

## TEORİK ESASLAR

PV-yakıt pili birleşik sisteminde, 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 durum Şekil 2'de gösterilmiş olup, her bir bileşenin I-V davranışını temsil eden eğriler, ayrı grafikler halinde gösterilmiştir. Şekilde gösterilen eğriler arasında istenen uyumun sağlanması (örneğin; elektroliz I-V eğrisinin PV panel maksimum çalışma noktasından geçmesi) genellikle zordur. Bu durum çok aşamalı bir optimizasyon gerektirmektedir. Bu zorluğa ek olarak, elektroliz ve yakıt piline ait I-V denklemlerinde bulunan bazı parametrelerin ise deneysel olarak tespiti gereklidir. Bu durumun daha iyi anlaşılabilmesi amacıyla; PV panel, elektroliz ünitesi ve yakıt pili I-V davranışlarını temsil eden denklemlere yönelik açıklamalar aşağıda sunulmuştur.

Öncelikle; PV panellerin akım (I)-gerilim (V) karakteristikleri ışınım şiddetinin ve çevre (ya da panel yüzey) sıcaklığının bir fonksiyonu olup, bu ilişki çoğunlukla karmaşık denklemlerle tanımlanmaktadır. Ancak; sözü edilen bu denklemin, ticari alanda yaklaşık %60 pazar payına sahip kristal silikon (C-Si) paneller için uygulanan daha basit bir formu bulunmaktadır. Aşağıda verilen bu denklemin en büyük özelliği, üretici firma katalog verileri kullanılarak analitik çözüme imkan vermesi olup, bu nedenle kullanımı oldukça yaygındır [1]:

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

şeklinde. Denklemdaki  $I_L$  yüzeye ışınım düştüğünde üretilen akımı,  $I_0$  karanlık devre akımı,  $R_s$  seri direnci,  $A$  termal voltajı,  $I_{pv}$  ve  $V_{pv}$  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 karakteristikleri; katot, anot ve hücre reaksiyonlarının direkt fonksiyonu olup, aşağıdaki denklemlerle verilmektedir [1]:

$$V_{el} = n_{el} (E_o + I_{el} R_{el}) \quad (2)$$

Bu denklemden geçen parametrelerden; ' $n_{el}$ ' hücre sayısını,  $I_{el}$

elektroliz ünitesinde akımı ve ' $R_{el}$ ' hücre iç direncini göstermektedir.  $E_o$  değeri ise; standart koşullardaki ( $T=25^\circ\text{C}$  ve  $P=0.98$  bar) teorik açık devre potansiyeli,

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

olmak üzere,

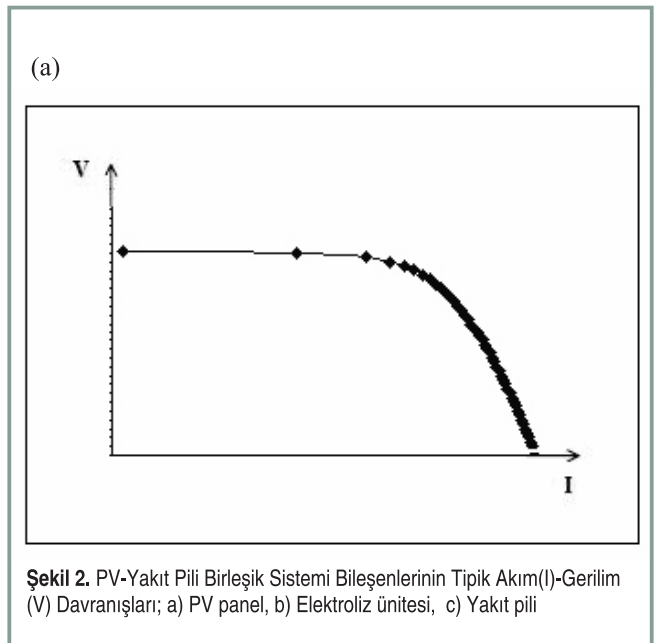
$$E_o = E_{o*} + \frac{\bar{R}T}{m\alpha} \ln(I_{el}/I_{oel}) \quad (4)$$

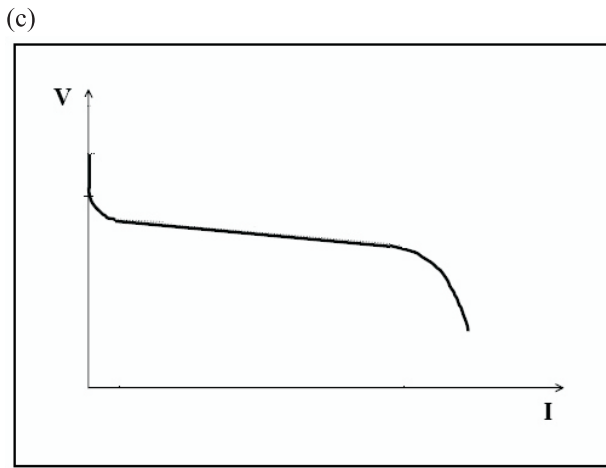
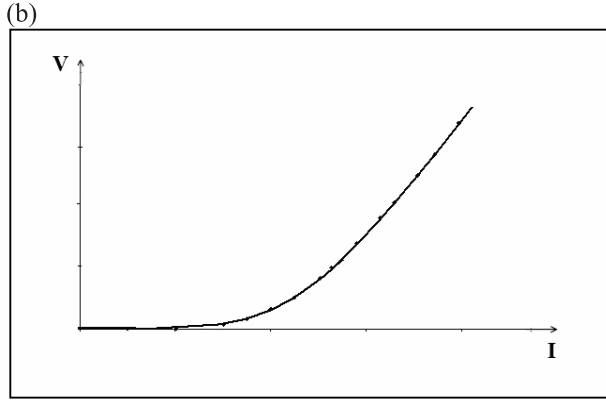
denklemler ile hesaplanabilmektedir. (3) nolu denklemden, ' $\Delta G$ ' Gibbs serbest enerjisini, ' $m$ ' alınan veya verilen elektronun mol sayısını ve ' $F$ ' Faraday sabitini göstermektedir. (4) nolu denklemden ise; ' $\bar{R}$ ' universal gaz sabitini, ' $\alpha$ ' şarj transfer katsayısını ve ' $I_{oel}$ ' katot için kısa-devre akımını göstermektedir. Elektroliz ünitesinde hidrojen üretiminin başlayabilmesi için bir hücreye uygulanacak voltajın, (2) nolu denklemlerle hesaplanacak değerin üzerinde olması gerekmektedir. Diğer taraftan elektroliz ünitesinde üretilen hidrojenin kütleli debisi;  $\dot{m}_{H_2} = n_c I_{el} M/2F$  bağıntısı ile hesaplanabilmekte olup, ' $M$ ' hidrojenin molar kütleleridir.

Son olarak yakıt pili hücresi için voltaj ( $V_{fc}$ ) değerini veren denklemin en basit ve yaygın kullanılan formu;

$$V_{fc} = n_{fc} (E_r - b \log(I_{fc}/I_{ofc}) - I_{fc} R_{fc}) \quad (5)$$

şeklinde [1]. Denklemden parantez içerisindeki negatif işaretli terimler sırasıyla; aktivasyon ve iç direnç kayıplarına karşılık gelmekte olup, ' $b$ ' deneysel olarak tespit edilebilen 'Tafel eğimi' parametresidir.





Şekil 2 devamı. PV-Yakıt Pili Birleşik Sistemi Bileşenlerinin Tipik Akım(I)-Gerilim (V) Davranışları; a) PV Panel, b) Elektroliz Ünitesi, c) Yakıt pili

## DENEY DÜZENEĞİ VE YÖNTEM

Bu çalışmada kullanılan fotovoltaik (PV) ve yakıt pili (FC) hibrid sisteminin temel bileşenleri Şekil 3'te şematik olarak gösterilmiştir. Şekilde gösterilen 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.

Sistemde kullanılan sekiz adet 24 V/175 Watt güneş paneli; tek eksenli güneş izleme sehпасı üzerine monte edilmiş olup, her iki bileşene ait teknik özellikler Tablo 1'de verilmiştir. PV modüller tarafından üretilen enerjisi ile çalıştırılan hidrojen üreticiden (elektroliz ünitesi) elde edilen hidrojen metal hidrid tanklarda depolanmaktadır. Her iki bileşene ait teknik özellikler Tablo 2'de sunulmuştur. Metal hidrid tanklarda depolanan hidrojen yakıt pilini çalıştırmada kullanılmaktadır. Üretilen enerjinin istenilen DC ya da AC elektrik yüklerini tahrik etmesi ise sistemde bulunan Enerji Yönetim Modülü tarafından sağlanmaktadır. Yakıt pili ve enerji yönetim ünitesine ait teknik özellikler Tablo 3'te verilmiştir.

Bu çalışmada kullanılan PV-FC hibrid sisteminde; elektriksel karakterizasyon amacıyla çok sayıda noktada ölçüm gerekliliği söz konusudur. Elektriksel ölçüm noktalarına ait şematik gösterim Şekil 4'te sunulmuştur. İstenilen her noktada gerek elektriksel (akım, gerilim), gerekse termodinamiksel (basınç, sıcaklık, debi) büyüklüklerin değerlerini ölçmede 32 kanallı datalogger, biri 16 diğeri sekiz kanallı olmak üzere iki adet çok kanallı hafızalı sıcaklık ölçer, bir adet digital

