

Güneş Pili Modülünün Matlab/Simulink ile Modellenmesi ve Simülasyonu Modeling and Simulation of Solar Cell Module in Matlab/Simulink

Mustafa Ergin Şahin¹, Halil İbrahim Okumuş²

¹Fizik Bölümü, Fen Edebiyat Fakültesi
RTE Üniversitesi, RİZE
mustafaerginsahin@yahoo.com

²Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü,
KTÜ Mühendislik Mimarlık Fakültesi, TRABZON
okumus@ktu.edu.tr

Özet

Bu çalışmada güneş pilinin genel matematiksel modeli elde edilmiş ve bu model Matlab/Simulink yazılımı ile görsel olarak programlanmıştır. Modellenen güneş pili için farklı sayıda seri ve paralel bağlı hücreler, farklı sıcaklık değerleri, farklı güneş soğrulma miktarları, farklı malzeme yapısı ve verime bağlı diğer parametrelere göre Akım-Gerilim (I-V) ve Güç-Gerilim (P-V) karakteristik eğrileri elde edilmiş ve elde edilen benzetim sonuçları teorik sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Modellenen güneş piline farklı özellikteki doğrusal ve doğrusal olmayan yükler bağlanarak çıkış akımı, çıkış gerilimi ve güç değerlerinin değişimleri elde edilmiştir. Ayrıca, yapılan çalışmada deneysel olarak karakteristik özellikleri elde edilen bir güneş pilinin farklı aydınlanma durumları için I-V ve P-V eğrileri elde edilerek teorik ve benzetim sonuçları ile karşılaştırılmış ve fiziki koşulların değişimi ile güneş pili eğrilerinin nasıl etkilendiği ortaya konmuştur. Çalışmada elde edilen benzetimler bu modelin diğer karma sistemlerle beraber kullanımına imkân sağlayacak ve aynı zamanda güneş pili üretiminde ve diğer uygulamalarda deneysel çalışmalar için bir referans oluşturacaktır.

Anahtar Kelimeler: Güneş pili, güneş pili modülü, Matlab/Simulink ile güneş pili benzetimi

Abstract

In this study, a general mathematical model of solar cells has been obtained and Matlab/Simulink software based simulation of this model has been visually programmed. Current-Voltage (I-V) and Power-Voltage (P-V) characteristics have been obtained for different number of series and parallel connected cells, different temperature values, different solar absorption ratios and the other parameters depending on the material structure and the efficiency. The simulation results have been compared with theoretical results for the modeled solar cell. Also, modeling of solar cells for different linear and non-linear loads has been carried out to get output power, current, and voltage curves. Still in this study a solar cell experimental characteristic specifications have been known for different illumination states I-V and P-V curves are obtained and compared with theoretical and simulation results. And, it has been revealed that how affected the curve of the solar cell with the variation of physical conditions. The simulation results

have shown that it is possible to use the model with the other hybrid systems. Also, the model can be used as a reference for solar cell manufacturers and the experimental studies in different applications.

Keywords: Solar cell, Solar cell module, Solar cell modeling with Matlab/Simulink

1. Giriş

Günümüzde hızla artan enerji ihtiyacı, fosil yakıtların sınırlı olması ve çevreye zarar vermesi gibi nedenlerden dolayı yenilenebilir enerji kaynakları alanındaki çalışmalar hızla artmış ve oldukça önemli bir hale gelmiştir. Özellikle güneş pili teknolojilerindeki gelişmeler, yenilenebilir enerji sistemlerinde önemli bir yeri olan güneş gözeleri kullanılarak üretilen elektrik enerjisinin şebekeden bağımsız olarak kullanılması sağlanmıştır. Güneş pillerinin üretim maliyetlerinin her geçen gün daha da azalması, bunların şebekeden bağımsız ve şebekeye bağımlı sistemler olarak kullanılmalarını gündeme getirmiş ve bu konuda daha fazla bilimsel çalışma yapma ihtiyacı doğmuştur [1-4]. Bu bağımsız sistemler aydınlatma sistemi, su pompalama sistemi, havalandırma sistemi ve buna benzer AA ve DA yüklerden oluşabilmektedir. Bu sistemler için ilave bataryalar, DA-AA ve DA-DA çeviricilere ihtiyaç duyulmaktadır. Tüm bu sistemlerin karmaşıklığı ve güneş pillerinin diğer kaynaklardan farklı kendine özgü yapısı, öncelikle güneş pillerinin eksiksiz olarak modellenmesi gereğini doğurmuştur [5-7].

Güneş pillerinin verimi kendi iç dirençleri, kontak yapıları, üretildiği malzeme, sıcaklık ve ışık şiddeti değişimi gibi parametrelerden etkilenmektedir. Dolayısıyla güneş pilleri ile ilgili yapılan çalışmalarda sağlıklı sonuçlar elde edebilmek için öncelikle değişken parametrelerin güneş pili verimine etkisini ortaya koyacak bir model oluşturulması gerekmektedir. Matlab/Simulink yazılımında güneş pili modülüne ait böyle bir modelin mevcut olmaması ve bu konuda yapılan benzer çalışmaların yetersiz olması bu modellenmenin yapılması gereksinimini doğurmuştur [8- 12]. Ayrıca oluşturulan bu model güneş pili üretiminde ve güneş pili testlerinde deneysel çalışan kişilere de yapılan deneysel

çalışmaların ve ölçümlerin doğruluğu açısından ışık tutacak niteliktedir [13- 15]. Oluşturulan bu model konuyla ilgili diğer benzetim çalışmaları ile birleştirilerek kompakt sistemlerin modellenmesi amaçlanmaktadır [16,17].

Literatürde yapılan çalışmalar incelendiğinde, Francisco tarafından yapılan çalışmada güneş pili modülü benzetimi Matlab kodları ile gerçekleştirilmiş ve farklı parametreler için denenmiştir. Ancak yapılan bu çalışmada tüm parametreler yeterince incelenmemiş ve sistemin diğer elektriksel sistemlerle nasıl kullanılacağı düşünülmüştür. Tsai ve arkadaşları tarafından yapılan çalışma da ise güneş pili modülü benzetimi Matlab/Simulink yazılımı ile gerçekleştirilmiş ancak bu modelde yalnızca sıcaklık ve ışık şiddeti değişimlerine bağlı olarak benzetimler yapılmış ve diğer parametreler incelenmemiştir. Modülün yük durumlarına karşı tepkisi incelenmemiş, elektriksel bir sisteme bağlantısı düşünülmemiş, modelin doğruluğu ve gerçek bir güneş pili ile uyumluluğu kontrol edilmemiştir. Walker, Joyce ve arkadaşları ile, Hansen ve arkadaşları tarafından yapılan benzer çalışmalarda da diğer çalışmalarda değinilen benzer eksikler mevcut olduğu görülmüştür. Altaş ve Sharaf tarafından yapılan çalışma ise kullanılan malzemenin verimine bağlı parametreler ve eşdeğer direnç parametreleri modellemede kullanılmamıştır. Bunun yerine denemeler sonucunda bulunan ve yalnızca bir türdeki güneş pili için geçerli alfa ve beta katsayıları kullanılmıştır. Güneş pili modülünün farklı parametreler için gerekli tüm karakteristik eğrilerin doğruluğunu sağladığı test edilmemiştir.

Yine literatürde yer alan Uzunoğlu ve diğerleri, Walker ve diğerleri, Patel ve diğerleri, Hegazy, Ropp ve diğer kişiler tarafından yapılan benzer çalışmalar da her ne kadar güneş pilleri ile ilgili benzetim çalışmaları ve güneş pillerinin farklı sistemlere bağlantıları ile ilgili çalışmalar yapılsa da bu çalışmalar tam olarak bir güneş pili modülünü içerecek tüm parametreleri ele almamakta veya bu konularla ilgili çok özel bir durum üzerine yoğunlaşmış çalışmalar olarak karşımıza çıkmaktadır.

Yapılan bu çalışmada ise güneş pilinin verimini etkileyecek tüm parametreleri içeren genel matematiksel benzetim modeli elde edilmiş ve bu model Matlab/Simulink yazılımı ile görsel olarak programlanmıştır. Bu modelle öncelikle güneş pilinin genel $I-V$ ve $P-V$ karakteristik eğrileri elde edilmiştir. Modellenen güneş pili için farklı seri ve paralel hücre sayıları, farklı sıcaklık değerleri, farklı güneş ışıma ve soğrulma miktarları ve farklı özellikte üretilen güneş pilleri için kullanılan diğer parametrelere göre $I-V$ ve $P-V$ karakteristik eğrileri elde edilmiş ve elde edilen bu benzetim sonuçları olası teorik sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Yine modellenen güneş piline farklı direnç yükleri ve bu tip sistemlerde yaygın olarak kullanılan doğrusal olmayan özellik gösteren akü yükü doğrudan bağlanarak çıkış akımı, çıkış gerilimi ve güç değişimlerinin elde edilmesine yönelik benzetimleri yapılmıştır. Çalışmanın son kısmında ise gerçek bir güneş paneli kullanılarak farklı ışıma ve sıcaklık değişim değerleri için güneş pili modülünün benzetim sonuçlarının gerçek bir güneş pili modülü ile karşılaştırması yapılmıştır.

2. Güneş Pili Genel Matematiksel Modeli ve Eşdeğer Devresi

Bir güneş pilinin $I-V$ karakteristiği temel olarak Eşitlik 1'de ki Shockley diyot eşitliğine dayanmaktadır. Ancak tam bir gösterim için diğer parametreleri içeren genel güneş pili eşitliği Eşitlik 2'deki gibi verilmiştir.

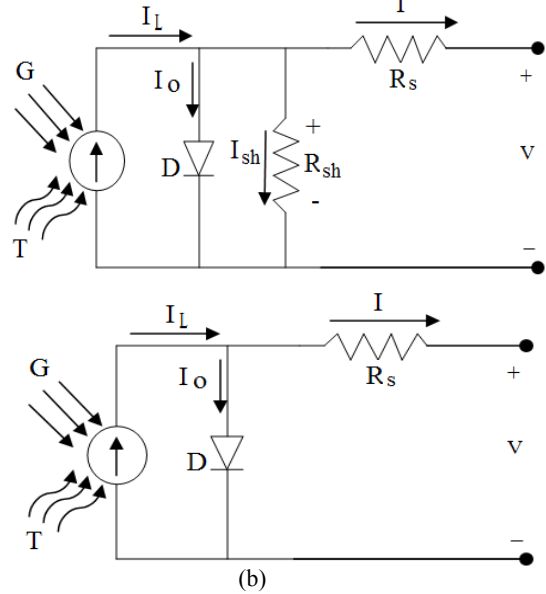
$$I = I_0 \left[\exp\left(\frac{qV}{kT} - 1\right) \right] \quad (1)$$

$$I = I_L - I_0 \left[\exp\left(\frac{q(V + R_s I)}{n k T}\right) - 1 \right] - \frac{V + R_s I}{R_{sh}} \quad (2)$$

Burada ideallik faktörü (n), seri direnç (R_s) ve paralel direnç (R_{sh}) güneş pilinin özelliğine göre değişen parametrelerdir. Diğer parametreler ise Boltzmann sabiti (k), elektron yükü (q) ve güneş pilinin sıcaklığı (T) dir. Eşitlik 2 kullanılarak ve gerekli matematiksel işlemler yapılarak güneş pilinin gerilim ifadesi Eşitlik 3'deki gibi yazılabilir. Burada paralel direnç (R_{sh}) ihmal edilmiştir.

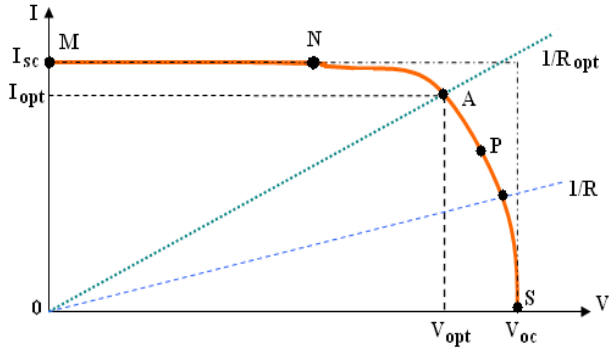
$$V = \frac{n k T}{q} \ln \left[\frac{I_L + I_0 - I}{I_0} \right] - R_s I \quad (3)$$

Güneş pilinin eşdeğer devre modeli Lorenzo tarafından 1994 yılında tanımlanmıştır [11]. Bu model bir akım kaynağı ve buna bağlı paralel bir diyottan oluşmaktadır. Burada seri direnç (R_s) akım akışından kaynaklanan güneş pilinin iç kayıplarını ifade etmektedir ve maksimum güç üretimi için küçük olması istenir. Diyota paralel bağlı (R_{sh}) direnci ise toprağa olan kaçak akımlardan meydana gelen kayıpları ifade eder ve çok küçük olduğu için genelde ihmal edilir. Güneş pilinin eşdeğer devre modeli Şekil 1(a) da, basitleştirilmiş eşdeğer devre modeli ise Şekil 1(b) de verilmiştir.



Şekil 1: (a) Güneş pili eşdeğer devre modeli, (b) Basitleştirilmiş eşdeğer devre modeli.

Güneş pilinin tipik I - V karakteristiği sabit sıcaklık (T) ve belirli bir ışık şiddeti (G) için Şekil 2'deki gibidir. Omik bir yük için yük karakteristiği doğrusal olarak $I/V=1/R$ 'nin eğimi olarak bulunabilir. Yüke aktarılan gücün sadece dirence bağlı olduğu söylenebilir. Buna göre şayet R yükü çok küçükse güneş pili Şekil 2'deki M-N aralığında bir akım kaynağı olarak kısa devre akımına yakın bir akım değerinde çalışacaktır. Şayet R yükü oldukça büyük değerdeseyse bu durumda da güneş pili eğrinin P-S aralığında sabit bir gerilim kaynağı olarak açık devre gerilimine yakın bir gerilim değerinde çalışacaktır [4].



Şekil 2: Güneş pilinin tipik akım-gerilim (I - V) karakteristiği.

Yüke aktarılan gücün maksimum olduğu noktaya *maksimum güç noktası* denir ve bu nokta Şekil 2'de A (I_{opt} , V_{opt}) noktasıdır. Ve bu nokta için yükün aldığı uygun değer R_{opt} olur. Maksimum güç P_{max} ise Eşitlik 4'deki gibi yazılabilir.

$$P_{max} = V_{opt} \cdot I_{opt} \quad (4)$$

Güneş pilinin verimi ise pile aktarılan güç ile emilen ışık gücü arasındaki orana bağlıdır ve Eşitlik 5'de gösterilmiştir. Burada G aydınlanma şiddeti, A ise hücrenin alanıdır.

$$\eta = \frac{P_{max}}{P_{in}} = \frac{V_{opt} \cdot I_{opt}}{G \cdot A} \quad (5)$$

Diğer bir parametre ise maksimum gücün (P_{max}), kısa devre akımı (I_{sc}) ile açık devre gerilimi (V_{oc})'nin çarpımına bölümünden elde edilen ve Eşitlik 6'da gösterilen doldurma faktörüdür. Bu değer üretilen güneş pilleri için hesaplanabilir ve ideal bir güneş pili için 0.7 değerinden büyük olması istenir.

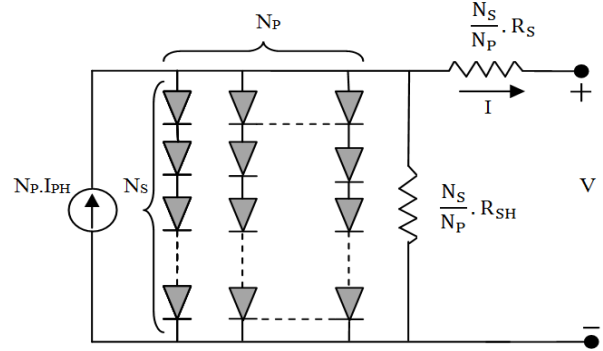
$$DF = \frac{P_{max}}{V_{oc} \cdot I_{sc}} = \frac{V_{opt} \cdot I_{opt}}{V_{oc} \cdot I_{sc}} \quad (6)$$

Güneş pilinin akımının hücresel çalışma sıcaklığı (T) ve güneş ışığı soğurulması (G) ye bağlı ifadesi Eşitlik 7'deki gibi gösterilebilir. Burada G , güneş ışığı enerjisi soğrulma miktarı olup ışık şiddetine göre 0-1100kW/m² aralığında değişmektedir. K_I ise kısa devre akımına bağlı sıcaklık katsayısıdır. Genel olarak 3mA/°C olarak alınır [9]. Burada bir diğer parametre de rüzgar hızıdır ancak literatürde genel olarak 1-3m/s aralığında seçilmiş ve etkisiz eleman olarak gözükmemektedir. Ayrıca gerçekleştirilen modelde güneş modülü sıcaklığı esas alındığı için hava koşullarındaki değişimlerin sıcaklık etkisi dikkate alınmamıştır [18].

$$I_L = \left[I_{sc} + K_I (T - T_{ref}) \right] \cdot G \quad (7)$$

Basit bir güneş pili hücresi en fazla 0.5V gerilimde 2W güce çıkabilmektedir. Bu yüzden hücreler seri ve paralel bağlanarak istenen gerilim ve akımda güneş pilleri elde edilebilir. Bu elde edilen yapılar güneş pili modülü olarak adlandırılır. Eşdeğer devre modelinde seri hücre sayıları N_s , paralel hücre sayıları ise N_p olarak alınıp Şekil 3'deki modüler eşdeğer devre modeli gösterilmiştir [9]. Bu ifade de seri hücre sayısı gerilimi artırırken paralel hücre sayısı ise akımı artırır. Bu modül için toplam akım ifadesi Eşitlik 8'deki gibi yazılabilir.

$$I = N_p \cdot I_{PH} - N_p \cdot I_0 \left[\exp \left(q \left(\frac{V}{N_s} + \frac{I R_s}{N_p} \right) / k T_c \cdot A \right) - 1 \right] - \left(\frac{N_p \cdot V}{N_s} + I R_s \right) / R_{SH} \quad (8)$$



Şekil 3: Güneş pili modülü için genel eşdeğer devre modeli.

Güneş pili eşdeğer devresinde ki R_s direnci R_{sh} direncine göre çok daha duyarlıdır. Bu yüzden R_{sh} direnci R_s direnci yanında açık devre gibi alınabilir. Bu durumda toplam modül akımı (I) Eşitlik 9'daki gibi olur.

$$I = N_p \cdot I_{PH} - N_p \cdot I_0 \left[\exp \left(q \left(\frac{V}{N_s} + \frac{I R_s}{N_p} \right) / k T_c \cdot A \right) - 1 \right] \quad (9)$$

Eşitlik 9'da $V=V_{PV}$, $I=I_{PV}$, $I_{PH}=I_L$, $A=n$ ve $T_c=T$ ifadeleri yerine konularak toplam modül çıkış gerilimi (V_{PV}) Eşitlik 10'daki gibi yazılabilir.

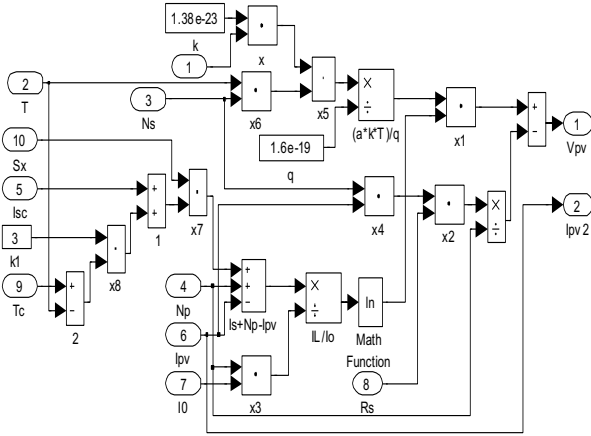
$$V_{PV} = \frac{N_s \cdot n \cdot k \cdot T}{q} \ln \left[\frac{I_L + I_0 - I_{PV} + N_p}{I_0 \cdot N_p} \right] - \frac{N_s}{N_p} R_s \cdot I_{PV} \quad (10)$$

Eşitlik 7'deki güneş pilinin sıcaklığa ve güneş ışığı soğrulma miktarına bağlı akım ifadesi, Eşitlik 10'da yerine yazılacak olursa bu parametrelere bağlı güneş pili modülünün gerilim ifadesi Eşitlik 11'deki gibi yazılabilir.

$$V_{PV} = \frac{N_s \cdot n \cdot k \cdot T}{q} \ln \left[\frac{(I_{sc} + K_I (T - T_{ref})) \cdot G + I_0 - I_{PV} + N_p}{I_0 \cdot N_p} \right] - \frac{N_s}{N_p} R_s \cdot I_{PV} \quad (11)$$

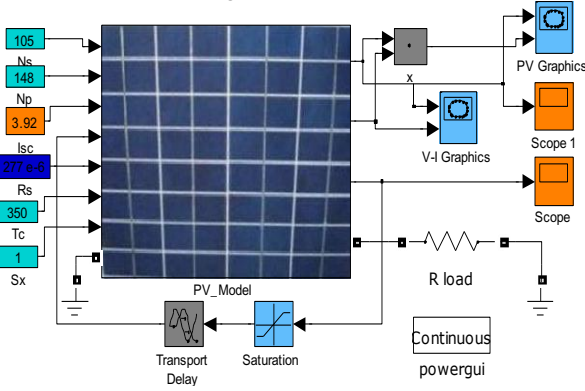
3. Güneş Pilinin Matlab/Simulink Benzetimi

Sayısal ifadelerin ve formüllerin yazımında, bu ifadeleri oluşturan sistemlerin modellenmesinde ve diğer sistemlerle birleştirilmesinde Matlab/Simulink görsel yazılımı oldukça kolaylıklar sağlamaktadır. Bu yüzden modellemede Matlab/Simulink yazılımı tercih edilmiştir. Eşitlik 11'deki güneş pilinin tüm parametrelerini içeren akıma bağlı gerilim ifadesinin Simulink benzetimi Şekil 4'de verilmiştir.



Şekil 4: Güneş pilinin Simulink eşdeğer modeli.

Güneş piline bir yük bağlanması ve bu yük durumuna göre sonuçların elde edildiği güneş piline ait gerçekleştirilen genel devre modeli Şekil 5'de gösterilmiştir.



Şekil 5: Güneş pilinin Simulink'de yük bağlanarak elde edilen genel modeli.

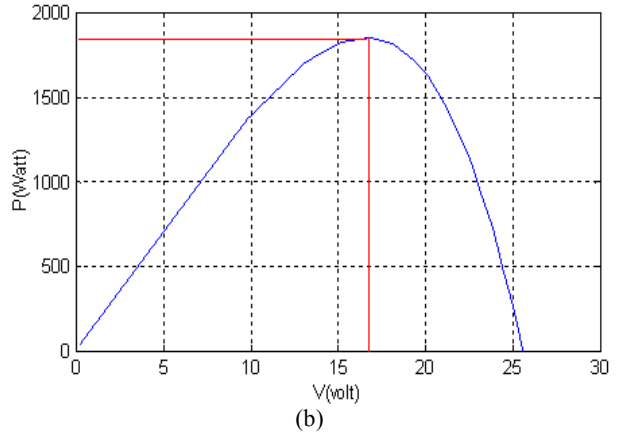
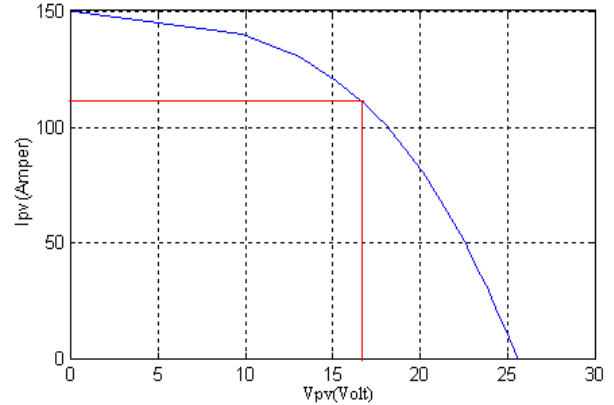
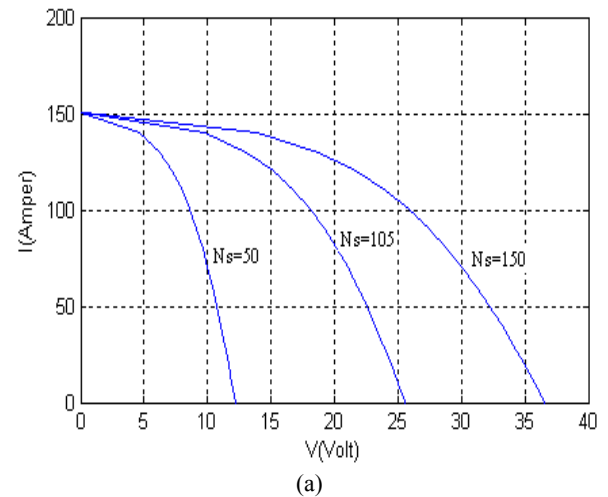
Şekil 4'deki güneş pilinin eşdeğer modeli ve Şekil 5'deki güneş piline yük bağlanmış genel elektriksel modeli kullanılarak benzetim sonuçları elde edilmiştir. Bu benzetimlerde Tablo 1'deki sabit değerler ve değişken parametreler kullanılmıştır.

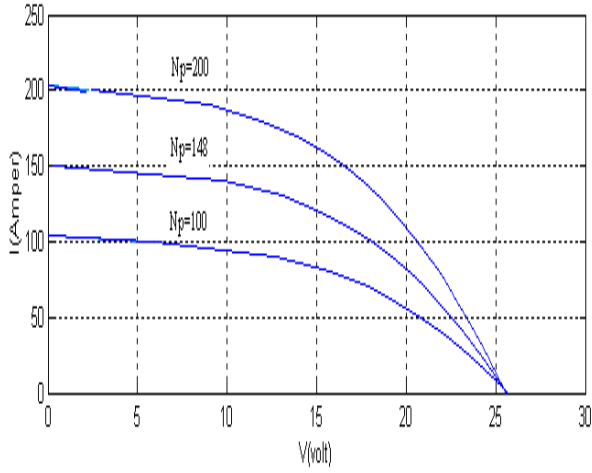
Tablo 1: Simülasyonlarda kullanılan sabit değerler ve değişken parametreler

Sabit Kabul Edilen Parametreler ve Değerleri	
Boltzmann sabiti (k)	$1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$
Elektron yükü (q)	$1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$
Referans sıcaklık (T)	$(273+25) \text{ K}$
Kısa devre akımı sıcaklık sabiti (K_s)	$3 \text{ mA/}^\circ\text{C}$
Diyot akımı (I_0)	$50 \mu\text{A}$
Kısa devre akımı (I_{sc})	3.92 A
Değişken Parametreler ve Değerleri	
Seri hücre sayısı (N_s)	105
Paralel hücre sayısı (N_p)	148
Seri iç direnç (R_s)	0.0277Ω
Değişken sıcaklık (T_s)	$0-100^\circ\text{C}$
Işık soğurulması ($S_x=G$)	$0.1-1 \text{ kW/m}^2$
İdeallik faktörü ($a=n$)	1.2-5

4. Güneş Pili Modülü için Benzetim Sonuçları

Güneş pili modülüne ait benzetimler ve Tablo 1'deki parametreler kullanılarak Şekil 6(a)'da güneş piline ait akım-gerilim ($I-V$) karakteristik eğrisi elde edilmiştir. Bu eğri için maksimum güç noktası belirlenmiştir. Şekil 6(b)'de ise güç-gerilim ($P-V$) karakteristiği çizilmiştir ve maksimum güç noktası için gerilim değeri belirlenmiştir. Maksimum güç aktarımı ise 17V için 1800Watt civarındadır.

Şekil 6. Güneş pili modelinin $I-V$ karakteristiği(a) ve $P-V$ karakteristiği(b) benzetimi.

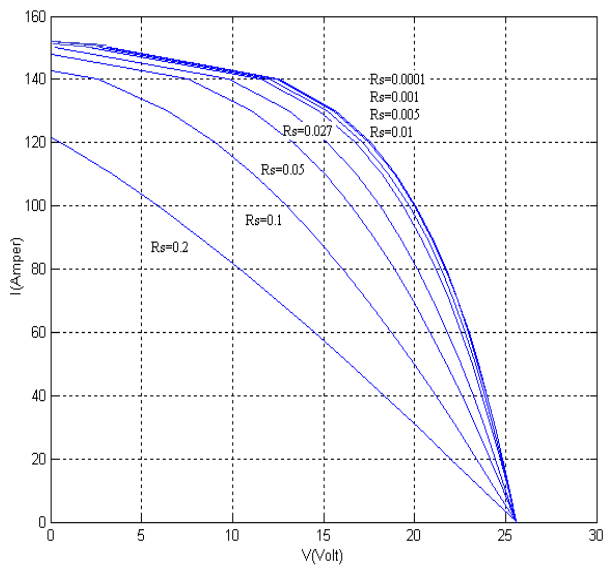


(b)

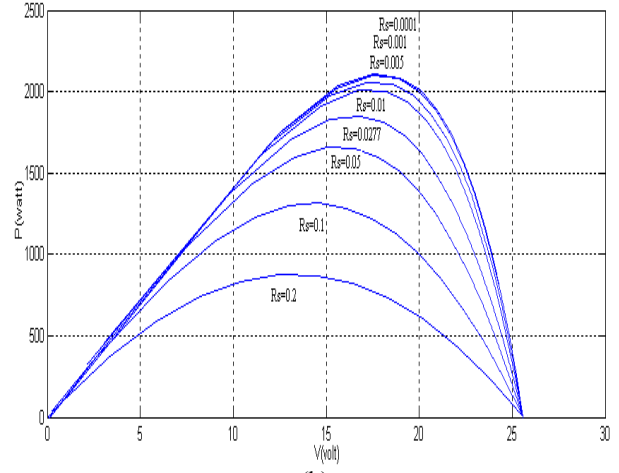
Şekil 7: Güneş modülünün farklı seri(a) ve paralel(b) hücre sayıları için $I-V$ karakteristiği.

Şekil 7(a) ve (b) de güneş pili modelinin değişik sayılarda paralel ve seri bağlı hücreler için akım-gerilim ($I-V$) karakteristiklerinin nasıl değiştiği görülmektedir. Bu grafiklerde görüldüğü üzere seri hücre sayısı artarken açık devre gerilimine yakın değerlerde gerilim değeri artmakta kısa devre akım değeri ise sabit kalmaktadır. Aynı şekilde paralel hücre sayıları arttığında yüklü durumda akım artmakta açık devre gerilimi ise değişmemektedir. Bu benzetim sonuçları beklenen teorik sonuçlarla uyumaktadır.

Şekil 8(a) ve 8(b) de ise güneş pili modelinin farklı seri iç dirençleri için $I-V$ ve $P-V$ karakteristikleri görülmektedir. Şekil 8(a) da görüldüğü gibi seri iç direnç değeri ne kadar küçültülürse $I-V$ karakteristiğinin maksimum noktası V_{oc} ve I_{sc} değerlerine yaklaşmakta ve doldurma faktörü 0.7 değerinden büyük olmaktadır. Aynı şekilde $P-V$ karakteristiğinde de R_s 'nin değerinin azalması ile maksimum güç noktası artmaktadır.



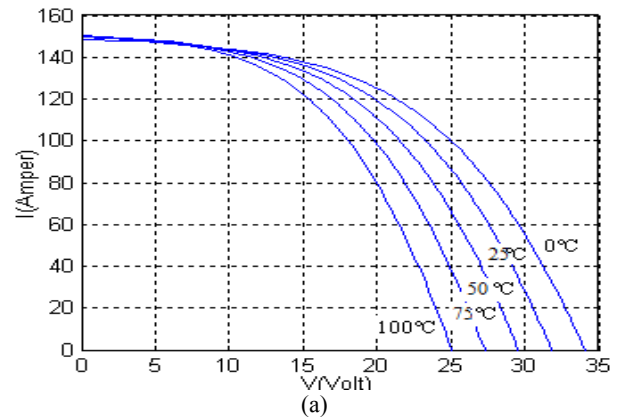
(a)



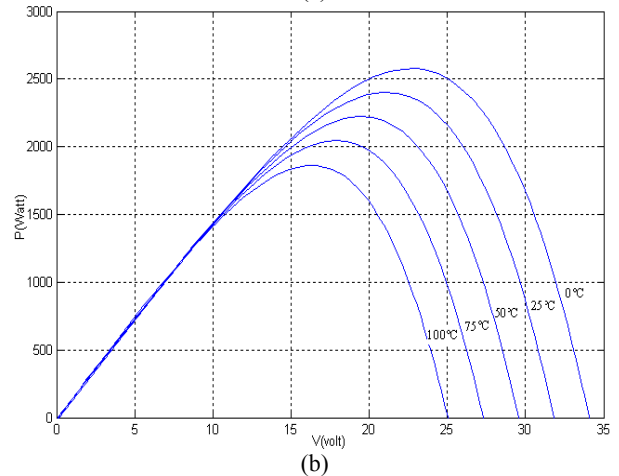
(b)

Şekil 8 : Farklı seri iç dirençler($R_s=0.0001\Omega-R_s=0.2\Omega$) için $I-V$ (a) ve $P-V$ (b) eğrileri.

Şekil 9(a) ve (b) de farklı sıcaklık değerleri için güneş pilinin $I-V$ ve $P-V$ eğrileri görülmektedir. Şekil 9(a) da güneş pilinde sıcaklık artışının açık devre gerilimi (V_{oc}) nin değerini düşürdüğü kısa devre akımı (I_{sc}) yi ise çok az miktarda da olsa artırdığı görülmektedir. Ancak Şekil 9(b)'de görüldüğü gibi maksimum güç noktası sıcaklık artışı ile beraber düşmektedir. Bu durum teorik hesaplara uygun bir durumdur.



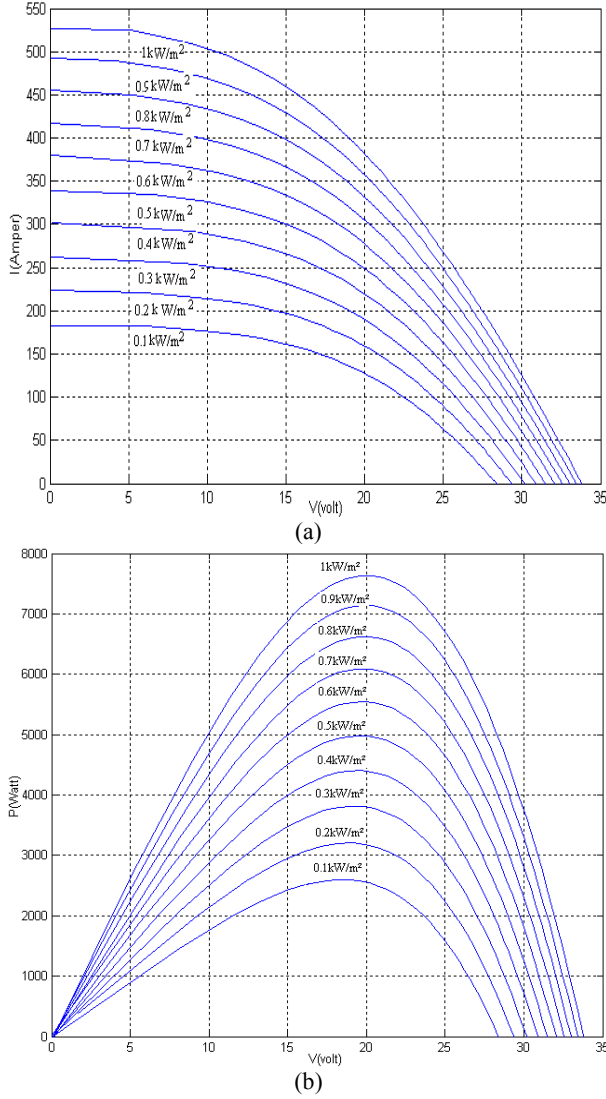
(a)



(b)

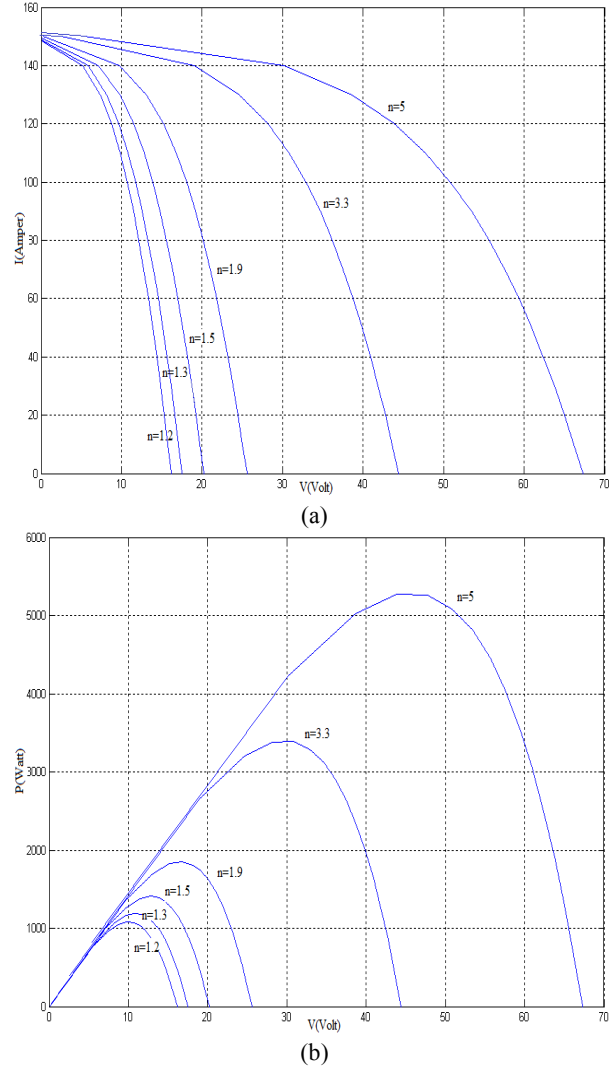
Şekil 9: Farklı sıcaklık değerleri($T=0^\circ\text{C} - T=100^\circ\text{C}$) için $I-V$ (a) ve $P-V$ (b) eğrileri

Şekil 10(a) ve (b) de ise güneş pilinin farklı güneş ışığı soğrulması durumları için $I-V$ ve $P-V$ karakteristik eğrileri çizilmiştir. Burada güneş ışığı soğrulma değerleri için $S_x=0.1\text{kW/m}^2$ ile $S_x=1\text{kW/m}^2$ aralığında ki değerler kullanılmış ve karakteristik eğrileri çizdirilmiştir. Burada soğrulan ışık şiddetine bağlı olarak gerilimin ve akımın arttığı gözükmektedir. Ancak gerilimdeki artış akıma göre çok daha azdır. Buna bağlı olarak güç aktarımı da Şekil 10(b) de görüldüğü gibi belli oranda artmaktadır.



Şekil 10: Farklı güneş soğrulma değerleri ($S_x = 0.1-1\text{kW/m}^2$) için (a) $I-V$ ve (b) $P-V$ eğrileri.

Güneş pilinin modellenmesinde kullanılan bir diğer parametre de ideallik faktörüdür. Bu faktör güneş pilinin üretim teknolojisine göre 1.2 ile 5 aralığında değişmektedir. Örneğin Silisyum mono kristali için $n=1.2$ iken Kadmiyum Tellür için $n=1.5$ dur. Bu değer değişik malzeme yapısına göre farklı değerler alabilir. Şekil 11(a) ve (b) de farklı ideallik faktörüne sahip güneş pilleri için $I-V$ ve $P-V$ karakteristik eğrileri çizilmiştir. İdeallik faktörünün büyümesine bağlı olarak açık devre gerilimi (V_{oc}) ve kısa devre akımı (I_{sc}) değerleri de büyümektedir. Buna bağlı olarak maksimum güç aktarımı da Şekil 11(b) deki gibi artmaktadır.



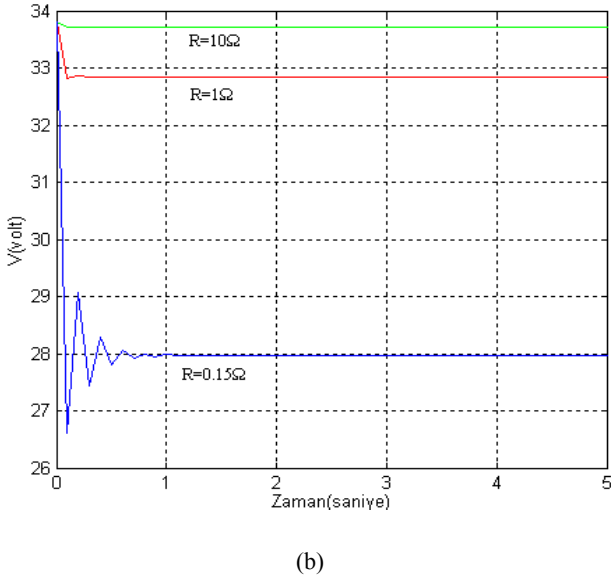
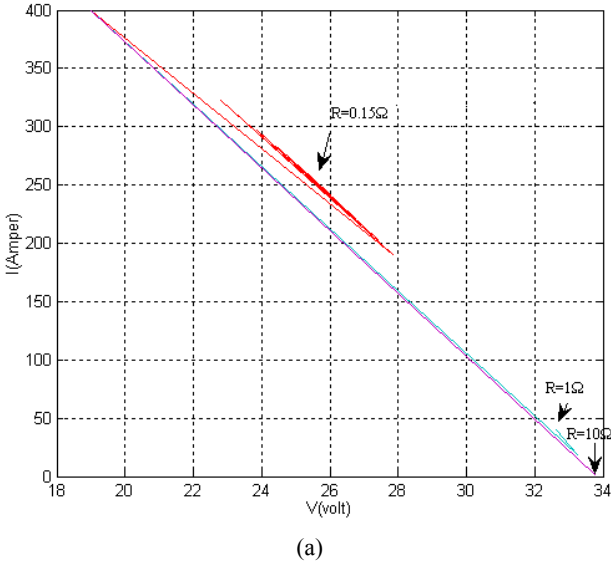
Şekil 11: Farklı ideallik faktörüne sahip güneş pilleri ($n=1.2-5$) için (a) $I-V$ ve (b) $P-V$ eğrileri.

5. Farklı Yükler Bağlı Güneş Pili için Benzetim Sonuçları

Güneş pilinin karakteristik eğrilerinde doğrusal değişen farklı yüklerde güneş pili yükü doğrusal olmayan farklı akım ve gerilim değerlerine sahip olmaktadır. Bu durum güneş pili sisteminin diğer sistemlere bağlanmasında önem arz etmektedir. Güneş gözesi sistemleri kullanılarak elde edilen enerji doğrusal bir yük özelliği göstermeyen akülerde depolanmakta ve sonradan ihtiyaca göre kullanılmaktadır. Bu çalışmada güneş pilinin omik yük ve akünün farklı şarj durumları için doğrusal olmayan yük durumu incelenmiştir.

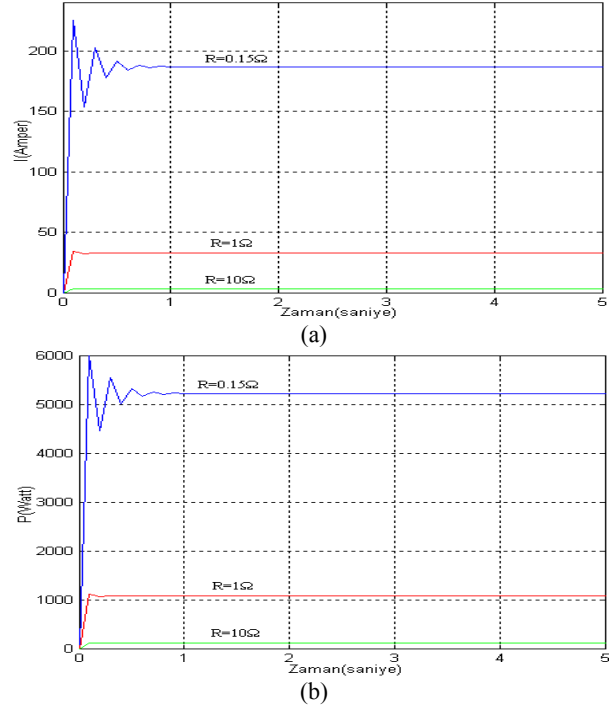
Güneş pili modeli için Şekil 5'deki direnç yüklü Matlab/Simulink benzetimi kullanılmıştır. Direnç yükü bağlı güneş pili modeli için akım-gerilim ($I-V$) karakteristiğinin farklı yüklenme durumu için çalışma bölgesi Şekil 12(a)'da verilmiştir. Omik yükün durumuna göre $I-V$ karakteristiğindeki çalışma noktası maksimum güç noktası ile açık devre gerilimi aralığında değişmektedir. Direnç değeri artarken akım değeri de azalmakta çalışma gerilimi ise

artmaktadır. Şekil 12(b)'de görüldüğü gibi çıkış geriliminin değişimi zamanla sabitlenmektedir. Akımın başlangıç değeri sıfır olduğundan başlangıçta açık devre gerilim değerinden yüklenme gerilim değerine doğru gerilim zamanla değişmekte ve sabitlenmektedir. Çok küçük yük değerinde ise ani akım tepkisi sistemin kararlılığını bir miktarda olsa yavaşlatmaktadır.



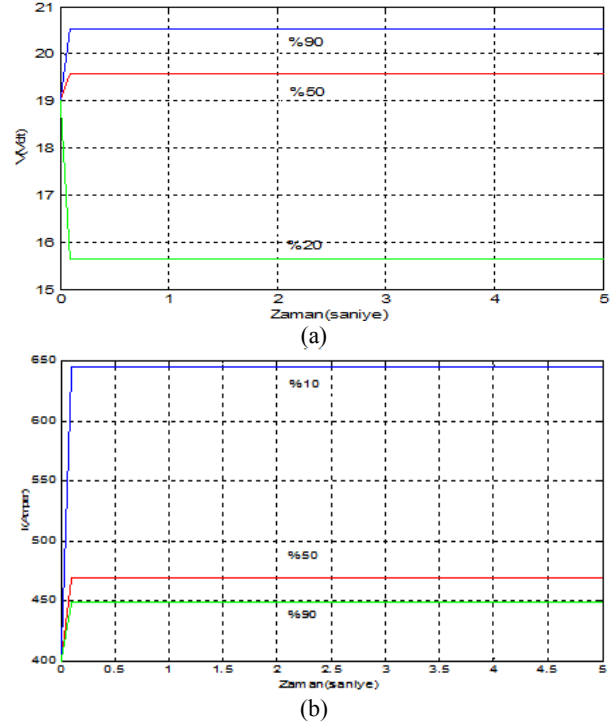
Şekil 12: Farklı yükler ($R=0.15\Omega$, $R=1\Omega$, $R=10\Omega$) için ;(a) I - V karakteristiğinde ki çalışma durumları, (b)Çıkış geriliminin zamanla değişimi.

Şekil 13(a) da çıkış akımı, 13(b) de ise çıkış gücünün zamanla değişimi farklı yükler için gösterilmiştir. Küçük dirençler için güneş pilinden maksimum güç çekilmekte büyük dirençler için ise minimuma yakın güç çekilmektedir. Çıkışın küçük değerli yükler için daha yavaş kararlı hale geldiği ve kaynağın veriminin düştüğü gözükmektedir.



Şekil 13: Farklı yükler için;(a)çıkış akımının, (b) çıkış gücünün zamanla değişimi.

Şekil 14(a) da güneş piline bağlı 12V ve 20 amper-saat'lik akünün geriliminin zamanla değişimi 14(b) de ise akü akımının zamanla değişimi farklı şarj seviyeleri için verilmiştir. Farklı şarj seviyeleri için güneş pilinden çekilen akım ve buna bağlı gerilimin kararlı olduğu ancak şarj seviyesi ile doğrusal değişmediği gözükmektedir.



Şekil 14. Farklı akü şarj seviyeleri için;(a)gerilimin, (b) akımın zamanla değişimi

6. Güneş Pili Ölçümleri ve Benzetim Karşılaştırması

Yapılan deneysel ölçümlerde SUNRISE marka SR-M540100 model 100W'lık tek kristal yapıya sahip bir güneş paneli kullanılmıştır. Güneş piline ait katalog verileri Tablo 2 de, kurulan deney düzeneği ise Şekil 15 de verilmiştir.

Tablo 2: Güneş paneline ait katalog verileri.

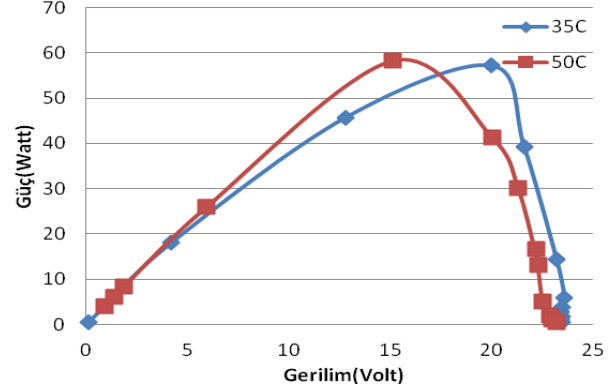
Güneş Panelinin Temel Özellikleri	Sayısal Değerleri
Maksimum panel gücü (P_m)	100W±%3
Açık devre gerilimi (V_{oc})	24.35 V
Kısa devre akımı (I_{sc})	5.51 A
Maksimum güç voltajı (V_m)	19.80V
Maksimum güç akımı (I_m)	5.06 A
Modül-tek hücre verimi (%)	15.6- 18.43
Hücre tipi (Si tek kristal) boyutları	125x125(mm)
Hücre sayısı (Pcs)	40(4x10) Adet
Çalışma sıcaklığı	-40,+85 °C



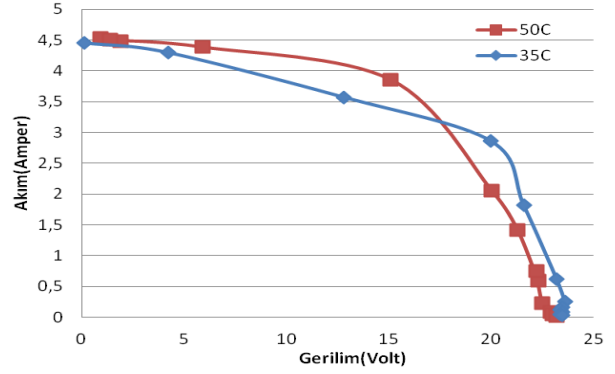
Şekil 15: Kullanılan güneş paneline ait ölçüm düzeneği

Kurulan deney düzeneğinde güneş ışığının aydınlatma şiddeti bir lüksmetre yardımı ile ölçülmüştür. Ancak güneş ışınımı (W/m^2) ile aydınlatma şiddeti (lüks) farklı boyutlarda olduğu için aralarında doğrusal bir dönüşüm yapmak mümkün değildir. Elimizdeki ışıkölçerin, katalog bilgilerine göre, 550nm dalga boyu için ölçüm yapabildiği görülmektedir. Gün ışığının görünür ışık bölgesinde (600nm) en büyük ışınımına sahip olduğu bilinmektedir. Bu dalga boyunda aydınlanma şiddeti ile güneş ışınımı arasında bir dönüşüm katsayısı kullanılmaktadır [19-21]. Kullanılan iki termik çift yardımıyla panelin alt ve üst sıcaklığı ölçülerek ortalama panel sıcaklığı bulunmuştur. Güneş panelinin akım ve gerilimleri farklı yüklerde ölçülerek I-V ve P-V eğrileri Şekil 16 (a) ve (b) deki gibi elde edilmiştir. Yapılan ölçümler güneş ışınımının en düşük olduğu aralık ayında güneş ışık şiddetinin 95000 lüks ve 70000 lüks olduğu saatlerde farklı günlerde yapılmıştır. Ortalama panel sıcaklığı 50°C ve 35°C olarak ölçülmüştür.

Yapılan ölçümlerde güneş paneli eğrilerinin beklenen katalog verilerine ulaşılmış ancak, düşük ışınım için maksimum güce ulaşamamıştır. Yıl içerisinde en düşük ışınım için güneş panelinin verebileceği güç miktarı bulunmuştur. Işınım miktarının bir miktar artışı ile güç miktarı az da olsa artmıştır. Ancak panel sıcaklığı da arttığı için önceki benzetimlerdeki sonuçlara ve literatüre uygun olarak maksimum güç noktasının sağında bir miktar gerilim düşüşü olmuş ve buna bağlı olarak güçte azalmıştır [14-22].



(a)



(b)

Şekil 16: Güneş panelinin, farklı yükler için ölçülen akım-gerilim(b), güç-gerilim(a) eğrileri.

7. Sonuçlar

Bu çalışmada, güneş pilinin elde edilen matematiksel modeli Matlab/Simulink yazılımı ile görsel olarak programlanmış ve güneş pili modülünün benzetimi gerçekleştirilmiştir. Elde edilen benzetim sonuçlarının güneş pilinin verimini etkileyen tüm parametreler için nasıl değiştiği incelenmiştir ve teorik sonuçlara yakın sonuçlar verdiği gözlenmiştir. Güneş pili modelinin çıkışına omik bir yük ve doğrusal olmayan akü yükü bağlanarak çıkış akımı, çıkış gerilimi ve çıkış gücünün farklı yükler için zamanla değişimi incelenmiştir. Elde edilen benzetim sonuçlarının teorikte bilinen ideal bir kaynağa benzer sonuçlar verdiği görülmüştür. Bu nedenle modellenen güneş pilinin benzetimi yapılacak farklı elektriksel sistemlerle beraber kullanılabilirliği görülmüştür.

Yapılan deneysel ölçümlerde ise farklı ışınım ve panel sıcaklıkları için güneş pilinin deneysel I-V ve P-V eğrileri çıkartılarak benzetimlerin doğruluğu kanıtlanmış ve kurulacak gerçek bir sistemde en düşük ışınım için en iyi çalışma noktası belirlenmeye çalışılmıştır.

Gerçekleştirilen ölçümlerin sürekli çalışan bir sistem kurularak yapılması daha gerçekçi sonuçlar verecek ve bölgesel istatistikî verilerin elde edilmesi sağlanabilecektir.

Teşekkür

Bu çalışma, 111E292 numaralı TÜBİTAK hızlı destek projesi kapsamında desteklenmiştir. Yazarlar destek için teşekkür ederler.

8. Kaynaklar

- [1] Joyce A., Rodrigues C., Manso R., “Modeling a PV System”, *Renewable Energy* 22, 275-280, 2001.
- [2] Fangrui L., Shanxu D., Fei L., Bangyin L., and Yong K., “A Variable Step Size INC MPPT Method for PV Systems”, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 55(7), 2008.
- [3] Masoum M.A.S., Dehbonei H., Fuchs E. F., “Theoretical and Experimental Analyses of Photovoltaic Systems with Voltage and Current-Based Maximum Power-Point Tracking”, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 17(4), 2002.
- [4] Hansen A. D., Sørensen P., Hansen L. H., Bindner H., “Models for a Stand-Alone PV System”, *Risø National Laboratory*, Roskilde, December 2000.
- [5] Uzunoglu M., Onar O. C., Alam M. S., “Modeling, Control and Simulation of a PV/FC/UC Based Hybrid Power Generation System for Stand-alone Applications”, *Renewable Energy* 34, 509-520, 2009.
- [6] Walker G. R., Sernia P. C., “Cascaded DC-DC Converter Connection of Photovoltaic Modules”, *IEEE Transactions on Power Electronics*, 19(4), 1130-1140 July 2004.
- [7] Walker G., “Evaluating Mppt Converter Topologies Using A Matlab PV Model”, *Journal of Electrical & Electronics Engineering*, 21(1), 49-56, 2001.
- [8] Altaş I. H., Sharaf, A. M. “A Photovoltaic Array Simulation Model for Matlab-Simulink GUI Environment”, *IEEE Conference*, 341-345, 2007.
- [9] Tsai H. L., Tu C. S., and Su Y. J., “Development of Generalized Photovoltaic Model Using Matlab/Simulink”, *WCECS 2008*, San Francisco, USA, October 22-24, 2008
- [10] Francisco M.G.L., “Model of Photovoltaic Module in Matlab”, *II CIBELEC*, 2005,
- [11] Lorenzo, E. “Solar Electricity Engineering of Photovoltaic Systems” *Artes Graficas Gala*, S.L., Spain. 1994
- [12] Ropp M. E., Gonzales S., “Development of Matlab/Simulink Model of a Single- Phase Grid-Connected Photovoltaic System”, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2009.
- [13] Patel H., Agarwal V., “MATLAB-Based Modeling to Study the Effects of Partial Shadings on PV Array Characteristics”, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 23(1), 302-311, March 2008.
- [14] Hegazy A. A., “Comparative Study of the Performances of Four Photovoltaic/ Thermal Solar Air Collectors”, *Energy Conversion & Management* 41, 861-881, 2000.
- [15] Navruz T. S., Saritaş M., “Efficiency Variation of The Intermediate Band Solar Cell Due to The Overlap Between Absorption Coefficients”, *Solar Energy Materials & Solar Cells* 92, 273-282, 2008.
- [16] Sahin M. E., Okumus H. İ., “A Fuzzy Logic Controlled PV-Powered Buck-Boost DC-DC Converter for Battery-Load System”, *INISTA Conference*, Trabzon, 2011.
- [17] Sharaf A.M., Sahin M.E., “A Novel Photovoltaic PV-Powered Battery Charging Scheme for Electric Vehicles”, *ICEAS IEEE Conference*, India, 2011.
- [18] Sahin M. E., Nevruzov V., “Computer Controlled Solar House for Measurement Rize City Solar Energy Potential”, *NuRER Conference*, Ankara, 2010.
- [19] Bücher K., Kleiss G., Bätzner D., “Photovoltaic Modules in Buildings: Performance and Safety”, *Renewable Energy* 15, 545-551, 1998.
- [20] Manallah A., Bouafia M., Guechi A., “Photometric Study of a Solar Cell Panel Si-c”, *NuRER Conference*, İstanbul, 2012.
- [21] İnternet: www.wikipedia.com, “Electromagnetic spectrum and visible light”, 2012.
- [22] Joshi A.S., Dinçer I., Reddy B. V., “Performance Analyses of Photovoltaic Systems: A review”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 13, 1884-1897, 2009.