

## Gaz Difüzyon Tabakası Kalınlığının PEM Yakıt Hücresinin Performansına Etkisinin İncelenmesi

Muhammet OZDOGAN<sup>1\*</sup>, Lütfü NAMLI<sup>2</sup> and Aydın DURMUŞ<sup>3</sup>

<sup>1, 2, 3</sup>Departm Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü 55139 Kurupelit / SAMSUN  
(\*muhammet.ozdogan@omu.edu.tr) Email of the corresponding author

**Özet** –Gaz difüzyon tabakasının yapısı, reaksiyon gazlarının ve elektronların geçişini etkileyeceğinden dolayı hücre performansını etkilemektedir. Yapılan bu çalışmada, tek hücreli yapıya sahip PEM yakıt hücresi için gaz difüzyon tabakasının kalınlığının hücre performansına etkisi sayısal olarak modellenerek incelenmiştir. Gaz difüzyon tabakasının PEM yakıt hücresinin performansına etkisinin incelenmesi amacıyla kararlı, tek fazlı ve üç boyutlu model oluşturulmuştur. Farklı çalışma koşullarında ve farklı gaz difüzyon tabakası kalınlıklarında analizler yapılarak; farklı hücre potansiyellerinde oluşan akım yoğunluğu ve elde edilen güç miktarları belirlenmiştir. Ek olarak, farklı gaz difüzyon tabakası kalınlıkları için, akım yoğunluğunun, sıcaklığa, basınca ve hava debisine göre değişimleri grafikler halinde verilmiştir. En yüksek akım yoğunluğunun, gaz difüzyon tabakası kalınlığının 0.2 mm ve hücre potansiyelinin 0.4 V olduğu durumda 1.794 A/cm<sup>2</sup> olarak bulunmuştur. Yüksek hücre potansiyellerinde elde edilen sonuçlar ise birbirine yakın çıkmıştır.

*Anahtar kelimeler – PEM yakıt pili, gaz difüzyon tabakası, üç boyutlu modelleme*

## Investigation of the Effect of Gas Diffusion Layer Thickness on the PEM Fuel Cell Performance

**Abstract** –The structure of the gas diffusion layer influences cell performance because it also affects the passage of reaction gases and electrons. In this study, the effect of the thickness of the gas diffusion layer on the cell performance for the single-celled PEM fuel cell was investigated by numerically modelling. In order to investigate the effect of the gas diffusion layer on the performance of the PEM fuel cell, a stable single-phase and three-dimensional model was established. The effect of the gas diffusion layer thickness on the current density and the amount of power obtained is examined. By analysing the gas diffusion layer thickness under different operating conditions; the current density at different cell potentials and the amount of power obtained were determined. In addition, the changes in the current density with respect to temperature, pressure and air flow rate are given as graphs for the different gas diffusion layer thicknesses. The highest current density was found to be 1.794 A/cm<sup>2</sup>, where the gas diffusion layer thickness was 0.2 mm and the cell potential was 0.4 V. In addition, the results obtained at high cell potentials are close to each other.

*Keywords – PEM fuel cell, gas diffusion layer, three-dimensional modelling*

---

### I. GİRİŞ

Yakıt hücreleri arasında, PEM yakıt hücreleri düşük çalışma sıcaklıkları ve yüksek verimlerinden dolayı ön plana çıkmaktadırlar [1]. PEM yakıt hücresi Akım Toplama Plakası, Gaz Difüzyon Tabakası (GDT), Katalizör Tabaka ve Polimer Elektrolit Membrandan oluşmaktadır. Gaz difüzyon tabakaları, reaktantların dağıtılmasında ve elektronların geçişinde etkili olduğundan, gaz difüzyon tabakasının kalınlığı hücre performansını etkilemektedir.

Park ve Li [2], yapmış oldukları çalışmada, serpantin yapılı kanala sahip PEM yakıt hücresinde çapraz akışın araştırılması için sayısal ve deneysel bir inceleme yapılmıştır. Yaptıkları çalışmada, GDT kalınlığı ve geçirgenliğinin ve reaktant hızlarının basınç kaybına olan etkilerini incelemişlerdir. Jang ve ark. [3], çalışmalarında, GDT karakteristik parametrelerinin hücre performansına ve kütle geçişine etkilerini incelemek için çift fazlı iki boyutlu model oluşturmuşlardır. GDT'nin kalınlığı etkilerini

araştırmışlardır. GDT'nin gözenekliliğini 0.3-0.6 aralığında alarak analizler yapmışlardır ve sonuç olarak GDT'nin gözenekliliğinin artmasının hücre performansını arttırdığını belirlemişlerdir. Diğer taraftan, GDT kalınlığının artmasının hücre performansını olumsuz yönde etkilediğini belirtmişlerdir. Azhmi ve ark.[4] GDT'nin izotropik olmayan ısıl iletkenliğinin PEM yakıt hücresinin performansına etkisini incelemişlerdir. Zhao ve ark [5] yapmış oldukları çalışmada, içerisinde gaz difüzyontabakasının kalınlığının da olduğu bazı parametrelerin PEM yakıt hücresinde elde edilen polarizasyon eğrilerine etkilerini incelemişlerdir. Zhou ve Liu [6] geliştirmiş oldukları üç boyutlu modelle GDT' nin elektrik iletkenliğinin hücre performansına etkisini incelemişlerdir.

Bu çalışmada, tek hücreli yapıya sahip PEM yakıt hücresi için gaz difüzyon tabakasının kalınlığının hücre performansına etkisi sayısal olarak modellenerek incelenmiştir. Bu amaçla, gaz difüzyon tabakasının PEM

yakıt hücrelerinin performansına etkisinin incelenmesi için kararlı, tek fazlı ve üç boyutlu model oluşturulmuştur. Farklı çalışma koşullarında ve farklı gaz difüzyon tabakası kalınlıklarında çözümler yapılarak; farklı hücre potansiyellerinde oluşan akım yoğunluğu ve elde edilen güç miktarları belirlenmiştir.

## II. MATERYAL VE METOD

Gaz difüzyon tabakası kalınlığının PEM yakıt hücrelerinin performansına olan etkisinin incelenmesi amacıyla, tek hücreli yakıt hücresi, FLUENT 6.3 paket programında modellenmiştir. Sayısal model oluşturulurken çözüm bölgesinin geometrisi oluşturulmuş ve oluşturulan bu geometri sonlu hacimlere bölünmüştür. Oluşturulan geometrinin bileşenlerinin boyutları Çizelge 1’de verilmiştir. Sonlu hacimlere bölünme işleminin ardından çözüm için gerekli olan elektrokimyasal parametreler ve sınır koşulları tanımlanmış ve program koşturulmuştur. Oluşturulan model literatürle doğrulandıktan sonra farklı parametreler için analizler yapılmıştır.

Yakıt hücresi modellenirken; sistemin kararlı olduğu, gazların ideal gaz olduğu, faz değişiminin olmadığı kabul edilmiştir. Gazların çapraz geçişi ve membrandaki gaz geçişleri ihmal edilmiş, gaz difüzyon tabakasının, katalizör tabakanın ve membranın izotropik oldukları kabul edilmiştir.

Çizelge 1. Yakıt hücrelerinin bileşenlerinin boyutları.

Bileşenin Adı	Birim	Değer
Kanal uzunluğu	mm	50
Kanal boyu	mm	1
Kanal eni	mm	1
Akım toplama plakası (ATP) kalınlığı	mm	2
Gaz difüzyon tabakası kalınlığı	mm	0.1, 0.2, 0.3, 0.4
Katalizör tabakası kalınlığı	mm	0.01
Membran kalınlığı	mm	0.05
Hücre eni	mm	3

### A. Korunum Denklemleri

Nümerik modelin oluşturulabilmesi için, hücreyi matematiksel olarak denklemlerin tanımlanması ve bu denklemlerin, tanımlanan sınır koşulları kullanılarak çözülmesi gerekmektedir.

#### Kütlenin korunum denklemi

Tüm çözüm bölgesi için kütle dengesini veren denklem Eşitlik 1’de verilmiştir.

$$\nabla \cdot (\varepsilon \rho \vec{u}) = 0 \quad (1)$$

#### Momentumun korunum denklemi

Momentumun korunum denklemi Eşitlik 2’de verildiği gibidir. Eşitlik 2’de,  $S_u$  terimi, dış kuvvetlerdir ve her çözüm bölgesi için Çizelge 2’de tanımlanmıştır.

$$\nabla \cdot (\varepsilon \rho \vec{u} \vec{u}) = -\varepsilon \nabla p + \nabla \cdot (\varepsilon \mu \nabla \vec{u}) + S_u \quad (2)$$

#### Enerjinin korunum denklemi

Enerjinin dengesi Eşitlik 3’de verilmiştir. Eşitlik 3’deki,  $h$ , entalpi,  $k$ , ısı iletim katsayısı büyüklükleridir.  $S_h$  terimi ise termal kaynak terimidir ve tüm çözüm bölgeleri için Çizelge 2’de verilmiştir.

$$\nabla \cdot (\varepsilon \rho \vec{u} h) = \nabla \cdot (k \nabla T) + S_h \quad (3)$$

#### Tür konsantrasyon denklemi

Türlerin konsantrasyonu denklemi Eşitlik 4’te verilmiştir. Eşitlikte,  $S_k$ , kaynak terimidir ve Çizelge 2’de verilmiştir.

$$\nabla \cdot (\varepsilon \vec{u} C_k) = \nabla \cdot (D_k^{eff} \nabla C_k) + S_k \quad (4)$$

Eşitlik 4’deki gaz tür diffüzivitesi  $D_k^{eff}$ , aşağıda verilen Eşitlik 5 denklemi yardımıyla hesaplanmıştır.

$$D_k^{eff} = \varepsilon^{1.5} D_k \quad (5)$$

#### Proton ve elektron transfer denklemi

Hücrede proton ve elektronların transfer özellikleri Eşitlikler 6 ve 7 yardımıyla hesaplanmıştır. Eşitlik 6’da,  $\sigma_m$ , iyonik iletkenlik,  $\phi_m$ , membran potansiyeli ve  $S_i$ , iyonik kaynak terimleridir. Eşitlik 7’de  $\sigma_s$ , elektriksel iletkenlik,  $\phi_s$ , elektriksel potansiyel ve  $S_e$ , elektriksel kaynak terimidir. Verilen tüm eşitliklerdeki kaynak terimleri Çizelge 2’de verilmiştir.

$$\nabla \cdot (\sigma_m \nabla \phi_m) = S_i \quad (6)$$

$$\nabla \cdot (\sigma_s \nabla \phi_s) = S_e \quad (7)$$

Çizelge 2. Kaynak terimleri.

Bileşen / Kaynak terim	$S_u$ (Momentum)	$S_h$ (Enerji)	$S_k$ (Tür)	$S_e$ (Potansiyel)	$S_i$ (Potansiyel)
Akım toplama plakası	0	0	0	0	0
Gaz kanalı	0	0	0	0	0
Gaz difüzyon tabakası	$-\frac{\mu}{K} \varepsilon^2 \vec{u}$	0	0	0	0
Katalizör tabaka	$-\frac{\mu}{K} \varepsilon^2 \vec{u}$	$h_{reaksiyon} + j_{a.c} n_{a.c} + \frac{i_s^2}{\sigma_s^{eff}} + \frac{i_m^2}{\sigma_m^{eff}} + h_{jaz}$	$H_2: -\frac{M_{H_2}}{2F} j_a$ $O_2: -\frac{M_{O_2}}{4F} j_c$ $H_2O: \frac{M_{H_2O}}{2F} j_c - \frac{n_d M_{H_2O}}{2F} j_c$	$j$	$j$
Membran	$-\frac{\mu}{K} \varepsilon^2 \vec{u}$	0	0	0	0

## B. Çözüm Yöntemi

Korunum denklemleri, hesaplamalı akışkanlar dinamiği programı olan FLUENT 6.3 programının PEM modülü kullanılarak çözülmüştür. Basınç denklemlerinin çözümünde Standart Şema, diğer korunum denklemlerinin çözümünde ise Birinci Derece Upwind Şema kullanılmıştır. Basınç hız eşleştirmesi olarak SIMPLE algoritması kullanılmıştır. Programda tanımlanan elektrokimyasal ve transfer özellikleri Çizelge 3'teki verilmiştir. Sınır koşulları da tanımlandıktan sonra program koşturulmuştur. Çözümlere, hata büyüklüğü  $10^{-5}$  mertebesine yakınsayınca kadar devam edilmiştir.

Çizelge 3. Elektrokimyasal ve transfer özellikleri.

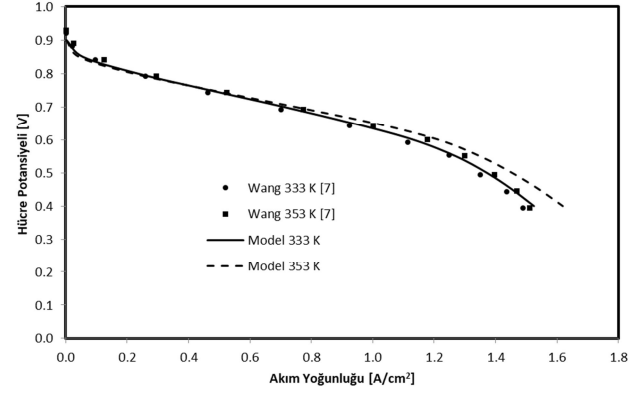
Parametre [Birim]	Değer
Anot referans akım yoğunluğu [ $A.m^{-3}$ ]	$1.5 \times 10^9$
Anot referans akım konsantrasyonu [ $kmol.m^{-3}$ ]	1
Anot konsantrasyon üssü	0.5
Anot transfer katsayısı	2
Gaz difüzyon tabakası gözenekliliği	0.5
Katot referans akım yoğunluğu [ $A.m^{-3}$ ]	$4 \times 10^6$
Katot referans akım konsantrasyonu [ $kmol.m^{-3}$ ]	1
Katot konsantrasyon üssü	1
Katot transfer katsayısı	2
Katalizör tabakası gözenekliliği	0.5
Açık devre voltajı [V]	0.95
Hidrojen referans diffüzyon hızı [ $m^2.s^{-1}$ ]	$3 \times 10^{-5}$
Oksijen referans diffüzyon hızı [ $m^2.s^{-1}$ ]	$3 \times 10^{-5}$
Su buharı referans diffüzyon hızı [ $m^2.s^{-1}$ ]	$3 \times 10^{-5}$

## C. Sınır Koşulları

Çözüm bölgesi, iki akım toplama plakası, iki akış kanalı, iki gaz difüzyon tabakası, iki katalizör tabaka ve bir membran olmak üzere toplam dokuz farklı bölgeden oluşmuştur. Akım toplama plakaları katı, diğer bölgeler ise akışkan olarak tanımlanmıştır. Akış kanalları dışındaki tüm dış yüzeylerde duvar sınır şartı tanımlanmış, akış kanalı girişlerinde kütle giriş sınır şartı, akış kanalı çıkışlarında ise basınç tanımlı çıkış sınır şartı tanımlanmıştır. Reaktantların hücreye doymuş olarak girdiği kabul edilmiştir. Tüm analizler için hidrojen debisi;  $5.874 \times 10^{-8}$  kg/s olarak alınmıştır. Anot akım toplama plakasının üst yüzeyinde ve akım toplama plakasının alt yüzeyinde sabit yüzey sıcaklığı ve sabit hücre potansiyeli tanımlanmıştır.

## D. Modelin Doğrulanması

Oluşturulan nümerik modelin doğruluğunun kontrol edilmesi gerekmektedir. Modelin doğruluğunun kontrol edilmesi için Wang ve ark. [7]'nin yapmış olduğu deneysel çalışmadan elde ettikleri bulgular kullanılmıştır. Basıncın 300 kPa, hücre sıcaklığının ile reaksiyon gazlarının sıcaklıklarına eşit olduğu durum için analizler yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar, Wang ve ark. [7]'nin bulmuş olduğu sonuçlarla karşılaştırılmıştır. 333 K ve 353 K sıcaklıkları için Wang ve ark. [7]'nin bulmuş oldukları sonuçlardan ve modelden elde edilen polarizasyon eğrileri Şekil 1'de verilmiştir. Düşük akım yoğunluklarında model sonuçları deneysel sonuçlarla oldukça iyi bir şekilde uyumaktadır. Yüksek akım yoğunluklarında ise, model oluşturulurken göz ardı edilen faz değişiminden dolayı modelden elde edilen sonuçlar sınırlı da olsa yüksek çıkmıştır.



Şekil 1. Model sonuçlarının deneysel verilerle karşılaştırılması.

## III. BULGULAR VE TARTIŞMA

Gaz difüzyon tabakası (GDT) kalınlığının hücre performansına etkisini incelemek amacıyla dört farklı GDT kalınlığı için analizler yapılmıştır. Farklı GDT kalınlıkları için, hücre potansiyeline, basınca, sıcaklığa ve havanın debisine göre akım yoğunluğunun değişimi incelenmiştir.

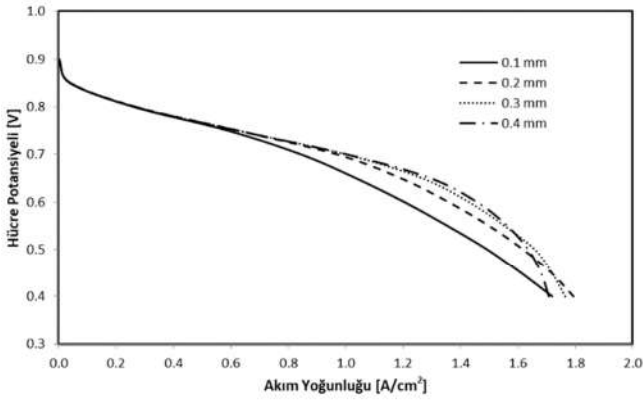
0.1 mm, 0.2 mm, 0.3 mm ve 0.4 mm GDT kalınlıklarında, farklı hücre potansiyelleri için elde edilen akım yoğunluğu miktarları Çizelge 4'te verilmiştir. Analizler yapılırken sıcaklık; 333 K, basınç; 200 kPa ve havanın debisi;  $1.560 \times 10^{-6}$  kg/s olarak alınmıştır. 0.40 V hücre potansiyeli için, en yüksek akım yoğunluğu, 0.2 mm GDT kalınlığına sahip geometride; 1.794 A/cm<sup>2</sup>, en düşük akım yoğunluğu ise 0.40 mm GDT kalınlığına sahip geometride; 1.708 A/cm<sup>2</sup> değerlerini almaktadır. 0.45 V ve 0.50 V hücre potansiyelleri için, en yüksek akım yoğunluğu, 0.3 mm GDT kalınlığına sahip geometride, buna karşın en düşük akım yoğunluğu ise 0.1 mm GDT kalınlığına sahip geometride meydana gelmektedir. 0.55 - 0.75 hücre potansiyeli aralığında GDT kalınlığının artmasıyla elde edilen akım yoğunluğu artmaktadır. 0.75 V hücre potansiyelinin üstüne çıkılmasıyla birlikte dört GDT kalınlığı için elde edilen sonuçlar ise yakın çıkmıştır.

Çizelge 4. Farklı gaz difüzyon tabakası kalınlıkları için akım yoğunluğunun hücre potansiyeline göre değişimi (T=333 K, P=200 kPa).

Hücre Potansiyeli [V]	Akım yoğunluğu [A/cm <sup>2</sup> ]			
	GDT 0.1 mm	GDT 0.2 mm	GDT 0.3 mm	GDT 0.4 mm
0.40	1.720	1.794	1.765	1.708
0.45	1.611	1.717	1.719	1.681
0.50	1.493	1.618	1.659	1.636
0.55	1.354	1.499	1.553	1.563
0.60	1.204	1.358	1.429	1.457
0.65	1.036	1.192	1.266	1.295
0.70	0.844	0.969	1.000	1.003
0.75	0.589	0.623	0.625	0.621
0.80	0.259	0.266	0.265	0.264
0.85	0.039	0.040	0.038	0.041
0.90	0.002	0.002	0.002	0.002

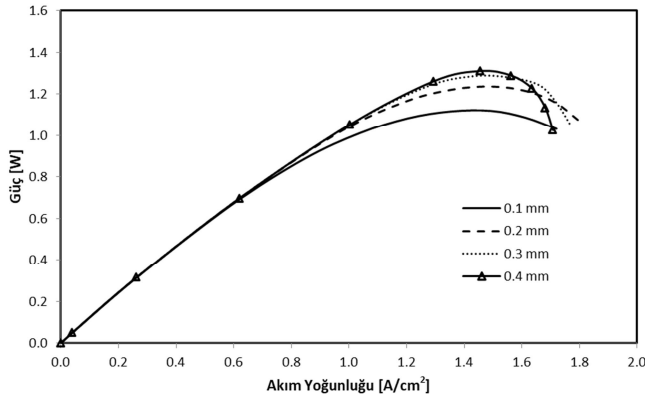
Çizelge 4'deki veriler kullanılarak oluşturulan farklı gaz difüzyon tabakası kalınlıkları için polarizasyon eğrileri Şekil 2'de verilmiştir. Şekil 2'den de görüldüğü gibi, akım yoğunluğunun artmasıyla hücre potansiyeli azalmıştır. GDT genişliğinin etkisi, akım yoğunluğu miktarına göre farklılık göstermektedir. Düşük akım yoğunluklarında GDT genişliğinin belirgin bir etkisi yok iken, 0.6 A/cm<sup>2</sup>'nin üstündeki akım yoğunluklarında bu etki belirginleşmektedir.

0.6 A/cm<sup>2</sup> - 1.6 A /cm<sup>2</sup> akım yoğunluğu aralığında GDT kalınlığının artması hücre potansiyelini arttırdığı söylenebilir.



Şekil 2. Farklı gaz difüzyon tabakası kalınlıklarında hücre potansiyelinin değişimi (polarizasyon) (T=333 K, P=200 kPa, havanın debisi; 1.560\*10<sup>-6</sup> kg/s).

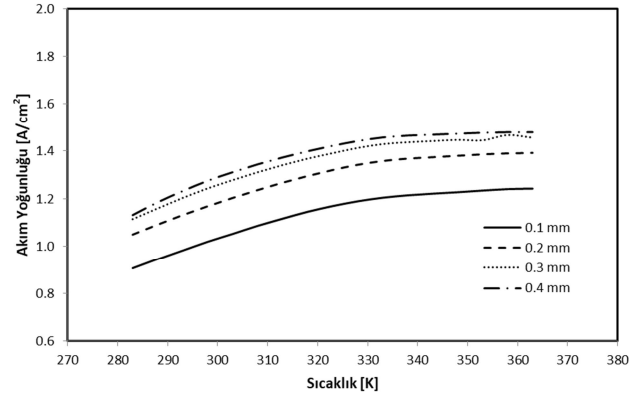
333 K sıcaklık, 200 kPa basınç ve 1.560\*10<sup>-6</sup> kg/s hava debisi için elde edilen güç eğrileri Şekil 3'te verilmiştir. GDT kalınlığının elde edilen güç miktarına etkisi, hücre potansiyeline etkisiyle benzerlik göstermektedir. Maksimum güç miktarı, yaklaşık 1.4 A /cm<sup>2</sup> akım yoğunluğunda, 0.4 mm GDT kalınlığı için elde edilmiştir.



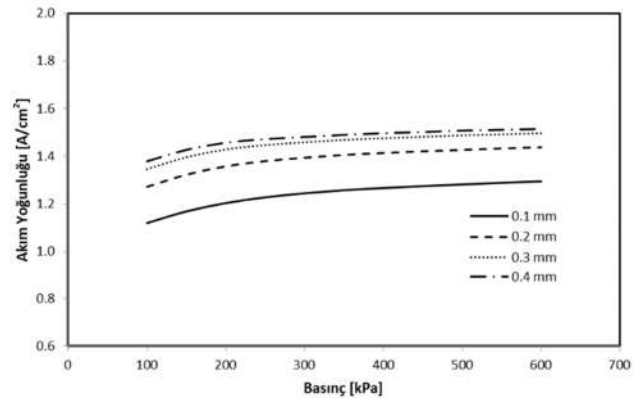
Şekil 3. Farklı gaz difüzyon tabakası kalınlıklarında akım yoğunluğuna göre gücün değişimi (T=333 K, P=200 kPa, havanın debisi; 1.560\*10<sup>-6</sup> kg/s).

200 kPa basınç, 1.560\*10<sup>-6</sup> kg/s hava debisi ve 0.6 V hücre potansiyeli için akım yoğunluğunun sıcaklığa göre değişim eğrileri Şekil 4'de verilmiştir. Dört farklı GDT kalınlığında da sıcaklığın artması, akım yoğunluğunu arttırmıştır. Sıcaklık artışının etkisi, düşük akım yoğunluklarında daha fazla olmaktadır. İncelenen durum için, GDT kalınlığının artması, gazların homojen dağılımını arttırdığından elde edilen akım yoğunluğunu da arttırmıştır.

Gaz difüzyon tabakası kalınlığının farklı çalışma basınçlarındaki etkisinin incelenmesi amacıyla 333 K sıcaklık, 1.560\*10<sup>-6</sup> kg/s hava debisi ve 0.6 V hücre potansiyeli için analizler yapılmıştır. Analizler sonucunda elde edilen, akım yoğunluğunun basınca göre değişim eğrileri Şekil 5'de verilmiştir. Şekil 5 incelendiğinde, tüm GDT için çalışma basıncının artması, akım yoğunluğunu arttırmıştır. Yüksek basınçlarda basıncın etkisi azalmıştır. GDT kalınlığının fazla olması, hücre performansını iyileştirmiştir fakat kalınlığın artmasıyla birlikte kalınlığın etkisinin azaldığı görülmüştür.

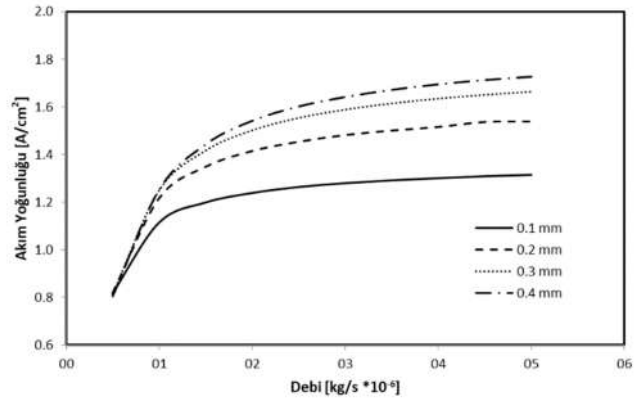


Şekil 4. Farklı gaz difüzyon tabakası kalınlıklarında sıcaklıkla akım yoğunluğunun değişimi (P=200 kPa, V=0.6 V, havanın debisi; 1.560\*10<sup>-6</sup> kg/s).



Şekil 5. Farklı gaz difüzyon tabakası kalınlıklarında akım yoğunluğunun basınca göre değişimi (T=333 K, V=0.6 V, havanın debisi; 1.560\*10<sup>-6</sup> kg/s).

333 K sıcaklık, 200 kPa basınç ve 0.6 V hücre potansiyelinde, farklı hidrojen debileri için analizler yapılmıştır. Yapılan analizler sonucu, farklı gaz difüzyon plakası kalınlıkları için elde edilen akım yoğunluğunun hidrojen debisine göre değişim eğrileri Şekil 6'da verilmiştir. Hava debisinin 0.5x10<sup>-6</sup> kg/s olduğu durumda tüm kanal genişlikleri için sonuçlar yakın çıkmıştır. Debinin artmasıyla kanal genişliğinin akım yoğunluğuna etkisi artmıştır. Düşük debilerde keskin bir artış olurken yüksek debilerde debi artışının etkisinin azaldığı gözlenmiştir.



Şekil 6. Farklı gaz difüzyon tabakası kalınlıklarında, hava debisinin miktarına göre akım yoğunluğunun değişimi (T= 333 K, P=200 kPa, V=0.6V).

#### IV. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Yapılmış olan çalışmada PEM yakıt hücresinde gaz difüzyon tabakası (GDT) kalınlığının etkisinin incelenmesi

amacıyla 0.1 mm, 0.2 mm, 0.3 mm ve 0.4 mm GDT kalınlıklarına sahip hücreler modellenmiştir. GDT kalınlığının hücre performansına etkisinin incelenmesi amacıyla polarizasyon ve güç eğrileri oluşturulmuştur. Ayrıca GDT kalınlığının farklı çalışma parametrelerindeki etkisinin değerlendirilmesi için 0.6 V hücre potansiyelindeki akım yoğunluğu miktarının, sıcaklığa, basınca ve hidrojenin debisine göre değişim grafikleri verilmiştir.

GDT genişliğinin hücre potansiyeline ve güç miktarına etkisi, akım yoğunluğu miktarına göre değişmektedir. Akım yoğunluğunun düşük olduğu durumlarda, GDT genişliğinin etkisi yok denebilecek düzeydeyken, 0.6 A/cm<sup>2</sup> - 1.6 A /cm<sup>2</sup> akım yoğunlukları aralığında GDT kalınlığının artmasının hücre potansiyelini arttırdığı belirlenmiştir. 0.6 V için tüm durumlarda, GDT kalınlığının artmasıyla birlikte akım yoğunluğunun arttığı belirlenmiştir. GDT kalınlığının hücre potansiyeline ve güç miktarına etkisinin, GDT kalınlıklarının düşük olduğu durumlarda daha fazla olduğu tespit edilmiştir.

#### KAYNAKLAR

- [1] Y. Ding, X. Bi and D.P. Wilkinson, *Numerical analysis on performance of polymer electrolyte membrane fuel cells*, Chemical Engineering Science, vol. 100, pp. 445-455, 2013.
- [2] J. Park and X Li, *An experimental and numerical investigation on the cross flow through gas diffusion layer in a PEM fuel cell with a serpentine flow*, Journal of Power Sources Chemical Engineering Science, vol. 163, pp. 853-863, 2007.
- [3] J.H. Jang, W.M. Yan and C.C. Shih, *Effects of the gas diffusion-layer parameters on cell performance of PEM fuel cells*, Journal of Power Sources Chemical Engineering Science, vol. 161, pp. 323-332, 2006.
- [4] D. Zhao, M. Dou, D. Zhou, F. Gao, *Study of the modeling parameter effects on the polarization characteristics of the PEM fuel cell*, International Journal of Hydrogen Energy, vol. 41, pp. 22316-22317, 2016.
- [5] N. Alhazmi, D.B. Ingham, M.S. Ismail, K.J. Hughes, L. Ma and M. Pourkashanian, *Effect of the anisotropic thermal conductivity of GDL on the performance of PEM fuel cells*, International Journal of Hydrogen Energy, vol. 38, pp. 603-611, 2013.
- [6] T. Zhou and H. Liu, *Effects of the electrical resistances of the GDL in a PEM fuel cell*, Journal of Power Sources, vol. 161(1), pp. 444-453, 2006.
- [7] L. Wang, A. Husar, T. Zhou and H. Liu, *A parametric study of PEM fuel cell performances*, International Journal of Hydrogen Energy, vol. 28, pp. 1263-1277, 2003.