

PEM YAKIT PİLİNİN SİMULİNK MODELİ ve ANALİZİ

*Gürsel ŞEFKAT **
*Mert Ali ÖZEL **

Alınma:02.03.2018; düzeltme:09.07.2018; kabul:30.07.2018

Öz: PEM (Proton Değiştirici Membran) yakıt pilleri; düşük çalışma sıcaklıkları, yüksek güç yoğunlukları ve yüksek enerji dönüşüm verimlerinden dolayı otomobiller ve sabit uygulamalar için potansiyel bir güç kaynağı olarak oldukça dikkat çekmektedir. PEM yakıt pilinin verimliliğinin artırılması ve iyileştirilmesi adına matematiksel modelleri oluşturularak sayısal veriler yardımıyla daha uygun yakıt pili tasarımları yapılabilmektedir. Bu çalışmada, prototip araç için tasarlanacak PEM yakıt pili sistemi, MATLAB Simulink programı yardımıyla modellenmiş, benzetimi yapılmış ve sonuçları sunulmuştur. Yakıt pili sistem modeli; membran içi akış modelleri, gerilim üretimi ve kayıplarının modellenmesi ile yapılmıştır. Analiz edilen parametreler iki ve üç boyutlu grafikler halinde sunularak sonuçların tartışılmasına olanak sağlanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Hidrojen Enerjisi, Yakıt Pili, Simulink.

Simulink Model and Analysis of PEM Fuel Cell

Abstract: PEM (Proton Exchange Membrane) fuel cells; due to its low operating temperatures, high power densities and high energy conversion efficiencies, it attracts considerable attention as a potential power source for automobiles and stationary applications. In order to improve and improve the efficiency of the PEM fuel cell, mathematical models can be created and more suitable fuel cell designs can be made with the help of numerical data. In this study, the PEM fuel system which will design for prototype vehicle is modeled with the help of the MATLAB Simulink program, simulated and presented. Fuel system model includes membrane flow models, voltage generation and loss modeling. The values of the important parameters were calculated, and two and three dimensional graphics were prepared to allow the results to be appreciated.

Keywords: Hydrogen Energy, Fuel Cell, Simulink.

1. GİRİŞ

Teknolojinin hızla gelişmesiyle enerjiye olan ihtiyaç gün geçtikçe artmaktadır. Günümüzde ihtiyaç duyulan enerjinin büyük bir kısmı fosil yakıtlar ile karşılanmakta ve bunun sonucunda çevre kirletilerek çağın en büyük problemlerinden biri olan çevre kirliliği problemi oluşmaktadır. Yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanılmasıyla çevre kirliliğinin azaltılması, enerji sorununun çözülmesi ve daha verimli hale getirilmesi amaçlanmaktadır. Yenilenebilir enerji, günümüz teknoloji dünyasının üzerinde yoğun çalışmalar yaptığı alanlardan biri olmuştur. Hidrojen enerjisi yenilenebilir enerji kaynaklarının en önemlilerinden birisidir. Hidrojenin yakıt olarak kullanıldığı yakıt pilleri de bu enerjinin en önemli kullanım alanlarından. Uzay çalışmalarında kullanılmasıyla bilinen yakıt pilleri, özellikle PEM yakıt

* Uludağ Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Görükle Kampüsü, 16059
İletişim Yazarı: Gürsel ŞEFKAT (sefkat@uludag.edu.tr)

pillerinde kaydedilen büyük gelişmeler günümüzün ilgi alanının yüksek olduğu sektörlerde de kullanıma sunulmuştur.

Yakıt pili sistemi, diğer enerji sistemlerine göre daha yüksek verimliliğe sahiptir. %80 oranında toplam verimliliğe ve %40-60'lık elektriksel verimliliğine ulaşabilir. Farklı yakıt pili çeşitleri arasında, PEM yakıt pilleri, düşük çalışma sıcaklığı (20°C~100 °C), yüksek güç yoğunluğu ve hızlı çalışma gibi avantajlara sahiptir. Ayrıca gürültü probleminin olmaması PEM yakıt piline olan ilgiyi arttırmaktadır [Karaoğlu ve Kuralay 2014].

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 [Ural, 2007 ve Yiğinsu, 2015].

Bu çalışmanın amacı; bilinen yöntemler kullanılarak farklı parametreler için PEM yakıt pili performansının simülasyonunu yapan bir model geliştirmektir. Elde edilen MATLAB-Simulink Model daha önceki çalışma parametreleri kullanılarak elde edilen sonuçların karşılaştırılması yoluyla da doğrulanması yapılmıştır [Karaoğlu ve Kuralay 2014, Oğuz, 2006, Ural, 2007]. Bu çalışmada membran malzemesinin kayıplara olan etkisi model kullanılarak incelenmiştir. Ayrıca endüstriyel ürünlere ait verimlilik değerleri ile model üzerinden belirlenen teorik verimliliklerin karşılaştırılması da yapılmıştır.

Çalışmada kullanılan tasarım parametreleri; verimlilik odaklı uluslararası mühendislik yarışması olan Shell Eco-Marathon Europe yarışmasında [<http://www.goo.gl/6rufkt>] yarışacak hidrojen enerjili araca uygun olarak belirlenmiştir.

Bu çalışmanın ikinci bölümünde PEM yakıt pilinin teorisinden ve matematiksel modelde referans alınan metodolojiden bahsedilmiştir. Üçüncü bölümde, MATLAB Simulink ortamında modeli oluşturulan yakıt pil modelinin ekran çıktıları ve sonuçları grafikler ile gösterilmiştir. Dördüncü bölümde ise, matematiksel modelin sonuçları incelenerek yorumlanmıştır.

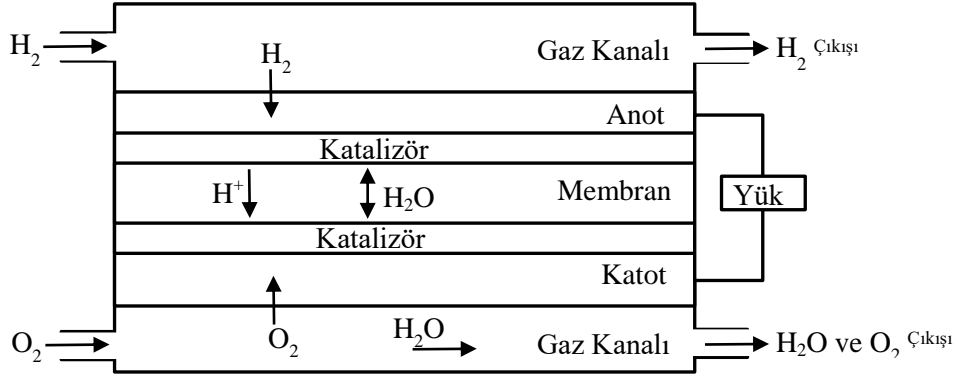
2. MATERYAL VE YÖNTEM

2.1. PEM Yakıt Pili

Yakıt pilleri elektrokimyasal dönüştürücülerdir. Yakıt pillerinde kimyasal enerji, ısı enerjisinin mekanik enerjiye dönüşümü olmadan, doğrudan elektrik enerjisine dönüştürülür. Bu pillerde ki kimyasal süreçte içten yanmalı motorlarda olduğu gibi yanma evresi olmadığından temiz enerji kaynağıdır. Çevreye zararı olan atık maddeler üretmezler. Ayrıca, elektrik enerjisinin yüksek verimlilik ile elde edilmesine olanak sağlarlar [Hirschenhofer, 1997 ve Oğuz, 2006].

Yakıt pillerinde ana enerji kaynağından alınan enerji ile hidrojen elde etme yöntemlerinden biri kullanılarak hidrojen üretilir. Hidrojen havadaki oksijenle yakıt pili aracılığı ile tepkimeye girerek su oluşturur. Tepkime ekzotermik olup ısı açığa çıkar. Ancak oluşan ısı çok yüksek değerde olmadığına su ile yakıt pili dışına atılır. Yüksek ısı üreten yakıt pillerinde ise ayrıca soğutma ihtiyacı duyulabilir.[Ural, 2007]

Şekil 1'de görüldüğü üzere, hidrojen ve oksijen ayrı gaz kanallarına girmekte, hidrojen gazı katalizöre geldiğinde elektronunu kaybederek oksijenin bulunduğu kanala doğru hareket eder. Oksijenin bulunduğu kanalda tepkimeye girerek su açığa çıkarır. Katalizörden geçemeyen hidrojen elektronu ise dış devreyi dolanarak katoda doğru hareket eder ve bu hareket elektrik üretimini sağlar. [Karaoğlu ve Kuralay,2014]



Şekil 1:
Yakıt Pili Çalışma Sistemi (Ural, 2007)

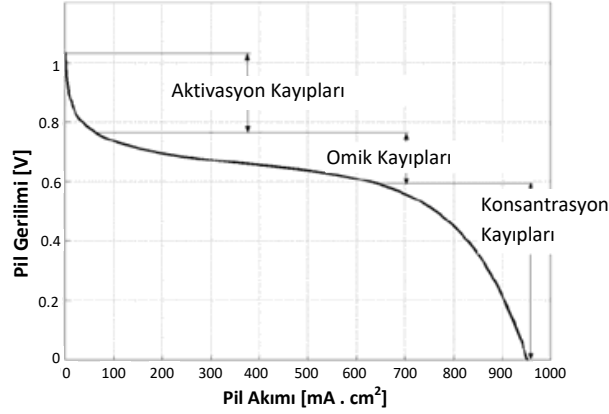
2.2. Metodoloji

Tasarlanan yakıt pili için çalışma koşuluna uygun olarak tasarım istekleri belirlenmiş ve diğer önemli parametreler referans alınan çalışmalardan elde edilmiştir. Tasarlanacak yakıt pili, hava soğutmalı yapıda olup oksijen kaynağı olarak atmosferi kullanmaktadır. Bu tasarım parametreleri, Shell Eco-Marathon Europe isimli mühendislik yarışmasının kurallarına uygun olacak şekilde tasarlanacak tek kişilik 4 tekerlekli şehir içi araca uygun olarak belirlenmiştir. Yarış konseptine göre en az hidrojen yakıtı ile en çok mesafe kat eden aracın kazanacağı ve yarışmada yer alabilmek için yarışma kurallarına uygun olacak aracın tasarlanması gerektiğinden, Tablo 1'de görülen araç tasarım parametreleri ve tasarlanacak yakıt pilinin parametreleride buna uygun olarak belirlenmiştir.

Tablo 1. Yakıt pili tasarım parametreleri

Sembol	Parametre	Değer	Birim
$M_{Araç}$	Araç Ağırlığı	120	kg
v_{maks}	Azami Hız	25	km/h
$E_{yığın}$	Çalışma gerilimi	48	V
N	Hücre Sayısı	47	-
P	Nominal Güç	500	W
P_{H2}	Çalışma Basıncı	0,5	Bar

Şekil 2'de gösterilen ve polarizasyon eğrisi olarak da bilinen PEM yakıt pilinin kayıp eğrisi, genellikle bir yakıt pilinin karakteristiğini ifade etmek için kullanılır. Bir hücrenin davranışı yüksek derecede doğrusal olmayan bir yapıya sahiptir ve akım yoğunluğu, hücre sıcaklığı, membran nemliliği ve reaktant kısmi basıncı gibi faktörlere bağlıdır. [Hirschenhofer, 1997]



Şekil 2:
PEM Yakıt Pilinin Kayıp Eğrisi (Ural, 2007)

Yakıt hücrelerinin gerilimi akım artışıyla azalır. Bir PEM yakıt pili genellikle 70- 80 °C civarında bir sıcaklık, 3-5 atm reaktant kısmi basıncında ve ~%100 bir zar nemliliğinde en iyi performans gösterir. [Kılıçoğlu ve Altun, 2007] Hücre gerilimi ($V_{hücre}$); herhangi bir durumda 1 nolu denklem kullanılarak bulunabilir. Bir hücre yüke güç verdiği zaman, yüksüz gerilim (E); gerilim düşümü olarak adlandırılan aktivasyon (V_{akt}), omik (V_{omik}) ve konsantrasyon (V_{kon}) aşırı gerilimleri tarafından azaltılır.

$$V_{hücre} = E - V_{akt} - V_{omik} - V_{kon} \quad [V] \quad (1)$$

Açık devre hücre gerilimini (E) hücre sıcaklığının (T) ve reaktant kısmi basınçlarının bir fonksiyonu olarak denklem (2) deki gibi verilebilir.

$$E = E_0 - 0,85 * 10^{-3} * (T - 298,15) + \frac{R * T}{2 * F} * \ln\left(\frac{P_{H_2} * P_{O_2}^{0.5}}{P_{H_2O}}\right) \quad [V] \quad (2)$$

Bu eşitlikte; E_0 , referans gerilimi, R universal gaz sabiti ve F 'de Faraday sabitidir. P_{H_2} , P_{O_2} ve P_{H_2O} ; hidrojen, oksijen ve su buharı basınçları, P ise yığın içindeki toplam basınçtır. İlgili parametreler Tablo 1'de verilmiştir. Aktivasyon düşümü denklemi [Karaoğlu ve Kuralay, 2014] aşağıdaki şekilde Tafel denklemi ile ifade edilir ve buna göre analiz edilebilir.

$$E_{akt} = \frac{R * T}{n * \alpha * F} * \ln\left(\frac{i}{i_0}\right) \quad [V] \quad (3)$$

Aktivasyon aşırı gerilimi Denklem (3)'de bir gerilim düşümü olarak görünür ve E_{akt} Denklem (3)'de dizinin her yerinde negatiftir. Denklem (4) bu terimin negatifiğinden kaçınmak için kullanılır. [Ural, 2007]

$$V_{akt} = -E_{akt} \quad [V] \quad (4)$$

Ortalama akım yoğunluğunda gerilim düşümü yaklaşık olarak doğrusaldır ve doğal durumda omiktir. R_{mem} membran direncidir ve membran kalınlığının (t_m) iletkenliğe (σ) bölümüyle bulunur.

$$V_{omik} = I * R_{mem} \quad [V] \quad (5)$$

$$R_{mem} = \frac{t_m}{\sigma} \quad [k\Omega \cdot cm] \quad (6)$$

Membran su hacmi çeşitli faktörlere bağlıdır. Bunlar; elektron hareketinden dolayı anottan katoda su akışı, reaktantların dış su hacmi ve katottan anoda geri su difüzyonu gibi olaylardır [3]. Su akışının etkisi önemli bir faktör olduğundan membran proton konsantrasyonu sadece hücre akım yoğunluğunun bir fonksiyonu olduğu farz edilebilir. Membran kalınlığı, omik direnç kaybını etkileyen en önemli faktörlerden biridir ve kalınlığın artması kaybı arttırmaktadır. [User Manuel, 2013 ve Nexa 2015]

Daha yüksek akım yoğunluklarında, hücre potansiyeli kütle-geçiş sınırlamalarından dolayı hızla azalır. Bu doğrusal olmayan konsantrasyon aşırı gerilimi olarak adlandırılır.

$$V_{kons} = a * e^{b*I} \quad [V] \quad (7)$$

Aşağıda görüldüğü üzere, Tablo 2’de yakıt pili modeline ait parametreler verilmiştir.

Tablo 2. Yakıt pili model parametreleri (Ural, 2007)

Sembol	Parametre	Değer	Birim
E_0	Referans gerilim	1,229	V
R	Üniversal gaz sabiti	8,314	J mol ⁻¹ K ⁻¹
F	Faraday sabiti	96485	C mol ⁻¹
T	Yığın sıcaklığı	353	K
P	Hücre basıncı	1,2	atm
t_m	Membran kalınlığı	$175 \cdot 10^{-4}$	cm
C_{dl}	Çift katman kapasitansı	0,035x232	F
τ_{H^+}	Zaman sabiti	12,78	s

Burada a (V) katsayısı sıcaklıkla değişirken ve b (cm².mA⁻¹) katsayısı sabittir.

$$a = 1,1 * 10^{-4} - 12 * 10^{-6} * (T - 273)$$

$$b = 8 * 10^{-3} \quad (8)$$

Bir hücrenin potansiyeli ($V_{hücre}$) akım yoğunluğu, hücre sıcaklığı, hidrojen basıncı ve oksijen basıncının bir fonksiyonu olarak çözülebilir. Eğer tüm hücreler seri olarak bağlanmışlarsa yığın gerilimi hücre gerilimi ile hücre sayısının çarpımına eşittir.

$$V_{Yığın} = V_{hücre} \times \text{Hücre Sayısı} \quad [V] \quad (9)$$

Hücre potansiyeli oksijen, hidrojen ve buhar kısmi basınçlarına bağlıdır. Bu durum Denklem 10 ile ifade edilmektedir. Bu basınçlar, anot ve katottaki reaktant akış oranları ve nemlilikleri tarafından oldukça etkilenir. Tüm gazların ideal olduğu varsayılarak ideal gaz kanunu dinamik analizler için genişletilebilir ve kütle korunum yasası, genel denklemler ile reaktant akış modeli kullanılabilir.

$$\frac{V}{R * T} \frac{dP_g}{dt} = m_g - m_c \pm \frac{I}{n * F} \quad (10)$$

Burada; anot veya katot hacmi $V(m^3)$, gaz (oksijen, hidrojen, buhar) basıncı P_g (atm), reaktant giriş akış oranı m_g ($mol.s^{-1}$), reaktant çıkış akış oranı m_c ($mol.s^{-1}$), reaksiyonda kullanılan her bir molekülü kapsayan elektron sayısı ise n ile gösterilmiştir.

Hücre içerisinde ani durumları belirleyebilmek için gaz reaktantların korunumları aşağıdaki formüller kullanılarak hesaplanabilir.

Anot akışı model eşitlikleri;

$$\begin{aligned} \frac{V_a}{R * T} \frac{dP_{H_2}}{dt} &= m_{H_2-g} - m_{H_2-c} - \frac{I}{4 * F} \\ m_{H_2} &= k_a * (P_{H_2} - P_{amb}) \end{aligned} \quad (11)$$

Katot akışı model eşitlikleri;

$$\begin{aligned} \frac{V_c}{R * T} \frac{dP_{O_2}}{dt} &= m_{O_2-g} - m_{O_2-c} - \frac{I}{4 * F} \\ m_{O_2} &= k_c * (P_{O_2} - P_{amb}) \end{aligned} \quad (12)$$

Katot su akışı model eşitlikleri;

$$\frac{V_c}{R * T} \frac{dP_{H_2O-c}}{dt} = m_{H_2O-g,c} - m_{H_2O-c,c} - \frac{I}{2 * F} \quad (13)$$

denklemleri ile gösterilir.

Membran su hacmi çeşitli faktörlere bağlıdır. Bunlar; elektron hareketinden dolayı anottan katoda su akışı, reaktantların dış su hacmi ve katottan anoda geri su difüzyonu gibi olaylardır. [Karaoğlan ve Kuralay (2014)] Su akışının etkisi önemli bir faktör olduğundan membran proton konsantrasyonu sadece hücre akım yoğunluğunun bir fonksiyonu olduğu farz edilebilir. Denklemlerde kullanılan parametreler Tablo 3'de verilmiştir.

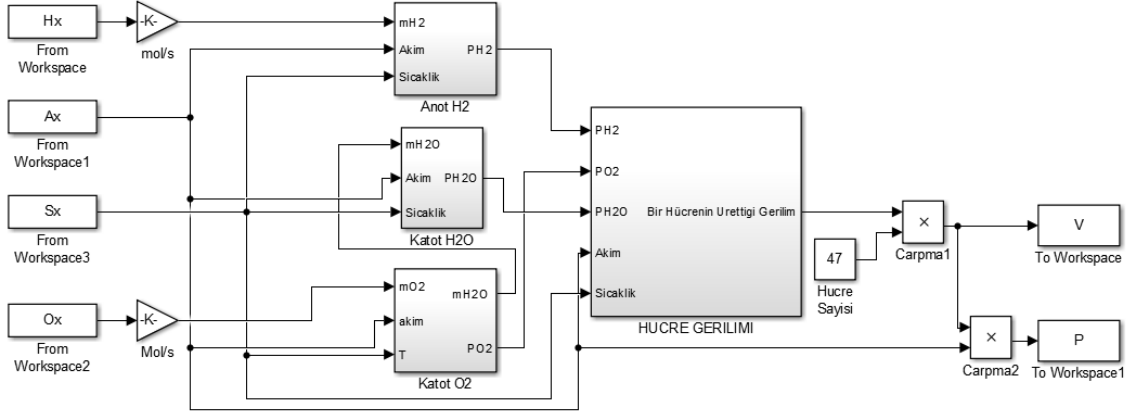
Tablo 3. Reaktant akışı model parametreleri (Ural, 2007)

	Parametre	Değer	Birim
P_{amb}	Çevreleyen basınç	1	atm
V_a	Anot hacmi	0,0159	m^3
k_a	Anot akış sabiti	0,004	$mol\ s^{-1}atm^{-1}$
V_c	Katot hacmi	0,0025	m^3
k_c	Katot akış sabiti	0,01	$mol\ s^{-1}atm^{-1}$

3. ARAŞTIRMA VE BULGULAR

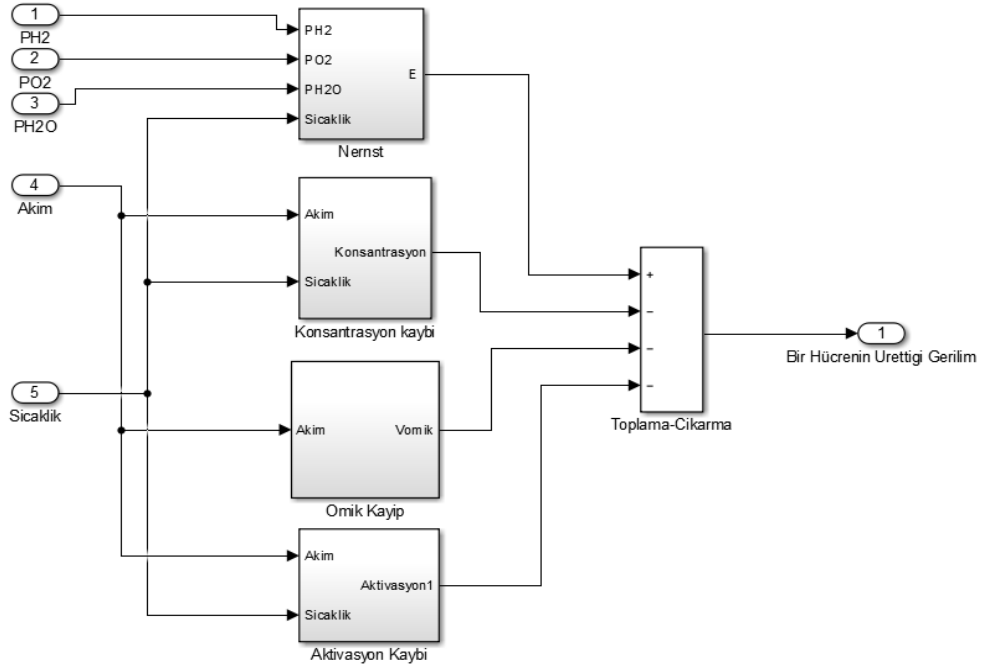
3.1. Simulink Modeli

Şekil 3’de PEM yakıt pilinin hücre yığınının Simulink modeli görülmektedir. Hidrojen tüketimi [L/dak], oksijen hava akışı [m^3/s], akım değeri [A] ve sıcaklık [K] girilerek üretilen gerilim [V] ve güç değerleri [W] çıktı olarak alınmıştır. Yakıt pilinin Nernst gerilimi ve oluşan aktivasyon, omik ve konsantrasyon kayıpları dört adet alt sistem ile gruplandırılmıştır.



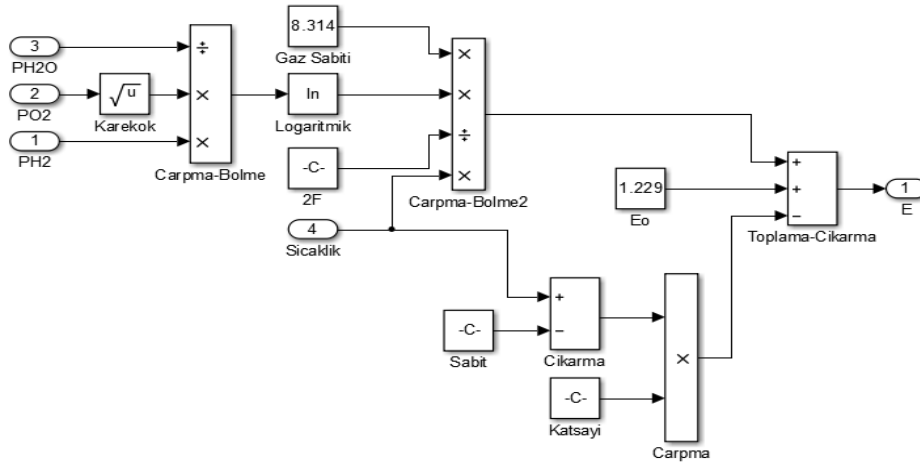
Şekil 3:
PEM Yakıt Pili Simulink Modeli

Hesaplama adımlarına uygun olarak alt sistemlere ayrılan sistem, uygulanan giriş değerlerini hesaplayarak elde edilen çıkış değerlerini bir sonraki adıma aktarmaktadır. Gerilim değerini ve yakıt pilinin kayıplarını hesaplamada gerekli olan hidrojen, oksijen ve su buharının basınç değerleri oksijen akış modeli, hidrojen akış modeli ve su akış modeli alt sistemlerinde hesaplanarak bir sonraki alt sistemlerden Nernst gerilimi ile aktivasyon, konsantrasyon ve omik kayıplar alt modellerine gönderilmektedir. Şekil 4’te görülen hücre gerilimi Simulink modeli, Denklem (1) referans alınarak oluşturulmuştur.



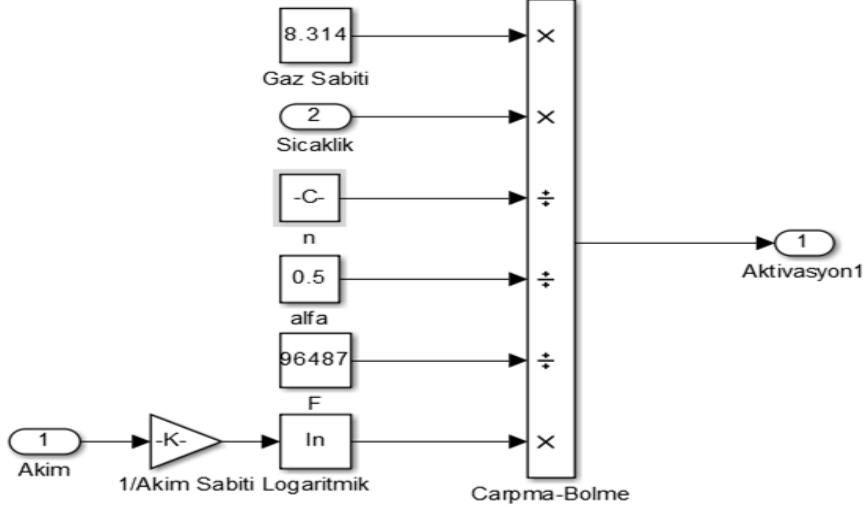
Şekil 4:
Hücre Gerilimi Simulink Modeli

Modelin en önemli kısımlarından olan Nernst gerilimi, hidrojen yakıt pilinin kayıpsız ürettiği gerilimdir.[Cook, 2002 ve Bose ve ark. 2011] Hidrojen, oksijen ve su buharının basınçlarının etkisiyle değişim gösteren Nernst gerilimine, bir diğer önemli etki eden parametre ise sıcaklıktır. Nernst gerilimi, hidrojen ve oksijen basınçlarının yükselmesiyle artarken, su basıncı ve sıcaklığın artmasıyla gerilim değerinde düşüş gözlenmektedir. Şekil 5’de görüldüğü gibi oluşturulan Simulink modeli, Denklem (2) referans alınarak oluşturulmuştur.



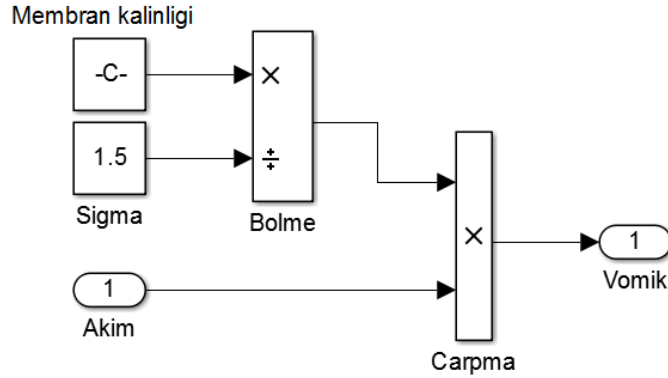
Şekil 5:
Nernst Gerilimi Simulink Modeli

Şekil 6'yı incelediğimizde, yakıt pili içindeki tepkime hızının yavaşlaması ve özellikle başlangıç anında gerilim değeri yükselen aktivasyon kaybının modeli, Denklem (3) ve Denklem (4) referans alınarak oluşturulmuştur.



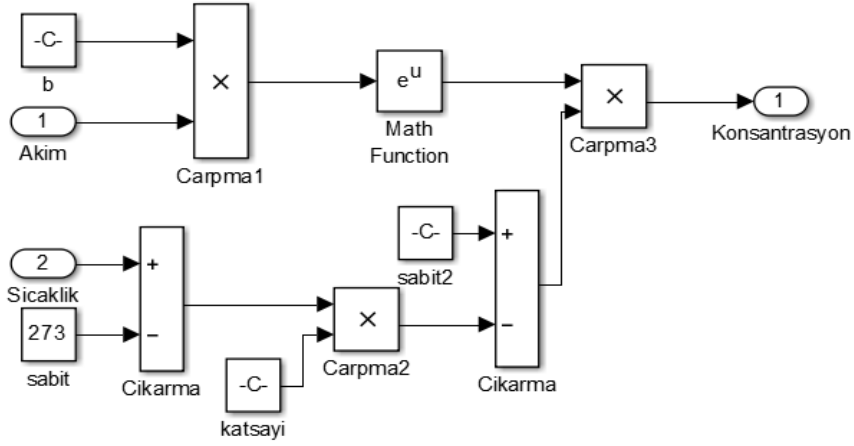
Şekil 6:
Aktivasyon Kaybı Simulink Modeli

Omik kayıplar, hücre içerisindeki direnç kayıplarını temsil eder ve bu direnç kayıpları elektrolit ve elektriksel bağlantı noktalarında oluşur. [11] Şekil 7'de görüldüğü üzere, omik kayıpların simulink modelinin oluşturulmasında Denklem (5) ve Denklem (6) referans alınmıştır.



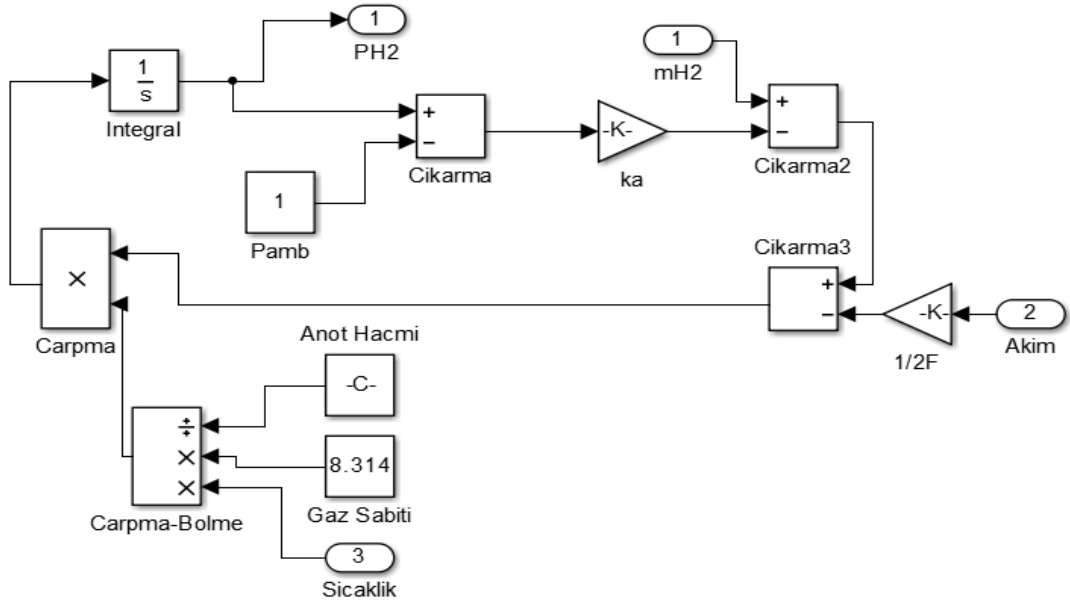
Şekil 7:
Omik Kayıp Simulink Modeli

Konsantrasyon kayıpları, elektrotta meydana gelen reaksiyonların kütle iletimi tarafından engellenmesi sırasında meydana gelmektedir ve bu anda üretilen gerilim değerinden, daha çok gerilim tüketmeye başlar ve bununla birlikte hücre gerilimi hızla düşmeye başlar.[12] Şekil 8'da görülen konsantrasyon kaybı Simulink modeli, Denklem (7) ve Denklem (8) referans alınarak oluşturulmuştur.



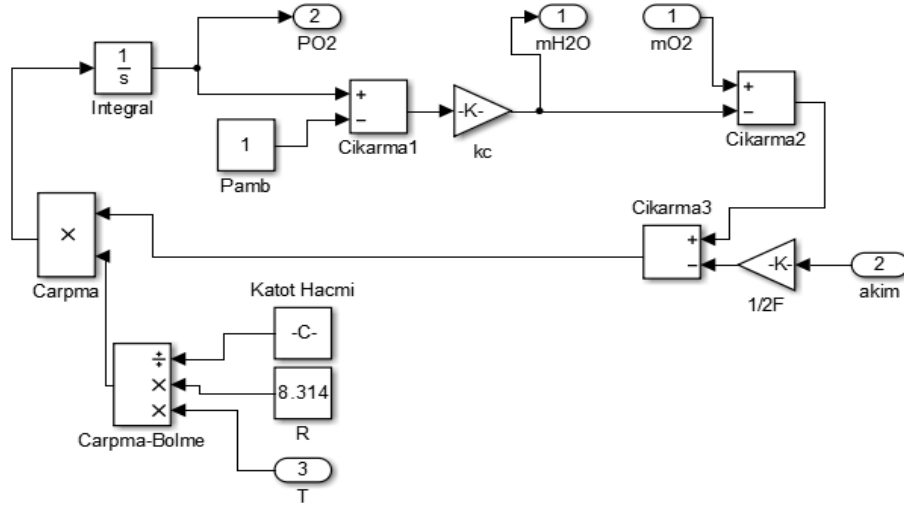
Şekil 8:
Konsantrasyon Kaybı Simulink Modeli

Denklem (11) referans alınarak oluşturulan anot kısmı hidrojen Simulink modeliyle (Şekil 9), hücre içerisindeki anot tarafında, hidrojen debisi, akım ve sıcaklık parametrelerinin etkisiyle oluşan basınç değerini hesaplanmaktadır.



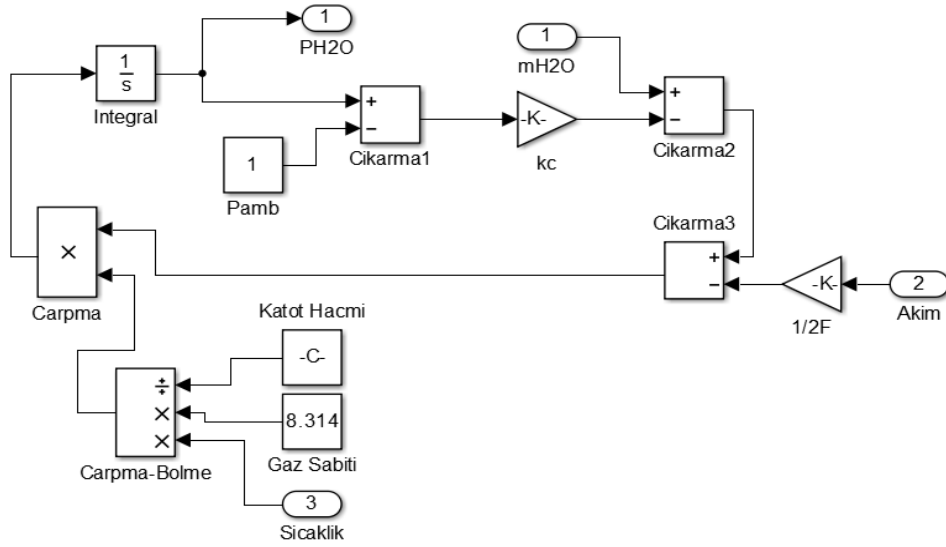
Şekil 9:
Anot Hidrojen Simulink Modeli

Denklem (12) referans alınarak oluşturulan katot oksijen Simulink modeliyle ise (Şekil 10), hücre içerisindeki katot kısmında, atmosferden gelen oksijen, sıcaklık ve akım parametrelerinin etkisiyle bu sefer katot kısmındaki oksijen basıncı hesaplanmaktadır.



Şekil 10:
Katot Oksijen Simulink Modeli

Hidrojen ve oksijenin hücre içindeki tepkimelerinin ardından oluşan suyun doğru bir şekilde tahliyesi, hücre içerisindeki üretilen gerilim değerini yükseltme adına oldukça önemlidir.[Laoun, 2011] Denklem (2)'de açıkça görüldüğü gibi, su buharı basıncı Nernst gerilim değeri üzerinde azaltıcı bir etkiye sahiptir. Denklem (13) referans alınarak oluşturulan katot su buharı Simulink modeli Şekil 11'de gösterilmiştir.



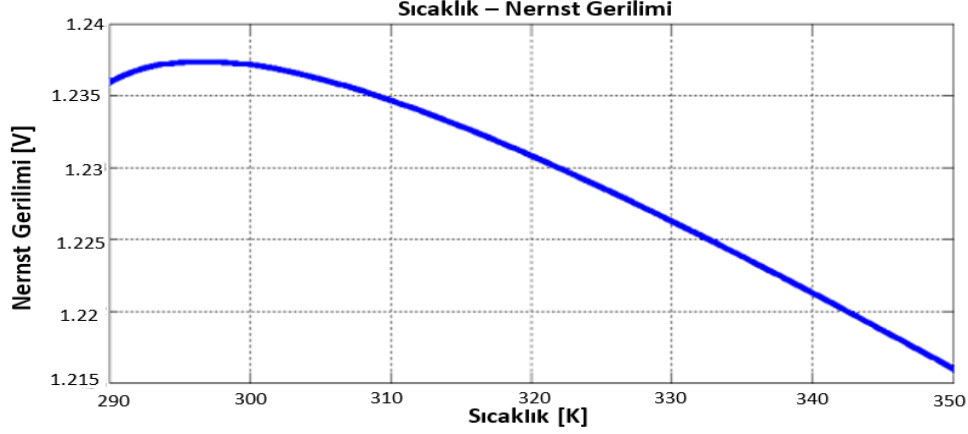
Şekil 11:
Katot Su Buharı Simulink Modeli

3.2. Simulink Model Çıktıları

Yakıt pili içerisinde üretilen gerilimi temsil eden Nernst gerilimini, kendisine etki eden en önemli parametreleri dikkate alarak incelemek gerekmektedir. Bu doğrultuda, Denklem (2)'de görüleceği gibi hidrojen ve oksijen basınçlarının artırıcı, su buharı basıncının ise azaltıcı yönde etki yaptığını görmek aşikardır. Nernst gerilimi için bir diğer önemli parametre olan sıcaklığın

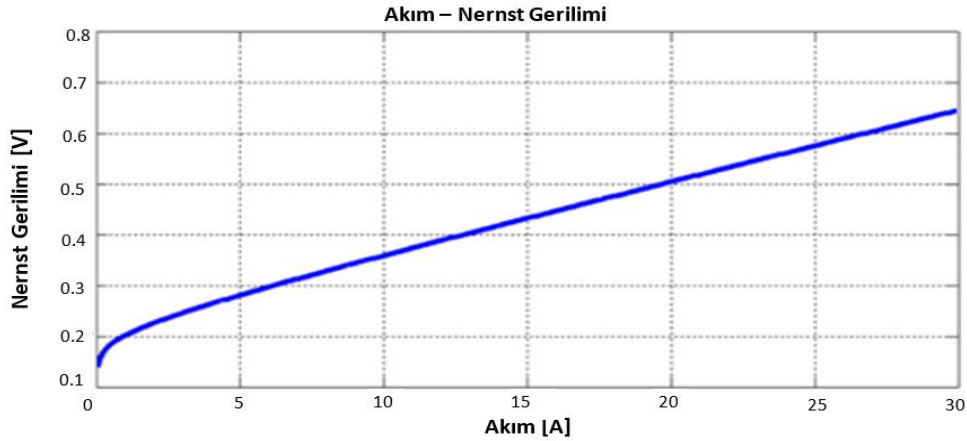
etkisi, Şekil 5’te modellenen Nernst gerilimi Simulink modelinin çıktısını Şekil 12’de görmek mümkündür.

Sıcaklık etkisini daha iyi inceleyebilme adına, akım değeri 2 [A], hidrojen akısı 2 [L/dak] ve oksijen akısı 0.02 [m³/s] değerinde sabit tutulmuştur. Grafikte görüleceği üzere, yakıt pili sıcaklık değerinin artmasıyla Nernst geriliminde azalma göstermekte ve buradan yakıt pilinin termal yönetiminin önemini görmek mümkün olacaktır.



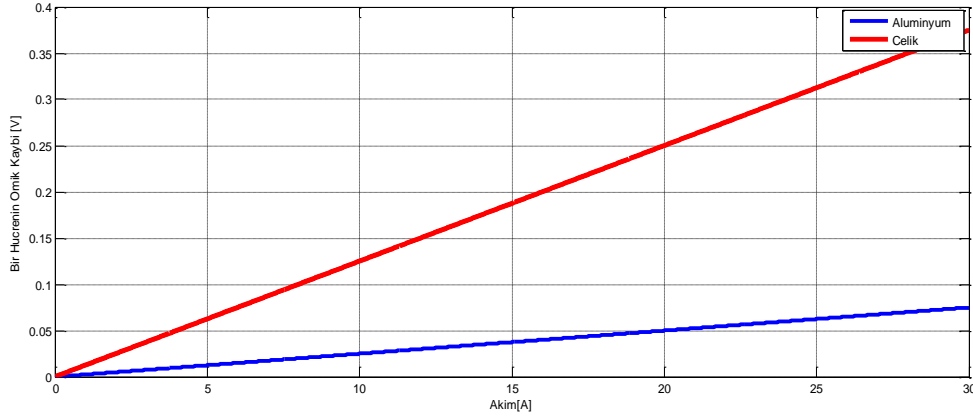
Şekil 12:
Nernst Geriliminin Akım İle Değişimi

Aktivasyon ve konsantrasyon kayıpları başta akım ve sıcaklık değerlerine bağlı olarak değişim göstermekte ve bunların etkileri omik kayıplarında eklenmesiyle başta eksponansiyel ardından da doğrusal bir şekilde artmaktadır. Şekil 13’de görülen akım ile yakıt pili toplam gerilim kayıpları ilişkisini incelemek için sıcaklık değeri 300 [K] sıcaklıkta, hidrojen akısı 2 [L/dak] ve oksijen akısı 0.02 [m³/s] değerinde sabit tutulmuştur.



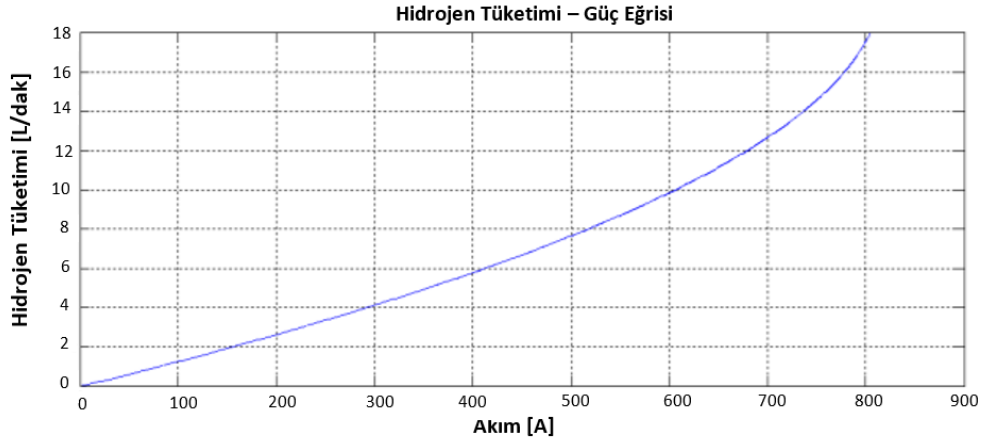
Şekil 13:
Toplam Gerilim Kayıplarının Akım İle Değişimi

Membran malzemesi seçiminde etkili olan Şekil 14’teki grafikte görüldüğü üzere alüminyum (öz direnci 0.0282 [mm²*Ω/m]) omik kaybı değerinin, çelik (öz direnci 0.17 [mm²*Ω/m]) omik kaybı değerine göre yaklaşık 6 kat daha düşük çıkmıştır. Ayrıca, alüminyumun daha düşük yoğunluğa [2,70 g/cm³] sahip olması prototip aracın ağırlığını azaltıcı yönde etki etmesi ve alüminyumun çeliğe göre ısı iletim katsayısının [200 W/mK] yüksek olması da termal özelliklerini iyileştirici özelliğinden dolayı tercih edilen malzeme olmuştur.



Şekil 14:
Akım-Bir Hücrenin Omik Kaybı Eğrisi

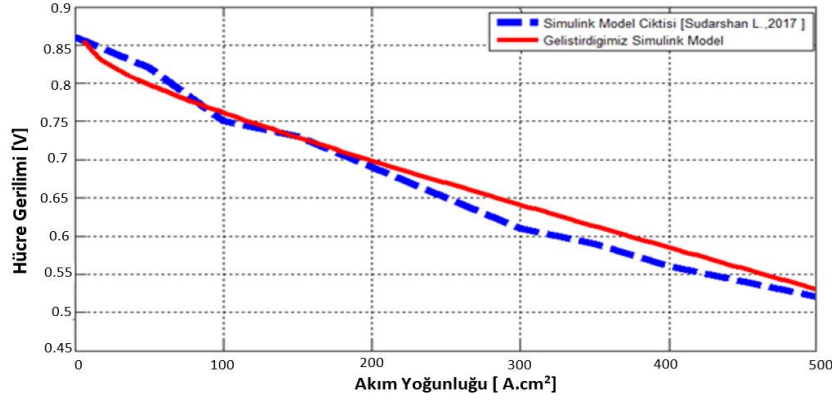
Şekil 15'te hidrojen tüketiminin artması, güç değerinin eksponansiyel bir şekilde arttırmaktadır. Yüksek güç istenilen durumlarda daha fazla hidrojen tüketimi olduğu görülmektedir. Bu çıktı elde edilken, 300 [K] sıcaklıkta ve 2 [A] akım değerinde sabit tutulmuştur.



Şekil 15:
Hidrojen Tüketimi-Güç Eğrisi

Mevcut endüstriyel ürünler olan Horizon 1000 XP ve Nexa Ballard ürünlerin verimlilik açısından karşılaştırıldığında; 1 L/dak debiye sahip hidrojenin teorik olarak içerdiği güç miktarı 178.361 W 'tır [User Manual, 2013]. Şekil 15'de görüldüğü gibi, 6 L/dak hidrojen tüketiminde 410.3 W değerinde güç elde edildiğinden, tasarlanan yakıt pilinin verimi %38.34 olarak hesaplanır. Bu değer piyasada yaygın olarak kullanılan Horizon 1000 XP [User Manual, 2013] verimliliğine göre yüksek bir değer iken, Nexa [Nexa, 2003] ürünü içinde yaklaşık olarak aynı verimliliğe sahiptir.

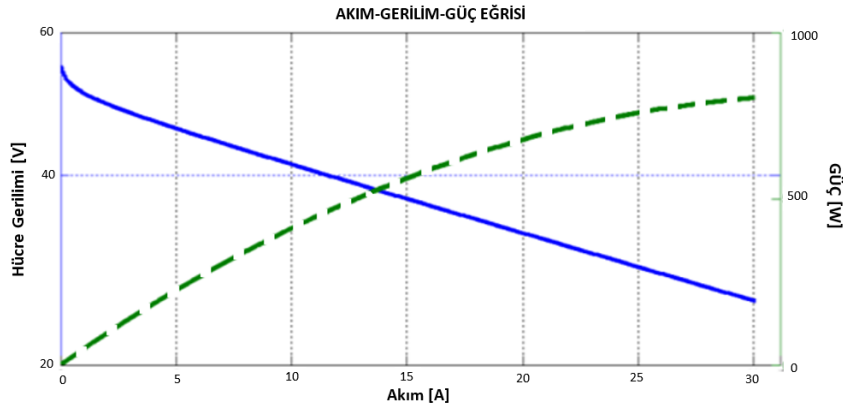
Şekil 16'da, referans alınan makalenin [Sudarshan ve Dhananjay 2017] Simulink modelinin bir hücrede üretilen gerilim miktarı ile oluşturduğumuz Simulink modelinin bir hücrede ürettiği gerilimi daha doğru karşılaştırabilme adına, yatay ekseninde akım yoğunluğu hesaba katarak alandan bağımsız hale getirilmiştir. Eğriden de görüleceği üzere, sonuçlar arasında belirgin bir farkın olmadığı ve yakın çıktığı gözlemlenmiştir.



Şekil 16:

Akım Yoğunluğu – Bir Hücrenin Gerilim Eğrilerinin Karşılaştırılması (Sudarshan L., 2017)

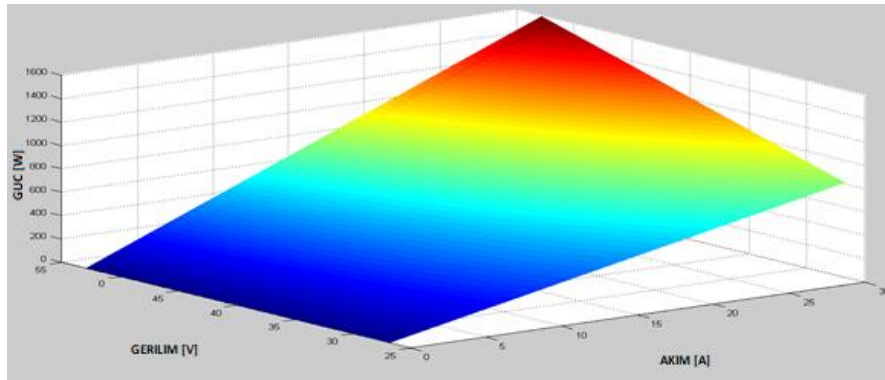
Tasarlanacak bir yakıt pilinin karakteristiğini daha iyi tanımlamak için akım, gerilim ve güç arasındaki ilişki de değerlendirilmiştir. Şekil 17’de gösterilen, Akım-Gerilim-Güç eğrisinin hesabı için başlangıç şartı; olarak hidrojen akısı 2 [L/dak], sıcaklık 320 [K] ve oksijen akısı 0.02 [m³/s] alınmıştır.



Şekil 17:

Akım-Gerilim-Güç Eğrisi

Gerilim, akım ve güç arasındaki ilişki üç boyutlu yüzeyde açıkça görülmektedir. Şekil 18’den görüldüğü gibi güç, akım değerinin artışı nedeniyle artmaktayken gerilim değerindeki düşüş, güç artışını sınırlamakta ve akım artışına rağmen gücün sürekli artışını sınırlamaktadır.



Şekil 18:

Akım-Gerilim-Güç Üç Boyutlu Grafiği

4. SONUÇLAR

Yakıt hücresi sistemlerinin performansını iyileştirmek ve yakıt hücresinin gerilim değişimini tahmin etmek için değişime neden olan faktörlerin belirlenmesi gerekmektedir. Bu çalışmada, tasarlanacak PEM yakıt pilinin teorik olarak MATLAB Simulink ortamında modeli oluşturularak, hidrojen ve oksijen debileri, sıcaklık ve akım değerinin değişmesiyle yakıt pilinin güç ve gerilimdeki değişimleri ve membran malzemesi seçiminde alüminyumun tercih edilmesinin daha doğru olduğu ortaya çıkarılmıştır.

Modeli oluşturulan yakıt pilinin üretilmesi durumunda, üzerinde yapılacak testlerin sonuçları ile teorik hesaplamaların çıktıları karşılaştırılabilecektir. Teorik hesaplaması zor ve karmaşık olan bu sistemin Simulink ortamında modellenmesi ile değişken girdiler hızlı olarak hesaplanabilmektedir. Böylece simülasyon tabanlı bu model kullanılarak farklı parametrelerin sistem performansı üzerine etkisinin hızlı bir şekilde analiz edilmesi ve uygun parametrelerin belirlenmesi olanağı sağlanmıştır.

Yakıt hücresi veriminin iyileştirilmesi 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

KAYNAKLAR

1. B. Laoun, Simulation of PEMFC performance, Revue des Energies Renouvelables Vol. 14 N°3 (2011) 441 – 448
2. Brian Cook, “Introduction to Fuel Cells and Hydrogen Technology”, Engineering Science and Education Journal, December 2002
3. Dicks A., Larminie, J., ‘Fuel Cell Systems Explained’, John Wiley & Sons, Ltd, West Sussex, İngiltere, 2000.
4. <http://www.goo.gl/6rufkt> Erişim Tarihi: 23.07.2018 Konu: Shell Eco Marathon Europe, (2018). Global Rules Chapter 1.
5. Hydrogen Fuel Cell Engines and Related Technologies: Rev 0, December 2001
6. John H. Hirschenhofer, “Fuel Cell Status: 1996” , IEEEAES Systems Magazine, March 1997 , pp. 23-28
7. Karaoğlan, M. U., Kuralay, N. S. 2014. “PEM Yakıt Hücresi Modeli,” Mühendis ve Makina, cilt 55, sayı 657, s. 51-58.
8. Kılıçoğlu A.E., Altun H., “PEM YAKIT PİLİ SİMÜLASYON MODELİ”, Niğde Üniv., Mühendisli-Mimarlık Fakültesi, Haziran, 2007.
9. Nexa™ (310-0027) Power Module User’s Manual, 5,000,001 Series PBS, June 16, 2003.
10. Oğuz, A.E, ”HİDROJEN YAKIT PİLLERİ VE PEM YAKIT PİLİNİN ANALİZİ”, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Nisan 2006.
11. Saswata Bose, Tapas Kuila, Thi Xuan Hien Nguyen, Nam Hoon Kim, Kin-tak Lau, Joong Hee Lee(2011). “Polymer membranes for high temperature proton exchange membrane fuel cell: Recent advances and challenges “Progress in Polymer Science doi: 10.1016/j.progpolymsci.2011.01.003
12. Sudarshan L.,Dhananjay B., “Modeling and performance evaluation of PEM fuel cell by controlling its input parameters”, Elsevier Energy 138 (2017) 437-445 doi: 10.1016/j.energy.2017.07.070

13. Ural, Z., “Yakıt Pilleri ve Bir PEM Yakıt Pili Sisteminin Dinamik Benzetimi”, Y. Lisans Tezi, Dicle Üniv., Fen Bilimleri Enstitüsü, Haziran, 2007.
14. User Manual H-1000 XP Fuel Cell System Version: 20130805, HORIZON FUEL CELL TECHNOLOGIES, August 2013
15. Yiğinsu, B., “Modeling and Analysis of Flow and Heat Transfer in a Large PEM Fuel Cell Suitable for Automotive Applications”, Submitted to the Graduate School of Engineering and Natural Sciences In partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science, Sabanci University, 2015