

# PEM YAKIT HÜCRESESİ MODELİ

**Mustafa Umut Karaođlan\***

Arş. Gör.,  
Dokuz Eylül Üniversitesi,  
Makine Mühendisliği Bölümü, İzmir  
mustafa.karaoglan@deu.edu.tr

**N. Sefa Kuralay**

Prof. Dr.,  
Dokuz Eylül Üniversitesi,  
Makine Mühendisliği Bölümü, İzmir  
kuralay@deu.edu.tr

## ÖZET

Fosil yakıt kullanımının doğurduğu olumsuz sonuçlar neticesinde, son yıllarda enerji kaynağı olarak yakıt hücrelerinin kullanımı ve geliştirilmesi üzerine çalışmalar gerçekleştirilmektedir. Yüksek egzoz emisyonuna neden olan ve düşük verimle çalışan içten yanmalı motora sahip araçlara nazaran yakıt hücresinin, özellikle otomotiv endüstrisinde kullanımı yaygınlaşmaktadır. Bu bağlamda yakıt hücresi teknolojisi, otomotiv sektöründe geleceğin güç kaynağı olarak öne çıkmaktadır. Yakıt olarak yüksek basınçta depolanan hidrojenin kullanıldığı yakıt hücreleri içerisinde en popüler olanı PEM (Proton Exchange Membrane) yakıt hücresidir. Temel termodinamik yasalarıyla ifade edilebilen, hidrojen ile oksijenin birleştirilerek su açığa çıkması ve anottan katoda elektron geçişi ile hücre voltajı elde edilmesi olayı, sistemdeki voltaj kayıplarının hesaba katılmasıyla karmaşık hale gelir. Bu sebeple, voltaj kayıpları dikkate alınarak hücre voltajının değişimi ve bunu etkileyen faktörler belirlenmelidir.

**Anahtar Kelimeler:** Yakıt hücresi, PEM, hücre modellemesi

# MODEL OF PEM FUEL CELL

## ABSTRACT

As a result of negative consequences of fossil fuel usage, many research and developments have been done in recent years on fuel cells as an energy source. Compared to the conventional vehicles that have low efficient internal combustion engine and high exhaust emission, fuel cells take places commonly in especially automotive industry. In this context, fuel cell technology is pioneer power source of future in automotive sector. Most popular fuel cell type is PEM (Proton Exchange Membrane) in fuel cells that use hydrogen in high pressure storage as fuel. The circumstance of combining hydrogen and oxygen, electron transfer between anode and cathode that explained by basic thermodynamic laws, calculation transforms complicated with considering voltage drops in fuel cell. For this reason, cell voltage changes and the factors that effect the voltage changes should be determined taking into account the voltage drops.

**Keywords:** Fuel cell, PEM, cell modeling

\* İletişim yazarı

Geliş tarihi : 11.07.2014

Kabul tarihi : 22.09.2014

Karaođlan, M. U., Kuralay, N. S. 2014. "PEM Yakıt Hücresi Modeli," Mühendis ve Makina, cilt 55, sayı 657, s. 51-58.

## 1. GİRİŞ

PEM (Proton Exchange Membrane) yakıt hücresi 1960'larda NASA'nın uzay araçlarında kullanması için Amerika'da geliştirilmiştir. Yakıt olarak saf hidrojen ile oksidan olarak oksijen veya hava kullanılan PEM yakıt hücresinde, elektrolit olarak da katı polimer membran kullanılır. Polimer membran Nafion (Dupont®) ürünü olan perfluorosülfonik asittir. Asidik özellikli bu membran ile hidrojen iyonları veya protonlar taşınır [1, 3, 8].

60-100 °C arasında çalışan ve güç yoğunluğu 0,35-0,6 W/cm<sup>2</sup> olan yakıt hücresi, Elektrikli Araç (EA) veya Hibrit Elektrikli Araç (HEA) uygulamalarında bazı kesin avantajlara sahiptir. EA ve HEA'larda öncelikle istenilen özellik, düşük sıcaklık çalışma bölgesi ve buna bağlı olarak hızlı çalışmasıdır. Ayrıca PEM yakıt hücresi diğer uygun yakıt hücresi tipleri arasında güç yoğunluğu en yüksek olandır. Yüksek güç yoğunluğu, talep edilen güç ihtiyacına göre, kullanılacak yakıt hücresinin daha küçük boyutta olmasına olanak sağlamaktadır. Bunların yanında, membranın pahalı olması ve katalist ile membranın kolayca zehirlenmeye yol açması dezavantajları arasındadır [8].

Polimer elektrolit membran karbon destekli bir katalizör ile kaplıdır. Bu katalizör, karışma noktasını maksimize etmek için direkt olarak difüzyon tabakası ve elektrolit ile bağlıdır. Katalizör, elektrotu oluşturur ve katalizör tabakasının üzeri difüzyon tabakasıdır. Elektrolit, katalizör tabakası, gaz difüzyon tabakası gibi elemanlara topluca membran-elektrolit düzeneği (MEA) adı verilir.

Katalizör, PEM yakıt hücresi için kritik öneme sahiptir. Yakıt hücresinin düşük çalışma sıcaklığı ve elektrolitin asidik yapısı, katalizör tabakasında soy metal kullanımını gerekli kılar. Önceki uygulamalarda yakıt hücresinin düzgün çalışabilmesi için katalizör olarak yüksek miktarda platin kullanmak gerekliydi. Katalizör teknolojisindeki önemli gelişmeler ile kullanılan platin miktarını santimetre kare başına 28 mg'dan 0,2 mg'a düşürmek mümkün hale gelmiştir. Platin katalizör son derece aktif olup, bu sayede yüksek performans sağlamaktadır. Aktifliğinin fazla olması nedeniyle, oksijenden daha fazla karbon monoksit ve sülfür üretme eğilimi içerisindedir. Zehirlenmeyi oluşturan bu ürünler, katalizöre kuvvetle bağlanabilmekte ve hidrojen ve oksijenin buraya ulaşmasını engellemektedir. Bununla birlikte, elektrot reaksiyonları zehirlenmenin olduğu bölgelerde gerçekleşemez ve yakıt hücresi performansı azalır. Ayrıca karbon monoksit, havanın atmosferden pompalan-

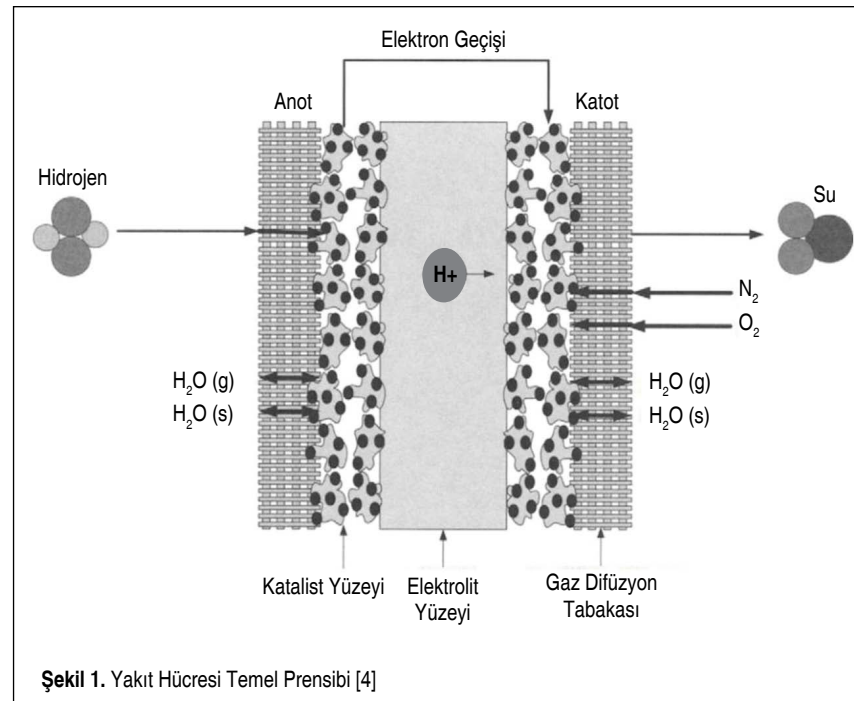
dığı durumlarda hava akımından da yakıt hücresine girebilir. Karbon monoksit bazlı zehirlenmeler geri dönüşümü mümkün olabilen türde bir zehirlenmedir; fakat her bir hücrenin tek tek tedavisinin gerektiği gibi maliyeti de yüksektir [8].

PEM yakıt hücresi uygulamalarında düzgün bir çalışma rejimi sağlamak ve yakıt hücresi çalışma sıcaklığını istenen seviyede tutmak için polimer membranın nemli halde tutulması gerekmektedir. Eğer membran çok kuru kalırsa, protonları taşıyacak yeterli miktarda asidik iyon bulunamayacaktır. Bu sebeple yakıt hücresi uygulamalarında nem ihtiyacını karşılamak için harici bir nemlendirici kullanılmaktadır. Buna karşın membranın çok nemli olması halinde, difüzyon tabakasının gözenekleri bloke olur ve tepkime gazları katalizöre ulaşmayı başaramaz.

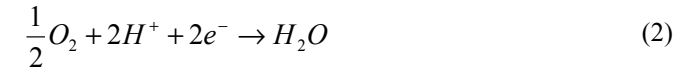
## 2. YAKIT HÜCRELERİ TEMEL ÇALIŞMA PRENSİBİ

Yakıt hücresi, kullanılan yakıttan aldığı kimyasal enerjiyi direkt olarak elektrokimyasal proseslerle elektrik enerjisine çevirir. Yakıt ve oksijen, sürekli olarak reaksiyonun gerçekleştiği yakıt hücresinin iki ayrı elektrotuna gönderilir. Elektrotlar arasında bulunan elektrolitte ise yakıt (hidrojen) beslemesinin yapıldığı anottan oksijenin bulunduğu katoda doğru bir iyon geçişi gerçekleşir (Şekil 1).

Hidrojen gazı anot üzerinden geçerken hava da katot üzerinden geçmektedir. Elektrolit ise pozitif iyonların geçmesine izin veren ve elektronların geçmesini engelleyen özellikte olmalıdır. Anotta (1) ve katotta (2) oluşan reaksiyon aşağıdaki gibidir:



Şekil 1. Yakıt Hücresi Temel Prensibi [4]



Elektronlar, elektrik devresine akarken hidrojen protonları da elektrolite doğru akar. Hidrojen protonları ile elektronların katotta oksijen akışı ile birleşmesiyle su oluşurken, atık ısı ve elektrik enerjisi açığa çıkar. Yakıt hücresindeki reaksiyonlar ile elde edilen termodinamik voltaj, açığa çıkan enerji ve reaksiyon sonucu katoda geçen elektron sayısı ile ilgilidir. Yakıt hücresinde gerçekleşen reaksiyon sonucu oluşan enerji, Gibbs Serbest Enerjisi'ndeki değişimle ifade edilir. Serbest enerji değişimi ( $G_0$ ), sabit sıcaklık ve basınçtaki reaksiyon için maksimum elektrik işinin ( $W_{elk}$ ) ölçüsüdür [3, 6].

$$W_{elk} = G_0 \quad (3)$$

Bu bağıntı basınç ve sıcaklığın sabit olduğu durumlar için geçerli olmaktadır. Entalpi (H) ve entropi (S) değişimine bağlı olarak farklı sıcaklıklar (T) için serbest enerji değişimi şöyledir:

$$G_0 = \Delta H - T \cdot \Delta S \quad (4)$$

Elde edilen elektriksel iş, elektronların taşınması ile oluşan şarj miktarı  $Q$  (coulomb) olmak üzere, sistemdeki elektrik potansiyel farkına ( $V_r$ ) eşittir. Bir mol için taşınan elektron sayısı  $n=2$  (denklem 1) ve Faraday Sabiti (F) 96485 olduğuna göre [6];

$$W_{elk} = V_r \cdot Q \quad (5)$$

$$Q = n \cdot F \quad (6)$$

$$G_0 = -n \cdot F \cdot V_r \quad (7)$$

$$V_r = -\frac{\Delta H - T \cdot \Delta S}{n \cdot F} \quad (8)$$

Standart basınç ve sıcaklıkta yakıt hücresinden elde edilecek en yüksek voltaj değeri yukarıdaki eşitlikten (denklem 8) yararlanılarak hesaplanabilir. Sıvı haldeki su için  $G_0$  değeri -237.3 kJ/mol alınmasıyla, 1.229 V değeri bir hücre voltajı olarak elde edilir. Bu değer, yakıt hücrelerde 0.8 ile 1.5 V aralığındadır. Otomotiv sektörü gibi alanlarda yüksek voltaj gereksinimini karşılamak için, her hücre seri bağlanmak suretiyle, çok sayıda yakıt hücresine ihtiyaç vardır [6].

Yakıt hücreleri atmosfer basıncının üzerinde çalışması durumunda daha avantajlı olmaktadır. Hidrojen ve havanın yakıt hücresine gönderilmesi 3-6 bar civarında gerçekleşir. Molar hacim  $V_m$  (m<sup>3</sup>/mol) olmak üzere basınca (P) bağlı Gibbs Serbest Enerjisi:

$$dG = V_m \cdot dP \quad (9)$$

$$p \cdot V_m = R \cdot T \quad (10)$$

$$dG = R \cdot T \cdot \frac{dP}{P} \quad (11)$$

$$G = G_0 + R \cdot T \cdot \ln\left(\frac{P}{P_0}\right) \quad (12)$$

Standart basınç ( $P_0$ ) ve sıcaklıktaki (25 °C ve 1 atm) Gibbs Serbest Enerjisi  $G_0$  olmak üzere Nerst eşitliği, denklem 1 ve 2'deki reaksiyon ifadelerine göre uygulanırsa, reaksiyona girenlerin ve oluşan ürünün ( $H_2O$ ) kısmi basınçları cinsinden Gibbs Serbest Enerjisi:

$$G = G_0 + R \cdot T \cdot \ln\left(\frac{P_{H_2} \cdot P_{O_2}^{0.5}}{P_{H_2O}}\right) \quad (13)$$

Bu ifade ile hücre voltajı, basınç ve sıcaklığın fonksiyonu olarak aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$V(T, P) = \left(\frac{\Delta H}{n \cdot F} - \frac{T \cdot \Delta S}{n \cdot F}\right) + R \cdot T \cdot \ln\left(\frac{P_{H_2} \cdot P_{O_2}^{0.5}}{P_{H_2O}}\right) \quad (14)$$

Bir yakıt hücresinde voltaj kayıpları olmadan, hidrojenin kimyasal enerjisi sonucu ortaya çıkan ideal hücre voltajından yakıt geçişine bağlı voltaj kaybının çıkarılması ile elde edilen hücre açık devre voltajı, basınç ve sıcaklığın fonksiyonu olarak Nerst Voltajı (denklem 15) şeklinde ifade edilir.

$$V_{Nerst} = -\frac{G_0}{2 \cdot F} - \frac{R \cdot T}{2 \cdot F} \cdot \ln\left(\frac{P_{H_2O}}{P_{H_2} \cdot P_{O_2}^{0.5}}\right) \quad (15)$$

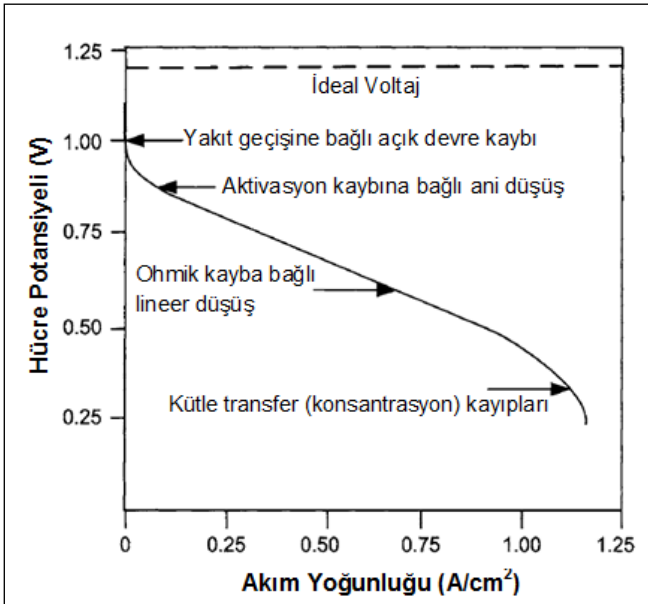
## 3. YAKIT HÜCRESİNDE MEYDANA GELEN VOLTAJ KAYIPLARI

Yakıt hücresi çalışma voltajı, akım yoğunluğu ve sıcaklığa bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Yakıt hücreleri için karakteristik olarak sadece akım kullanılması yerine, farklı büyüklükte hücreleri daha kolay kıyaslamak adına akım yoğunluğu (A/cm<sup>2</sup>) ifadesi kullanılır. Alan ifadesi ile yakıt hücresi yüzey alanı kastedilmektedir. Yakıt hücresinin voltaj-akım yoğunluğu karakteristiği Şekil 2'deki gibidir.

Hücre açık devre voltajı, akım yoğunluğunun fonksiyonu olarak değişiklik göstermektedir. Aktivasyon kayıpları, ohmik kayıplar ve konsantrasyon kayıpları, hücre potansiyelinin azalmasına sebep olan faktörlerdir.

Elektrot yüzeylerinde kimyasal reaksiyonun yavaşlamasından kaynaklanan aktivasyon kayıpları ( $V_{akt}$ ), iyonların geçişi sırasında elektrolit sıvısının direnci nedeniyle meydana gelen ohmik kayıplar ( $V_{ohm}$ ) ve elektrot yüzeyinde hidrojen konsantrasyonu düşüşünden kaynaklanan konsantrasyon kayıp-





Şekil 2. Yakıt Hücresinin Voltaj-Akım Yoğunluğu Karakteristiği

ları ( $V_{kon}$ ) sonucu toplam kayıplar, ( $V_K$ ) olmak üzere hücre voltajı ( $V$ ):

$$V_K = V_{akt} + V_{ohm} + V_{kon} \quad (16)$$

### 3.1 Aktivasyon Kayıpları

Gerçekleşen reaksiyonun yavaşlaması sonucu oluşan aktivasyon kayıpları, Tafel Eşitliği ile ifade edilmektedir (17). Doğal logaritmanın başındaki sabit bir katsayı olup, elektro-

kimyasal reaksiyonun yavaş olduğu durumlarda yüksek değer almaktadır.  $I_0$  değeri akım yoğunluk değişimini ifade etmektedir. Akım yoğunluğunun ( $I$ ) akım yoğunluk değişiminden büyük olduğu durumlar için Tafel Eşitliği geçerli olmaktadır. Transfer katsayısı  $\alpha$  ise 0 ile 1 arasında değişen bir katsayıdır. Anotta bu değer 0.5 civarında olup, katotta ise 0.1 ile 0.5 arasındadır [6].

$$V_{akt} = \frac{R \cdot T}{n \cdot \alpha \cdot F} \cdot \ln \left( \frac{I}{I_0} \right) \quad (17)$$

Katotta akım yoğunluk değişiminin düşük olması aktivasyon kayıplarının temel nedenidir. Aktivasyon kayıplarının azaltılması adına, elektrotta Pt ya da Pd gibi katalizörlerin kullanılması, akım yoğunluk değişiminin artmasını sağlamaktadır. Bunun yanında, akım yoğunluğu ve sıcaklığın artması da aktivasyon kayıplarının artmasına neden olmaktadır (Şekil 3).

### 3.2 Ohmik Kayıplar

Elektrolit sıvısının iyon geçişine karşı direnci ohmik kayıpları oluşturmaktadır. Bu dirençler, iyonik ( $R_{ion}$ ) ve elektronik ( $R_{elk}$ ) dirençlerden ibarettir. İyonik direnç, elektrolitin iyon geçirme direncini ifade ederken, elektronik direnç de katalist yüzeyi, gaz difüzyon yüzeyi gibi diğer bütün elemanların dirençlerini kapsayan toplam elektrik direncini ifade eder.

$$V_{ohm} = i \cdot R_{ohm} = i \cdot (R_{elk} + R_{ion}) \quad (18)$$

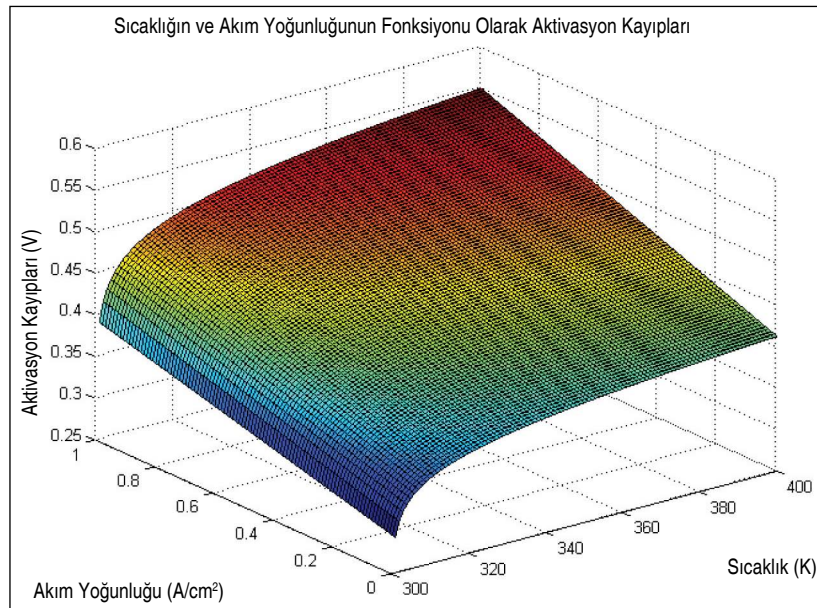
Elektrolitin iletkenliği ( $\sigma$ ) ve elektrolit kalınlığı ( $L_{elekt}$ ) göz önüne alınarak, elektrolit yüzey alanı  $A_{elekt}$  olmak üzere, akım yoğunluğu ( $I$ ) ve hücre akımı ( $i$ ) kapsayan eşitlik aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$\sigma = \frac{i}{R_{ohm}} \quad (19)$$

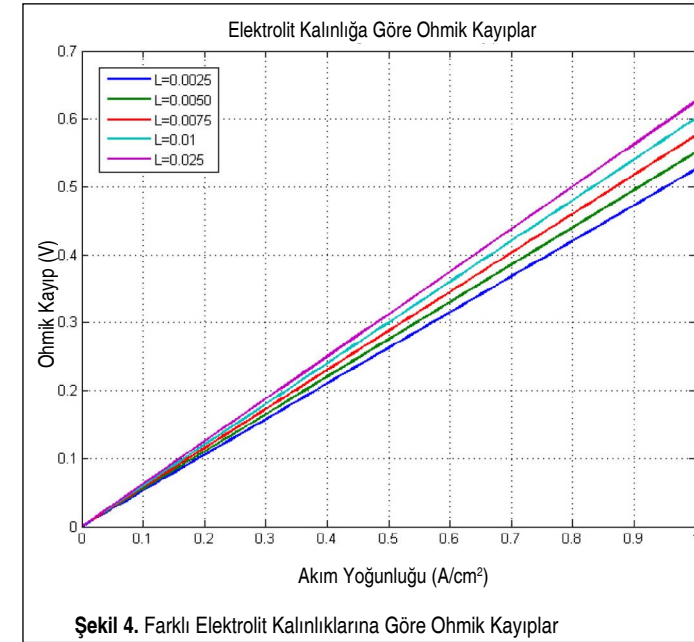
$$R_{ion} = \frac{L_{elekt}}{\sigma \cdot A_{elekt}} \quad (20)$$

$$i = I \cdot A_{elekt} \quad (21)$$

Ohmik kayıpların azaltılması için, yüksek iletkenliğe sahip elektrotların kullanılması ve elektrolit kalınlığının düşük olması gerekmektedir. Elektrolit içerisindeki akışkanın sirkülasyonunun gerçekleşebilmesi için elektrolit kalınlığının çok fazla düşürmek olanaksızdır. Elektrolit kalınlıklarının ( $L$ -cm) artmasıyla birlikte ohmik kayıplar, lineer olarak artış göstermektedir (Şekil 4).



Şekil 3. Sıcaklık ve Akım Yoğunluğuna Bağlı Olarak Aktivasyon Kayıplarının Değişimi



Şekil 4. Farklı Elektrolit Kalınlıklarına Göre Ohmik Kayıplar

Elektrolit yüzey alanı ve akım yoğunluğunun artması ohmik kayıpları arttıran diğer temel etmenlerdir. Bu parametrelere

göre ohmik kayıpların değişimi de aşağıdaki gibi olmaktadır (Şekil 5).

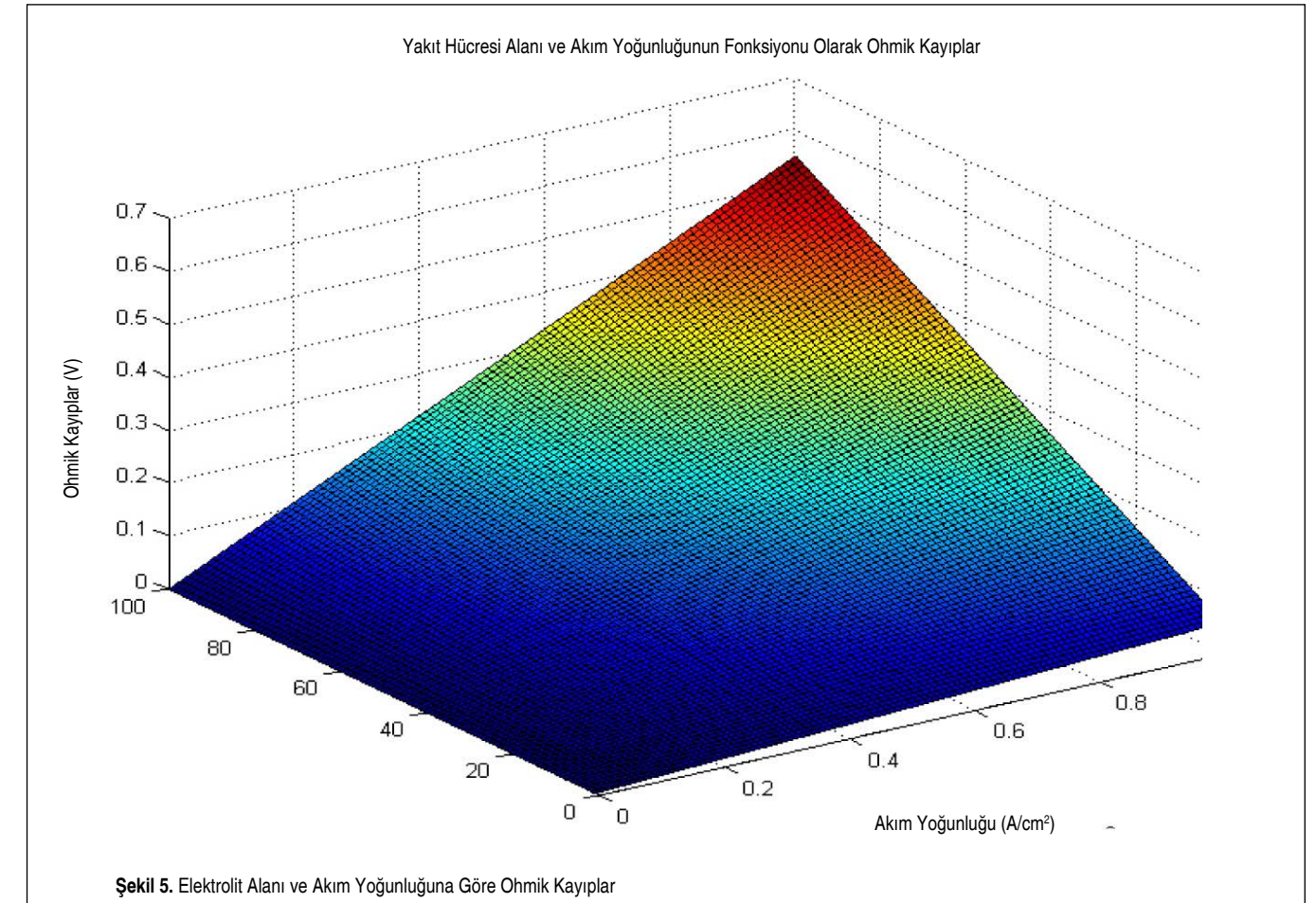
### 3.3 Konsantrasyon Kayıpları

Anot akış kanalında,  $C_0$  konsantrasyonundaki ( $\text{mol/m}^3$ ) hidrojen, taşınım yoluyla elektrot yüzeyine taşınmaktadır (Şekil 6).

Elektrot yüzeyindeki hidrojen konsantrasyonu  $C_s$  ve kütle transfer katsayısı  $h_m$  olmak üzere taşınan hidrojen kütlesi:

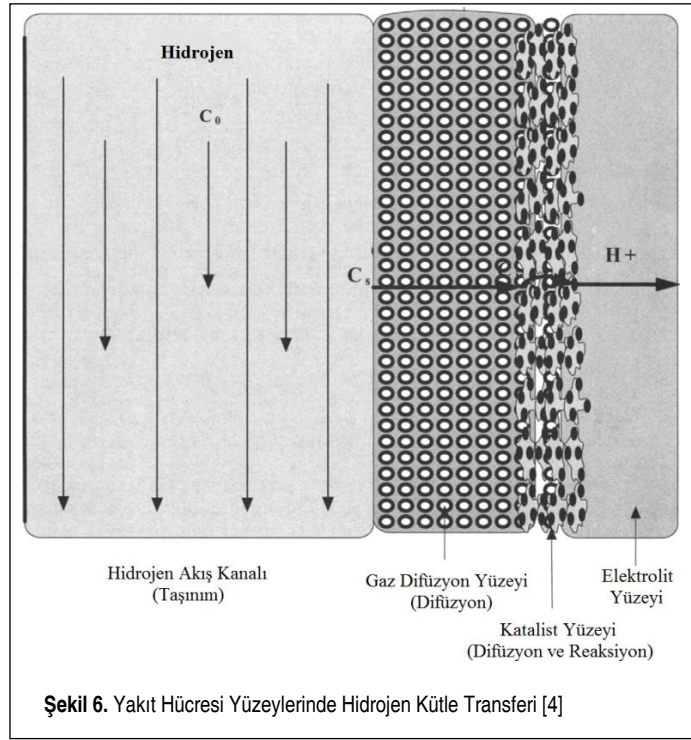
$$\dot{m} = A_{elekt} \cdot h_m \cdot (C_0 - C_s) \quad (22)$$

Gaz difüzyon yüzeyi ve katalist yüzeyinde meydana gelen difüzyon akışı ile kütle transferi bu bölgelerde mikro seviyede gerçekleşir. Katalist yüzeyinde meydana gelen elektro kimyasal reaksiyonlar, hidrojenin konsantrasyonunun azalmasına ve konsantrasyon kayıplarının meydana gelmesine neden olur. Hidrojen kaybı ayrıca aktivasyon kayıplarına da yol açmaktadır. Kalınlığı  $\delta$  olan gaz difüzyon tabakası ile katalist yüzeyindeki hidrojen konsantrasyonu  $C_i$  ve gözenekli gaz difüzyon tabakası için difüzyon katsayısı  $D_c$  olmak üzere hidrojen kütlesi ve akım yoğunluğu:



Şekil 5. Elektrolit Alanı ve Akım Yoğunluğuna Göre Ohmik Kayıplar





Şekil 6. Yakıt Hücresi Yüzeylerinde Hidrojen Kütle Transferi [4]

$$\dot{m} = \frac{C_0 - C_i}{\left( \frac{1}{h_m \cdot A_{elekt}} + \frac{\delta}{D_e \cdot A_{elekt}} \right)} \quad (23)$$

$$I = \frac{n \cdot F \cdot \dot{m}}{A_{elekt}} \quad (24)$$

$$I = -n \cdot F \cdot \frac{C_0 - C_i}{\left( \frac{1}{h_m} + \frac{\delta}{D_e} \right)} \quad (25)$$

Gaz difüzyon ve katalist yüzeyindeki hidrojen miktarı,  $I$ ,  $\delta$  ve  $D_e$  gibi parametrelere bağlı olarak hidrojen akış kanalı konsantrasyonundan daha düşüktür. Akım yoğunluğunun artmasıyla konsantrasyon kayıpları da artmaktadır. Akım yoğunluğu limiti ( $I_L$ ), akım yoğunluğunun çok büyük ve hidrojen konsantrasyonunun sıfıra düşmesiyle meydana gelir. Katalist yüzeyindeki hidrojen konsantrasyonunun sıfır olması durumunda akım yoğunluğu limiti:

$$I_L = -n \cdot F \cdot \frac{C_0}{\left( \frac{1}{h_m} + \frac{\delta}{D_e} \right)} \quad (26)$$

Bu durumda konsantrasyon kaybı ( $V_{kon}$ ):

$$V_{kon} = \frac{R \cdot T}{n \cdot F} \cdot \ln \frac{C_0}{C_i} \quad (27)$$

Aynı şekilde akım yoğunluğu limiti cinsinden yazıldığı takdirde konsantrasyon kaybı:

$$V_{kon} = \frac{R \cdot T}{n \cdot F} \cdot \ln \left( \frac{I_L}{I_L - I} \right) \quad (28)$$

#### 4. HÜCRE VOLTAJİ VE GÜCÜ

Hücre, açık devre voltajından kayıp voltajların çıkarılmasıyla, yakıt hücresinin akım yoğunluğuna bağlı olarak çıkış voltajı eğrisi elde edilebilir (29). Polarizasyon eğrisi olarak da bilinen bu eğri, yakıt hücresinin karakteristiğini ifade etmek için kullanılır. Aşağıdaki tabloda hesaplamada kullanılan yakıt hücresi parametreleri gösterilmektedir.

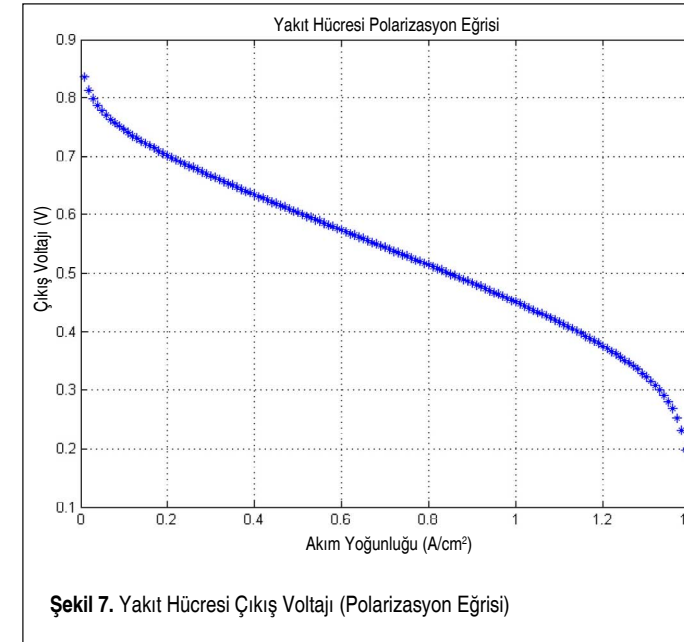
$$V = V_{Nerst} - V_K \quad (29)$$

Tablo 1. Hesaplamalarda Kullanılan Parametreler

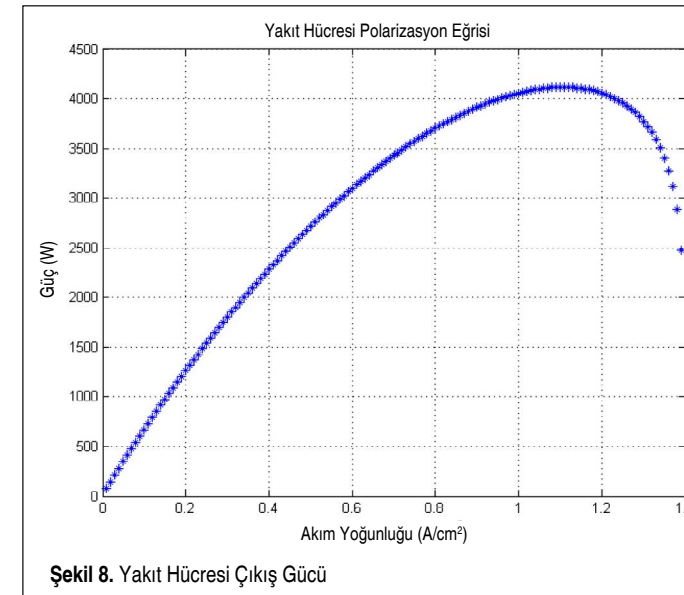
Sembol	Parametre	Değer	Birim
R	İdeal Gaz Sabiti	8.314	J/mol.K
F	Faraday Sabiti	96487	C
T	Çalışma Sıcaklığı	80	°C
$P_{H_2O}$	Suyun Doyma Kısmi Basıncı	2.03	atm
$P_{H_2}$	Hidrojen Kısmi Basıncı	1.265	atm
$P_{O_2}$	Oksijen Kısmi Basıncı	2.527	atm
$n_h$	Hücre Sayısı	90	-
$A_h$	Hücre Yüzey Alanı	100	cm <sup>2</sup>
$R_{ohm}$	Elektrolit İç Direnci	0.19	Ohm/cm <sup>2</sup>
$\alpha$	Transfer Katsayısı	0.5	-
$I_0$	Akım Yoğunluk Değişimi	$10^{6.912}$	A/cm <sup>2</sup>
$I_L$	Akım Yoğunluk Limiti	1.4	A/cm <sup>2</sup>
$\sigma$	Elektrolit İletkenliği	0.1	$\Omega \cdot cm^{-1}$
$L_{elekt}$	Elektrolit Kalınlığı	0.005	cm

Voltaj karakteristiği non-linner bir yapıya sahip olan yakıt hücresi, yukarıda da değinildiği gibi hücre sıcaklığı, membran kalınlığı, hidrojen ve oksijenin kısmi basınçları gibi parametrelere bağlıdır. Voltaj kayıplarının dikkate alınmasıyla yakıt hücresi çıkış voltajı Şekil 7'deki gibidir.

Yakıt hücresi çıkış voltajı, akımın artmasıyla azalmaktadır. Genellikle 70-80 °C sıcaklık aralığında çalışan PEM yakıt hücreleri, hidrojen ve hava basıncının 3-5 atm civarında yapılmasıyla iyi performans gösterir.



Şekil 7. Yakıt Hücresi Çıkış Voltajı (Polarizasyon Eğrisi)



Şekil 8. Yakıt Hücresi Çıkış Gücü

Yakıt hücresinin çıkış voltajına göre çıkış gücü, kullanılan hücre sayısına hesaplanabilir. Hücrelerin seri olarak bağlanmasıyla çıkış gücü artırılabilir. Burada  $n_h$  hücre sayısı;  $A_h$  hücre yüzey alanı olmak üzere akım yoğunluğuna göre yakıt hücresi gücü ( $P$ ) hesaplanarak grafiği Şekil 8'deki gibi çizdirilir.

$$P = V \cdot n_h \cdot A_h \cdot I \quad (30)$$

#### 5. SONUÇ

Yakıt hücresinin gerilim değişimini tahmin etmek ve yakıt hücresi sistemlerinin performansını geliştirmek için değişime neden olan faktörlerin belirlenmesi gerekmektedir. Yakıt

hücresi performansını doğrudan etkileyen voltaj kayıplarının oluşum parametreleri ve etkileri göz önüne alınarak yakıt hücresi çıkış voltajı ve gücü hesaplanmıştır. Yakıt hücresi veriminin, hücrede meydana gelen voltaj kayıpları nedeniyle düşmesi neticesinde yakıt hücresi voltajı eğrisi, verim eğrisi ile aynı karakteristiktir. Yakıt hücresi veriminin geliştirilmesi ve yapılacak AR-GE faaliyetleri ile ülkemizde yakıt hücresinin kullanımının yaygınlaşması sonucu temiz ve yüksek verimli enerji ihtiyacı giderilebilir. Günümüzde artan çevre bilinci sonucunda, temiz ve verimli yakıt kullanımının yaygınlaştırılması, hidrojen yakıtının ve yakıt hücrelerinin önemini arttırmıştır. Başta otomotiv endüstrisi olmak üzere, enerji ihtiyacının fazla olduğu alanlarda yakıt hücrelerinin kullanımına yönelik çalışma ve araştırmalar devam etmektedir.

#### SEMBOLLER

$W_{elk}$  : Maksimum elektrik işi, kJ

$G_0$  : Serbest enerji değişimi, kJ

$H$  : Entalpi, kJ

$S$  : Entropi kJ/K

$T$  : Yakıt hücresi sıcaklığı, K

$Q$  : Sistem potansiyeli, coulomb

$V_r$  : Elektriksel potansiyel farkı, V

$n$  : Taşınan elektronların mol sayısı

$F$  : Faraday sabiti

$V_m$  : Molar hacim, m<sup>3</sup>mol<sup>-1</sup>

$P_0$  : Standart basınç Nm<sup>-2</sup>

$G$  : Gibbs serbest enerjisi, kJ

$V_{Nerst}$  : Nerst voltajı, V

$V_K$  : Toplam voltaj kaybı, V

$V_{akt}$  : Aktivasyon kaybı, V

$V_{ohm}$  : Ohmik kaybı, V

$V_{kon}$  : Konsantrasyon kaybı, V

$I$  : Akım yoğunluğu, Acm<sup>-2</sup>

$I_0$  : Akım yoğunluğu değişimi, Acm<sup>-2</sup>

$\alpha$  : Transfer katsayısı

$i$  : Akım, A

$R$  : Evrensel gaz sabiti, Jk<sup>-1</sup>mol<sup>-1</sup>

$R_{ohm}$  : Ohmik direnç,  $\Omega cm^2$

- $R_{\text{elk}}$  : Elektronik direnç,  $\Omega\text{cm}^2$   
 $R_{\text{ion}}$  : İyonik direnç,  $\Omega\text{cm}^2$   
 $\sigma$  : Elektrolit iletkenliği,  $\Omega^{-1}\text{cm}^{-1}$   
 $L_{\text{elkt}}$  : Elektrolit kalınlığı, cm  
 $C_0$  : Anot akış kanalındaki hidrojen konsantrasyonu,  $\text{molm}^{-3}$   
 $C_s$  : Elektrod yüzeyindeki hidrojen konsantrasyonu,  $\text{molm}^{-3}$   
 $h_m$  : Kütle transfer katsayısı  
 $m$  : Hidrojen kütlesi, kg  
 $A_{\text{elek}}$  : Elektrod yüzey alanı,  $\text{cm}^2$   
 $D_e$  : Difüzyon katsayısı  
 $C_i$  : Gaz difüzyon tabakası ile katalist yüzeyi arasındaki hidrojen konsantrasyonu,  $\text{molm}^{-3}$   
 $\delta$  : Gaz difüzyon tabakası kalınlığı, cm  
 $I_L$  : Limit akım yoğunluğu,  $\text{Acm}^{-2}$   
 $A_h$  : Yakıt hücresi yüzey alanı,  $\text{cm}^2$   
 $n_h$  : Yakıt hücresi sayısı  
 $P$  : Yakıt hücresi gücü, W

### Kısaltmalar

- PEM : Proton Exchange Membrane  
 EA : Elektrikli Araç  
 HEA : Hibrit Elektrikli Araç  
 MEA : Membrane Electrode Assembly

## KAYNAKÇA

1. **Kuralay, N. S.** 2013. Motorlu Taşıtlarda Hibrit Tahrik, ISBN: 978-605-01-0439-4, MMO/598, TMMOB MMO Yayını, İzmir.
2. **Hodkinson, R., Fenton J.** 2001. Lightweight Electric/ Hybrid Vehicle Design, ISBN: 0-7506-5092-3, Butterworth-Heinemann Press, UK.
3. **Larminie, J., Dicks, A.** 2003. Fuel Cell Systems Explained, ISBN: 0-470-84857-X, Wiley Press, UK.
4. **Spiegel, C.** 2008. PEM Fuel Cell Modeling and Simulation Using Matlab, ISBN: 978-0123742599, USA.
5. **Larminie, J., Lowry, J.** 2003. Electric Vehicle Technology Explained, ISBN: 0-470-85163-5, John Wiley & Sons Press, UK.
6. **Spiegel, C.** 2008. "Mathematical Modeling of Polymer Exchange Membrane Fuel Cells," Doktora Tezi, University of South Florida, Florida, USA.
7. **Mi, C., Masrur, M. A., Gao, D. W.** 2011. Hybrid Electric Vehicles Principles and Applications with Practical Perspectives, ISBN: 978-0-470-74773-5, Wiley Publication, USA
8. **Ehsani, M., Gao Y., Emadi A.** 2010. Modern Electric, Hybrid Electric and Fuel Cell Vehicles Fundamentals, Theory and Design, ISBN: 978-1-4200-5398, CRC Press, USA
9. **Ural, Z., Gümüş, B., Gençoğlu, M. T.** 2007. "Bir Yakıt Pili Sisteminin Matlab ile Modellenmesi," IV. Yenilenebilir Enerji Kaynakları Sempozyumu, 1-2 Kasım 2007, Gaziantep.
10. **Khan, F., Nawaz, A., Muhammed, M. A., Khadim, M. A.** 2013. "Review and Analysis of Matlab Simulink Model of PEM Fuel Cell Stack," International Journal of Engineering & Computer Science, vol. 13, no. 03, p. 31-34.
11. **Ural, Z., Gencoglu, M. T.** 2010. "Mathematical Models of PEM Fuel Cells," 5. International Egen Energy Symposium and Exhibition, 27-30 Haziran 2010, Denizli.
12. **Seyezhai, R., Mathur, B. L.** 2011. "Mathematical Modeling of Proton Exchange Membrane Fuel Cell," Internaional Journal of Computer Applications, vol. 20, no. 5.
13. **Fuhs, A. E.** 2009. Hybrid Vehicles and the Future of Personal Transportation, ISBN: 978-4200-7534-2, CRC Press, USA.
14. **Bocarsly, A., Mingos, D. M. P.** 2011. Fuel Cells and Hydrogen Storage, ISBN: 978-3-642-21779-1, Springer, USA.
15. **Şenol, R., Üçgül, İ., Acar, M.** 2006. "Yakıt Pili Teknolojilerindeki Gelişmeler ve Taşıtlara Uygulanabilirliğinin İncelenmesi," Mühendis ve Makine, cilt: 47, sayı: 563, s. 37-50.
16. **Becerikli, F.** 2011. "Yüksek Basınçlı PEM (Proton Exchange Membran) Elektrolizör Geliştirilmesi ve Çalışma Parametrelerinin Performansa Etkisi," Yüksek Lisans Tezi, Niğde Üniversitesi, Niğde.