



Kısmi Gölgeleme Durumundaki Seri Bağlı Fotovoltaik (FV) Panellerde Bypass Diyotunun Kullanılmasının Sistem Gücü Üzerine Etkisi

The Effect of Using Bypass Diode in Series Connected Photovoltaic (PV) Panels on System Power in Partial Shading Condition

Akif Karafil ^{1*}

¹ Yalova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Yalova, TÜRKİYE
Sorumlu Yazar / Corresponding Author *: akif.karafil@yalova.edu.tr

Geliş Tarihi / Received: 04.09.2020

Kabul Tarihi / Accepted: 26.11.2020

Araştırma Makalesi/Research Article

DOI:10.21205/deufmd.2021236823

Atıf şekli/How to cite: KARAFİL A.(2021). Kısmi Gölgeleme Durumundaki Seri Bağlı Fotovoltaik (FV) Panellerde Bypass Diyotunun Kullanılmasının Sistem Gücü Üzerine Etkisi. DEÜFMD 23(68), 621-630.

Öz

Gerilimin yüksek değerde olması istenilen fotovoltaik (FV) sistemlerde paneller seri olarak bağlanır. Seri bağlanan FV sistemlerde en önemli sorunlardan biri bina, ağaç, direk vb. nedenlerden dolayı panel üzerinde kısmi gölgenin oluşmasıdır. Kısmi gölgeleme, panel üzerinde sıcak noktaların oluşmasını neden olarak hem panele zarar verir hem de sistemin verimini düşürür. Bu olumsuz durumların engellenebilmesi için panellere paralel olarak bypass diyotları bağlanır. Bu çalışmada, kısmi gölgeleme durumundaki seri bağlı FV panel sayısının sırasıyla 2, 4 ve 6 olacak şekilde artırılarak sistemde bypass diyotunun kullanılıp kullanılmamasına göre meydana gelen kayıp oranı incelenmiştir. Panel sayısı artırılırken sistemin toplam gölgeleme oranı da azaltılmıştır. Çalışma, PSIM benzetim programı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Yapılan inceleme sonucunda kısmi gölgelemeye maruz kalmış seri bağlı FV panellerde panel sayısı artırılıp toplam gölgeleme oranı düştükçe bypass diyotunun kullanıldığı sistemlerde kayıp oranı azalmaktadır. Bypass diyotunun kullanılmadığı sistemlerde ise panel sayısı artırılıp toplam gölgeleme oranının düşürülmesi kayıp oranını azaltmamakta aksine arttırmaktadır. Yani; bypass diyotsuz sistemlerde seri bağlı FV panel sayısı artırıldığında düşük gölgeleme oranlarının bile verimliliği önemli ölçüde düşürdüğü görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Kısmi Gölgeleme, Bypass Diyot, Fotovoltaik Panel

Abstract

Panels are connected in series in photovoltaic (PV) systems where high voltage is desired. One of the most important problems in PV systems connected in series is the formation of partial shading due to the factors as building, tree, pole etc. Partial shading causes the formation of hot spots on the panel, damaging the panel and reducing the efficiency of the system. In order to prevent these negative situations, bypass diodes are connected parallel to the panels. In this study, the number of PV panels connected in series in partial shading is increased in a way to be 2, 4 and 6, respectively, and therefore the rate of losses when the bypass diode is used and is not used not in the system are

investigated. While the number of panels was increased, the total shading rate of the system was also reduced. The study was carried out using the PSIM simulation program. As a result of the examination, as the number of panels in series connected PV panels and exposed to partial shading is increased and the total shading rate decreases, the loss rate in systems using bypass diodes decreases. On the contrary, in systems where bypass diode is not used, increasing the number of panels and decreasing the total shading rate does not reduce the loss rate. Therefore, it was seen that when the number of PV panels connected in series was increased in systems where bypass diode was not used, even low shading rates significantly reduced the efficiency.

Keywords: *Partial Shading, Bypass Diode, Photovoltaic Panel*

1. Giriş

Makineleşmiş olan endüstride gerekli olan elektrik enerjisinin elde edilmesi çoğunlukla kömür, petrol gibi fosil esaslı kaynaklar ile sağlanmaktadır. Her ne kadar günümüzde çoğunlukla petrol türevi kaynaklar kullanılsa da, bu kaynaklara alternatif olabilecek enerji kaynağı arayışları hızla devam etmektedir. Bu arayışların nedeni, fosil esaslı kaynakların yanması sonucu ortaya çıkan gazların çevreyi kirletmesi ve bu kaynakların yakın gelecekte tükenerek olmasıdır. Bunun sonucunda rüzgar, güneş, jeotermal, biokütle gibi yenilenebilir enerji kaynakları kullanılmaya başlanmıştır [1-3]. Elektrik enerjisinin üretiminde özellikle rüzgar ve güneş enerjisinin kullanımı, diğer yenilenebilir enerji kaynaklarına göre daha önde gelmektedir. Bu alanda yapılan teşvik ve yatırımlarla bu enerji kaynakları, fosil esaslı kaynaklar ile rekabet edebilir hale gelmiştir [4].

Mevcut alternatif enerji kaynakları içerisinde fotovoltaiik (FV) enerji en önemli yenilenebilir enerji kaynaklarından biridir. FV enerjinin temiz ve kurulumlarının basit olması, çok fazla bakıma ihtiyaç duymamaları ve megavatlara kadar güç sağlayabilmeleri bu enerji kaynaklarının en önemli avantajlarıdır. Aynı zamanda su pompaları, güneş ev sistemleri, şebekeden uzak binalar gibi birçok alanlarda yaygın olarak kullanılmaya başlanması FV enerjiye olan talebi her geçen gün arttırmaktadır. Fakat, FV panel veriminin düşük olması, atmosferik şartların gün içerisinde değişiklik göstermesi ve buna bağlı olarak FV panellerinden elde edilen güç değerlerinin de sürekli olarak değişmesi FV enerji sistemlerinin en önemli dezavantajlarını oluşturmaktadır [5-6].

FV hücreler seri bağlanarak FV paneli oluşturur. FV panel, seri bağlanan hücre sayısı kadar çıkış gerilimi üretir. Akımın yeterli olduğu, fakat daha yüksek gerilim seviyesinin istendiği durumlarda

FV paneller seri bağlanarak çıkış gerilimi arttırılır. Seri bağlanan FV paneller her zaman eşit miktarda güneş ışınımına maruz kalamayabilir. Bulut, bina, direk, baca, ağaç vb. nedenlerden dolayı FV panelin/hücrelerin belirli bir kısmı gölgelenmeye maruz kalabilir. Bu duruma kısmi gölgelenme denir. Özellikle seri bağlı FV panellerde kısmi gölgelenme önemli bir sorun oluşturur. Seri bağlı FV panellerden herhangi biri gölgelendiğinde gölgeli olan hücrelerde akım sıfır olur ve sistemin toplam akımı azalır. Bu durum gölgeli olan hücrelerin bir tüketici yük gibi davranmasına neden olarak güç kaybı oluşturur. Aynı zamanda sistemin verimi de azalır. Güç kaybı, gölgeli hücrelerde ısı kaybı olarak ortaya çıkar ve panelin gölgelenmiş kısımlarında sıcak bölgeler oluşturur. Sıcak bölgeler verimi düşürmekle birlikte lehim yapılmış olan bağlantı yerlerine zarar vererek panelin hasar görmesine neden olur. Bu olumsuz durumların giderilebilmesi için bir bypass diyotu FV panele ters paralel olarak bağlanır [7-9]. Her bir hücreye bypass diyotunun bağlanması hem maliyetli hem de pratik değildir. Ayrıca bypass diyotunun aktif durumda belirli bir güç kaybına neden olacağı unutulmamalıdır. Bu yüzden hücre sayısı düşük olan FV panellerde, panel üreticileri bir veya iki bypass diyotu kullanırken, hücre sayısı fazla olan FV panellerde daha fazla bypass diyotu yer almaktadır. Bazı FV panellerde ise bypass diyotu bulunmayabilir. Özellikle şebekeden bağımsız sistemlerde paralel bağlanacak FV paneller için bypass diyotuna gerek yoktur [10].

Herhangi bir gölgelenme meydana gelmediğinde bypass diyotu pasif durumdadır. Gölgelenme gerçekleştiğinde ise FV akım, bypass diyotundan geçer ve bu sayede gölgelenmiş olan panel üzerinde sıcak noktaların oluşması engellenir. Fakat bypass diyotunun kullanılmasıyla birlikte sistemde bir genel güç noktası, bir veya birden fazla da yerel

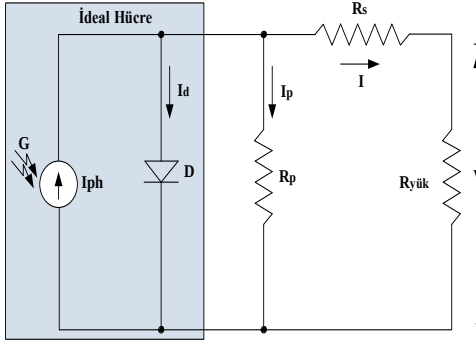
güç noktaları oluşur. Eğer sistemde maksimum güç noktası takibi (MGNT) kullanılacaksa MGNT algoritmasında genel güç noktasının bulunması sağlanarak sistemin toplam gücünün düşmesi engellenir. Bu sayede sistem verimliliği de artırılır [11-13].

Bu çalışmada, kısmi gölgenme durumundaki seri bağlı FV panellerde bypass diyotunun kullanılıp kullanılmamasının sistem gücü üzerine etkisi incelenmiştir. Çalışmada PSIM benzetim programı kullanılarak 2, 4 ve 6 adet seri bağlı FV panellerde toplam gölgenme miktarı değiştirilerek bypass diyotlu ve diyotsuz sistemlerde meydana gelen kayıp güç miktarı analiz edilmiştir.

2. Matematiksel Analiz

2.1. FV hücrenin matematiksel analizi

FV panellerinden elde edilen akım, gerilim ve güç gibi değerlerin belirlenebilmesi için FV hücrenin eşdeğer devre modelinin çıkartılması gerekmektedir. FV hücre, p-n yarı iletken malzemelerden yapılmıştır. Bu yüzden FV hücre, elektronların en temel elemanlarından olan bir diyot ve ona paralel bağlı akım kaynağı ile sembolize edilmektedir. FV hücredeki kayıplar ise paralel-seri direnç ile temsil edilmektedir. FV hücrenin tek diyotlu eşdeğer devre modeli Şekil 1’de gösterilmiştir.



Şekil 1. FV hücrenin tek diyotlu eşdeğer devresi

Şekil 1’deki devre modeline göre eşitlik (1) elde edilir.

$$I = I_{ph} - I_o \left[e^{\left(\frac{q \cdot (V + I \cdot R_s)}{A \cdot k \cdot T} \right)} - 1 \right] - \frac{V + I \cdot R_s}{R_p} \quad (1)$$

Burada;

I_{ph} : FV hücrede oluşan akım

I_o : Ters sızıntı akımı

q : Elektrik yükü ($1,602 \cdot 10^{-19}$ C)

V : FV hücrenin çıkış gerilimi

I : FV hücrenin çıkış akımı

R_s : Hücrenin iç direnci

R_p : Paralel kaçak akım direnci

A : Diyotun kalite faktörü

k : Boltzman sabiti ($1,3806505 \cdot 10^{-23}$ J/K)

T : FV hücrenin Kelvin cinsinden sıcaklığı

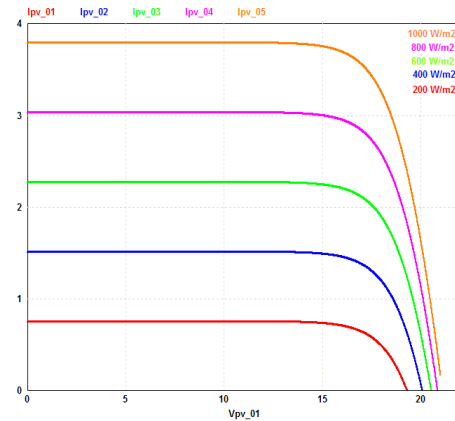
temsil etmektedir [2,14-15].

Kullanılan FV panelin özellikleri Tablo 1’de verilmiştir.

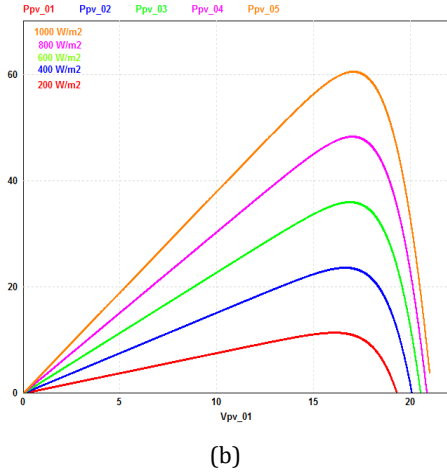
Tablo 1. FV panelin özellikleri.

FV Panelin Özellikleri	Değerleri
Maksimum güç (P_{max})	60 W
Maksimum gerilim (V_{mp})	17,1 V
Maksimum akım (I_{mp})	3,5 A
Kısa devre akımı (I_{sc})	3,8 A
Açık devre gerilimi (V_{oc})	21,1 V
Hücre sayısı (n)	36 Adet

Matematiksel eşdeğer devre modeli kullanılarak FV panelin 25 °C sıcaklıkta ve 200, 400, 600, 800, 1000 W/m² güneş ışınlam değişimlerinde PSIM benzetim programında elde edilen akım-gerilim ve güç-gerilim karakteristikleri Şekil 2’de verilmiştir.



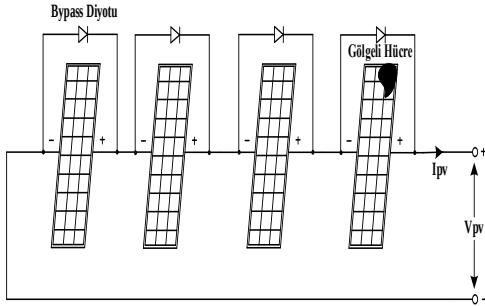
(a)



Şekil 2. FV panelin karakteristikleri (a) Akım-gerilim, (b) Güç-gerilim

2.2. Gölge FV panelin matematiksel analizi

Şekil 3'te seri bağlı FV paneller ile birlikte kısmi gölge FV panelin şekli verilmiştir.



Şekil 3. Seri bağlı FV panellerde kısmi gölgeleme durumu

Kısmi gölgeleme durumundaki panelin kısa devre akımı ($I_{sc}=0$) sıfır olur. Bu durumda devreden geçen akım, gölgeleme olmuş olan hücrelerde paralel direnç üzerinden geçmektedir. Paralel direncin değeri seri dirence göre çok yüksek olduğundan gölgeleme olmuş olan panelin gerilimi düşer. Özellikle gölgeleme miktarının fazla olduğu durumlarda seri bağlı FV panellerin toplam gerilimi ve gücü önemli ölçüde düşmektedir. Hücre sayısı n olan panelin tüm hücreleri güneş ışığı altında iken FV panelin gerilimi V_{pv} , tek hücresi gölgeleme olmuş FV panelin gerilimi ise V_{pvs} olup, gölgeleme olmuş panelin gerilimi eşitlik (2) deki gibi hesaplanır [7,13].

$$V_{pvs} = V_{pv} - (R_p + R_s) * I_{pv} - \frac{V_{pv}}{n} \quad (2)$$

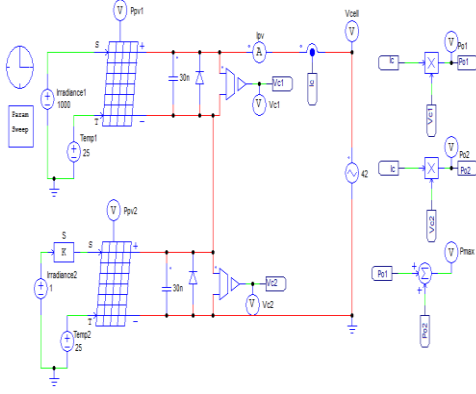
Seri bağlı sistemler için gölgeleme miktarının düşük olduğu durumlarda gölgeleme olmuş olan panelin akımı, sistemin akımını oluşturur. Bu durum sistem akımının sınırlandırılmasına neden olarak güç kaybına yol açar. Oluşan bu güç kaybı gölgeleme olmuş hücrelerde ısı kaybı oluşturur. Oluşan güç kaybının azaltılması ve panel üzerindeki sıcak noktaların engellenebilmesi için bypass diyotu kullanılır. Bypass diyotu panele paralel bağlanarak akımın diyot üzerinden geçmesi sağlanır ve panelin zarar görmesi engellenir. Bypass diyotunun kullanılması ile birlikte bir genel güç noktası, bir de yerel güç noktası oluşur. Gölgeleme olmuş panel sayısının artması durumunda gölgelemenin olduğu panel sayısı kadar yerel güç noktaları oluşur. Yerel güç noktasında çalışan sistemde güç kayıpları fazladır. Eğer sistem genel güç noktasında sürekli olarak çalıştırılırsa güç kaybı daha az olur [16-18].

3. Benzetim Sonuçları

Çalışmada önce 2 adet FV panel seri bağlanmıştır. Bu FV panellerden birinin güneş ışıma değeri sürekli olarak 1000 W/m^2 iken, diğer panel gölgesiz (%0), %20, %40, %60 ve %80 gölgelemeye maruz kaldığında bypass diyotunun kullanılıp kullanılmaması durumuna göre kayıp analizi yapılmıştır. Çalışma PSIM benzetim programında incelenmiştir. Daha sonra 4 adet FV panel seri bağlanmış ve bunlardan 3'ünün sürekli olarak 1000 W/m^2 tam güneş ışığı altında çalıştığı, diğer panelin ise gölgesiz (%0), %20, %40, %60 ve %80 gölgelemeye maruz kaldığında bypass diyotunun kullanılıp kullanılmaması durumuna göre kayıp analizi yapılmıştır. Yapılan bu çalışmada, seri bağlanan FV panel sayısının artırılıp sistemin toplam gölgeleme miktarının düşmesi sonucu bypass diyotunun kullanılıp kullanılmamasına göre meydana gelen kayıp değerlerinin sisteme olan etkisi incelenmiştir.

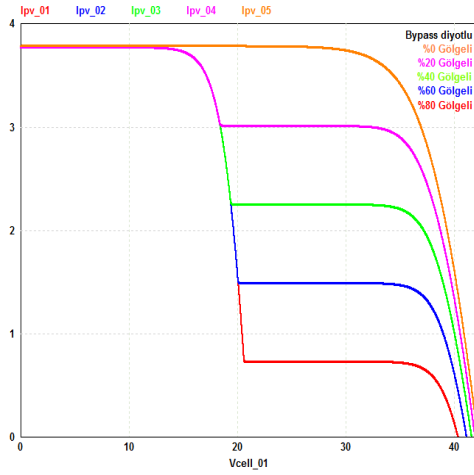
3.1. 2 adet seri bağlı FV panelde gölgelenme

Seri bağlı FV sistemde kısmi gölgelenme durumunun incelenmesi için Şekil 4'teki devre PSIM benzetim programında oluşturulmuştur.

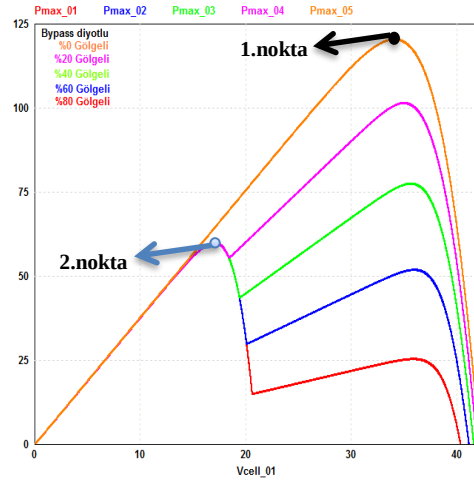


Şekil 4. Seri bağlı FV panellerde kısmi gölgelenme durumunun incelenmesi

Öncelikle bypass diyotunun bulunduğu 2 adet seri bağlı FV panelde, panellerden birinin tam güneş ışınımı altında (1000 W/m^2) değerinin ise kademeli olarak %0, %20, %40, %60 ve %80 gölgelenme durumuna ait benzetim sonuçları Şekil 5'te gösterilmiştir.



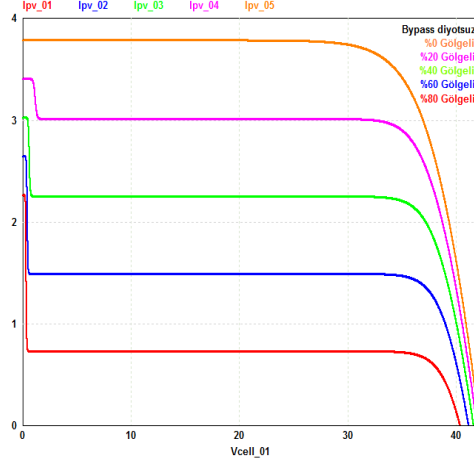
(a)



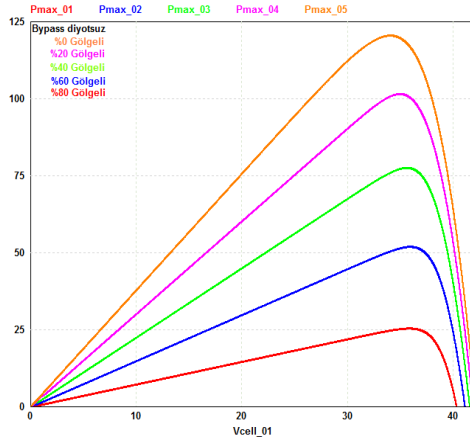
(b)

Şekil 5. Bypass diyotlu 2 adet seri bağlı FV panelin karakteristikleri (a) Akım-gerilim, (b) Güç-gerilim

Şekil 5'ten de görüleceği üzere kısmi gölgelenmeye maruz kalmış bypass diyotunun bağlı olduğu sistemlerde 2 adet maksimum güç noktası oluşmaktadır. Bu güç noktalarından biri olan genel güç noktası her zaman yerel güç noktasından büyük değerde olur. Genel güç noktası, %0, %20 ve %40 gölgelenme durumunda 1.noktada oluşurken yerel güç noktası 2.noktada oluşmaktadır. Gölgelenme %60 ile %80 olduğunda genel güç noktası 2.noktaya kaymıştır. Kısmi gölgelenmeye maruz kalmış bypass diyotsuz sistemin karakteristikleri Şekil 6'da verilmiştir.



(a)



(b)

Şekil 6. Bypass diyotsuz 2 adet seri bağlı FV panelin karakteristikleri (a) Akım-gerilim, (b) Güç-gerilim

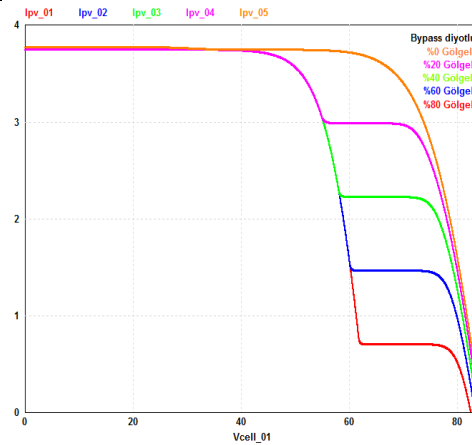
Şekil 6'dan da görüleceği üzere bypass diyotunun bağlı olmadığı 2 adet seri bağlı FV panel sisteminde akımın düştüğü ve bu durumda akımın sınırlandırıldığı görülmektedir. Bunun sonucunda sistemde toplam gölgelenme miktarı %30 olduğunda %56,69 kayıp oluşurken, toplam %40 gölgelenme olduğunda ise kayıp %78,77 olmaktadır. Yani; gölgelenme oranı arttıkça verimlilik düşürerek kayıp oranı artmaktadır. Bypass diyodunun bağlı olduğu sistemde ise toplam gölgelenme oranı %30 ve %40 iken kayıp oranı %50'dir. Bu durum bypass diyotlu sistemde gölgelenme miktarının belirli bir sınır değerinden sonra kayıp oranını arttırmadığını, kayıp oranının aynı değerde kaldığını göstermektedir. Tablo 2'de kısmi gölgelenmeye maruz kalmış 2 adet seri bağlı FV panelde bypass diyotunun bağlı olduğu ve olmadığı durumlardaki güç, gerilim, verimlilik ve toplam gölgelenme oranına ait sayısal veriler sunulmuştur.

Tablo 2. 2 adet seri bağlı FV panelde bypass diyotlu ve bypass diyotsuz sisteme ait veriler.

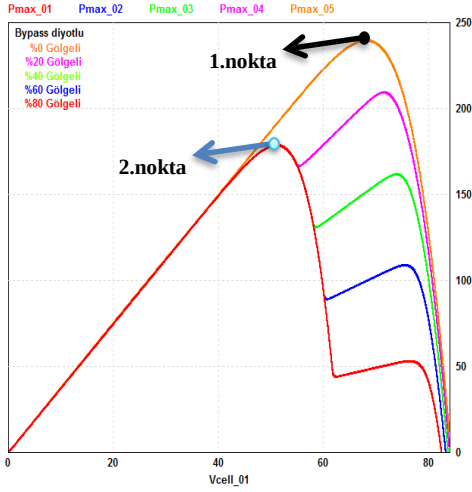
Parametre	2 Adet Seri Bağlı FV Panel Bypass Diyotlu					2 Adet Seri Bağlı FV Panel Bypass Diyotsuz				
	%0	%20	%40	%60	%80	%0	%20	%40	%60	%80
Güç (W)	120,14	101,66	77,69	60,09	60,09	120,14	101,66	77,69	52,04	25,51
Gerilim (V)	34,05	34,96	35,73	17,11	17,11	34,05	34,96	35,73	36,08	36,07
Verimlilik (%)	100	84,61	64,66	50	50	100	84,61	64,66	43,31	21,23
Sistemin toplam gölgelenme oranı (%)	0	10	20	30	40	0	10	20	30	40

3.2. 4 adet seri bağlı FV panelde gölgelenme

Bypass diyotunun bulunduğu 4 adet seri bağlı FV panelde panellerden üçünün tam güneş ışınımı altında (1000 W/m^2), birinin ise kademeli olarak %0, %20, %40, %60 ve %80 gölgelenme durumuna ait benzetim sonuçları Şekil 7'de gösterilmiştir.



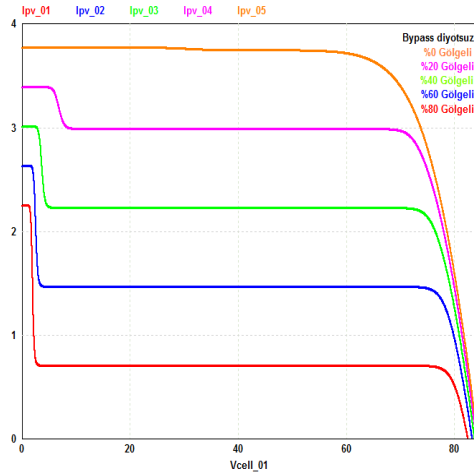
(a)



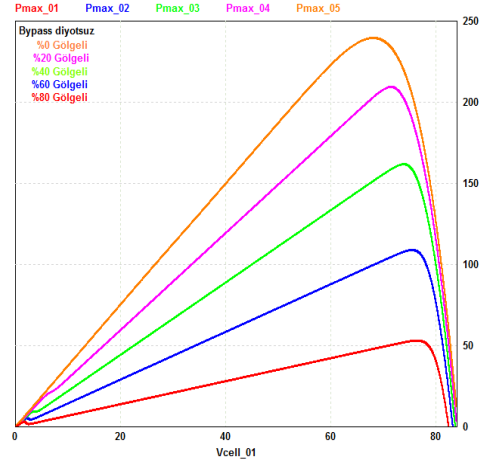
(b)

Şekil 7. Bypass diyotlu 4 adet seri bağlı FV panelin karakteristikleri (a) Akım-gerilim, (b) Güç-gerilim

Şekil 7'den de görüldüğü üzere bypass diyotlu 4 adet seri bağlı FV panelden biri %0 ve %20 kısmi gölgelenmeye maruz kaldığında genel güç noktası 1. noktada oluşurken %40, %60 ve %80 kısmi gölgelenme durumunda genel güç noktası 2. noktaya kaymıştır. Kısmi gölgelenmeye maruz kalmış bypass diyotsuz sistemin karakteristikleri Şekil 8'de verilmiştir.



(a)



(b)

Şekil 8. Bypass diyotsuz 4 adet seri bağlı FV panelin karakteristikleri (a) Akım-gerilim, (b) Güç-gerilim

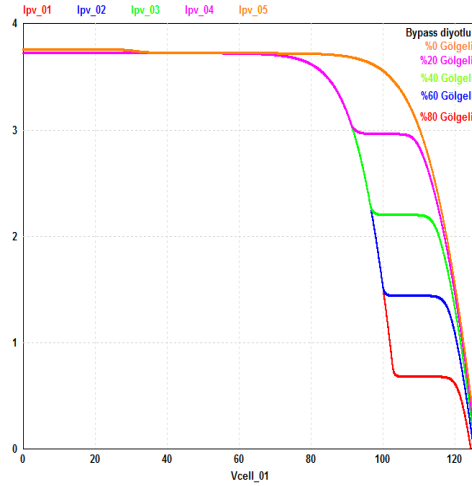
Bypass diyotunun bağlı olmadığı 4 adet seri bağlı FV panel sisteminde toplam gölgelenme miktarı %10 olduğunda %32,63 kayıp, toplam %15 gölgelenme olduğunda %54,47 kayıp ve toplam %20 gölgelenme olduğunda ise %77,96 kayıp oluşmuştur. Yani; seri bağlı FV panel sayısı artırılıp toplam gölgelenme oranı düştükçe bypass diyotsuz sistemler bundan daha çok etkilenecek kayıplar daha fazla olmaktadır. Bypass diyodunun bağlı olduğu sistemde ise toplam gölgelenme oranı %10, %15 ve %20 iken kayıp sabit bir şekilde %24,6 olarak kalmıştır. Bu durumda, düşük gölgelenme oranlarında dahi bypass diyotsuz sistemlerde bypass diyotlu sistemlere göre kayıpların daha fazla olduğu ve sistemin veriminin düştüğü görülmektedir. Tablo 3'te kısmi gölgelenmeye maruz kalmış 4 adet seri bağlı FV panelde bypass diyotunun bağlı olduğu ve olmadığı durumlardaki güç, gerilim, verimlilik ve toplam gölgelenme oranına ait sayısal veriler sunulmuştur.

Tablo 3. 4 adet seri bağlı FV panelde bypass diyotlu ve bypass diyotsuz sisteme ait veriler.

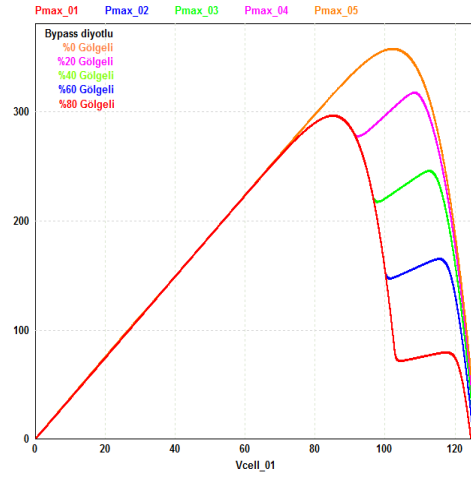
Parametre	4 Adet Seri Bağlı FV Panel Bypass Diyotlu					4 Adet Seri Bağlı FV Panel Bypass Diyotsuz				
	%0	%20	%40	%60	%80	%0	%20	%40	%60	%80
Güç (W)	240,28	209,4	181,18	181,18	181,18	240,28	209,4	161,88	109,4	52,97
Gerilim (V)	68,09	71,74	51,12	51,12	51,12	68,09	71,74	74,09	75,9	76,46
Verimlilik (%)	100	87,14	75,4	75,4	75,4	100	87,14	67,37	45,53	22,04
Sistemin toplam gölgelenme oranı (%)	0	5	10	15	20	0	5	10	15	20

3.3. 6 adet seri bağlı FV panelde gölgelenme

Bypass diyotunun bulunduğu 6 adet seri bağlı FV panelde panellerden 5'inin tam güneş ışınımı altında, birinin ise kademeli olarak %0, %20, %40, %60 ve %80 gölgelenme durumuna ait benzetim sonuçları Şekil 9'da gösterilmiştir.



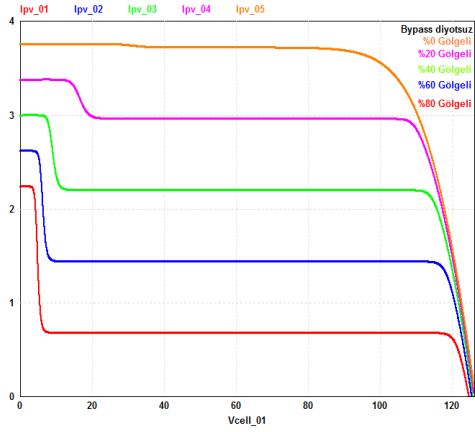
(a)



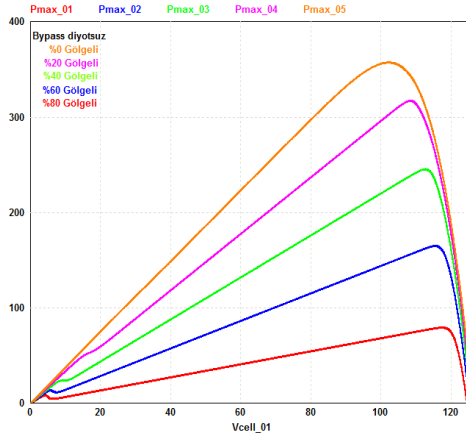
(b)

Şekil 9. Bypass diyotlu 6 adet seri bağlı FV panelin karakteristikleri (a) Akım-gerilim, (b) Güç-gerilim

Bypass diyotlu 6 adet seri bağlı FV panelden biri %0 ve %20 kısmi gölgelenmeye maruz kaldığında genel güç noktası 1. noktada oluşurken yerel güç noktası 2. noktada oluşmuştur. %40, %60 ve %80 kısmi gölgelenme durumunda ise genel güç noktası 2. noktaya, yerel güç noktası ise 1. noktaya kaymıştır. Kısmi gölgelenmeye maruz kalmış bypass diyotsuz sistemin karakteristikleri Şekil 10'da verilmiştir.



(a)



(b)

Şekil 10. Bypass diyotsuz 6 adet seri bağlı FV panelin karakteristikleri (a) Akım-gerilim, (b) Güç-gerilim

Bypass diyotunun bağlı olmadığı 6 adet seri bağlı FV panel sisteminde toplam gölgelenme miktarı %6,7 olduğunda %31,3 kayıp, toplam %10 gölgelenme olduğunda %53,82 kayıp ve toplam %14 gölgelenme olduğunda ise %77,76 kayıp oluşmuştur. Yani; seri bağlı FV panel sayısı artırılıp toplam gölgelenme oranı düştükçe bypass diyotsuz sistemler bundan daha çok etkilenecek kayıplar daha fazla olmaktadır. Bypass diyodunun bağlı olduğu sistemde ise toplam gölgelenme oranı %6,7, %10 ve %14 iken kayıp sabit bir şekilde %17,2

olarak kalmıştır. Bypass diyotlu sistemde seri bağlı FV panel sayısı artırılıp gölgelenme miktarı düştükçe kayıp oranı da düşmektedir. Tablo 4'te kısmi gölgelenmeye maruz kalmış 6 adet seri bağlı FV panelde bypass diyotunun bağlı olduğu ve olmadığı durumlardaki güç, gerilim, verimlilik ve toplam gölgelenme oranına ait sayısal veriler sunulmuştur.

4. Tartışma ve Sonuç

Bu çalışmada, kısmi gölgelenmeye maruz kalmış seri bağlı FV sistemlerde panel sayısının artırılmasının bypass diyotlu ve diyotsuz sistemlerde meydana getirmiş olduğu kayıplar incelenmiştir. Çalışmada sırasıyla 2, 4 ve 6 adet seri bağlı FV panellerde panel sayıları artırılmış, toplam kısmi gölgelenme oranı düşürülerek sistemin verimliliği ele alınmıştır. Bypass diyotunun bağlı olmadığı 2 adet seri bağlı FV sistemlerde %10 ve %20 kayıp oranları diyotlu sistemler ile aynı verimliliktedir. Fakat gölgelenme oranı %30 ve %40 olduğunda, bypass diyotsuz sistemlerde bypass diyotlu sistemlere nazaran kayıp oranlarının daha fazla olduğu ve verimliliğin düştüğü görülmektedir. Bu durum, 4 ve 6 adet seri bağlı FV sistemler için de geçerlidir. 4 ve 6 adet seri bağlı bypass diyotsuz sistemlerde gölgelenme oranı düşürülse de kayıp oranı artmaktadır. Bu durum, bypass diyotunun yer almadığı sistemlerde seri bağlı FV panel sayısının artırılması durumunda gölgelenme oranının düşük kalsa bile sistemi çok fazla etkileyerek kayıpların yüksek olduğunu göstermektedir. Bunun temel nedeni diyotsuz seri bağlı FV sistemde, sistem akımının düşerek akımın sınırlandırılıyor olmasıdır. Bypass diyotlu sistemlerde ise seri bağlanan FV panel sayısı artsa da toplam gölgelenme oranı azaldıkça kayıp oranının düşük kaldığı ve bu durumun sistemi daha az etkilediği görülmektedir. Bu çalışmanın sonucu olarak kısmi gölgelenmeye maruz kalmış sistemlerde seri bağlanan FV panel sayısının artırılması ile bypass diyotsuz sistemlerde gölgelenme etkisinin kayıpları artırarak verimliliği düşürdüğü, bypass diyotlu sistemlerde ise kayıpların düşük kalarak sistemi daha az etkilediği görülmektedir.

Tablo 4. 6 adet seri bağlı FV panelde bypass diyotlu ve bypass diyotsuz sisteme ait veriler.

Parametre	6 Adet Seri Bağlı FV Panel Bypass Diyotlu					6 Adet Seri Bağlı FV Panel Bypass Diyotsuz				
	%0	%20	%40	%60	%80	%0	%20	%40	%60	%80
Güç (W)	357,41	317,37	296,23	296,23	296,23	357,41	317,37	245,57	165,06	79,52
Gerilim (V)	102,23	108,33	84,97	84,97	84,97	102,23	108,33	112,74	115,69	117,79
Verimlilik (%)	100	88,79	82,88	82,88	82,88	100	88,79	68,7	46,18	22,24
Sistemin toplam gölgelenme oranı (%)	0	3,4	6,7	10	14	0	3,4	6,7	10	14

Kaynakça

- [1] Mert, B.D., Ekinci, F., Demirdelen, T. 2019. Effect of Partial Shading Conditions on Off-Grid Solar PV/Hydrogen Production in High Solar Energy Index Regions, *International Journal of Hydrogen Energy*, Cilt. 44(51), s. 27713-27725. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2019.09.011
- [2] Karafil, A., Özbay, H., Kesler, M. 2016. Sıcaklık ve Güneş Işınım Değişimlerinin Fotovoltaik Panel Gücü Üzerindeki Etkilerinin Simülasyon Analizi. *EEB 2016 Elektrik-Elektronik ve Bilgisayar Sempozyumu*, 11-13 Mayıs, Tokat, 106-111.
- [3] Nguyen, K.H., Kakinaka, M. 2019. Renewable Energy Consumption, Carbon Emissions, and Development Stages: Some Evidence from Panel Cointegration Analysis, *Renewable Energy*, Cilt. 132, s. 1049-1057. DOI: 10.1016/j.renene.2018.08.069
- [4] Lehtola, T., Zahedi, A. 2019. Solar Energy and Wind Power Supply Supported by Storage Technology: A Review, *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, Cilt. 35, s. 25-31. DOI: 10.1016/j.seta.2019.05.013
- [5] Ullah, A., Imran, H., Maqsood, Z., Butt, N.Z. 2019. Investigation of Optimal Tilt Angles and Effects of Soiling on PV Energy Production in Pakistan, *Renewable Energy*, Cilt. 139, s. 830-843. DOI: 10.1016/j.renene.2019.02.114
- [6] Reimuth, A., Locherer, V., Danner, M., Mauser, W. 2020. How Do Changes in Climate and Consumption Loads Affect Residential PV Coupled Battery Energy Systems?, *Energy*, Cilt. 198, s. 117339. DOI: 10.1016/j.energy.2020.117339
- [7] Ünlü, M., Çamur, S., Arifoğlu, B. 2015. Fotovoltaik Enerji Dönüşüm Sistemlerinde Parçalı Gölgeleme Durum Analizi, *Elektrik Enerji, Elektrik, Aydınlatma, Elektronik ve Otomasyon Mühendisliği Dergisi*, Cilt. 314, s. 83-87.
- [8] Teo, J.C., Tan, R.H., Mok, V.H., Ramachandaramurthy, V.K., Tan, C. 2020. Impact of Bypass Diode Forward Voltage on Maximum Power of A Photovoltaic System Under Partial Shading Conditions, *Energy*, Cilt. 191, s. 116491. DOI: 10.1016/j.energy.2019.116491
- [9] Satpathy, P.R., Sharma, R. 2020. Parametric Indicators for Partial Shading and Fault Prediction in Photovoltaic Arrays With Various Interconnection Topologies, *Energy Conversion and Management*, Cilt. 219, s. 113018. DOI: 10.1016/j.enconman.2020.113018
- [10] Silvestre, S., Boronat, A., Chouder, A. 2009. Study of Bypass Diodes Configuration on PV Modules, *Applied Energy*, Cilt. 86(9), s. 1632-1640. DOI: 10.1016/j.apenergy.2009.01.020
- [11] Wen, Z., Chen, J., Cheng, X., Niu, H., Luo, X. 2019. A New and Simple Split Series Strings Approach for Adding Bypass Diodes in Shingled Cells Modules to Reduce Shading Loss, *Solar Energy*, Cilt. 184, s. 497-507. DOI: 10.1016/j.solener.2019.03.099
- [12] Abdulazeez, M., Iskender, I. 2011. Simulation and Experimental Study of Shading Effect on Series and Parallel Connected Photovoltaic PV Modules. In 7th IEEE International Conference on Electrical and Electronics Engineering (ELECO), 1-4 December, Bursa, I-28-I-32.
- [13] Karafil, A., Özbay, H. 2017. Investigation of the Effect of Partial Shadowing With Solar Array Simulator. *International Conference on Advances and Innovations in Engineering (ICAIE)*, 10-12 May, Elazığ, 424-427.
- [14] Yin, O.W., Babu, B.C. 2018. Simple and Easy Approach for Mathematical Analysis of Photovoltaic (PV) Module Under Normal and Partial Shading Conditions, *Optik*, Cilt. 169, s. 48-61. DOI: 10.1016/j.ijleo.2018.05.037
- [15] Karaca, M., Mamizadeh, A., Genc, N., Sular, A. 2019. Analysis of Passive Filters for PV Inverters Under Variable Irradiances. In 8th IEEE International Conference on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA), 3-6 November, Brasov, 680-685.
- [16] Teo, J.C., Tan, R.H., Mok, V.H., Ramachandaramurthy, V.K., Tan, C. 2018. Impact of Partial Shading on the PV Characteristics and the Maximum Power of A Photovoltaic String, *Energies*, Cilt. 11(7), s. 1860. DOI: 10.3390/en11071860
- [17] Hu, K., Cao, S., Li, W., Zhu, F. 2019. An Improved Particle Swarm Optimization Algorithm Suitable for Photovoltaic Power Tracking Under Partial Shading Conditions, *IEEE Access*, Cilt. 7, s. 143217-143232. DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2944964
- [18] Ma, J., Pan, X., Man, K. L., Li, X., Wen, H., Ting, T.O. 2018. Detection and Assessment of Partial Shading Scenarios on Photovoltaic Strings, *IEEE Transactions on Industry Applications*, Cilt. 54(6), s. 6279-6289. DOI: 10.1109/TIA.2018.2848643