

Çok Kristalli Silisyum (mc-Si) Bir Fotovoltaik Modülün Kısmi Gölgeleme Altında Parametrelerinin İncelenmesi

Gencer Sarıoğlu^{1,2, *}, Rüştü Eke^{1,2}

¹Muğla Sıtkı Koçman Üniversitesi, Temiz Enerji Kaynakları Araştırma-Geliştirme Merkezi, 48120, Muğla, Türkiye

²Muğla Sıtkı Koçman Üniversitesi, Fen Fakültesi, Fizik Bölümü, Fotovoltaik Malzeme ve Aygıt Laboratuvarı, 48120, Muğla, Türkiye

Yazışılan yazar e-posta: gencer.sarioglu@gmail.com

Alınış: 26 Temmuz 2012, Kabul: 22 Ekim 2012

Özet: Bu çalışmada, ticari bir ürün olan 72 adet seri bağlı güneş gözesinden oluşan 95W_p gücünde çok kristalli silisyum (mc-Si) bir fotovoltaik (PV) modülün baypas diyot kullanıldığı ve kullanılmadığı durumda gölgeleme etkisi altındaki güç değişimi akım gerilim eğrilerinden yola çıkılarak incelenmiştir. Verim, dolun çarpanı, maksimum güç gibi bazı modül parametreleri her iki durum için de hesaplanmıştır. Modül üzerinde %2,7'lik bir gölgeleme ile baypas diyot yokken %77,88 olarak hesaplanan güç kaybının baypas diyot kullanıldığında %45,35 değerine kadar düştüğü gözlenmiştir.

Anahtar kelimeler: Kısmi gölgeleme, Baypas diyot, PV Modül, uyumsuzluk etkisi.

Parameter Analysis of A Multi Crystalline Silicon (mc-Si) Photovoltaic Module Under Partially Shaded Insolation

Abstract: The purpose of this work is the study of a commercially available multi-crystalline silicon photovoltaic module's power decrease under varying shading with and without bypass diode. Some module parameters; efficiency, fill factor and power difference are analysed using the current voltage curves for both conditions. It is shown that the power loss decreased from 77.88% to 45.35% plugging bypass diode to the module under 2.7% shading of the module area.

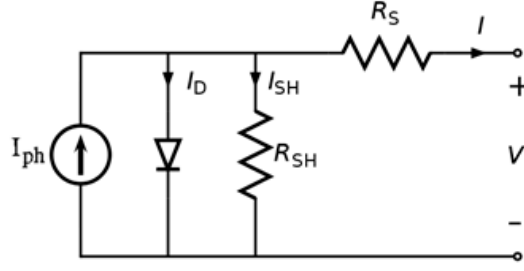
Key words: Partial shading, Bypass diode, PV Module, mismatch effect.

1. Giriş

Fotovoltaik (PV) sistemi oluşturan en temel ve en küçük yapı güneş gözeleridir. Bir güneş gözesi veya modülün akım-gerilim karakteristiği için seçilen tek diyot modeli eşdeğer devresi Şekil 1'de gösterilmektedir. Tek diyot modelinde akım ifadesi,

$$I = I_{ph} - I_D - I_{sh} = I_{ph} - I_0 \left\{ \exp \left[\frac{V + I.R_s}{a} \right] - 1 \right\} - \left(\frac{V + I.R_s}{R_{sh}} \right) \quad (1)$$

şeklinde ifade edilebilmektedir.



Şekil 1. Güneş gözesinin tek diyot modelini gösteren eşdeğer devre.

Burada I (A) elektrik akımının, I_0 (A) karanlık doyma akımının, I_{ph} (A) ışıkla üreyen akımın, V (V) gerilimin, R_s (Ω) seri direncin, R_{SH} (Ω) paralel direncin değerini ve $a = N_s n k_B T_c / q$ olmak üzere düzeltilmiş idealite faktörünün değerini ifade etmektedir. Burada, N_s , modül içerisindeki seri bağlı güneş gözesi sayısını, n gözenin idealite faktörünü, k_B Boltzmann sabitini, T_c (K) göze veya modül çalışma sıcaklığını, q , elektron yükünü göstermektedir [1].

Güneş gözesinin dört önemli parametresi vardır ve bunlardan birincisi kısa devre akımı, I_{sc} (*short circuit current*); devrenin uçları arasındaki potansiyel farkı sıfır ($V = 0$) olduğunda devreden elde edilen akım değeridir. İdeal bir diyotta kısa devre akımı göze üzerine ışık düştüğünde oluşan akım değerine eşittir ($I_{sc} = I_{ph}$). İkinci önemli parametre devreden akım geçmediği düşünülerek (akım denkleminde $I = 0$ alındığında) devrenin uçları arasında elde edilecek voltaj değeri açık devre voltajı, V_{oc} (*open circuit voltage*) dır.

Güneş gözesinin üçüncü ve dördüncü önemli parametreleri dolun faktörü, FF , (*fill factor*) ve verimlilik, η , (*efficiency*) değerleridir. Dolun faktörü;

$$FF = \frac{V_{mx} I_{max}}{V_{oc} I_{sc}} \quad (2)$$

oranı ile tanımlanır. Verimlilik, maksimum güç değerinin göze üzerine gelen ışının gücüne (P_{in}) oranı olarak tanımlanır [2].

$$\eta = \frac{V_{max} I_{max}}{P_{in}} \quad (3)$$

Standart test koşulları altında bir kristal silisyum güneş gözesinin açık devre gerilimi 0,5-0,6V ve kısa devre akımı 2-2,5A değerindedir. Bu açık devre gerilimi ve kısa devre akımına sahip bir gözenin maksimum çıkış gücü 1-1,5W arasında değişmektedir. Bu akım ve gerilim değerlerine sahip bir göze ile 12V veya 24V gerilime sahip bir aküye depolama işlemi yapılamaz. Bir güneş gözesinden elde edilebilecek akım ve gerilim değerleri ancak küçük bir elektronik cihazı çalıştırmaya yetecek büyüklüktedir. Bu nedenle güneş gözeleri çıkış gerilimini artırmak için birbirine seri bağlanırlar. Aynı şekilde elde edilecek çıkış akımını artırmak için de birbirine paralel bağlanırlar [3].

PV modüller en genel olarak 36 gözenin seri bağlanması ile elde edilir. Seri bağlı 36 gözenin açık devre gerilimi 18-21V ve kısa devre akımı gözeler seri bağlandığı için 2-2,5A değerindedir. Açık devre gerilimi 18V olan bir modülün maksimum çıkış gerilimi açık devre geriliminin yaklaşık %80'ne eşittir. Bu durumda maksimum çıkış gerilimi 14V civarındadır ve bu gerilim 12V değerindeki bir aküyü şarj etmek için yeterlidir [4, 5].

Ancak PV modülü oluşturan gözeler her zaman aynı koşullarda çalışmayabilir. PV modül üzerine herhangi bir nedenle kısmi gölge uygulandığında gölgeli göze diğer gözeler tarafından ters beslenir ve gölgeli gözeler yük gibi davranır [6,7].

Gözeler arasındaki bu uyumsuzluk sebebiyle küçük gölgelenmeler modülün çıkış gücünün ve verimliliğinin büyük oranda azalmasına neden olabilir. Ayrıca gölgelenme etkisi fiziksel olarak sisteme zarar verebilir. Gölgelenme etkisinden dolayı 1 göze üzerinde diğer gözeler tarafından büyük miktarda güç harcanması söz konusu olabilir. Bu durum ise göze üzerinde oldukça sıcak noktaların oluşmasına ve gözenin fiziksel olarak zarar görmesine neden olabilir. Gözelerin normal şartlar altında çalışma sıcaklığı 65°C'dir. Bu sıcaklık gölgelenme sebebiyle 85°C'lere ulaşabilir ve gözenin sıcaklığının 85°C'nin üzerine çıkması gözelerin birbirleri arasındaki lehimlerin ve modülün paket yapısının bozulmasına neden olabilir [8, 9].

Bu etkilerden korunmak ve verimliliği arttırmak için seri bağlı gözeler paralel olarak bağlanmış olan baypas diyotlar kullanılır. Baypas diyotlarının her gözenin karşısına yerleştirmek pratik bir yaklaşım değildir ayrıca maliyet yönünden uygun değildir. Bu nedenle baypas diyotları, bir modül içerisindeki bir grup gözeye ortak olarak veya her bir modül için ayrı bir diyot ile birlikte kullanılabilir [10, 11].

Bu çalışmada ticari bir ürün olan 72 adet seri bağlı güneş gözesinden oluşan 95W_p gücünde mc-Si bir PV modülün baypas diyot bulunduğu ve bulunmadığı durumda gölgelenme etkisi altındaki güç değişimi akım gerilim eğrilerinden yola çıkılarak incelenmiştir. Verim, dolun çarpanı, maksimum güç gibi bazı modül parametreleri her iki durum için de hesaplanmıştır.

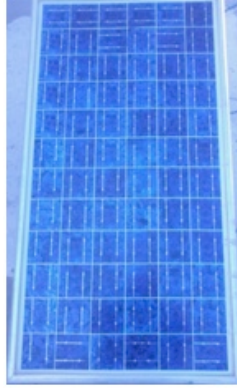
2. Materyal ve Metot

Bu çalışmada çok kristal silisyum yapıya sahip fotovoltaik modül kullanılmıştır. Standart test koşulları altında maksimum gücü 95 W_p olan çok kristalli silisyum fotovoltaik modül 72 adet seri bağlı gözeden oluşmaktadır. Modülde her 24 gözeye paralel olarak bağlı 3 tane baypas diyot kullanılmıştır. Modülün üretici firma tarafından verilen özellikleri Tablo 1'de verilmektedir [12].

Tablo 1. Çalışmada kullanılan fotovoltaik modülün özellikleri.

Güç, P (W _p)	Açık devre gerilimi, V _{oc} (V)	Kısa devre akımı, I _{sc} (A)	Verimlilik (%)	Dolun çarpanı (FF)
95	43	3,1	10,5	0,742

Test edilmiş olan modül Şekil 2’de gösterilmektedir. Çalışmada bu modülün seçilmesinin en önemli sebebi modülde kullanmış olduğumuz baypas diyotların modüle bağlantısının kısa sürede gerçekleştirilebilir olmasıdır. Birçok ticari modülde baypas diyotlar lehimlenmiştir. Bu modül üzerinde ölçüm sırasında baypas diyotların kısa sürede çıkarılması sayesinde aynı ışık şiddeti ve sıcaklık koşulları altında baypas diyotun modülün fiziksel parametreleri üzerine etkisi kolaylıkla ölçülmüştür.

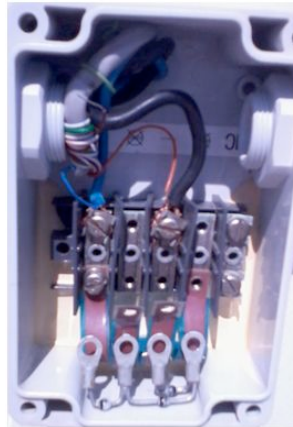


Şekil 2. Çok kristalli silisyum PV modül.

Baypas diyotların üretici firma tarafından verilen elektriksel özellikleri Tablo 2’de verilmektedir. Bu diyotların seçilmesinde en önemli sebep ters besleme gerilimine dayanıklı olmasıdır. Baypas diyotların modül üzerinde bağlantısı Şekil 3’de gösterilmektedir.

Tablo 2. Baypas diyotun özellikleri.

Geri besleme gerilimi (V_R)	İleri besleme akımı (I_F)	Eşik gerilimi (V_F)	Geri besleme akımı (I_R)
-100 V	3,5A	0,8V	5 μ A



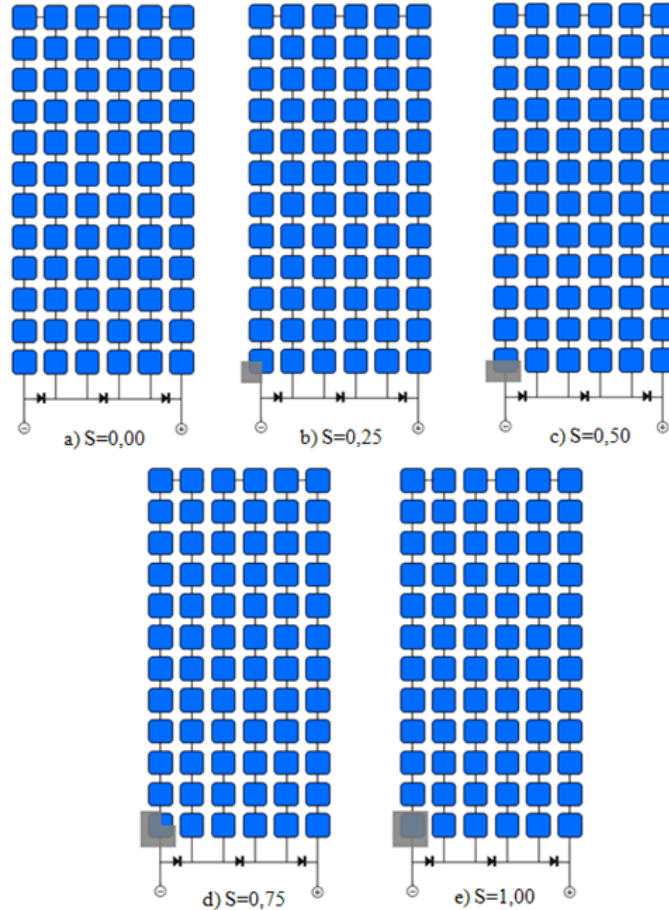
Şekil 3. Bağlantı kutusu ve baypas diyotlar.

PV modülün akım gerilim ölçümleri Muğla Sıtkı Koçman Üniversitesi Temiz Enerji Kaynakları Araştırma Geliştirme Merkezi (MUTEK Ar&Ge) bünyesinde bulunan çok kanallı ölçüm sistemi kullanılarak alınmıştır.

3. Bulgular

Fotovoltaik modül üzerine farklı büyüklükte gölgelenme uygulanarak baypas diyot bulunduğu ve bulunmadığı durumlarda modülün fiziksel parametrelerinin değişimi incelenmiştir. Her bir gölgelenme etkisinin alındığı ışınım şiddeti incelendiğinde 1007W/m^2 ile 1016W/m^2 arasında değişmektedir. Ölçümler 04/08/2011 tarihinde alınmış ve ölçüm sırasında modülün sıcaklığı $55,8^\circ\text{C}$, dış ortam sıcaklığı $34,3^\circ\text{C}$ değerindedir.

S ifadesi bir göze üzerinde gözenin gölgelenme oranını göstermektedir. $S=0$ gölgesiz durumu, $S=0,25$ gözenin %25 gölgeli olduğu, $S=0,50$ gözenin %50 gölgeli olduğu, $S=0,75$ gözenin %75 gölgeli olduğunu, $S=1$ gözenin tamamının gölgeli olduğunu göstermektedir (Şekil 4). Şekil 4'deki gölgelenme etkileri modül üzerinde baypas diyot bulunduğu ve bulunmadığı durumlar için ölçüm alınmıştır.

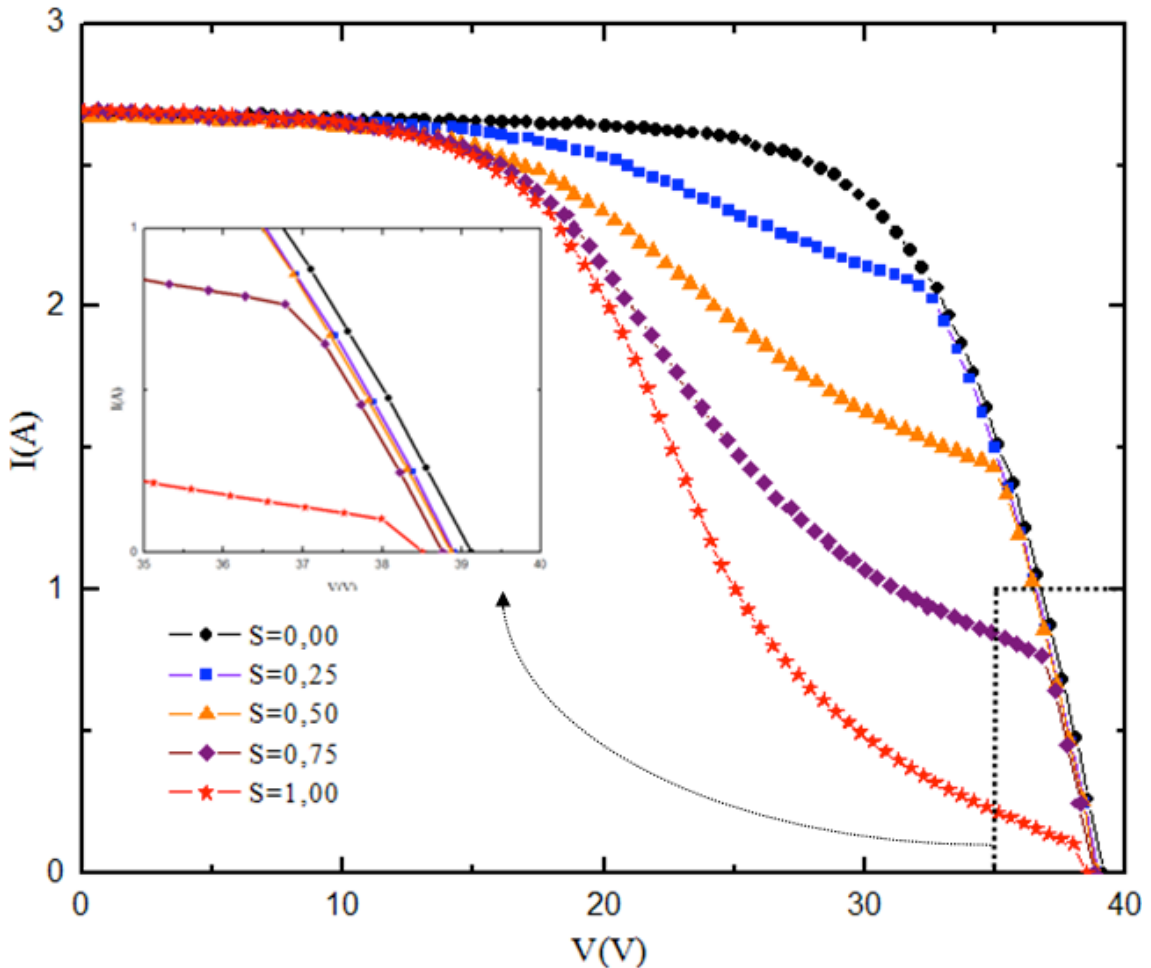


Şekil 4. Baypas diyot bulunduğu durumda farklı gölgelenme oranları, a) $S=0,00$ (gölgesiz) b) $S=0,25$ (gözenin %25'i gölgeli) c) $S=0,50$ (gözenin %50'si gölgeli) d) $S=0,75$ (gözenin %75'i gölgeli) e) $S=1$ (gözenin tamamı gölgeli).

Her bir gölgelenme durumu için modülün akım gerilim ölçümleri yapılmıştır. Baypas diyot bulunmadığı durumda I-V karakteristiği Şekil 5 ve baypas diyot bulunduğu durumda I-V karakteristiği Şekil 6'da gösterilmektedir.

Gölgelenme etkisi maksimum akım ve maksimum gerilim değerlerini değiştirmiştir. Bu değerlerin değişmesi maksimum güç değerini değiştirmiştir, ayrıca $S=0,50$ 'de olduğu gibi çift tepe oluşmasına neden olmuştur. Gölgesiz koşullarda maksimum gerilim değeri açık devre geriliminin %80'ne eşittir. Bir gözenin gölgelenmesi ile maksimum gerilim değeri açık devre geriliminin yaklaşık %50'sine eşit olmuştur. Bu durum maksimum güç noktasını, açık devre geriliminin %80'ni alarak elde eden invertörler için olumsuzluk yaratabilir.

Diğer bir değişim ise açık devre gerilimi bir göze üzerindeki gölgelenme miktarının (S) artması ile yaklaşık 0,25V azalmaktadır. Açık devre geriliminin azalması gölgeli gözeler üzerinde oluşan sıcak noktalardan kaynaklanmaktadır. Modül üzerinde bir gözenin gölgelenmesi ile oluşabilecek sıcak noktalar 85°C 'nin üzerine çıkabilir. Bu sıcaklık değeri de gözenin zarar görmesine neden olur.



Şekil 5. PV modülün baypas diyot bulunmadığı durumda kısmi gölgelenme altında I-V karakteristiği.

I-V eğrileri üzerinden maksimum güç (P_m) değerleri belirlenmiş ve bu güç değerleri için maksimum akım (I_m) ve maksimum gerilim (V_m) elde edilmiştir. I-V karakteristiğinden faydalanarak her bir gölgelenme etkisi için kısa devre akımı (I_{sc}) ve açık devre gerilimi (V_{oc}) belirlenmiştir. Deneysel verilerden elde edilen fiziksel parametreler (I_{sc} , V_{oc} , I_m , V_m , P_m) ve her bir gölgelenmenin alındığı ışınım şiddeti (P_{in}) Tablo 3'te verilmektedir. Bu parametreler incelendiğinde I_{sc} ifadesinin bu gölgelenmeler altında değişmediği gözlenmiştir. I_{sc} akımında oluşan küçük değişimler gelen ışık şiddetinin değişimine bağlıdır.

I_m , V_m değerleri düzenli bir artış göstermemiştir. Göze %25 gölgelendiğinde I_m azalmıştır, V_m artmıştır. Göze %75 gölgelendiğinde I_m artmıştır, V_m azalmıştır. I_m ve V_m değerlerine bağlı olarak gözenin gölgelenen alanı arttıkça P_m azalmıştır.

Tablo 3. PV modülün kısmi gölgelenme altında fiziksel parametreleri

S (gölgelenme oranı)	I_{sc} (A)	V_{oc} (V)	I_m (A)	V_m (V)	P_m (W)	P_{in} (W/m ²)
0,00	2,67	39,12	2,36	30,31	71,53	1007
0,25	2,68	38,90	2,07	32,06	66,51	1009
0,50	2,67	38,87	1,46	34,44	50,18	1010
0,75	2,69	38,76	2,22	19,41	43,02	1017
1,00	2,69	38,51	2,33	17,90	41,65	1016

Tablo 3'deki parametrelerden faydalanarak modülün η (verimlilik), FF (dolum çarpanı), ΔP ($P_{m,gölgersiz} - P_{m,gölgeli}$), $\Delta P/P$ (gölgesiz duruma göre güç kayıp oranı) değerleri hesaplanmıştır.

Burada $\Delta P/P$ (%) oranı,

$$\frac{\Delta P}{P} (\%) = \frac{P_{m,gölgersiz} - P_{m,gölgeli}}{P_{m,gölgersiz}} \times 100 \quad (4)$$

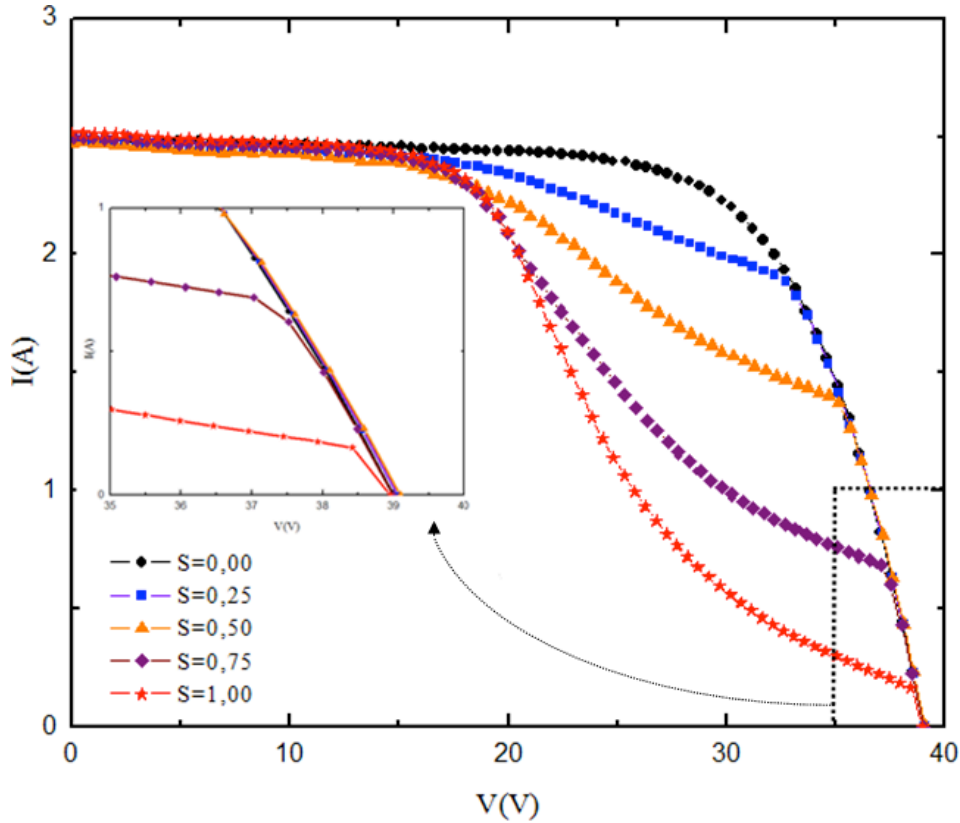
ifadesi kullanılarak elde edilmiştir (Tablo 4).

Tablo 4. PV modülün kısmi gölgelenme altında kayıp oranları.

S (gölgelenme oranı)	η (%)	FF (%)	ΔP (W)	$\Delta P/P$ (%)
----------------------	------------	--------	----------------	------------------

0,00	7,10	68,48	0,00	0,00
0,25	6,59	63,79	5,02	7,02
0,50	4,96	48,35	21,35	29,84
0,75	4,23	41,26	28,51	39,85
1,00	4,09	40,20	29,88	41,76

Tablo 4 incelendiğinde bir göze üzerine uygulanan gölge miktarı arttıkça verimlilik azalmaktadır. Gölgesiz durumda modülün verimliliği %7,10 iken bir gözenin gölgelenmesi ile verimlilik %4,09'a düşmüştür. Bir göze üzerindeki gölgelenme arttıkça dolun çarpanı azalmaktadır. Gölgesiz durumda dolun çarpanı %68,48 iken bir gözenin gölgelenmesi ile %40,20 olmuştur. ΔP ifadesi gölgesiz durumdaki maksimum güç ile gölgeli durumdaki maksimum güç arasındaki farktır ve gölgelenme etkisi ile kaybedilen gücü belirtmektedir. Bir göze üzerinde yapılan farklı gölgelenmeler ile güç kaybı azalmıştır, her bir gölgelenme etkisi için güç kaybı artmaktadır.



Şekil 6. PV modülün baypas diyot bulunduğu durumda kısmi gölgelenme altında I-V karakteristiği.

Baypas diyot bulunduğu durumda $S=0,00$ $0,25$ $0,50$ $0,75$ ve 1 oranında gölgelenmeler için I-V karakteristiği Şekil 6'de gösterilmektedir. Şekil 6 incelendiğinde bu

gölgelenmelerin etkisinde I-V karakteristiğinde fazla bir değişim olmamıştır. Gölgesiz alt dizilerin ürettiği akım baypas diyot üzerinden geçtiği için bu kısmın I_{sc} akımında bir azalma olmamıştır. Burada baypas diyot olmadığı duruma göre en önemli fark, açık devre geriliminde değişim olmamıştır. Bunun sebebi akım üreten diğer gözelerin gölgeli göze üzerinde negatif bir gerilim uygulamadan direk baypas diyot üzerinden geçmesidir. Baypas diyot kullanımı ile V_{oc} gerilimindeki azalma engellenmiştir. Bu sayede gözeler sıcak nokta oluşumuna karşı korunmuştur. Ayrıca bir göze gölgelendiğinde maksimum güç noktası baypas diyot olmadığı durumda 41W iken baypas diyot kullanıldığı durumda 46W değerindedir.

Şekil 5 ve Şekil 6'daki I-V karakteristikleri karşılaştırıldığında baypas diyot bulunmadığı durumda modül üzerinde bir gözenin gölgelendiği durumda ($S=1$) açık devre gerilimi 0,61V azalmıştır (Şekil 5). Bunun sebebi uyumsuzluk etkisi nedeniyle anlık olarak gölgeli gözenin sıcaklığının artmasıdır [9,13]. Baypas diyot bulunduğu durumda ise modül kısmi gölgelenme etkisine karşı korunduğu için gölgeli göze üzerinde sıcaklık artışı olmamış ve açık devre gerilimi (V_{oc}) değişmemiştir (Şekil 6).

PV modülün akım gerilim karakteristiğinden modülün I_{sc} , V_{oc} , I_m , V_m , P_m değerleri belirlenmiş ve Tablo 5'te verilmiştir. Tablo 5'teki verilere göre bu gölgelenme koşulları altında modülün I_{sc} ve V_{oc} parametreleri değişmemiştir. P_m , I_m ve V_m değerlerine bağlı olarak gölgelenme arttıkça maksimum güç azalır. Tablo 5'de verilen parametrelerden faydalanarak hesaplanan modülün η , FF, ΔP ve $\Delta P/P$ (%) oranları Tablo 6'da verilmiştir.

Tablo 5. Baypas diyot kullanıldığında PV modülün kısmi gölgelenme altında fiziksel parametreleri

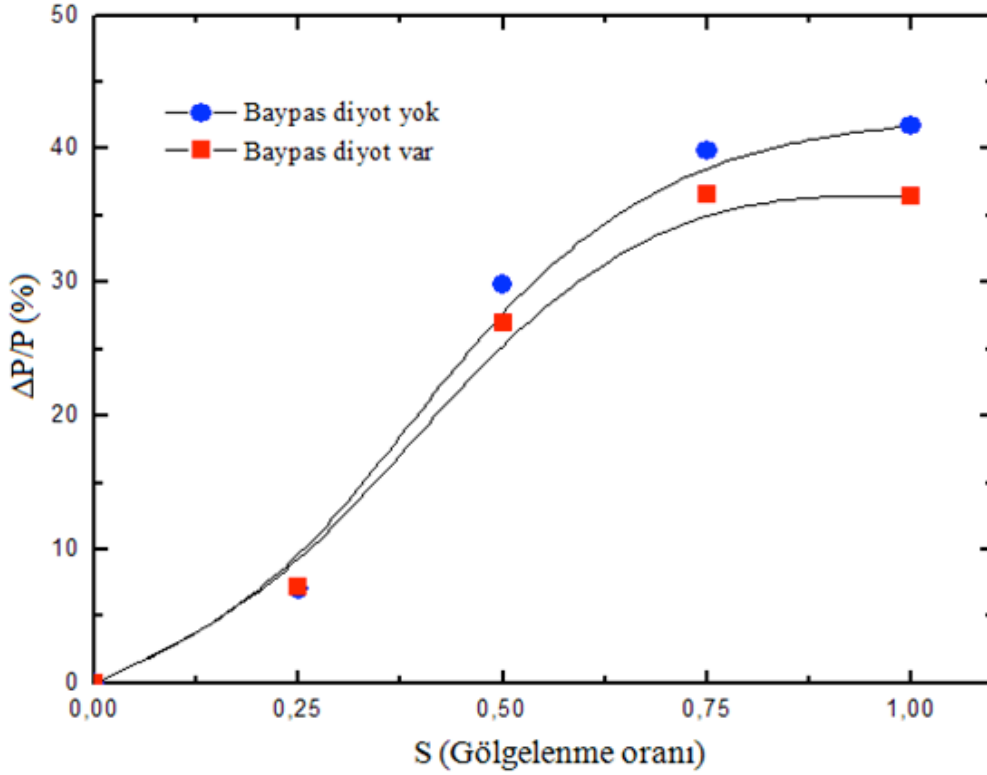
S (gölge oranı)	I_{sc} (A)	V_{oc} (V)	I_m (A)	V_m (V)	P_m (W)	P_{in} (W/m ²)
0,00	2,72	39,00	2,41	30,23	72,97	1024
0,25	2,72	39,05	2,06	32,72	67,72	1021
0,50	2,71	39,10	1,53	34,69	53,31	1018
0,75	2,73	38,99	2,36	19,54	46,27	1028
1,00	2,75	38,95	2,44	18,98	46,40	1032

Tablo 6'da verimlilik bir gözenin gölgelenmesi ile %7,12 değerinden %4,49'a kadar düşmüştür. Dolum çarpanı bir gözenin gölgelenmesi ile %68,55'den %43,21'e kadar düşmektedir. Modül üzerinde bir gözenin gölgelenmesi ile 26,56W güç kaybı olmuştur ve bir gözenin gölgelenmesi ile modülün güç kaybı %36,40 değerindedir.

Tablo 6. Modülde baypas diyot kullanıldığında gölgelenme altında kayıp oranları.

K (gölgeli göze sayısı)	η (%)	FF (%)	$\Delta P(W)$	$\Delta P/P(\%)$
0,00	7,12	68,55	0,00	0,00
0,25	6,63	63,71	5,24	7,18
0,50	5,23	50,24	19,65	26,94
0,75	4,50	43,33	26,69	36,58
1,00	4,49	43,21	26,56	36,40

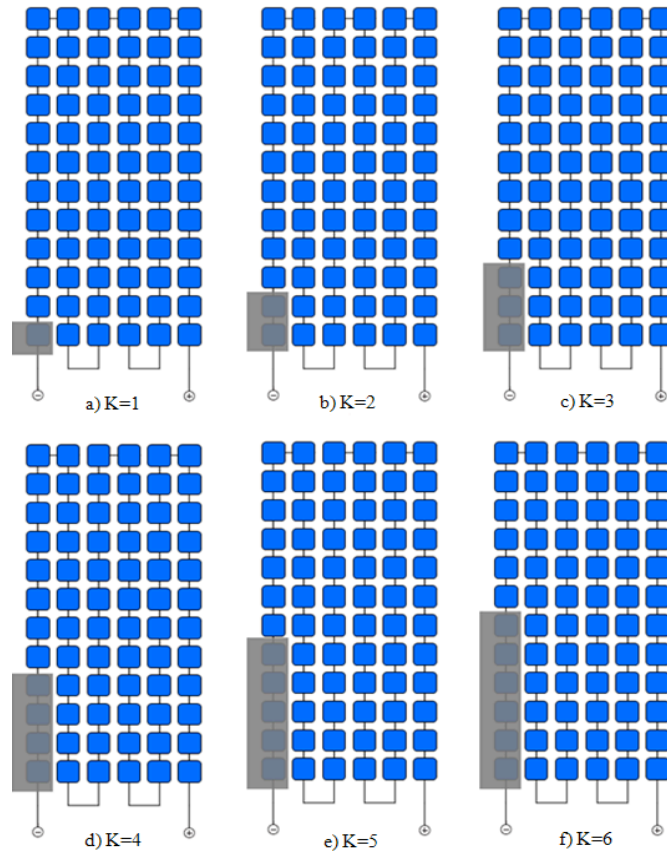
S=0 0,25 0,50 0,75 ve 1 durumları için baypas diyot bulunduğu ve bulunmadığı durumlarda $\Delta P/P$ (%) oranları Şekil 7’de gösterilmiştir. $\Delta P/P$ ifadesinin gölgelenme oranı ile değişimi doğrusal değildir.

**Şekil 7.** $\Delta P/P$ (%) oranının S gölgelenme oranı ile değişimi.

Bir göze üzerindeki farklı gölgelenmelerde her iki durumda da gölge büyüklüğü arttıkça güç kaybı yüzdesi artmaktadır. %25 gölgelenme etkisi altında baypas diyot kullanıldığı ve kullanılmadığı durumlarda aynı miktarda güç kaybı gerçekleşmiştir. %50 gölgelenme etkisi altında baypas diyot kullanılmadığı durumda %30 güç kaybı olurken baypas diyot kullanıldığında %27 civarındadır. %75 gölgelenme altında baypas diyot

kullanılmadığında %40, baypas diyot kullanıldığında ise %37 güç kaybı gerçekleşmiştir. Bir gözenin gölgelenmesi ile baypas diyot kullanılmadığında %41, baypas diyot kullanıldığında %36 güç kaybı gözlenmiştir. Küçük gölgelenme etkileri altında bir gözenin gölgelenmesi ile baypas diyot kullanmak çıkış gücünde %5 artış sağlayacaktır.

Farklı sayıda gözelerin gölgelendiği durum için, K gölgelenen göze sayısını göstermek üzere $K=0$ gölgesiz $K=1, 2, 3, 4, 5, 6$ sırasıyla seri bağlı 1, 2, 3, 4, 5, 6 gözenin gölgelenmiş olduğunu göstermektedir. Uygulanmış olan gölgelenmeler Şekil 8’de gösterilmektedir.



Şekil 8. Baypas diyot bulunmadığı durumda farklı sayıda göze gölgelenmeleri, a) $K=1$ (1 göze gölgeli) b) $K=2$ (2 göze gölgeli) c) $K=3$ (3 göze gölgeli) d) $K=4$ (4 göze gölgeli) e) $K=5$ (5 göze gölgeli) f) $K=6$ (6 göze gölgeli).

Her bir gölgelenme etkisinin alındığı ışınım şiddeti incelendiğinde 1071W/m^2 ile 1016W/m^2 arasında değişmektedir (Tablo 7). Bu kısımdaki ölçümler 04/08/2011 tarihinde alınmış ve ölçüm sırasında modülün sıcaklığı $57,6^\circ\text{C}$, dış ortam sıcaklığı $34,3^\circ\text{C}$ değerindedir.

$K=0, 1, 2, 3, 4, 5, 6$ durumları için baypas diyot bulunmadığı durumda modülün akım gerilim (I-V) ölçümleri alınmış ve bu ölçümler kullanılarak gösterilen gölgelenmeler altında modülün I-V karakteristiği elde edilmiştir.

Gölgelenen gözenin ters beslenmesi sonucu gözenin sıcaklığı artmış ve buna bağlı olarak her bir gölgelenme etkisi için V_{oc} yaklaşık 0,61V azalmıştır. V_{oc} gerilimindeki fark 0,61V değerini geçmemiştir. Eğer bu fark bu değer üzerinde olursa gözede 85°C 'nin üzerine çıkar ve bu sıcaklık gözenin zarar görmesine neden olabilir.

Tablo 7. PV modülün kısmi gölgelenme altında fiziksel parametreleri.

K (gölgeli göze sayısı)	I_{sc} (A)	V_{oc} (V)	I_m (A)	V_m (V)	P_m (W)	P_{in} (W/m^2)
0	2,67	39,12	2,36	30,31	71,53	1071
1	2,69	38,51	2,33	17,90	41,65	1016
2	2,63	38,66	1,63	9,68	15,82	1036
3	1,29	38,72	0,51	18,89	9,57	1047
4	0,80	38,68	0,33	23,69	7,80	1055
5	0,67	38,66	0,27	26,58	7,30	1063
6	0,47	38,42	0,21	24,98	5,14	1067

Baypas diyot bulunmadığı $K=1, 2, 3, 4, 5, 6$ gözenin gölgelendiği durum için I-V karakteristikleri Şekil 9. ve Şekil 14. arasında gösterilmektedir. Bu I-V karakteristiklerinden faydalanarak Tablo 7 elde edilmiştir. Tablo 7'de I_{sc} kısa devre akımı gölgesiz durumda 2,67A iken gölgeli göze sayısının artmasıyla 0,47A'ye kadar düşmüştür. Açık devre gerilimi gölgeli göze sayısının artmasıyla değişmemiştir. Ancak gölgesiz duruma göre her birinin açık devre gerilimi yaklaşık 0,61V azalmıştır. Bir gözenin gölgelenmesinden sonra gölgeli göze sayısını arttırdığımızda açık devre geriliminde küçük miktarlarda artma gözlenmiştir. Gerilimdeki bu değişme çok az olduğu için Tablo 7'de daha net görülmektedir. Bunun nedeni gölgelenen göze sayısının arttığında, gölgeli göze üzerine uygulanan ters beslemenin azalması ve bu ters beslemenin daha büyük alana yayılıyor olmasıdır. Gölgeli gözelerin üzerine yayılan enerji azaldıkça sıcak noktaların sıcaklığı da 85°C 'nin altına iner ve buna bağlı olarak açık devre geriliminde doğru orantılı olarak artma görülür. Bu parametreler kullanılarak modülün η , FF, ΔP ve $\Delta P/P$ (%) değerleri farklı gölgelenmeler altında hesaplanmıştır (Tablo 8).

Tablo 8. PV modülün kısmi gölgelenme altında kayıp oranları.

K (gölgeli göze sayısı)	$\eta(\%)$	FF (%)	$\Delta P(W)$	$\Delta P/P (\%)$
0	6,67	68,48	0,00	0,00
1	4,09	40,20	29,88	41,77
2	1,52	15,55	55,71	77,88
3	0,91	19,15	61,96	86,62
4	0,73	25,20	63,73	89,09
5	0,68	28,18	64,23	89,79
6	0,48	28,46	66,39	92,81

Modülün verimliliği %6,67 değerinden altı tane gözenin gölgelenmesi ile %0,48 değerine kadar düşmüştür. Dolum çarpanı %68,48 değerinden 28,46 değerine kadar düşmüştür. Güç değişimi bir gözenin gölgelenmesi ile 29,88W, seri bağlı altı gözenin gölgelenmesi ile 66,39W düşmüş ve modülün çıkış gücü büyük oranda kaybolmuştur. 72 gözeden oluşan modülün altı tane gözeninin gölgelenmesi ile modülün maksimum gücü %92,81 azalmıştır.

Baypas diyot bulunduğu K=1, 2, 3, 4, 5, 6 gözenin gölgelendiği durum için I-V karakteristikleri Şekil 9 ve Şekil 14 arasında gösterilmektedir. I-V karakteristiğinden PV modülün I_{sc} , V_{oc} , I_m , V_m , P_m değerleri belirlenmiş ve Tablo 9’de verilmiştir.

Tablo 9’da verilen parametrelerden faydalanarak hesaplanan modülün verimlilik, dolum çarpanı ve güç kaybı oranları Tablo 10’da verilmiştir. Tablo 10’da verimlilik bir gözenin gölgelenmesi ile %7,02 değerinden %4,45’e kadar düşmüştür. Altı tane gözenin gölgelenmesi ile verimlilik %4,28 değerinde kalmıştır. Baypas diyot sayesinde aynı alt dizideki gölgeli gözelerin sayısına bağlı olmadan verimlilik %4,28’in altına düşmemiştir.

Tablo 9. Baypas diyot kullanıldığında PV modülün kısmi gölgelenme altında fiziksel parametreleri.

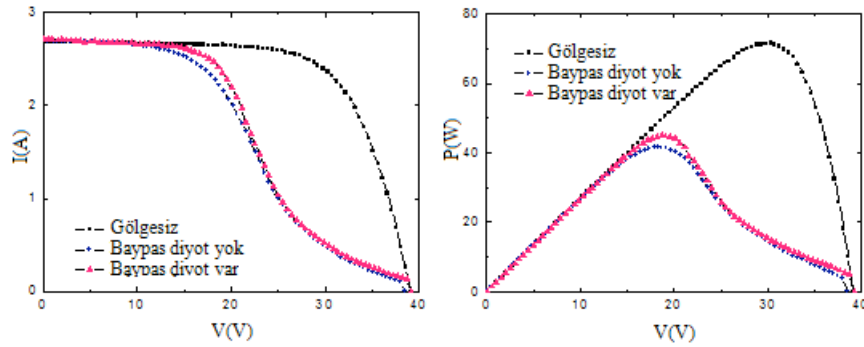
K (gölgeli)	$I_{sc}(A)$	$V_{oc}(V)$	$I_m(A)$	$V_m(V)$	$P_m(W)$	P_{in}
0	2,71	39,00	2,40	30,23	72,64	1034
1	2,73	38,95	2,42	18,98	46,01	1032
2	2,73	38,75	2,40	18,87	45,36	1023
3	2,72	38,25	2,42	18,27	44,37	1032
4	2,71	38,36	2,40	18,24	43,95	1037
5	2,71	38,25	2,42	18,27	44,23	1038
6	2,71	38,12	2,42	18,16	44,14	1031

Dolum çarpanı bir gözenin gölgelenmesi ile %68,55 değerinden %43,21'e kadar düşmektedir ve altı gözenin gölgelendiği durumda %42,58 değerindedir. Modül üzerinde bir gözenin gölgelenmesi ile 26,62W güç kaybı gözlenmiş ve gölgelenen gözenin sayısı arttıkça güç kaybında çok az bir değişim gerçekleşmiştir. Modülün bir gözesinin gölgelenmesi ile %36,65'lik bir güç kaybı olurken gölgeli gözelerin sayısının artırılmasıyla altı tane gölgeli göze olduğunda güç kaybı %39,23 değerinde kalmaktadır

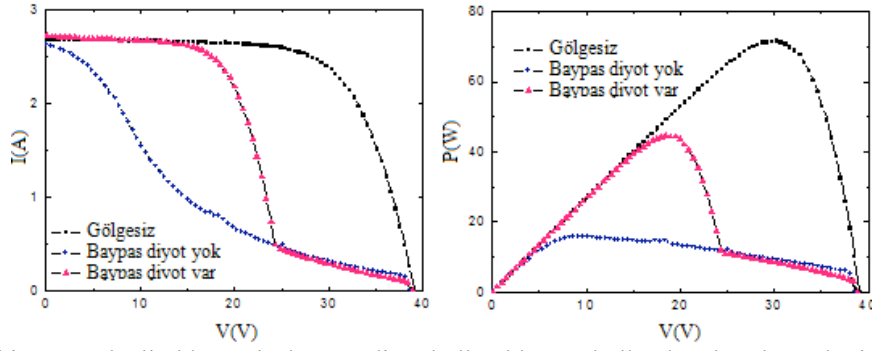
Tablo 10. Modülün baypas diyot kullanıldığında gölgelenme altında kayıp oranları

K (gölgeli göze sayısı)	η (%)	FF (%)	ΔP (W)	$\Delta P/P$ (%)
0	7,02	68,55	0,00	0,00
1	4,45	43,21	26,62	36,65
2	4,43	42,88	27,27	37,54
3	4,30	42,58	28,26	38,90
4	4,23	42,17	28,68	39,49
5	4,26	42,58	28,40	39,10
6	4,28	42,58	28,50	39,23

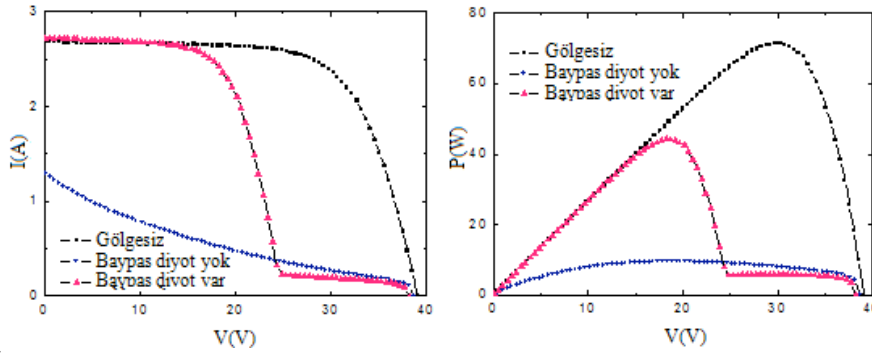
Kısmi gölgelenme koşullarında güç kaybı ihmal edilemeyecek kadar büyüktür. Baypas diyot kullanarak bu kayıp en az seviyeye indirilmektedir. $K=0, 1, 2, 3, 4, 5, 6$ gölgelenmeleri için baypas diyot kullanıldığı ve kullanılmadığı durumlar için I-V ve P-V karakteristiklerinin değişimi Şekil 9. ile Şekil 14. arasında verilmiştir.



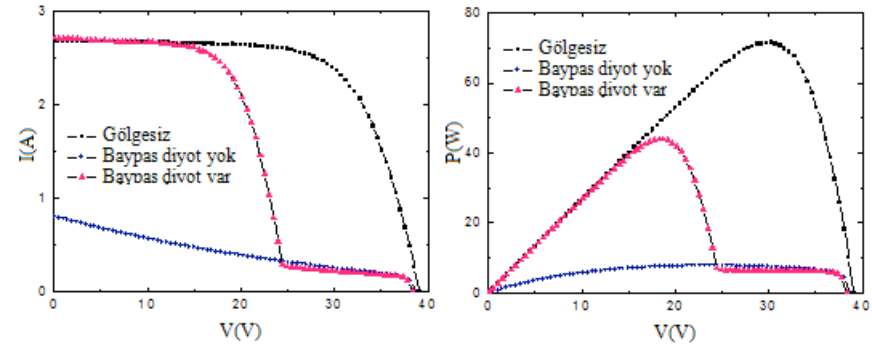
Şekil 9. Bir göze gölgeli olduğunda, baypas diyot kullanıldığı ve kullanılmadığı durumlar için I-V ve PV karakteristiği.



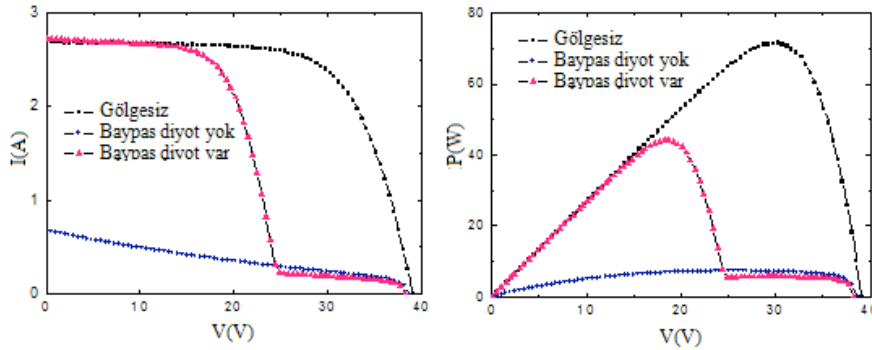
Şekil 10. İki göze gölgeli olduğunda, baypas diyot kullanıldığı ve kullanılmadığı durumlar için I-V ve P-V karakteristiği.



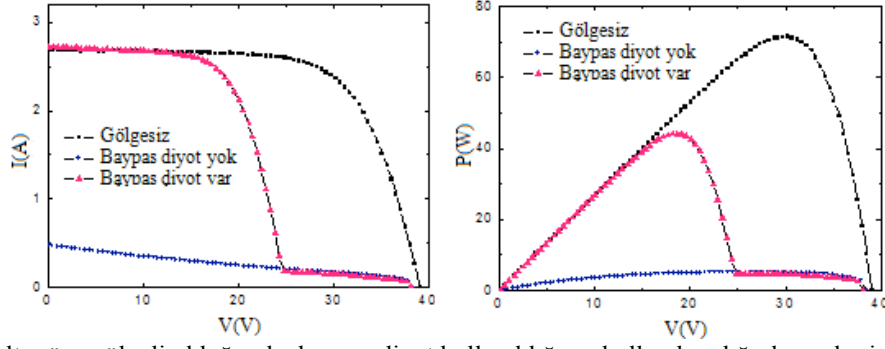
Şekil 11. Üç göze gölgeli olduğunda, baypas diyot kullanıldığı ve kullanılmadığı durumlar için I-V ve P-V karakteristiği.



Şekil 12. Dört göze gölgeli olduğunda, baypas diyot kullanıldığı ve kullanılmadığı durumlar için I-V ve P-V karakteristiği.

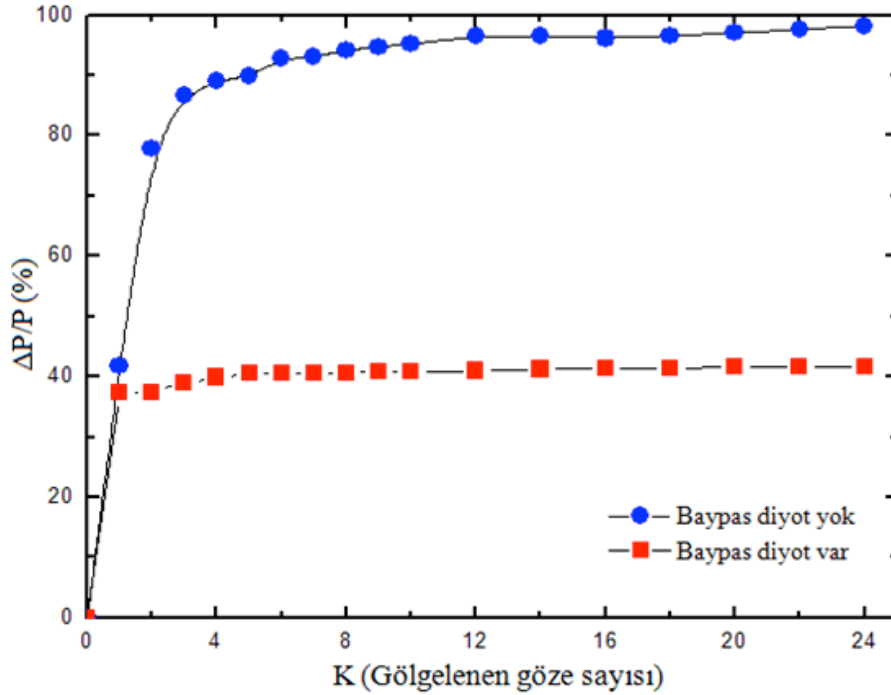


Şekil 13. Beş göze gölgeli olduğunda, baypas diyot kullanıldığı ve kullanılmadığı durumlar için I-V ve P-V karakteristiği.



Şekil 14. Altı göze gölgeli olduğunda, baypas diyot kullanıldığı ve kullanılmadığı durumlar için I-V ve P-V karakteristiği.

K=0, 1, 2, 3, 4, 5, 6,..., 24 durumları için baypas diyot bulunduğu ve bulunmadığı durumlar için $\Delta P/P$ oranları Şekil 15’de gösterilmiştir.



Şekil 15. $\Delta P/P$ (%) oranının K gölgelenen göze sayısı ile değişimi

Bir göze gölgelendiğinde baypas diyot kullanıldığı ve kullanılmadığı durumlar arasında %5 güç farkı vardır. Bu oran iki gözün gölgelenmesi ile büyük oranda artmıştır. İki gözün gölgelendiği durumda baypas diyot kullanılmadığı durumda %78 güç kaybı olurken baypas diyot kullanıldığında bu oran %37 olmaktadır. İki gözün gölgeli olduğu durumda baypas diyot kullanımı güç kaybında %41 kazanç sağlamıştır. Baypas diyot kullanımı ile çıkış gücündeki kayıp %40’ın üzerine çıkmamaktadır. Bunun nedeni bir gözün gölgelenmesi ile gölgeli gözün bulunduğu alt dizi uyumsuzluk etkisi göstermektedir ve alt dizideki gözlerin tamamı gölgeli gibi davranmaktadır. Bu sebeple alt dizideki gölge miktarının artırılması bir değişiklik yaratmamaktadır.

Baypas diyot kullanılmadığında altı gözenin gölgelenmesi durumunda güç kaybı %93 iken baypas diyot kullanıldığında bu oran %40'ın üzerine çıkmamaktadır.

3. Sonuç ve Yorum

Bu çalışmada fotovoltaik dönüşümlerle güneş enerjisinin doğrudan elektrik enerjisine dönüştürüldüğü güneş gözelerinin gölgelenme etkisi altında performansı incelenmiştir. Farklı gölgelenme etkileri altında baypas diyot kullanıldığı ve kullanılmadığı durumlar için çok kristalli silisyum fotovoltaik modülün I-V ölçümleri alınmış ve modülün fiziksel parametrelerinin (I_{sc} , V_{oc} , I_m , V_m , P_m) gölgelenme etkisi ile değişimi belirlenmiştir.

Modülün kısa devre akımı (I_{sc}) modül üzerindeki 1 gözenin gölgelenmesi ile değişmez ancak gölgeli göze sayısı arttıkça azalır. Açık devre gerilimi bir gözenin gölgelenmesi ile yaklaşık 0,61V azalır. Bunun sebebi gölgeli gözelerin diğer gözelere yük gibi davranması ve üzerinde sıcak noktaların oluşmasıdır. Açık devre gerilimindeki 0,61V değerindeki azalmanın çıkış gücüne etkisi azdır. Ancak gerilimdeki 0,61V'luk azalma modülün üzerinde 80°C'lik sıcak noktaların oluştuğunu gösterir ve bu sıcaklığın üzerine çıkılması modülün fiziksel yapısının bozulmasına ve zarar görmesine neden olabilir.

Modülün maksimum akım (I_m) ve maksimum gerilim (V_m) değerleri gölgelenme etkisi ile değişim gösterirler. I_m ve V_m parametrelerindeki değişime bağlı olarak maksimum güç (P_m) gölgelenme arttıkça azalır.

PV modülün fiziksel parametrelerindeki değişime bağlı olarak; η , FF, ΔP ve $\Delta P/P$ (%) ifadeleri gölgelenme etkisi ile değişmektedir.

Teşekkür ve Bilgi

Bu çalışma Adım Fizik Günleri 2012'de poster olarak sunulmuştur.

Kaynaklar

- [1] Eke R., Oktik Ş., 2007. Muğla İklim Koşullarına AS1206 Tek Kristal Silisyum (m-Si) Fotovoltaik Modülün Seri ve Paralel Direnç Değerlerinin Mevsimsel Olarak Değişimi, *Çankaya Üniversitesi Fen-Edebiyat Fakültesi, Journal of Arts and Sciences*, 7: 21-32.
- [2] Wenham S.R., Green M. A., Watt M.E., Corkish R., 2007. Applied Photovoltaic, *Earthscan*, p. 323.
- [3] <http://pveducation.org/pvcdrom>. (Erişim tarihi: 20.07.2012)
- [4] Eke, R., 2000. Fotovoltaik (PV) Güç Sistemlerinde Performansın Modellenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Muğla Sıtkı Koçman Üniversitesi, Muğla. 142s.
- [5] Lasnier F. and Ang T. G., 1990. Photovoltaic Engineering Handbook. *Adam Hilger, Bristol, England*, p. 548.
- [6] Karatepe E., Boztepe M., Colak M., 2007. Developments of a suitable model for characterizing photovoltaic arrays with shaded solar cells. *Solar Energy*. 81: 977-992.
- [7] Silvestre S. and Chouder A., 2008. Effects of Shadowing on Photovoltaic Module Performance. *Progress in Photovoltaic: Research and Application*, 16: 141-149.
- [8] Swaleh, M. S. and Green M. A., 1981. Effect of Shunt Resistance and Bypass Diodes on the Shadow Tolerance of Solar Cell Modules. *Solar Cells*, 5: 183-198.
- [9] Herrmann, W., 1997. Hot Spot investigations on PV Modules-New Concepts for a Test Standard and Consequences for Module Design with Respect to bypass Diodes. *Photovoltaic Specification Conference*. 2: 1129 - 1132.

- [10] Hasyım, E. S., Wenham, S. R., Green, M. A., 1986. Shadow tolerance of Modules Incorporating Integral Bypass Diode Solar Cells. *Solar Cells*, 19: 109 - 122.
- [11] Alonso-Garcia M.C., Ruiz J.M., Herrmann W., 2006. Computer simulation of shading effects in photovoltaic arrays. *Renewable Energy*, 31: 1986–1993.
- [12] <http://www.pvsyst.com> (Erişim tarihi: 20.07.2012)
- [13] Molenbroek E., Waddington D. W., Emery K. A., 1991. Hot Spot Susceptibility And Testing Of PV Modules, *Institute of Electrical and Electronics Engineers*, 91: 547-552.

Rüştü Eke e-mail: erustu@mu.edu.tr