenlik ( $ohm.m$ ) <sup>-1</sup>
$\phi$	Elektriksel potansiyel (Volt)
$\gamma$	Konsantrasyon üssü (boyutsuz)

**KISALTMALAR (ABBREVIATIONS)**

<b>ATP</b>	Akım toplama plakası
<b>CC</b>	Akım toplama plakası
<b>CL</b>	Katalizör tabakası
<b>GDL</b>	Gaz difüzyon tabakası
<b>MEA</b>	Membrane electrode assembly
<b>MEÇ</b>	Membran elektrot çifti
<b>PEM</b>	Proton aktaran membran
<b>PEMFC</b>	Proton aktaran membran yakıt pili

**İNDİSLER (INDICES)**

<b>an</b>	anot
<b>cat</b>	katot
<b>e</b>	elektriksel
<b>eff</b>	etkin (effective)
<b>i</b>	$i$ türü
<b>m</b>	membran

**KAYNAKLAR (REFERENCES)**

1. Bilgili, M., **Akış Kanalları İçerisindeki Yarı Silindirik Blokların Pem Yakıt Pili Performansına Etkisinin Üç Boyutlu Analizi**, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2011.
2. Alpat, C. Ö., **Düz Kanallı Proton Aktaran Membran Yakıt Hücresinin Sayısal Çözümü**, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2007.
3. Biyikoğlu, A. ve Alpat, C.Ö., "Parametric Study of A Single Cell Proton Exchange Membrane Fuel Cell For A Bundle of Straight Gas Channels", **Gazi Univ. J. Sci.**, Cilt 24, No 4, 883–899, 2011.
4. Baschuk, J.J. ve Li, X., "A general formulation for a mathematical PEM fuel cell model", **J. Power Sources**, Cilt 142, No 1–2, 134–153, 2005.
5. Aydın, M. ve Şişman, A., "2-D modelling of a PEM fuel cell", **Proceedings International Hydrogen Energy Congress and Exhibition IHEC 2007**, İstanbul, 1–12, 13-15 Temmuz 2007.
6. Baschuk, J. J. ve Li, X., "Mathematical model of a PEM fuel cell incorporating CO poisoning and O<sub>2</sub>", **Int. J. Glob. Energy Issues**, Cilt 20, No 3, 245–276, 2003.
7. Park, J. ve Li, X., "Effect of flow and temperature distribution on the performance of a PEM fuel cell stack", **J. Power Sources**, Cilt 162, No 1, 444–459, 2006.
8. Liu, X., Tao, W., Li, Z. ve He, Y., "Three-dimensional transport model of PEM fuel cell with straight flow channels", **J. Power Sources**, Cilt 158, No 1, 25–35, 2006.
9. Um, S., Wang, C.-Y. ve Chen, K.S. "Computational Fluid Dynamics Modeling of Proton Exchange Membrane Fuel Cells", **J. Electrochem. Soc.**, Cilt 147, No 12, 4485–4493, 2000.
10. Dutta, S., Shimpalee, S. ve Van Zee, J.W., "Three-dimensional numerical simulation of straight channel PEM fuel cells", **J. Appl. Electrochem.**, Cilt 30, 135–146, 2000.
11. Sivertsen B. ve Djilali N., "CFD-based modelling of proton exchange membrane fuel cells," **J. Power Sources**, Cilt 141, No 1, 65–78, 2005.
12. Wang, L., "A parametric study of PEM fuel cell performances", **Int. J. Hydrogen Energy**, Cilt 28, No 11, 1263–1272, 2003.
13. Meng H. ve Wang, C.-Y., "Electron Transport in PEFCs", **J. Electrochem. Soc.**, Cilt 151, No 3, A358–A367, 2004.
14. Li, S., Cao, J., Wangard, W. ve Becker, U., "Modeling PEMFC with FLUENT: numerical performance and validations with experimental data", **Proceedings of Fuel Cell 3rd International Conference on Fuel Cell Science**, Ypsilanti, Michigan, USA, 103–110, 2005.
15. "Fluent 6.3, Fuel Cell Modules Manual, Fluent Inc.", 2006.
16. "ANSYS Fluent Help Documentation, ANSYS Inc.", 2012.

17. Mench, M. M., "Performance Characterization of Fuel Cell Systems", **Fuel Cell Engines**, John Wiley & Sons, New Jersey, USA, 121–190, 2008.
18. Kuo, J.-K., Yen, T.-H. ve Chen, C.-K., "Three-dimensional numerical analysis of PEM fuel cells with straight and wave-like gas flow fields channels", **J. Power Sources**, Cilt 177, No 1, 96–103, 2008.
19. Wang, X.-D., Duan, Y.-Y., Yan, W.-M. ve Peng, X.-F., "Local transport phenomena and cell performance of PEM fuel cells with various serpentine flow field designs", **J. Power Sources**, Cilt 175, No 1, 397–407, 2008.

