

# Fotovoltaik panel verimliliği ve maksimum güç noktası izleme

Yasemin SELİM SARAL\*

**Geliş tarihi / Received:** 02.05.2023

**Düzeltilerek geliş tarihi / Received in revised form:** 30.05.2023

**Kabul tarihi / Accepted:** 05.06.2023

**DOI:** 10.17932/IAU.ABMYOD.2006.005/abmyod\_v18i67001

## Özet

*Bu çalışmada, fotovoltaik enerjili bir sistemden en yüksek performansı elde edebilmek için hücre ve panel kısmında yapılabileceklerin geniş bir çerçevesi çizilmiş, özel olarak da maksimum güç noktası izleme konusu incelenmiştir. Fotovoltaik hücrenin enerji dönüşümü prensibi izah edilerek, bir fotovoltaik hücrenin elektrik enerjisi üretim karakteristiğine ve bir fotovoltaik panelin enerji dönüşüm verimliliğine etki eden faktörler ortaya konulmuştur. Bütün bu faktörlerin maksimum verimliliği elde edecek şekilde yönetilmesinin yanı sıra, fotovoltaik panelin potansiyelinin en üst düzeyde kullanılması için dikkat edilmesi gereken diğer bir konunun maksimum güç noktasının izlenme olduğu gösterilmiştir. Fotovoltaik hücre, yarı iletken bir malzemedir ve hem fotovoltaik hücre hem de fotovoltaik panel çıkış karakteristiği diğer yarı iletken malzemelerde olduğu gibi doğrusal olmayan yapıdadır. Fotovoltaik panelden elde edilecek olan güç, bağlı bulunan yüke, sıcaklık ve ışınım gibi parametrelere bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Fotovoltaik panel çıkış karakteristiği boyunca en yüksek gücün elde edildiği noktaya “maksimum güç noktası” denir. Bir fotovoltaik*

---

\* Öğr. Gör., İstanbul Aydın Üniversitesi, Anadolu Bil Meslek Yüksekokulu, Elektrik Programı, e-mail: yaseminselim@aydin.edu.tr ORCID: 0000-0002-7450-16981

*panelden en yüksek performansının elde edilmesinin yalnızca verimlilik parametrelerinin kontrol edilmesine değil, aynı zamanda sürekli olarak bu maksimum güç noktasında çalışılmasına bağlı olduğu gösterilmiştir. En yaygın kullanılan maksimum güç noktası izleme yöntemleri ve bunlara ait algoritmalar incelenip zayıf ve güçlü yönleri yorumlanmıştır.*

**Anahtar Kelimeler:** *Fotovoltaik Güneş Panelleri, Fotovoltaik Enerji, Maksimum Güç Noktası İzleme, Fotovoltaik Panel Verimliliği, MPPT*

## **Photovoltaic panel efficiency and maximum power point tracking**

### **Abstract**

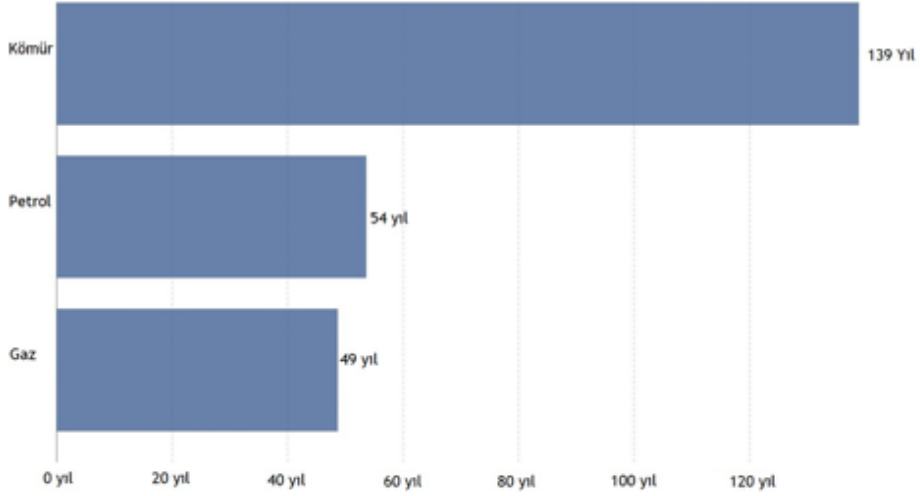
*In this study, in order to obtain the highest performance from a photovoltaic energy system, a wide frame of what can be done in the cell and panel section has been drawn and especially the maximum power point tracking has been examined. The energy conversion principle of the photovoltaic cell is explained, and the factors that affect the electrical energy generation characteristics of a photovoltaic cell and the energy conversion efficiency of a photovoltaic panel are presented. In addition to managing all these factors to achieve maximum efficiency, it has been shown that the maximum power point is another issue to be considered in order to maximize the potential of the photovoltaic panel. The photovoltaic cell is a semiconductor material and the output characteristic of both the photovoltaic cell and the photovoltaic panel is nonlinear as in other semiconductor materials. The power to be obtained from the photovoltaic panel varies depending on the connected load, temperature and radiation parameters. The maximum power point along the output characteristic of*

*the photovoltaic panel is called the “maximum power point”. It has been shown that obtaining the highest performance from a photovoltaic panel depends not only on controlling the efficiency parameters but also on continuously operating at this maximum power point. The most commonly used maximum power point tracking methods and their algorithms are examined and their weaknesses and strengths are interpreted.*

**Keywords:** *Photovoltaic Solar Panels, Photovoltaic Energy, Maximum Power Point Tracking, Photovoltaic Panel Efficiency, MPPT*

## **Giriş**

Dünyamızın artan nüfusu, bununla paralel bir enerji ihtiyacı doğurmaktadır. Artan enerji ihtiyacına geleneksel yöntemleri kullanarak cevap vermeye çalışmak kimi nedenlerle artık mümkün değildir. Enerji ihtiyacını karşılamakta yaygın olarak kullandığımız kaynaklar fosil yakıtlar dediğimiz petrol, kömür ve doğalgazdır. 2016 yılı itibariyle dünya birincil enerji kaynaklarının %81’ini fosil yakıtlar oluşturmaktadır. (Koç ve ark., 2018). Enerji üretiminde mevcuttaki bu büyük paylarına rağmen fosil yakıtlara alternatif arayışında olunmasının ilk ve önemli nedeni, sürdürülebilir dünya ihtiyacıdır. Fosil yakıtlar, yanmalarından ortaya çıkan atıklar ve zehirli gazların çevreye salınımı nedeniyle çevreye telafisi güç zararlar vermektedirler. Hava kirliliği, su kirliliği, iklim değişiklikleri, canlılık faaliyetlerinin azalması, bitki örtülerinin bozulması ve iklimlerin değişmesi bunların sadece bir kaçıdır. İlaveten, dünyanın fosil yakıt kaynağı sınırlıdır ve tükenmek üzeredir. Şekil 1’de, 2020 yılı itibariyle fosil yakıt rezervlerinin türlerine göre kalan ömürleri yer almaktadır.



*Şekil 1. Türlerine göre fosil yakıt rezervlerinin kalan ömürleri,2020(URL-1).*

Mevcut enerji ihtiyacımızı karşılamada büyük payı olan fosil yakıtlar çevreci olmamaları ve tükenmek üzere olmaları nedeniyle yerlerini su, güneş, rüzgâr gibi yenilenebilir enerji kaynaklarına bırakmaktadırlar.

Su ve rüzgâr kaynağını elektrik enerjisine dönüştürmek fosil yakıt kullanımına kıyasla çevrecidir. Ancak hidroelektrik santrallerin üzerlerine kuruldukları akarsular ve çevrelerindeki doğal yaşama zarar verdikleri, akarsu debilerini etkiledikleri, yaban hayvanlarının göç yollarını değiştirdikleri, yöre iklimine zarar verdikleri bilinen bir gerçektir. Rüzgâr santrallerinin de benzer etkisinin kuşların göç yollarını değiştirmek şeklinde olduğu bilinmektedir. Bununla birlikte su ve rüzgâr kaynakları mekâna bağımlıdır ve her yerden erişilebilir değildir.

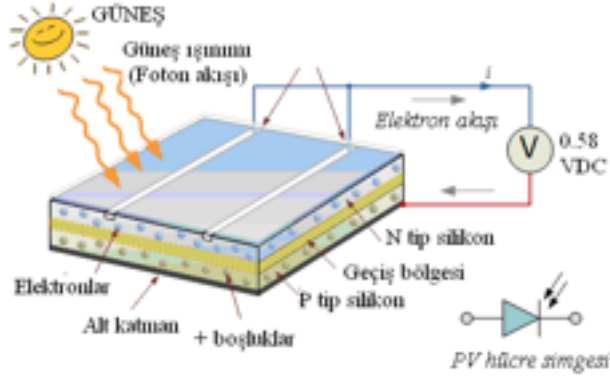
Rakiplerine kıyasla güneş enerjisi temiz, çevreci, sınırsız ve her yerden erişilebilir bir kaynaktır. Bununla birlikte güneş enerjisinin kimi kısıtları elbette ki mevcuttur. Güneş enerjisi, güneş hücresinin yapısına bağı

olarak % 5 ile % 24 arasında bir verimle elektriğe dönüştürülebilir (Duyan ve Bayrakdarlar, 2022). Güneş enerjisini elektrik enerjisine dönüştürmedeki bu son derece düşük verimin yanı sıra, güneş panellerinin (enerji dönüşümünden sonra) verimini etkileyen birçok faktör daha vardır. Bunlar; sıcaklık, dc kablolama, panel konumu, uyumsuzluk kayıpları, arazi kullanımı ve gölgeleme ve maksimum güç noktası izlemedir (Boztepe, 2017).

Fotovoltaik güneş hücreleri yarı iletken elemanlardır ve karakteristikleri doğrusal değildir. Yüke sağladıkları güç, yükün büyüklüğüne, sıcaklık ve ışınımına bağlı olarak anlık olarak değişebilir. Fotovoltaik hücre ya da panellerden en yüksek performansı alabilmek için, verimliliği etkileyen parametreleri en yüksek verimi elde edecek şekilde yönetmek gerektiği gibi aynı zamanda hücre ve paneli her daim maksimum güç noktasında çalışacak şekilde güç elektroniği yöntemleri ile kumanda etmek de gerekmektedir. Bu çalışmada bu verimlilik parametreleri hakkında genel bir bilgi verilecek ve maksimum güç noktası kavramı açıklanıp en yaygın kullanılan maksimum güç noktası izleme yöntemleri ve kullandıkları algoritmalar incelenecektir.

### **Fotovoltaik hücre**

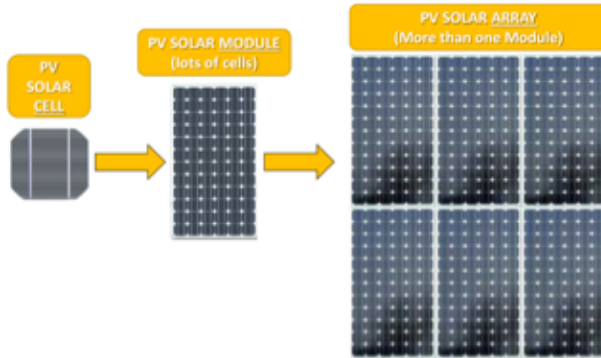
Fotovoltaik hücre, bir N ve bir P tipi maddenin birleşiminden oluşan, fotoelektrik olay prensibi ile foton enerjisini elektrik enerjisine dönüştüren bir yarı iletken elemandır. Fotoelektrik olay, fotonların bir maddedeki serbest elektronları harekete geçirip elektrik akımı meydana getirmesidir.



Şekil 2. Fotovoltaik hücrenin çalışma ilkesi (Öztürk, 2017).

Endüstriyel bir fotovoltaik hücrede bir N ve bir P tipi madde, her iki maddeye temas eden birer üst ve alt elektrot ve N tipi madde üzerinde yansımayı önleyici bir yüzey yer almaktadır. Şekil 2’de genel bir fotovoltaik hücre yapısı görülmektedir.

Fotovoltaik hücrelerin verebilecekleri gerilim 0,5-0,6 V civarında, verebilecekleri maksimum güç de 3W civarındadır. Bu nedenle, yükün ihtiyaç duyduğu akım, gerilim ve gücü elde edebilmek için fotovoltaik hücreler seri ya da paralel bağlanarak güneş modüllerini onlar da kendi aralarında seri ya da paralel bağlanarak dizinleri meydana getirirler. Şekil 3’te fotovoltaik hücre, fotovoltaik panel ve fotovoltaik dizin yapıları görülmektedir.



Şekil 3. Fotovoltaik hücre, panel, dizin (URL-2).

## Fotovoltaik hücre karakteristikleri

Fotovoltaik hücrenin yapısı yarı iletken bir diyotunkinin aynısıdır ve çıkış karakteristiği de tıpkı bir diyotta olduğu gibi doğrusal olmayan yapıdadır. Fotovoltaik hücrenin çalışmasını anlamada bizim için son derece önemli iki karakteristik vardır. Bunlar, fotovoltaik hücre akımının gerilimine göre değişimi (I-V) ve fotovoltaik hücre gücünün gerilimine göre değişimi (P-V) karakteristikleridir. Karakteristikler üzerinde önemli olan parametreler;

$$I_{sc}=\text{Kısa devre akımı} \quad (1)$$

$$V_{oc}=\text{Açık devre gerilimi} \quad (2)$$

$$M_{pp}=\text{Maksimum güç noktası} \quad (3)$$

$$I_{mpp}=\text{Maksimum güç noktası akımı} \quad (4)$$

$$V_{mpp}=\text{Maksimum güç noktası gerilim} \quad (5)$$

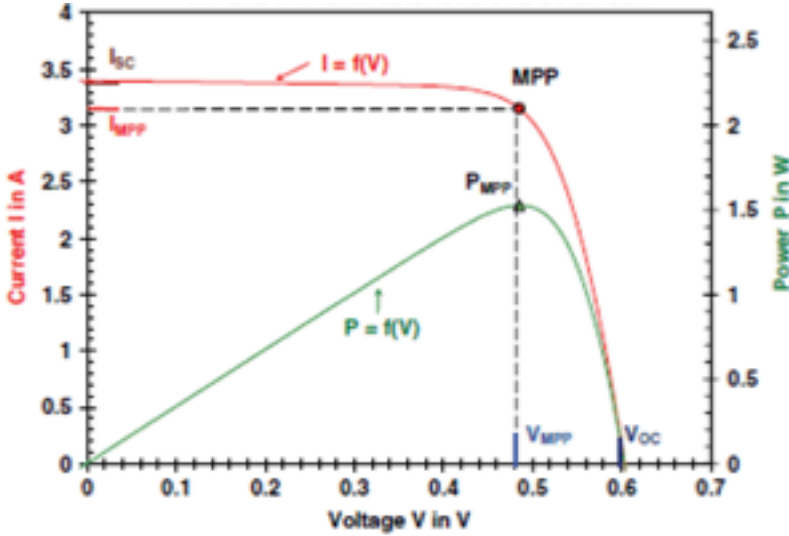
Bir fotovoltaik hücre uçlarına ayarlı bir yük bağlayıp yükü minimum ve maksimum değer aralığında değiştirdiğimizde hücrenin akım gerilim karakteristiği ile birlikte açık devre gerilimi ( $V_{oc}$ ) ve kısa devre akımı ( $I_{sc}$ ) parametrelerini elde edebiliriz. Maksimum güç noktası, bu hücreden tüm yük durumlarında elde edebileceğimiz en yüksek güç değeri ( $M_{pp}$ ), maksimum güç noktası akımı ( $I_{mpp}$ ) ve maksimum güç noktası gerilimi ( $V_{mpp}$ ) ise P-V karakteristiğinin tepe noktasının I-V karakteristiğini kestiği yerdeki akım ve gerilim değerleridir.

Fotovoltaik hücre karakteristiğinde hücre performansını belirleyen bir diğer önemli parametre dolum faktörü (FF) denilen orandır.

$$\text{Fill Factor}=\text{FF}=(I_{sc} \cdot V_{oc})/(V_{mp} \cdot I_{mp}) \quad (6)$$

Dolum faktörü, fotovoltaik hücrenin açık devre gerilimi ve kısa devre akımının çarpımının maksimum güç noktasındaki çalışmadaki akım ve geriliminin çarpımına oranıdır. Yani, fotovoltaik hücrenin yüklü

çalışmada açık devre gerilimi ve kısa devre akımı performansına ne denli ulaşabildiğinin bir göstergesidir ki, fotovoltaik panel satın alınırken dikkat edilen en önemli parametrelerden biridir. Sistem tasarımında iyi bir hücre seçimi için bu değerin 0,7-0,8 aralığında olması gerekir. Kötü denebilecek bir panel için bu 0,4 olabilir (Chikate ve ark., 2015). Dolum faktörü, aynı zamanda Şekil 4'te  $I_{mpp}$  ve  $V_{mpp}$  ile belirlenmiş dikdörtgen alanın kırmızı eğrinin altında kalan alana oranıdır.



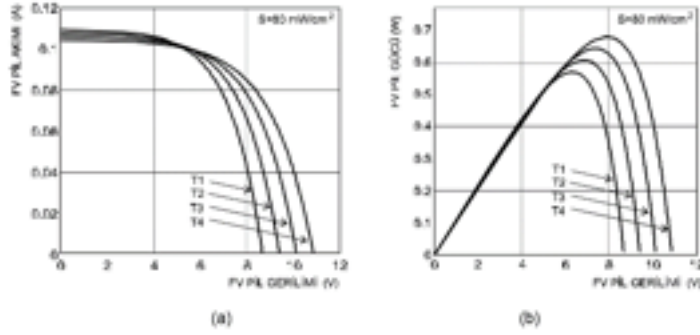
Şekil 4. Fotovoltaik hücre karakteristikleri (Öztürk, 2017).

#### Fotovoltaik hücre karakteristiğine sıcaklık ve ışınımın etkisi

Sıcaklığın etkisi-Aşağıda, Şekil 5'te, Altaş (1998) tarafından yapılan çalışmada 80 mW/cm<sup>2</sup> sabit ışınım altında T1 en yüksek, T4 en düşük olmak üzere 4 farklı sıcaklıkta bir fotovoltaik hücreye ait karakteristiklerin değişimi görülmektedir. Görüldüğü gibi fotovoltaik hücre gücü, güneşin ısı etkisinin kullanıldığı diğer uygulamaların aksine, sıcaklıktan olumsuz olarak etkilenmektedir. fotovoltaik hücre akımı bir miktar artsa da, gerilimdeki daha fazla düşüş, gücün de düşmesine yol açmaktadır. Isının bir madde üzerindeki en temel etkisi, atomlarını titreştirmektir. Madde içerisinde elektronlar hali hazırda zaten hareket halinde iken, ısının artması

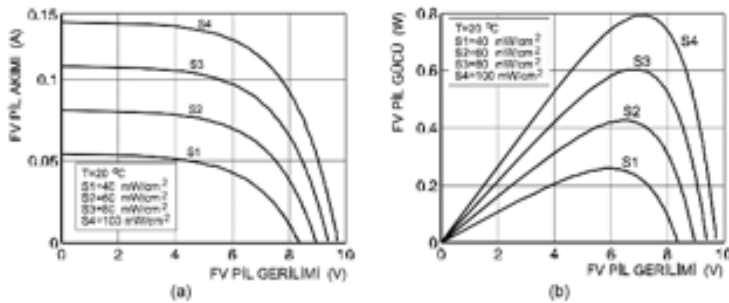


elektronların daha da hareketli hale gelmesine ve akışın düzenli bir yolda değil bir öncekine göre daha rastgele olmasına yol açmaktadır. Hareket halindeki elektronları birbirlerine çarpması, enerji kaybetmeleri, bu da direnç demektir. İç devredeki bu direnç artışı, iç devrede gerilim düşümüne yol açarak, elektrik kaynağı yani fotovoltaik hücrenin dış devreye daha az gerilim verebilmesi anlamına gelmektedir. Akımın bir miktar artmasının nedeni sıcaklığın elektron hareketliliğini artırmasıdır.



**Şekil 5.** Fotovoltaik güneş hücresinin akım, gerilim ve gücünün sıcaklıkla değişimi (Altaş, 1998).

Işınımın etkisi-Aşağıda, yine aynı çalışmada 200C de sabit sıcaklık altında 4 farklı ışınım miktarında fotovoltaik hücrenin akım gerilim ve gücünün değişimi gözlenmiştir. Beklenildiği gibi foton yani ışınım miktarının artması, fotovoltaik hücre performansını akım/gerilim/gücünü artış yönünde etkilemiştir. Şekil 6’ da bu durum açıkça görülmektedir.



**Şekil 6.** Fotovoltaik hücrenin akım, gerilim ve gücünün ışınım ile değişimi (Altaş, 1998).

## Fotovoltaik sistemlerde panel verimliliğine etki eden etmenler

### Sıcaklığın etkisi

Fotovoltaik panel ısısı, paneli güneşin ısıtması yani panelin çalışma sıcaklığı ile; panel içerisindeki ısı iletimi esnasında oluşan kayıplar, panelin dışarıya yaydığı ısı ve paneli rüzgârın soğutması arasındaki bir dengeden meydana gelir. Bir güneş panelinin gücünün sıcaklıkla ne kadar değişeceği aşağıdaki formülle hesaplanabilir (Boztepe, 2017);

$$T_c = T_a + (NOCT - 20) / 0.8 \cdot G \quad (7)$$

$$P_{m(T_c)} = P_{m(STC)} [1 - \mu_p (T_c - 25)] \quad (8)$$

$T_c$  = Panelin hücre sıcaklığı

$T_a$  = Hava sıcaklığı

NOCT: Standart işletim hücre sıcaklığı (800w/m<sup>2</sup>, Ortam 20 °C, Hava Kütlesi 1,5 Rüzgar 1m/s iken ulaşılan panel sıcaklığı )

STC=Standard test koşulları (1000w/m<sup>2</sup>, Panel 25,

Hava Kütlesi 1,5, Rüzgâr 1m/s)

$G$  = Işınım (kW/m<sup>2</sup>)

$P_{m,STC}$  = Standart Test Koşullarındaki Panel Gücü

$\mu_p$  = Sıcaklığa bağımlılık katsayısı

Bilinen bir hava sıcaklığında ve ışınım altında, fotovoltaik panel bilgi sayfasından alınacak NOCT değeri kullanılarak panel hücre sıcaklığı ve buna bağlı olan panelin sıcaklığa bağlı gücünü hesaplamak mümkündür.

Aşağıda, katalog bilgileri bilinen örnek bir güneş paneli için standart test koşullarının 100C üzerindeki bir sıcaklıkta gücün nasıl değiştiği hesaplanmıştır.

**Tablo 1.** BSM-150 güneş panelinin tipik elektriksel özellikleri

Parametre	Gösterim	Değer	Parametre	Gösterim	Değer
Maksimum Güç	$P_m$	150W	Hücre Boyutu	Mm	156x156
Güç toleransı	%	+5	$I_m$ sıcaklık katsayısı	(%/°C)	+0.1
Maksimum güç gerilimi	$V_m$ (V)	18.11	$V_m$ sıcaklık katsayısı	(%/°C)	-0.38
Maksimum güç akımı	$V_{oc}$ (V)	8.32	$P_m$ sıcaklık katsayısı	(%/°C)	-0.47
Açık devre gerilimi	$I_m$ (A)	22.51	$I_{sc}$ sıcaklık katsayısı	(%/°C)	+0.1
Kısa devre akımı	$I_{sc}$ (A)	9.08	$V_{oc}$ sıcaklık katsayısı	(%/°C)	-0.38
Maksimum sistem gerilimi	VDC	1000	NOTC	°C	48±2
Hücre verimi	$\eta_c$ (%)	≥17	Dolum faktörü	%	≥73.3

Tablo 1’de tipik özellikleri verilen güneş paneli için standart test koşullarının 10°C üzerinde (35°C) bir sıcaklık 1000 W/m<sup>2</sup> (STC) bir ışınım için güç hesaplaması yapıldığında;

$$T_c = \frac{35 + 48 - 20}{0.8} G (kW / m^2) = 70 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (9)$$

$$P_m (70^\circ\text{C}) = 150[1 - 0.0047(70 - 25)] = 118.275W \quad (10)$$

Sonuç olarak, 10 derecelik bir sıcaklık artışı güneş panelinden alınan gücün % 21,15 oranında düşmesine yol açmıştır. NOCT değeri ve  $\mu p$  katsayısı fotovoltaik hücre performansının sıcaklıkla değişimi konusunda belirleyici parametrelerdir, mümkün merteye düşük olmaları beklenir.

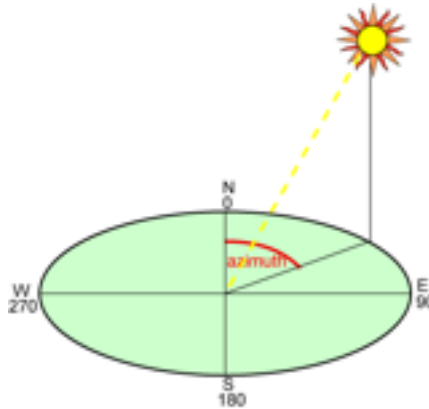
### DC kablolanmanın verimliliğe etkisi

Fotovoltaik hücrenin dizin içerisinde veyahut dışındaki kablo iletimi üzerinde oluşan kayıpların fotovoltaik panel verimliliğine etkisi elbette ki vardır. Herhangi bir sistemde iletim hatlarında kullanılacak olan iletken kesitlerini belirlerken için nasıl ki yüke, kısa devre ve gerilim düşümü hesaplarına göre işlem yapıyorsak, aynı şekilde fotovoltaik hücreleri, panelleri birbirine bağlamak için aynı şekilde dizinleri güç elektroniği ekipmanlarına ve sisteme bağlamak için kullanılacak olan kablo kesitlerini hesaplarken de benzer yaklaşım sergileriz.

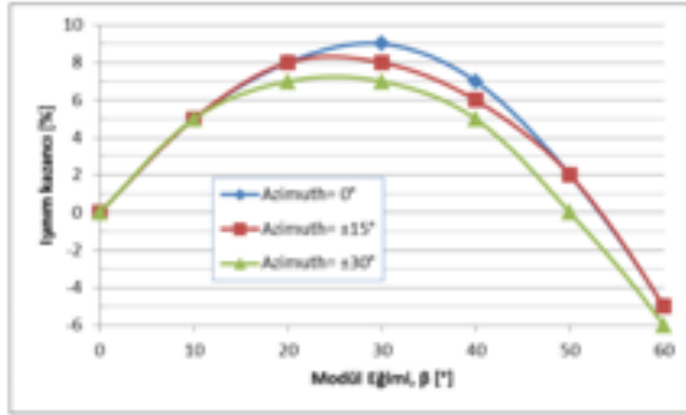
Burada kabul gören yaklaşım, doğru akım (DC) ve alternatif akım (AC) her iki tarafta da gerilim düşümlerinin %1 – 3 arasında olmasıdır (Deniz, 2013).

### Fotovoltaik panel konumlamasının verimliliğe etkisi

Fotovoltaik hücrenin karakteristiğine ışınımın etkisi, fotovoltaik hücre karakteristiğine etki eden parametreler konusunda incelenmişti. Fotovoltaik hücrede olduğu gibi, ışınımın artması, fotovoltaik panel gücünü olumlu etkilemektedir. Fotovoltaik panele ışınımın geliş açısı, dolayısıyla fotovoltaik panel konumu panel performansını ve verimliliğini etkileyen son derece önemli parametrelerden biridir. Yıl boyunca sabit duracak olan panellerde optimum duruş açısını elde edebilmek için dikkat edilmesi gereken iki önemli konumlama parametresi vardır: doğrultu ve panelin yerle yaptığı açı. Fotovoltaik sistemlerde panel doğrultusunun azimut açısı sıfır olacak şekilde (kuzey yarım kürede) gerçek güney yönünde olması gerektiği bilinmektedir. Azimut açısı, bir gök cisminin yer küre üzerindeki izdüşümü ile dünyanın kuzey-güney eksenini arasında kalan açıdır. Şekil 7’de görülmektedir.



Şekil 7. Azimut açısı (URL-3).



**Şekil 8.** Işınım kazancının eğim ile değişimi (Boztepe, 2017).

Grafikte 0, 15 ve 30° azimut açıları, yatay ile yaptığı açı 0 ila 60° aralığında değiştirilen panelin ışınım kazancı değişimi görülmektedir. En yüksek kazancın 0 azimut açısında elde edildiği ve azimut açısı fark etmeksizin 30° lik yatay açı civarlarında en yine en yüksek kazanımın elde edildiği görülmektedir. Söz konusu grafiğe ait veriler İzmir, Bornova’da elde edilmiş ve enlem yaklaşık olarak 38°dir. Yapılan çalışmalar göstermektedir ki, panelin yerle yaptığı açı bölgenin enlemi ile aynı olduğunda en yüksek ışınım kazancı elde edilmiştir. Aynı çalışmada, bir yıllık performans takip edildiğinde yaz aylarında düşük, kış aylarında nispeten yüksek eğimin faydalı olduğu görülmüştür. Bu nedenle panel açısını direkt olarak enleme eşitlemek yerine  $-10 < \text{eğim} < \text{enlem}$  şeklinde bir kabul yapılmıştır.

Bunlarla birlikte yıl ve gün boyunca güneşten maksimum verimi elde edebilmek için panel açısının değiştirilerek güneş takibi yapan sistemler de mevcuttur. Bunların içerisinde sabit panellerin yansıtıcı ile kullanıldığı sistemler, tek eksenli döndürülebilir sistemler, çift eksenli döndürülebilir sistemler yer almaktadır.

### **Uyumsuzluk kayıplarının verimliliğe etkisi**

Fotovoltaik panel içerisinde üretim toleransları ve dinamik özellikleri nedeniyle birbirlerinden farklı kısa devre akımlarına sahip olabilecek

yüzlerce fotovoltaik hücre birlikte çalışmaktadır. Seri hücrelerin eşzamanlı farklı akımlarla çalışmaları, paralel hücrelerin ise farklı gerilimlerle çalışmaları uyumsuzluk kayıplarına yol açmaktadır.

Fotovoltaik panelin kısa devre akımı üretiminin ışınımına direkt olarak bağımlılığı aşağıdaki denklemde görülmektedir. (Boztepe, 2017)

$$I_{sc} = I_{sc,STC} \left( \frac{G_T (W/m^2)}{1000 (W/m^2)} \right) \quad (11)$$

Işınım miktarının bileşenleri ise aşağıda görülmektedir.

$$G_T = G_b R_b + G_d \left( \frac{1 + \cos \beta}{2} \right) + (G_b + G_d) R_u \left( \frac{1 + \cos \beta}{2} \right) \quad (12)$$

$G_b R_b$  = direkt bileşen

$G_d \left( \frac{1 + \cos \beta}{2} \right)$  = yeryüzünden ışınım

$(G_b + G_d) R_u \left( \frac{1 + \cos \beta}{2} \right)$  = gökyüzünden ışınım

$R_b = \cos \theta / \cos \theta_z$

$G_t$  = panel yüzeyine düşen toplam ışınım

$G_b$  = Direkt ışınım

$G_d$  = Difüz ışınım

$R_u$  = Yerin yansıtma katsayısı (toprak yüzeyler için 0.14-0.20 arasında alınabilir)

$\beta$  = Panel eğimi

$R_b$  = Eğimli yüzeye güneş geliş açısı  $\theta$  ile zenith açısı  $\theta_z$  nin kosinüslerinin oranı

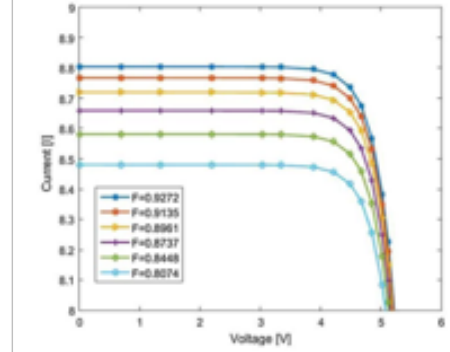
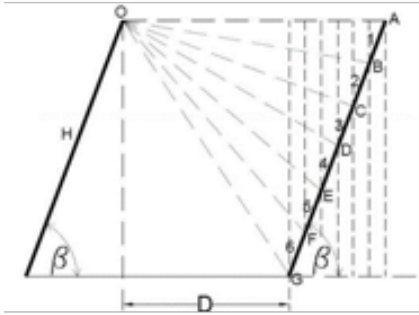
$\theta$  = Yüzeye güneş geliş açısı

$\theta_z$  = Zenit açısı

Işınım faktörü aynı dizindeki iki panelde hem direkt hem de difüz bileşenler açısından farklılaşabilir. Peled ve Appelbaum (2016) tarafından yapılan

bir çalışmada, difüz bileşenlerin yol açabileceği uyumsuzluk kayıplarına değinilmiştir. Çalışmada difüz bileşenler  $F_{sky}$  (panel görüş faktörü) isimli bir parametre adı altında toplanmış ve aşağıdaki denklem elde edilmiştir.

$$G_T = G_b + F_{sky} G_d \quad (13)$$



**Şekil 9.** (a) Panel yerleşimi (b) Difüz gölgelemede IV eğrileri (Peled ve Appelbaum, 2016).

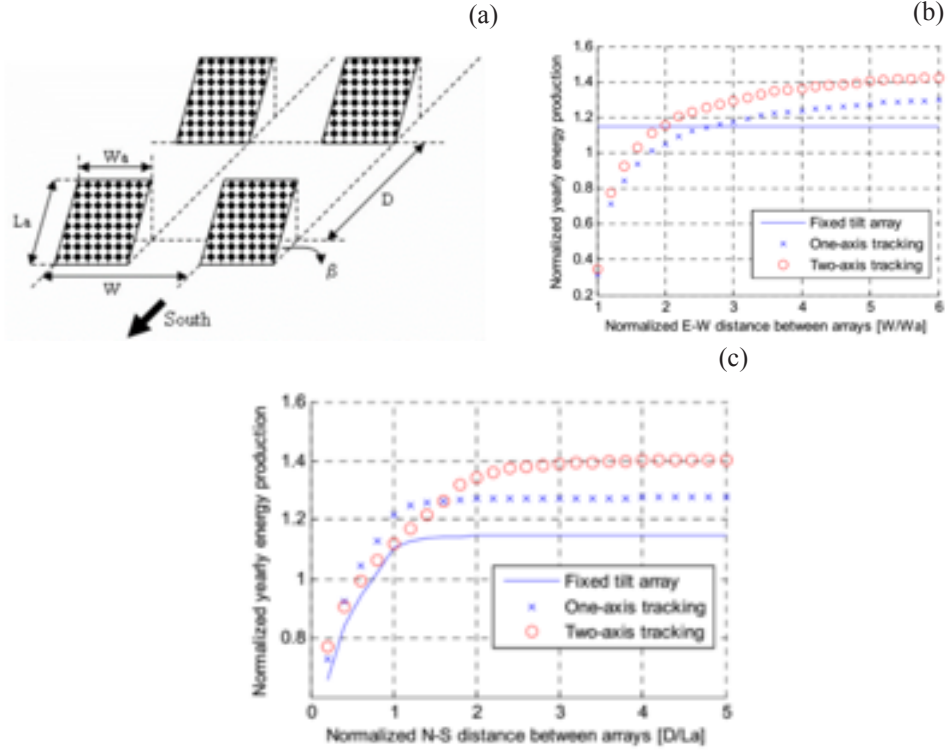
Çalışmada direkt bileşeni aynı şekilde alan 6 adet çeşitli görüş faktörlerine sahip panellerin üretimleri arasındaki farklar incelenmiştir. Şekil 9. (b) grafiğinden de görülebileceği gibi, direkt bileşeni aynı aldıkları halde bir dizin içerisindeki 6 panelin difüz bileşenlerindeki farklılaşma panel üretimlerini etkilemekte dolayısıyla uyumsuzluk kayıplarına yol açmaktadır.

Panel konumlamalarının farklı olmasının yol açabileceği uyumsuzluklar “panel konumlamasının verimliliğe etkisi” başlığında söylendiği gibi panelin yerle yaptığı açı ve azimut açısının farklı olmasından ileri gelmektedir ki panel üretiminin bu iki parametreye bağlılığı ilgili başlıkta ifade edilmiştir.

### Arazi kullanımının etkisi

Gölgelemenin fotovoltaiik hücre performansını olumsuz etkilediğini ve kaçınılması gerektiğini biliyoruz. Fakat bu her zaman mümkün değildir

bazen dar alanlara çok fazla sayıda panel yerleşimi yapmak gerekebilir. Yapılan çalışmada sabit açılı, tek eksen güneş takip sistemli ve iki eksen güneş takip sistemli panellerin yatay ve düşey uzaklıklarının artışına kıyasla üretilen gerilimlerine ilişkin grafikler elde edilmiştir (Boztepe, 2017). Şekil 10'da solda paneller arası dikey aralığın, sağda ise paneller arası yatay aralığın panel üretimine etkisi görülmektedir.



**Şekil 10.** (a) Panel yerleşim ölçüleri (b) Paneller arası yatay aralığın etkisi (c) Paneller arası dikey aralığın etkisi (Boztepe, 2017).

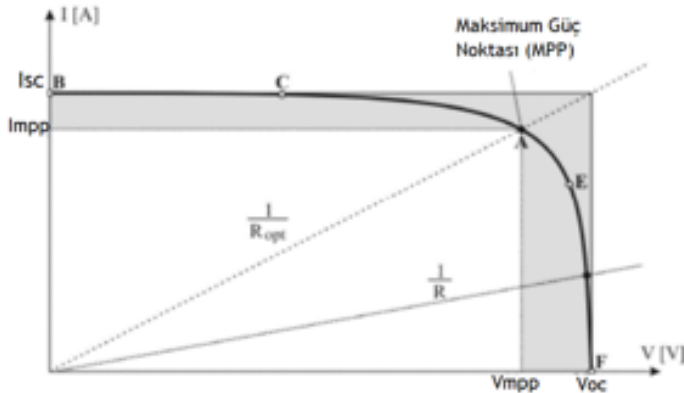
Sonuç olarak, yıl boyu sabit eğimde çalışan sistemden daha fazla enerji üretebilmesi için; yan yana paneller arası mesafenin 2 eksen güneş izleyen sistem için en az panel genişliği kadar, tek eksende izleyen sistem için en az panel genişliğinin iki katı kadar, arka arkaya mesafelerin ise tek eksende izleme için en az panel uzunluğu kadar, 2 eksende izlemeli sistem için en az panel uzunluğunun 2 katı kadar olması gerektiği görülmektedir.



## Maksimum Güç Noktası İzleme

Fotovoltaik hücre karakteristikleri bölümünde, fotovoltaik hücrenin bir yarıiletken olduğu ve çıkış I-V ve P-V karakteristiklerinin doğrusal olmadığı ifade edilmişti. P-V eğrisinin bir tepe noktası bulunduğu, bu noktaya maksimum güç noktası denildiği, bu noktaya I-V eğrisinde karşılık gelen I ve V noktalarının ise maksimum güç akımı ve maksimum güç gerilimi olduğu söylenmişti. Fotovoltaik hücrenin verdiği akım ve gerilimin sıcaklık ve ışınım ile değişimi de bir sonraki bölümde ifade edilmişti. Fotovoltaik hücre akımı sıcaklık ile bir miktar artıyor iken, hücre gerilimi sıcaklık ile çok fazla düştüğünden güç olumsuz etkilenirken, fotovoltaik hücre gerilimi biraz daha az, akımı biraz daha fazla olmak üzere ışınımından olumlu etkilenmekteydi. Dolayısıyla fotovoltaik hücre gücünün ışınımından olumlu etkilendiği söylenebilirdi.

Hücre uçlarına bir yük bağlandığında ise sistemin çalışması direnç yükünün  $1/R$  şeklindeki I-V karakteristiği ile fotovoltaik hücre I-V karakteristiğinin kesişim noktasında olacaktır. Şekil 11’de çeşitli direnç yükleri için fotovoltaik sistemin çalışma noktaları görülmektedir. Küçük yük direnci için bu çalışma noktası B-C noktaları arası, büyük yük direnci için E-F noktaları arasıdır. Maksimum güç ise A noktasında elde edilir.

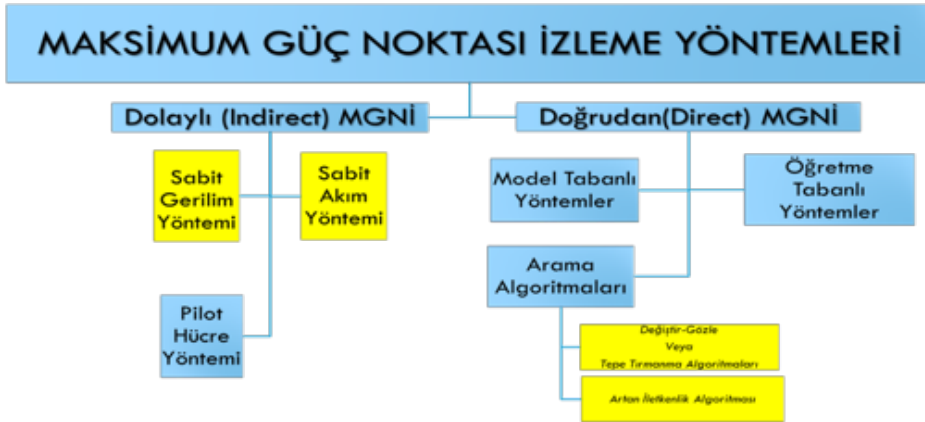


**Şekil 11.** Çeşitli direnç yükleri için fotovoltaik sistemin çalışma noktası (Ersöz ve Onat, 2009).

Böylece, büyük yükler için çalışma noktasının maksimum çalışma noktasının solunda, küçük yükler için sağında olduğunu görebiliriz.

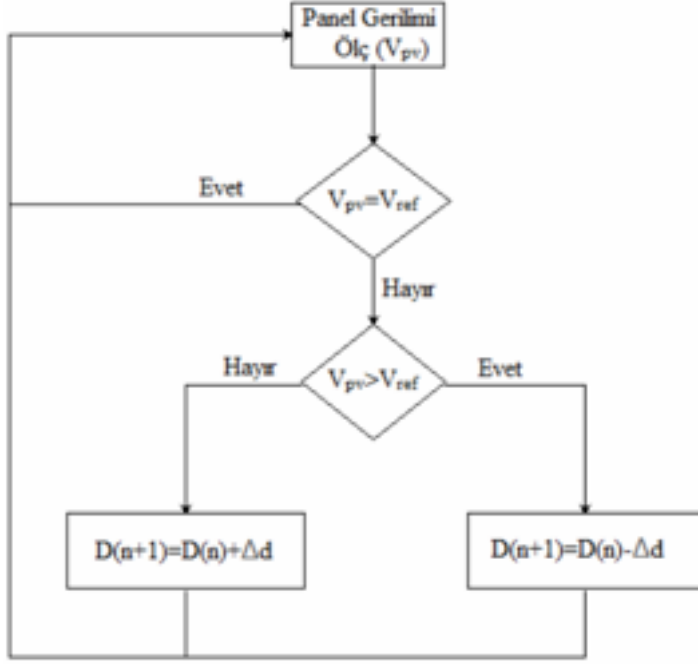
Fotovoltaik hücrenin maksimum güç noktasının sıcaklık ve ışınım gibi faktörlerle değişmesi ve yüklü sistemin çalışma noktasının yüke bağlı olarak değişmesi nedeniyle sistemi her zaman en yüksek güç noktasında çalıştırmak mümkün olmamaktadır. Sürekli olarak maksimum güç noktasında çalışabilmeyi sağlamak için çeşitli anahtarlamalı güç dönüştürücüleri ve birçok algoritma kullanılmaktadır.

Güç noktası izleme yöntemleri için yapılan birçok sınıflandırma bulunmakla birlikte aşağıda Şekil 12’de bunlardan bir tanesi kullanılarak en yaygın olan sabit gerilim yöntemi, sabit akım yöntemi, değiştir gözle algoritması ve artan iletkenlik algoritmaları hakkında ilerleyen kısımda bilgi verilmiştir.



Şekil 12. Maksimum güç noktası izleme yöntemleri (Ünlü, 2015).

Sabit Gerilim Algoritması- Kullanılan en basit algoritmadır. Değişkenler göz ardı edilir ve referans bir V değeri belirlenir. (Maksimum güç noktasındaki gerilim). Daha sonra belirli aralıklarla panel gerilimi ölçülerek referans gerilime eşit olup olmadığı kontrol edilir, değil ise doluluk/boşluk ayarı ile maksimum güç noktası izleme yapılır. (Şekil 13)

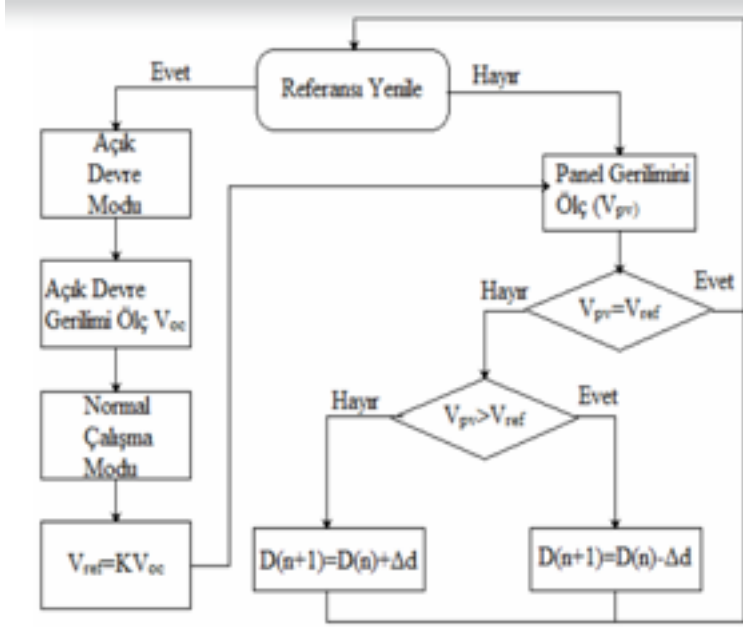


Şekil 13. Sabit gerilim algoritması (Keskin, 2014)

Açık Devre Gerilimi Yöntemi-Sabit gerilim yöntemine dayanır. Bu algorithmada, değişik çevre koşullarında aşağıdaki oran hesaplanıp bir K sabiti bulunur.

$$K = V_{mpp} / V_{oc} \quad (14)$$

Maksimum güç noktasındaki gerilim ile açık devre geriliminin farklı güneş ışınımı ve sıcaklık durumlarında sabit oranlı bir ilişkisi bulunduğu kabul edilir. (Asim ve ark., 2018). Şekil 14’te ilgili algoritma görülmektedir. Yöntemin dezavantajlarından biri, K sabitinin optimal değerinin bulunması oldukça zor olmasıdır. Ölçüm için Testi yapılan hücre kısa sürelerle devre dışı kaldığından güç kayıpları oluşur. Verimi diğer algoritmalara göre oldukça düşüktür.



**Şekil 14.** Açık devre gerilimi yöntemi (Keskin, 2014)

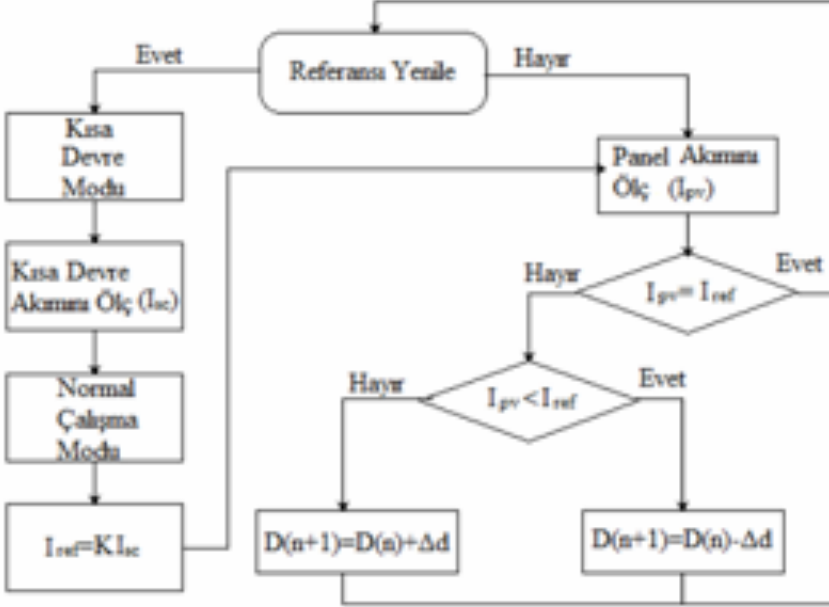
Sabit Akım Algoritması/Kısa Devre Akımı Yöntemi-Bu algoritmada, değişik çevre koşullarında aşağıdaki oran hesaplanıp bir K sabiti bulunur.

$$K=I_{\text{mpp}}/I_{\text{sc}} \quad (15)$$

Maksimum güç noktasındaki akım ile kısa devre akımının sabit oranlı bir ilişkisi bulunduğu kabul edilir. Panel çıkışına konulan bir anahtar kısa sürelerle ani olarak kapatılarak kısa devre akımı ölçülür. Şekil 15'te ilgili algoritma görülmektedir.

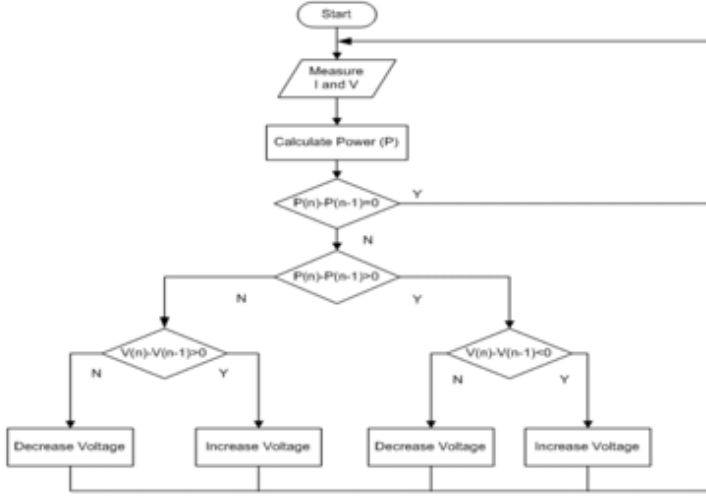
Oransal metodların şüphesiz en büyük avantajı kullanım kolaylıklarıdır. Genellikle tek bir değeri ölçmemiz gerekir ve uygulaması oldukça basittir. Panel çıkışına konulan bir anahtar kısa sürelerle kapatılarak akım ölçülür. Yani alıcıya bir süreliğine akım verilmez ve bu sistem verimliliğini etkiler. (Hadaj ve Nowak, 2016). Akım ölçmek gerilim ölçmeye göre zordur ve panelin kısa devre edilmesi her zaman mümkün olmayabilir.

Yöntemin diğer bir dezavantajı yine K sabitinin değerinin bulunmasının zor olmasıdır.



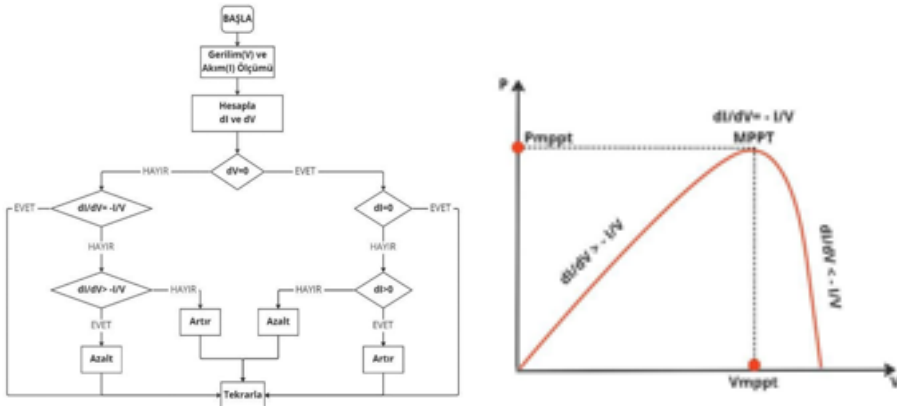
**Şekil 15.** Kısa devre akımı yöntemi (Keskin, 2014).

Değiştir Gözle Algoritması-Uygulamadaki basitliği nedeniyle tercih edilir. Fotovoltaik hücrenin gücünün gerilime göre değişim grafiğinden faydalanılır. Gerilimdeki küçük hatalara/değişimlere karşılık, gücün ne cevap verdiğine bakılır. Buna göre gerilimde artış veya azalma yapılarak maksimum güç noktası aranır. Yöntemin en büyük dezavantajı, algoritmanın hiçbir zaman gerçek maksimum güç noktasında kalamaması, güç noktasının sağında ve solunda salınım yapmasıdır. Yani algoritma sistemde sürekli olarak değiştir-gözetle işlemini yaptığından maksimum güç noktasına ulaştığında burada kalamayıp sürekli salınım yapar ve bu sistemde bir miktar güç kaybı demektir (Duman ve ark., 2014). Diğer dezavantajı, grafik yassılaştıkça gerilim artışına karşılık gelecek olan güç değişikliklerinin hissedilmez hale gelmesidir. Şekil 16’da ilgili algoritma görülmektedir.



Şekil 16. Değiştir-gözle algoritması (Putri ve ark., 2015).

Artan İletkenlik Algoritması- Güç eğrisinin dirsek noktasında gücün gerilime göre türevinin sıfır, noktanın solunda (+), sağında (-) olması bilgisini kullanır. Diğer algoritmalara göre daha zekidir ancak karmaşık olması ise dezavantajdır. Değiştir gözle algoritmasının aksine güç eğrisinin sağında ya da solunda olduğumuz bilgisine sahiptir. Şekil 17’de ilgili algoritma görülmektedir.



Şekil 17. (a) Artan iletkenlik algoritması (b)Algoritma P-V karakteristiği (Çakır ve Türkay, 2023).

## Sonuçlar

Fotovoltaik hücrenin güneş enerjisini elektrik enerjisine dönüştürmedeki verimi mevcut teknolojiler ile maksimum %21'lere ulaşabilmiştir. Bununla birlikte, bir panel ya da hücrenin verimini etkileyen ve kontrol altında tutulması gereken parametre sayısı da fazladır. Konum, panel sıcaklığı, kablolama kayıpları, uyumsuzluk kayıpları, arazi kullanımı ve gölgelendirme etkenlerini maksimum verimi elde edecek şekilde kullanmanın önemi bu çalışmada gösterilmiştir. Tüm bunların en iyi verimi elde edecek şekilde kullanımı da tek başına fotovoltaik hücreden maksimum performansı elde etmek için yeterli değildir. Çünkü fotovoltaik hücreler yarı iletken karakteristiğine sahiptirler ve verdikleri maksimum güç sıcaklık ve ışınım, çalışma noktaları da yüke bağlı olarak değişmektedir. Sürekli olarak en yüksek güç noktasında çalışmalarını için güç dönüşüm algoritmaları ile kontrol edilmeleri gerekmektedir.

## Kaynaklar

- [1] Altaş, İ. H., (1998). Fotovoltaj güneş pilleri: yapısal özellikleri ve karakteristikleri, *Enerji, Elektrik, Elektromekanik-3e*, 47, pp.66-71.
- [2] Asim, M., Tariq, M., Mallick, M. A., Ashraf, I., Kumari, S., Bhoi, A. K., (2018). *Critical evaluation of offline MPPT techniques of solar PV for stand-alone applications, in Advances in Smart Grid and Renewable Energy: Proceedings of ETAEERE-2016*, (pp. 13-21), Springer Nature Singapore, Singapore.
- [3] Boztepe, M., (2017). Fotovoltaik Güç Sistemlerinde Verimliliği Etkileyen Parametreler, *IV. İzmir Enerji Verimliliği Günleri*, 19-20, İzmir
- [4] Chikate, B. V., Sadawarte, Y., Sewagram, B. D. C. O. E., (2015). The factors affecting the performance of solar cell. *International journal of computer applications*, 1(1), 0975-8887.

[5] Çakır, M., Türkay, Y., (2023). Maksimum Güç Noktası Takibinde Kullanılan Değişir Gözle ve Artan İletkenlik Algoritmalarının Karşılaştırmalı Analizi. *In International Conference on Trends in Advanced Research* (Vol. 1, pp. 193-198), Konya.

[6] Deniz E., (2013). Güneş Enerjisi Santrallerinde Kayıplar, *III. Elektrik Tesisat Ulusal Kongre ve Sergisi Bildirileri*, İzmir

[7] Duman, S., Yörükeren, N., Altaş, İ. H., (2014). Fotovoltaik Enerji Sistemlerinin Modellenmesi, Benzetimi ve Uygulaması. *İleri Teknoloji Bilimleri Dergisi*, 3(1), pp.9-23.

[8] Duyan, F., Bayrakdarlar, K. P., (2022). Enerji Etkin Bina Tasarımında Yapı Elemanı olarak Fotovoltaik Sistemler. *Mimarlık ve Yaşam*, 7(3), 965-980.

[9] Ersöz, S., Onat, N., (2009). Fotovoltaik Sistemlerde Maksimum Güç Noktası İzleyici Algoritmalarının Karşılaştırılması, *V.Yenilenebilir Enerji Kaynaklar Sempozyumu*, 50-57, Diyarbakır.

[10] Hadaj, P. and Nowak, M., 2016. "Mppt Algorithms Used In Photovoltaics. *Advances in IT and Electrical Engineering*, 24(35-2), pp.5-17.

[11] Koç, A., Yağlı, H., Koç, Y., Uğurlu, İ., (2018). Dünyada ve Türkiye’de Enerji Görünümünün Genel Değerlendirilmesi. *Mühendis ve Makina*, 59(692), 86-114.

[12] Keskin, Y. E., (2014). *Fotovoltaik sistemlerde maksimum güç noktası izleme yöntemlerinin karşılaştırılması*, Yüksek lisans tezi, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli.



[13] Öztürk, H., (2017). Güneş Enerjisinden Fotovoltaik Yöntemle Elektrik Üretiminde Güç Dönüşüm Verimi ve Etkili Etmenler, *TMMOB Elektrik Mühendisleri Odası V. Elektrik Tesisat Ulusal Kongre ve Sergisi*, İzmir.

[14] Peled, A., Appelbaum, J., (2016). Minimizing the current mismatch resulting from different locations of solar cells within a PV module by proposing new interconnections. *Solar Energy*, 135, 840-847.

[15] Putri, R. I., Wibowo, S., Rifa'i, M., (2015). Maximum power point tracking for photovoltaic using incremental conductance method. *Energy Procedia*, 68, 22-30.

[16] Ünlü, M., (2015). *Fotovoltaik Sistemlerde Parçalı Gölgeleme Durumlarında Maksimum Güç Noktası İzleyebilen Şebeke Bağlantılı Yeni Bir Evirici Tasarımı ve Uygulaması*, Doktora Tezi, Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli.

### **İnternet Kaynakları**

URL 1- URL 1- <https://group.met.com/en/mind-the-fyouture/mindthefyouture/when-will-fossil-fuels-run-out>, (Erişim tarihi: 22.05.2023).

URL-2 <https://www.gosolartexas.org/solar-equipment>, (Erişim tarihi: 04.05.2023).

URL-3 <https://www.pveducation.org/pvcdrom/properties-of-sunlight/azimuth-angle> (Erişim tarihi: 04. 05. 2023)