



## FOTOVOLTAİK VE YAKIT PİLİ BİRLEŞİK SİSTEMİNİN ANALİZİ

**Bülent YEŞİLATA\* ve Feridun DEMİR\*\***

\*Harran Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü  
Şanlıurfa, [byesilata@harran.edu.tr](mailto:byesilata@harran.edu.tr)

\*\*Harran Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, Çevre Mühendisliği Bölümü  
Şanlıurfa, [feridundemir@harran.edu.tr](mailto:feridundemir@harran.edu.tr)

(Geliş Tarihi: 19. 01. 2006)

**Özet:** Bu çalışmada, fotovoltaik (PV) ve yakıt pili (FC) sistemlerinin birleşik (hibrid) sistem olarak kullanımına yönelik bir analiz sunulmaktadır. Birleşik sistem; PV panel, elektroliz ünitesi, hidrojen deposu ve yakıt pilinden oluşmaktadır. PV panelden temin edilen elektrik enerjisi, elektroliz ünitesinde hidrojen üretimi için kullanılmaktadır. Depolanan hidrojen daha sonra yakıt pilini çalıştırarak, düzenli elektrik teminini sağlamaktadır. Birleşik sistemin matematiksel olarak modellenmesine yönelik temel bilgiler sunulmasına karşın, karmaşıklığı sebebiyle model çözümü yapılmamıştır. Bunun yerine; PV panele bağlı ve elektroliz ünitesini temsil eden bir elektriksel direnç kullanılarak, deneysel bir çalışma gerçekleştirilmiştir. Deneysel ölçüm sonuçları ile üretilmesi beklenen hidrojen miktarı hesaplanarak, yakıt pilinde kullanımına yönelik senaryolar için hesaplamalar sunulmuştur.

**Anahtar Kelimeler:** Fotovoltaik (PV) panel, Yakıt pili, Elektroliz, Temiz enerji, Elektrokimya

## ANALYSIS OF COMBINED PHOTOVOLTAIC AND FUEL CELL SYSTEM

**Abstract:** In this study, a hybrid system composed of a photovoltaic (PV) unit and a fuel cell (FC) unit is analysed. The main components of the system are a PV panel, an electrolysis unit, a hydrogen tank and a fuel cell. Electrical energy obtained from PV panel is used to generate hydrogen at the electrolysis unit. The stored hydrogen helps to provide regular electricity to the load by operating the fuel cell. Even though mathematical modeling of combined system was formulated, because of its complexity, the numerical solution was not carried out. Instead, an experimental study has been performed using an electrical resistance which represents the electrolysis unit coupled to the PV panel. The expected production/consumption rates of hydrogen for some possible fuel-cell operation scenarios are calculated by using measured data from PV panel experiments.

**Keywords:** Photovoltaic (PV) panel, Fuel cell, Electrolysis, Clean energy, Electrochemistry

### GİRİŞ

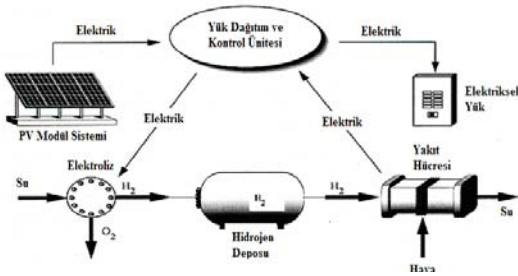
Günümüzde fotovoltaik (PV) sistemler hızla yaygınlaşmasına karşın, kullanımlarındaki (yüksek maliyeti dışında) en önemli sınırlamalardan biri üretilen elektrik enerjisinin depolanmasındaki zorluklardır. PV sistemler bu sınırlama nedeniyle, güneş enerjisi potansiyeli düşük bölgelerde sadece yaz mevsimlerinde ve güneşli saatlerde kullanılmaktadır. Küçük güçte bir elektriksel yük için ise enerji depolamada bataryalı PV sistemler kullanılmaktadır. Bu tür sistemlerde; genellikle güneşli saatlerde PV sistem tarafından üretilen enerjinin kullanılmayan kısmı bir batarya grubunda depolanmakta ve güneşin bulunmadığı saatlerde (ya da geceleri) kullanılmaktadır. Ancak, bataryalı sistemlerde büyük miktarlarda enerji depolamanın maliyeti çok yüksek olduğu gibi, uzun süreli (örneğin mevsimlik) depolama mümkün değildir. Ayrıca, klasik (örneğin araçlarda kullanılan basit çevrimli) bataryalardan oluşmuş bir sistemde depolanan enerjinin sadece

%20-30 kısmı çekilebilmekte ve batarya ömrü çok kısa (1-2 yıl) olmaktadır. Özel olarak tasarlanmış genişletilmiş çevrime sahip bataryalarda çalışma ömrü daha uzun (yaklaşık 5 yıl) ve enerji çekilme oranı daha yüksek (yaklaşık %80) olmasına karşın, maliyet çok yükselmektedir (Radovic, 1997).

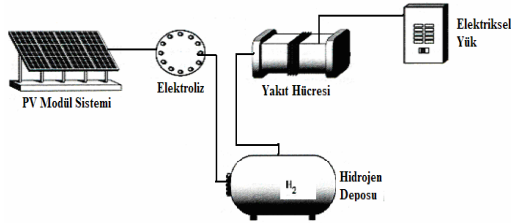
Fotovoltaik (PV) ve yakıt pili (FC) birleşik sistemi; bu depolama sakıncalarını büyük ölçüde ortadan kaldıran bir çözüm olarak günümüzde en iyi alternatiflerden biri olarak kabul edilmektedir. Kısa ve uzun süreli enerji depolamanın her ikisi için de uygun sistem dizilişleri oluşturmak mümkündür (Busquet *vd*, 2002). Bu konfigürasyonlara ait temel üniteler/cihazlar Şekil 1'de gösterilmektedir. Her iki sistemde de kullanılan temel üniteler PV panel, elektroliz ve yakıt pilidir. Şekil 1(a)'daki konfigürasyonda PV modüller tarafından üretilen enerjinin elektriksel yük için gerekli miktardan fazlası ile çalıştırılan elektroliz ünitesinden elde edilen

hidrojen depolanmaktadır. Bu tür bir sistemde, kontrol ünitesi güneşin olmadığı saatlerde yakıt pili ünitesini çalıştırmaktadır. Böylece depodan çekilen hidrojen ile anlık elektrik enerjisi yakıt pilinden elektriksel cihaza gitmektedir. Şekil 1(b)'deki sistem ise benzer mantıkla çalışmakta, ancak genellikle, gündüz PV-elektroliz ünitesi vasıtasıyla enerji hidrojen olarak depolanmaktadır. Depolanan hidrojen ise, gece yakıt pili ile elektrik enerjisi üretiminde kullanılmaktadır. Deponun yeterince büyük seçilmesi durumunda ise aynı sistem yaz aylarında hidrojen depolayıp, kış aylarında elektrik enerjisi gereksinimi için kullanılabilir (Hirschenhofer vd, 1998; Johnston vd, 2005).

(a)



(b)



Şekil 1. a) PV-FC birleşik sistemi ile sürekli elektrik temini, b) PV sistemi ile üretilen hidrojenin depolanarak gerekli anlarda yakıt pilinde kullanımı.

## YAKIT PİLİ İLE İLGİLİ TEMEL ESASLAR

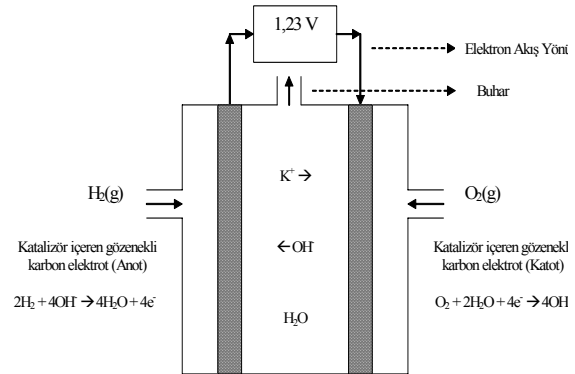
### Yakıt Pili Çalışma Prensibi ve Türleri

Yakıt pillerinin çalışma prensibi 1839 yılında Sir William Grove tarafından keşfedilmiştir. Fakat yüksek maliyetinden dolayı, 1960 yılında Amerikan uzay araçlarında kullanılmaya kadar yaygın bir şekilde kullanılmamıştır. Bu aşamayı takiben, yakıt pilinden üretilen enerjinin nükleer enerjiden daha güvenli ve güneş enerjisinden daha ucuz olduğu düşünülmüş ve gittikçe daha yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır. Yakıt pili; içerisinde yükseltgenme-indirgenme reaksiyonlarının gerçekleştiği ve reaktiflerin sürekli olarak dışarıdan verilip ürünlere dönüştürüldüğü, bu reaksiyonlar sonucu kimyasal enerjiden elektrik enerjisinin üretildiği bir elektrokimyasal cihazdır. Elektroliz

olayında, su; hidrojen gazı katotta ve oksijen gazı anotta olacak şekilde bileşenlerine ayrılır. Bir yakıt pilinde ise, elektroliz olayında gerçekleşen olayın tersi gerçekleşir ve hidrojen ile oksijen birleşerek suyu oluştururlar. Elektrik akımını meydana getiren unsur ise; anoda beslenen hidrojenden kopartılan elektrondur. H<sup>+</sup> formuna dönüşen hidrojen iyonu membran veya diğer elektrolitler tarafından katoda iletilirken, kopartılan elektron da dış devreden geçerek elektrik akımını meydana getirir (Zumdhahl 1995; Hirschenhofer vd, 1998; Silbey ve Alberty 2001; Johnston vd, 2005).

Yakıt pilinin çalışabilmesi için gerekli olan hidrojen ve oksijen; bir DC güç kaynağının veya güneş pilinin bağlı olduğu bir elektroliz ünitesinden temin edilebilir (Prince-Richard vd, 2005). Yakıt pili, reaksiyona giren maddelerin sürekli olarak girişinin temin edildiği galvanik bir pildir. Bir yakıt pilinde bulunan elektrotlar, galvanik ve elektrolitik pillerde bulunan elektrotlardan farklı olarak, herhangi bir tepkimeye girmezler. Bunların işlevi, sadece pilin içine ve dışına elektronları iletmek ve çözelti içerisindeki gazlar ve iyonlar arasındaki değişimi kolaylaştırmaktır.

Elektrolit çözelti, pil içerisinde yüklerin aktarımını sağlar ve çözülmüş iyonlar elektrotlardaki yarı-pil reaksiyonlarına katılırlar. Bir yakıt pilinde asidik çözeltinin kullanımı korozyon oluşumuna neden olur. Bundan dolayı, bazik çözeltiler (örneğin KOH) tercih edilir (Silbey ve Alberty 2001). Elektrik enerjisi üretim mekanizmasına örnek olmak üzere, bir alkali yakıt pili şematik olarak Şekil 2'de verilmiştir.



Şekil 2. Bir alkali yakıt pili üzerinde elektrik üretim mekanizmasının gösterimi (Hirschenhofer vd, 1998).

Şekil 2'den görüleceği üzere, hidrojen gazı bağlı olduğu elektrota gider ve iyonlaşır, iyonlaşan hidrojen elektrolit çözelti içerisinde geçerek diğer tarafta hidrojenin vermiş olduğu elektronu alarak, iyonlaşan oksijen ile birleşerek suyu meydana getirir. Burada hidrojenin iyonlaşmasıyla açığa çıkan elektronun devreden geçmesiyle sistemde bir elektrik enerjisi üretilmiş olur. Gerçekte, bir yakıt pilinin çalışması için hidrojen ve oksijen kullanılacak diye bir zorunluluk yoktur. Bir redoks reaksiyonunun gerçekleşebilmesi için, bir yükseltgene ve bir de indirgene ihtiyaç vardır. Oksijenin havadan kolay bir şekilde elde

edilmesi ve hidrojenin de hızlı bir reaksiyon kinetiğine sahip olması yüzünden, bu maddeler yakıt pillerinde daha yaygın olarak kullanılmaktadır.

Yakıt pilleri, içten yanmalı motorlarla karşılaştırıldığında, yüksek verimliliğe, neredeyse sıfır sayılabilecek kirliliğe, kolay işletilebilme yeteneğine ve parçalarının kolayca değiştirilebilme avantajlarına sahiptir. Çalışma prensibi aynı olmasına rağmen, farklı tiplerde yakıt pilleri vardır (Faghri ve Guo 2005; www.fuelcelltoday.com; www.fuelcells.org; www.eere.energy): i) alkali yakıt pilleri (AFC), ii) fosforik asit yakıt pilleri (PAFC), iii) proton değişimli membran kullanan yakıt pilleri (PEMFC), iv) erimiş karbonat yakıt pilleri (MCFC), v) katı oksit yakıt pilleri (SOFC), vi) direk metanol yakıt pilleri (DMFC).

Alkali yakıt pilleri 65-220°C de çalışırlar ve yakıt olarak hidrojeni ve elektrolit olarak KOH'ı kullanırlar. Bu yüzden pahalıdır ve genellikle uzay çalışmalarında kullanılmaktadır. Fosforik asit pilleri en yaygın ticari pillerden biridir ve çoğunlukla hastahanelerde, okullarda ve havaalanlarında kullanılmaktadır. Bu piller büyük boyutlu ve kısmen pahalı olup, yakıt olarak hidrojen gazını, elektrolit olarak ise fosforik asiti kullanır. Çalışma sıcaklığı yaklaşık 205°C' dir. PEM tipi yakıt pilleri ulaşım araçlarında ve küçük güç kaynaklarında kullanılmaktadır. Yakıt olarak hidrojen gazı, katalizör olarak Pt kullanılmakta ve pil 80°C de çalışmaktadır. Erimiş (molten) karbonat yakıt pilleri ve katı-oksit yakıt pilleri ticari olarak kullanıma neredeyse hazır yakıt pilleridir ve sırasıyla 600°C ve 1000°C de çalışmaktadır. Erimiş karbonat yakıt pilleri elektrolit olarak karbonatı ve katı-oksit yakıt pilleri ise elektrolit olarak seramik teknolojisini kullanır. Direk-metanol yakıt pilleri ise son zamanlarda geliştirilmiş yeni bir tip yakıt pili'dir ve hidrojeni, sıvı metanolden direk olarak alır. Pil 75°C gibi düşük sıcaklıklarda çalışır.

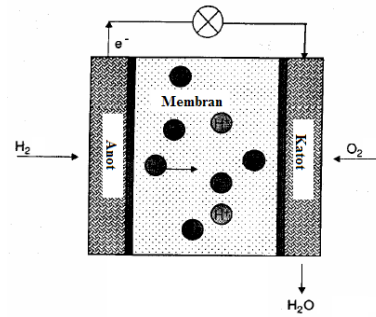
Yukarıda belirtilen yakıt pili türlerinden PEM tipi yakıt pili, mobil (kara ve hava taşıtları) uygulamalarda kullanımındaki kolaylık ve düşük çalışma sıcaklığı nedeniyle, son yıllarda yoğun olarak araştırılmaktadır (Bıyıkoglu, 2005; Serrafiro vd, 2005; Souzy ve Ameduri, 2005; Vargas vd, 2005; Maher ve Al-Baghdadi 2005). Söz konusu piller basit bir dönüşüm mekanizması ile ters yönde çalıştırılarak PEM tipi elektroliz ünitesine dönüşmekte ve hidrojen üretebilmektedir. Bu çalışmada sunulan analizlerde, PEM tipi elektroliz ve yakıt pili üniteleri göz önüne alınmaktadır.

#### PEM Tipi Yakıt Pili Reaksiyon Mekanizması

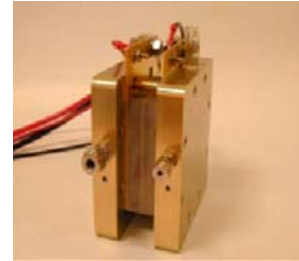
PEM tipi yakıt pillerde, elektrotlar (anot ve katot) bir proton değiş-tokuş membranı (Proton Exchange Membrane) tarafından birbirinden ayrılmaktadır (Hirschenhofer vd, 1998; Bıyıkoglu, 2005; Vargas vd, 2005). Her bir elektrotun bir yüzeyi ince platin bir tabaka ile kaplanmıştır. Elektrotlar, katalizör ve

membran, pilin membran-elektrot sistemini oluşturmaktadır. Membran-elektrot sisteminin bir pil gövdesi içerisine yerleştirilmesi sonucu; kimyasal enerji, elektrik enerjisine dönüştürülür. PEM yakıt pilinin çalışma sıcaklığı 80°C, verim yaklaşık olarak %40 – %60 ve güç üretim aralığı ise 50W – 250 kW'dır (www.fuelcells.org; www.eere.energy). Diğer yakıt pilleriyle karşılaştırıldığında, daha düşük sıcaklıklarda çalışıyor olması, bu pilin evlerde ve araçlarda kullanımını cazip hale getirmiştir (Yildirim, 2004). Kullanılacak olan hidrojen yakıtının saflaştırılması gerekmektedir. Katalizör olarak kullanılan platin ise pilin maliyetini yükseltmektedir. PEM tipi bir yakıt piline ait membranelektrot sistemi ve ticari olarak üretilmiş bir pilin yapısı, Şekil 3'de gösterilmiştir (Yildirim, 2004). Şekil 3(b)'de gösterilen pilin içerisinde ince levhalar halinde PEM bulunmaktadır.

(a)

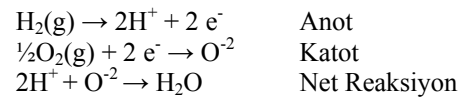


(b)



Şekil 3. PEM tipi yakıt piline ait; a) membran-elektrot sistemi, b) ticari bir pilin yapısı.

Pilde gerçekleşen anot, katot ve toplam reaksiyon denklemleri sırasıyla;



şeklinde. Bu reaksiyonlar sonucunda ortama verilen enerji, izotermal ortamda suyun oluşumu sırasında oluşan entalpi değişiminden yararlanılarak hesaplanır. Su ve bileşenlerinin normal koşullarda termodinamik özellikleri Tablo 1'de verilmiştir (Silbey ve Alberty 2001). Hava kullanılması durumunda, hava içerisindeki diğer gazlar (CO<sub>2</sub> ve N<sub>2</sub> gibi) elektrokimyasal reaksiyon içerisinde yer almadığı için, enerji hesaplamalarında bunları

değerlendirmeye gerek yoktur. Tersinir ve sabit sıcaklıkta gerçekleştiği varsayılan reaksiyona ait termodinamik büyüklüklerin hesabına yönelik bilgiler Tablo 2’de verilmiştir (Bknz: Smith ve Ness, 1987; http://hyperphysics).

**Tablo 1.** Normal koşullarda (T=25 °C ve P=0.98 bar) su ve bileşenlerinin termodinamik özellikleri (Silbey ve Alberty, 2001).

	H <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O
Entalpi (kJ/mol)	0	0	-285.83
Entropi (J/mol K)	130.68	205.14	69.91

**Tablo 2.** Yakıt piline ait termodinamik özelliklerin (bir mol hidrojen için) hesabı.

Termodinamik Büyüklük	Geçerli denklemi ve hesabı
Entalpi değişimi ( $\Delta H$ )	$H_2(g) + \frac{1}{2}O_2(g) \rightarrow H_2O(s)$ $\Delta H = \Delta H_{tepkime} = \sum H_{ürün} - \sum H_{girenler} = (1\text{mol}) \times (-285.83 \text{ kJ/mol}) - 0 = -285.83 \text{ kJ}$
Entropi değişimi ( $\Delta S$ )	$\Delta S = \Delta S_{tepkime} = \sum S_{ürün} - \sum S_{girenler}$ $\Delta S = [(1\text{mol}) \times (69,91 \text{ J/mol}\cdot\text{K})] - [(1\text{mol}) \times (130,68 \text{ J/mol}\cdot\text{K}) + (\frac{1}{2}\text{mol}) \times (205,14 \text{ J/mol}\cdot\text{K})] = -163,34 \text{ J/K}$
Sistem tarafından çevreye atılan ısı enerjisi ( $Q_s$ )	$Q_s = T\Delta S$ $Q_s = (298\text{K}) \times (-163,34 \text{ J/K}) = -48,7 \text{ kJ}$
Gibbs Serbest Enerjisi ( $\Delta G$ )	$\Delta G = \Delta H - T\Delta S$ $\Delta G = (-285,83 \text{ kJ}) - (-48,7 \text{ kJ}) = -237,13 \text{ kJ}$
Elektrik enerjisi çıkışı ( $W_e$ )	$W_e = -\Delta G = 237,13 \text{ kJ}$
Isı enerjisi çıkışı ( $Q_{gev}$ )	$Q_{gev} = -Q_s = 48,7 \text{ kJ}$
Yakıt (H <sub>2</sub> gazı) tarafından temin edilmesi gerekli toplam enerji ( $W_T$ )	$W_T = W_e + Q_c = 285.7 \text{ kJ}$
Yakıt pili ideal verimi ( $\eta_i$ )	$\eta_i = W_e/W_T = 0.83$

## PV-YAKIT PİLİ BİRLEŞİK SİSTEM ELEMANLARININ AKIM VE GERİLİM MODELLERİ

PV-yakıt pili birleşik sisteminde, Şekil 1’de gösterildiği üzere, elektrik enerjisi üreten (panel ve yakıt pili) ya da tüketen (elektroliz) ünitelerin akupleli olarak çalışmaları gerektiğinden elektriksel karakteristikleri arasında bir uyum sağlanması

gereklidir. Sistemde bulunan her üç ünitenin de akım (I) ve gerilim (V) büyüklükleri arasında çok parametrelili doğrusal olmayan bir ilişki mevcuttur. Bu zorluğa ek olarak, elektroliz ve yakıt piline ait I-V denklemlerinde bulunan bazı parametrelerin ise deneysel olarak tespiti gereklidir. Elektroliz ünitesinin karakterizasyondaki bu zorluğu aşmak için; çalışma gerilimi hesaplanırken, sadece açık devre gerilimi ile doğrusal direnç kayıpları göz önüne alınır (Silbey ve Alberty 2001). Bu durumda elektroliz ünitesinin çalışma gerilimi; doğrusal bir direncin sebep olduğu gerilim kaybının (V=IR), açık devre gerilimine eklenmesi ile bulunabilir. Aşağıda elektroliz ünitesi için verilen denklemlerde (Bknz: Denklem (6)) bu yaklaşımı doğrulamak mümkün olup, sabit açık devre gerilimi koşullarında, elektroliz ünitesi gerçekte doğrusal bir direnç ile temsil edilebilmektedir.

PV panellerin akım (I)-gerilim (V) karakteristikleri ışınım şiddetinin ve çevre (ya da panel yüzey) sıcaklığının bir fonksiyonu olup, bu ilişki en genel halde;

$$I_{pv} = I_L - I_0 \left[ \exp\left(\frac{V_{pv} + I_{pv}R_s}{A}\right) - 1 \right] - \frac{V_{pv} + IR_s}{R_{sh}} \quad (1)$$

denklemi ile tanımlanmaktadır (Duffie ve Beckman, 1991). Bu genel denklemin, ticari alanda yaklaşık %60 pazar payına sahip kristal silikon (C-Si) paneller için uygulanan daha basit bir formu bulunmaktadır. Mevcut denklemden,  $R_{sh} \gg R_s$  varsayımıyla elde edilen aşağıdaki matematiksel modelin (Kou vd, 1998) kullanımı oldukça yaygındır:

$$I_{pv} = I_L - I_0 \left[ \exp\left(\frac{V_{pv} + I_{pv}R_s}{A}\right) - 1 \right] \quad (2)$$

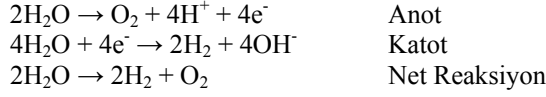
Bu elde edilen denklem ile, C-Si hücreler için doğru sonuçlara ulaşılabilmektedir. Denklemin voltaj cinsinden ifadesi ise,

$$V_{pv} = A \ln\left(\frac{I_{pv} - I_L}{I_0} + 1\right) - I_{pv}R_s \quad (3)$$

şeklinde. Denklemlerdeki  $I_L=f(H_v, T)$  yüzeye ışınım düştüğünde üretilen akımı,  $I_0=f(T)$  karanlık devre akımı,  $R_s$  seri direnci,  $A$  termal voltajı,  $I$  ve  $V$  sırasıyla çalışma akımını ve voltajını göstermektedir. Bu modelin en büyük özelliği, beş olan parametre sayısının dörde düşürülmesi sonucu üretici firma katalog verileriyle çözüm yapılabilmesidir. PV paneli oluşturan hücrelerin seri bağlanması nedeniyle, panel akım ve gerilimi için ‘n’ hücre sayısı ve ‘i’ herhangi bir hücreye ait indis olmak üzere,  $I_{pv} = I_i$  ve  $V_{pv} = nV_i$  bağıntıları geçerlidir. Bu bağıntılar; PV panellerin, seri bağlanarak bir panel sistemi oluşturulması durumunda da kullanılabilir.

Elektroliz ünitesindeki akım-gerilim karakteristiklerinin anlaşılabilmesi için, katot ve anottaki reaksiyonların bilinmesi gereklidir. Elektroliz ünitesindeki yarı-hücre

elektro-kimyasal reaksiyonları yukarıda yakıt pilleri için belirtilen reaksiyonların zıt yönde gerçekleşmesiyle oluşmaktadır. Anot, katot ve hücre net reaksiyonları sırasıyla aşağıda verilmektedir (Silbey ve Alberty 2001):



Söz konusu reaksiyon için standart koşullardaki (T=25 °C ve P= 0.98 bar) teorik (ideal) açık devre potansiyeli

$$E_{o^*} = \frac{\Delta G}{mF} = \frac{237.10^3}{2.96487} \cong 1.23 \text{ V} \quad (4)$$

olup, hidrojen üretiminin başlayabilmesi için bir elektroliz hücresine uygulanacak voltajın bu değerin üzerinde olması gerekmektedir. Denklemdaki, ' $\Delta G$ ' Gibbs serbest enerjisini, ' $m$ ' alınan veya verilen elektronun mol sayısını ve ' $F$ ' Faraday sabitini göstermektedir. Hücre sayısı ' $n_{el}$ ' olan bir elektroliz ünitesinde akım ( $I_{el}$ ) ve voltaj ( $V_{el}$ ) arasındaki ilişki,

$$E_o = E_{o^*} + \frac{\bar{R}T}{m\alpha F} \ln(I_{el} / I_o) \quad (5)$$

olmak üzere,

$$V_{el} = n_{el}(E_o + I_{el}R_{el}) \quad (6)$$

denklemler ile hesaplanabilmektedir. Denklemlerdeki ' $\bar{R}$ ' universal gaz sabitini, ' $\alpha$ ' şarj transfer katsayısını, ' $I_{oel}$ ' katot için kısa-devre akımını ve ' $R_{el}$ ' hücre iç direncini göstermektedir. Elektroliz ünitesinde üretilen hidrojenin kütleli debisi ise  $\dot{m}_{H_2} = n_c I_{el} M / 2F$  bağıntısı ile hesaplanabilmekte olup, ' $M$ ' hidrojenin molar kütesidir.

Yakıt pili hücresi için voltaj ( $V_{fc}$ ) değerini veren denklemin en genel formu; reaksiyon süresince geçerli tersinir voltaj ( $E_r$ ) ile kayıp voltaj ( $E_l$ ) arasındaki fark göz önüne alınarak aşağıdaki formda

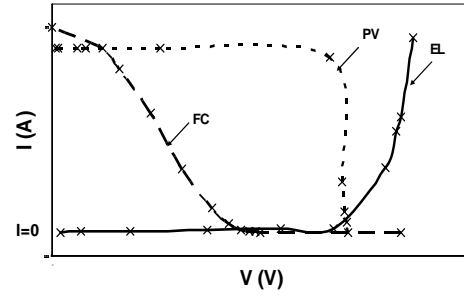
$$V_{fc} = E_r - E_l = E_r - (E_a + E_o + E_d) \quad (7)$$

yazılabilir (Hirschenhofer vd, 1998). Toplam voltaj kaybını oluşturan bileşenler; aktivasyon ( $E_a$ ), iç direnç ( $E_c$ ) ve difüzyon ( $E_p$ ) voltajlarıdır. Denklemden belirtilen kayıpların anot ve katot için ayrı ayrı göz önüne alınması gerekmektedir. Ancak, PEM yakıt hücresinin ticari uygulamada kullanılan çalışma aralıkları için, anottaki kayıplar ile katottaki difüzyon kaybının ihmal edilmesi sonucu elde edilen (elektroliz denklemine benzer) aşağıdaki denklemin kullanımı daha yaygındır (Hirschenhofer vd, 1998):

$$V_{fc} = n_{fc}(E_r - b \log(I_{fc} / I_{ofc}) - I_{fc}R_{fc}) \quad (8)$$

Denklemden parantez içerisindeki negatif işaretli terimler sırasıyla; aktivasyon ve iç direnç kayıplarına karşılık gelmekte olup, ' $b$ ' deneysel olarak tespit edilebilen 'Tafel eğimi' parametresidir.

Matematiksel modelleri verilen panel (PV), yakıt pili (FC) ve elektroliz (EI) ünitelerinin I-V niteliksel (qualitative) davranışını gösteren eğriler Şekil 4'de gösterilmiştir.



Şekil 4. PV panel, yakıt pili ve elektroliz hücrelerinin tipik I-V davranışları.

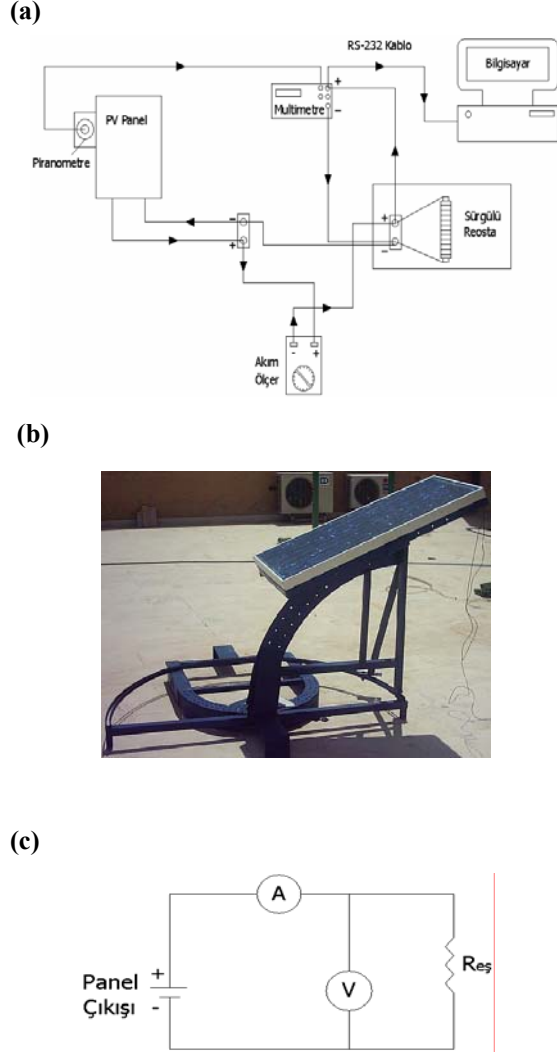
## DENEYSEL VE TEORİK ANALİZ

Fotovoltaik panele (Solarex, SX60U tipi) ait karakteristik değerlerin ölçümüne olanak sağlayan düzenek Şekil 5(a)'da gösterilmiştir. Ölçüm düzeneği temel olarak; güneş ışınımını ölçmek için kullanılan ve panellerle aynı eğim açısında yerleştirilen bir piranometre, PV panellerin voltaj ve akımını ölçmek için kullanılan 2 adet multimetre, verilerin aktarıldığı bir bilgisayar ve üretilen güçle tahrik edilen bir cihazı temsil eden sürgülü bir reostadan oluşmaktadır. Ayrıca, panel yüzey sıcaklığı ölçümü için, panelin arka yüzeyine yapıştırılmış, K-tipi bir ısıl çift bulunmaktadır. Multimetre ile bilgisayar ara bağlantısı RS-232 kablo ile gerçekleştirilmiştir. İstenilen yük (direnç) değeri sürgülü reosta ile ayarlanabilmektedir. Düzenek ve veri toplama sistemi ile ilgili detaylı bilgiler bir başka çalışmada (Aydın ve Yeşilata, 2005) mevcuttur.

Şekil 5(b)'de gösterilen sistem sehpa, güneşi gün içerisinde hem yatay hem de düşey ekseninde takip edebilmektedir. Yatay düzlemdeki takip işlemi, sehpa ayaklarına monte edilmiş yarım daire şeklindeki kızak ile gerçekleştirilmektedir. Sehpanın dönme merkezine konulan gösterge sayesinde dönme miktarı görülebilmektedir. Düşey düzlemdeki takip işlemi ise, panelin konulacağı yüzeyin altına yerleştirilen bağlantı elemanları ile sağlanmaktadır. Fotovoltaik panel yüzeye bağlandıktan sonra, panel istenilen miktarda eğilip kaldırılarak eğimi ayarlanmaktadır. Panelin bağlandığı yüzeye konulan bir gösterge ile panel eğimi görülebilmektedir. Bu çalışmada, panel güney yön doğrusuna paralel (azimut açısı sıfır) olacak şekilde yerleştirilmiştir. Yatay düzlem ile panel yüzeyi arasındaki eğim açısı olarak  $\alpha=5^\circ$  değeri seçilmiştir. Bu değer, Şanlıurfa ili için deneylerin yapıldığı Mayıs ayında geçerli

optimum eğim açısına eşittir (Bknz: Fıratoglu ve Yesilata, 2004).

Deneylerde bir elektroliz ünitesini simüle edecek şekilde bir eşdeğer direnç kullanılmıştır. Şekil 5(c)'de gösterilen elektrik devresindeki elektroliz ünitesine eşdeğer direnç değeri olarak, PV panelin standart test koşullarında maksimum güç ürettiği noktasal direnç değeri olan,  $R_e = 4,72 \Omega$  değeri seçilmiştir.



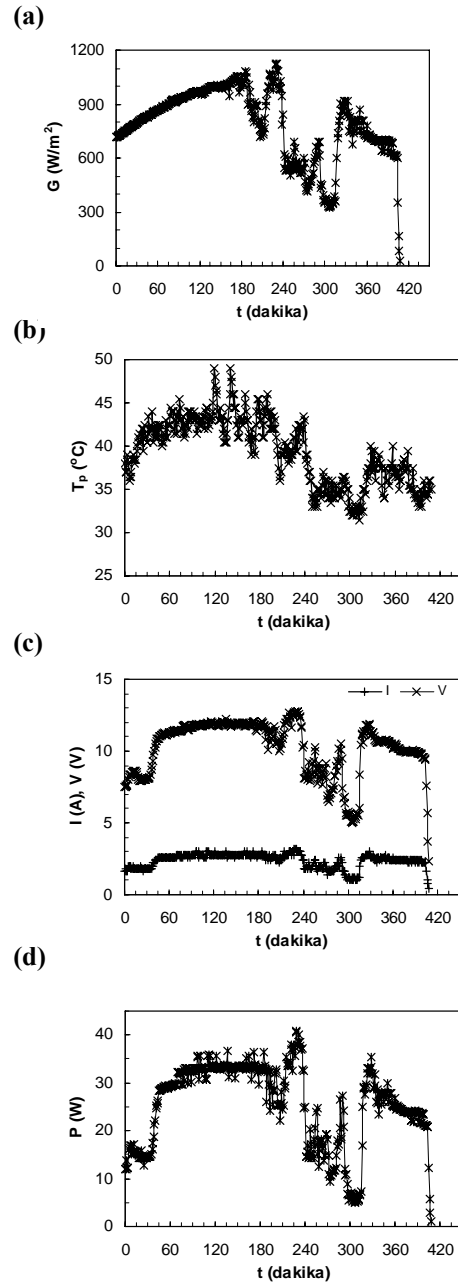
Şekil 5. (a) Veri ölçüm ve kayıt sistemini oluşturan bileşenler, (b) PV panel ve sehvası, (c) ölçümlere ait eşdeğer elektriksel devre.

Bu değer, standart koşullarda çalışan 4 hücreli ideal bir elektroliz ünitesinden,  $I = 1.076 A$  akım geçmesine eşdeğerdır. Çünkü, aralarında seri olarak bağlanmış dört hücreli bir elektroliz ünitesinde,  $E_o = 5.08 V$  değerinin üzerinde bir voltaj temin edilmesi halinde; üniteden bir akım geçmesi (dolayısıyla hidrojen üretimi) mümkün olabilecektir.

### DeneySEL Sonuçlar

Seçilen bir güne ait (31/05/2005) deneysel ölçüm sonuçları Şekil 6'da verilmiştir.

Grafikler,  $t=0$  anı, saat 09:00'a karşılık gelecek şekilde çizilmiştir. Şekil 6(a) ve 6(b)'den görüleceği üzere, dış atmosferik koşullar (ışınım ve sıcaklık) deneyler süresince dinamik bir seyir izlemekte olup, bu değişimler Şekil 6(c) ve 6(d)'de gösterilen panel akım-gerilim ve güç çıktılarında önemli seviyede dalgalanma yaratmaktadır. Panel yüzeyine ulaşan toplam ışınım şiddetinde ( $G$ ) ulaşılan maksimum ve minimum değerler sırasıyla  $1121 W/m^2$  ve  $340 W/m^2$  olarak kaydedilmiştir. Panel yüzey sıcaklığı ( $T_p$ ), günün büyük bir bölümünde çevre sıcaklığının (ortalama  $32^\circ C$ ) üzerinde seyretmiş olup, bazı anlarda  $49^\circ C$  gibi panel güç çıktısını önemli ölçüde düşürecek yüksek panel sıcaklığı kaydedilmiştir.



Şekil 6. (a) toplam güneş ışınımı, (b) panel yüzey sıcaklığı, (c) akım-gerilim, (d) panel gücü; değerlerinin anlık değişimleri.

Bu değişimler, beklenildiği üzere panel gerilimini ( $V$ ) daha büyük oranda etkilemekle birlikte, minimum gerilim

değeri 5.1 V değerinin altına düşmemiştir. Bu durum, göz önüne alınan elektroliz ünitesinde deney süresinin yaklaşık tamamına yakın kısmında hidrojen üretiminin gerçekleşmesi anlamına gelmektedir. Minimum gerilim değerinin kaydedildiği noktadaki akım değeri ise yaklaşık 1A olarak ölçülmüştür. Panel gücünde ( $P$ ) elde edilen maksimum ve minimum değerler sırasıyla 41W ve 5.5W olmuştur. Panel nominal gücü olan 60W değerine ulaşamamasının temel nedeni; yüksek  $T_p$  değerleri ve dirençte oluşan Joule ( $I^2.R$ ) kayıplarıdır.

#### 4.2. Teorik Sonuçlar

Yukarıda bahsedildiği üzere, panel tarafından üretilen gerilim değeri ( $V_{min}=5.1V$ ), elektroliz ünitesinde gün boyunca hidrojen üretimini gerçekleştirecek seviyededir. Ölçülen akım değerleri kullanılarak, elektroliz ünitesinde üretilen hidrojenin anlık hacimsel debisi ( $q$ ) ve hidrojen deposundaki toplam hidrojen hacminin ( $Q$ ) değişimi hesaplanmış ve sonuçlar Şekil 7(a)'da verilmiştir. Gün boyunca atmosferik şartların değişkenliğine rağmen, 'q' değerlerindeki değişim (sadece panel akımının bir fonksiyonu olduğundan) nispeten daha kararlı bir seyir izlemektedir. Hidrojen deposunda (daha sonra yakıt pili ünitesinde kullanılmak üzere) biriken hidrojen miktarı  $Q=7.4$  lt ( $=10^{-3}$  m<sup>3</sup>) olarak belirlenmiştir.

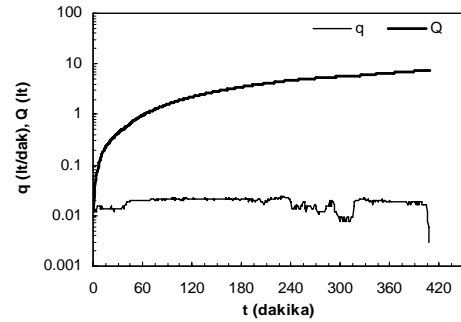
Mevcut hidrojen ile yakıt pilinin ne kadar süre elektrik üretebileceğine bir örnek olmak üzere parametrik bir hesaplama gerçekleştirilmiştir.  $V_{fc}=12V$  çıkış voltajına sahip PEM tipi bir yakıt hücresinde farklı yanma (elektrik enerjisine dönüşüm) verimleri kullanılarak, farklı miktarda güç çıktılarına göre mevcut hidrojenin ne kadar sürede tükeneceğine yönelik hesaplama sonuçları Şekil 7(b)'de gösterilmiştir. Çıkış voltajı belirlendiğinden, her bir farklı güç değeri, gerçekte hidrojen tüketimine direkt etki eden farklı bir akım ( $I_{fc}$ ) değerine karşılık gelmektedir. PEM tipi ile elde edilebilecek maksimum (ideal) yanma verimi olan  $\eta=0.83$  değeri (Bknz: Tablo 2) göz önüne alındığında, depodaki hidrojen  $P_{fc}=100$  W'lık bir elektriksel gücü ancak  $t=46$  dak. için karşılayabilmektedir. Daha küçük güçteki elektriksel yükler için yakıt pili çalışma süresi orantılı olarak artmaktadır (örneğin  $P_{fc}=10$  W için  $t=465$  dak.) PEM tipi yakıt pillerinin yanma verimi uygulamada 0.40 - 0.60 değerleri arasında değiştiğinden, yakıt pilinin mevcut hidrojen ile çalışma süresi Şekil 7(b)'de gösterildiği üzere verim düşüşü ile daha da azalmaktadır.

#### DEĞERLENDİRME

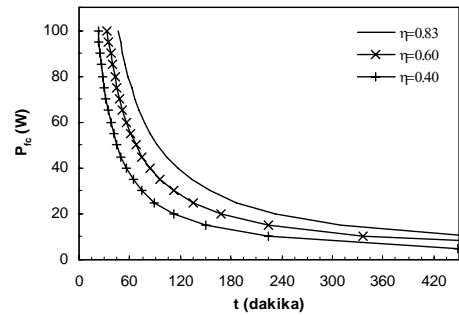
PV sistemlerle üretilen elektrik enerjisinin depolanmasındaki zorlukları gidermede, PEM tipi yakıt pillerinin kullanımı son yıllarda gündeme gelmiş bir alternatiftir. Ancak her iki sistem ile elektrik temini pahalı bir teknolojidir. PV sistem, yakıt pilinde kullanılan hidrojenin üretilmesi sırasında, gerekli enerji giderlerini ortadan kaldırmasına karşın, zaten düşük olan verim değeri, elektroliz ve yakıt pili ünitelerindeki dönüşümlerle daha da düşmektedir.

Ancak; ülkemiz enerji ve savunma sanayi stratejisi için, bu konuda yapılacak uygulamalı üretim ve araştırmalara gereksinim vardır. Güneş enerjisi potansiyeli yüksek olan yörelerde, en az altı ay süresince enerji bedeli ödmeden hidrojen üretimi mümkündür. Depolanan hidrojenin, gereksinim halinde mobil uygulamalarda kullanımı için ise en iyi alternatif hali hazırda PEM yakıt pilidir. PV-yakıt pili birleşik sisteminin, ekonomikliğin ön planda olmadığı, ileri düzey güvenlik/strateji gerektiren durumlara hazırlık anlamında önemli olduğu gerçeği göz ardı edilmemelidir.

(a)



(b)



Şekil 7. (a) Elektroliz ile üretilen anlık ( $q$ ) ve toplam ( $Q$ ) hidrojen miktarları, (b) yakıt pilinin depolanan hidrojen ile enerji temin etme süresinin güç ve yanma verimine göre değişimi.

## KAYNAKLAR

Aydın M. ve Yeşilata B., PV Panel Güç Karakteristiklerinin Deneysel Yöntemle Belirlenmesi, *Isı Bilimi ve Tekniği Dergisi Dergisi* 25, 1-8, 2005.

Bıyıkoglu, A., Review of Proton Exchange Membrane Fuel Cell Models, *International Journal of Hydrogen Energy* 30, 1181 – 1212, 2005.

Busquet, S., Domain, F. Metkemeijer, R., Mayer, D., Stand-Alone Power System Coupling a PV Field and a Fuel Cell: Description of the Selected System and Advantages, in *Proceedings of the PV in Europe conference*, Rome, Italy, 7–11 October 2002, pp. 667-660.

Duffie, J. A. and Beckman, W. A., *Solar Engineering of Thermal Processes*, John Wiley & Sons Inc., New York, 1991.

Faghri, A., Guo, Z., Challenges and Opportunities of Thermal Management Issues Related to Fuel Cell Technology and Modeling, *International Journal of Heat and Mass Transfer* 48, 3891–3920, 2005.

Fıratoglu, Z.A., Yesilata B., New Approaches on the Optimization of Directly-Coupled Photovoltaic Water-Pumping Systems, *Solar Energy* 77, 81-93, 2004.

Hirschenhofer, J.H., Stauffer, D.B., Engleman, R.R., Klett, M.G., *Fuel Cell Handbook* (Second Edition), Parsons Corporation, Reading, PA, 1998.

<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/thermo/electrol.html#c2>

[http://www.eere.energy.gov/hydrogenandfuelcells/fuelcells/fc\\_types.html#pem](http://www.eere.energy.gov/hydrogenandfuelcells/fuelcells/fc_types.html#pem)

<http://www.fuelcells.org>

<http://www.fuelcelltoday.com>

Johnston, B., Mayo, M.C., Khare, A., Hydrogen: The Energy Source for the 21st Century, *Technovation* 25, 569–585, 2005.

Kou, Q., Klein, A., Beckman, W., A Method for Estimating the Long-Term Performance of Direct-Coupled PV Pumping Systems, *Solar Energy* 64, 33-40, 1998.

Maher, A.R., Al-Baghdadi, S., Modelling of Proton Exchange Membrane Fuel Cell Performance Based on Semi-Empirical Equations, *Renewable Energy* 30, 1587–1599, 2005.

Prince-Richard, S., Whale, M., Djilali, N., A Techno-economic Analysis of Decentralized Electrolytic Hydrogen Production for Fuel Cell Vehicles, *International Journal of Hydrogen Energy* 30, 1159 – 1179, 2005.

Radovic, L.R., *Energy and Fuels In Society*, (Second Edition), McGraw Hill, January 1997, ISBN: 0-07-052577-3.

Serrafero, A., Arato, E., Costa, P., Transport Phenomena and Performance Limits in Polymeric Electrolyte Membrane Fuel Cells, *Journal of Power Sources* 145, 470–476, 2005.

Silbey, R.J., Alberty, R.A., *Physical Chemistry* (Third Edition), John Wiley & Sons, Inc., New York, 2001.

Smith, J.M., Van Ness, H.C., *Introduction to Chemical Engineering Thermodynamics* (Fourth Edition), McGraw-Hill International Editions, New York, 1987.

Souzy, R., Ameduri, B., Functional Fluoropolymers for Fuel Cell Membranes, *Prog. Polym. Sci.* 30, 644–687, 2005.

Vargas, J.V.C., Ordonez, J.C., Bejan, A., Constructal PEM Fuel Cell Stack Design, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 48, 4410–4427, 2005.

Yildirim, T., *Neutron Methods for Characterization of Fuel Cell and Hydrogen Storage Materials*, Presentation, NIST Center for Neutron Research Gaithersburg, 2004, MD 20899-8562.

Zumdahl, S.S., *Chemical Principles* (Second Edition), D.C. Heath and Company, Lexington, 1995.



### Bülent YEŞİLATA

Doktor ünvanını Ocak/1999'da (Lehigh Üniversitesi/ ABD), Doçent ünvanını ise Mart/2004'de almıştır. Ağustos/2002-Ocak/2003 tarihleri arasında Massachusetts Institute of Technology (MIT)'de ziyaretçi araştırmacı olarak çalışmıştır. Polimerik malzeme teknolojisi, polimerik akışlarda kararsızlıklar ve viskoz ısınma etkisi, uçak türbini malzemelerinde oksidasyon modellemesi, mikro-akışkan sistemler ve fotovoltaik pillerle enerji üretiminde optimizasyon konularında çalışmaları bulunmaktadır.



### Feridun DEMİR

1995-1997 yılları arasında A.B.D.'de Polytechnic University'de Yüksek Lisansını ve 1997-2001 yılları arasında University of Florida'da Doktora eğitimini tamamladı. 2002-2003 yılları arasında Deniz Yedek Subayı ve Kimya Öğretim Üyesi olarak askerlik görevini Deniz Harp Okulunda yaptı. Halen Yardımcı Doçent Doktor olarak Harran Üniversitesinde Mühendislik Fakültesi Çevre Mühendisliği Bölümünde Öğretim Üyesi olarak çalışmaktadır.