

# Fotovoltaik Güç Sistemlerinde Verimliliği Etkileyen Parametreler-I

Doç. Dr. Mutlu Boztepe  
mutlu.boztepe@ege.edu.tr

## 1. GİRİŞ

Almanya'nın kurulu fotovoltaik (FV) güç santrali kapasitesi 2015 yılı itibariyle ülkemizden yaklaşık 150 kat daha fazladır ve bu FV santrallerden elde ettiği 38,432 GWh'lik enerji yıllık elektrik tüketiminin %5,4'ünü karşılamaktadır [1]. Aynı dönemde ülkemizde FV santrallerden 194,1 GWh elektrik enerjisi elde edilmiş ve yıllık 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]  $1,5 \times 38,432 = 57,648$  GWh elektrik enerjisi üretilebilirdi ve 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 gerekir. 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 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  $\pm 5$  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.

Trafosuz bir eviriciye bağlı FV panellerin çerçeve, cam gibi topraklanmış kısımlarında pozitif bir yük birikimi oluş-

şabilmekte ve bu durum kristal Si teknolojide Potential Induced Degredation (PID) adı verilen bir etki ile panel gücünü %30'a varan oranlarda düşürebilmektedir. Bu

nedenle trafosuz evirici kullanılacak sistemlerde PID testinden onay almış FV panellerin tercih edilmesi önemlidir. İnce film teknolojisinde ise aynı etki Transparent Conductive Oxide (TCO) tabakasının kalıcı kasar görmesine yol açtığından dikkatli olunmalıdır.

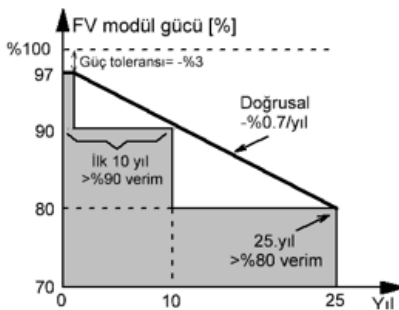
Panel verimi ile panel alanı birlikte düşünülmesi gereken iki parametredir. Eğer alan sınırlı ise maksimum kurulu güce ulaşabilmek için en verimli panelleri kullanmak gerekir. Şekil-2'de farklı teknolojilere sahip ticari panellerin verimleri karşılaştırılmıştır [4]. Buna göre Heterojunction with Intrinsic 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

$$I_{PV} = I_L - I_S \left( e^{\frac{qV_{PV}}{nkT}} - 1 \right) \quad \text{akım gerilim ilişkisi yandaki gibi ifade edilebilir (1)}$$

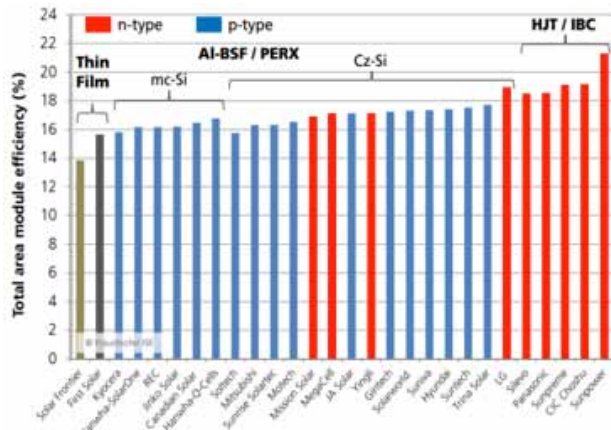
Burada VPV ve IPV sırasıyla güneş panelinin gerilimi ve akımı, IL ışık akımı, IS diyot doyma akımı, q elektron yükü, k Boltzman sabiti, n diyot faktörü



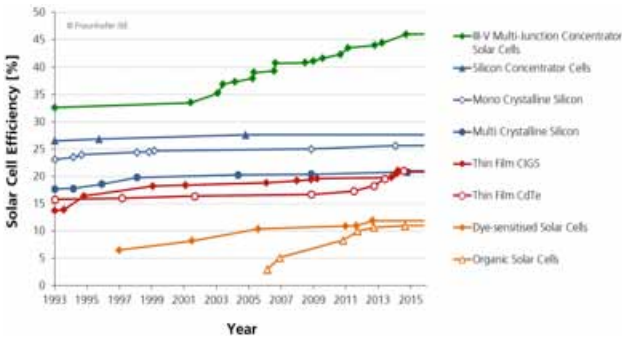
Şekil-1: FV panel garanti süreleri

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 Değişir 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  $1000\text{W/m}^2$  iken sadece bir hücrenin bile gölgelenmesi (örnekte gölgelenmiş hücre ışınımı  $100\text{W/m}^2$ 'dir) iki tepe oluşmasına sebep olur ve geleneksel MGN izleyiciler en yüksek gerilimdeki tepeyi izleyeceğinden panelin gücü önemli oranda düşer.



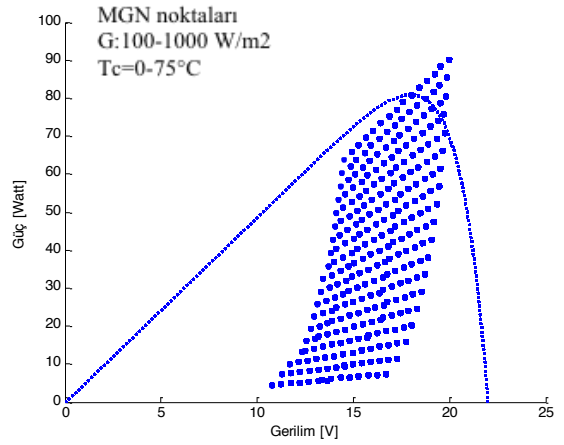
Şekil-2 Ticari güneş paneli verimleri [4]



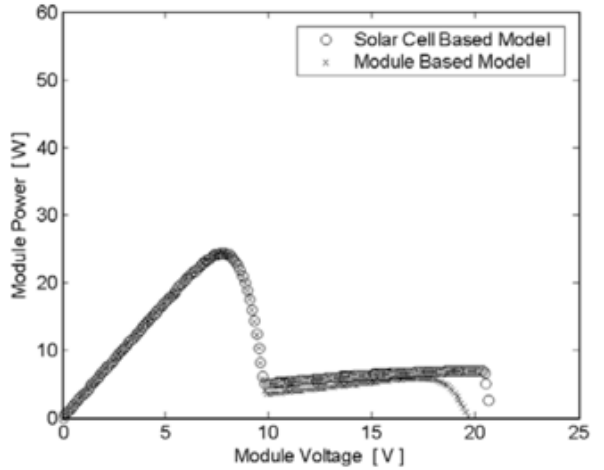
Şekil-3 Laboratuvar güneş pili verimleri [4]

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

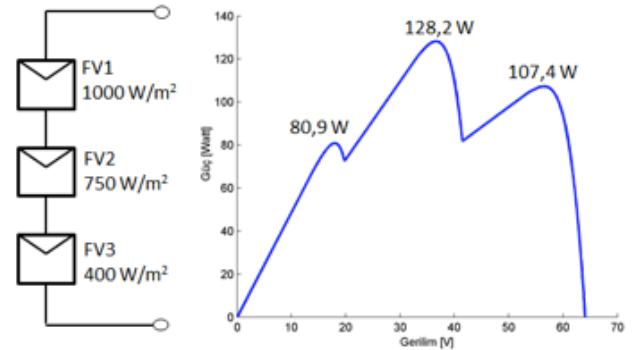
Global MGN izleyiciler kısmi gölge sorununu çözüyor gibi görünse de, Şekil-6'da görüldüğü gibi, farklı ışınımlara



Şekil-4: MGN değişimi



Şekil-5: Kısmi gölgeleme etkisi [5]



Modüller bağımsız			Modüller seri bağlı	
FV1	FV2	FV3	Global MGN	Klasik MGN
80W	59 W	30 W	128.2W	107.4W
<b>Σ GÜÇ= 169W</b>			<b>128.2W</b>	<b>107.4W</b>

Şekil-6: DMGN izleme

sahip 3 FV panel seri bağlandığında global MGN izleyiciler  $128,2\text{W}$  gücünde çalışırken, bütün panellerin tek tek güçlerinin toplamı  $169\text{W}$  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.

### b. Sıcaklığın etkisi

Bir FV panelin hücre sıcaklığı ( $T_c$ ), istenilen bir hava sıcaklığı ( $T_a$ ) ve ışınım ( $G$ ) 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  $\mu_p$  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.

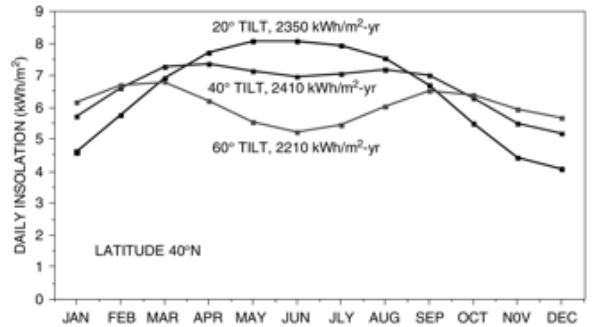
### c. DC kablolama

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<sup>2</sup>R 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.

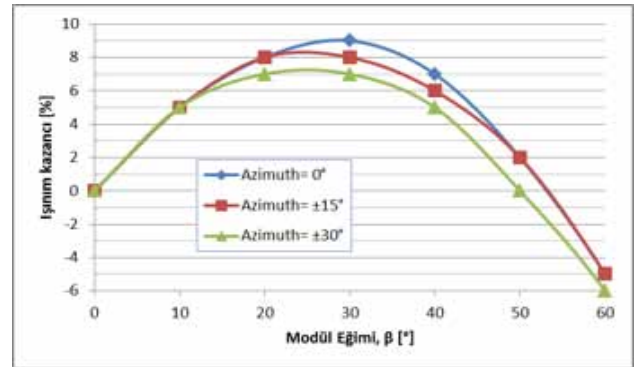
#### a. FV Panel yerleşimi

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 ışınım azalırken kış aylarında artmaktadır. Bir güneş santrali yıl boyunca sürekli çalışacağı için yıl boyunca toplamın en büyük olduğu değer seçilmelidir. Açık gökyüzü ışınım hesaplarına göre bu değer Eğim=Enlem olarak ortaya çıkmaktadır. Ancak açık gökyüzü ışınımında bulutlanma, yağmur, kar vb. gibi etkiler olmadığından dengeli olmak yerine yaz aylarına biraz ağırlık verilmesi, yani Enlem-10<Eğim<Enlem arasında bir seçim yapılması daha uygun olacaktır. Şekil-8'de İzmir Bornova için ölçülmüş ışınım 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 ışınımın eğime bağımlılığı [7]



Şekil-8: Işınım 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 ışınım farklılıkları da uyumsuzluk kaybına neden olan önemli etkenlerden birisidir.

Bir FV panelin kısa devre akımı ışınımın doğrusal 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 ışınımdır 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 ( $G_d$ ) ışınım değerleri bilinirse herhangi bir  $\beta$  eğimine sahip bir yüzeyde toplam ışınım ( $G_T$ ) aşağıdaki formülle hesaplanabilir [11].

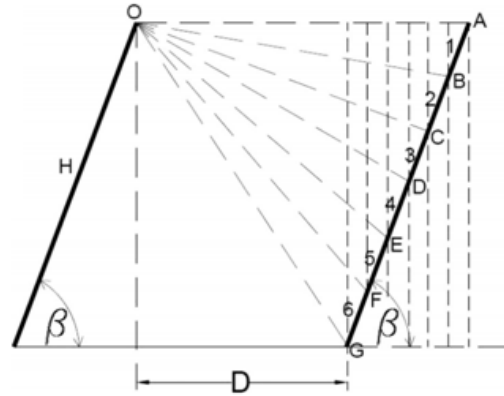
$$G_T = \overbrace{G_b R_b}^{\text{Direkt}} + \overbrace{G_d \left( \frac{1 + \cos \beta}{2} \right)}^{\text{Gökyüzünden}} + \overbrace{(G_b + G_d) R_u \left( \frac{1 - \cos \beta}{2} \right)}^{\text{Yeryüzünden}} \quad (5)$$

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  $\theta$  ile zenith açısı  $\theta_z$ '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 ışınım 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

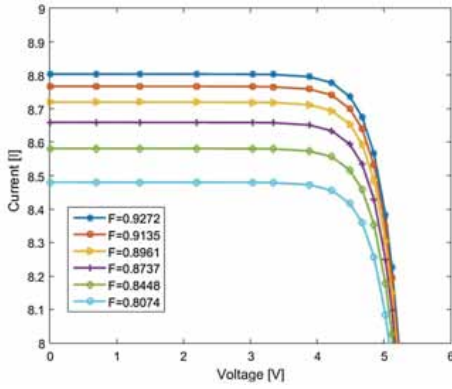
factor) olarak adlandırılmıştır ve  $\beta=30$ ,  $D=1.0$  m,  $H=0.942$  m ve %30 difüz ışınım oranı için hesaplanan  $F_{sky}$  kaysayıları 1'den (en üst) 6'ya (en alt) kadar olan paneller için akım-gerilim eğrileri ile birlikte Şekil-10'da verilmiştir. Hemen fark edileceği üzere direkt bileşen bütün panellere aynı oranda ulaşırken (yani gölgeleme yok), gökyüzünden yansıyan gelen difüz ışınım 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 ışınım olan bir yerde akım farklılıkları %1.81 olarak hesaplanırken, bu değer  $\beta=50^\circ$  ve %70 difüz ışınım olan bir yerde %19.82'ye kadar çıkabilmektedir. Dolayısıyla panel yerleşiminde çok yüksek boylu ve dar aralıklı yerleşimden uzak durmak bu türlü kayıpları azaltacaktır.



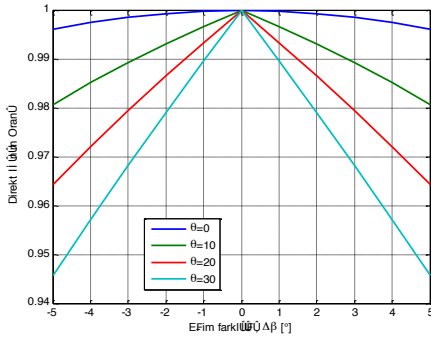
Şekil-9: Panel yerleşimi [12]

Benzer şekilde panel düzlemlerinin (yani  $\beta$  eğimi ve azimut açılarının) aynı olmaması da direkt ışınımın ve dolayısıyla akımların farklılaşmasına yol açmaktadır. Eğimleri arasında  $\Delta\beta$  kadar farklılık olan iki panel grubunun  $R_b$  katsayıları oranı yaklaşık olarak  $\cos(\theta + |\Delta\beta|) / \cos \theta$  alınırsa direkt bileşen için ışınım 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 ışınım farklılığı ortaya çıkabildiği görülmektedir. Bu farklılık direkt bileşenin toplam ışınımdaki oranına göre uyumsuzluk kaybı oluşturacaktır. Dolayısıyla FV panelleri tam güneşe 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]



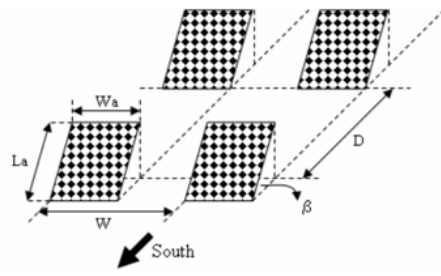
Şekil-11: Eğim farklılıkları

Diğer yandan Eşitlik (3)'teki  $P_m(T_c)$  denkleminden 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 ulaşamaması 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 gruplandırılmakta ve MGN akımları birbirine yakın olan paneller aynı dizide seri bağlı olarak kullanılarak uyumsuzluk kayıplarının düşük olması sağlanmaktadır.

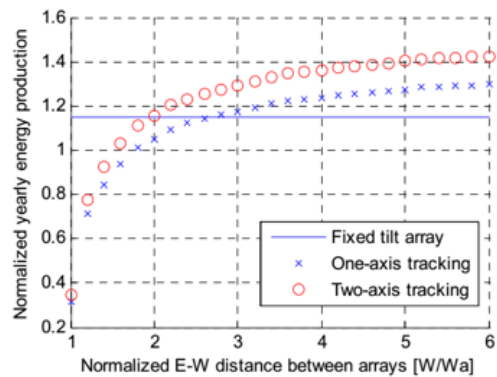
#### e. Arazi kullanımı ve gölgeden kaçınma

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

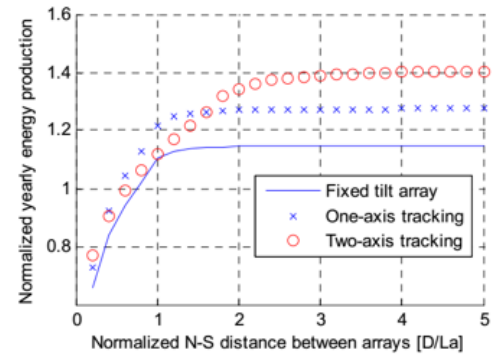


Şekil-12: Panel yerleşim ölçüleri [13]

bir çalışmada güneye yönelmiş sabit eğimli, tek ekseninde güneş izlemeli ve 2 ekseninde 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 üretilebilmesi için yan yana paneller arası mesafenin 2 ekseninde güneşi izleyen sistem için en az panel genişliği kadar, tek ekseninde izleyen sistem için en az 2 katı olması gerektiği görülmektedir. Şekil-14'ten arka arkaya mesafelerin ise tek ekseninde izleme için en az panel uzunluğu kadar, 2 ekseninde izlemeli sistem için en az panel uzunluğunun 2 katı kadar olması gerektiği görülmektedir. Bu sonuçlar açık gökyüzü güneş ışınımı kullanılarak 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 13: Paneller arası yatay aralığın etkisi [13]



Şekil 14: Paneller arası dikey aralığın etkisi [13]

\*IV. Enerji Verimliliği Günleri'nde sunulan bildiridir