

# FOTOVOLTAİK SİSTEMLERDE MAKSİMUM GÜÇ NOKTASI İZLEYİCİ ALGORİTMALARININ KARŞILAŞTIRILMASI

Nevzat ONAT\*

Sedat ERSÖZ\*\*

Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik Eğitimi A.B.D., Kadıköy-İstanbul,

\*nonat@marmara.edu.tr

\*\*sedatersoz1@gmail.com

## ÖZET

Fotovoltaik (PV) sistemlerin en önemli elemanı olan güneş pilleri, özellikle ilk yatırım maliyeti ve kullanılacak diğer elemanların nitelik ve miktarlarını da belirleyici özelliğe sahiptir. Bu nedenle ilk kurulum aşamasında güneş pillerinin en iyi şartlarda ve en yüksek verimle çalışabilecekleri bir sistem tasarlamak çok önemlidir. PV sistemlerin maksimum çıkış gücü sağlayarak çalıştığı maksimum güç noktası, güneş ışınlarının panel yüzeyine yaptığı açıya ve panel sıcaklığına bağlı olarak değişmektedir. Dolayısıyla yükün çalışma noktası her zaman fotovoltaik sistemin maksimum güç noktası değildir. Beslenen yüke talep ettiği gücü sürekli olarak sağlayabilmek amacıyla fotovoltaik sistemler gerektiğinden daha fazla modül içerecek şekilde tasarlanırlar. Bu durumda sistem maliyeti oldukça yükselir, ayrıca önemli miktarda enerji kaybı yaşanır.

Bu problemin çözümü için maksimum güç noktası izleyicisi (MGNI) olarak adlandırılan anahtarlamalı güç konvertörü kullanılabilir. Böylece fotovoltaik panellerin maksimum güç noktasında sürekli çalışması sağlanabilir. MGNI fotovoltaik panelin gerilim ve akımını yükten bağımsız olarak kontrol ederek bu işlemi gerçekleştirmektedir.

Bu çalışmada, sistem tasarımında en çok kullanılan MGNI algoritmaları incelenmiştir. Algoritmaların sınıflandırılması, tanımları ve temel denklemleri verilmiştir. Literatürdeki çalışmalar dikkate alınarak, bu algoritmaların karşılaştırmalı analizi gerçekleştirilmiştir.

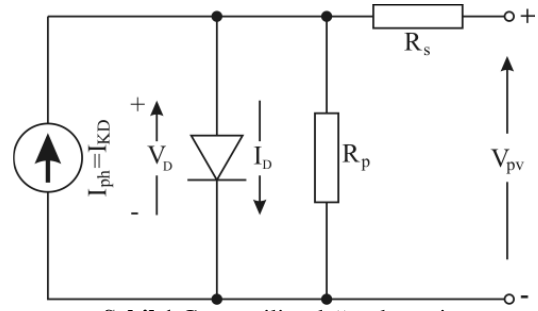
**Anahtar kelimeler:** Fotovoltaik sistemler, doldurma faktörü, maksimum güç noktası, hata ve gözlem algoritması, sabit gerilim algoritması,

## 1. GİRİŞ

Fotovoltaik (PV) sistemler, güneş pilleri, bağlantı elemanları, koruma elemanları, depolama elemanları ve beslediği yükün karakteristiğine bağlı olarak bazı ilave elemanlar içeren bir yapıya sahiptirler. Bu sistemlerin en önemli elemanı olan güneş pilleri, özellikle ilk yatırım maliyeti ve kullanılacak diğer elemanların nitelik ve miktarlarını da belirleyici özelliğe sahiptir. Bu nedenle ilk kurulum aşamasında güneş pillerinin en iyi şartlarda ve en yüksek verimle çalışabilecekleri bir sistem tasarlamak çok önemlidir.

Şekil 1'de güneş pilinin eşdeğer devresi görülmektedir. Güneş hücresinden elde edilen elektrik üretimi devrede gerilim bağımlı bir akım kaynağından çekilen akım ile ( $I_{ph}$ ) sembolize edilmiştir. Hücre üzerinde düşen ışınım miktarı arttıkça üretilen elektrik akımı da artmaktadır. Güneş pili gövdesi yarı iletken malzeme olması nedeniyle bir diyotla gösterilmiştir. Güneş pilinden elde edilen gerilim ise  $V_{pv}$  olarak gösterilmektedir. Çıkış ucuna seri bağlı olarak gösterilen direnç değeri ( $R_s$ ) hücreyi oluşturan yarı iletken malzemenin direnci ile hücrelerin birbirine

bağlantı noktalarında oluşan temas dirençlerinin toplamına eşittir. Paralel direnç ( $R_p$ ) ise çok ince katmanlardan oluşan ince film yapısına sahip malzemelerde katmanlar arasında ve hücre çevresinde oluşan dirençlerin toplamı olarak alınmaktadır. Yapılan incelemelerde seri direnç değerinin paralel dirence oranla çok küçük olduğu ve ihmal edilebileceği belirlenmiştir. Devrenin asıl direnci seri direnç olarak kabul edilebilir.



Şekil 1 Güneş pili eşdeğer devresi

Şekil 1'de görülebileceği gibi bir fotovoltaik pilin dış devreye verdiği akım miktarı kısa devre akımı

( $I_{KD}$ ) ile diyot üzerinden geçen akımın ( $I_D$ ) farkına eşittir. Bu durumda;

$$I = I_{ph} - I_D = I_{ph} - I_0 \left( e^{\frac{qV}{kT_C}} - 1 \right) \quad (1)$$

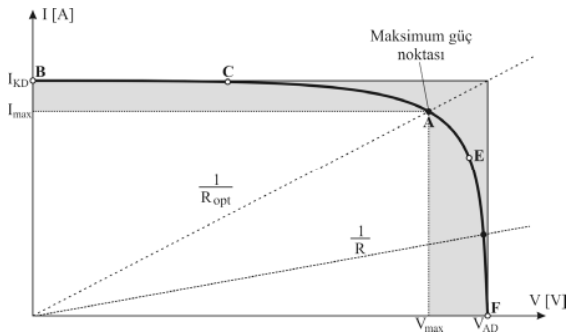
ifadesi yazılabilir. Bu ifade;  $k$  Boltzmann gaz sabiti ( $k = 1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$ ),  $T_C$  pilin mutlak sıcaklığı ( $K$ ),  $q$  elektron yükü ( $q = 1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$ ),  $V$  pil üzerinde düşen gerilim ve  $I_0$  büyük ölçüde sıcaklığa bağlı olarak değişen karanlık doyma akımı değerini göstermektedir.

Yukarıdaki ifadeye dış devreye verilen akım sıfır kabul edilirse pilin üreteceği açık devre gerilimi;

$$V_{AD} = \frac{k \cdot T_C}{q} \ln \frac{I_{ph} + I_0}{I_0} \approx \frac{k \cdot T_C}{q} \ln \frac{I_{ph}}{I_0} \quad (2)$$

olarak ifade edilebilir. Diyot üzerinden geçen karanlık doyma akımı, pil tarafından üretilen akımdan çok küçük olduğundan ihmal edilebilir [1-3].

**Şekil 2'**de sabit pil sıcaklığı ve güneş ışınımı ( $G_a$ ) değerleri altında, bir güneş pilinin akım-gerilim ( $I-V$ ) karakteristiği görülmektedir.



**Şekil 2** Güneş pilinin tipik akım-gerilim karakteristiği

Akım gerilim karakteristiğinden de anlaşıldığı gibi güneş pili aydınlatıldığında pil uçlarında pozitif bir potansiyel fark meydana gelir ve dış devreye pozitif bir akım verebilir. Pil uçlarına değişken bir direnç yük olarak bağlanacak olursa, bu yükün çalışma noktası karakteristik eğrinin üzerinde bir değerdir. Bir direnç yükü için yük karakteristik eğrisi eğimi  $I/V = 1/R$  olan bir doğrudur. Bu nedenle yüke aktarılan güç miktarı sadece yük direncine bağlıdır.  $R$  direnci küçük değerlerde ise, güneş pili  $B-C$  noktaları arasında sabit bir akım kaynağı davranışı göstererek çalışır. Şayet  $R$  direnci yüksek bir değere sahipse, bu durumda pil  $E-F$  noktaları arasında sabit bir gerilim

kaynağı gibi çalışacaktır. Pil için en verimli çalışma noktası  $A$  noktasıdır ve bu nokta **maksimum güç noktası (MGN)** olarak adlandırılır. Bu noktada pilden çekilen güç;

$$P_{max} = I_{max} \cdot V_{max} \quad (3)$$

olarak ifade edilir. Dolayısıyla bu noktada çalışma durumunda pilden alınan verim de maksimum olacaktır.

$$\eta_{max} = \frac{P_{max}}{P_{in}} = \frac{P_{max}}{A \cdot G_a} \quad (4)$$

Bu ifadeye,  $A$  değeri  $m^2$  cinsinden fotovoltaik panel alanını,  $G_a$  ise  $Wh/m^2$  cinsinden panelin bulunduğu ortamdaki güneş ışınım miktarını göstermektedir. **Şekil 2'**de görülen  $I-V$  karakteristiğinin bir diğer ölçütü ise **doldurma faktörü (Fill Factor (FF))** olarak ifade edilen büyüklüktür. Doldurma faktörü pil kalitesini de belirler. Sistem tasarımında iyi bir pil seçimi için bu değer 0,7 veya daha büyük olması gerekir. **Şekil 2'**de taralı bölgenin kısa devre akımı ve açık devre geriliminin oluşturduğu dikdörtgenin alanından çıkarılması ile doldurma faktörü değeri bulunur. Matematiksel olarak;

$$FF = \frac{P_{max}}{V_{AD} \cdot I_{KD}} = \frac{V_{max} \cdot I_{max}}{V_{AD} \cdot I_{KD}} \quad (5)$$

olarak ifade edilir. Güneş pili modüllerinin katalog bilgilerinde standart test şartları ( $G_{a,0} = 1000 \text{ W/m}^2$ ,  $T_0^C = 25^\circ \text{C}$ ) altında ve nominal şartlarda ( $G_{a,ref} = 800 \text{ W/m}^2$ ,  $T_{a,ref} = 20^\circ \text{C}$ ) maksimum güç, kısa devre akımı ve açık devre gerilimi değerleri yer almaktadır [4].

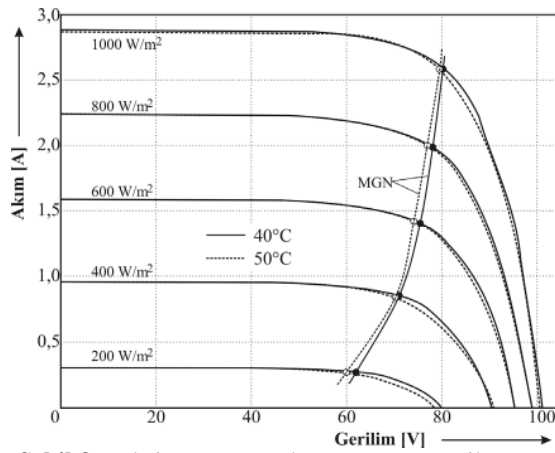
## 2. MAKSİMUM GÜÇ NOKTASININ DEĞİŞİMİ

Fotovoltaik panellerin maksimum verimle ve maksimum çıkış gücü sağlayarak çalıştığı maksimum güç noktası, güneş ışınlarının panel yüzeyine yaptığı açıya ve panel sıcaklığına bağlı olarak değişmektedir. Dolayısıyla yükün çalışma noktası her zaman maksimum güç noktası fotovoltaik sistem maksimum güç noktası değildir. Beslenen yüke talep ettiği gücü sürekli olarak sağlayabilmek amacıyla fotovoltaik sistemler gerektiğinden daha fazla modül içerecek şekilde tasarlanırlar. Bu durumda sistem maliyeti oldukça yükselir, ayrıca önemli miktarda enerji kaybı yaşanır.

Bu problemin çözümü için maksimum güç noktası izleyicisi (MGNİ) olarak adlandırılan anahtarlamalı

güç konvertörü kullanılabilir. Böylece fotovoltaik panellerin maksimum güç noktasında sürekli çalışması sağlanabilir. MGNİ fotovoltaik panelin gerilim ve akımını yükten bağımsız olarak kontrol ederek bu işlemi gerçekleştirmektedir. Doğru tasarlanmış bir MGNİ algoritması ve modelleme hesaplamaları ile maksimum güç noktasının yeri ve paneller tarafından izlenmesi gerçekleştirilebilir. Maksimum güç noktası güneş ışınımı miktarı ve az da olsa sıcaklıkla değişmektedir (Şekil 3) [5].

Bu çalışmada, maksimum güç noktasının belirlenmesi ve izlenmesi için kullanılan algoritma ve modeller üzerinde durulmaktadır. Literatürde sunulan sistemlerin ana prensipleri incelenerek birbirlerine karşı avantaj ve dezavantajlarının neler olduğu üzerinde durulmuştur



Şekil 3 Maksimum güç noktasının ışınım miktarı ve sıcaklıkla değişimi

### 3. MAKSİMUM GÜÇ NOKTASI İZLEYİCİLERİNİN SINIFLANDIRILMASI

Yukarıda belirtildiği gibi bir fotovoltaik panelin maksimum güç noktasını bulmak ve takip etmek için literatürde çok sayıda strateji ve algoritmalar geliştirilmiştir. Bu algoritmalar en genel anlamda doğrudan ve dolaylı MGNİ sistemleri olmak üzere iki başlıkta toplanabilir.

#### 3.1. Dolaylı (Indirect) MGN İzleyiciler

Bu tip MGNİ'ler maksimum güç noktasının basit kabuller ve ölçümler aracılığıyla bu noktadaki pil geriliminin hesaplanması prensibi ile çalışırlar. Bu sistemlerin uygulama açısından çeşitli tipleri mevcuttur. Bunlardan bazı örnekler aşağıda sıralanmıştır.

- Fotovoltaik panelin çalışma gerilimi mevsimlik olarak ayarlanabilir. Bu sistemde kış aylarında pil

ısının düşük olmasından dolayı daha yüksek MGN gerilimi ölçülmesi, yaz aylarında ise tersi bir durumun oluşması beklenebilir.

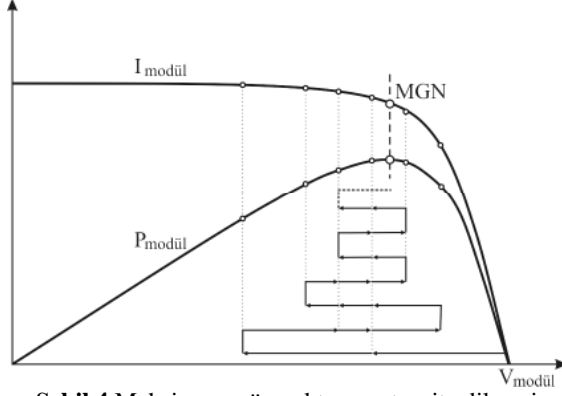
- Çalışma gerilimi modül sıcaklığına göre ayarlanabilir.
- Fotovoltaik pilin ani açık devre geriliminin belirli bir sabit sayıyla (örneğin silikon piller için 0,8 gibi) çarpılarak MGN gerilimi hesaplanabilir. Fotovoltaik panelin açık devre gerilimi periyodik olarak ölçülür. Bu işlem, yükün örneğin her 2 dakikada bir 1ms gibi çok kısa sürelerle devre dışına alınarak gerçekleştirilir.
- Bazı sistemlerde ise güneşin azimut ve yükseklik (altitude) açılarına göre tasarım yapılır. Fotovoltaik sistemin kurulacağı bölgenin coğrafi konumuna göre güneş açılarının değişimi bir veritabanına aktarılarak MGNİ'nin hareketi bu veri tabanındaki bilgilere göre şekillenir [6].

Yukarıda tanımlanan yöntemlerin avantajı çok basit yapıda olmalarıdır. Ancak sadece optimum çalışma noktası için bir tahmin sonucu verirler. Piller eskimesi veya kirlenmesinden dolayı oluşacak değişimlere duyarlı değildirler.

#### 3.2. Doğrudan (Direct) MGN İzleyiciler

Bu sistemlerde, optimal çalışma noktası fotovoltaik panelden alınan akım, gerilim veya güç ölçümlerinde elde edilir. Bu nedenle zaman içerisinde çeşitli nedenlerle sistemin performansında meydana gelebilecek değişikliklerden etkilenerek daha doğru bir izleme yapabilirler. Bu tip sistemlerin uygulama örnekleri aşağıdaki temel prensipleri kullanılmaktadırlar.

- $I-V$  karakteristik eğrisinin bir bölümünün periyodik olarak taranması prensibi ile çalışır. MGNİ sistemlerinde, modülün çalışma gerilimi DC/DC konvertör tarafından verilen bir gerilim çerçevesi içerisinde maksimum modül gücü elde edilir ve çalışma noktası bu güce karşılık gelen gerilime ayarlanır. Pratikte, DC/DC konvertörün çıkış akımını ölçmek ve bu değeri en yüksek değere çıkarmak daha kolaydır. Bu yöntemle de istenen amaç gerçekleştirilmiş olur.
- İkinci yöntem, dilimize dağa tırmanma algoritması (mountain-climb algorithm) olarak çevrilebilir. Burada, çalışma gerilimi küçük adımlarla periyodik olarak değiştirilerek modül gücü veya akımındaki artış ölçülür. Böylece artış durduğu veya azalmaya başladığı nokta tespit edilerek ani çalışma noktası olarak kabul edilir (Şekil 4). Eğer güç veya akım, gerilimin her bir adım artışında artıyorsa, araştırma yönü ileriye, aksi halde geriye doğru sürdürülür. Bu yolla maksimum güç noktası bulunur ve çalışma noktası gerçek MGN civarında bir salınım yapar.



**Şekil 4** Maksimum güç noktasının tespit edilmesi (mountain-climb algorithm)

MGNİ kullanılmadan tasarlanan sistemler için yukarıda sözü edilen enerji kayıpları, uygun eleman seçimi ve doğrudan MGN izleyici sistemlerinin kurulması ile çok küçük oranlarda tutulabilir. Ayrıca MGN noktasının belirlenmesi ve izlenmesiyle tüm sistem için optimum çalışma parametreleri de elde edilebilir. Örneğin, tipik bir güneş evi sisteminde batarya grubu öğleden önce tamamen şarj edilerek, fazla enerji miktarı çeşitli yüklerle dağıtılabilecektir. Güneş pili üreticileri veya bilim adamları genellikle MGN izleyiciler kullanılarak büyük bir enerji kazancı sağlanabileceğinin altını çizmektedirler.

Ayrıca maksimum güç noktasını takip ederek işlem yapan şarj kontrol ünitelerinin uygun DC/DC konvertörlerle kullanılmasının avantajları şu şekilde sıralanabilir:

- Fotovoltaik panel ile batarya grubu arasındaki mesafenin uzun olması durumunda, panel gerilimi batarya geriliminden bir miktar yüksek seçilir. Böylece şarj akımı düşürülerek, iletkenler üzerindeki güç kaybı azaltılmış olur.
- Küçük güçlü uygulamalarda, PV modül seri bağlı çok sayıda küçük pil yerine, sadece bir kaç büyük pilden oluşturulur. Böylece üretim maliyetleri, pil uyumsuzluğunun etkileri ve kısmi gölgelenmeye karşı duyarlılığı azaltılmış olur.
- DC/DC konvertör vasıtasıyla daha kompleks şarj akımı profilleri gerçekleştirilebilir [7].

#### 4. MGNİ ALGORİTMALARININ TANIMLANMASI

MGNİ sistemlerinin bir diğer sınıflandırma şekli de kullanılan kontrol teknikleri olabilir. Birçok MGNİ kontrol algoritmaları geliştirilmiştir. Ticari olarak fotovoltaik sistem pazarında en çok kullanılan algoritma hata gözlem (perturb&observe (P&O)) tekniğidir. Buna rağmen hangi algoritmanın en iyi sonucu verdiği konusunda oluşmuş bir görüş birliği yoktur. Bunun en önemli nedenlerinden biri de

literatürde MGNİ algoritmalarının verimlerini birbirleriyle karşılaştıran kapsamlı çalışmaların olmamasıdır. Yapılan çalışmaların çoğu bir MGNİ algoritması ile izleyici olmayan doğrudan bağlı sistemleri veya bir MGNİ algoritması ile sabit çalışma noktası için tasarlanmış bir konvertör sistemini karşılaştırmaktadır. Diğer karşılaştırma çalışmalarında ise algoritmalar arası karşılaştırma yapılmasına rağmen, bu karşılaştırmalar genellikle temel bir algoritma (genellikle hata gözlem algoritması) ile test koşulları altında tamamen optimize edilmiş parametreler içeren algoritmanın karşılaştırılması esasına dayanmaktadır.

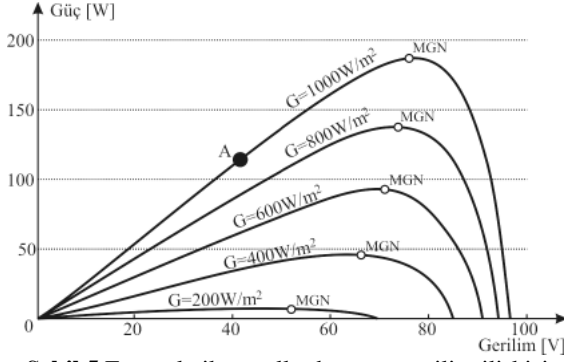
Bir MGNİ sisteminin verimi en önemli parametresidir. Bu verim,

$$\eta_{MGNİ} = \frac{\int_0^t P_{alınan}(t) dt}{\int_0^t P_{maks}(t) dt} \quad (6)$$

ifadesiyle elde edilir. Burada  $P_{alınan}$  fotovoltaik panel tarafından MGNİ sistemi kullanılarak ölçülen gücü,  $P_{maks}$  ise belirli şartlar altında üretebileceği maksimum gücü göstermektedir. Bu çalışmada literatürde en çok karşılaşılan dört MGNİ algoritmasının tanımı yapılarak, verimleri açısından karşılaştırılmıştır.

#### 4.1. Hata ve Gözlem (P&Q) Algoritması

P&Q algoritması uygulamadaki basitliği nedeniyle pratikte en çok kullanılan yaklaşımdır. Bu algoritmada fotovoltaik panelin  $P-V$  karakteristiğinden faydalanılmaktadır. Bilindiği gibi, fotovoltaik panellerden üretilen güç gerilimin bir fonksiyonu olarak değişmektedir. Hata ve gözlem algoritmasında PV panelin çalışma geriliminde küçük bir artış gerçekleştirilerek, güçteki değişim miktarı ( $\Delta P$ ) ölçülür.  $\Delta P$  değeri pozitif ise çalışma gerilimi tekrar artırılarak PV panel çalışma noktası maksimum güç noktasına yaklaştırılır. Böylece gerilimde küçük hatalar oluşturularak güçte meydana gelen hatanın işareti izlenir. **Şekil 5'**deki  $P-V$  karakteristiğine sahip bir PV panelin  $-A-$  noktasında çalıştığını kabul edecek olursak, yukarıdaki işlem tekrarlanarak çalışma noktası yukarıya doğru taşınmış olacaktır. MGN'dan sonra gerilimin artması durumunda  $\Delta P$ 'in değişimi negatif olacağından gerilim artışı yönü değiştirilerek, sistemin maksimum güç noktasına en yakın noktaya getirilmesine çalışılır [8].



Şekil 5 Fotovoltaik panellerde güç – gerilim ilişkisi

P&Q algoritmasının en önemli avantajı basit ve uygulanmasının kolay olmasıdır. Ancak en önemli dezavantajı MGNİ verimini azaltıcı sınırlamalara sahip olmasıdır. Gün ışığının azaldığı durumlarda, örneğin Şekil 5'deki  $G = 400W/m^2$  ve  $G = 200W/m^2$  eğrilerinde bir yataylaşma olduğundan MGN'nin yerini tam olarak tespit etmek güçleşmektedir. Bunun nedeni gerilimdeki değişmelerin çok küçük güç hataları oluşturmasıdır. Bu yöntemin diğer bir temel olumsuzluğu da MGN'nin gerçek yerini tespit edememesidir. Bu yöntemde ancak çalışma noktasının MGN'na yakın bir bölgede salınım yapması sağlanabilmektedir. Bu salınım miktarını azaltmak amacıyla literatürde bazı çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Sisteme bir bekleme fonksiyonu eklenerek gerilim artışları arasındaki süre artırılarak salınım miktarı azaltılabilir. Ancak bu bekleme süresi sabit ışınım şartları altında başarılıdır. Hatta bu şartlar altında algoritmanın verimini de artırabilir. Ancak sisteme ilave edilen bekleme süresi atmosferik şartların değişimine verilen cevap süresini yavaşlatır ve özellikle parçalı bulutlu günlerde kararsız davranışları daha da kötüleştirir. Salınımı azaltıcı diğer bir yöntem,  $V_1$  panel geriliminde ölçülen  $P_1$  ve gerilimin  $V_2$  değerine arttırılması durumunda ölçülen  $P_2$  değerlerinden sonra gerilimin tekrar  $V_1$  değerine indirilerek bu noktadaki  $P_1'$  değerinin elde edilmesidir. Eğer  $P_1$  ve  $P_1'$  değerleri arasında fark olursa ortamdaki ışınım miktarında değişme olduğu sonucuna varılarak MGN'nin tekrar tespit edilmesi için algoritma çalışır. Eğer fark oluşmamışsa panelin çalışma noktası değiştirilmez. Ancak bu yöntemde örnekleme sayısının artması ile birlikte algoritmanın çalışma hızı yavaşlar. Ayrıca elde edilen iki değer arasındaki farka bakılarak algoritmanın gerilimi azaltıcı veya artırıcı yönde çalışmasına karar verilmesi gerekmektedir. Bu işlemler algoritmanın karmaşıklığını arttırmaktadır [5, 9].

## 4.2. Sabit Gerilim ve Akım Algoritması

Sabit gerilim (constant voltage (CV)) algoritması, Şekil 2'den de görüleceği gibi, maksimum güç noktasındaki gerilim ile açık devre gerilimi arasındaki oranın yaklaşık sabit olduğu esasına dayanmaktadır.

$$\frac{V_{max}}{V_{AD}} \cong K < 1 \quad (7)$$

olarak yazılabilir. CV algoritmasında güneş paneli geçici olarak MGNİ'den ayrılarak açık devre gerilimi ölçülür ve (7) denkleminde MGN gerilimi hesaplanır. Hesaplanan bu değere panel gerilimi ayarlanarak MGN'da çalışma sağlanmış olur. Bu işlem periyodik olarak tekrarlanarak MGN'nin pozisyonu sürekli takip edilir. Bu yöntemin oldukça basit olmasına rağmen,  $K$  sabitinin optimal değerini belirlemek zordur. Literatürde  $K$  değerinin %73-80 arasında değiştiği ortaya konulmuştur.

Sabit gerilim kontrolü analog donanımlarla kolayca gerçekleştirilebilir. Ancak, bu yöntemin MGN izleme verimi diğer algoritmalarla oranla daha düşüktür. Bunu nedeni daha önce belirtilen  $K$  sabitinin optimal değerinin elde edilme zorluğu ve daha da önemlisi açık devre geriliminin ölçülebilmesi için PV gücün ani olarak kesilmesini gerektirmesidir.

Sabit gerilim algoritması için yukarıda belirtilen yaklaşım aynı şekilde sabit akım (constant current (CC)) için de gerçekleştirilebilir. Sabit akım algoritmasında maksimum çalışma noktasındaki akım ile kısa devre akımı arasındaki oran kontrol edilerek işlem yapılır. Bu yöntemi gerçekleştirmek için PV panel çıkışına veya konvertör girişine konulan bir anahtar kullanılır. Bu anahtar ani olarak kapatılarak kısa devre akım değeri ölçülür ve  $K$  sabiti kullanılarak çalışma noktasındaki gerilim belirlenmiş olur. Bu işlem periyodik olarak tekrar edilir.

Doğal olarak, sabit gerilim yöntemi daha çok tercih edilmektedir. Çünkü gerilimi ölçmek akıma nazaran daha kolaydır. Ayrıca, paneli açık devre durumuna getirmek basit bir işlemdir. Panel uçlarını kısa devre etmek ise pratik olarak çoğu zaman mümkün olmayabilir [5].

## 4.3. Artan İletkenlik Algoritması

Artan iletkenlik algoritması fotovoltaik panel gücünün gerilime göre türevinin alınarak sıfıra eşitlenmesi esasına dayanır. Buna göre maksimum güç noktasında,

$$\frac{dP}{dV} = \frac{d(V \cdot I)}{dV} = I + V \frac{dI}{dV} = 0 \quad (8)$$

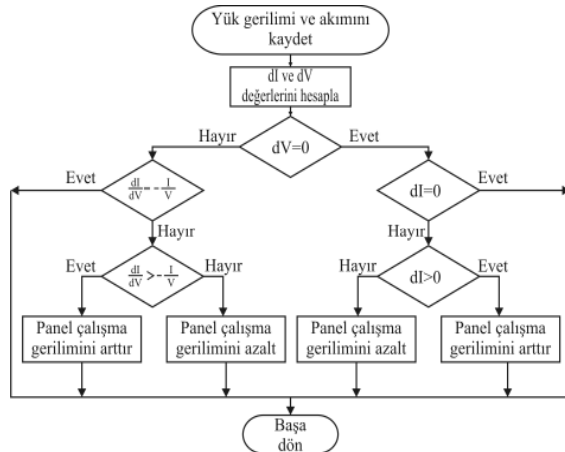
olmaktadır. (6) denkleminin yeniden düzenlenmesiyle;



$$-\frac{I}{V} = \frac{dI}{dV} \quad (9)$$

denklemin elde edilir. (9) denklemindeki  $-I/V$  ifadesi fotovoltaik panelin ani iletkenlik değerinin tersini ifade etmektedir. Denklemin sağ tarafındaki ifade ise artan iletkenlik değeridir. Bu durumda maksimum güç noktasında bu iki değer birbirine eşit fakat zıt işaretli olması gerekir. Bu denklemin bir eşitsizlik olması halinde çalışma geriliminin MGN geriliminden düşük ya da yüksek olduğu anlaşılır. Artan iletkenlik algoritması akış diyagramı **Şekil 6**'da görülmektedir.

Artan iletkenlik metodu, hata ve gözlem metodundan farklı olarak, ne yönde bir gerilim değişimi yapması gerektiğini hesaplayabilmektedir. Ayrıca maksimum güç noktasına tam olarak ulaşıp ulaşılmadığını da tespit edebilmektedir. Böylece, hızla değişen şartlar altında dahi yanlış yönlü bir izleme dolayısıyla MGN etrafında bir salınım yapmazlar [5].



**Şekil 6** Artan iletkenlik algoritması ile MGN belirleme işlemi akış diyagramı

#### 4.4. Parazit Kapasite Algoritması

Parazit kapasite metodu, artan iletkenlik metodu ile benzerlikler göstermektedir. Ancak bu yöntemde, fotovoltaik pillerin  $p-n$  birleşim bölgesinde oluşan yük birikimi sonucu ortaya çıkan "parazit birleşim kapasitesi" değerinin değişimi dikkate alınır. Bu kapasitenin çektiği  $i(t) = C \frac{dV}{dt}$  akımı aydınlatılmış diyot denkleminde (1 no'lu denklem) eklenerek,

$$I = I_{ph} - I_0 \left( e^{\frac{qV}{kT_c}} - 1 \right) + C \frac{dV}{dt} = F(V) + C \frac{dV}{dt} \quad (10)$$

denklemin elde edilmiş olur. Bu denklemin panel gerilimi ile çarpımının türevi alınırsa,

$$\frac{dF(V)}{dV} + C \left( \frac{V'}{V} + \frac{V''}{V'} \right) + \frac{F(V)}{V} = 0 \quad (11)$$

olur. Bu ifadedeki üç terim sırasıyla ani iletkenlik, parazit kapasite nedeniyle gerilimde oluşan titreşimleri ve artan iletkenlik değerlerini göstermektedir. Panel geriliminin birinci ve ikinci türevi konvertör tarafından üretilen A.C. titreşim bileşenlerini dikkate almaktadır. Bu ifadede kapasite değeri sıfır kabul edilirse, artan iletkenlik algoritması denklemin elde edilmektedir. Parazit kapasite algoritması modül içerisindeki her bir pile paralel bağlı bir kondansatör şeklinde modellendiğinden, pillerin paralel bağlanması MGN tarafından görülen kapasite miktarını arttıracaktır. Bu nedenle, parazit kapasite ve artan iletkenlik algoritmalarına göre tasarlanan MGN verimliliği arasındaki verim farkı çok sayıda pilin paralel bağlandığı yüksek güçlü fotovoltaik sistemlerde maksimum değerine ulaşır [5].

## 5. SONUÇ

Fotovoltaik sistemlerde kullanılan MGN algoritmaları sistemin elektriksel verimini etkileyen en önemli unsurlardan biridir. Maliyet optimizasyonu sonucunda sistem tasarımcısı tarafından MGN kullanımına karar verildikten sonra, seçilecek MGN'nin hangi algoritmayı kullanacağı önem kazanmaktadır.

Bu çalışmada, MGN algoritmalarının genel sınıflandırması ve en çok kullanılan algoritma tanımlamaları sunulmuştur. Hata ve gözlem, sabit akım ve gerilim, artan iletkenlik ve parazit kapasite algoritmalarının çalışma prensipleri üzerinde durulmuştur. Literatürde bu algoritmaların birbirleriyle karşılaştırıldığı çalışmalar çok fazla yer almamakla birlikte, çalışmalar sonucu ortaya konulan verim aralıkları ve diğer karşılaştırma kriterleri **Tablo 1**'de verilmiştir.

**Tablo 1** MGNİ algoritmalarının çeşitli parametrelere göre karşılaştırılması [5, 10].

Karşılaştırma Parametreleri	MGNİ ALGORİTMALARI			
	Hata Gözlem	Sabit Gerilim	Artan İletkenlik	Parazit Kapasite
Verim	81,5 - 85	88 - 89,9	73 - 85	99,8
Panele Bağımlı Çalışma	Hayır	Evet	Hayır	Hayır
MGN'nın tam olarak tespiti	Evet	Hayır	Evet	Evet
Analog veya dijital kontrol	Her ikisi	Her ikisi	Dijital	Analog
Periyodik ayar gereksinimi	Hayır	Evet	Hayır	Hayır
Yaklaşma hızı	Değişken	Orta	Değişken	Hızlı
Uygulama karmaşıklığı	Düşük	Düşük	Orta	Düşük
Algılanan büyüklükler	Gerilim Akım	Gerilim	Gerilim Akım	Gerilim Akım

En yüksek verime sahip tasarım parazit kapasite algoritması olarak rapor edilmiştir. Ancak uygulamada en çok kullanılan tasarımlar, ticari olarak daha ekonomik ve basit yapılı olan, hata ve gözlem algoritmasına dayalı maksimum güç noktası izleyici sistemleridir.

## KAYNAKLAR

- [1] Patel, M.R., *Wind and Solar Power Systems*, CRC Press, U.S.A, 1999.
- [2] Green, M.A., "Photovoltaics: Technology Overview", *Energy Policy*, Vol.28, p.989-998, 2000.
- [3] Messenger, R., Ventre J., *Photovoltaic System Engineering Chapter-3*, CRC Press LLC, pp.41-45, 2000.
- [4] Hansen, A.D., Sorensen, P., Hansen, L.H. and Bindner, H., *Models for a Stand-Alone PV System*, Danka Services International A/S, pp.9-10, 2001.
- [5] Hohm, D.P., Ropp, M.E., "Comparative Study of Maximum Power Point Tracking Algorithms", *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, John Wiley and Sons, Ltd, pp.47-62, 2001.
- [6] Sungur, C., "Multi-Axes, Sun-Tracking System with PLC Control for Photovoltaic Panels in Turkey", *Renewable Energy*, Vol.34, pp.1119-1125, 2009.

- [7] Luque, A., Hegedus, S., *Handbook of Photovoltaic Science and Engineering, Chapter-19*, John Wiley and Sons, Ltd, pp.871-873, 2003.
- [8] Yafaoui, A., Wu, B., Cheung, R., "Implementation of Maximum Power Point Tracking Algorithm for Residential Photovoltaic Systems", 2nd Canadian Solar Building Conference, 2007.
- [9] Nikraz, M., Dehbonei, H., Nayar, C., "A DSP Controlled Photovoltaic System with Maximum Power Point Tracking", url:<http://www.itee.uq.edu.au/~aupec/aupec03/papers/129%20Nikraz%20full%20paper.pdf>, 2009.
- [10] ESRAM, T., Chapman, P.L., "Comparison of Photovoltaic Array Maximum Power Point Tracking Techniques", *IEEE Transactions on Energy Conversion*, Vol.22, No.2, pp.439-449, 2007.