

PV Panel ve PEM Yakıt Pilinden Oluşan Küçük Ölçekli Hibrid Sistemin Matematiksel Modeli

Buğra YILMAZ^{1*}, Muhsin Tunay GENÇOĞLU²

¹ Sivil Havacılık Yüksekokulu, Fırat Üniversitesi, Elazığ, Türkiye

² Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Fırat Üniversitesi, Elazığ, Türkiye

*¹ b.yilmaz@firat.edu.tr, ² mtgencoglu@firat.edu.tr

(Geliş/Received: 09/01/2024;

Kabul/Accepted: 04/07/2024)

Öz: Günümüzde, giderek artan enerji talebinin fosil yakıtlarla karşılanması sera gaz emisyonlarını yükseltmektedir. Bu yükseliş dünyamızı küresel iklim krizine doğru sürüklemektedir. Bundan dolayı, küresel ısınma geri dönüşü olmayan noktaya ulaşmadan önce ülkelerin yenilenebilir ve yeşil enerjiye geçiş yapması zorunluluk halini almaktadır. Yenilenebilir kaynaklar arasında önde gelen güneş ve hidrojen enerjisi son yıllarda yapılan çalışmalar ve yatırımlarla giderek popülerliğini artırmaktadır. Bu çalışmada, 200 W fotovoltaik (PV) panel ve 100 W Proton Değişim Membranlı (PEM) yakıt pilinin MATLAB/Simulink'te matematiksel modellerinin oluşturulmasıyla güneş ve hidrojen enerjisini birleştiren hibrid sistem incelenmiştir. PV panelin ve PEM yakıt pilinin tanım denklemlerini kullanarak adım adım elde edilen alt modeller birleştirilerek yakıt pilinin polarizasyon ve güç grafiği elde edilmiştir. Modeller detaylı ve tekrarlanabilir bir şekilde anlatılmış ve tüm model parametreleri paylaşılmıştır. Her iki kaynak için DC-DC yükseltici dönüştürücü modelleri oluşturulup panel ve yakıt pili paralel bağlanarak tipik rezistif yük beslenmiştir. 3,795 A ve 6,205 A sırasıyla yakıt pili ve PV panelden elde edilerek 300 W güç sağlanmıştır.

Anahtar kelimeler: PV panel, PEM yakıt pili, hibrid sistem, matematiksel model, MATLAB/Simulink.

Mathematical Model of Small-Scale Hybrid System Consisting of PV Panel and PEM Fuel Cell

Abstract: Today, meeting the ever-increasing energy demand with fossil fuels increases greenhouse gas emissions. This rise is dragging our world towards a global climate crisis. Therefore, it becomes imperative for countries to switch to renewable and green energy before global warming reaches the point of no return. Solar and hydrogen energy, which are the leading renewable sources, are increasing in popularity with the studies and investments made in recent years. This study examined a hybrid system combining solar and hydrogen energy by creating mathematical models of a 200 W photovoltaic (PV) panel and a 100 W Proton Exchange Membrane (PEM) fuel cell in MATLAB/Simulink. Combining the submodels obtained step by step using the definition equations of the PV panel and PEM fuel cell, the polarization and power graph of the fuel cell was obtained. The models are explained in detail and reproducibly, and all model parameters are shared. DC-DC boost converter models were developed for both sources, and the panel and fuel cell were connected in parallel to feed a typical resistive load. 3.795 A and 6.205 A were obtained from the PEM fuel cell and PV panel, respectively, providing 300 W power.

Key words: PV panel, PEM fuel cell, hybrid system, mathematical model, MATLAB/Simulink.

1. Giriş

Sanayi Devrimi'nden günümüze kadar enerji ihtiyacı büyük oranda fosil yakıtlarla karşılanmaktadır. Yaklaşık 170 yıldır insan medeniyeti için vazgeçilmez olan fosil yakıtlar, gezegenin iklimini olumsuz şekilde değiştiren görünür etkilere yol açmaktadır. Fosil yakıt kullanımına bağlı oluşan karbondioksit (CO₂) ve metan (CH₄) gibi sera gazları, yüzeyden yansıyan güneş ışınlarının atmosferden uzaya geçmesini engelleyerek kara ve okyanus sıcaklıklarında artışa neden olmaktadır. Meydana gelen bu olumsuz durumlar, yenilenebilir ve yeşil enerji kaynaklarının kullanımını seçenек değil, bir zorunluluk haline getirmektedir.

Hidrojen enerjisi, son yıllarda sera gazı emisyonlarını azaltmak için ideal bir kaynak olarak ortaya çıkmaktadır.

Temiz bir enerji kaynağı olan hidrojen, PV panel veya rüzgâr türbiniyle üretilecek elektrik enerjisi kullanılarak elde edilebilmektedir [1-9]. Tüm yenilenebilir enerji teknolojileri arasında, PV paneller kullanarak güneş enerjisiyle elektrik üretimi için en umut verici seçeneklerden biridir [10, 11]. Güneş enerjisi mevsimsel olarak değişken ve öngörülemez olduğundan, başka bir yenilenebilir enerji kaynağıyla birlikte kullanmak hibrid sistemin sürekliliğini ve güvenilirliğini artıracaktır. PEM yakıt pilleri, yüksek güç yoğunlukları, düşük çalışma sıcaklıkları, düşük yerel emisyonlar, sessiz çalışma, daha az korozyon, yığın tasarımının basitleştirilmesi ve hızlı başlatma-kapanma özellikleri nedeniyle en uygun kaynaklardan biridir [12, 13]. Sağladığı avantajlar sayesinde,

* Sorumlu yazar: b.yilmaz@firat.edu.tr. Yazarların ORCID Numarası: ¹ 0000-0003-1910-1816, ² 0000-0002-1774-1986

PEM yakıt pilleri, güç sistemi uygulamalarının yanı sıra [14-18], otomobillerde ve uçaklarda da kullanılmaktadır [19-23].

Literatürde güneş enerjisi ve hidrojen enerjisini Simulink ortamında inceleyen çalışmalarda genellikle kaynaklardan herhangi biri veya her ikisi hazır model olarak kullanılmıştır. PEM yakıt pilinin matematiksel olarak modellendiği bazı çalışmalarda ise sadece statik aktivasyon kayıpları dikkate alınırken şarj çift katman (CDL) etkisiyle meydana gelen dinamik aktivasyon kayıpları modele dâhil edilmemiştir. Ayrıca, PEM yakıt pili modellerinde genellikle anot hidrojen ve katot oksijen basınçları sabit alınmaktadır [24-36]. Bu çalışmada gerçekleştirilen modellemede ise hem dinamik aktivasyon kayıpları modele dâhil edilirken, anot hidrojen ve katot oksijen basınçları akım ve sıcaklığa bağlı şekilde anlık olarak hesaplanmıştır.

PEM yakıt pilinin yakıt pilleri arasında ve güneş enerjisinin ise yenilenebilir enerji kaynakları arasında popüler olması nedeniyle, bu çalışmada laboratuvarında bulunan 100 W PEM yakıt pili ile 200 W PV panelin matematiksel modelleri, her iki kaynağın tanım denklemleri kullanılarak MATLAB/Simulink'te oluşturulmuştur. Güneş ışınımı ve hidrojen miktarına bağlı değişken çıkış gerilimleri DC-DC yükseltici dönüştürücü konverterler vasıtasıyla sabit 30 V DC'ye dönüştürülmüştür. PEM yakıt pilindeki kayıplar ayrı ayrı hesaplanmış, güç ve polarizasyon eğrileri elde edilmiştir. Polarizasyon eğrisi, 20 hücreli PEM yakıt pilinin çıkış gerilimini elde etmek için 20 ile çarpılarak yükseltici dönüştürücü girişine bağlanmıştır. PV panel ve PEM yakıt pili için yükseltici dönüştürücü ayrı ayrı tasarlanmış ve maksimum gücü elde etmek için gerekli parametreler belirlenmiştir.

2. Modelleme

Literatürde PV panellerin ve PEM yakıt pillerinin matematiksel modelini ayrı ayrı gerçekleştiren çalışmalar bulunmaktadır. Öncelikle PV panelin matematiksel modelini oluşturmak için Simulink'te bloklar kullanılarak aşağıdaki tanım denklemleri oluşturulmuştur. Foto-akım, PV panellerde güneş ışığının yüzeye çarpmasıyla oluşan akımdır. Güneş ışığı PV panelin yüzeyine düştüğünde, fotovoltaiik etki denilen bir durum gerçekleşir ve bu etki, güneş ışığının yarı iletken malzemelerde elektronların serbest bırakılmasına neden olur. Serbest bırakılan elektronlar, panelin içerisindeki elektrik devresinde bir akım oluşturmak için hareket ederler. Bu oluşan akım, foto-akım olarak adlandırılır ve elektrik enerjisi üretmek için kullanılabilir. Foto-akımın büyüklüğü, güneş ışığının yoğunluğuna, panelin özelliklerine ve çalışma koşullarına bağlı olarak değişir. Foto-akım Denklem 1 ile hesaplanmaktadır [37-40].

$$I_{ph} = [I_{sc} + k_i * (T - 298)] * (G/1000) \quad (1)$$

Saturasyon akımı, panel üzerindeki gerilimin belirli bir düzeye yükseldiği ve akımın artık daha fazla artmadığı akımı ifade etmektedir. Bu durum diyot benzeri bir davranıştan kaynaklanır, çünkü artık taşıyıcıların çekilebileceği boşluklar kalmamıştır. Saturasyon akımı Denklem 2 ile hesaplanmaktadır [37-40].

$$I_0 = I_{rs} * \left(\frac{T}{T_n}\right)^3 * \exp\left[\frac{q.E_{g0} * (1/T_n - 1/T)}{n.K}\right] \quad (2)$$

Ters saturasyon akımı ise, diyotun ters polarize edildiği durumda akışkanın geçiş akımıdır. Diyotun tersine doğru akı yönündeki akımdır ve diyotun tersine gerilim altında çalışırken akan minimum akımdır. Bu akım, diyotun gerilim akım karakteristiğinin negatif yönde eğimli kısmına karşılık gelmektedir. Ters saturasyon akımı Denklem 3 ile hesaplanmaktadır [37-40].

$$I_{rs} = \frac{I_{sc}}{e^{\left(\frac{q.V_{oc}}{n.N_s.K.T}\right)} - 1} \quad (3)$$

PV panellerde şönt akımı, panellerin bir kısmının geçici olarak veya kalıcı olarak kapatılması veya etkisiz hale getirilmesi durumunda ortaya çıkan bir akımdır. Bu, bir hücre veya bir dizi hücredeki bir kısmın kısa devre olması veya etkin olmayan bir şekilde çalışması sonucunda gerçekleşebilir. Şönt akımı, panelin toplam verimliliğini azaltır çünkü panel nominal gücünden daha az bir güç sağlamaktadır. Bu durum, panelin üzerindeki bir leke, kırık veya başka bir hasar nedeniyle de oluşabilmektedir. Şönt akımı Denklem 4 ile hesaplanmaktadır [37-40].

$$I_{sh} = \left(\frac{V + I.R_s}{R_{sh}}\right) \quad (4)$$

Fotovoltaik akım, fotovoltaik etkiyi kullanarak güneş ışığını doğrudan elektrik enerjisine dönüştüren fotovoltaik PV panellerden üretilen akımdır. Bu akım, PV panelin çıkış terminallerinden dış devreye iletilir ve elektrik enerjisi olarak kullanılabilir. Fotovoltaik akım Denklem 5 ile ifade edilmektedir [37-40].

$$I = I_{ph} - I_0 * \left[\exp \left(\frac{q \cdot (V + I \cdot R_s)}{n \cdot K \cdot N_s \cdot T} \right) - 1 \right] - I_{sh} \quad (5)$$

Burada, I_{ph} foto-akım (A); I_0 doyma akımı (A); I_{rs} ters doyma akımı (A); I_{sh} şönt akımı (A); I fotovoltaik akım (A); I_{sc} , kısa devre akımı (A); T , çalışma sıcaklığı (K); T_n , nominal sıcaklık (K); G , güneş ışınımı (W/m²); V_{oc} , açık devre gerilimi (V); N_s , seri bağlı hücre sayısı; N_p , paralel bağlanan hücre sayısı; k_i , 25 °C ve 1000 W/m²'de hücrelerin kısa devre akımı (A); q , elektron yükü (C); n , ideallik faktörü; K , Boltzmann sabiti (J/K); E_{go} , yarı iletkenin bant aralığı enerjisi (eV); R_s , seri direnç (Ω); R_{sh} , şönt direnci (Ω); P_r , nominal gücü (W) tanımlar; V_{mp} , maksimum güçteki gerilim (V); I_{mp} , maksimum güçte akım (A).

İkinci olarak PEM yakıt pilinin tanım denklemleri ile Simulink modeli oluşturulmuştur. PEM yakıt pili çıkış gerilimi, konsantrasyon kaybı, ohmik kayıp, statik ve dinamik aktivasyon kayıpları gibi bazı kayıplardan etkilenmektedir. Tek PEM yakıt pili hücresinin gerilimi Denklem 6 ile tanımlanmaktadır [41-53].

$$V_{FC} = E_{Nernst} - V_{act} - V_{ohmic} - V_{con} \quad (6)$$

Yakıt pilinin açık devre gerilimi, yük olmadığı durumu temsil etmektedir. Bu gerilim, teorik olarak hücrenin termodinamik potansiyeli olarak tanımlanan Nernst gerilimi olarak ifade edilir ve değeri yaklaşık 1.2 V'dir. Ancak, uygulamalarda bu değerden daha düşüktür. Nernst gerilimi aşağıdaki gibi tanımlanmaktadır [41-53].

$$E_{Nernst} = 1,229 - \left(8,5 * 10^{-4} * (T - 298) + 4,308 * 10^{-5} * T * \ln(P_{H_2} * (P_{O_2})^{1/2}) \right) \quad (7)$$

CO₂, oksijen konsantrasyonunu temsil etmekte ve Denklem 8 ile hesaplanırken statik aktivasyon gerilimi düşümü matematiksel olarak Denklem 9 ile ifade edilmektedir [41-53].

$$C_{O_2} = \frac{P_{O_2}}{5,08 * 10^6 * \exp(-498/T)} \quad (8)$$

$$V_{st_act} = \beta_1 + \beta_2 * T + \beta_3 * T * \ln(C_{O_2}) * \beta_4 * T * \ln(I) \quad (9)$$

Ohmik gerilim düşüşü, grafit toplayıcı plakalarda ve grafit elektrotlarda elektron transferine ve katı polimer membranda proton transferine karşı oluşan direnç sebebiyle meydana gelmektedir. Bu kayıp Denklem 10 ile hesaplanmaktadır [41-53].

$$V_{ohmic} = I * (R_m + R_c) \quad (10)$$

$$R_m = \frac{\rho_m * l}{A} \quad (11)$$

$$\rho_m = \frac{181,6 * [1 + 0,039 * (I/A) + 0,062 * (T/303)^2 * (I/A)^{2,5}]}{[\lambda - 0,634 - 3 * (I/A)] * \exp(4,18 * \frac{T - 303}{T})} \quad (12)$$

Konsantrasyon kaybı, reaktanların tüketilmesidir ve Denklem 13 ile ifade edilmektedir [41-53].

$$V_{con} = -B * \ln \left(1 - \frac{I}{I_{lim}} \right) \quad (13)$$

$$B = \frac{R * T}{2 * F} \quad (14)$$

$$\frac{dV_{dy_act}}{dt} = \frac{I}{C} - \frac{V_{dy_act}}{R_c C} \quad (15)$$

$$R_c = \frac{V_{st_act} + V_{con}}{I} \quad (16)$$

Su buharı, doymuş buhar basıncı olarak ifade edilir ve Denklem 17'deki gibi tanımlanmaktadır [41-53].

$$\log_{10} P_{H_2O}^{sat} = -2,18 + 2,95e^{-2} T_c - 9,18e^{-5} T_c^2 + 1,44e^{-7} T_c^3 \quad (17)$$

$$T_c = T_{cell} - 273,15 \quad (18)$$

P_{H_2} hidrojenin kısmi basıncını ifade ederken P_{O_2} oksijenin kısmi basıncını temsil eder Gazdaki farklı kısmi basınçlar, reaktanlardaki farklılıklardan kaynaklanmaktadır. Reaktanların basınçları Denklem 19 ve 20 ile hesaplanmaktadır [41-53].

$$P_{H_2} = 0,5 P_{H_2O}^{sat} \left[\exp \left(-\frac{1,635 J}{T_{cell}^{1,334}} \right) \left(\frac{P_a}{P_{H_2O}^{sat}} \right) - 1 \right] \quad (19)$$

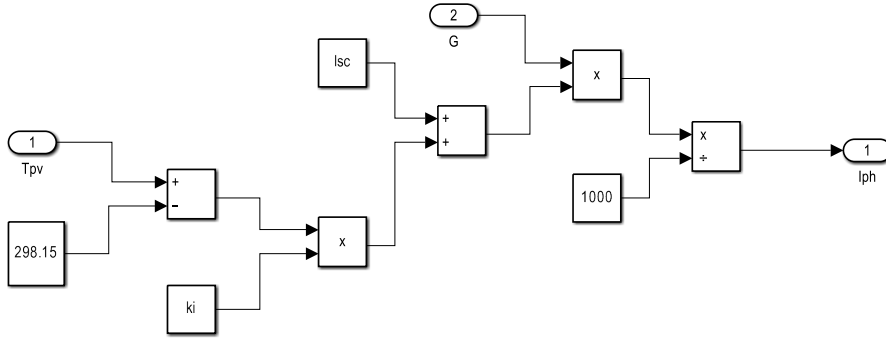
$$P_{O_2} = P_{H_2O}^{sat} \left[\exp \left(-\frac{4,192 J}{T_{cell}^{1,334}} \right) \left(\frac{P_c}{P_{H_2O}^{sat}} \right) - 1 \right] \quad (20)$$

Burada, V_{FC} , pil gerilimi (V); E_{Nernst} , Nernst gerilimi (V); V_{st_act} , sabit aktivasyon kaybı gerilimi (V); V_{ohmik} , ohmik kayıp gerilimi (V); V_{con} , konsantrasyon kaybı gerilimi (V); T , sıcaklık (K); P_{H_2} , hidrojen kısmi basıncı (atm); P_{O_2} , oksijen kısmi basıncı (atm); β , deneyim parametreleri; R_m , proton değişim membranının empedansı (Ω); R_c , eşdeğer kontak direnci (Ω); ρ_m , membrana özgü direnç ($\Omega \cdot cm$); I , pil akımı (A); I_{lim} , pil limit akımı (A); l proton değişim membranının kalınlığıdır (cm); A , proton değişim zarının etkin alanı (cm^2); λ , proton değişim zarının su içeriği; C_{O_2} , oksijen konsantrasyonları (mol/cm^3); R ideal gaz sabiti (J/K.mol); F , Faraday sabiti (C); V_{dy_act} , dinamik aktivasyon kaybı gerilimi (V); C çift katmanlı yük; P_{H_2} kısmi hidrojen basıncı (bar); P_{O_2} kısmi oksijen basıncı (bar); P_a anot kısmi basıncı (bar); P_c katot kısmi basıncı (bar); J akım yoğunluğu (A/cm^2); $P_{H_2O}^{sat}$ suyun doyma basıncı (bar); T pil sıcaklığı (K); T_c celsius cinsinden sıcaklık ($^{\circ}C$). Formüllerde kullanılan tüm sabitler Tablo 1'de verilmiştir.

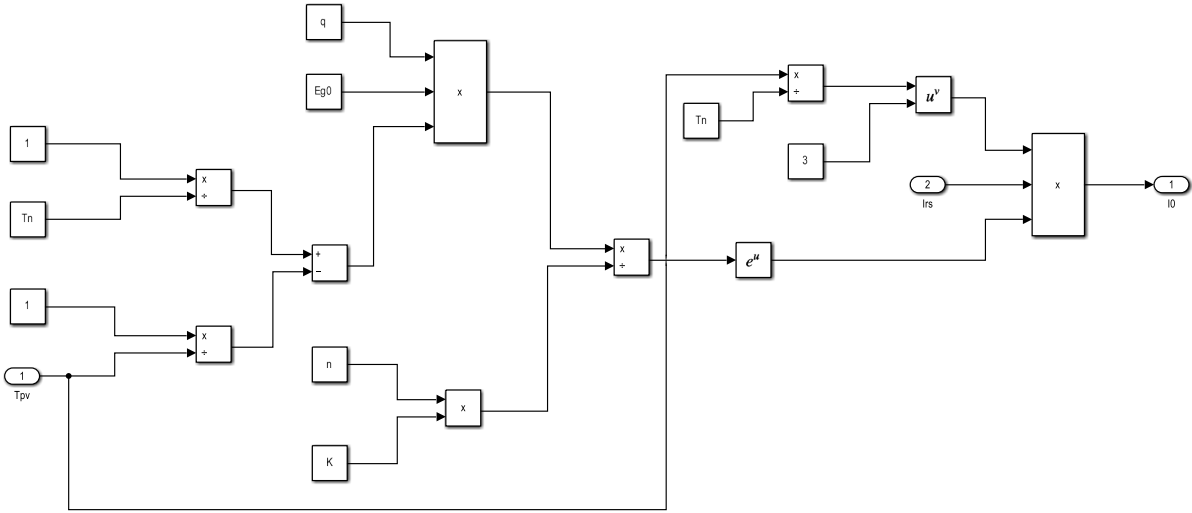
Tablo 1. PV panel ve PEM yakıt pili matematik modelindeki sabitler.

PV Panel Sabitleri		PEM Yakıt Pili Sabitleri	
Parametre	Değer	Parametre	Değer
k_i	0,0032 A	R	8,314 J/K.mol
T_n	298 K	F	96487 C
q	1,6e-19 C	β_1	-0,9514
n	1.3	β_2	3,12e-3
K	1,38e-23 J/K	β_3	7,4e-5
E_{g0}	1,1 eV	β_4	-1.87e-4
R_s	0,221 Ω	l	51 μm
R_{sh}	415,4 Ω	A	50 cm^2
P_r	200 W	λ	14
V_{mp}	26,4 V	R_c	0,0003 Ω
I_{mp}	7,58 A	I_{lim}	14 A
V_{oc}	32,9 V		
I_{sc}	8,21 A		
N_s	54		
N_p	1		

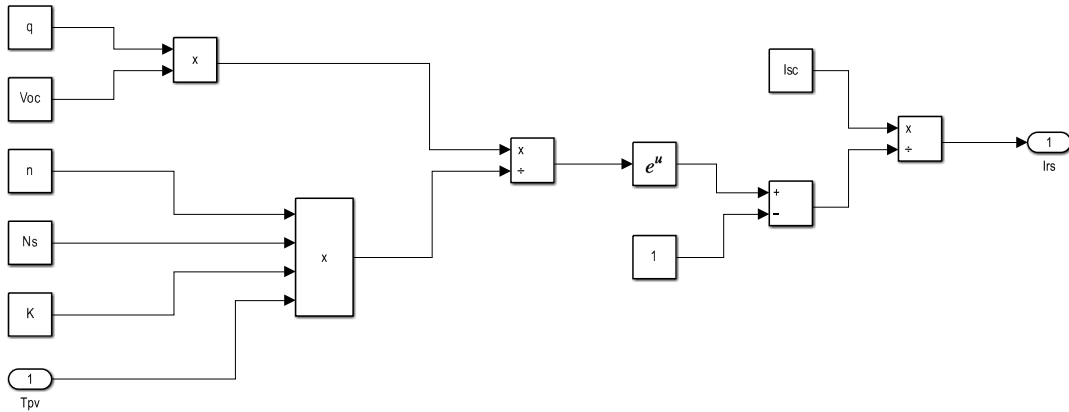
Şekil 1-5'te foto-akım, doyma akımı, ters doyma akımı, şönt akım ve fotovoltaik akım gösterilmektedir. Bu modelde güneş ışınımı (G) 1000 W/m², ortam sıcaklığı (T) 25 $^{\circ}C$ alınmıştır. Blok diyagramlar sırasıyla Denklem 1-5'e göre oluşturulmuştur.



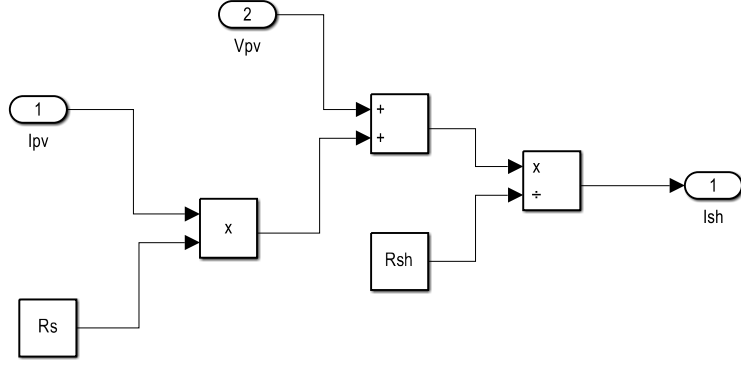
Şekil 1. Foto-akım blok diyagramı.



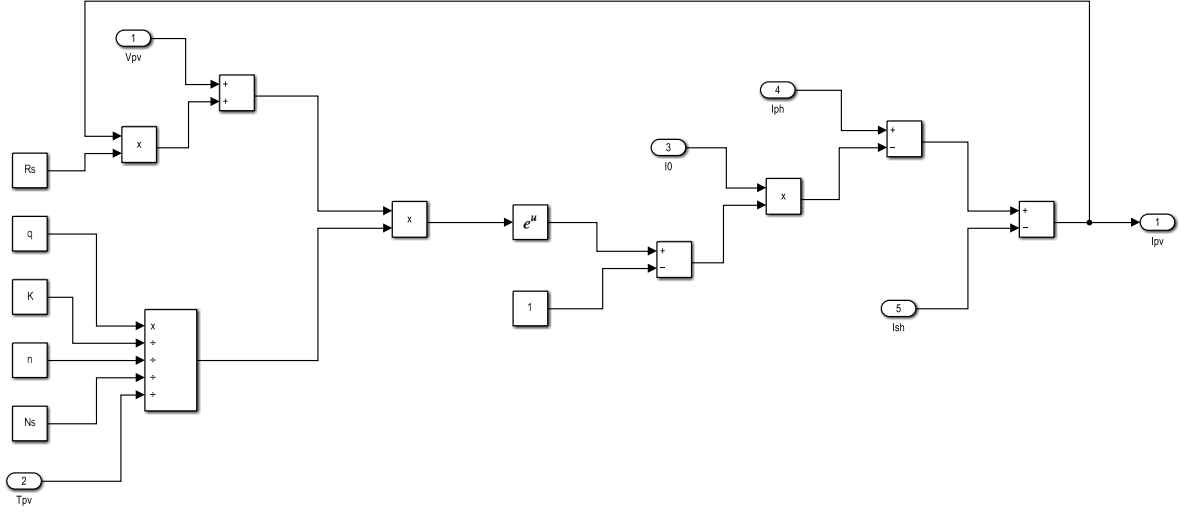
Şekil 2. Doyma akımı blok diyagramı.



Şekil 3. Ters doyma akımı blok diyagramı.

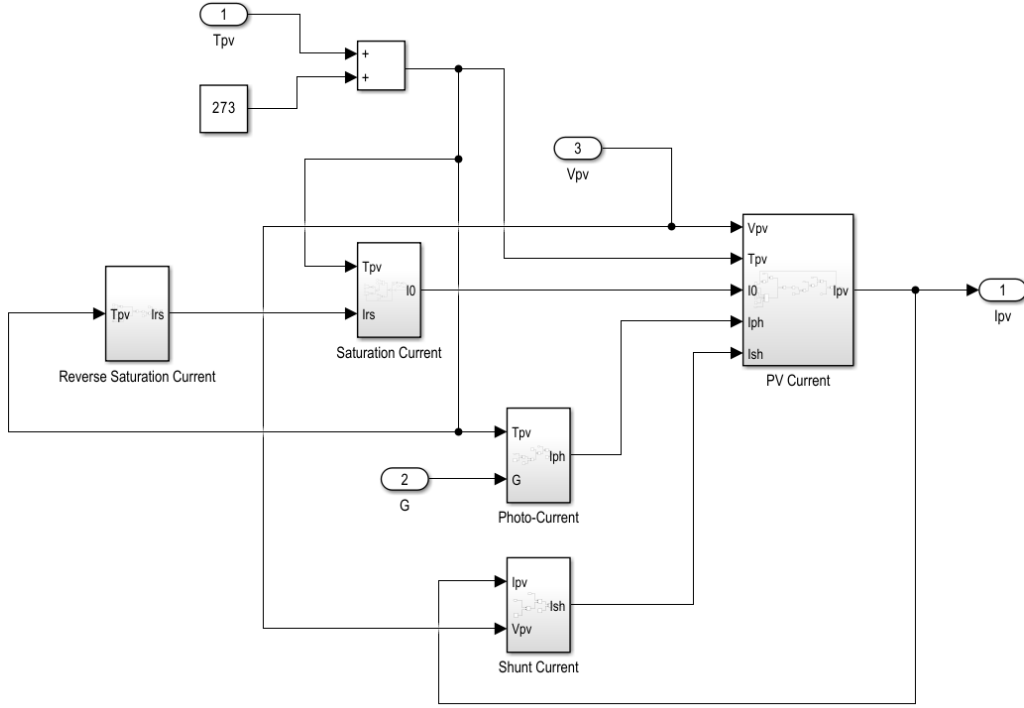


Şekil 4. Şönt akım blok diyagramı.



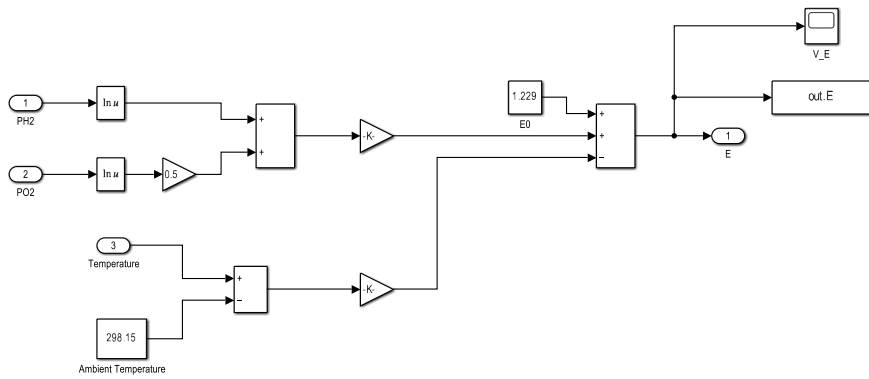
Şekil 5. Fotovoltaik akım blok diyagramı.

PV panel alt sistemi, yukarıdaki blok şemaların Şekil 6'da gösterildiği gibi bağlanmasıyla oluşturulmuştur.



Şekil 6. PV panel alt sistemi.

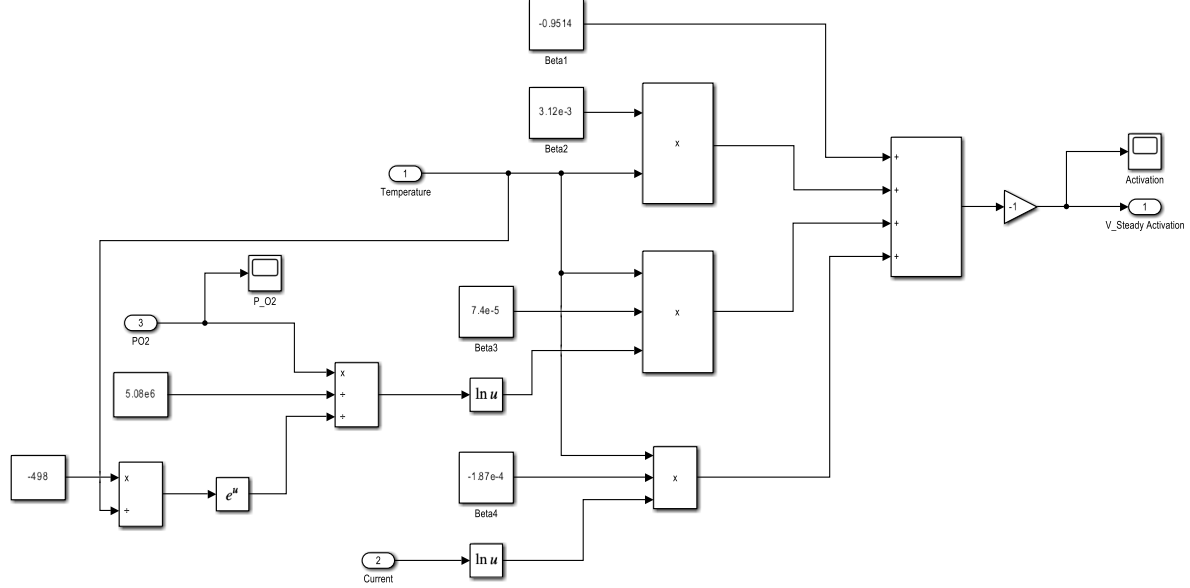
Matlab/Simulink'teki bir PEM yakıt pili modeli, belirli kararlı durum ve dinamik analiz denklemlerini gerektirmektedir. Seçilen giriş parametreleriyle bu model, PEM yakıt pilinin tepkisini göstermektedir. Bu çalışmada 20 hücreden oluşan Horizon H-100 yakıt pili parametrelerine göre modelleme yapılmıştır. İdeal gerilim açık devre durumunda yani yakıt pilinin dış devresinden akım geçmediğinde ortaya çıkar ve bu gerilime Nernst gerilimi adı verilir. Denklem 6, Nernst geriliminden tüm kayıpların çıkarılması sonucu yakıt pilinin çıkış gerilimi elde edilir. Simülasyonda bu değer tek bir pil için anlık olarak hesaplanmış ve hücre sayısı 20 ile çarpılarak yığının çıkış gerilimi elde edilmiştir. Şekil 7'de Denklem 7 ve 8'e göre oluşturulan Nernst gerilim blok diyagramı görülmektedir.



Şekil 7. Nernst gerilimi blok diyagramı

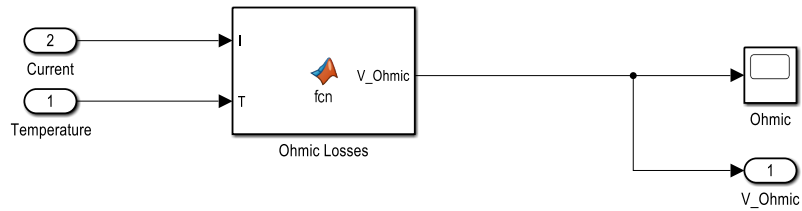
İlk aşamada yakıt pilinde oksidasyon ve redüksiyona uğrayan kimyasal reaksiyonlar sırasında aktivasyon kayıpları meydana gelir. Elektrotlardaki reaksiyon hızının yavaş olması nedeniyle kayıplar artar. Yakıt pilinin ürettiği toplam gerilimin bir kısmı kimyasal reaksiyonu güçlendirmek için kullanılır. Aktivasyon kayıpları düşük

akım yoğunluğunda meydana gelir. İhtiyaç duyulan aktivasyon enerjisinin üstesinden gelerek bir kimyasal reaksiyonu başlatmak için gereken gerilim olarak da tanımlanabilirler. Düşük sıcaklıktaki yakıt pilleri için aktivasyon kayıpları önemlidir ve genellikle katottan kaynaklanır. Sıcaklık arttıkça aktivasyon kayıpları daha az kritik hale gelir. Aktivasyon kayıpları genellikle Tafel denklemleri ve Butler-Vollmer denklemleri ile temsil edilir. Bu denklemler basitleştirilip genişletilerek Denklem 9 elde edilebilir. Sabit aktivasyon kayıpları bu denkleme göre elde edilmiştir. Şekil 8’de sabit aktivasyon kayıpları blok diyagramı gösterilmektedir.



Şekil 8. Sabit aktivasyon kayıpları blok diyagramı.

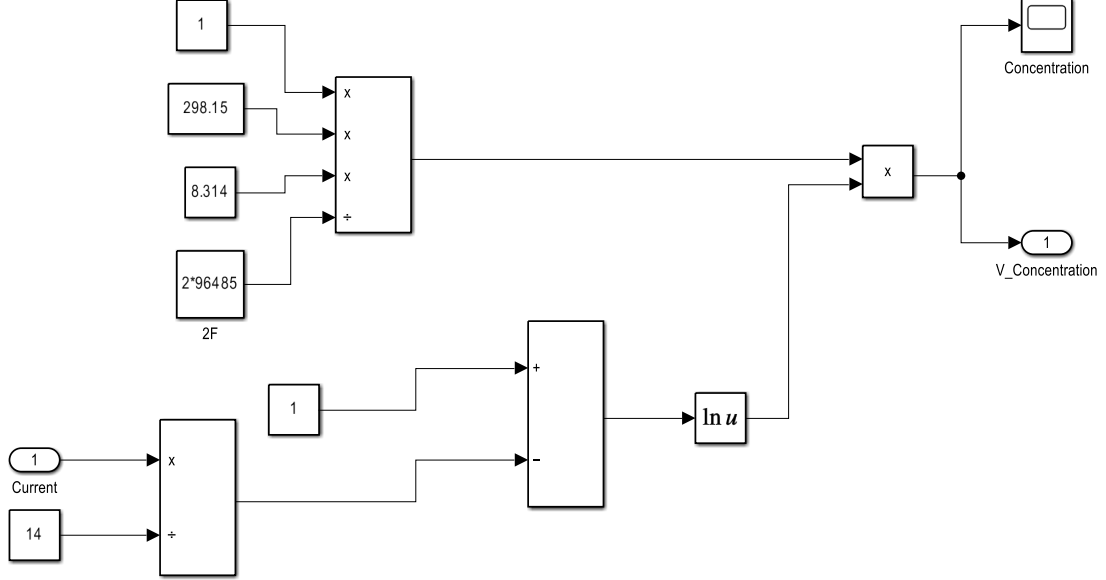
İkinci aşamada yakıt pilindeki iki dirençten dolayı ohmik kayıplar ortaya çıkar. Birincisi elektronların dış devreden geçerken gösterdiği dirençtir. İkincisi, proton değişim zarından akarken protonların direncidir. Bu dirençler yakıt pilinin potansiyelinin kaybolmasına neden olmaktadır. Bu nedenle toplam ohmik direnç, elektron ohmik kayıplarının ve proton ohmik kayıplarının toplamı olarak modellenilebilir. Ohmik kayıplar blok diyagramı Denklem 10-12’ye göre oluşturulmuştur. Şekil 9 ohmik kayıplar blok diyagramını göstermektedir.



Şekil 9. Ohmik kayıplar blok diyagramı.

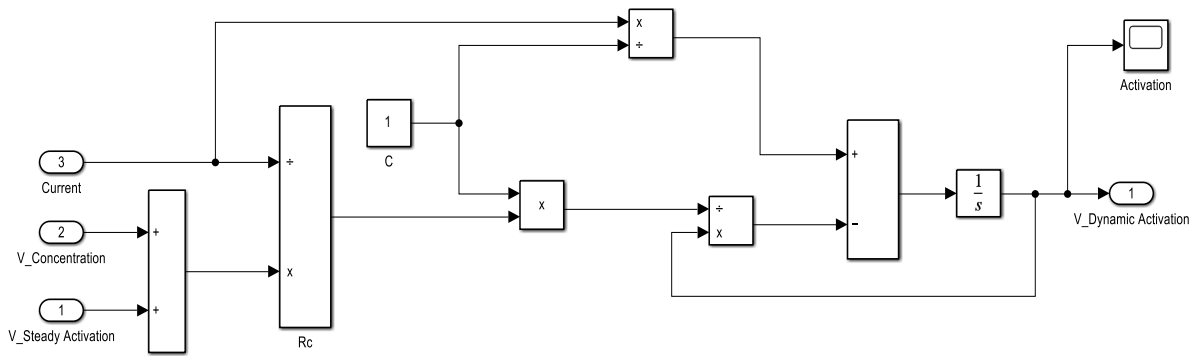
Üçüncü ve son aşamada ise konsantrasyon kayıpları meydana gelir. Kütle taşıma kayıpları olarak da bilinirler. Bu kayıplar sırasıyla anot ve katottaki hidrojen ve oksijen konsantrasyonuyla ilgilidir. Daha yüksek akım yoğunluklarında bu kayıplar önemlidir. Akım yoğunluğu arttıkça yani PEM yakıt pilinden daha fazla akım çekildikçe yakıt ve oksijen tüketimi artar. Elektrot yüzeyindeki reaktanların beslenme hızı ve tüketim hızı eşitlendiğinde reaktanların konsantrasyonu sıfıra eşit olur. Bu durum, reaktanlar beslendiğinde tükendiğinde ve elektrot üzerinde kalmadığında meydana gelir. Bu olgunun meydana geldiği akım yoğunluğu, sınırlayıcı akım yoğunluğudur. Akım yoğunluğu bu sınırın üzerine çıkarsa, tüketim oranı besleme oranından daha büyük

olacağından, daha az reaktan olacağından yakıt pili çalışmaz hale gelecektir. Konsantrasyon kayıpları Denklem 13 ve 14'e göre elde edilmiştir. Şekil 10 konsantrasyon kayıpları blok diyagramını göstermektedir.



Şekil 10. Konsantrasyon kayıpları blok diyagramı.

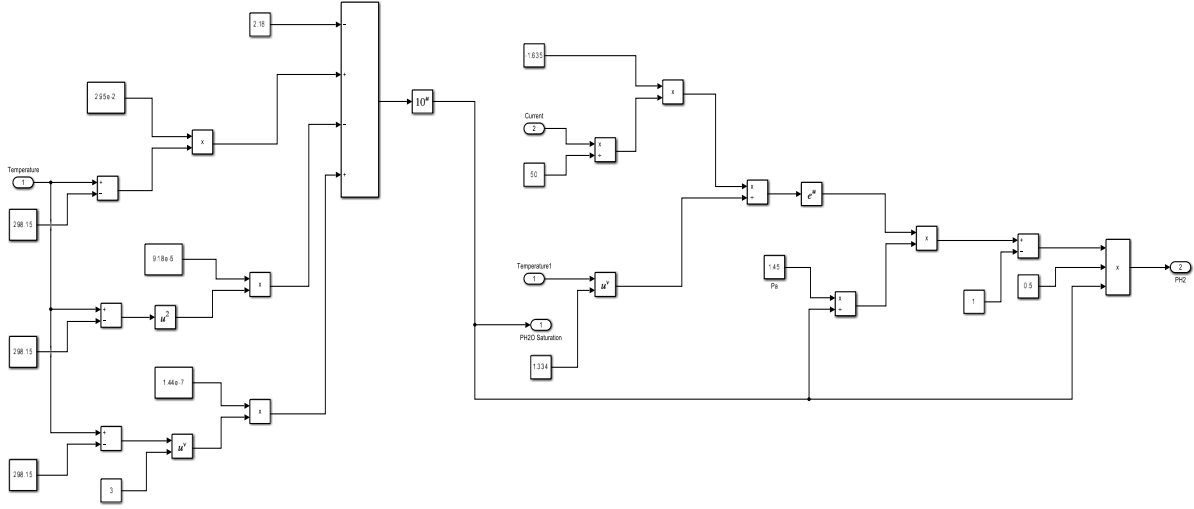
PEM yakıt pillerinin modellenmesinde dinamik ve kararlı durum modelleri arasında bir ayrım bulunmaktadır. Özellikle dinamik model, aktivasyon kayıplarındaki değişiklikleri içermekte ve karmaşık termodinamik ilkeleri kullanmaktadır. Yakıt pilinin dinamik davranışı ağırlıklı olarak şarj çift katmanı (CDL) olgusundan kaynaklanmaktadır. Bu, iki farklı malzeme ara yüzey oluşturduğunda gözlenir ve ilgili yüzeylerde yükün oluşmasına ve birikmesine yol açar. Daha sonra malzemeler arasında bu yükün aktarımı meydana gelir ve yakıt pilindeki hem aktivasyon hem de konsantrasyon kayıplarını etkiler. Bu dinamik davranışı kapsamlı bir şekilde anlamak ve tahmin etmek için 15 ve 16 numaralı denklemler gereklidir. Şekil 11 dinamik aktivasyon kayıplarını göstermektedir.



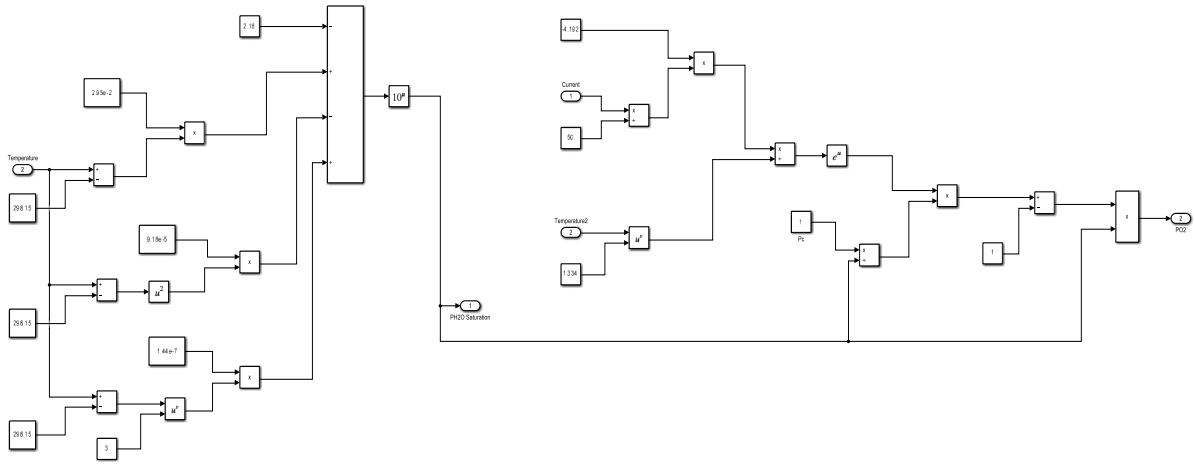
Şekil 11. Dinamik aktivasyon kayıpları blok diyagramı.

PEM yakıt pili modelinde, hidrojen ve oksijenin anot ve katottaki kısmi basınçları girdi verisi olarak kabul edilmiştir. Hidrojen ve oksijenin kısmi basınçları Denklem 17-20'ye göre oluşturulmuştur. Basınçları hesaplamak

için H_2O 'nun doyma basıncı denklemi kullanılmalıdır. Denklem 17, her iki kısmi basınç blok diyagramının içinde ve solunda oluşturulmuştur. Şekil 12 ve 13 sırasıyla anot hidrojen ve katot oksijen basıncını göstermektedir.

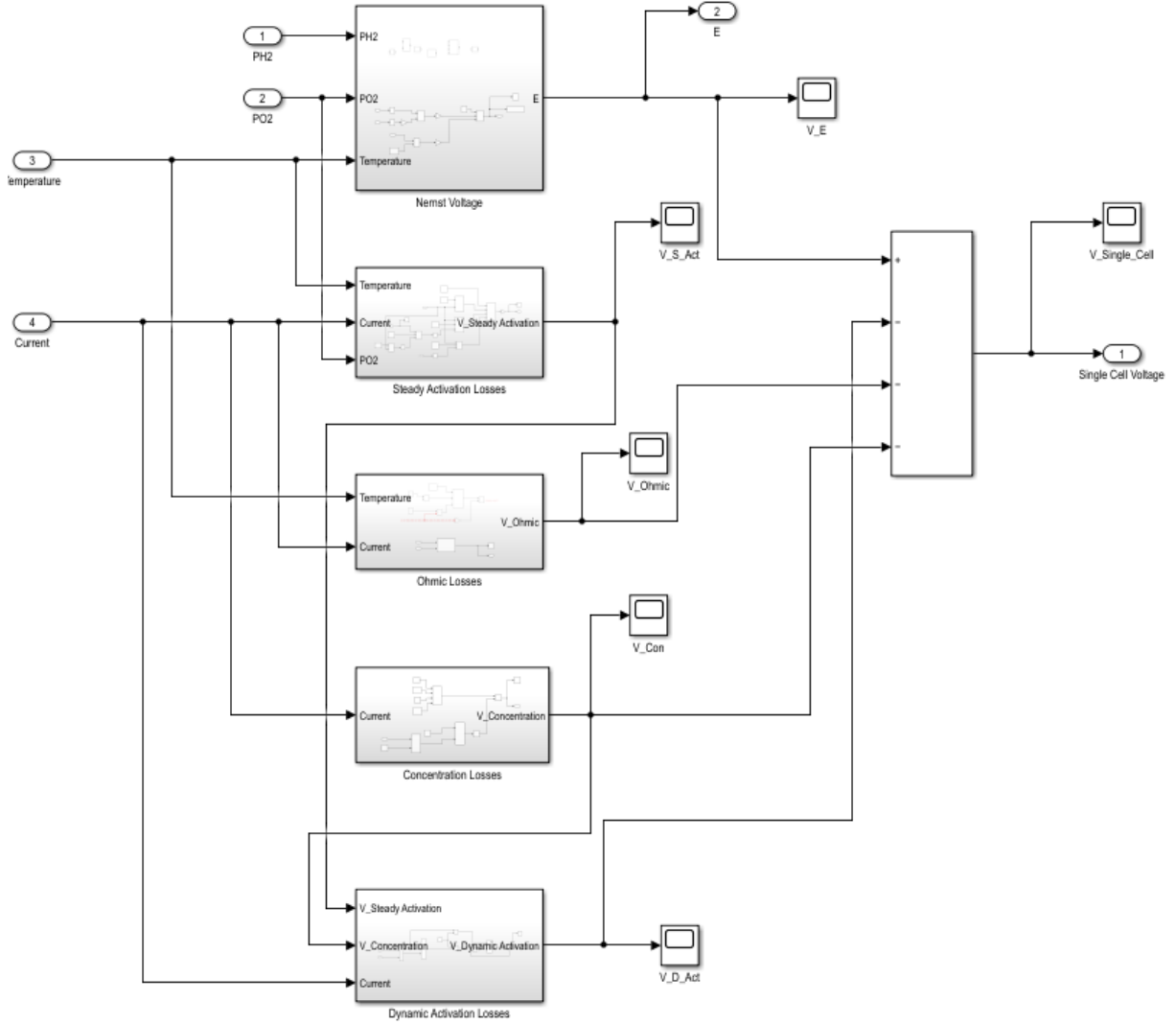


Şekil 12. Anot hidrojen basıncı blok diyagramı.



Şekil 13. Katot oksijen basıncı blok diyagramı.

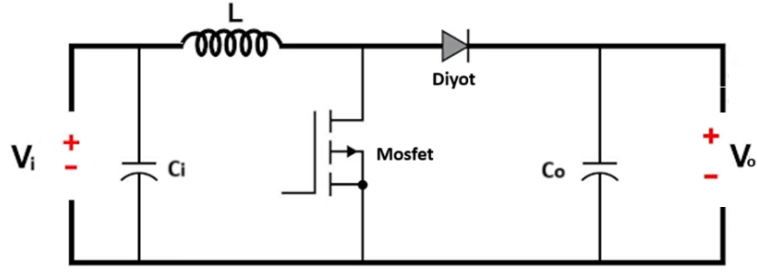
PEM yakıt pili alt sistemi, Şekil 14'te gösterildiği gibi yukarıdaki blok diyagramların bağlanmasıyla oluşturulmuştur. Çıkış gerilimleri matematiksel PV paneller ve PEM yakıt pili modellerinde farklılık göstermektedir. Bu nedenle yükseltici dönüştürücü tasarımında kullanılan indüktör ve kondansatör değerleri maksimum güç elde edecek şekilde ayrı ayrı hesaplanmıştır. Bu değerler çıkış gerilimleri yaklaşık 30 V olacak şekilde belirlenmiştir. 30 V DC bara üzerinden paralel bağlanan iki kaynak 3Ω değerindeki bir yük beslemiştir. L, C, görev periyotları (D) ve anahtarlama frekansı (f_s) değerleri Tablo 2'de verilmiştir. Şekil 15'te her iki kaynak için yükseltici dönüştürücü devre şeması gösterilirken Şekil 16'da ise hibrid sistemin simülasyon modeli gösterilmiştir.



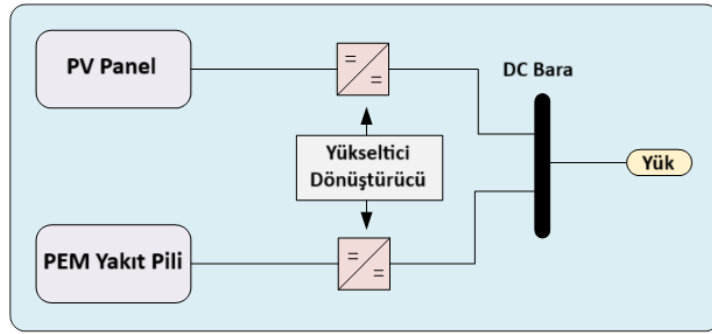
Şekil 14. PEM yakıt pili alt sistemi.

Tablo 2. L, C, D, ve f değerleri.

PV Panel Yükseltici Dönüştürücüsü		PEM YP Yükseltici Dönüştürücüsü	
L ₁	0,0016 H	L ₂	0,0047 H
C ₁	0,0040 F	C ₂	0,0068 F
D ₁	%11,77	D ₂	%47,83
f _{s1}	25 kHz	f _{s2}	25 kHz



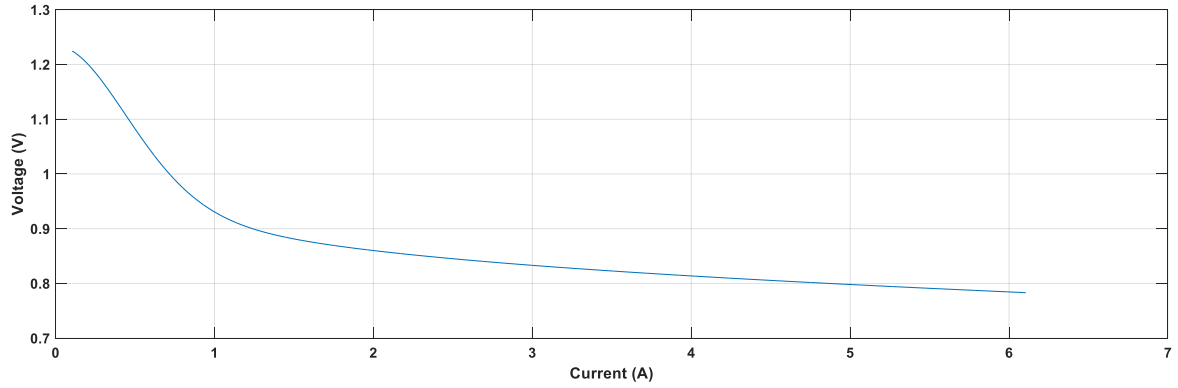
Şekil 15. Yükseltici dönüştürücü devre şeması.



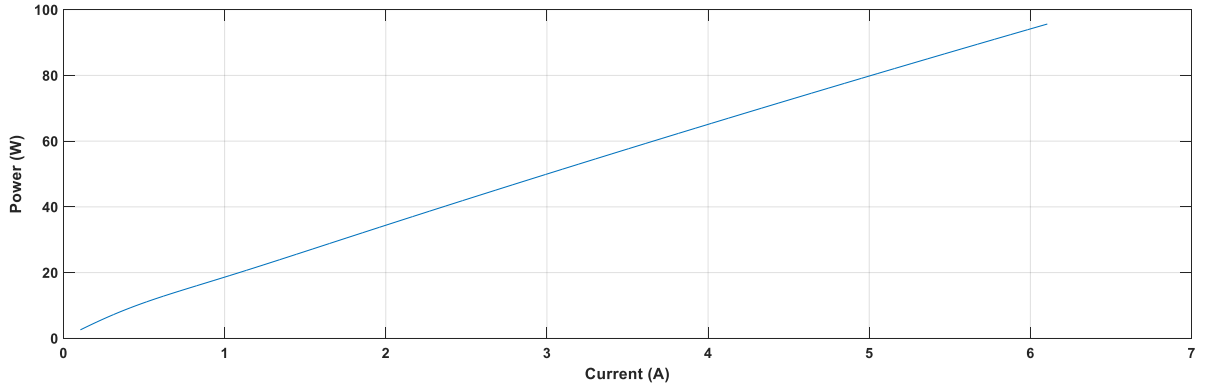
Şekil 16. Hibrid sistem simülasyon modeli.

3. Simülasyon Sonuçları

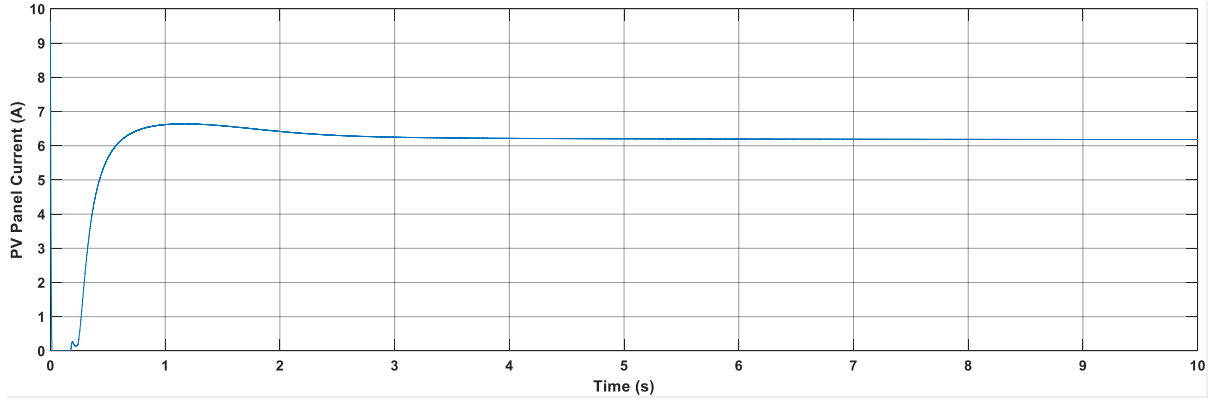
Aşağıdaki grafikler Matlab/Simulink R2021b verisi kullanılarak elde edilmiştir. Simülasyon süresi 10 saniye ve simülasyon türü Discrete olarak seçilmiştir. Örneklem zamanı $5e-6$ 'dır. Polarizasyon eğrisi Şekil 17'de, güç eğrisi ise Şekil 18'de verilirken, simülasyon sonucunda PV panel akımı ve PEM yakıt pili akımı Şekil 19 ve 20'de verilmiştir.



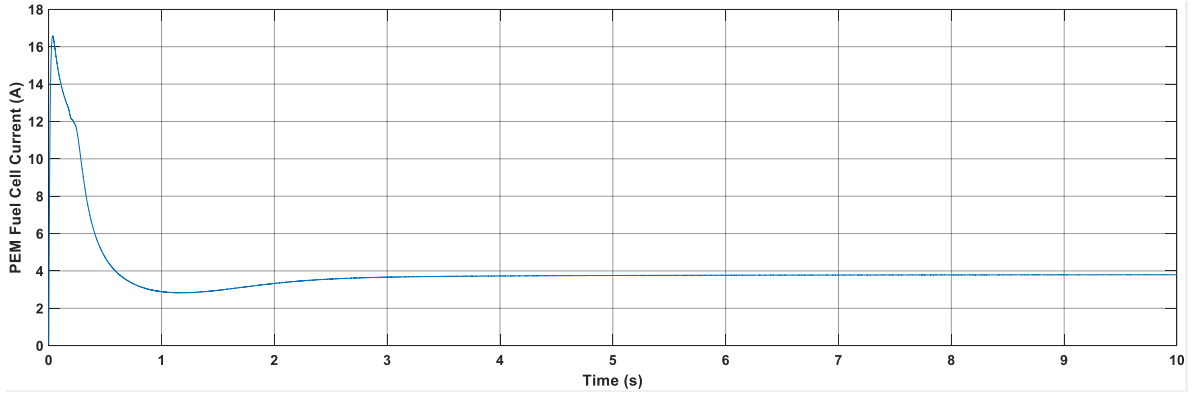
Şekil 17. Polarizasyon eğrisi.



Şekil 18. Güç eğrisi.



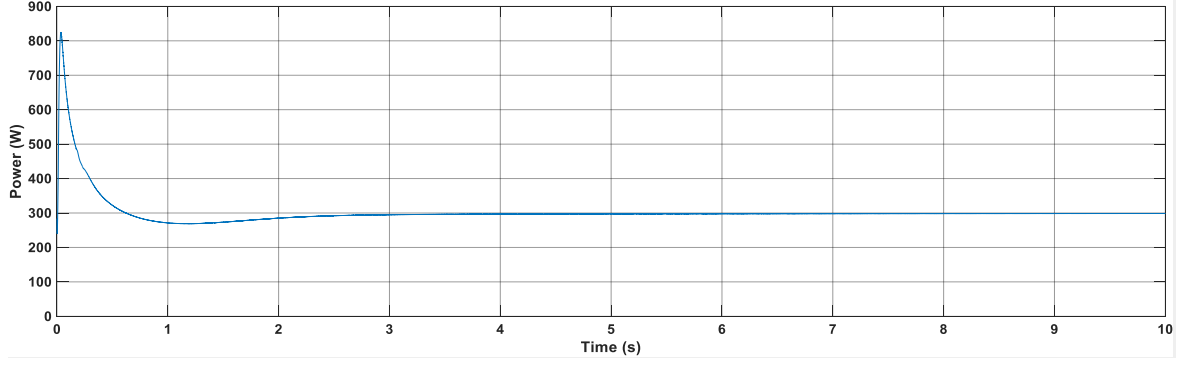
Şekil 19. PV panel akımı.



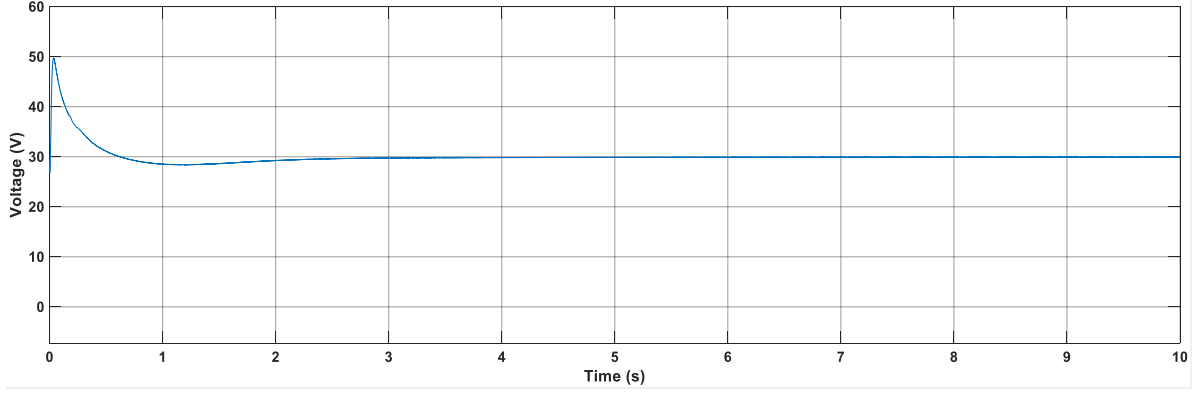
Şekil 20. PEM yakıt pili akımı.

Şekil 19 ve 20’de görüldüğü gibi her iki kaynak için yaklaşık 2 saniyelik bir geçici durum söz konusudur. Bu sürenin sonunda akımlar kararlı duruma ulaşmıştır. Güç değerlerine göre normalde 6,67 A PV panel ve 3,33 A PEM yakıt pili akımı beklenirken kaynakların ve konverterlerin modellenmesi sırasında bazı farklılıklar ortaya çıkmaktadır. Bu nedenle iki kaynak için beklenen akım değerleri ile simülasyon arasında yaklaşık 0,46 A fark

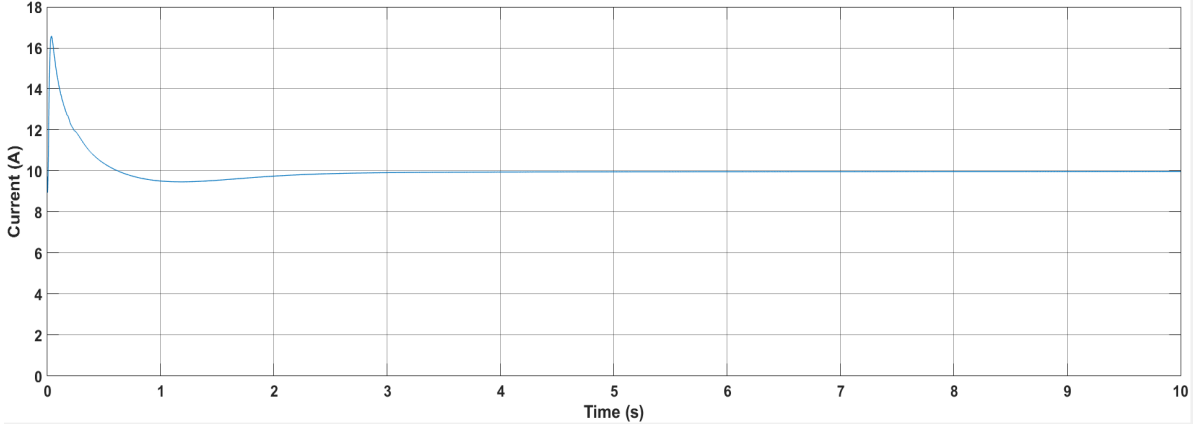
oluşturmuştur. Şekil 21-23'te sırasıyla yük üzerindeki güç, gerilim ve akım grafikleri gösterilmektedir.



Şekil 21. Yük gücü.



Şekil 22. Yük gerilimi.



Şekil 23. Yük akımı.

Yük grafikleri, yaklaşık 2 saniyelik geçici bir sürenin ardından yük geriliminin 30 V ve yük akımının 10 A olduğunu göstermektedir. Kararlı durumda, PV panel tarafından yaklaşık 6,205 A, PEM yakıt pili tarafından ise 3,795 A sağlanmaktadır. İki kaynağın paralel bağlanması sonucunda 3 Ω yük üzerinden 10 A akım akmış olup 300 W güç sağlanmıştır.

4. Sonuçlar

Sera gazı emisyonlarının azaltılması için yenilenebilir ve temiz enerji kaynaklarının kullanılması her geçen zaman daha büyük önem kazanmaktadır. Bu sebeple güneş ve hidrojen enerjisinin önemi bugüne kadar olduğu gibi gelecekte de giderek artacaktır. Bu çalışma ile güneş enerjisini ve hidrojen enerjisini elektriğe dönüştüren PV paneller ve PEM yakıt pilleri için referans alınabilecek detaylı matematiksel modeller elde edilmiştir. Her iki kaynağa ait tanım denklemleri ve sabitler Matlab/Simulink’te blok diyagramlar kullanılarak açık bir şekilde adım adım oluşturulmuştur. PEM yakıt pili için Nernst gerilimi, sabit aktivasyon kayıpları, omik kayıplar, konsantrasyon kayıpları ve dinamik aktivasyon kayıpları hesaplanarak tek bir hücre gerilimi elde edilmiştir. Bu gerilim toplam hücre sayısı ile çarpılarak yakıt pilinin çıkış gerilimine dönüştürülmüştür. Elde edilen polarizasyon eğrisi Horizon Educational üreticisinin H-100 yakıt pili için paylaştığı eğri ile benzerlik göstermekle beraber oluşan farklılıklar simülasyon parametreleri ile gerçek parametreler arasındaki farktan kaynaklanmaktadır. PEM yakıt pili modellenirken sabit aktivasyon kayıplarının yanı sıra dinamik aktivasyon kayıpları da oluşturulmuştur. Aynı zamanda anot ve katottaki gaz basınçlarını sabit kabul etmek yerine akım ve sıcaklığa bağlı şekilde değişken modellenmiştir. Çalışmada gerçekleştirilen simülasyon, 200 W PV panel ve 100 W PEM yakıt pilinin paralel olarak rezistif bir yük beslediği sistemin tepkilerini göstermiş olup güneş ve hidrojen enerjisiyle beklenen şekilde 300 W güç elde edilmiştir. Her iki kaynaktan yüke akan akımların beklenen değerlere oldukça yakın olması modellemenin doğruluğunu göstermektedir. Kaynakların ve dönüştürücülerin modellenmesinin iyileştirilmesi ve gerçeğe yakın parametre değerlerinin tespit edilmesiyle 0,46 A’lık fark ortadan kaldırılabilir ancak sonuçlar tatmin edicidir. Grafiklerde görülen anlık pik değerler 0,25 saniyeden daha kısa sürmüş olup konverter, PV panel ve PEM yakıt pilindeki geçici durumlar sebebiyle oluşmuştur. Bu analizde PEM yakıt pilinin hidrojen ihtiyacının depolama tanklarıyla sağlandığı kabul edilmiştir. Ek olarak PV panelin ürettiği enerji ile elektrolizör modeli beslenerek yakıt pili için hidrojen üretilmesi ve üretilen DC’nin inverter vasıtasıyla AC’ye dönüştürülerek AC yüklerin beslemesi gelecek çalışmalarda yapılacak hedeflerdir.

Kaynaklar

- [1] Özgirgin E, Devrim Y. And Albostan A. Modeling and simulation of a hybrid photovoltaic (PV) module-electrolyzer PEM fuel cell system for micro-cogeneration applications. *Int J Hydrogen Energy* 2015; 40(44):15336–15342.
- [2] Achour Y, Berrada A. Arechkik A. And El Mrabet R. Techno-Economic Assessment of hydrogen production from three different solar photovoltaic technologies. *Int J Hydrogen Energy* 2023; 48(83):32261–32276.
- [3] Ghenai C, Bettayeb M. Grid-Tied Solar PV/Fuel Cell Hybrid Power System for University Building. *Energy Procedia* 2019; 159: 96–103.
- [4] Rezk H, Alghassab M, and Ziedan HA. An optimal sizing of stand-alone hybrid PV-fuel cell-battery to desalinate seawater at Saudi NEOM city. *Processes* 2020;8(4).
- [5] Rezk H, et al., Fuel cell as an effective energy storage in reverse osmosis desalination plant powered by photovoltaic system. *Energy* 2019;175: 423–433.
- [6] Maleki A, Pourfayaz F, and Ahmadi MH, Design of a cost-effective wind/photovoltaic/hydrogen energy system for supplying a desalination unit by a heuristic approach. *Sol, Energy* 2016;139:666–675.
- [7] Wang Y, Su B, Yang X, Chen Z, Wang S. A green hydrogen production system based on solar-assisted biogas steam reforming. *Appl. Therm. Eng* 2024.
- [8] Baral S, and Šebo J, Techno-economic assessment of green hydrogen production integrated with hybrid and organic Rankine cycle (ORC) systems. *Heliyon* 2024; 10(4) 1–14.
- [9] Karayel GK, and Dincer I. A study on green hydrogen production potential of Canada with onshore and offshore wind power, *Clean J. Prod* 2023.
- [10] Yilanci A, Dincer I, and Ozturka HK. Performance analysis of a PEM fuel cell unit in a solar-hydrogen system. *Int J Hydrogen Energy* 2008;33(24): 7538–7552.
- [11] Ramakrishnan S, Delpisheh M, Convery C, Niblett D, Vinothkannan M, and Mamlouk M, Offshore green hydrogen production from wind energy: Critical review and perspective, *Renew. Sustain. Energy Rev* 2024.
- [12] Mehta V, and Cooper JS. Review and analysis of PEM fuel cell design and manufacturing, *J. Power Sources* 2003;114(1) 32–53.
- [13] Calasan M, Micev M, Hasanien HM, and Abdel Aleem SHE. PEM fuel cells: Two novel approaches for mathematical modeling and parameter estimation. *Energy* 2023, 2024.
- [14] Eroglu M, Dursun E, Sevencan S, Song J, Yazici S, and Kilic O. A mobile renewable house using PV/wind/fuel cell hybrid power system. *Int J Hydrogen Energy* 2011;36(13):7985–7992.
- [15] Duman AC, and Güler Ö. Techno-economic analysis of off-grid PV/wind/fuel cell hybrid system combinations with a comparison of regularly and seasonally occupied households. *Sustain Cities Soc* 2018;42(6):107–126.

- [16] Benlahbib B. et al., Experimental investigation of power management and control of a PV/wind/fuel cell/battery hybrid energy system microgrid. *Int J Hydrogen Energy* 2020;45(53):29110–29122.
- [17] Bendary AF, and Ismail MM. Battery charge management for hybrid PV/wind/fuel cell with storage battery. *Energy Procedia* 2019; 162: 107–116.
- [18] Soyuturk G, Kizilkan O, Ezan MA, and Colpan CO. Design, modeling, and analysis of a PV/T and PEM fuel cell based hybrid energy system for an off-grid house. *Int J Hydrogen Energy* 2024.
- [19] Suha Yazici M, Yavasoglu HA and Eroglu M. A mobile off-grid platform powered with photovoltaic/wind/battery/fuel cell hybrid power systems. *Int J Hydrogen Energy* 2013;38(26): 11639–11645.
- [20] Taç B, Arat HT, Baltacıoğlu E, and Aydın K. Overview of the next quarter century vision of hydrogen fuel cell electric vehicles. *Int J Hydrogen Energy* 2019;44(20): 10120–10128.
- [21] Arat HT, and Sürer MG. Experimental investigation of fuel cell usage on an air Vehicle's hybrid propulsion system. *Int J Hydrogen Energy* 2020;45(49): 26370–26378.
- [22] Ozbek E, Yalin G, Karaoglan MU, Ekici S, Colpan CO, and Karakoc TH. Architecture design and performance analysis of a hybrid hydrogen fuel cell system for unmanned aerial vehicle. *Int J Hydrogen Energy* 2021;46(30): 16453–16464.
- [23] Arat HT, Sürer MG, Gökpınar S, and Aydın K. Conceptual design analysis for a lightweight aircraft with a fuel cell hybrid propulsion system. *Energy Sources Part A Recover. Util Environ. Surf* 2020;45(1)46–60.
- [24] Natarajan SK, Kamran F, Ragavan N, Rajesh R, Jena RK, and Suraparaju SK. Analysis of PEM hydrogen fuel cell and solar PV cell hybrid model. *Mater. Today Proc* 2019;17: 246–253.
- [25] Biberici MA, and Celik MB. Dynamic Modeling and Simulation of a PEM Fuel Cell (PEMFC) during an Automotive Vehicle's Driving Cycle. *Eng. Technol. Appl. Sci. Res* 2020;10(3): 5796–5802.
- [26] Jadhav D, and Thakare M. Mathematical Modeling and Simulation of a Fuel Cell in MATLAB. *SSRN Electron J* ,2022.pp.1-10.
- [27] Maaruf M, and Khalid M. Hybrid Solar/ PEM Fuel Cell/ and Water Electrolyzer Energy System for All-Electric Ship. 2022 IEEE Kansas Power Energy Conf. KPEC 2022;1-5.
- [28] Parida RK. PEM Fuel Cell based PV/Wind Hybrid Energy System. 2022 OPJU Int Technol Conf. Emerg Technol Sustain Dev OTCON 2022, 2023.pp.1–6.
- [29] Miloslav Ulichy M, and Kutis V. System Modelling of a Proton Exchange Membrane Fuel Cell and its Comparison at Extreme Loads. *Proc. 31st Int Conf ,Cybern, Informatics, K I, 2022* 2022–2025, 2022.
- [30] Raj J, and Rajasree SR. A Microgrid with Hybrid Solar - Fuel Cell System With CHP Application. 2022 IEEE 2nd Int. Conf. Sustain. Energy Futur. Electr. Transp. SeFeT 2022, August 2022.pp.1–6.
- [31] Abdalfatah S, Nader I, Hegazy HY, El-Kholy EE, and Awad Hybrid H. Wind/FC System Design and Simulation. 2022 23rd Int. Middle East Power Syst. Conf. MEPCON, 2022.pp.1-6.
- [32] Kumar RK, and Samuel P. Green Hydrogen Generation from the PEM Electrolyzer Powered by Solar Panel. 2023 5th Int Conf Electr Comput Commun Technol ICECCT, 2023.pp.1–6.
- [33] Dapra T, Dalmau E, Poulichet P, and Nefzaoui E. Characterization of an experimental bench for low-carbon hydrogen production, storage and conversion. *Int Conf Electr Comput. Commun Mechatronics Eng ICECCME 2023*.pp.1–5.
- [34] Energy E, Of R, In AH, Region G, Analysis PT, and Simulation B. Department of Electrical and Electronics Engineering, Hasan Kalyoncu University, Gaziantep Product Development and Design Engineering, Gaziantep University, Gaziantep 2021.pp.145–159.
- [35] Banik A, Shrivastava A, Manohar Potdar R, Kumar Jain S, Gopal Nagpure S, and Soni M. Design, Modelling, and Analysis of Novel Solar PV System using MATLAB. *Mater. Today Proc* 2021;51:756–763.
- [36] Möller MC, and Krauter S. Dimensioning and Lifetime Prediction Model for a Hybrid Hydrogen-Based Household PV Energy System Using Matlab/Simulink. *Solar* 2023;3(1): 25–48.
- [37] Sharma C, Jain A, Engg C, Era G, and Uttrakhand D. Solar Panel Mathematical Modeling Using Simulink 2014;4(5): 67–72.
- [38] Pandiarajan N, and Muthu R. Mathematical Modeling of Photovoltaic Module with Simulink no. February 2011, 2014.
- [39] Kumari JS, and Babu CS. Mathematical Modeling and Simulation of Photovoltaic Cell using Matlab-Simulink Environment 2012.
- [40] Nguyen XH, and Nguyen MP. Mathematical modeling of photovoltaic cell / module / arrays with tags in Matlab / Simulink. *Environ. Syst. Res*,2015.
- [41] Corrêa JM, Member S, F. Farret FA, Popov VA, Simões MG, and Member S. Sensitivity Analysis of the Modeling Parameters Used in Simulation of Proton Exchange Membrane Fuel Cells 2005;20(1): 211–218.
- [42] Mogorosi K, Oladiran MT, and Rakgati E. Mathematical Modelling and Experimental Investigation of a Low Temperature Proton Exchange Membrane Fuel Cell ,2020.pp.653–670.
- [43] Qian X, Shi Z, Zhang J, and Xuan D. Measurement and control platform of the proton exchange membrane of fuel cell based on the MATLAB/Simulink June 2021.
- [44] Khan MJ, and Iqbal MT. Dynamic Modelling and Simulation of a Fuel Cell Generator, 2005.pp.97–104.
- [45] Ansari SA, et al. Modeling and Simulation of a Proton Exchange Membrane Fuel Cell Alongside a Waste Heat Recovery System Based on the Organic Rankine Cycle in MATLAB / SIMULINK Environment 2021.
- [46] Saleh IM, Ali R, and Zhang H. Experimental Testing and Validation of the Mathematical Model for a Self-Humidifying PEM Fuel Cell, 2018.pp.202–218.

- [47] Özdemir MT. Optimal parameter estimation of polymer electrolyte membrane fuel cells model with chaos embedded particle swarm optimization. *Int J Hydrogen Energy* 2021;46(30): 16465–16480.
- [48] Saleh IMM, Ali R, and Zhang H. Simplified mathematical model of proton exchange membrane fuel cell based on horizon fuel cell stack. *J Mod Power Syst Clean Energy* 2016;4(4): 668–679.
- [49] Calasan M, Abdel Aleem SHE, Hasanien HM, Alaas ZM, and Ali ZM. An innovative approach for mathematical modeling and parameter estimation of PEM fuel cells based on iterative Lambert W function. *Energy* vol. 264, no. September 2022, 2023.
- [50] Bhansali G, and Kumar R. Design analysis and dynamic control of PEM fuel cell for standalone applications 2014 IEEE Students Conf. Electr. Electron. Comput. Sci. SCEECS, 2014, pp.1–6.
- [51] Martín IS, Ursúa A, and Sanchis P. Modelling of PEM fuel cell performance: Steady-state and dynamic experimental validation. *Energies* 2014;7(2): 670–700.
- [52] Bankupalli PT, Ghosh S, Sahu LK, and Kumar Dwivedi A. Parameter estimation of PEM Fuel Cell Electrical Equivalent Model using Hybrid Optimization. 2019 8th Int. Conf. Power Syst. Transit. Towar. Sustain. Smart Flex. Grids, ICPS , 2019, pp.1–6.
- [53] Xie P, Araya SS, Guerrero JM, and Vasquez JC. Dynamic Modeling and Control of High Temperature PEM Fuel Cell and Battery System for Electrical Applications. *IECON Proc Industrial Electron. Conf*, 2023, pp.1–6.