

## NÜRDAM Tarafından Üretilen Fotovoltaik Modüllerin Tek ve Çift Diyot Eşdeğer Devre Modellerinin İncelenmesi

<sup>1\*</sup>Zeynel Abidin Sezer, <sup>2</sup>Oktay AYTAR, <sup>1,3</sup>Aliekber AKTAĞ, <sup>1,3</sup>Ercan YILMAZ

<sup>1\*</sup>Nükleer Radyasyon Dedektörleri Uygulama ve Araştırma Merkezi, Bolu Abant İzzet Baysal Üniversitesi, 14030  
Türkiye

<sup>2</sup>Mühendislik Fakültesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, Bolu Abant İzzet Baysal Üniversitesi, 14030,  
Türkiye

<sup>3</sup>Fen Edebiyat Fakültesi, Fizik Bölümü, Bolu Abant İzzet Baysal Üniversitesi, 14030, Türkiye

### Özet

En önemli yenilenebilir enerji kaynaklarından birisi olan güneş enerjisinin elektrik enerjisine dönüştürülmesinde kullanılan Fotovoltaik(FV) modüller ile çevre dostu ve sınırsız enerjiye ulaşım sağlanmaktadır. FV modüllerin simülasyonları sayesinde enerji dönüşümünde ortaya çıkacak olan olumlu veya olumsuz etkilerde bulunan parametrelerin testleri yapılmaktadır. Yapılan bu çalışma ile hem gerçek ölçümler ile elde edilen veriler hem de datasheet' ten alınan verilerin Matlab/Simulink ortamında geliştirilen tek ve çift diyot modellerine uygulanarak simule edilmiştir. Karşılaştırılması yapılan tek ve çift diyot yapılarının akım – gerilim ve güç – gerilim grafikleri incelenerek hava koşullarının güneş enerjisi üretimine yaptığı etkiler incelenmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Fotovoltaik(FV) Sistemler, Yenilenebilir Enerji, Matlab-Simulink

### Abstract

Photovoltaic (PV) modules are used to convert solar energy into electrical energy, which is one of the most important renewable energy sources. Thanks to the simulations of PV modules, parameters that have positive or negative effects in energy conversion are tested. In this study, both the data obtained by real measurements and the data obtained from the datasheet were simulated by applying to single and double diode models developed in Matlab / Simulink environment. Current - voltage and power - voltage graphs of single and double diode structures were compared and effects of weather conditions on solar energy production were investigated.

**Key words:** Photovoltaic (PV) Systems, Renewable Energy, Matlab-Simulink

### 1. Giriş

Elektrik enerjisi tüketiminin her geçen gün artmasından dolayı alternatif enerji kaynaklarının kullanılması gerekli hale gelmiştir. Fosil Enerji kaynaklarının oluşturduğu kirlilik ve fosil kaynakların sınırlı olması nedeniyle enerji üretimi için farklı arayışlar gerekmektedir.

Dünyadaki canlılar yaşamalarını devam ettirebilmek için güneşe muhtaçtırlar. Güneş enerjisi sınırsızdır ve insanlığın varlığı süresince serbestçe kullanılacaktır. Güneşin dünyadaki bütün enerjilerin ortaya çıkma sebebi olduğu bilinmektedir[17]. Rüzgar enerjisi, güneşin dünyayı ısıtması sonucu düşük hava basıncı alanlarının meydana gelmesi ve hava akımının yüksek

\*Corresponding author: Address: Nükleer Radyasyon Dedektörleri Uygulama ve Araştırma Merkezi, Bolu Abant İzzet Baysal Üniversitesi 14030 Bolu / Türkiye. E-mail address:sezerzeynelabidin@gmail.com, Phone: +905386232303

basınçtan düşük basınç alanına doğru hareket etmesi ile oluşmaktadır. Ortaya çıkan bu enerji rüzgar türbinleri aracılığıyla mekanik enerjiden elektrik enerjisine dönüştürülerek elektrik enerjisi üretiminde kullanılmaktadır. Hidroelektrik santralleri, güneşin yeryüzündeki suları ısıtıp buharlaştırması ve buharlaşan suyun yağmur olarak tekrar yeryüzüne inip barajlarda depolanması prensibine göre çalışıp elektrik enerjisi üretmektedir. Güneş pilleri ise güneş enerjisini doğrudan elektrik enerjisine dönüştüren temiz, gürültüsüz, bakımı zor olan mekanik parçalara ihtiyaç duymayan, hafif ve uzun ömürlü aygıtlardır. Çevre kirliliğine neden olabilecek herhangi bir maddeye ihtiyaç duymaksızın, güneşten yayılan fotonları elektrik enerjisine dönüştürerek temiz ve tükenmeyen enerji kaynağı olan Fotovoltaik(FV) enerji alternatif bir enerji kaynağı olarak kullanılmaktadır. FV enerji, güneş pilleri sayesinde üretilmektedir. Güneş pilleri, silikon yarıiletkenlerden meydana gelmektedir. Tipik güneş pili temel olarak p-n ekleminden oluşmaktadır. Güneş pillerinin birbirine bağlanması ile FV modüller meydana gelir. FV modüllerin kendi aralarındaki bağlantıları sayesinde FV diziler ortaya çıkar. Elektrik enerjisi üretiminde FV sistemler önemli bir yere sahiptir [5]. FV sistemler herhangi bir kirlilik veya bozulma olmadığı süre boyunca doğrudan elektrik akımı üretebilmektedir. FV modüller güneş ışığı altında belirli bir akım üretirler. Oluşan akım değeri güneşin radyasyon değerine ve güneş pillerinin sıcaklığına bağlıdır. Sürekli değişebilen parametrelerden dolayı FV sistemler lineer olmayan yapıya sahiptir. Lineer olmayan karakteristiklerinden dolayı FV sistemler bir diyot karakteristiğine benzemektedir[16]. FV sistemlerin modellenmesinde tahmin edilen karakteristik eğrilerinin doğruluğu önem arz etmektedir. Bunun yanında kolaylık ve hız da ön plana çıkan diğer parametrelerdir[3]. FV kullanımının hızla artmasından dolayı günlük hayatta birçok alanda FV sistemler karşımıza çıkmaktadır. FV modüllerin eşdeğer devre modelleri ile analizlerinin yapılması kullanılan güneş pillerinin verimlilikleri ve doğrulukları bakımından bilgi vermektedir. FV modüllerin modellenmesi için tek diyot ve çift diyot eşdeğer devre yapıları olan modeller mevcuttur. Güneş pilleri üzerine literatürde çeşitli çalışmalar mevcuttur. Çalışmaların birçoğunda Matlab/Simulink kullanılarak modellemeler yapılmaktadır[9]. Bu çalışmada Bolu Abant İzzet Baysal Üniversitesi Nükleer Radyasyon Dedektörleri Uygulama ve Araştırma Merkezinde(NÜRDAM) geliştirilen FV modüllerin Matlab/Simulink ile modellenmesi sonucu ortaya çıkan karakteristik eğrileri incelenmiştir. FV modüllerin datasheet'lerin de verilen parametreler Simulink' te oluşturulan simülasyona uygulanmıştır. Geliştirilen FV modüllerden alınan ölçümler ile elde edilen parametreler de Simulink' te oluşturulan modele uygulanmıştır. Bu sayede hem datasheet' e göre ortaya çıkan karakteristik grafikleri hem de alınan ölçümlerden elde edilen verilerin grafikleri birlikte incelenmiştir. Her iki veri de tek diyot ve çift diyot eşdeğer devre modellerine ayrı ayrı uygulanıp karakteristik grafikleri oluşturulmuştur.

## 2. Güneş Pili Modeli

Güneş Pilleri p-n eklemine sahip yarıiletken tabakadan üretilmektedir. Güneş pillerine ışık uygulandığında foton enerjisi band aralığından daha büyük ise, güneş radyasyonu ile orantılı olarak bir akım ortaya çıkar[1][10]. Bir Güneş Pili modeli; akım kaynağı, paralel diyot, seri ve paralel dirençler ile gösterilmektedir. Yüzey dirençlerinden oluşan kayıplar güneş pili modelinde seri bir direnç ( $R_s$ ) ile ifade edilmektedir. Diyot, akım kaynağına göre ters yönde olduğu için toprağa giden sızıntı akımları ise paralel direnç ( $R_p$ ) ile ifade edilmektedir[2][13]. Her iki direnç Şekil 1'de ki eşdeğer devrede gösterilmiştir.

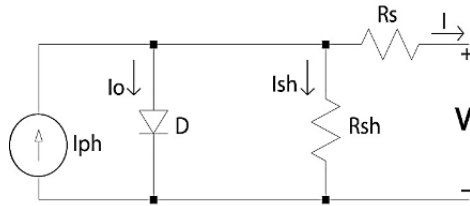
### 3. Tek Diyot Eşdeğer Devresinin Matematiksel Modeli

Şekil 1’ de gösterilen devreye Kirchoff akımlar kanunu uygulandığında denklem (1) elde edilmektedir[8]:

$$I = I_{ph} - I_D - I_{sh} \quad (1)$$

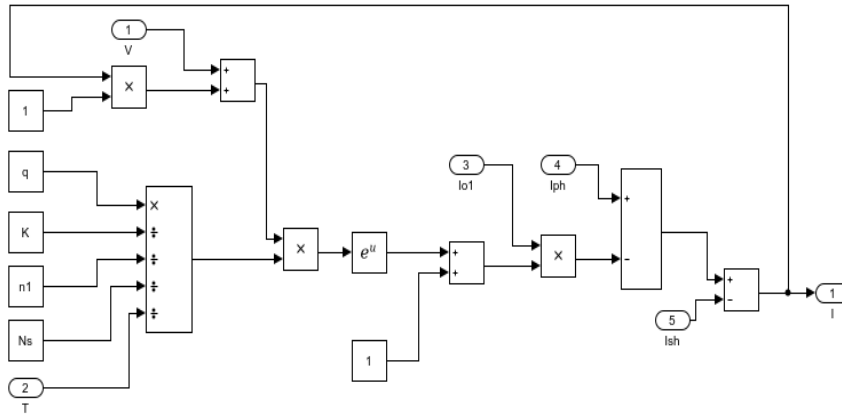
Eşdeğer devreye göre FV modülün çıkış akımı denklem 2’ de verilmiştir:

$$I = I_{ph} - I_o * \left[ e^{\left\{ (V + I * R_s) * \frac{q}{n * K * T * N_s} \right\} - 1} \right] - I_{sh} \quad (2)$$



Şekil 1. FV Modül Tek Diyot Eşdeğer Devre Modeli

Çalışmada matematiksel denklemlere ait modeller Matlab/Simulink ile geliştirilmiştir. Matlab platformunun mevcut simülasyon yazılımı olan Simulink birçok mühendislik alanında kullanılabilir kütüphanesi ile araştırmacılara avantaj sağlamaktadır[3]. Simulink ile oluşturulan FV modülün çıkış akımına ait matematiksel eşitliğin modeli Şekil 2’ de gösterilmiştir. Bu modelde  $I_{ph}$ ,  $I_o$ ,  $I_{sh}$ ,  $V$  ve  $T$  değerleri giriş değişkenleri olarak belirlenmiş olup  $q$ ,  $K$ ,  $n$ ,  $N_s$  parametreleri ise Simulink kütüphanesinde yer alan sabit sayı girilmesi için kullanılan constant bloğu ile tanımlanmıştır. Denklem (5) ile matematiksel eşitliği yazılan paralel dirençten dolayı oluşan sızıntı akımı ( $I_{sh}$ ) modellenerek Şekil 3’ te verilmiştir[14].

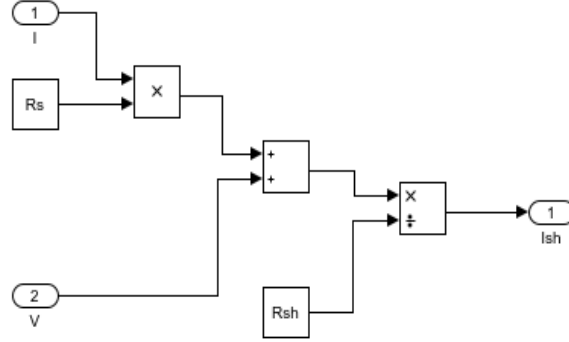


Şekil 2. Tek Diyot FV Modül Çıkış Akımının Simulink Modeli

Burada:

$I_{ph}$	Işık akımı	$T$	Güneş pilinin çalışma sıcaklığı (K)
$I_{sh}$	Paralel direnç akımı	$n$	Diyot idealite faktörü
$I_0$	Diyot doyma akımı (A)	$R_s$	Seri direnç
$q$	Elektron yükü ( $1.602 \times 10^{-19}$ C)	$R_{sh}$	Paralel direnç
$V$	Diyot gerilimi (V)	$N_s$	Seri bağlı güneş pili sayısı
$K$	Boltzmann sabiti ( $1.381 \times 10^{-23}$ J/K)		

$$I_{sh} = \frac{(V+I \cdot R_s)}{R_{sh}} \quad (5)$$

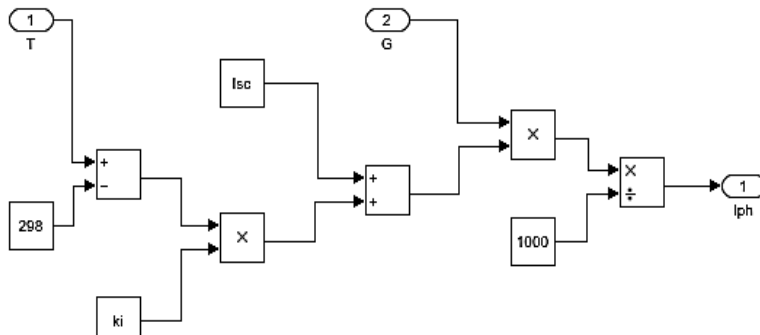


Şekil 3. Paralel Direnç Akımının Simulink Modeli

Güneş pili ışık akımı ( $I_{ph}$ ) denklem (3) 'te gösterilmiştir. Burada  $I_{sc}$  kısa devre akımını,  $K_i$  güneş pilinin kısa devre akımı sıcaklık sabitini ( $0.02$  A/K),  $G$  ise güneş radyasyon değeri,  $T$  ise çalışma sıcaklığı olarak tanımlanmaktadır[11].  $I_{ph}$  akımının, denklemi ve Simulink modeli hem tek diyot hem de çift diyot modelinde kullanılmıştır.

$$I_{ph} = [I_{sc} + \{K_i * (T - 298)\}] * (G/1000) \quad (3)$$

Güneş pili ışık akımı, güneşin radyasyon değerine ve güneş pilinin çalışma sıcaklığına bağlıdır[2,4]. Bu akıma ilişkin Simulink modeli Şekil 4'de gösterilmiştir. Burada nominal sıcaklık değeri  $298$  K olarak tanımlanmıştır.  $I_{sc}$ ,  $T$  ve  $G$  parametreleri yapılan ölçümlere göre değişmektedir.



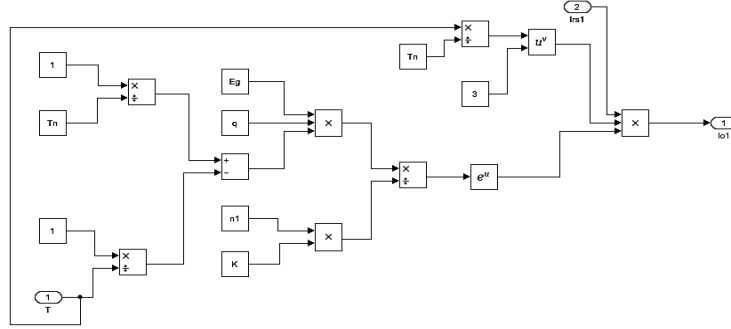
Şekil 4. Güneş Pili Işık Akımının Simulink Modeli

Diyot doyma akımı denklem (4) ile tanımlanmaktadır. Burada  $I_{rs}$  diyot ters doyma akımı,  $E_g$  güneş pilinin yapımında kullanılan yarıiletkenin bant aralığı enerjisi ( $1.1$  eV),  $T_n$  güneş pilinin

referans sıcaklığını,  $V_{oc}$  açık devre voltajını belirtmektedir. Diyot doyma akımı, sıcaklığa ve Ters Doyma Akımından dolayı kısa devre akımına bağlı olarak değişen bir parametredir[4,12,15].

$$I_o = I_{rs} * \left(\frac{T}{T_n}\right)^3 * e^{\left[\left(q * E_g * \left(\frac{1}{T_n} - \frac{1}{T}\right)\right) / (n * K)\right]} \quad (4)$$

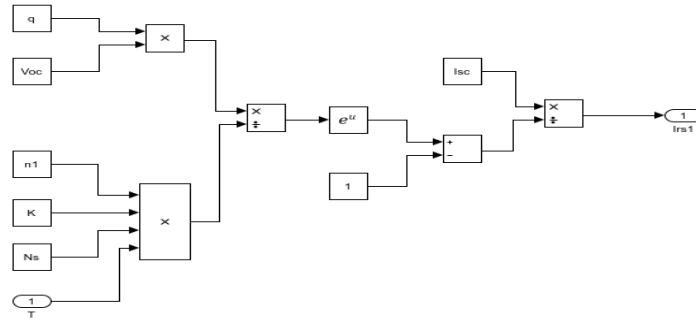
Simulink modelinde T değeri giriş değişkeni olarak tanımlanmıştır.  $E_g$ , q, n, K parametreleri Simulink kütüphanesindeki *constant* bloğu ile ifade edilmektedir.  $T_n$  değeri ise kelvin cinsinden ifade edilmiş olup 298 K değerine sahiptir.



Şekil 5. Diyot Doyma Akımının Simulink Modeli

Ters doyma akımı ( $I_{rs}$ ), kısa devre akımına ve açık devre voltajına bağlıdır.  $I_{rs}$  akımı denklem (6) ile ifade edilmiştir ve bu denkleme ilişkin Simulink modeli Şekil 6' da tanımlanmıştır.

$$I_{rs} = I_{sc} / \left[ e^{\left( \frac{q * V_{oc}}{n * N_s * K * T} \right)} - 1 \right] \quad (6)$$



Şekil 6. Diyot Ters Doyma Akımının Simulink Modeli

#### 4. Tek Diyot Modeli İçin I-V ve P-V Grafikleri

FV modüllerin üretiminde kullanılan güneş pilinin datasheet' inde yer alan ve standart test koşullarında (STC) ölçümleri yapılan değerlerin karakteristik ölçümleri MATLAB/Simulink ile oluşturulan tek diyot modeline uygulanmıştır. Kullanılan *Motech XS156B4* isimli güneş pillerinin teknik özellikleri Tablo 1' de gösterilmiştir:

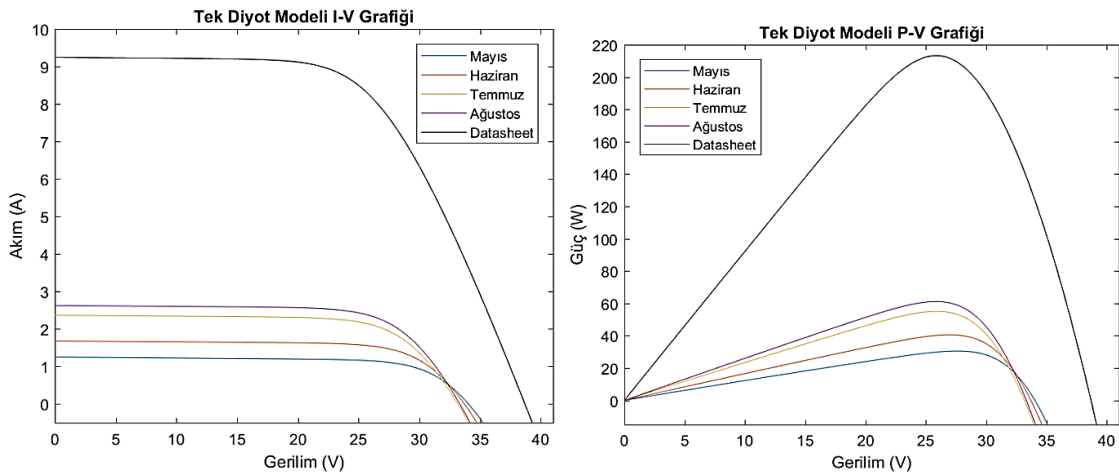
**Tablo 1.** Motech Güneş Pilinin Özellikleri

Model	Pil Tipi	Verimlilik	Güç	Açık Devre Voltajı ( $V_{oc}$ )	Kısa Devre Akımı ( $I_{sc}$ )	Güneş Radyasyon Değeri (STC)	Pil Sıcaklığı (STC)
Motech XS156B4	Monokristal Silikon 156.75mm x 156.75mm $\pm$ 0.25mm	% 19.80	4.84 W	0.645 V	9.25 A	1000 W/m <sup>2</sup>	25 °C

Bu güneş pillerinin 60 adetinin seri bağlanması ile oluşturulan FV modülün Mayıs, Haziran, Temmuz, Ağustos aylarında 08:00 ile 18:00 saatleri arasında günlük olarak ölçümleri alınmış olup alınan ölçümler akım, gerilim ve sıcaklık değerleri olarak kaydedilmiştir. Ayrıca güneş günlük radyasyon ışınması değeri de GEPA' dan alınıp işlenmiştir. Toplanan verilerin aylık ortalaması alınarak Simulink' te oluşturulan modelde yerlerine yazılmıştır. Alınan ölçümlerin ortalamaları Tablo 2' de verilmiştir. Hem datasheet' te verilen verilere göre hem de gerçek ölçümlerden alınmış olan verilerin Gerilim-Akım ve Gerilim-Güç grafikleri Şekil 7' de gösterilmektedir. Şekil 7' de görüldüğü gibi ağustos ayındaki voltaj değeri en düşük değere sahiptir. Bunun nedeni güneş pillerinin sıcaklıklarındaki artış FV modülün çıkış voltajının değerini düşürmektedir[11]. Ayrıca güneş radyasyon ışınması değerindeki artış ve sıcaklığın artmasından dolayı kısa devre akımının artmasına sebep olmuştur. Şekil 7' de de ifade edildiği gibi en yüksek akım ağustos ayında ortaya çıkmıştır[5].

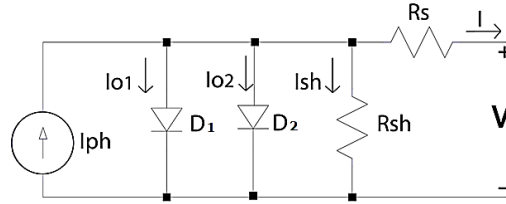
**Tablo 2.** FV Modül Karakteristik Ölçüm Sonuçları Ortalaması

Ay	Kısa Devre Akımı (A)	Açık Devre Gerilimi (V)	T (°C)	G (W/m <sup>2</sup> )
Mayıs	3.49	34.62	18.54	372.03
Haziran	4.07	34.45	20.48	423.06
Temmuz	5.25	34.73	24.63	451.5
Ağustos	5.7	34.98	25.2	460.9

**Şekil 7.** Tek Diyot Modeli Akım-Gerilim ve Güç-Gerilim Grafikleri

## 5. Çift Diyot Eşdeğer Devresinin Matematiksel Modeli

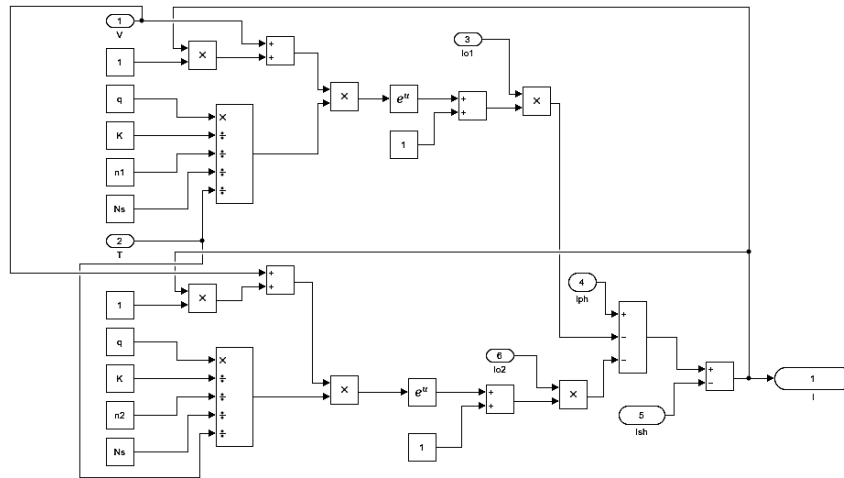
FV modülün bir başka modeli de çift diyot modelidir. Çift diyot modelinin, tek diyot modeline göre doğruluğu daha fazladır[3, 6]. Buna rağmen çift diyot modelinin karmaşıklığı ve bilinmeyen parametre sayısı tek diyot modeline göre daha fazladır[6, 7]. Çift diyot modeline ait eşdeğer devre modeli Şekil 8’ de verilmiştir. Eşdeğer devre modeline göre oluşturulmuş FV modülün çıkış akımı Denklem (8)’ de verilmiş olup Şekil 9’ da ki model ifade edilmektedir. Burada  $I_{o1}$  ve  $I_{o2}$  akımları, eşdeğer devre modelindeki  $D_1$  ve  $D_2$  diyotlarının doyma akımlarıdır.  $I_{o1}$  akımına ait denklem Denklem (9)’ da,  $I_{o2}$  akımına ait denklem ise Denklem (11) ile tanımlanmaktadır.  $I_{ph}$  güneş pili ışık akımı olup önceki bölümde Denklem (3)’te ifade edilmişti ve Şekil 4’ te modeli gösterilmektedir.  $I_{sh}$  paralel dirençten dolayı oluşan sızıntı akımı olup Denklem (5) ile tanımlanıp Şekil 3 ile modellenmektedir. Denklem (8)’ de ki  $I_{ph}$  ve  $I_{sh}$  akımları hem tek diyot hem de çift diyot modellerinde aynı denklemler ve modeller ile tanımlanmaktadır.



Şekil 8. Güneş Pili Çift Diyot Eşdeğer Devre Modeli

$$I = I_{ph} - I_{o1} * \left[ e^{\left\{ \frac{(V+I*R_s)*q}{n_1*K*T*N_s} \right\} - 1} \right] - I_{o2} * \left[ e^{\left\{ \frac{(V+I*R_s)*q}{n_2*K*T*N_s} \right\} - 1} \right] - I_{sh} \quad (8)$$

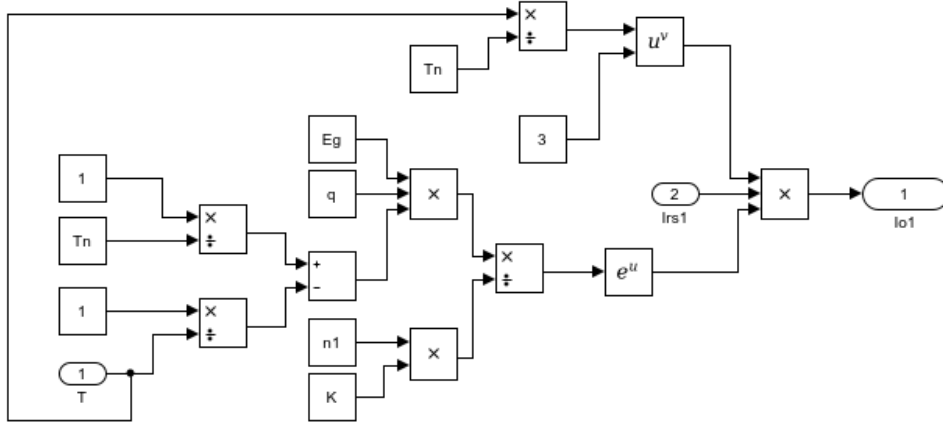
Çift diyot modelinde bilinmeyen parametre sayısının fazlalığından dolayı çıkış akımına ait olan ve Simulink ile oluşturulan Şekil 9’ da ki modelde  $q$ ,  $K$ ,  $n_1$ ,  $n_2$ ,  $N_s$ ,  $R_s$ ,  $R_{sh}$ ,  $T$  parametrelerinin tanımlanması gerekmektedir. Tek diyot modelinde olduğu gibi burada da bu parametreler Simulink kütüphanesinde bulunan *constant* bloğu kullanılarak modellenmiştir.  $I_{o1}$ ,  $I_{o2}$ ,  $I_{ph}$ ,  $I_{sh}$  akımları ise Simulink kütüphanesindeki *input* bloğu ile tanımlanıp alt sisteme bağlanmıştır. Burada;  $n_2$ , ikinci diyota ait diyot idealite faktörüdür.



Şekil 9. Çift Diyot FV Modül Çıkış Akımının Simulink Modeli

Çift diyot eşdeğer devre modeli iki adet diyot doyma akımından oluşmaktadır.  $I_{o1}$  ve  $I_{o2}$  akımlarına ait denklemler sırasıyla Denklem (9) ve Denklem (11) de verilmiş olup Simulink modelleri Şekil 10 ve Şekil 12’ de gösterilmiştir. Diyot doyma akımları sıcaklık ile değiştiğinden dolayı Tablo 2’ de verilen aylık sıcaklık ortalamalarından oluşan değişimler bu akımın değişmesine yol açmaktadır.

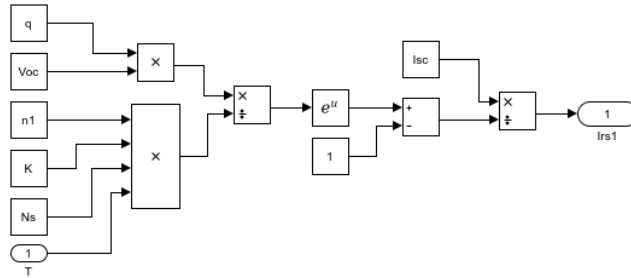
$$I_{o1} = I_{rs1} * \left(\frac{T}{T_n}\right)^3 * e^{\left[\left(q * E_g * \left(\frac{1}{T_n} - \frac{1}{T}\right)\right) / (n_1 * K)\right]} \quad (9)$$



Şekil 10. D1 Diyotu Doyma Akımının Simulink Modeli

$I_{sc}$  ve  $V_{oc}$  parametrelerinin sonucunu etkilediği akım olan  $D_1$  ve  $D_2$  diyotlarının ters doyma akımları sırasıyla Denklem (10) ve Denklem (12) de verilmiş olup Şekil 11 ve Şekil 13 de ki Simulink modelleriyle simülasyonları yapılmaktadır.

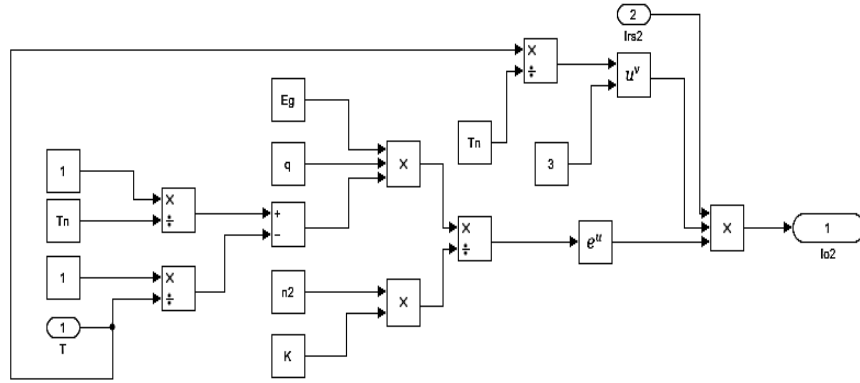
$$I_{rs1} = I_{sc} / [e^{(q * V_{oc} / (n_1 * N_s * K * T))} - 1] \quad (10)$$



Şekil 11. D1 Diyotu Ters Doyma Akımının Simulink Modeli

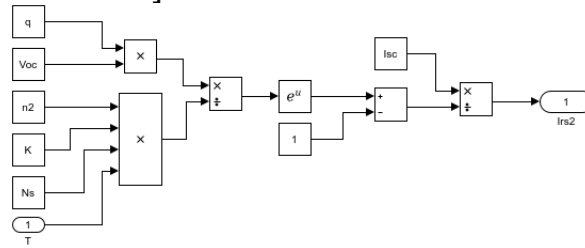
$$I_{o2} = I_{rs2} * \left(\frac{T}{T_n}\right)^3 * e^{\left[\left(q * E_g * \left(\frac{1}{T_n} - \frac{1}{T}\right)\right) / (n_2 * K)\right]} \quad (11)$$



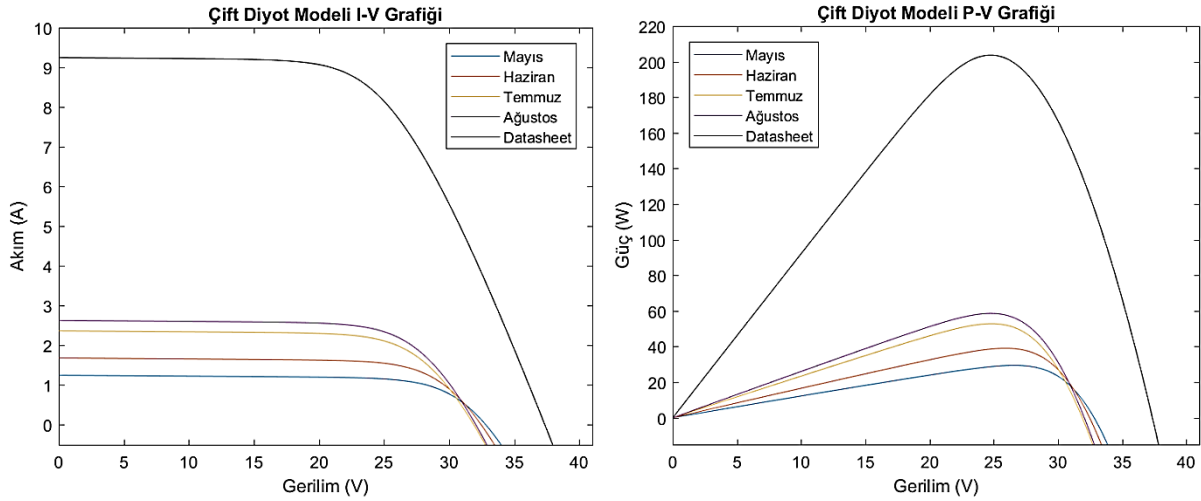


Şekil 12. D2 Diyotu Doyma Akımının Simulink Modeli

$$I_{rs2} = I_{sc} / [e^{(q \cdot V_{oc} / (n_2 \cdot N_s \cdot K \cdot T))} - 1] \quad (12)$$



Şekil 13. D2 Diyotu Ters Doyma Akımının Simulink Modeli



Şekil 14. Çift Diyot Modeli Akım-Gerilim ve Güç-Gerilim Grafikler

## 6. Sonuç

FV modüller güneş ışımının ve sıcaklık değerinin değişmesine bağlı olarak farklı çıkış akımı ve gerilim değerleri vermektedir. Hem tek diyot modelinden hem de çift diyot modelinden elde edilen grafiklerde de görüldüğü gibi güneş radyasyon ışınması miktarındaki değişiklik FV

modülün çıkış akımının artmasına neden olmuştur. Çıkış gerilimindeki değişimlerde ise sıcaklık değeri etki etmektedir. Akım – Gerilim ve Güç – Gerilim grafiklerinde gerilim eksenindeki değişim bundan kaynaklanmaktadır.

Şekil 14’ de ki grafiklerden de görüleceği gibi çift diyot modeline ait grafiğin eğimi Şekil 7’ de ki tek diyot modelinde ortaya çıkan grafik eğimlerine kıyasla biraz daha dik şekilde olduğu için bu fark çift diyot modelinin tek diyot modeline göre doğruluk bakımından daha iyi sonuç verdiğini göstermektedir[2].

### **Bilgilendirme:**

Bu çalışma, 2016K121110 sözleşme numaralı proje kapsamında Türkiye Cumhuriyeti Cumhurbaşkanlığı Strateji ve Bütçe Dairesi Başkanlığı’nca ve BAP: 2017.03.02.1244, BAP: 2017.03.02.1239 sözleşme numaralı projeler kapsamında Bolu Abant İzzet Baysal Üniversitesi tarafından desteklenmiştir.

### **7. Kaynaklar**

- [1] Rodrigues, E.M.G., et al., Simulation of a solar cell considering single-diode equivalent circuit mode. *Renewable Energy and Power Quality Journal*, 2011: p. 369-373.
- [2] Tamrakar, V., G. S.C, and Y. Sawle, Single-Diode and Two-Diode Pv Cell Modeling Using Matlab For Studying Characteristics Of Solar Cell Under Varying Conditions. *Electrical & Computer Engineering: An International Journal*, 2015. **4**(2): p. 67-77.
- [3] Ishaque, K., Z. Salam, and H. Taheri, Accurate MATLAB Simulink PV System Simulator Based on a Two-Diode Model. *Journal of Power Electronics*, 2011. **11**(2): p. 179-187.
- [4] Tsai, H.-L., Insolation-oriented model of photovoltaic module using Matlab/Simulink. *Solar Energy*, 2010. **84**(7): p. 1318-1326.
- [5] Pandiarajan, N. and R. Muthu, Mathematical modeling of photovoltaic module with Simulink. 2011: p. 258-263.
- [6] Alrahim Shannan, N.M.A., N.Z. Yahaya, and B. Singh, Single-diode model and two-diode model of PV modules: A comparison. 2013: p. 210-214.
- [7] Waliullah, M., M.Z. Hossain, and S. Saha, On the Implementation of Two-Diode Model for Photovoltaic Thermal Systems. *Procedia Engineering*, 2015. **105**: p. 725-732.
- [8] Zaidi, B., Saouane, I. and Shekhar, C., Simulation of Single-Diode Equivalent Model of Polycrystalline Silicon Solar Cells. *International Journal of Materials Science and Applications*, 2018. 7(1-1): p. 8-10.
- [9] BAYRAK, G. ve CEBEÇİ, M., 3.6 kW gücündeki fotovoltaik generatörün matlab simulink ile modellenmesi. *Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 2012. 28(3): p. 198-204.
- [10] Bonkougou, D., Koalaga, Z. and Njomo, D., Modelling and Simulation of photovoltaic module considering single-diode equivalent circuit model in MATLAB. *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*, 2013. 3(3): p. 493-502.

- [11] Salmi, T., Bouzguenda, M., Gastli, A., Masmoudi, A., MATLAB/Simulink Based Modelling of Solar Photovoltaic Cell. International Journal of Renewable Energy Research, 2012. 2(2): p. 213-218.
- [12] Nema, S., Nema, R.K., Agnihotri, G., Matlab / simulink based study of photovoltaic cells / modules / array and their experimental verification. International Journal Of Energy And Environment, 2010. 1(3): p. 487-500.
- [13] Toprak, A., Kılıç, H.Ş., Toprak, A. ve Kepceoğlu, A., Güneş Pili nin Tek Diyot Rs Model Parametrelerinin Hesaplanması ve I-V ile P-V Karakteristiklerinin İncelenmesi. Selçuk Üniversitesi Sosyal ve Teknik Araştırmalar Dergisi, 2016. 12: p.13-22.
- [14] Barbato, M., et al., Effect of shunt resistance on the performance of mc-Silicon solar cells: a combined electro-optical and thermal investigation. IEEE, 2011. X: p. 1241-1245.
- [15] YAVUZ, A., BAŞOL, M., Güneş Pili Modelleri Eğitim Seti, İleri Teknoloji Bilimleri Dergisi, 2, 14-21, 2013.
- [16] Awodugba, A. O., Sanusi, Y. K., and Ajayi, J. O., Photovoltaic solar cell simulation of shockley diode parameters in matlab, International Journal of Physical Sciences, 2013. 8(22): p. 1193-1200.
- [17] Soga, T. (2008). Nanostructured Materials For Solar Energy Conversion. B. Kılıç (Çev.). Ankara: Nobel Akademik Yayıncılık Eğitim Danışmanlık Tic. Ltd. Şti. (İlk baskı. 2013).