

# PSCAD Yazılımı Kullanarak PEM Yakıt Hücresinin Modelinin Ve Benzetiminin Gerçekleştirilmesi

Implementation And Simulation Of PEM Fuel Cell Model Using PSCAD Software

Serkan BAHÇECİ<sup>2</sup>, Seyfullah FEDAKAR<sup>1</sup>, Tankut YALÇINÖZ<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü  
Melikşah Üniversitesi  
tyalcinoz@meliksah.edu.tr, sfedakar@meliksah.edu.tr

<sup>2</sup>Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü  
Erciyes Üniversitesi  
sbahceci@erciyes.edu.tr

## Özet

Yakıt pilleri kimyasal enerjiyi direkt olarak elektriksel enerjiye dönüştüren sistemlerdir. Bu çalışmada termodinamik ve elektrokimyasal temellere bağlı olarak PEM (Polimer Elektrolit Membran) yakıt piline ait dinamik model PSCAD yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Dinamik modelin DC yükteki davranışı incelenmiştir. Bu amaçla PEM yakıt pilininin sabit DC yükteki elektriksel karakteristiği analiz edilmiştir. Daha sonra ise yakıt pili modelinin değişken yük altındaki çalışması ile ilgili simülasyonlar yapılmıştır.

## Abstract

Fuel cells convert chemical energy directly into electrical energy. In this study the dynamic model of PEM (Polymer Electrolyte Membran) fuel cell was developed using PSCAD software by thermodynamic and electrochemical foundations. The behavior of dynamic model based on Nernst equation was examined under DC load. For this purpose the electrical behavior of PEM fuel cell was analyzed under constant DC load. Then variable DC load simulations were done.

## 1. Giriş

Yakıt pili reaksiyonları hidrojen ve oksijen arasında gerçekleşmektedir ve atık olarak su ve ısı oluşmaktadır. Yakıt pili sistemleri son yıllarda hızla gelişen ve çevreye duyarlı, güvenilir ve yüksek verimli bir teknolojidir. Bu sistemlerin diğer teknolojilere göre yüksek güç kalitesi ve sıfır emisyon gibi önemli avantajları bulunmaktadır. Yakıt pillerinin güç sistemlerinde kullanılabilirliğinin araştırılması amacıyla elektrokimyasal temeller üzerine dinamik model oluşturma çalışmaları yapılmıştır.

Yakıt pili dinamik modeline ait genel karakteristikler ve temel yaklaşımlar sunulmuştur.

Bu çalışmalarda yakıt pili modelinin oluşturulması için gereken termodinamik ve elektrokimyasal temeller verilmiştir.

Yakıt pilinin temeli olan suyun elektrolizi ile Nernst denklemi açıklanmış ve yakıt pili kayıplarına ait hesaplamalar ile yakıt pili geriliminin matematiksel modeli incelenmiştir [1-3].

Birçok çalışmada ortaya konulan matematiksel modeller [4-9] numaralı referanslarda araştırmacılar tarafından PEM yakıt pilinin modellenmesine kaynak olmuştur. Bu çalışmalarda yakıt pillerinin dinamik modelleri oluşturulmuş ve çalışma karakteristikleri verilmiştir.

M.Y. El-Shark ve arkadaşları [2] tarafından Nernst denklemi kaynak alınarak PEM yakıt piline ait matematiksel model ortaya konmuştur. Bu çalışmada yakıt pili gerilimi Nernst denklemi yardımıyla hesaplanmış, oluşacak kayıplarla ilgili formüller verilerek yakıt pilinden alınacak gerilim hesabı yapılmıştır. Nernst denklemi için gerekli kısmi basınçların hesaplanması da yine bu çalışmada yer almıştır.

Referans [3]'de ise daha ayrıntılı bir çalışma yapılmıştır. Anot ve katot reaksiyonlarına ait tepkimeler ve buralarda oluşacak kayıplar ile omik kayıplara ait hesaplamalar yine Nernst denklemi ile birleştirilmiş ve yakıt pili gerilimi için matematiksel model ortaya konmuştur.

M. Y. El-Sharkh ve arkadaşları [10] ise oluşturdukları yakıt pili modelinin değişken yük altındaki davranışını incelemiştir. Yakıt piline bağlı yükün değişmesi halinde üretilen güç ve gerilime ait sonuçlar tartışılmıştır.

## 2. PEM yakıt pili ve çalışma prensibi

Polimer elektrolit membran ya da proton değişim membran yakıt pillerinde (PEM) elektrolit olarak 50µm'den daha ince olan ve proton geçişine izin verirken elektron geçişini mümkün kılmayan polimer membran kullanılır.

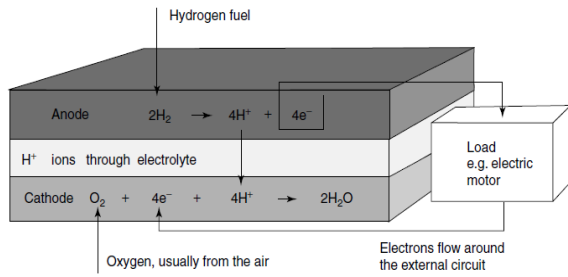
Polimer elektrolitler düşük sıcaklıkta çalışırlar. Bu özellikleriyle hızlı bir şekilde elektrik üretmeye başlamaları PEM yakıt pillerinin avantajlarından biridir. Anot-elektrolit-katod üçlü bağlantısının çok ince olması kompakt yakıt hücrelerinin üretilmesine olanak sağlar. Ayrıca hareketli herhangi bir parçasının olmaması güvenlik açısından da önemli bir avantajdır.

Elektrolit, anot ve katod reaksiyonlarının gerçekleştiği elektrotları birbirinden elektriksel olarak ayırır. Elektrotların birer yüzeyleri platin katalizör ile kaplıdır. Anot ve katod elektrotları gaz kanallarıyla hidrojen ve oksijen kaynaklarına bağlıdır [11]. Anot ve katod elektrotlarında gerçekleşen denklemler 1.1. ve 1.2. denklemlerde verilmiştir [12].



1. denklem anot reaksiyonunu göstermektedir. Hidrojen ile beslenen anot elektrotunda hidrojen, proton ve elektronlarına ayrılır.  $H^+$  iyonları elektrolit içinde hareket ederek katod elektrotundan beslenen oksijenle tepkimeye girerler. Katod reaksiyonunu gösteren 2. denklemin gerçekleşmesi için gerekli olan elektronlar ise dış devre üzerinden katod elektrotuna iletilir. Anottan katoda doğru hareket eden elektronların bu hareketi esnasında katottan anota doğru akan akım ile elektrik üretimi gerçekleşmiş olur [13].

Reaksiyonlar ve elektron akışına ait diyagram Şekil 1'de gösterilmiştir.



Şekil 1. PEM yakıt piline ait reaksiyonlar [14]

Bir gazın kısmi basıncı ile gaz akışı arasındaki bağıntı Denklem 3 ve 4 ile ifade edilir:

$$\frac{q_{H_2}}{p_{H_2}} = k_{H_2} \quad (3)$$

$$\frac{q_{H_2O}}{p_{H_2O}} = k_{H_2O} \quad (4)$$

$q_{H_2}$  ve  $q_{H_2O}$  hidrojen ve suya ait molar akış miktarını ( $\text{kmol s}^{-1}$ ),  $p_{H_2}$  ve  $p_{H_2O}$  kısmi basınçlarını (atm),  $k_{H_2}$  ve  $k_{H_2O}$  molar sabitlerini ( $\text{kmol atm}^{-1} \text{s}^{-1}$ ) göstermektedir. İdeal gaz denklemi ( $P.V=n.R.T$ ) kullanılarak hidrojen kısmi basıncının türevi Denklem 5 ile hesaplanabilir.

$$\frac{d}{dt} p_{H_2} = \frac{RT}{V_{an}} (q_{H_2}^{in} - q_{H_2}^{out} - q_{H_2}^r) \quad (5)$$

$q_{H_2} (q_{H_2}^{in} - q_{H_2}^{out} - q_{H_2}^r)$  hidrojen mol sayısının ( $n_{H_2}$ ) türevidir. R gaz sabiti ( $1 \text{atm kmol}^{-1} \text{K}^{-1}$ ), T Kelvin cinsinden sıcaklık,  $q_{H_2}^{in}$  giriş hidrojen akışı ( $\text{kmol s}^{-1}$ ),  $q_{H_2}^{out}$  çıkış hidrojen akışı ( $\text{kmol s}^{-1}$ ),  $q_{H_2}^r$  reaksiyona giren hidrojen akışı ( $\text{kmol s}^{-1}$ ),  $V_{an}$  anot hacmidir. Hidrojen akışı ile yakıt pili akımı arasındaki ilişki 6 nolu denklemde gösterilmiştir.

$$q_{H_2}^r = \frac{N_0 I}{2F} = 2k_r I \quad (6)$$

$N_0$  yakıt pilindeki hücre sayısını, I yakıt pili akımını (A), F Faraday sabitini ( $\text{Ckmol}^{-1}$ ),  $k_r$  model sabitini ( $\text{kmol s}^{-1} \text{A}^{-1}$ ) göstermektedir. 3 ve 6. denklemler kullanılarak 5. denklem s domeninde tekrar yazılırsa 7. denklem elde edilir.

$$p_{H_2} = \frac{1}{1 + \tau_{H_2} S} (q_{H_2}^{in} - 2k_r I) \quad (7)$$

$$\tau_{H_2} = \frac{V_{an}}{k_{H_2} RT} \quad (8)$$

Denklem 7'de kullanılan  $\tau_{H_2}$  Denklem 8 ile hesaplanır. 7. denklem kullanılarak oksijen ve su için de kısmi basınç hesabı yapılabilir. Böylece 9 numaralı denklemde verilen Nernst eşitliğine ait kısmi basınç değerleri elde edilmiş olur.

$$E_{Nernst} = E_0 + \frac{R^* T}{2^* F} \ln \left( \frac{p_{H_2} \sqrt{p_{O_2}}}{p_{H_2O}} \right) \quad (9)$$

$E_{Nernst}$  termodinamik potansiyelini,  $E_0$  açık devre hücre gerilimini,  $\eta_{act,a+c}$  anot ve katod kayıplarını,  $\eta_{omik}$  omik kayıpları, R yakıt pili iç direncini ifade eder. Aktivasyon kayıpları ve omik kayıplar Denklem 10, PEM yakıt pilinde hücre gerilimi ise 11 nolu denklem ile ifade edilir. [1-3]

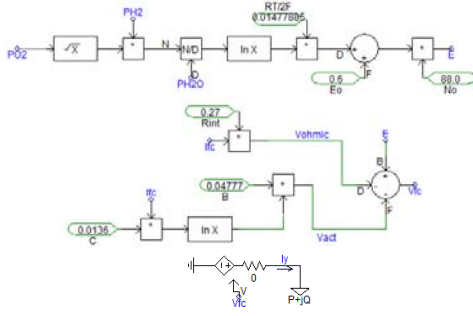
$$\eta_{act,a+c} = B^* \ln(C^* I) \quad \eta_{omik} = R^* I \quad (10)$$

$$V_{cell} = E_{Nernst} - \eta_{act,a+c} - \eta_{omik} \quad (11)$$

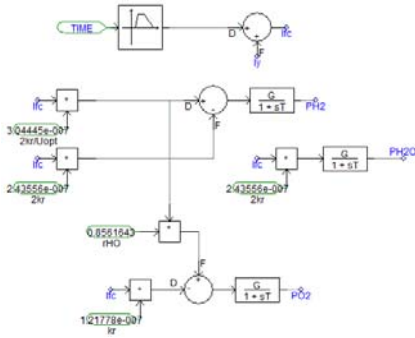
### 3. PEM yakıt pili modeli ve DC davranışı

PEM yakıt pili dinamik modeli elektrokimyasal ve termodinamik kurallara bağlı olarak Denklem 11'de verilen yakıt hücresi çıkış gerilimi kullanılarak oluşturulmuştur (Şekil 2). Yakıt pili açık devre gerilimi Denklem 9'da verilen Nernst eşitliği ile modellenmiş ve Denklem 10'da gösterilen kayıplar açık devre geriliminden çıkarılmıştır.

Nernst eşitliği ve kayıplara ait modelde yer alan akım değeri yakıt pili çıkışında bulunan yük üzerinden alınmıştır. Yakıt pili reaksiyonlarının başlaması için gerekli olan akım değeri kısa süreliğine harici olarak uygulanmış ve daha sonra yük üzerinden alınan akım geri besleme ile yakıt pilinin girişine verilmiştir. Denklem 7'de verilen  $H_2$  kısmi basıncı ve benzer şekilde hesaplanan  $O_2$  ve  $H_2O$  basınçları Şekil 3'te gösterildiği gibi modellenmiştir.

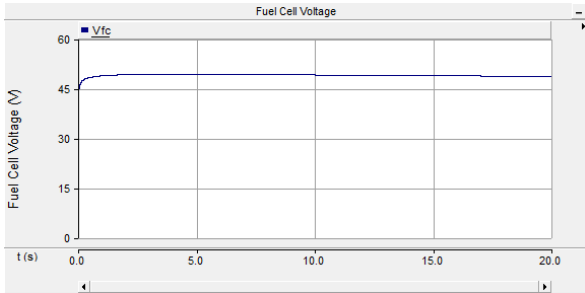


Şekil 2: PEM Yakıt Pili Modeli

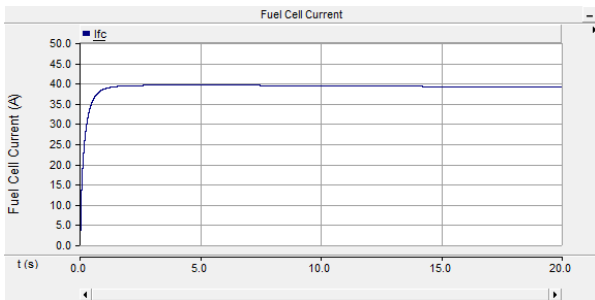


Şekil 3: PEM Yakıt Pili Modeli

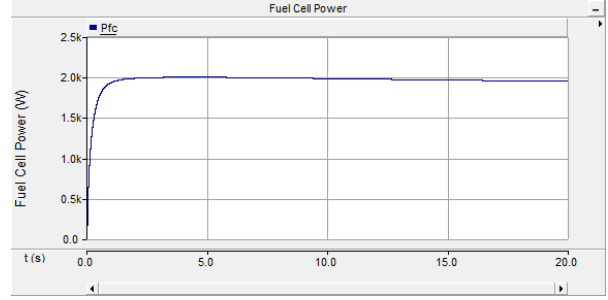
Yakıt pilinin öncelikle sabit DC yükte çalışması incelenmiş ve bu amaçla yakıt pili çıkışına 2 kW gücünde yük bağlanmıştır. Yapılan simülasyonlar sonucunda yakıt pili gerilimi (Şekil 4), yakıt pili akımı (Şekil 5) ve yakıt pili gücüne ait grafikler (Şekil 6) oluşturulmuştur. Grafiklerden görüldüğü üzere oluşturulan modele ait yakıt pili gerilimi 49.63 V olarak ölçülmüştür. Ayrıca 39.6 A akım elde edilmiş olup böylece yakıt pilinden 1.965 kW güç elde edilmiştir.



Şekil 4: Yakıt pili gerilimi



Şekil 5: Yakıt pili akımı

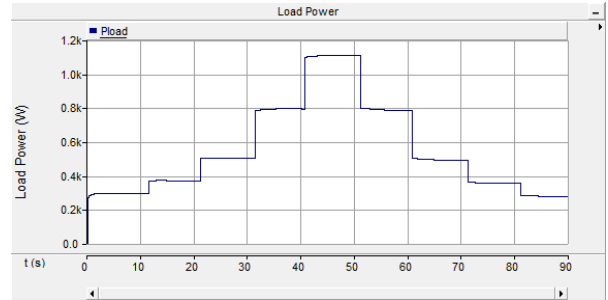


Şekil 6: Yakıt pili gücü

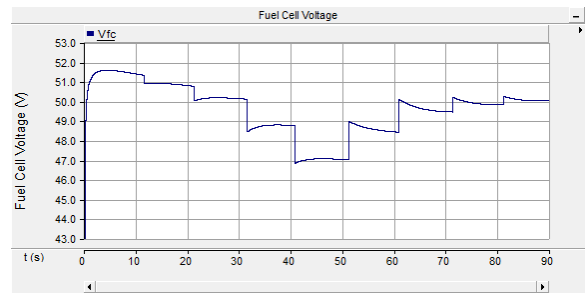
Yapılan simülasyonlarda sabit yük kullanıldığı için yakıt pili gerilimi ve akımının nominal değerlerine ulaştıktan sonra sabit bir değerde kaldığı görülmektedir. Aynı şekilde yakıt pilinden çekilen güç de sabit olduğu için güç değeri de simülasyon süresince sabit kalmıştır.

#### 4. PEM yakıt pilinin değişken yükte davranışı

Bu çalışmada yakıt pilinin, Şekil 7'de verilen yük durumları altındaki çalışması incelenmiştir. Yakıt piline 300 ile 1100 W arasında değişen yükler önce artırılarak daha sonra azaltılarak bağlanmıştır. Bu esnada yakıt pilinin gerilim değişimi Şekil 8'de gösterilmiştir. Yakıt piline bağlanan yükteki artışa bağlı olarak gerilim değeri kademeli bir düşüş sergilemektedir.

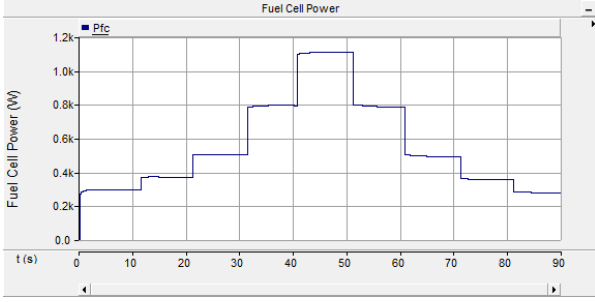


Şekil 7: Yük değişimi

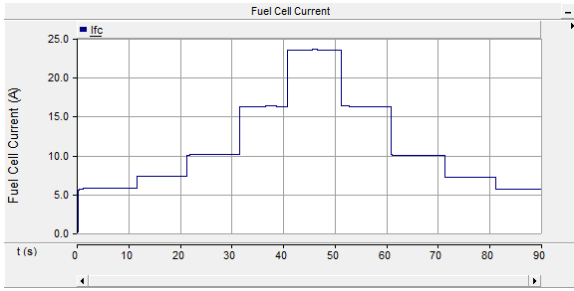


Şekil 8: Değişken yük altında yakıt pili gerilimi

Bağlanan yüke göre yakıt pilinden çekilen güç ise Şekil 9'da verilmiştir. Yakıt pilinden üretilen güç bağlanan yükle orantılı olarak değişmektedir. Yakıt pilinden üretilen güç değeriyle birlikte akım değeri de Şekil 10'da gösterildiği üzere değişim göstermektedir.



Şekil 9: Yük Değişimi Altında Yakıt Pili Gücü



Şekil 10: Yük Değişimi Altında Yakıt Pili Akımı

## 5. Sonuçlar

Yapılan çalışmada PEM yakıt piline ait dinamik model PSCAD yazılımı kullanarak oluşturulmuştur. Geliştirilen modelin DC yük davranışı incelenmiştir. İlk olarak sabit DC yük davranışı incelenmiş ve yakıt piline ait akım, gerilim ve güç değerleri gösterilmiştir. Yakıt pili çıkışına bağlanan yük değeri 2 kW olup yapılan simülasyonlar sonucunda yakıt pilinden çekilen güç değerinin de 1.965 kW olduğu görülmektedir. Daha sonra değişken DC yüke bağlı simülasyon çalışmaları yapılmış ve oluşturulan yakıt pili modelinin yük değişimine verdiği olumlu cevap gözlemlenmiştir.

## 6. Teşekkür

Bu çalışma 109R024 TÜBİTAK projesi çerçevesinde desteklenmiştir.

## 7. Kaynaklar

- [1] Padulles, J., Ault, G. W., McDonald, J. R., "An integrated SOFC plant dynamic model for power systems simulation", *Journal of Power Sources*, 86, 495-500, 2000.
- [2] El-Sharkh, M. Y., Rahman, A., Alam, M. S., Sakla, A. A., Thomas, T., "A dynamic model for a stand alone PEM fuel cell power plant for residential applications", *Journal of Power Sources*, 138, 199-204, 2004.
- [3] Mann, R. F., Amphlett, J. C., Hooper, M. A. I., Jensen, H. M., Peppley, B. A., "Development and application of a generalised steady-state electrochemical model for a PEM fuel cell", *Journal of Power Sources*, 86, 173-180, 2000.
- [4] Yalcinoz, T., Alam, M. S., "Dynamic modeling and simulation of air-breathing proton exchange membrane

fuel cell", *Journal of Power Sources*, 182, 168-174, 2008.

- [5] Uzunoglu, M., Alam, M.S., "Dynamic modeling, design and simulation of a combined PEM fuel cell and ultracapacitor system for stand-alone residential applications", *International Transactions on Energy Conversion*, 21, 767-775, 2006.
- [6] Xiao, Y., Agbossou, K., "Interface design and software development for PEM fuel cell modeling based on Matlab/Simulink environment", *World Congress on Software Engineering*, 4, 318-322, 2009.
- [7] Pasricha, S., Shaw, S. R., "A Dynamic PEM Fuel Cell Mode", *IEEE Trans. Energy Conversion*, 21, 484-490, 2006.
- [8] Pathapati, P. R., Xue, X., Tang, J., "A New Dynamic Model for Predicting Transient Phenomena in a PEM Fuel Cell System", *Renewable Energy*, 30, 1-22, 2005.
- [9] C. Wang, C., Nehrir, M. H., "Dynamic Models and Model Validation for a PEM Fuel Cells Using Electrical Circuits", *IEEE Trans. Energy Conversion*, 20, 442-451, 2005.
- [10] El-Sharkh, M. Y., Sisworahardjo, N. S., Yalcinoz, T., Alam, M.S., "Portable direct hydrogen fed PEM fuel cell model and experimental verification", *International Journal of Energy Research*, 34, 643-650, 2010.
- [11] Barbir, F., *PEM Fuel Cells: Theory and Practice*, Elsevier Academic Press, London, 2005.
- [12] Berning, T., Djilali, N., "Three-dimensional computational analysis of transport phenomena in a PEM fuel cell", *Journal of Power Sources*, 124, 440-452, 2003.
- [13] Al-Dabbagh, A.W., Lu, L., Mazza, A., "Modeling, simulation and control of a proton exchange membrane fuel cell (PEMFC) power system", *International Journal of Hydrogen Energy*, 35, 5061-5069, 2009.
- [14] Larminie, J., Dicks, A., *Fuel Cell Systems Explained*, John Wiley & Sons, England, 2003.