

FOTOVOLTAİK GÜÇ SİSTEMLERİNDE VERİMLİLİĞİ ETKİLEYEN PARAMETRELER

Mutlu BOZTEPE

Ege Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Müh. Bölümü, Bornova, İzmir
E-posta: mutlu.boztepe@ege.edu.tr

ÖZET

Bir fotovoltaik güç sisteminde verimlilik pek çok parametreye bağlıdır. Bu parametrelerin karakteristik özelliklerini bilmeden sisteme etkilerini minimize etmek veya ortadan kaldırmak mümkün değildir. Bu çalışmada şebekeye bağlı bir fotovoltaik sistemin performansını, yaşam ömrünü ve ürettiği enerji miktarını etkileyen en önemli parametreler incelenmiş, onların sisteme etkileri ortaya konulmaya çalışılmış, performansı yüksek tutmak için nasıl bir tasarım yapılması gerektiği hakkında önerilerde bulunulmuştur.

1. GİRİŞ

Almanya'nın kurulu fotovoltaik (FV) güç santrali kapasitesi 2015 yılı itibarıyla ülkemizden yaklaşık 150 kat daha fazladır ve FV santrallerden yılda elde ettiği 38.432 GWh'lik enerji elektrik tüketiminin %5,4'ünü karşılamaktadır [1]. Aynı dönemde ülkemizde FV santrallerden 194,1 GWh elektrik enerjisi elde edilmiş ve tüketimimizin sadece %0,07'sini karşılamıştır. [2]. Eğer Almanya'daki FV santraller ülkemizde kurulu olmuş olsa idi, ülkemizin Almanya'dan yaklaşık 1,5 kat daha fazla güneş enerjisi potansiyeli olduğunu kabul edersek [3] elektrik tüketimimizin yaklaşık %21,6'sını karşılayabilirdi. Görüleceği üzere FV güç santrallerinin ülkemizde ciddi bir enerji potansiyeli vardır ve bunun sonucu olarak son yıllarda ülkemizde Güneş Enerjisi Santrali (GES) kurulumu ivme kazanmıştır. Maksimum faydayı sağlayabilmek için bu santrallerin mümkün olan en yüksek verimde çalışacak şekilde ve performansı etkileyen faktörler dikkate alınarak tasarlanması gereklidir. Bu makalede söz konusu sistem parametreleri birer birer analiz edilecek ve sistem performansına etkisi ortaya konulacaktır.

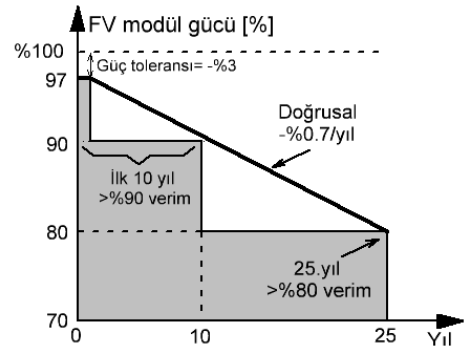
2. GÜNEŞ PANELLERİ

Güneş panelleri 36 veya daha çok güneş gözesinin seri bağlanmasıyla oluşturulur ve laminasyon tekniğiyle hermetik olarak paketlenerek dış ortamın bozucu etkilerinden uzun yıllar (~25 yıl) etkilenmemesi sağlanır. Bir FV güç sisteminin ömrünü FV panellerin ömrü belirlediğinden mümkün olduğunca uzun ömürlü güneş panelleri tercih edilmelidir. Genel olarak çoğu üretici 25.yılda %80 panel gücünü garanti etmektedir. Birçoğu güçteki azalmayı doğrusal olarak ifade

ederken bazıları ise 10.yılda %90 ve 25.yılda %80 güç garantisi şeklinde kademeli düşüş olarak belirtmektedir. Şekil-1'den de açıkça görüleceği üzere doğrusal düşüş kademeli düşüşe göre daha geniş bir garanti kapsamını ifade ettiğinden tercih edilmelidir.

Diğer yandan FV panellerin güç toleransı $\pm 2,5$ ile ± 5 arasında değişmektedir. Örneğin 300W'lık bir panelin güç toleransı %3 ise gerçek gücü 291W ile 309W arasında olabilir. Bu durum bir FV sistemde uyumsuzluk (mismatch) kayıplarını arttıran bir etkidir ve dolayısıyla toleransı düşük panellerin kullanılması uygun olacaktır.

Transformatörsüz bir evirici ile kullanılacak kristal Si teknoloji FV panellerin çerçeve, cam gibi topraklanmış kısımlarında pozitif bir yük birikimi oluşabilmekte ve Potential Induced Degredation (PID) adı verilen etki ile modül gücü %30'a varan oranlarda azalabilmektedir. Bu nedenle trafosuz evirici kullanılacak sistemlerde PID testinden onay almış FV panellerin tercih edilmesi önemlidir. Aynı etki ince film teknolojisinde Transparent Conductive Oxide (TCO) tabakasının kalıcı kasar görmesine yol açtığından dikkatli olunmalıdır.



Şekil-1: FV panel garanti süreleri

Panel verimi ile panel alanı birlikte düşünülmesi gereken iki parametredir. Eğer alan sınırlı ise maksimum kurulu güce ulaşabilmek için en verimli panelleri kullanmak gerekir. Şekil-2’de farklı teknolojilere sahip ticari panellerin verimleri karşılaştırılmıştır [4]. Buna göre Heterojunction with Intrinsic Thin layer (HIT) ve Interdigitated Back Contact (IBC) teknolojilerinin verimleri diğer teknolojilere göre oldukça yüksektir. Ayrıca yüksek verimli HIT ve IBC teknolojilerinde gücün sıcaklığa bağımlılık katsayısı da geleneksel teknolojilerden daha düşüktür ve dolayısıyla yıl boyunca sıcaklığın yüksek olduğu yerlerde avantajları daha çok ortaya çıkar. Panel seçiminde ölçüt olarak sadece verim değerini kullanmak yerine kurulacak FV sistemin yaşamı boyunca üreteceği toplam enerjiyi çeşitli benzetim programlarıyla hesaplayarak göz önüne almak daha doğru olacaktır, çünkü bu durumda panellerin ömürleri ve yaşlanma süreçleri de hesaba dahil edilmiş olmaktadır. Diğer yandan yakın gelecekte Şekil-3’te görülen çok eklemli güneş pillerinin pazara girmesiyle >%45 verimli güneş panelleri kullanılması mümkün olabilecektir.

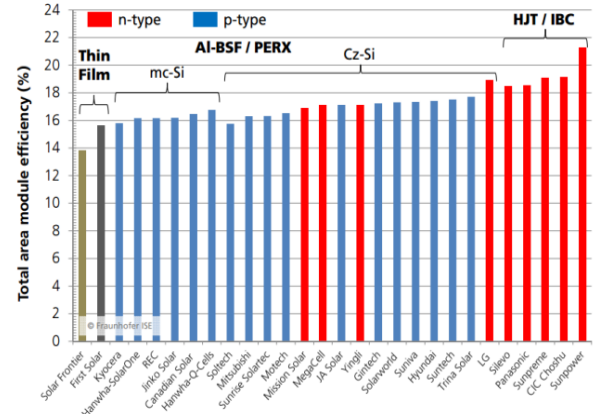
a. Maksimum Güç Noktası İzleme

Seri ve paralel direnç ihmal edilirse bir güneş panelinin akım gerilim ilişkisi şöyle ifade edilebilir

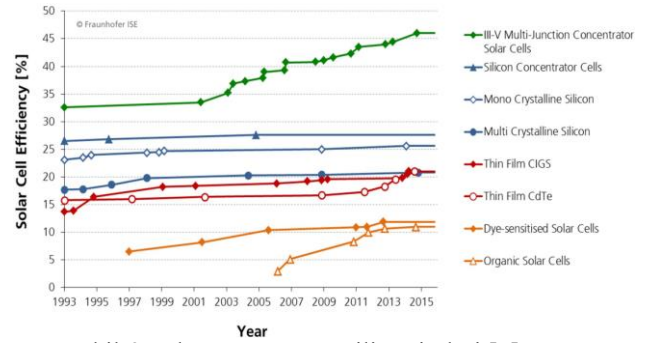
$$I_{PV} = I_L - I_S \left(e^{\frac{qV_{PV}}{nkT}} - 1 \right) \quad (1)$$

Burada V_{PV} ve I_{PV} sırasıyla güneş panelinin gerilimi ve akımı, I_L ışık akımı, I_S diyot doyma akımı, q elektron yükü, k Boltzman sabiti, n diyot faktörü ve T hücre sıcaklığıdır. Işınım $G=100-1000\text{W/m}^2$ arasında ve hücre sıcaklığı $T_c=0-75^\circ\text{C}$ arasında değişirken 36 elemanlı tipik bir FV panelin maksimum güç noktasının (MGN) değişimi Eşitlik (1) yardımıyla hesaplanmış ve Şekil 4 elde edilmiştir. Görüldüğü gibi FV panelin MGN’si çok geniş bir aralıkta hareket etmektedir. Dolayısıyla eğer MGN noktası takip edilmez ise panel çıkış gücü ve dolayısıyla verimi ciddi oranda düşebilir. Bu yüzden bir eviricinin çok iyi bir MGN izleyiciye sahip olması gerekir. Günümüzde en çok kullanılan yöntem Değiştir ve Gözle (D&G) algoritmasıdır ve normal çalışmada >%99 MGN izleme verimi elde edilebilmektedir.

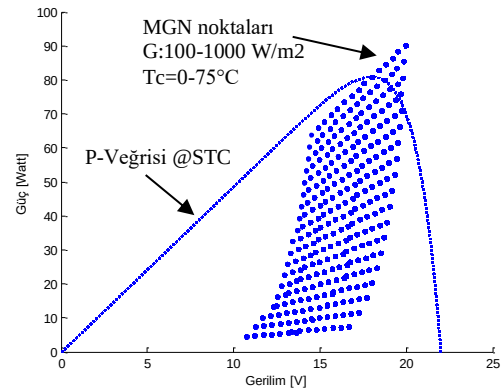
Ancak kısmi gölgeleme durumunda P-V eğrisi önemli ölçüde değişebilir. Örneğin Şekil-5’te görüldüğü gibi ışınım 1000W/m^2 iken sadece bir hücrenin bile gölgelemesi (örnekte gölgelemiş hücre ışınımı 100W/m^2 alınmıştır) iki tepe oluşmasına sebep olur ve geleneksel MGN izleyiciler en yüksek gerilimdeki tepeyi izleyeceğinden panelin gücü önemli oranda düşer.



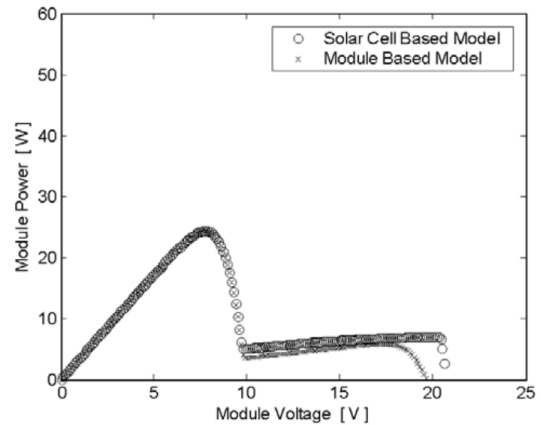
Şekil-2 Ticari güneş paneli verimleri [4]



Şekil-3 Laboratuvar güneş pili verimleri [4]



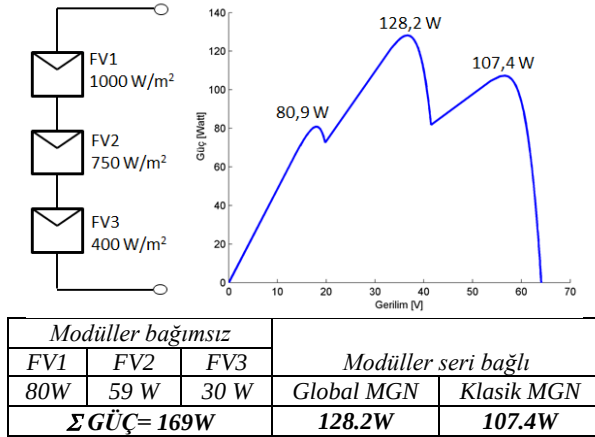
Şekil-4: MGN değişimi



Şekil-5: Kısmi gölgeleme etkisi [5]

Bu yüzden son yıllarda global MGN izleyiciler üzerinde çalışmalar yoğunlaşmıştır. Bu izleyiciler P-V eğrisini çeşitli yöntemlerle tarayarak en büyük güce sahip tepeyi bulabilmektedirler.

Global MGN izleyiciler kısmi gölge sorununu çözüyor gibi görünse de, Şekil-6'da görüldüğü gibi, farklı ışınımlara sahip 3 FV panel seri bağlandığında global MGN izleyiciler 128,2W gücünde çalışırken, bütün panellerin tek tek güçlerinin toplamı 169 W değeri ile ondan daha fazla olmaktadır. Bu sonuç, “dağıtılmış MGN izleyici (DMGN)” kavramını ortaya çıkarmıştır ve kısmi gölgelemenin kaçınılmaz olduğu bir sistemde en iyi performansı bu yöntem sağlamaktadır. Ancak bu yöntem hem maliyetlidir hem de kısmi gölgeleme oluşmayan sistemlerde bir faydası olmadığı gibi aksine üzerinde oluşan kayıplardan dolayı performans düşüklüğü bile meydana getirebilir. Dolayısıyla sadece ciddi oranda gölgeleme etkisi olan sistemlerde kullanımı uygundur.



Şekil-6: DMGN izleme

b. Sıcaklığın etkisi

Bir FV panelin hücre sıcaklığı (T_c), istenilen bir hava sıcaklığı (T_a) ve ışınlam (G) değeri için NOCT sıcaklığı kullanılarak tahminlenebilir.

$$T_c = T_a + \frac{NOCT - 20}{0.8} G(kW / m^2) \quad (2)$$

Bulunan sıcaklık değeri, panel gücünün sıcaklığa bağımlılık katsayısı μ_p ile birlikte kullanılarak panelin çıkış gücü hesaplanabilmektedir.

$$P_m(T_c) = P_{m,STC} [1 - \mu_p (T_c - 25)] \quad (3)$$

Burada $P_{m,STC}$ standart test koşullarındaki (STC) panel gücüdür. FV panellerde NOCT sıcaklığı 42-52°C arasında değer almaktadır. Paneller arasındaki bu 10°C'lik fark, sıcaklığa bağımlılık katsayısı $\mu_p=0.38-0.45$ %/K arasında kabul edilirse %3.8-4.5 arasında bir güç farklılıkları ortaya çıkarır ki bu önemli bir miktardır. Dolayısıyla panel seçiminde NOCT sıcaklığı ile gücün sıcaklığa bağımlılık katsayısı birlikte değerlendirilmeli ve sıcaklıktan en

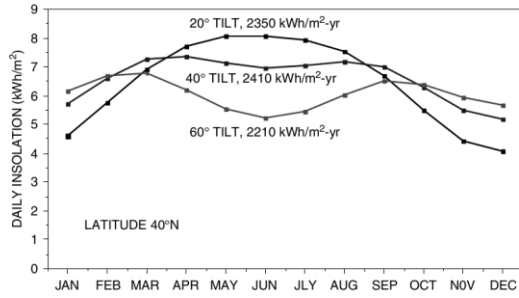
az etkilenenler seçilmeye çalışılmalıdır. Böylece sıcaklığın yüksek olduğu zamanlarda performans düşüşü azaltılmış olacaktır.

c. DC kablolama

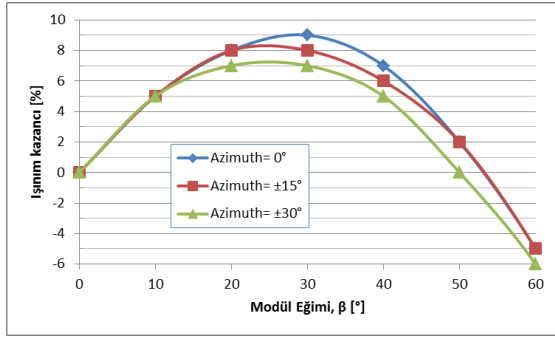
Bir elektrik tesisatında kablo kesiti çalışma voltajına, akım taşıma kapasitesine, gerilim düşümü ve kısa devre hesaplarına göre seçilir. FV sistemlerin tesisatında da aynı yöntem geçerlidir ancak kablo üzerindeki güç kaybını %1 ile sınırlamak genel olarak tercih edilir. Bunun için dc devrede gerilim düşümü <%1 olacak şekilde bir iletken seçimi yapılması yeterli olacaktır. Çok sayıda dizi bulunan ve farklı kesitlerde iletkenlerin olduğu durumda ise en genel yöntem olarak MGN akımında bütün iletkenlerin üzerinde düşen I^2R kayıpları bulunur ve toplam panel gücüne oranlanır. Bulunan değer %1'i geçmemelidir. 12-48V gibi düşük gerilimli sistemlerde %1 güç kaybını elde etmek için gerekli iletken kesitleri çok büyük olabilir. Bu gibi durumlarda kayıp oranının %1'i biraz geçmesine izin verilebilir veya paralel iletkenler kullanılabilir. Burada dikkat edilmesi gereken nokta kablo kayıpları arttığı oranda FV sistem enerji üretimi azalmaktadır.

a. FV Panel yerleşimi

Panel yüzeyine düşen güneş radyasyonu toplamı ne kadar çok olursa, elektrik üretimi de o kadar çok olacaktır. Dolayısıyla panel yerleşimi FV sistem için en başta gelen konulardan birisidir. Bundan sonraki analizlerde panel doğrultusunun güneyi gösterdiği yani azimut açısının sıfır olduğu kabul edilecektir, çünkü ancak bu durumda gelen güneş radyasyonu maksimize edilebilir. Şekil-7'de bir FV panelin farklı eğim açılarında yüzeyine düşen güneş radyasyonunun yıllık değişimi çizilmiştir. Örnekte görüldüğü gibi eğim yükseldikçe yaz aylarında ışınlam azalırken kış aylarında artmaktadır. Bir güneş santrali yıl boyunca sürekli çalışacağı için yıl boyunca toplamın en büyük olduğu değer seçilmelidir. Açık gökyüzü ışınlam hesaplarına göre bu değer $E_{gim} = E_{nlem}$ olarak ortaya çıkmaktadır. Ancak açık gökyüzü ışınlamında bulutlanma, yağmur, kar vb. gibi etkiler olmadığından dengeli olmak yerine yaz aylarına biraz ağırlık verilmesi, yani $E_{nlem} - 10 < E_{gim} < E_{nlem}$ arasında bir seçim yapılması daha uygun olacaktır. Şekil-8'de İzmir Bornova için ölçülmüş ışınlam değerleri kullanılarak yapılan hesaplama sonucunda [6] yaklaşık 30°'lik bir eğimin optimum olduğu bu eğimde çalışan bir panelin yatay bir panele göre yıllık bazda %9 civarında bir enerji kazancı sağlayabileceği görülmektedir. Yine aynı grafikte görüldüğü gibi en yüksek kazanç yüzey azimutunun 0° olduğu durumdur, yani panel doğrultusunun güneyi göstermesi en uygun olanıdır.



Şekil-7 Yıllık ışıının eğime bağımlılığı [7]



Şekil-8: Işıının kazancının eğim ile değişimi

Panel yüzeyine gelen güneş radyasyonunu daha da artırmak için güneş takip sistemleri tercih edilebilir. İzleyici elektromekanik sistemin kayıpları nispeten yüksek olduğu için küçük güçlü FV sistemlerde izleme yapmak avantajlı olmayabilir. Hossein ve ark. yaptığı bir çalışmada [8] toplam enerjinin %2-3'ünün izleme için harcadığı belirtilmektedir. Muğla Ü. Kampüsünde yapılan bir 2-eksenli izleme uygulamasında da sabit eğimli sisteme nazaran %30,79 kazanç elde edildiği rapor edilmiştir [9].

d. Uyumsuzluk (Mismatch) kayıpları

FV paneller seri bağlı hücrelerden meydana gelir. Şebekeye bağlı bir FV sistemde eviriciye uygun bir gerilim seviyesine ulaşmak için onlarca FV panel seri bağlandığından, bu durum yüzlerce hücrenin birbirlerine seri bağlı durumda ve aynı DC akımda çalışması demektir. Burada uyumsuzluk kayıplarının olmaması için bütün hücrelerin MGN akımının aynı olması gerekir ki, uygulamada panellerin farklı çalışma koşulları altında bulunması ve üretim toleransları yüzünden bu mümkün olmaz ve mutlaka bir uyumsuzluk kaybı ortaya çıkar. Kaushika ve ark.'nın [10] yaptığı bir çalışmada uyumsuzluk kayıplarının başlangıçta %2 civarında olduğu ve paneller yaşlandıkça %12'lere kadar çıkabileceği belirtilmektedir. Önceki bölümde değinilen üretim toleransları ve sıcaklığın yanında ışıının farklılıkları da uyumsuzluk kaybına neden olan önemli etkenlerden birisidir.

Bir FV panelin kısa devre akımı ışıının doğruşal bir fonksiyonudur ve sıcaklığın etkisi ihmal edilirse şu şekilde hesaplanabilir,

$$I_{sc} = I_{sc,STC} \frac{G_T (W/m^2)}{1000(W/m^2)} \quad (4)$$

Eşitlikte $I_{sc,STC}$ standart koşullardaki (STC) kısa devre akımı, G_T ise panel yüzeyine düşen toplam ışıındır ve direkt ile difüz bileşenlerden meydana gelmektedir. Difüz bileşen kendi içinde gökyüzünden ve yeryüzünden yansıyan olmak üzere ikiye ayrılır. Buna göre yatay düzleme gelen direkt (G_b) ve difüz (G_d) ışıının değerleri bilinirse herhangi bir β eğimine sahip bir yüzeyde toplam ışıının (G_T) aşağıdaki formülle hesaplanabilir [11].

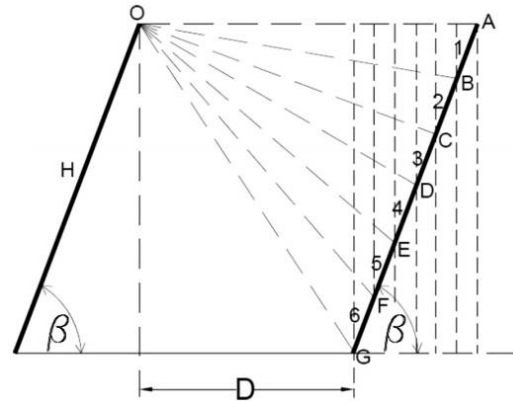
$$G_T = \overbrace{G_b R_b}^{\text{Direkt}} + \overbrace{G_d \left(\frac{1 + \cos \beta}{2} \right)}^{\text{Gökyüzünd en}} + \overbrace{(G_b + G_d) R_u \left(\frac{1 - \cos \beta}{2} \right)}^{\text{Yeryüzünd en}} \quad (5)$$

Burada R_u yerin yansıtma katsayısı olup toprak yüzeyler için 0.14-0.20 arasında bir değer alınabilir. R_b parametresi eğimli yüzeye güneş geliş açısı θ ile zenith açısı θ_z 'in kosinüslerinin oranına eşittir ($R_b = \cos \theta / \cos \theta_z$).

Peled ve ark.'nın [12] Şekil-9'daki gibi arka arkaya yerleştirilmiş paneller için yaptıkları ışıının hesabında difüz bileşenleri birleştirerek aşağıdaki formülü kullanmışlardır,

$$G_T = G_b + F_{sky} G_d \quad (6)$$

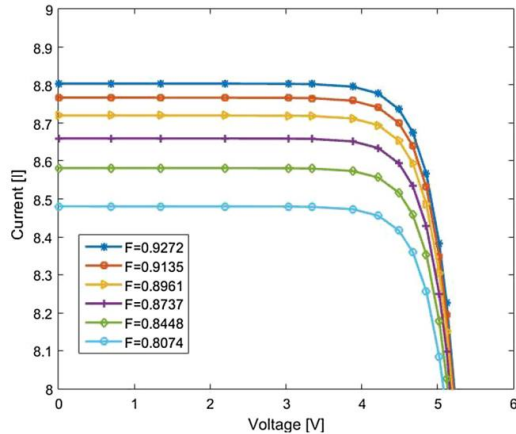
Eşitlikte F_{sky} parametresi panelin görüş faktörü (view factor) olarak adlandırılmıştır ve $\beta=30^\circ$, $D=1.0$ m, $H=0.942$ m ve %30 difüz ışıının oranı için hesaplanan F_{sky} kaysayıları 1'den (en üst) 6'ya (en alt) kadar olan paneller için akım-gerilim eğrileri ile birlikte Şekil-10'da verilmiştir. Hemen fark edileceği üzere direkt bileşen bütün panellere aynı oranda ulaşırken (yani gölgeleme yok), gökyüzünden yansıyarak gelen difüz ışıının farklılaşmaktadır çünkü öndeki panel grubu arkadakini perdelemekte ve gökyüzünü görme açısını daraltmaktadır. Sonuçta panellerin akımları farklılaşarak uyumsuzluk kayıplarını artırmaktadır. Çalışmaya göre $\beta=20^\circ$ ve %30 difüz ışıının olan bir yerde akım farklılıkları %1.81 olarak hesaplanırken, bu değer $\beta=50^\circ$ ve %70 difüz ışıının olan bir yerde %19.82'ye kadar çıkabilmektedir. Dolayısıyla panel yerleşiminde çok yüksek boylu ve dar aralıklı yerleşimden uzak durmak bu türlü kayıpları azaltacaktır.



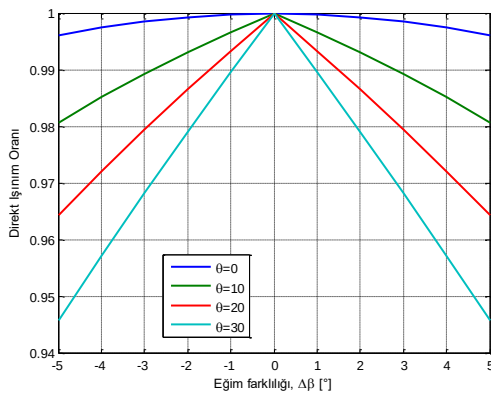
Şekil-9: Panel yerleşimi [12]

Benzer şekilde panel düzlemlerinin (yani β eğimi ve azimut açılarının) aynı olmaması da direkt ışıının ve dolayısıyla akımların farklılaşmasına yol açmaktadır. Eğimleri arasında $\Delta\beta$ kadar farklılık olan iki panel grubunun R_b katsayıları oranı yaklaşık olarak $\cos \theta \mp |\Delta\beta| / \cos \theta$ alınırsa direkt bileşen için ışıının oranları $\theta = \{0^\circ, 10^\circ, 20^\circ, 30^\circ\}$ geliş açıları için Şekil-11'deki gibi elde edilir. Görüldüğü üzere geliş açısının büyük olduğu durumlarda eğim farklılıklarının etkisi daha fazladır. Özellikle kış aylarında geliş açısı daha büyük değerler alacağından $\Delta\beta = 5^\circ$ eğimde %5'lere varan oranda ışıının farklılığı ortaya çıkabildiği görülmektedir. Bu farklılık direkt bileşenin toplam ışıınındaki oranına göre uyumsuzluk kaybı oluşturacaktır. Dolayısıyla FV panelleri tam güneye yönelmiş ve en fazla $\pm 1-2^\circ$ eğim farklılıkları ile aynı düzlemde yerleştirmenin uygun olacağı söylenebilir.

Hücre sıcaklığı ile hücre gerilimi arasında ters orantı olduğundan paneller arasındaki sıcaklık farklılıkları da uyumsuzluk kaybı oluşturabilir. Bu etkinin merkezi eviricilerde olduğu gibi birbirine paralel bağlı dizilerin olduğu FV sistemlerde daha fazla olacağı söylenebilir.



Şekil-10: Difüz gölgelemede I-V eğrileri [12]



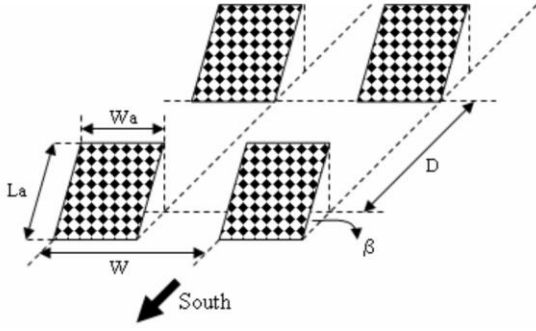
Şekil -11: Eğim farklılıkları

Diğer yandan Eşitlik (3)'teki $P_m(T_c)$ denkleminde de görüleceği üzere sıcaklığın yükselmesi gücü azaltmaktadır. Bu nedenle panellerin sıcaklığının çok artmamasını sağlayacak ve ısı atımına imkân verecek bir mekanik yerleşim tercih edilmelidir. Örneğin 3° 'lik bir sıcaklık düşüşü FV sistem üretimini yaklaşık %1 oranında artırabilir.

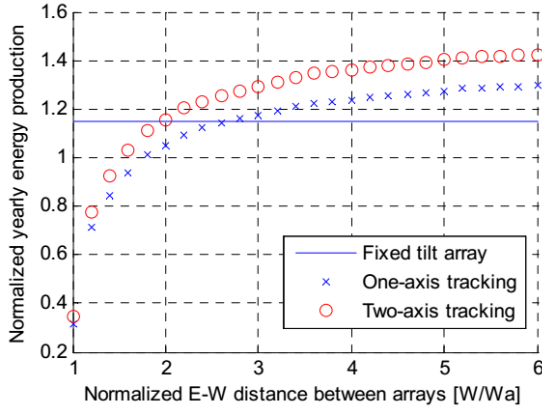
Bir FV sistemde uyumsuzluk etkisi, güç-gerilim eğrisini etkiler ve küçük lokal tepeler oluşturabilir. Bu durumda MGN izleyici algoritmasının bu küçük lokal tepeye takılması nedeniyle maksimum güce ulaşmaması sonucu MGN izleme kayıpları da ortaya çıkabilir. Bu nedenle bir FV sistem tasarımında uyumsuzluk etkisi mutlaka ciddiye alınmalıdır. Bazı sistemlerde FV paneller MGN akımlarına göre gruplandırmakta ve MGN akımları birbirine yakın olan paneller aynı dizide seri bağlı olarak kullanılarak uyumsuzluk kayıplarının düşük olması sağlanmaktadır.

e. Arazi kullanımı ve gölgeden kaçınma

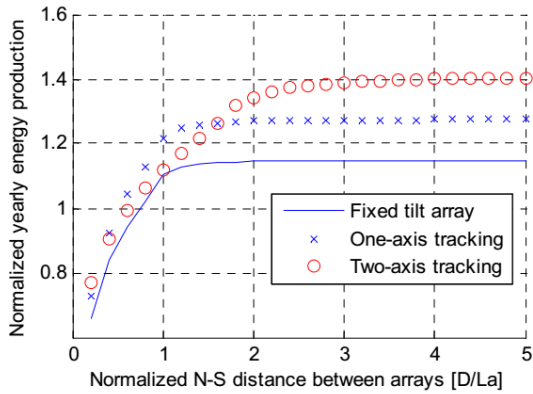
Kısmi gölgeleme Şekil-5'te görüldüğü gibi güç-gerilim eğrisini ciddi biçimde etkilemektedir. Bu yüzden gölgelemeden mutlak surette kaçınmak önemlidir. Ancak bazı uygulamalarda arazi kısıtlı olabilir ve mümkün olan en çok FV paneli en az arazi kullanacak şekilde yerleştirmek ihtiyacı doğabilir. Bu durumda Şekil-12'de gösterildiği gibi arka arkaya ve yan yana olan panel gruplarının birbirlerini gölgeleme etkisini incelemek gereklidir. Boztepe ve ark. [13] yaptığı bir çalışmada güneye yönelmiş sabit eğimli, tek eksenli güneş izlemeli ve 2 eksenli güneş izlemeli olmak üzere 3 farklı sistem için gölgeleme etkisi analiz edilmiş ve elde edilen sonuçlar Şekil-13 ve 14'te yatay düzlemdeki duruma göre normalize edilerek verilmiştir. Şekil 13'ten yıl boyunca optimum bir sabit eğimde çalışan sistemden daha fazla enerji üretilmesi için yan yana paneller arası mesafenin 2 eksenli güneş izleyen sistem için en az panel genişliği kadar, tek eksenli izleyen sistem için en az 2 katı olması gerektiği görülmektedir. Şekil-14'ten arka arkaya mesafelerin ise tek eksenli izleme için en az panel uzunluğu kadar, 2 eksenli izlemeli sistem için en az panel uzunluğunun 2 katı kadar olması gerektiği görülmektedir. Bu sonuçlar açık gökyüzü güneş ışıını kullanarak İzmir Bornova için yapılmıştır ve farklı enlemlerde farklı sonuçlar elde edilebilir. Bu yüzden panel yerleşiminin bir simülasyon programı ile detaylı olarak irdelenmesi ve gölgeleme ve uyumsuzluk kayıplarının dikkate alınarak tasarım yapılması oldukça önemlidir.



Şekil-12: Panel yerleşim ölçüleri [13]



Şekil 13: Paneller arası yatay aralığın etkisi [13]

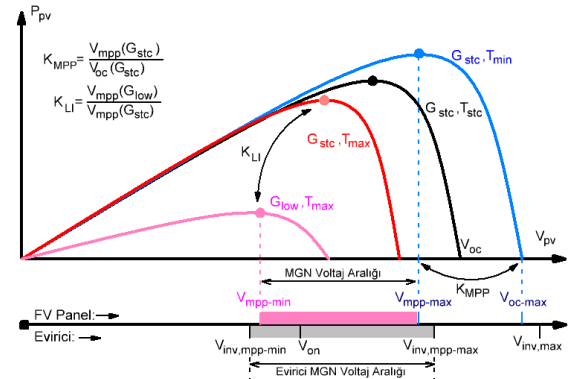


Şekil 14: Paneller arası dikey aralığın etkisi [13]

3. SİSTEM VERİMLİLİĞİ

Fotovoltaik güç sistemlerinde panel ve eviricinin uyumu performans oranını yüksek tutmak için oldukça önemlidir. Bu uyum simülasyon programlarından alınan detaylı raporlarla sağlanabileceği gibi FV panel sıcaklık katsayıları yardımıyla da hesaplanabilir. Örneğin açık devre geriliminin (V_{oc}) sıcaklığa bağımlılık katsayısı $\mu_{V_{oc}} = 0.0038 / ^\circ C$ olan bir FV panelde hücre sıcaklığı $T_c = -10^\circ C$ için hesap yapılırsa, V_{oc-max} gerilimi Standart Test Koşulları (STC) değerinden yaklaşık olarak %14 fazla olacaktır. Benzer şekilde $T_c = 60^\circ C$ için V_{oc-min} gerilimi de katalog değerinden %14 düşük olacaktır. Bu V_{oc-min} ve V_{oc-max}

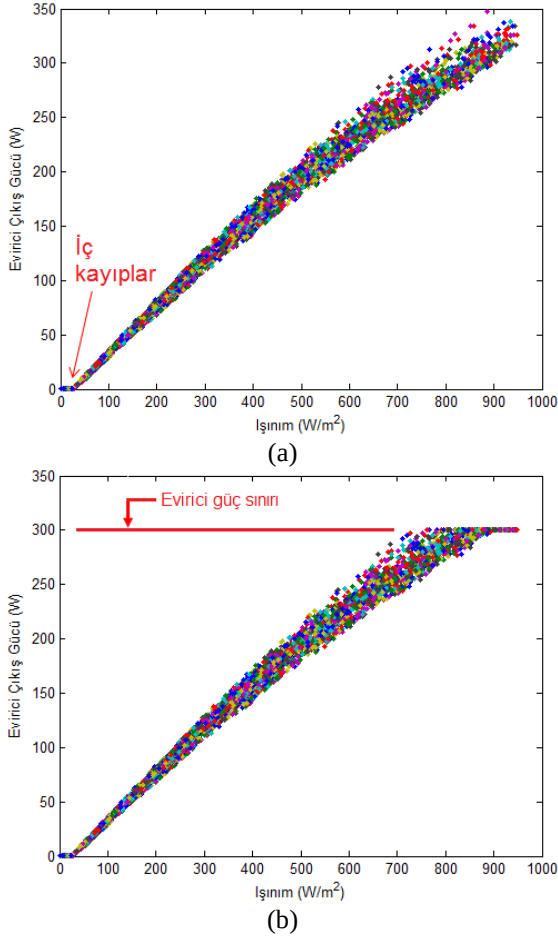
gerilimleri $K_{MPP} = V_m / V_{oc}$ oranıyla çarpılarak MGN geriliminin (V_m) STC koşullarındaki en büyük ve en küçük değerleri de bulunabilir [14]. Bu oran katalog bilgilerinden kolayca elde edilebilir ve bütün çalışma koşulları için yaklaşık sabit olduğu kabul edilmiştir. Diğer yandan ışıınım şiddeti de FV panel gerilimini etkilemektedir. En düşük ışıınım olarak 100 W/m^2 alınırsa STC koşullarına göre MGN gerilimi yaklaşık $K_{LI} = 0.88$ oranında azalmaktadır [14]. Böylece FV panelin maksimum V_{oc} gerilimi ve MGN gerilim aralığı Şekil 15'te gösterildiği gibi elde edilir. Aynı şekil üzerinde eviricinin gerilimleri de bulunmaktadır. Görüldüğü üzere eviricinin MGN voltaj aralığı, FV panelin MGN voltaj aralığını kapsamaktadır. Eğer aksi olursa MGN izleme her koşulda gerçekleşemez ve güç kaybı yaşanır. Diğer yandan eviricinin maksimum dc giriş gerilimi ($V_{inv,max}$) kesinlikle aşılmamalıdır, aksi takdirde evirici arızalanır.



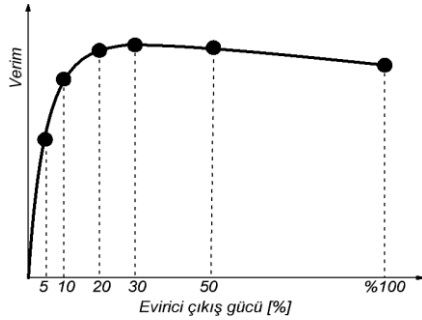
Şekil 15: FV panel ve evirici çalışma gerilimleri

Evirici gücü seçilirken FV panellerin üretebileceği maksimum güç hesaplanmalı ve evirici bu güce eşit veya daha büyük olacak şekilde seçilmelidir. Örneğin Şekil-16(a)'da bir yıllık ışıınım-çıkış gücü grafiği verilen FV sistem için 350W gücünde bir evirici yeterli olacaktır. Eğer evirici gücü 300W gibi düşük seviyede olursa Şekil-16(b)'de gösterildiği gibi güç sınırlaması olur ve performans düşer. Bu grafikler benzetim programları tarafından raporlanmaktadır ve bu grafiklere bakarak evirici gücünün uygunluğuna kolayca karar verilebilir.

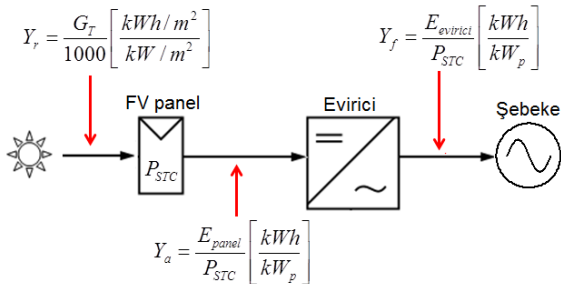
Verimliliği doğrudan etkileyen bir diğer konu da eviricinin DC-AC dönüşüm verimidir. Bilindiği üzere FV sistemler her zaman maksimum güçte çalışmazlar. Güneş ışıının şiddetine bağlı olarak gün boyunca gücü değişkendir. Bu nedenle evirici seçiminde sadece nominal güçteki verim değerini dikkate almak hatalı bir yaklaşım olacaktır. Bu yüzden Şekil 17'deki temsili verim eğrisi üzerinde gösterilen güçlerde verimin ağırlıklı ortalaması, bir başka deyişle "Avrupa Verimi, η_{EU} " tanımlanmıştır. η_{50} terimi %50 güçte evirici verimini göstermek üzere, Avrupa verimi aşağıdaki formülle hesaplanır.



Şekil 16: Yıllık ışınlam-çıkış gücü grafiği



Şekil 17: Avrupa verimi



Şekil-18: Performans oranı tanımlamaları

$$\eta_{EU} = 0.03\eta_{\%5} + 0.06\eta_{\%10} + 0.13\eta_{\%20} + 0.10\eta_{\%30} + 0.48\eta_{\%50} + 0.20\eta_{\%100} \quad (7)$$

Dolayısıyla evirici seçiminde Avrupa verimi yüksek olanın seçilmesi performansı yükseltecektir.

Evirici çıkışı AC kablo kesitini seçerken de gerilim düşümü ve akım taşıma kapasitesinin yanında omik kayıpların da dikkate alınması performansı daha da yükseltmek açısından uygun olacaktır.

4. PERFORMANS ORANI

Performans oranı bir verim katsayısı değildir. Kurulu güçten ve ışınlam şiddetinden arındırılmış bir başarımlı katsayısıdır. Böylece Dünya'nın çeşitli yerlerinde kurulu bulunan şebekeye bağlı FV güç sistemlerinin birbirleriyle karşılaştırılması mümkün hale gelmektedir. Şekil-18'de görüldüğü gibi sisteme giren güneş ışınlamı (Y_r) 1000 W/m²'ye normalize edilmekte ve sistemin ürettiği enerji (Y_f) ise kurulu güce oranlanmaktadır. Buna göre Performans oranı (PR) sistemin ürettiği enerjinin (Y_f) sisteme giren referans enerjiye (Y_r) oranı olarak tanımlanmaktadır

$$PR = \frac{Y_f}{Y_r} \quad (8)$$

Y_r 'den FV panelin ürettiği enerji olan Y_a çıkarılırsa panel kayıpları (capture loss) ($Y_r - Y_a$) olarak elde edilir; bunlara dc kablolama, MGN izleme verimi, uyumsuzluk kayıpları, toz ve kir kayıpları vb. dahildir. Benzer şekilde ($Y_a - Y_f$) ise sistem kayıplarını (system loss) temsil etmektedir. Benzetim programları bu iki kaybı da tablolar halinde her ay için rapor etmektedir ve performans düşüklüğü var ise bunun panellerden mi yoksa eviriciden mi kaynaklandığı bu bilgilerden tespit edilebilir.

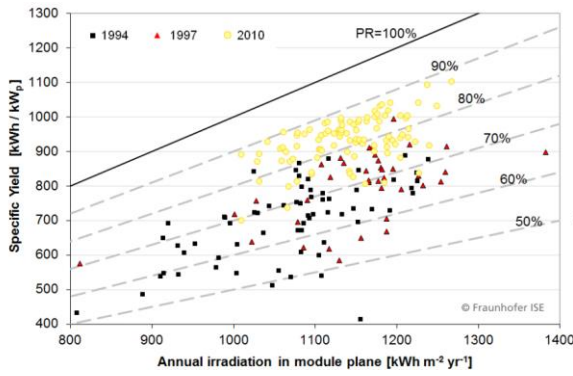
Şekil-19'da Almanya'da kurulu olan FV sistemlerin performans oranları yıllara göre gruplandırılarak gösterilmektedir [4]. Görüldüğü üzere 1990'larda %70 civarında olan PR değerleri 2010'larda %80-90 bandına yükselmiştir. Bunda evirici ve panel verimlerinin artmasının etkili olduğu söylenebilir. Öyleyse bugün kurulacak bir FV sistemde performans oranının >%85 olması hedeflenmelidir. Bir FV sistemde PR'nin sürekli ölçülmesi tavsiye edilir. Eğer düşük çıkarsa kaybı fazla olan bir elemana, arızalı bir elemana ya da elemanların uyumsuzluğuna işaretler ve mutlaka ciddiye alınmalıdır.

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada bir FV güç sistemin verimini etkileyen parametreler irdelenmiş ve performansı yüksek tutmak için gerekli önlemler tartışılmıştır. Buna göre FV panellerini ışınlam kazancı

maksimum olacak şekilde yerleştirmek, gölgelemeden mutlak surette kaçınmak ve panel-evirici uyumuna dikkat etmek önemlidir. Bunların dışında yüksek verimli FV panel ve evirici kullanmak gereklidir.

Görüldüğü üzere güneş santrallerinde üretilecek enerjinin hesabı pek çok parametreye bağılıdır ve mutlaka bir benzetim yapılarak tasarımın doğrulanması uygun bir yaklaşımdır. FV sistemler karmaşık mühendislik sistemleridir ve bu makalede belirtilen bütün hesaplamalar benzetim programı tarafından daha hassas matematiksel modellerle ve bir yıl boyunca her saat için yapıldığından gerçeğe daha yakın sonuçlar elde edilebilmektedir.



Şekil-19: FV sistemlerin PR değerleri [4]

6. KAYNAKLAR

- [1] Wikipedia, «https://en.wikipedia.org/wiki/Renewable_energy_in_Germany,» Erişim Tarihi:03.01.2017.
- [2] «Türkiye Elektrik Üretim ve İletim İstatistikleri 2015, TEİAŞ,» <http://www.teias.gov.tr/>.
- [3] M. Šuri, T. A. Huld, E. D. Dunlop ve H. A. & Ossenbrink, «Potential of solar electricity generation in the European Union member states and candidate countries,» *Solar energy*, cilt 81, no. 10, pp. 1295-1305, 2007.
- [4] Fraunhofer ISE, «Photovoltaic Report,» 2016.
- [5] E. Karatepe, M. Boztepe ve M. Colak, «Development of a suitable model for characterizing photovoltaic arrays with shaded solar cells,» *Solar Energy*, cilt 81, no. 8, pp. 977-992, 2007.
- [6] M. Boztepe, İzmir (Bornova) Koşullarında Şebekeye Bağlı bir Fotovoltaik Sistemin Tasarımı ve Denenmesi, Doktora Tezi, 2002.
- [7] G. M. Masters, *Renewable and Efficient Electric Power Systems*, John Wiley&Sons, 2004.
- [8] H. Mousazadeh, A. Keyhan, A. Javadi ve H.

Mobli, «A review of principle and sun-tracking methods for maximizing solar systems output,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, no. 13, pp. 1800-1818, 2009.

- [9] R. Eke ve A. Şentürk, «Performance comparison of a double-axis sun tracking versus fixed PV System,» *Solar Energy*, no. 86, pp. 2665-2672, 2012.
- [10] N. Kaushikaa ve A. K. Rai, «An investigation of mismatch losses in solar photovoltaic cell networks,» *Energy*, no. 32, pp. 755-759, 2007.
- [11] J. Duffie ve W.A.Beckman, *Solar Engineering of Thermal Processes*, John Wiley&Sons, 1980.
- [12] A.Peled ve J.Appelbaum, «Minimizing the current mismatch resulting from different locations of solar cells within a PV module by proposing new interconnections,» *Solar Energy*, no. 135, pp. 840-847, 2016.
- [13] M. Boztepe, E. Cetin, E. Deniz ve M. Colak, «Evaluation of Sun Tracking in Photovoltaic Arrays Using Shading Analysis,» %1 içinde *5th International Symposium on Electrical and Computer Systems*, Lefke, Turkish Republic of North Cyprus, November 27-28, 2008.
- [14] H.Haeberlin, «Optimum DC operating Voltage for Grid-connected Plants,» %1 içinde *20th European Photovoltaic Solar Energy Conference*, Barcelona, 2005.