

**T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**FOTOVOLTAİK SİSTEMLERDE KISMİ GÖLGELENME
DURUMLARI İÇİN HİBRİT MAKSİMUM GÜÇ NOKTASI
İZLEYİCİSİ TASARIMI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Tuğba ŞAHİN

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Elektrik Mühendisliği Bilim Dalı

OCAK 2025

T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**FOTOVOLTAİK SİSTEMLERDE KISMİ GÖLGELENME
DURUMLARI İÇİN HİBRİT MAKSİMUM GÜÇ NOKTASI
İZLEYİCİSİ TASARIMI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Tuğba ŞAHİN

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Elektrik Mühendisliği Bilim Dalı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Mehmet BAYRAK

OCAK 2025

Tuğba ŞAHİN tarafından hazırlanan “Fotovoltaik Sistemlerde Kısmi Gölgeleme Durumları için Hibrit Maksimum Güç Noktası İzleyicisi Tasarımı” adlı tez çalışması 24.01.2025 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı Elektrik Mühendisliği Bilim Dalı’nda Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Tez Jürisi

Jüri Başkanı :

Jüri Üyesi :

Jüri Üyesi :



ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ

Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Lisansüstü Eğitim-Öğretim Yönetmeliğine ve Yükseköğretim Kurumları Bilimsel Araştırma ve Yayın Etiği Yönergesine uygun olarak hazırlamış olduğum “FOTOVOLTAİK SİSTEMLERDE KISMİ GÖLGELENME DURUMLARI İÇİN HİBRİT MAKSİMUM GÜÇ NOKTASI İZLEYİCİSİ TASARIMI” başlıklı tezin bana ait, özgün bir çalışma olduğunu; çalışmamın tüm aşamalarında yukarıda belirtilen yönetmelik ve yönergeye uygun davrandığımı, tezin içerdiği yenilik ve sonuçları başka bir yerden almadığımı, tezde kullandığım eserleri usulüne göre kaynak olarak gösterdiğimi, bu tezi başka bir bilim kuruluna akademik amaç ve unvan almak amacıyla vermediğimi ve 20.04.2016 tarihli Resmi Gazete’de yayımlanan Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliğinin 9/2 ve 22/2 maddeleri gereğince Sakarya Üniversitesi’nin abonesi olduğu intihal yazılım programı kullanılarak Enstitü tarafından belirlenmiş ölçütlere uygun rapor alındığını, çalışmamla ilgili yaptığım bu beyana aykırı bir durumun ortaya çıkması halinde doğabilecek her türlü hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi beyan ederim.

(24/01/2025).

Tuğba ŞAHİN





Çok değerli aileme...



TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitimim boyunca bilgi ve deneyimleriyle bana rehberlik eden danışman hocam Prof.Dr.Mehmet Bayrak’a teşekkürlerimi sunarım.

Hayatım boyunca yanımda olan, maddi ve manevi destekleriyle her zaman güç veren, emekleriyle bugünlere ulaşmamı sağlayan sevgili aileme en derin şükranlarımı sunarım.



Tuğba ŞAHİN



İÇİNDEKİLER

Sayfa

ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ	v
TEŞEKKÜR	ix
İÇİNDEKİLER	xi
KISALTMALAR	xiii
SİMGELER	xv
TABLO LİSTESİ	xvii
ŞEKİL LİSTESİ	xix
ÖZET	xxi
SUMMARY	xxiii
1. GİRİŞ	1
1.1. Tezin Kapsamı ve Amacı	2
1.2. Literatür Araştırması	3
2. FOTOVOLTAİK SİSTEMLER	7
2.1. Fotovoltaik Hücre	7
2.1.1. Fotovoltaik hücre çeşitleri	8
2.1.2. Fotovoltaik hücrelerin çalışma prensibi	9
2.1.3. Fotovoltaik hücrelerin elektriksel eşdeğer devre modeli	10
2.2. Fotovoltaik Sistemlerin Elektriksel Karakteristiği	12
2.3. Fotovoltaik Sistemlere Etki Eden Parametreler	13
2.3.1. Işınım ve sıcaklık değişimlerinin etkisi	13
2.3.2. Kısmi gölgelenme etkisi	15
2.4. FV Sistemlerde Maksimum Güç Noktası İzleme	16
2.5. FV Sistemlerde DA-DA Dönüştürücülerin Yeri	17
2.5.1. Düşürücü dönüştürücü	18
2.5.2. Yükseltici dönüştürücü	20
2.5.3. Düşürücü yükseltici dönüştürücü	21
2.6. Düşürücü - Yükseltici Dönüştürücü Tasarımı	22
2.6.1. Mod 1: Anahtarlama elemanı iletimdeyken	22
2.6.2. Mod 2: Anahtarlama elemanı kesimdeyken	23
3. MAKSİMUM GÜÇ NOKTASI ALGORİTMALARI	25
3.1. Geleneksel Metotlar	25
3.1.1. Sabit gerilim metodu	25
3.1.2. Kısa devre akımı metodu	25
3.1.3. Açık devre gerilim metodu	26
3.1.4. Değiştir ve gözle metodu	26
3.1.5. Artımsal iletkenlik metodu	27
3.2. Kısmi Gölgeleme Durumları için Tasarlanmış Atlamalı Metotlar	28
3.2.1. 0.8V _{oc} metodu	28
3.2.2. Arama-atlama-değerlendirme metodu	32
3.2.3. Atlamalı adaptif D&G metodu	35
4. ÖNERİLEN MAKSİMUM GÜÇ NOKTASI İZLEYİCİ ALGORİTMASI ..	39

4.1. Düzenli Işınımında Sistemin Çalışma Yapısı	39
4.2. Kısmi Gölgeleme Tespit Metodu	40
4.2.1. Orijinal Kısmi Gölgeleme Tespit Metodu	40
4.2.2. Modifiye Edilmiş Kısmi Gölgeleme Tespit Metodu.....	43
4.3. Önerilen Yeni Global MGNİ Algoritması.....	45
4.3.1. Orta nokta metodu.....	46
4.3.2. Sıralı tarama metodu	47
4.4. Önerilen Hibrit MGNİ Algoritmasının Farklı Kısmi Gölgeleme Durumlarında Çalışması.....	47
4.4.1. Senaryo 1: Modifiye KGTM'nin Vatlama Gerilimi ile Sağladığı Avantaj	48
4.4.2. Senaryo 2: KGD'de Hibrit MGNİ algoritmasının çalışması.....	49
4.4.3. Senaryo 3: KGD'de Hibrit MGNİ algoritmasının çalışması.....	50
5. TASARIM VE BENZETİM ÇALIŞMALARI	53
5.1. Sistem Tasarımı.....	53
5.2. Simülasyon Çalışmaları.....	56
5.2.1. Düzgün ışınım durumunda MGNİ'nin performansı.....	56
5.2.2. Farklı ışınım değişim hızlarında MGNİ'nin çalışması.....	57
5.2.3. Önerilen metot ve diğer metotların farklı kısmi gölgeleme durumlarındaki performansı.....	59
5.2.3.1. İki farklı ışınım seviyesi içeren gölgeleme senaryoları.....	59
5.2.3.2. Üç ve dört farklı ışınım seviyesi içeren gölgeleme senaryoları	64
6. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	67
KAYNAKLAR.....	69
ÖZGEÇMİŞ.....	73

KISALTMALAR

AI	: Artımsal İletkenlik Algoritması
BMK	: Bulanık Mantık Kontrol
DA	: Doğru Akım
D&G	: Değiştir ve Gözle Algoritması
DGM	: Darbe Genlik Modülasyonu
FV	: Fotovoltaik
GKO	: Gri Kurt Optimizasyonu
GMGN	: Global Maksimum Güç Noktası
KG	: Kısmi Gölgeleme
KGD	: Kısmi Gölgeleme Durumu
KGTM	: Kısmi Gölgeleme Tespit Metodu
KKO	: Karınca Kolonisi Optimizasyonu
MGN	: Maksimum Güç Noktası
MGNİ	: Maksimum Güç Noktası İzleyici
PSO	: Parçacık Sürü Optimizasyonu
SSJ	: Arama - Atlama - Değerlendirme Metodu
STC	: Standart Test Koşulu
YMGN	: Yerel Maksimum Güç Noktası
YSA	: Yapay Sinir Ağları



SİMGELER

C	: Kapasitör [F]
D	: Görev oranı
G	: Işınım [W/m^2]
G_{sc}	: Kısa devre akımı üzerinden elde edilen ışıınım [W/m^2]
G_{mgn}	: Maksimum güç akımı üzerinden elde edilen ışıınım [W/m^2]
I_{SC}	: Kısa devre akımı [A]
I_{sh}	: Paralel direnç akımı [A]
I_{pv}	: Fotoakımı [A]
I_{FV}	: FV dizi çıkış akımı [A]
I_d	: Diyot akımı [A]
i_p	: Paralel direnç akımı [A]
k	: Boltzmann sabiti
n	: Diyotun ideallik faktörü
R_p	: Paralel kaçak akım direnci [Ω]
R_s	: Hücre iç direnci [Ω]
R_{fv}	: FV panelin empedansı [Ω]
R_y	: Yük empedansı [Ω]
P_{mak}	: Maksimum güç [W]
t	: Zaman [Saniye]
V_{mak}	: Maksimum güç gerilimi [V]
V_{OC}	: Açık devre gerilimi [V]
V_{FV}	: FV dizi çıkış gerilimi [V]
W	: Watt



TABLO LİSTESİ

Sayfa

Tablo 5.1. Düşürücü yükseltici dönüştürücü tasarımı.	55
Tablo 5.2. Farklı ışıınım seviyeleri altında FV sistemin MGN'deki gerilim, akım ve güç değerleri.	57
Tablo 5.3. Üç ve dört farklı ışıınım seviyesi içeren KGD'lerin gölgelenme durumları.	65





ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1. Fotovoltaik hücreden dizi elde edilmesi	7
Şekil 2.2. Fotovoltaik hücrelerin sınıflandırılması	9
Şekil 2.3. FV hücre yapısı.....	10
Şekil 2.4. Fotovoltaik hücrenin eşdeğer devresi [26]	11
Şekil 2.5. Fotovoltaik bir panele ait akım-gerilim ve güç-gerilim karakteristiği.....	12
Şekil 2.6. Seri ve paralel bağlantı durumuna göre akım-gerilim karakteristiği	13
Şekil 2.7. Sabit sıcaklık altında, farklı ışınım seviyelerine göre (a) akım-gerilim ve (b) güç-gerilim eğrileri [28]	14
Şekil 2.8. Sabit ışınım altında, farklı sıcaklıklara göre (a) akım-gerilim ve (b) güç-gerilim eğrileri [28]	14
Şekil 2.9. Baypas diyotlarının gölgelenme durumuna göre çalışması [29]	15
Şekil 2.10. Baypas diyodu olmayan ve olan bir FV sistemin güç gerilim eğrisi	16
Şekil 2.11. Düzgün ışınım ve farklı kısmi gölgelenme durumlarındaki akım-gerilim ve güç-gerilim karakteristiği	16
Şekil 2.12. MGNİ sisteminin genel yapısı	17
Şekil 2.13. FV panel ve dönüştürücü bağlantı şeması	18
Şekil 2.14. FV sistemde yük çizgileri	18
Şekil 2.15. Düşürücü dönüştürücü devre şeması	19
Şekil 2.16. Düşürücü dönüştürücünün yük empedansına göre MGN takip yeteneği	19
Şekil 2.17. Yükseltici dönüştürücü devre şeması	20
Şekil 2.18. Yükseltici dönüştürücünün yük empedansına göre MGN takip yeteneği	20
Şekil 2.19. Düşürücü - yükseltici dönüştürücü devre şeması	21
Şekil 2.20. Düşürücü - yükseltici dönüştürücünün yük empedansına göre MGN takip yeteneği	21
Şekil 2.21. Mod 1: Anahtarlama elemanı ON durumu	22
Şekil 2.22. Mod 2: Anahtarlama elemanı OFF durumu.....	23
Şekil 3.1. Bir FV panelin P–V eğrisi üzerinde Aİ yönteminin temel fikri	27
Şekil 3.2. Artımsal iletkenlik algoritması akış şeması	28
Şekil 3.3. 0.8Voc metodu akış şeması [12].....	30
Şekil 3.4. 0.8Voc metodu akış şeması [15].....	32
Şekil 3.5. SSJ metodu akış şeması [17]	34
Şekil 3.6. Kısmi gölgelenme altında SSJ yönteminin izleme süreci. (a) Durum 1 (b) Durum 2	35
Şekil 3.7. Işınım seviyesi ile α arasındaki ilişki [16]	36
Şekil 3.8. Atlamalı Adaptif D&G metodu akış şeması [37]	37
Şekil 4.1. Düzenli ışınımda MGNİ'nin akış şeması	39
Şekil 4.2. Kısmi Gölgeleme Tespit Metotunun akış şeması	44
Şekil 4.3. Kısmi gölgelenme metodu akış şeması.....	46
Şekil 4.4. Modifiye KGTM ile Vatlama Avantajının P-V Karakteristiğinde Gösterimi	48

Şekil 4.5 KGD: 6 panel 800 W/m ² ,14 panel 500 W/m ² için akım-gerilim (I-V) ve güç-gerilim (P-V) karakteristik eğrileri.....	49
Şekil 4.6. KGD: 6 panel 1000 W/m ² , 5 panel 300 W/m ² , 9 panel 200 W/m ² için akım-gerilim (I-V) ve güç-gerilim (P-V) karakteristik eğrileri.....	50
Şekil 5.1. Sistemin genel yapısı	53
Şekil 5.2. STC altında FV dizi akım - gerilim ve güç - gerilim eğrileri	54
Şekil 5.3. Düzgün ışıınım seviyeleri altında FV sistemin akım-gerilim, güç gerilim karakteristik eğrileri	56
Şekil 5.4. Farklı ışıınım seviyelerine maruz kalan sistemin güç - zaman grafiği	57
Şekil 5.5. Farklı ışıınım değişim hızlarında ışıınım-zaman grafiği.....	58
Şekil 5.6. Değişen ışıınım durumuna göre FV dizi çıkış gücü.....	59
Şekil 5.7. KGD1'in güç - gerilim, akım - gerilim karakteristiği.....	60
Şekil 5.8. KGD1: Önerilen Hibrit Metot ile Atlamalı Adaptif D&G ve Artımsal İletkenlik metotlarının a) gerilim-zaman ve b) güç-zaman grafikleri	61
Şekil 5.9. KGD2: Önerilen Hibrit Metot ile Atlamalı Adaptif D&G ve Aİ metotlarının a) gerilim-zaman ve b) güç-zaman grafikleri	62
Şekil 5.10. KGD3'ün güç - gerilim, akım - gerilim karakteristiği.....	63
Şekil 5.11. KGD3: Önerilen Hibrit Metot ile Atlamalı Adaptif D&G ve Aİ metotlarının a) gerilim-zaman ve b) güç-zaman grafikleri	64
Şekil 5.12. KGD4, KGD5, KGD6 ve KGD7'nin güç - gerilim, akım - gerilim karakteristikleri.....	65
Şekil 5.13. KGD4, KGD5, KGD6 ve KGD7'nin a) gerilim - zaman , b) güç - zaman grafikleri	66

FOTOVOLTAİK SİSTEMLERDE KİSMİ GÖLGELENME DURUMLARI İÇİN HİBRİT MAKSİMUM GÜÇ NOKTASI İZLEYİCİSİ TASARIMI

ÖZET

Fotovoltaik (FV) sistemler, temiz ve sürdürülebilir enerji üretimi sağlaması nedeniyle yenilenebilir enerji kaynakları arasında büyük bir öneme sahiptir. Ancak bu sistemlerin performansı, çevresel koşullara bağlı olarak değişkenlik göstermekte ve özellikle kısmi gölgelenme durumlarında ciddi güç kayıpları yaşanmaktadır. Kısmi gölgelenme durumlarında, FV sistemlerin güç-gerilim (P-V) karakteristiklerinde birden fazla güç zirvesi oluşabilmekte, bu durum sistemin global maksimum güç noktasını (GMGN) takip edebilmesini zorlaştırmaktadır.

Geleneksel MGNİ algoritmaları, kısmi gölgelenme koşullarında GMGN'yi belirlemede yetersiz kalmakta ve yerel maksimum güç noktalarında takılabilmektedir. Değiştir ve Gözle, Artımsal İletkenlik gibi geleneksel yöntemler, düşük maliyet ve kolay uygulama avantajına sahip olmakla birlikte, karmaşık gölgelenme koşullarında başarılı olamamaktadır. Bu yetersizliklerin giderilmesi için kısmi gölgelenme durumlarına özel olarak atlamalı metotlar geliştirilmiştir. Bu metotlar arasında 0.8Voc ve SSJ gibi yöntemler yer almaktadır. Atlamalı metotlar, geleneksel yöntemlerle birleştirilerek hibrit yapılar oluşturulmakta ve geleneksel metotların kısmi gölgelenmedeki dezavantajları giderilebilmektedir.

Bu çalışmada da, literatürde bulunan geleneksel ve atlamalı yöntemlerin bazıları açıklanmış, kısmi gölgelenme koşullarında FV sistemlerin performansını artırmak için yeni bir hibrit MGNİ algoritması geliştirilmiştir.

Önerilen hibrit MGNİ algoritması, üç temel bileşenden oluşmaktadır. İlk olarak, düzenli ışıyım koşulları altında sistemin çalışmasını sağlayan Değiştir ve Gözle (D&G) metodu; ikinci olarak, ani güç değişimlerinin kısmi gölgelenmeden kaynaklanıp kaynaklanmadığını belirleyen Kısmi Gölgelenme Tespit Metodu (KGTM); son olarak ise kısmi gölgelenme tespit edildiğinde devreye giren yeni Global MGNİ algoritması yer almaktadır.

Kullanılan Kısmi Gölgelenme Tespit Metoduna modifiye bir yapı eklenerek sistemin düşük gerilimlerde gereksiz tarama yapması önüne geçilmiş, güç kayıplarının azaltılması ve tarama süresinin iyileştirilmesi sağlanmıştır. Ayrıca, geliştirilen yeni Global MGNİ algoritmasının, kısmi gölgelenme durumlarında, özellikle uzun FV sistemlerde global maksimum güç noktasını (GMGN) daha hızlı ve etkili bir şekilde tespit etmesi amaçlanmıştır.

Bu çalışmada önerilen Hibrit MGNİ algoritmasının uygulanacağı bir FV sistem tasarlanmıştır. Bu sistem FV dizi, DA-DA düşürücü yükseltici dönüştürücü, yük ve MGNİ algoritmasından oluşmaktadır. Benzetim çalışması MATLAB/SIMULINK programında gerçekleştirilmiştir.

Önerilen hibrit MGNİ algoritmasının farklı atmosferik koşullarda (gölgelenme, ani ışıyım) ve çeşitli kısmi gölgelenme senaryolarında gösterdiği performans simüle

edilmiş, MGN takip yeteneği detaylı şekilde incelenmiştir. Simölasyon sonuçları, algoritmanın GMGN'yi doğru bir şekilde izlediğini ve kısmi gölgelenme durumlarında sistemin verimliliğini artırdığını göstermiştir. Özellikle, algoritmanın gereksiz taramaları önlemesi sayesinde izleme süresinde önemli ölçüde azalma sağlanmıştır. Önerilen algoritma, Artımsal İletkenlik ve Atlamalı Adaptif D&G algoritmalarıyla karşılaştırılmış ve izleme doğruluğu, hız ve verimlilik açısından üstünlük sağladığı tespit edilmiştir.

Sonuç olarak, bu tez kapsamında geliştirilen hibrit MGNİ algoritması, kısmi gölgelenme koşullarında FV sistemlerin verimliliğini artırmak ve sistemin global maksimum güç noktasında çalışmasını hızlı bir şekilde sağlamak için yenilikçi ve etkili bir çözüm sunmaktadır.



DESIGN OF A HYBRID MAXIMUM POWER POINT TRACKER FOR PARTIAL SHADING CONDITIONS IN PHOTOVOLTAIC SYSTEMS

SUMMARY

As the demand for energy continues to increase globally, the reserves of fossil-based energy sources are rapidly depleting. This situation has led us to utilize renewable energy sources. Solar energy is one of the primary renewable energy sources and is converted into electrical energy through photovoltaic (PV) panels. PV panels are technologies primarily made of semiconductor materials that directly convert sunlight into electrical energy. With their long service life and ease of installation, PV systems offer a reliable solution to meet energy demands.

The performance of PV systems is influenced by several environmental and physical factors, including the amount of irradiance, the angle at which sunlight strikes the panels, ambient temperature, shading, and panel surface cleanliness (e.g., dirt, dust). The characteristic curve of PV panels is nonlinear, and the system can transfer maximum power to the load at only one point, which varies depending on environmental conditions. To extract maximum power from the system, this dynamic point must be continuously tracked, and the system must be operated at this point. To achieve this, Maximum Power Point Tracking (MPPT) systems have been developed.

Shading is one of the primary factors negatively affecting the performance of PV panels and is typically caused by clouds, trees, utility poles, or other environmental obstructions. Depending on the type and distribution of shading on the panel, power losses may occur. Under partial shading conditions, shaded areas can absorb the power generated by other sections, potentially leading to hot spot formation. In such cases, bypass diodes connected in parallel with the panels activate to protect the system. The use of bypass diodes complicates the panel's characteristic curve, resulting in the emergence of multiple peak points. Among these peaks, the one providing the highest power is defined as the Global Maximum Power Point (GMPP), while the others are referred to as Local Maximum Power Points (LMPPs).

Conventional MPPT algorithms often fall short in identifying the GMPP under partial shading conditions, getting stuck at local maximum power points. Methods such as Perturb and Observe (P&O) and Incremental Conductance (IC) have advantages like low cost and ease of implementation but fail to perform well under complex shading conditions. Various improvement efforts have been made to address the shortcomings of traditional methods, particularly the issue of multiple peak points under partial shading conditions. Examples include developing dynamic step sizes instead of fixed step sizes for the P&O and IC methods. Skip-based methods specifically designed for partial shading conditions are also among these efforts. These methods are combined with traditional approaches to create hybrid structures that address the deficiencies of traditional methods under partial shading. Examples of such methods include the 0.8V_{oc} and SSJ techniques.

In this study, some of the traditional and skip-based methods found in the literature are explained, and a new hybrid MPPT algorithm has been developed to enhance the performance of PV systems under partial shading conditions.

The proposed hybrid MPPT algorithm consists of three main components. Firstly, the Perturb and Observe (P&O) method ensures the system's operation under regular irradiance conditions. Secondly, the Partial Shading Detection Method identifies whether sudden power changes are caused by partial shading. Lastly, a new Global MPPT algorithm is activated when partial shading is detected.

A modified structure has been added to the Partial Shading Detection Method to prevent unnecessary scanning at low voltages, thereby reducing power losses and improving scanning time. Furthermore, the new Global MPPT algorithm has been designed to detect the global maximum power point (GMPP) more quickly and effectively under partial shading conditions, particularly in long PV systems.

The new Global MPPT algorithm is fundamentally inspired by the 0.8V_{oc} method. While the skip-based methods studied are effective in PV systems with a small number of series-connected modules, their detection time for the global maximum power point increases significantly as the number of series-connected panels in the system grows. This adversely affects the efficiency of large PV arrays, causing delays in the tracking process. In this context, the designed Global MPPT algorithm aims to eliminate this disadvantage with its structure. The proposed algorithm combines midpoint and sequential scanning methods and selects the most appropriate one to optimize system performance. Thus, the scanning time is reduced, enabling the MPPT system to locate the GMPP more rapidly, even under partial shading conditions, thereby improving efficiency in large PV systems.

A PV system designed to implement the proposed hybrid MPPT algorithm was modeled. This system consists of a PV array, a DC-DC buck boost converter, a load, and the MPPT algorithm. Simulation studies were conducted using MATLAB/SIMULINK software.

The performance of the proposed hybrid MPPT algorithm was simulated under different atmospheric conditions (e.g., shading, sudden irradiance changes) and various partial shading scenarios. Its tracking capability was analyzed in detail. Simulation results demonstrated that the algorithm accurately tracks the GMPP and enhances system efficiency under partial shading conditions. Particularly, the prevention of unnecessary scans significantly reduced the tracking time. The proposed algorithm was compared with the Incremental Conductance and Skipping Adaptive P&O algorithms, and it was found to outperform them in terms of tracking accuracy, speed, and efficiency.

While the Incremental Conductance (IC) method, one of the traditional approaches, failed to track the global maximum power point in many partial shading conditions, the proposed hybrid method and the Skipping Adaptive P&O method successfully tracked the GMPP in all scenarios.

Skipping Adaptive P&O method detected the global maximum power point in 10–21 sampling steps (0.25–0.525 seconds) across seven different partial shading scenarios, whereas the proposed hybrid MPPT method achieved this in 3–9 sampling steps (0.075–0.225 seconds). These findings reveal that the proposed algorithm can detect the GMPP faster than the Skipping Adaptive P&O method.

In conclusion, the proposed hybrid MPPT algorithm has the potential to enhance system efficiency by rapidly and accurately detecting the global maximum power point, particularly in long PV systems, by reducing scanning time. To further evaluate and improve the algorithm, it can be implemented on real-time hardware platforms in the future, and its practical performance can be assessed.





1. GİRİŞ

Enerji kaynakları, günümüz dünyasında artan enerji talebiyle birlikte giderek daha büyük bir önem kazanmaktadır. Sanayi devrimiyle birlikte hız kazanan enerji ihtiyacı, fosil yakıtlar gibi geleneksel enerji kaynaklarının hem sınırlı olması ve hem de çevreye olumsuz etkileri nedeniyle insanlığı alternatif çözümler aramaya yönlendirmiştir. Bu durum günümüzde yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımının yaygınlaşmasını sağlamıştır. Yenilenebilir enerji kaynaklarına rüzgâr, güneş, hidroelektrik, gelgit, biyokütle ve jeotermal kaynaklar örnek verilebilir [1,2].

Güneş başlıca yenilenebilir enerji kaynaklarından birisidir. Güneş enerjisi fotovoltaiik paneller (FV) yardımıyla elektrik enerjisine dönüştürülmektedir. FV enerji teknolojisi, güneş enerjisinin sınırsız olması, çevre kirliliği oluşturmaması, FV sistem bakım maliyetlerinin düşük olması, yakıt maliyetinin olmaması gibi avantajlara sahiptir. FV sistemlerin enerji dönüşüm verimliliğinin düşük olması ve kurulum maliyetinin yüksek olması ise dezavantajlarıdır [3].

FV panellerin karakteristik eğrisi doğrusal değildir ve bu eğri güneş ışınlam seviyesi, ortam sıcaklığı, ışınlam açısı, gölgelenme durumu gibi parametrelere göre değişiklik göstermektedir. FV sistemler sadece bir noktada sisteme maksimum güç aktarabilmekte ve bu nokta sıcaklık ve güneş ışınlamı gibi çevresel durumlara bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Sistemden maksimum gücü alabilmek için bu değişken nokta takip edilmeli ve sistem bu nokta üzerinde çalıştırılmalıdır. Bu amaçla Maksimum Güç Noktası İzleyici (MGNI) sistemleri geliştirilmiştir [4].

MGNI sistemleri yazılım ve donanım olmak üzere iki kısımdan oluşur. Donanım kısmı, DA-DA dönüştürücü veya eviricilerden, yazılım kısmı ise MGNI algoritmalarından oluşur. MGNI algoritmaları, dönüştürücüleri kontrol ederek FV panelin akım ve gerilimini düzenler ve böylece sistemin maksimum güç noktasında çalışması sağlanır.

Literatürde çeşitli MGNI metotları bulunmaktadır. Bu metotlar genellikle Geleneksel, Akıllı, Optimizasyon, Hibrit olmak üzere dört ana kategoride sınıflandırılır. Geleneksel metotlar, basitlikleri ve düşük maliyetleri ile bilinir; yaygın

olarak kullanılsalar da, kısmi gölgelenme, ani ışıma değişim gibi durumlarda global maksimum güç noktasını (GMGN) belirlemede başarısız olabilmektedir. Sabit Gerilim, Kısa Devre Akımı, Açık Devre Gerilim Metodu, Değiştir ve Gözle (D&G) ve Artımsal İletkenlik (Aİ) yöntemleri bu gruba örnek olarak gösterilebilir.

Akıllı metotlar, dinamik hava koşullarında bile yüksek doğrulukla çalışabilmektedir. İzleme verimlilikleri ve izleme hızları oldukça yüksektir. Bununla birlikte, bu metotlar büyük kontrol devresi karmaşıklığı ve sistemin önceden eğitilmesi için büyük veri işleme gerektirir. Bulanık Mantık Kontrol (BMK) ve Yapay Sinir Ağları (YSA) bu kategoriye giren popüler yaklaşımlardır. Optimizasyon metotları, doğadan ilham alan algoritmalar kullanarak en iyi çözümü bulmayı hedefler; Parçacık Sürü Optimizasyonu (PSO) ve Gri Kurt Optimizasyonu (GKO), Karınca Kolonisi Optimizasyonu (KKO) popüler örneklerdendir. Hibrit metotlar ise birden fazla yaklaşımın avantajlarını birleştirerek daha güçlü ve esnek çözümler sunar; PSO-D&G ve Bulanık Parçacık Sürü Optimizasyonu hibrit metotlara örnek olarak verilebilir [4-6].

Geleneksel yöntemlerin, özellikle kısmi gölgelenme koşullarında GMGN'yi bulmadaki sınırlamaları, bu metotlar üzerinde çeşitli iyileştirme çalışmaları yapılmasını zorunlu kılmıştır. Kısmi gölgelenme durumlarına özgü olarak geliştirilen atlamalı metotlar bu çabalardan biridir. Bu yöntemler, geleneksel yaklaşımlarla birleştirilerek hibrit yapılar oluşturulmakta ve geleneksel yöntemlerin kısmi gölgelenme altındaki eksiklikleri giderilmektedir. Örneğin, 0.8Voc ve SSJ gibi atlamalı metotlar, bu amaçla geliştirilen etkili yaklaşımlardır.

Bu çalışmada da geleneksel metotlar ve kısmi gölgelenme durumlarında global maksimum güç noktası takibi sağlaması için geliştirilen metotlardan atlamalı metotlar incelenmekte ve yeni bir hibrit Maksimum Güç Noktası İzleyici (MGNİ) algoritması sunulmaktadır.

1.1. Tezin Kapsamı ve Amacı

FV sistemlerde değişen çevresel koşullara hızlı ve doğru bir şekilde yanıt verebilen yeni bir hibrit MGNİ tasarımı geliştirilmiştir. Bu sistem, üç ana bileşenden oluşmaktadır. Standart koşullarda, düzenli ışınlam altında çalışacak Değiştir ve Gözle Metodunu, ani bir güç değişimi meydana geldiğinde, Kısmi Gölgeleme Durumu (KGD) olup olmadığının tespitini yapacak Kısmi Gölgeleme Tespit Metotunu

(KGTM), KGD tespit edildiğinde ise çalışacak yeni Global MGNİ algoritmasını barındırmaktadır.

Bu çalışma kapsamında, önerilen Hibrit MGNİ algoritmasının uygulanacağı bir fotovoltaiik sistem tasarımı gerçekleştirilmiştir. Tasarlanan sistem; FV panel dizisi, DA-DA düşürücü-yükseltici dönüştürücü, yük ve MGNİ algoritmasından oluşmaktadır. Sistem MATLAB/SIMULINK ortamında modellenmiş; önerilen algoritma, Artımsal İletkenlik ve Atlamalı Adaptif D&G algoritmasıyla karşılaştırılarak simülasyon sonuçları detaylı bir şekilde değerlendirilmiştir.

Kısmi gölgelenme durumları için yeni bir Global MGNİ algoritması tasarlanarak, MGN tespit süresini azaltmak ve sistem verimliliğini artırmak amaçlanmıştır. Ayrıca çalışmada, kısmi gölgelenme durumlarını, ani ışıma değişiminden ayırt edebilen bir mekanizma kullanılarak FV sistemin çıkış gücündeki büyük değişiklik (ΔP), ani ışıma değişimden kaynaklanıyorsa bu durumda gereksiz GMGN taraması yapılmasının önüne geçilerek sistem verimliliğinin artırılması hedeflenmiştir.

Tezin birinci bölümünde çalışmanın kapsamı ve amacı açıklanmakta, literatür araştırması sunulmaktadır. İkinci bölümde, fotovoltaiik sistemlere ilişkin temel bilgiler sunulmaktadır. Üçüncü bölümde, maksimum güç noktası izleyici algoritmaları incelenmektedir. Dördüncü bölümde, önerilen MGNİ tasarımı, beşinci bölümde ise, önerilen sistemlerin modelleme ve simülasyon çalışmaları yer almaktadır. Son olarak, altıncı bölümde çalışma sonuçları ve öneriler sunulmaktadır.

1.2. Literatür Araştırması

Değiştir ve Gözle, Artımsal İletkenlik algoritmaları geleneksel metotlar arasında oldukça popülerdir ve yaygın olarak kullanılmaktadır. Ancak, her iki algoritmanın da bazı dezavantajları bulunmaktadır. D&G algoritması, maksimum güç noktası etrafında salınım yapar bu durum güç kayıplarına yol açar. Ayrıca, çevresel değişimlerin hızlı olduğu durumlarda, izleme doğruluğu azalır ve MGN'nin izlenmesi zorlaşır. Aİ algoritması ise, D&G'ye göre daha fazla işlem yüküne sahip olup daha karmaşıktır. Buna rağmen, Aİ algoritması hızlı çevresel değişikliklere karşı daha hassas tepki vererek MGN etrafında daha az salınım yapma avantajına sahiptir [7-10].

Bu algoritmalar, genellikle sabit adım boyutuna dayanır. Küçük bir adım boyutu seçildiğinde, sistemde daha düşük salınım olur ve MGN'ye daha hassas bir şekilde ulaşılır; ancak bu durumda sistemin tepki hızı yavaş kalır. Büyük bir adım boyutu seçildiğinde ise, izleme hızı artar, fakat salınım da artar [8-9]. Bu dengeyi sağlayabilmek için literatürde, sabit adım yerine dinamik adım boyutuna sahip algoritmalar geliştirilmiştir.

[7]'de Artımsal İletkenlik metodu için değişken adım büyüklüğüne sahip bir algoritma geliştirilmiştir. Bu algoritma, N ölçeklendirme faktörü kullanarak adım büyüklüğünü otomatik olarak ayarlamakta ve sistemin hem dinamik hem de kararlı hâl performansını iyileştirmektedir. Simülasyon çalışmaları MATLAB-SIMULINK ortamında gerçekleştirilmiş ve gerçekleştirme için bir DSP kullanılmıştır. Çalışmada, önerilen değişken adım boyutu kullanılarak %99,2'lik bir verim elde edilmiştir. Sabit adım boyutlu klasik yöntemde ise %98,9'a kadar ulaşan bir verim kaydedilmiştir. Bu çalışma, AI yönteminin verimliliğinin değişken adım boyutuyla arttırılabileceğini ortaya koymuştur.

Ahmed ve Salam, kararlı durum salınımlarını azaltmak ve izleme verimliliğini artırmak için Geleneksel D&G yöntemi üzerinde bir modifikasyon önermiştir. Önerilen yöntem, güç değişimlerine bağlı adaptif adım boyutu ve sınır koşulları kullanarak daha hassas bir izleme sağlar. Bu sınırlar, hızlı ısıtım değişimlerinde izleme yönünün kaybolmasını önleyerek sistemi MGN çevresinde tutar ve güç kayıplarını azaltır. Yavaş ısıtım değişim hızlarında ($0,5 \text{ W/m}^2/\text{s}$) geleneksel algoritmaya göre %1,1 daha yüksek bir verim sağlanırken, hızlı ısıtım değişimlerinde ($10 \text{ W/m}^2/\text{s}$ 'den büyük) %12'lik bir artış elde edilmiştir. Sonuçlar, modifiye D&G'nin değişen ısıtım koşullarında MGN verimliliğini artırdığını ve sistem performansını iyileştirdiğini göstermektedir [11].

Geleneksel metotların bahsedilen bu dezavantajlarını gidermek ve bu algoritmaları geliştirmek için bu örnek verilen çalışmalar gibi birçok çalışma yapılmıştır. Ancak Geleneksel MGNİ teknikleri düzgün güneş ısıtımını altında etkin çalışsalar da, kısmi gölgelenme durumlarında başarısız olabilmektedir. GMGN'yi doğru izlemek için algoritmanın, yerel maksimum güç noktaları (YMGN) ile global maksimum güç noktası arasında net bir ayırım yapmasını sağlayacak ek yöntemlere ihtiyaç duyulmuştur.

Bu konuda Patel ve Agarwal çalışmasında $0.8V_{oc}$ metodunu önermiş ve kısmi gölgelenme sırasında P-V eğrisinde tüm güç zirvelerinin (yerel ve global) her zaman V_{oc_mod} 'un (bir modülün açık devre gerilimi) %80'inin katlarının yakınında oluştuğunu ve P-V eğrisinde tarama yapılırken (P-V eğrisinin hangi yönden tarandığı farketmeksizin) zirve büyüklüklerinin arttığı ve GMGN'ye ulaşıldıktan sonra zirve büyüklükleri sürekli olarak azaldığı öne sürmüştür [12].

Tey and Mekhilef, [12]'deki çalışmada öne sürülen GMGN zirvesinden önce ve sonraki zirvelerin GMGN zirvesinden daha düşük değerde olduğu bilgisinden yola çıkarak, Modifiye Artımsal İletkenlik Algoritması adlı çalışmayı önerdi. Bu metotta amaç üç ardışık tepe içeren kümeler oluşturularak aramayı basitleştirmektir. Orta tepe, solunda ve sağında eşlik eden iki tepeden daha yüksekse, GMGN'nin bulunduğu kabul edilir ve arama durdurulur. Aksi takdirde bu prosedür sıralı şekilde yeni kümeler oluşturularak uygulanır. Çalışma da yapılan simülasyon sonucunda önerilen algoritmanın GMGN'yi doğru bir şekilde izleyebildiği, böylece geleneksel algoritmanın karşılaştığı güç kayıplarını azalttığı ve geleneksel Artımsal İletkenlik algoritmasına kıyasla, kısmi gölgeleme koşulları ve yük değişimi altında GMGN' yi izlemede daha iyi performans gösterdiği öne sürülmektedir [13].

Kermadi ve arkadaşları [14], yaptığı çalışmada [12,13]'de öne sürülen bulgunun her P-V eğrisinde geçerli olamayacağını kanıtlamakta ve karmaşık kısmi gölgeleme koşulları altında fotovoltaik sistemler için geliştirilmiş bir maksimum güç noktası izleyici önermektedir. Önerilen yöntem, adaptif değiştir ve gözle (A-D&G) ile parçacık sürü optimizasyonunu (PSO) birleştiren hibrit bir algoritmadır. Algoritma, PSO'nun arama alanını en aza indirmek için Arama-Atlama-Değerlendirme (SSJ) mekanizmasını içerir. Önerilen yöntem, modifiye artımsal iletkenlik, orijinal SSJ, modifiye guguk kuşu arama ve hibrit PSO gibi dört iyi bilinen MGNİ tekniği ile karşılaştırılarak değerlendirilmiştir. Ek olarak, PV dizi simülatörüne dayalı bir deneysel prototip kullanılarak simülasyon doğrulanmıştır. Önerilen yöntemin, karmaşık kısmi gölgeleme koşulları altında bile hızlı ve doğru bir şekilde global maksimum güç noktasına ulaştığı ve izleme garantisi sağladığı görülmüştür.

Kouchaki ve arkadaşları, düzenli ışınlam koşullarında tepe tırmanışı algoritmasını kullanan, ancak kısmi gölgelenme tespit edildiğinde açık devre geriliminin belirli katlarını ($0.8V_{oc}$) tarayarak global maksimum güç noktasını bulan bir yapı geliştirmişlerdir. Bu çalışmada, kısmi gölgelenme tespitinde normalleştirilmiş akım

değişiminin ($\Delta I/I$) referans değerlerle karşılaştırılması yöntemi kullanılmıştır. Normal ışınım koşullarında $\Delta I/I$ değerinin kısmi gölgelenme durumlarındaki değerden daha büyük olduğu öne sürülen bu çalışmada, kullanılan bu karşılaştırma yöntemi kısmi gölgelenme durumunda GMGN'nin hızlı ve doğru bir şekilde tespit edilmesine olanak sağlamıştır [15].

Ahmed and Salam çalışmasında mevcut 0.8Voc modelinin yetersizliklerini ortaya koyarak, bu modelin özellikle uzun modül dizilerinde doğru sonuçlar vermediğini savunmaktadır. Önerilen yöntem, MGN'nin doğru konumunu tahmin etmek için basit bir ilişki önermektedir. 20 seri bağlı panel içeren bir dizide, gerçek ve hesaplanan tepe arasındaki maksimum sapmanın 3 V'tan az olduğu bulunmuştur, oysa 0.8Voc modelinde bu sapma 50 V'a kadar çıkmaktadır. Yapılan testler, önerilen yöntemin MGNİ verimliliğini yaklaşık %2 oranında artırabileceğini göstermektedir [16] .

Wang ve arkadaşları tarafından 2016 yılında yayımlanan çalışma, kısmi gölgelenme koşulları altında fotovoltaik sistemlerde global maksimum güç noktası izleme konusunda iki farklı metot sunmaktadır. Bunlar Arama-Atlama-Değerlendirme Metodu (SSJ) ve Hızlı GMGNİ metodudur. SSJ metodu, FV sistemde herhangi bir gölgeleme koşulu altında global maksimum güç noktası takibinde taranan gerilim aralığını azaltmayı hedefler. İlave devreler ve sensörler gerektirmeden yüksek doğruluk ve hızlı izleme sağlar. Hızlı GMGNİ, geleneksel global maksimum güç noktası yöntemlerine göre çok daha hızlı bir izleme süresi sağlar; Wang ve arkadaşlarının bulgularına göre izleme süresi %90 oranında kısalmaktadır. Ancak, bu yöntem, bypass diyot akımını ölçmek için panel sayısı adedince akım sensörüne ihtiyaç duyar ve bu durum, sistemi daha maliyetli hale getirir. Sonuç olarak, geleneksel MGNİ yöntemleri kısmi gölgelenme koşulları altında hem izleme doğruluğu hem de izleme hızında yetersiz kalırken, bu çalışmada önerilen SSJ ve Hızlı GMGNİ yöntemleri bu eksiklikleri gidererek hızlı ve yüksek doğruluklu MGN takibi sağlamaktadır [17].

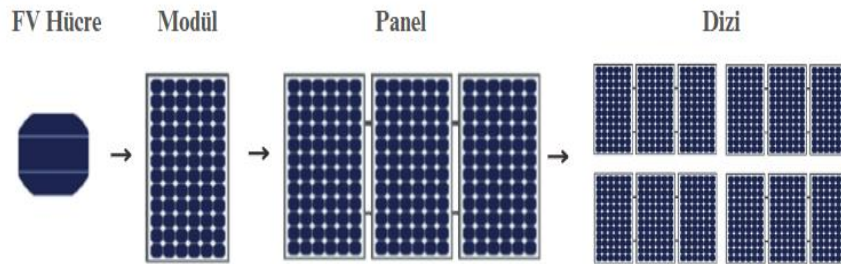
2. FOTOVOLTAİK SİSTEMLER

Fotovoltaik sistemler, güneş enerjisini doğrudan elektrik enerjisine dönüştüren teknolojilerdir [18]. Bu sistemler, temiz ve yenilenebilir enerji kaynağı olarak sürdürülebilir enerji üretimi için büyük bir potansiyele sahiptir. Son yıllarda, FV sistemlerin yaygınlaşması hız kazanmıştır. Hem bireysel hem de ticari uygulamalarda kullanımı artan bu sistemler, çevreye duyarlı enerji üretimi sağlamanın yanı sıra, enerji maliyetlerini düşürme noktasında da önemli avantajlar sunmaktadır.

2.1. Fotovoltaik Hücre

Fotovoltaik Hücreler (Güneş pilleri) güneşten gelen ışık enerjisini doğrudan elektrik enerjisine dönüştüren yapılardır. Genellikle silisyum gibi yarı iletken malzemelerden yapılan bu hücreler, fotonların enerjisi sayesinde elektronların serbest kalmasını sağlayarak bir elektrik akımı üretir. Fotovoltaik hücrelerin temel amacı, gelen güneş ışığını verimli bir şekilde elektrik enerjisine dönüştürmektir [18,19].

Fotovoltaik hücreler genellikle yaklaşık 0.5V gibi düşük bir gerilim üretir. Birden fazla FV hücre, seri ve/veya paralel bağlantılarla bir araya getirilerek FV modül oluşturulur. Tek bir FV modül, çerçevesiyle birlikte genellikle FV panel olarak adlandırılır. Çoğu panel bir modül içerir, ancak bazı büyük paneller birden fazla modülden oluşabilir. Güç talebine bağlı olarak, FV paneller seri ve/veya paralel bağlanarak FV dizileri oluşturur [20]. Şekil 2.1’de FV hücre, modül, panel ve dizi yapıları gösterilmiştir.



Şekil 2.1. Fotovoltaik hücreden dizi elde edilmesi

Fotovoltaik hücrelerin verimliliği, kullanılan malzemenin yapısı ve güneş spektrumunun ne kadarını absorbe edebildiği ile yakından ilişkilidir. Silisyum bazlı hücreler, bu alanda yaygın olarak tercih edilen hücre türleri olmakla birlikte, son yıllarda farklı malzemelerle yapılan yeni nesil hücreler de kullanılmaya başlanmıştır [19].

2.1.1. Fotovoltaik hücre çeşitleri

Fotovoltaik hücreler, kullanılan malzeme ve üretim yöntemlerine göre farklı türlere ayrılmaktadır. Bu çeşitlilik, hücrelerin maliyetlerini, verimliliklerini ve kullanım alanlarını etkilemektedir. Genel olarak, FV hücreler 1.Nesil, 2.Nesil ve 3.Nesil olmak üzere üç ana kategoriye ayrılır:

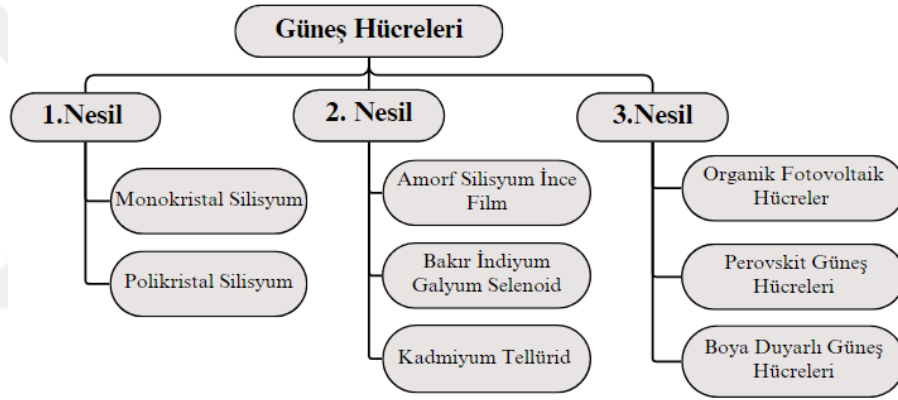
1.Nesil FV Hücreler, genellikle kristal silisyum tabanlı hücrelerden oluşur. Monokristal Silisyum Hücreler yüksek saflıktaki tek bir silisyum kristalinden üretilirler [21]. Bu hücreler yüksek verimlilik seviyesine sahiptir (yaklaşık %15-24). Bu hücreler uzun ömürlü ve yüksek performanslı olmasına rağmen, üretim maliyetleri yüksektir. Polikristal Silisyum Hücreler birden fazla silisyum kristalinin birleşimiyle oluşur ve monokristal hücrelerden daha düşük verimlilik (%10-18) sağlasa da üretim maliyetleri daha düşüktür. Geniş ticari uygulamalarda yaygın olarak tercih edilmektedir [19].

2.Nesil FV Hücreler, genellikle ince film teknolojilerine dayanmaktadır. Daha az malzeme kullanımı ve düşük maliyetleri ile dikkat çekerler, ancak verimlilikleri 1. nesil hücrelere göre düşüktür. Amorf İnce Film Silisyum Hücreler kristal yapı içermezler ve genellikle çok düşük maliyetlerle üretilirler. Ancak, verimlilikleri %5-12 arasında değişmektedir [22]. İnce ve esnek yapısı sayesinde bina yüzeyleri gibi yerlerde kullanım avantajı sağlarlar. Bakır İndiyum Galyum Selenoid Hücreler, özellikle daha geniş dalga boyu aralığındaki ışığı absorbe edebildiği için verimlilikleri ince film teknolojilerine göre oldukça yüksektir (~ %20). Esneklik ve maliyet avantajı sunar. Kadmiyum Tellür Hücrelerin üretim maliyeti düşüktür ve geniş ölçekte kullanılır. Verimlilikleri %15-16 civarındadır. Ancak kadmiyum toksik yapıdır [19, 22 - 23].

3.Nesil FV Hücreler, nanoteknoloji ve ileri malzeme bilimlerinden faydalanarak geliştirilmiştir. Bu nesil, gelecekte daha yüksek verimlilikler sunma potansiyeline sahiptir. Organik Fotovoltaik Hücreler organik polimerler veya moleküller

kullanılarak üretilir; hafif ve esnek bir yapıdadır. Düşük maliyetli olmaları ve geniş kullanım alanları ile gelecekte önemli bir potansiyel sunmaktadırlar, ancak verimlilikleri henüz %10'un altındadır. Perovskite Hücreler, son yıllarda büyük bir ilgi görmüştür ve araştırma aşamasında hızla gelişmektedir. Yüksek verimlilik (~%20) sunma potansiyeli taşıyan bu hücreler, ucuz ve kolay üretim süreçlerine sahiptir. Boya ile Duyarlaştırılmış hücreler, geleneksel yarı iletkenlerden ziyade, boya maddeleri kullanılarak ışığı emer. Düşük maliyetli üretimleri ve estetik avantajları bulunmasına rağmen, verimlilikleri %5-20 aralığındadır [21-22].

Bu nesillerin her biri, teknolojik ilerlemelere paralel olarak enerji maliyetlerini düşürmek ve verimliliği artırmak için geliştirilmiştir. Şekil 2.2'de bu FV hücrelerin türlerine göre sınıflandırılması gösterilmektedir.



Şekil 2.2. Fotovoltaik hücrelerin sınıflandırılması

2.1.2. Fotovoltaik hücrelerin çalışma prensibi

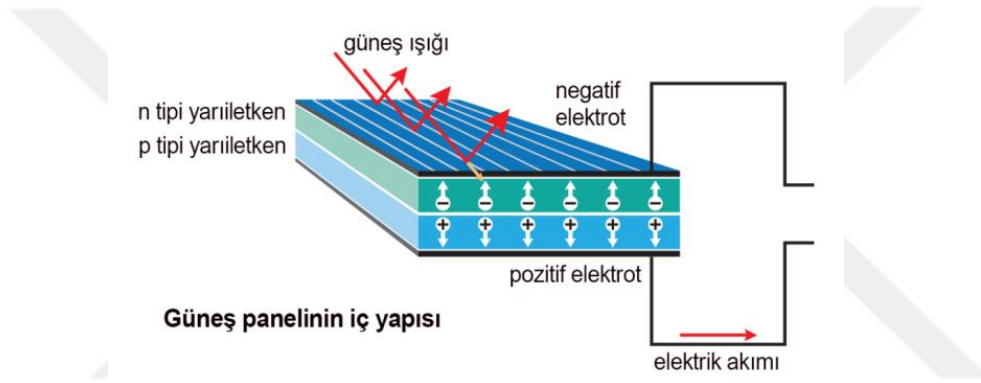
FV hücrelerin temel çalışma prensibi, kısaca güneşten gelen fotonların yarı iletken malzemeye çarpması ve bu malzemedeki elektronları harekete geçirmesiyle elektrik üretmesi şeklinde tanımlanabilir.

FV hücrelerde kullanılan silisyum gibi yarı iletken malzemeler, belirli katkı maddeleri eklenerek n tipi ya da p tipi hale getirilir. N tipi yarı iletkenler, 5. grup elementlerinden fosfor gibi bir elementle katkılanarak fazladan bir elektron kazandırılır. P tipi yarı iletkenler ise 3. grup elementlerinden bor ya da alüminyum ile katkılanarak elektron boşlukları (hol) oluşturur.

N tipi ve p tipi yarı iletkenler bir araya geldiğinde, pn eklemi olarak adlandırılan bir bölge oluşur. Bu bölgede, n tipi yarı iletkenin fazla elektronları, p tipi yarı iletkenin

hol bölgelerine doğru hareket eder ve yük transferi gerçekleşir. Bu transferin sonucunda, p tipi bölge negatif yükle, n tipi bölge ise pozitif yükle yüklenir. Bu durum, "geçiş bölgesi" veya "deplezyon bölgesi" adı verilen bir alan oluşturur. Bu bölgede meydana gelen elektrik alan, fotovoltaik hücrelerin çalışma prensibinin merkezinde yer alır.

Güneş hücresine düşen fotonlar, yarı iletken malzemelerin üzerinde elektron-hol çiftlerinin oluşmasına neden olur. Bu çiftler, hücredeki elektrik alan tarafından birbirinden ayrılır ve eğer hücre bir dış devreye bağlanırsa, bu akım devre boyunca akar ve kullanılabilir elektrik enerjisi elde edilir [20,24]. Şekil 2.3'te bir FV hücrenin yapısı gösterilmektedir.

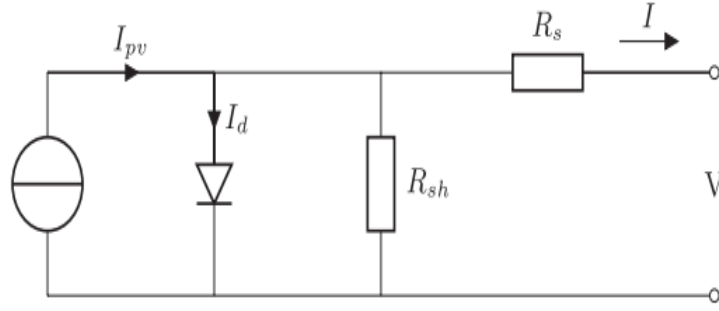


Şekil 2.3. FV hücre yapısı

2.1.3. Fotovoltaik hücrelerin elektriksel eşdeğer devre modeli

Fotovoltaik hücrelerin elektriksel davranışı, aldığı ışınım şiddeti ve çevresel koşullara bağlı olarak değişir. FV hücreler, ışık almadıkları durumlarda çıkış I-V karakteristiği açısından bir diyotun karakteristiğine benzer şekilde davranır. Ancak ışığa maruz kaldıklarında, FV hücreler diyotla paralel bağlanmış bir akım kaynağı gibi işlev görmektedir [25].

Fotovoltaik hücreler, elektriksel davranışlarını analiz etmek ve modellemek için çeşitli matematiksel ve devre temelli modellerle temsil edilir. Burada yaygın olarak kullanılan tek diyot modeli açıklanmaktadır. Şekil 2.4'te bir FV hücrenin tek diyotlu eşdeğer devresi verilmiştir.



Şekil 2.4. Fotovoltaik hücrenin eşdeğer devresi [26]

I_{pv} fotoakımı (ışık akımı), I_d diyot akımı, I_{sh} Paralel direnç akımı, R_{sh} Paralel kaçak akım direnci (Ω), R_s Hücredeki iç direnci (Ω), V FV hücrenin çıkış gerilimini temsil etmektedir. FV hücrenin eşdeğer devresinde hücrenin üreteceği I çıkış akımı denklem 2.1’de verilmiştir.

$$I = I_{pv} - I_d - I_{sh} \quad (2.1)$$

I_d diyot akımı denklem 2.2’deki gibidir.

$$I_d = I_0 \times \left(\exp \left(\frac{q(V + I \times R_s)}{nkT} \right) - 1 \right) \quad (2.2)$$

I_0 diyotun doygunluk akımı, q elektronun yükü, n diyotun ideallik faktörü, k Boltzmann sabitidir ve T hücre sıcaklığıdır.

Paralel direnç akımı, hücre üzerindeki gerilimle doğru orantılıdır:

$$I_{sh} = \left(\frac{V + I \times R_s}{R_{sh}} \right) \quad (2.3)$$

Denklem 2.2 ve 2.3’deki ifadeler denklem 2.1’de yerine konulduğunda; FV hücrenin çıkış akımı

$$I = I_{pv} - I_0 \times \left(\exp \left(\frac{q(V + I \times R_s)}{nkT} \right) - 1 \right) - \left(\frac{V + I \times R_s}{R_{sh}} \right) \quad (2.4)$$

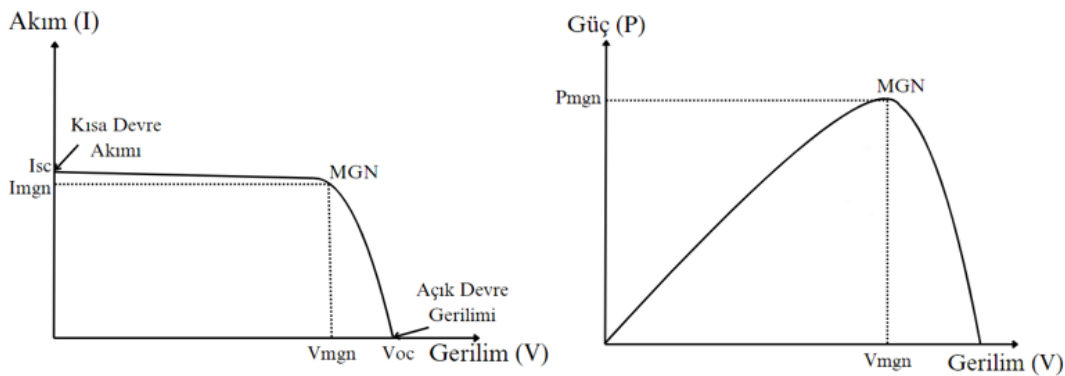
olarak elde edilmektedir [26].

2.2. Fotovoltaik Sistemlerin Elektriksel Karakteristiği

Fotovoltaik paneller lineer olmayan bir elektriksel karakteristiğe sahiptir. Şekil 2.5'te standart test koşulunda, tipik bir FV panelin akım-gerilim ve gúc-gerilim karakteristik eğrileri verilmiştir.

Şekilde de görüldüğü üzere, kısa devre akımı (I_{sc}), FV panelin uçları kısa devre yapıldığında elde edilen maksimum akımdır. Açık devre gerilimi (V_{oc}) ise, herhangi bir yük bağlı olmadığında panelin verdiği en yüksek gerilimdir. Kısa devre akımı ve açık devre gerilimi fotovoltaik panellerin uç değerlerini ifade ederken, bu noktaların dışında, panelin çalışma koşulları altında karakteristik akım-gerilim (I-V) eğrisi lineer olmayan bir yapı sergiler. Akım, kısa devre akımına yakın değerlerde maksimum seviyedeysen gerilim sifıra yakındır. Gerilim arttıkça akım düşmeye başlar ve açık devre geriliminde (V_{oc}) akım sifıra ulaşır.

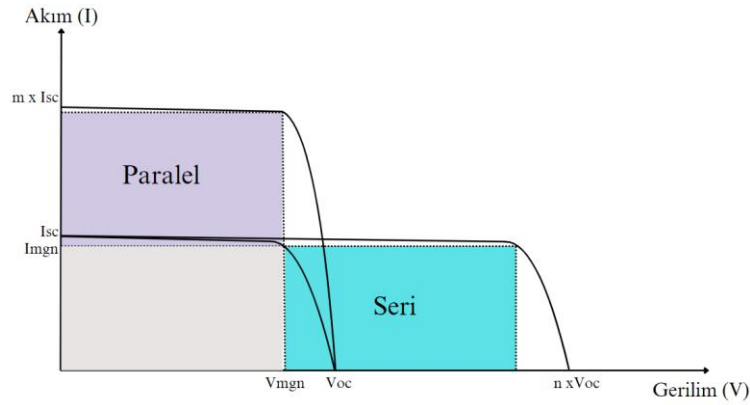
Gúc-gerilim eğrisi ise, akım-gerilim eğrisinden türetilir ve fotovoltaik panelin ürettiği gúcün, gerilime bağlı olarak nasıl değiştiğini gösterir. Gúc-gerilim eğrisinde, belirli bir noktaya kadar gerilim arttıkça gúc de artar, ancak bir noktadan sonra gerilim artmasına rağmen gúc düşmeye başlar. Bu nokta, panelin ulaştığı maksimum gúc değeridir. Maksimum gúc noktası (MGN), panelin en yüksek verimle çalıştığı gerilim ve akım değerlerine karşılık gelir.



Şekil 2.5. Fotovoltaik bir panele ait akım-gerilim ve gúc-gerilim karakteristiği

FV paneller, genellikle daha yüksek gerilim ve akım elde edebilmek için seri, paralel veya seri-paralel olarak bağlanabilirler. Paneller seri bağlandığında, toplam gerilim her bir panelin açık devre gerilimlerinin toplamına eşittir, ancak akım, en düşük akım sağlayan panel tarafından sınırlandırılır. Paralel bağlantıda ise akımlar toplanır ve her bir panelin gerilimi eşit olur. Bu tür bir bağlantı, daha büyük akımlar elde etmek için

uygundur. Şekil 2.6’da seri ve paralel bağlantı durumuna göre oluşan akım-gerilim karakteristiği görülmektedir.



Şekil 2.6. Seri ve paralel bağlantı durumuna göre akım-gerilim karakteristiği

2.3. Fotovoltaik Sistemlere Etki Eden Parametreler

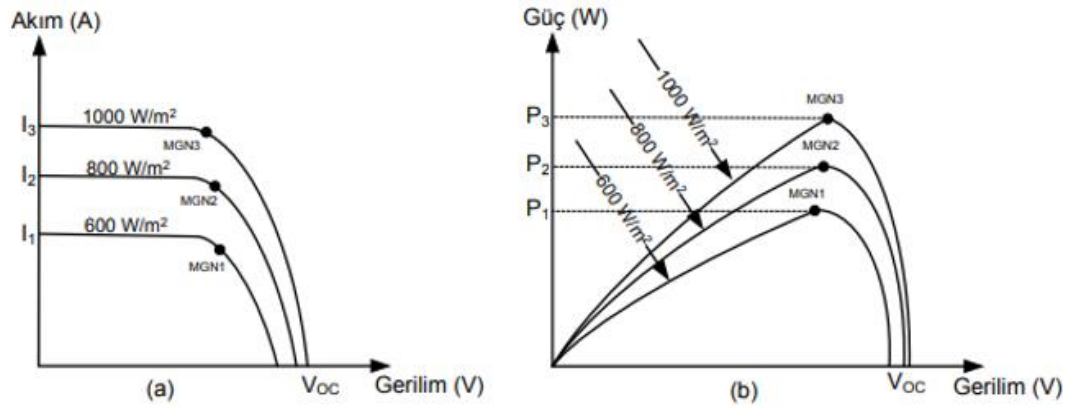
FV sistemlerin performansını etkileyen bir dizi çevresel ve fiziksel faktör bulunmaktadır. Bunlara; güneşten gelen ışıyım miktarı, ışınların panellere düşme açısı, ortam sıcaklığı, gölgelenme, panel yüzey temizliği (kir, toz vb.) gibi çeşitli örnekler verilebilir.

Sistemin enerji üretimi, doğrudan güneşten alınan ışıyım miktarına bağlıdır. Işıyım arttıkça üretim artar, azalınca ise düşer. Bununla birlikte, sıcaklık artışı genellikle panellerin performansını olumsuz etkiler. Gölgelenme, özellikle kısmi gölgelenme, enerji üretiminde ciddi kayıplara yol açabilir. Ayrıca, güneş ışınlarının panellere düşme açısı da oldukça önemlidir; bu açı ne kadar dik olursa, sistem o kadar verimli çalışır. Ayrıca panel yüzeyinde biriken kir, toz ve diğer maddeler, ışıyımın hücrelere ulaşmasını engelleyerek panel performansını düşürebilir [27]. Bu faktörlerin tümü FV sistemlerin genel performansı üzerinde etkilidir.

2.3.1. Işıyım ve sıcaklık değişimlerinin etkisi

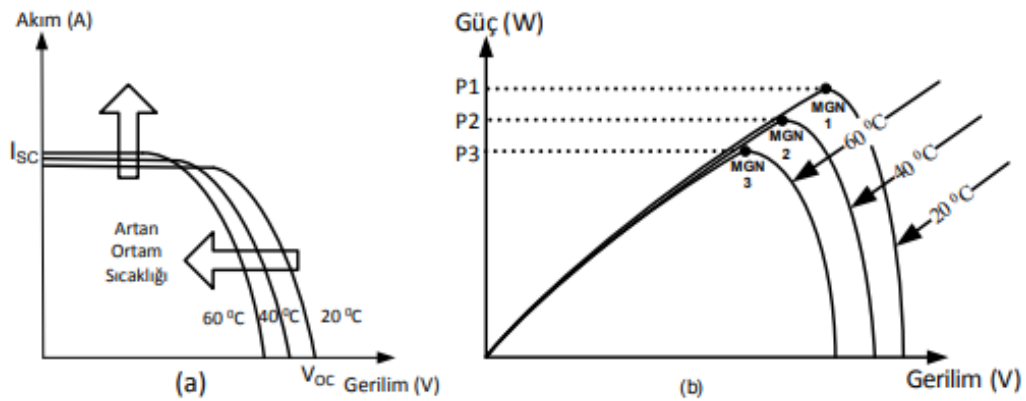
Fotovoltaik sistemlerin performansı, ışıyım ve sıcaklık değişikliklerine karşı oldukça hassastır. Işıyım seviyeleri arttıkça, kısa devre akımı (I_{sc}) artış gösterir ve bununla birlikte FV sistemden elde edilebilecek maksimum güç de artar. Şekil 2.7’de sabit sıcaklık altında, farklı ışıyım seviyelerinde FV sistemin akım-gerilim ve güç-gerilim eğrileri gösterilmektedir. Panel üzerindeki ışıyım seviyesi düştükçe, panelin çıkış

gücü ve kısa devre akımı azalır, ancak açık devre gerilimi (V_{oc}) nispeten sabit kaldığı görülmektedir [28].



Şekil 2.7. Sabit sıcaklık altında, farklı ışınlama seviyelerine göre (a) akım-gerilim ve (b) güç-gerilim eğrileri [28]

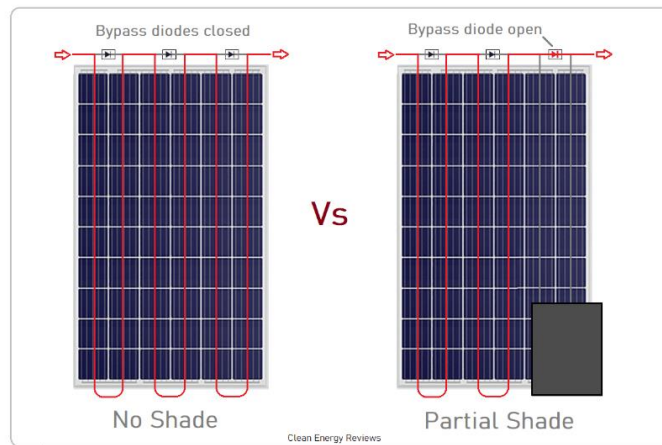
Sıcaklık değişimlerinin FV sistem karakteristiği üzerindeki etkisi ise genellikle açık devre geriliminde (V_{oc}) görülür. Sıcaklık arttıkça, sistemin açık devre gerilimi azalır ve panelin genel verimliliği düşer [28]. Şekil 2.8’de sabit ışınlama altında, farklı sıcaklık seviyelerindeki FV akım-gerilim ve güç-gerilim eğrileri gösterilmektedir. Daha yüksek sıcaklıklarda panelin çıkış gerilimi düşmekte ve bu, maksimum güç noktasının daha düşük bir gerilim değerine kaymasına neden olur. Bunun yanı sıra, sıcaklık arttıkça panelin kısa devre akımı (I_{sc}) çok az da olsa artış gösterebilir, ancak bu artış panelin toplam çıkış gücü üzerinde önemli bir etkiye sahip değildir.



Şekil 2.8. Sabit ışınlama altında, farklı sıcaklıklara göre (a) akım-gerilim ve (b) güç-gerilim eğrileri [28]

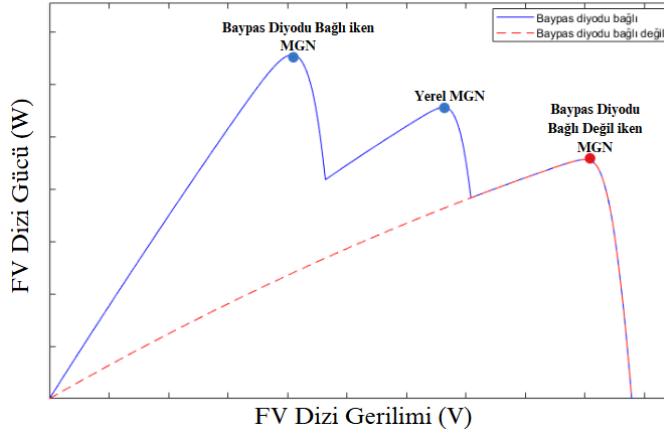
2.3.2. Kısmi gölgelenme etkisi

Gölgelenme, FV panellerin performansını olumsuz etkileyen temel faktörlerden biridir ve genellikle bulutlar, ağaçlar, elektrik direkleri veya diğer çevresel engeller nedeniyle oluşur. Gölgelenmenin türüne ve panel üzerindeki dağılımına bağlı olarak, güç kayıpları meydana gelir. Kısmi gölgelenme koşullarında, gölgeli alanlar diğer bölümlerin ürettiği gücü emebilir ve bu, sıcak nokta oluşumuna yol açabilir [29]. Bu gibi durumlarda, panellere paralel olarak bağlanan baypas diyotları devreye girerek sistemi korur. Baypas diyotları, normal koşullarda etkisiz olup, gölgelenme olduğunda gölgeli bölgeden akımı devralır. Şekil 2.9’da bir FV panelin gölgelenme olmadığı durumdaki çalışması ile kısmi gölgelenme olduğu durumdaki baypas diyotlarının devreye girdiği çalışma durumu gösterilmektedir. Burada kısmi gölgelenme esnasında, diyotların, gölgelenen hücre grubunun devre dışı kalmasını sağladığı görülmektedir.



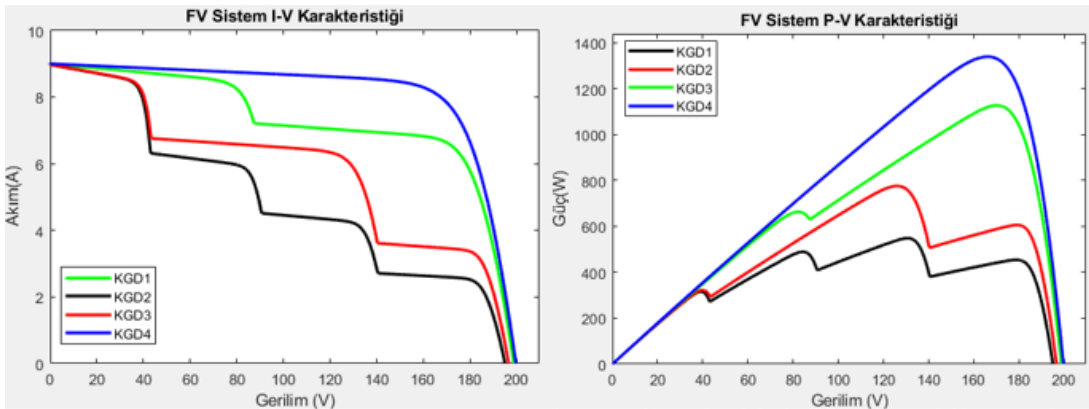
Şekil 2.9. Baypas diyotlarının gölgelenme durumuna göre çalışması [29]

Kısmi gölgelenme koşullarında, FV sistemlerin karakteristiği bypass diyotlarının devreye girmesiyle değişiklik gösterir. Şekil 2.10’da FV sistemin kısmi gölgelenme durumunda baypas diyodu bağlı olduğu ve olmadığı durumlardaki güç-gerilim karakteristik eğrisi görülmektedir. Baypas diyotlarının kullanımı, panelin karakteristik eğrisini karmaşık hale getirir ve çoklu tepe noktalarının ortaya çıkmasına neden olur [30]. Bu tepe noktalarından en yüksek gücü veren global MGN, diğer tepe noktaları Yerel MGN olarak tanımlanır. Şekil 2.10’da baypas diyodu kullanılmadığı zaman, kullanılmış halinde sistemin ulaşabileceği en yüksek güç noktasına ulaşamayacağı görülmektedir.



Şekil 2.10. Baypas diyodu olmayan ve olan bir FV sistemin güç gerilim eğrisi

Şekil 2.11’de, düzgün ışınım altında ve farklı gölgelenme durumlarındaki bir FV sistemin güç-gerilim ve akım-gerilim karakteristiği verilmektedir. Bu karakteristik eğriler incelendiğinde, gölgelenme etkisinin FV sistem performansını belirgin şekilde değiştirdiği görülmektedir. Gölgelenmenin etkisiyle akım-gerilim eğrisinde belirli basamaklar oluşur. Bu basamaklar, gölgeli hücre gruplarının devre dışı kalması sonucunda ortaya çıkar. Ayrıca, gölgelenme şiddeti ve alanın büyüklüğüne bağlı olarak güç-gerilim eğrisinde çoklu tepe noktaları meydana gelir. Bu tepe noktalarının konumu ve büyüklüğü, gölgelenmenin derecesine bağlı olarak değişiklik göstermektedir.

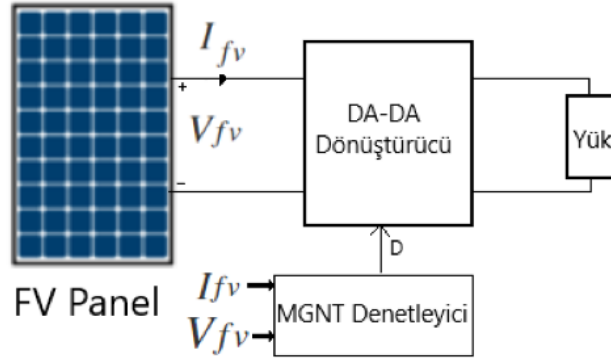


Şekil 2.11. Düzgün ışınım ve farklı kısmi gölgelenme durumlarındaki akım-gerilim ve güç-gerilim karakteristiği

2.4. FV Sistemlerde Maksimum Güç Noktası İzleme

Maksimum güç noktası, FV sistemin üretebileceği en yüksek gücü ifade eder. Ancak, atmosferik koşullardaki değişiklikler veya yük profili nedeniyle MGN sürekli

değişir. Bu nedenle, FV sistemlerden mümkün olan en yüksek verimi elde edebilmek için Maksimum Güç Noktası İzleyicilere ihtiyaç duyulur. MGNI, FV panelin sürekli olarak MGN'de çalışmasını sağlayan bir sistemdir ve FV panel ile yük veya şebeke arasına yerleştirilir. Şekil 2.12'de bir MGNI sisteminin genel şeması verilmektedir.



Şekil 2.12. MGNI sisteminin genel yapısı

MGNI, donanımsal ve yazılımsal olarak iki ana bileşenden oluşmaktadır. Donanımsal olarak, güç elektroniği devresi, güneş panelinden elde edilen enerjiyi yönetmek ve uygun bir şekilde işlemek için kullanılır. Bu devreler genellikle DA/DA dönüştürücüler veya invertörler şeklinde olabilir ve güneş panelinin çıkışını optimize etmek için gerekli güç ayarlamalarını gerçekleştirirler.

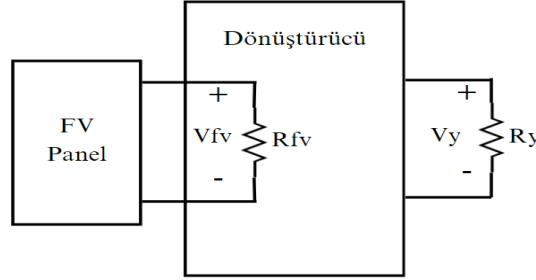
Yazılımsal olarak, MGNI algoritmaları, donanımsal bileşenlerle işbirliği yaparak güneş panelinden maksimum güç çıkışını elde etmek için gerekli kararları alır. Bu algoritmalar, genellikle güneş panelinin çevresel koşullarını, güneş ışığı yoğunluğunu, sıcaklığını ve diğer parametreleri izleyerek güneş panelinin maksimum güç noktasını belirlerler. Algoritmalar ayrıca güneş panelinin çalışma koşullarını sürekli olarak izler ve gerekirse güç elektroniği devresini ayarlarlar.

Bu şekilde, donanımsal ve yazılımsal bileşenler bir araya getirilerek oluşturulan MGNI sistemi, güneş enerjisi sistemlerinin verimliliğini artırmak ve güneş panellerinden maksimum güç çıkışı elde etmek için önemli bir rol oynar.

2.5. FV Sistemlerde DA-DA Dönüştürücülerin Yeri

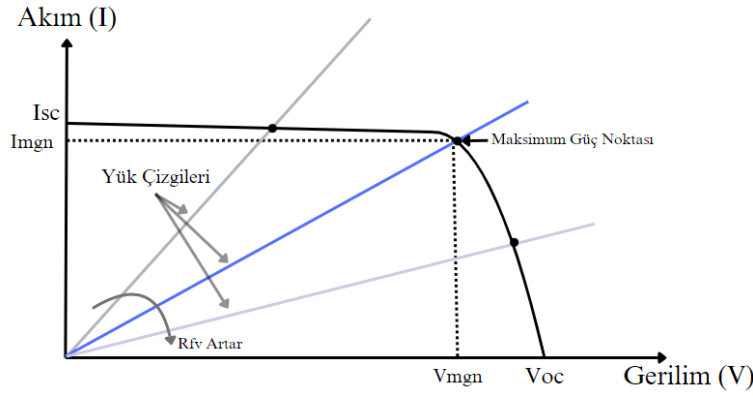
DA-DA Dönüştürücülerin düşürücü, yükseltici, düşürücü - yükseltici dönüştürücü ve daha birçok çeşidi bulunmaktadır. FV Sistemlerde maksimum güç takibi için dönüştürücüler önemli bir rol oynamaktadır.

Şekil 2.13'te FV panelin çıkışı, bir dönüştürücüye bağlıdır ve bu dönüştürücü, FV panelin empedansını (R_{fv}) yük empedansına (R_y) uygun hale getirir. Dönüştürücü, sistemin giriş ve çıkış gerilimlerine bağlı olarak empedansı dinamik bir şekilde ayarlayarak, panelin maksimum güç noktasında çalışmasını sağlar.



Şekil 2.13. FV panel ve dönüştürücü bağlantı şeması

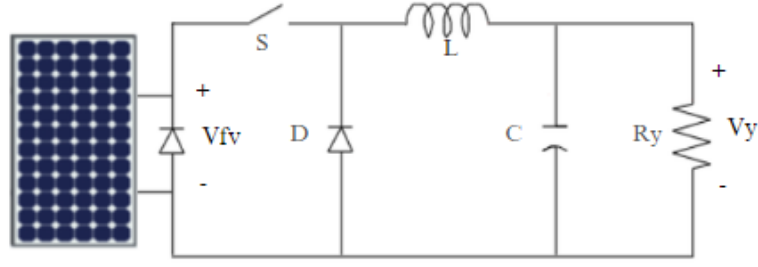
Yük çizgileri (Load Lines), sistem empedansının değişimine bağlı olarak çalışma noktasının nasıl değiştiğini gösterir. Şekil 2.14'te bir FV sistem akım gerilim eğrisi üzerinde yük çizgileri gösterilmektedir. Sistem empedansı arttıkça, yük çizgileri gerilim ekseninde sağa doğru kaymaktadır.



Şekil 2.14. FV sistemde yük çizgileri

2.5.1. Düşürücü dönüştürücü

Düşürücü dönüştürücüler girişindeki doğru gerilimi, daha düşük gerilim seviyelerine dönüştüren güç elektroniği devreleridir. Şekil 2.15'te devrenin genel yapısı gösterilmektedir.



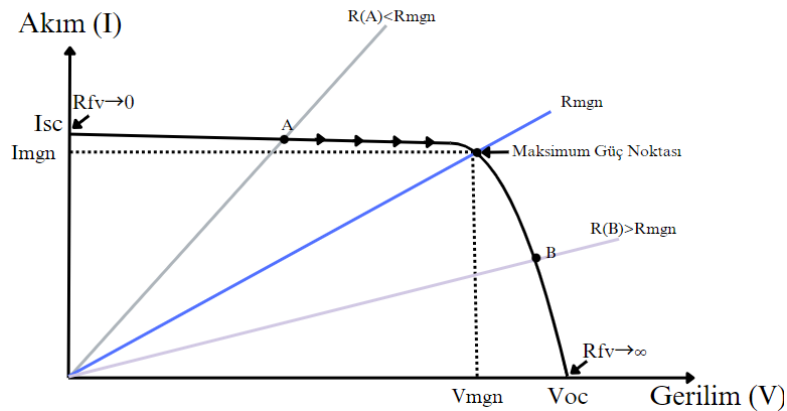
Şekil 2.15. Düşürücü dönüştürücü devre şeması

Düşürücü dönüştürülerin sürekli iletim modunda sistem empedansı (R_{fv}) ve yük empedansı (R_y) arasındaki ilişki denklem 2.5'teki gibidir.

$$R_{fv} = \frac{R_y}{d^2} \quad (2.5)$$

Düşürücü dönüştürücü görev döngüsü $d=0$ olduğunda, FV panel çıkış empedansı $R_{fv}=\infty$ olur, $d=1$ olduğunda ise panel çıkış empedansı $R_{fv}=R_y$ olur. Bu durumda panel çıkış empedansı R_{fv} , R_y yük direnci ile ∞ arasında herhangi bir değer alabilir. Sistemin maksimum güç noktasında çalışabilmesi için maksimum güç noktası empedansı R_{mgn} 'nin bu aralıkta yer alması gerekmektedir. Aksi halde, maksimum güç noktası yakalanamayacaktır [31].

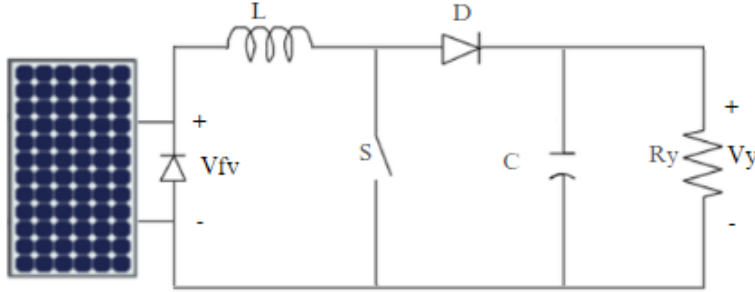
Şekil 2.16'da bu durum gösterilmektedir. İşletim noktası A ve B ile gösterilen iki farklı durumda, sistemin çalışma koşulları açıklanmıştır. A'da MGN empedansı sistemin yük empedansından daha büyüktür. $R_y \leq R_{mgn}$ şartı sağlandığından dönüştürücünün görev döngüsü ayarlanarak sistemin maksimum güç noktasında çalışması sağlanabilir. Ancak, B noktasında ise yük empedansı R_y , MGN empedansından büyüktür. Bu durumda sistem MGN'de çalışamaz.



Şekil 2.16. Düşürücü dönüştürücünün yük empedansına göre MGN takip yeteneği

2.5.2. Yükseltici dönüştürücü

Yükseltici dönüştürücüler girişindeki doğru gerilimi, daha yüksek gerilim seviyelerine dönüştüren güç elektroniği devreleridir. Şekil 2.17’de yükseltici dönüştürücünün devre yapısı görülmektedir.

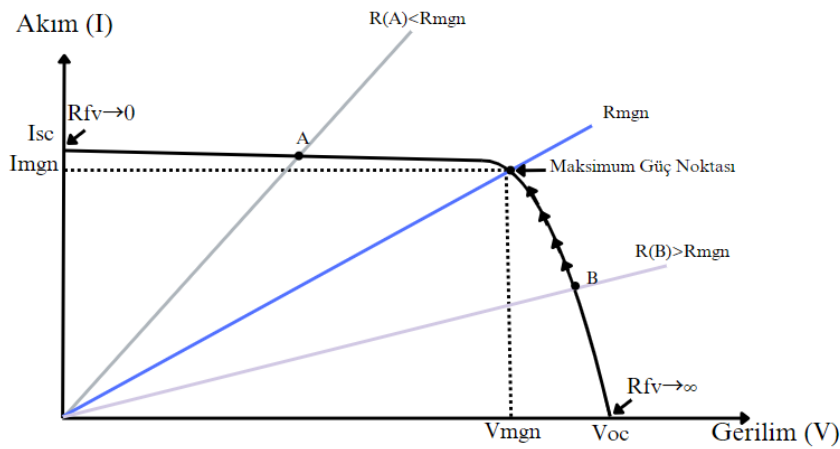


Şekil 2.17. Yükseltici dönüştürücü devre şeması

Yükseltici dönüştürücülerin sürekli iletim modunda sistem empedansı (R_{fv}) ve yük empedansı (R_y) arasındaki ilişki 2.6’daki gibidir.

$$R_{fv} = R_y(1 - d)^2 \quad (2.6)$$

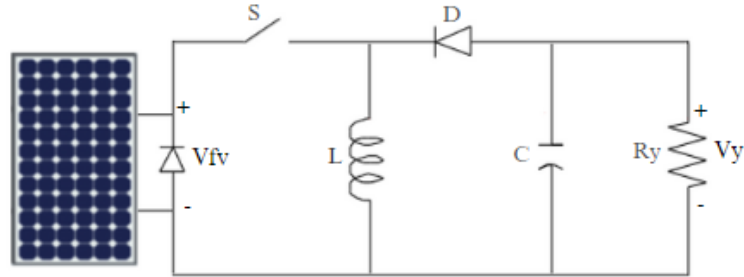
Yükseltici dönüştürücü görev döngüsü $d=0$ olduğunda, FV panel çıkış empedansı $R_{fv}=R_y$ olur, $d=1$ olduğunda ise panel çıkış empedansı $R_{fv}=0$ olur. Bu durumda panel çıkış empedansı R_{fv} , 0 ile yük direnci R_y arasındaki değerleri alabilir. MGNİ sistemi, R_{fv} ’yi değiştirerek $R_{fv}=R_{mgn}$ yapmaya çalışır. Ancak, R_{mgn} , panel çıkış empedansı R_{fv} ’nin alabileceği sınırlar içerisinde değilse yani $R_y < R_{mgn}$ ise sistem maksimum güç noktasına ulaşamayacaktır [31]. Şekil 2.18 bu etkiyi göstermektedir.



Şekil 2.18. Yükseltici dönüştürücünün yük empedansına göre MGN takip yeteneği

2.5.3. Düşürücü yükseltici dönüştürücü

Düşürücü yükseltici dönüştürücüler girişindeki doğru gerilimi, daha düşük veya yüksek gerilim seviyelerine dönüştürebilen güç elektroniği devreleridir. Şekil 2.19’da düşürücü yükseltici dönüştürücünün devre yapısı görülmektedir.

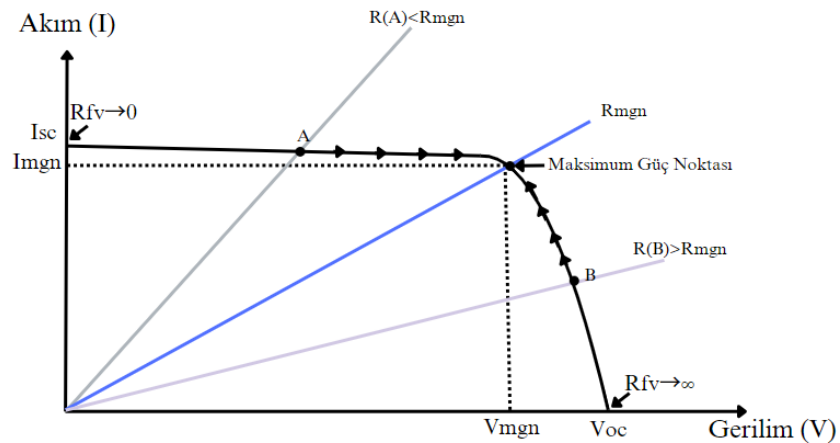


Şekil 2.19. Düşürücü - yükseltici dönüştürücü devre şeması

Düşürücü Yükseltici dönüştürücülerin sürekli iletim modunda sistem empedansı (R_{fv}) ve yük empedansı (R_y) arasındaki ilişki denklem 2.7’deki gibidir.

$$R_{fv} = \frac{R_y(1 - d)^2}{d^2} \quad (2.7)$$

Görev döngüsü $d \in [0 \ 1]$ aralığında iken FV sistem empedansı R_{fv} sıfır ve sonsuz arasında herhangi bir değeri alabilir [31]. Bu durumda düşürücü ve yükseltici dönüştürücülerde olduğu gibi belirli bir kısıtlama bulunmamaktadır, yani sistem empedansı istenen aralıkta dinamik olarak ayarlanabilir.



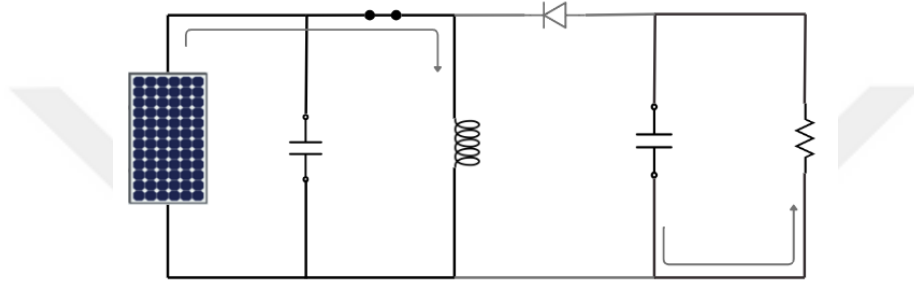
Şekil 2.20. Düşürücü - yükseltici dönüştürücünün yük empedansına göre MGN takip yeteneği

2.6. Düşürücü - Yükseltici Dönüştürücü Tasarımı

Düşürücü - yükseltici dönüştürücüler, anahtarlama elemanının iletimde (ON) ya da kesimde (OFF) olmasına göre iki farklı modda çalışmaktadır.

2.6.1. Mod 1: Anahtarlama elemanı iletimdeyken

Anahtarlama elemanı iletime geçtiğinde, FV panelden gelen enerji indüktör üzerinde depolanmaya başlar. Bu sırada çıkış kapasitörü, daha önce üzerinde biriken enerjiyi yüke aktarır [32]. İletim durumu için devredeki akım yolu Şekil 2.21'de gösterilmiştir.



Şekil 2.21. Mod 1: Anahtarlama elemanı ON durumu

Bu durumda, indüktör üzerindeki gerilim şu şekilde ifade edilir:

$$V_L = L \times \frac{di_L(t)}{dt} \quad (2.8)$$

Anahtarlama elemanı DT aralığı boyunca iletimde kalmaktadır ve bu süre boyunca indüktör akımındaki değişim miktarı denklem 2.9'da verilmiştir [33].

$$\Delta I_L = \frac{V_{in} \times D}{L \times f_{sw}} \quad (2.9)$$

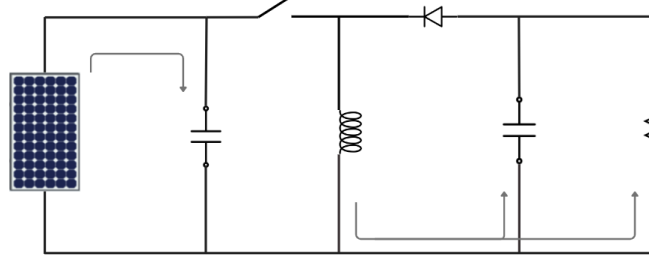
Buradan, indüktör değeri 2.10'daki şekilde hesaplanabilir

$$L = \frac{V_{in} \times D}{\Delta I_L \times f_{sw}} \quad (2.10)$$

Burada f_{sw} anahtarlama frekansı, V_{in} giriş gerilimi ve ΔI_L indüktörün tepe akım salınımını ifade etmektedir.

2.6.2. Mod 2: Anahtarlama elemanı kesimdeyken

Anahtarlama elemanı kesime geçtiğinde, indüktör üzerinde depolanan enerji çıkış kapasitörüne ve yüke aktarılır. Bu süreçte indüktör akımında bir azalma meydana gelir. Kesim durumu için devredeki akım yolu Şekil 2.22'de gösterilmiştir.



Şekil 2.22. Mod 2: Anahtarlama elemanı OFF durumu

Kesim durumunda indüktör üzerindeki gerilim şu şekilde ifade edilir:

$$V_L = -V_o \quad (2.11)$$

İndüktör gerilimi yerine akım denklemi yazılır ve düzenlemeler yapıldığında:

$$\left(\frac{dI_L}{dt}\right) = \frac{(-V_o)}{L} \quad (2.12)$$

Anahtarlama elemanının kesim süresi $(1-D)T$ aralığında, indüktör akımındaki değişim 2.13'teki şekilde hesaplanabilir:

$$\Delta I_L = \frac{(-V_o)}{L} \times (1-D)T = \frac{-V_o \times (1-D)}{L \times f_{sw}} \quad (2.13)$$

Düşürücü-yükseltici dönüştürücüde giriş ve çıkış gerilimleri arasındaki ilişki 2.14'te verilmektedir.

$$\frac{V_o}{V_{in}} = \frac{D}{1-D} \quad (2.14)$$

Görev döngüsü D , giriş ve çıkış gerilimleri cinsinden 2.15'teki gibi hesaplanabilir [33].

$$D = \frac{V_o}{V_o + V_{in}} \quad (2.15)$$



3. MAKSİMUM GÜÇ NOKTASI ALGORİTMALARI

Bir fotovoltaik sistemin MGN'sini bulmak ve takip etmek için literatürde pek çok algoritma ve metot geliştirilmiştir. Bu metotlar genellikle Geleneksel, Akıllı, Optimizasyon, Hibrit olmak üzere dört ana kategoride sınıflandırılır. Geleneksel metotlar, basitlikleri ve düşük maliyetleri ile bilinir; yaygın olarak kullanılsalar da, kısmi gölgelenme, ani ışıma değişim gibi durumlarda global maksimum güç noktasını belirlemede başarısız olabilmektedir [6]. Bu sebeple bu metotlar üzerine çeşitli modifiyeler yapılarak geliştirilmeye çalışılmıştır. Bu bölümde geleneksel metotlar ve kısmi gölgelenme durumlarında Global MGN takibi sağlanması için geliştirilen atlamalı metotlardan bazıları açıklanmaktadır.

3.1. Geleneksel Metotlar

3.1.1. Sabit gerilim metodu

Sabit Gerilim algoritması, en basit MGNİ kontrol yöntemlerinden biridir. Bu yöntem hızlı ve uygulanması kolay fakat sınırlı doğruluğa sahiptir. FV sistemin MGN yakınında çalışmasını sağlamak için FV panel gerilimi, MGN gerilimine eşdeğer sabit bir referans gerilim ile karşılaştırılır ve sistemin belirlenen MGN gerilim değerinde çalışması sağlanır. Bu metotta, sıcaklık değişimlerinin etkisi ihmal edilir. Bu yüzden ışıyım seviyesinin az değiştiği koşullarda tercih edilebilir. Fakat bu metot ile tam olarak gerçek MGN'si takip edilemez [6,34].

3.1.2. Kısa devre akımı metodu

Kısa devre akımı metodunda, değişen çevre koşulları için kısa devre durumundaki akım ile optimum çalışma noktasındaki (maksimum güç noktası) akım arasındaki oran hesap edilir. Bu K oranı 0.75 - 0.9 aralığındadır [34].

$$\frac{I_{MGN}}{I_{SC}} = K \quad (3.1)$$

Periyodik olarak FV panel kısa devre edilerek akımı ölçülür ve K değerine göre gerilim belirlenir. Bu teknik, düşük akım ve yüksek gerilim uygulamaları için uygundur.

3.1.3. Açık devre gerilim metodu

Bu yöntemde MGN'deki gerilim ile FV dizinin açık devre gerilimi arasında sabit bir oran olduğu, FV dizideki sıcaklık değişimlerinin önemsiz olduğu varsayılır. Bu K oranı literatürde çoğunlukla 0.7 - 0.8 aralığında kullanılmaktadır [6,34].

$$\frac{V_{MGN}}{V_{OC}} \cong K < 1 \quad (3.2)$$

FV dizinin açık devre gerilimi ölçülür ve denklem 3.2'deki K sabitine göre sistemin maksimum güç noktası gerilimi hesaplanır. FV dizi gerilimi, elde edilen MGN gerilimi ile kıyaslanarak sistemin MGN gerilim değerinde çalışması sağlanır.

K sabitinin optimal değerinin belirlenmesinin zor olması ve açık devre gerilimin ölçülebilmesi için FV gücün kesilmesi gerekmesi dezavantajlarındandır.

3.1.4. Değiştir ve gözle metodu

D&G metodu düşük maliyetli olması, uygulanmasının kolay olması ve kabul edilebilir doğruluğa sahip olması gibi özellikleri nedeniyle yaygın olarak kullanılmaktadır. Literatürde, bu tekniğin MGN'sini arama ve takip etmede deneme yanılma yöntemine dayandığını ortaya konulmuştur .

Bu metotta FV panelin karakteristik P-V eğrisinden faydalanılır. Panel gerilimi ve akımı ölçülerek panelin ürettiği güç hesaplanır. Güç ve gerilim değerleri bir önceki güç ve gerilim değerleri ile kıyaslanır. Algoritma oluşan güç farkı ve gerilim farkının oranının pozitif olması durumunda V_{ref} gerilim değerini artırır, negatif olması durumunda ise V_{ref} değerini azaltır. 3.3, 3.4 ve 3.5 denklemlerinde bu durum matematiksel olarak gösterilmiştir. Bu işlemler MGN'ye ulaşıncaya dek devam eder.

$$\frac{dP_{FV}}{dV_{FV}} > 0 \quad \text{MGN'nin sol tarafında, } V_{ref} \text{ artırılır} \quad (3.3)$$

$$\frac{dP_{FV}}{dV_{FV}} < 0 \quad \text{MGN'nin sağ tarafında, } V_{ref} \text{ azaltılır} \quad (3.4)$$

$$\frac{dP_{FV}}{dV_{FV}} = 0 \text{ Maksimum Güç Noktasında} \quad (3.5)$$

3.1.5. Artımsal iletkenlik metodu

Artımsal İletkenlik Metodu (Aİ), fotovoltaik sistemlerde maksimum güç noktasını aramak ve izlemek için kullanılan yaygın tekniklerden biridir. Aİ metodunun temel prensibi, FV panelin ürettiği gücün gerilime göre türevinin analizine dayanır. FV sistemin MGN'sinde gücün gerilime göre türevi sıfırdır.

Matematiksel olarak, FV sistemin çıkış gücü, panel gerilimi ve akımı ile şu şekilde ifade edilir:

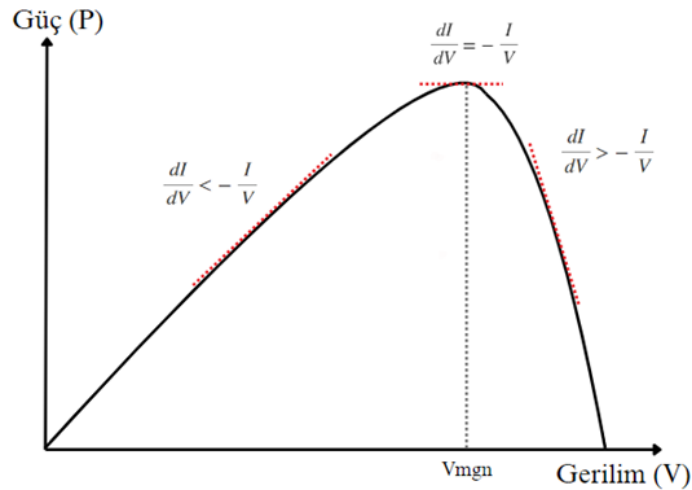
$$P = I_{fv} \times V_{fv} \quad (3.6)$$

Gücün gerilime göre türevi ise:

$$\frac{dP_{FV}}{dV_{FV}} = \frac{d(I_{FV}V_{FV})}{dV_{FV}} = I_{FV} + V_{FV} \frac{dI_{FV}}{dV_{FV}} \quad (3.7)$$

Bu denklemin MGN'de sıfır olduğu durum 3.8'deki gibidir.

$$\frac{dI_{FV}}{dV_{FV}} = - \frac{I_{FV}}{V_{FV}} \quad (3.8)$$



Şekil 3.1. Bir FV panelin P-V eğrisi üzerinde Aİ yönteminin temel fikri

Bu ilişki, MGN'nin solunda, akımın gerilime oranının negatif olduğu; sağında ise pozitif olduğu anlamına gelir. Aİ algoritması, artımsal iletkenlik ($\Delta I/\Delta V$) ve anlık

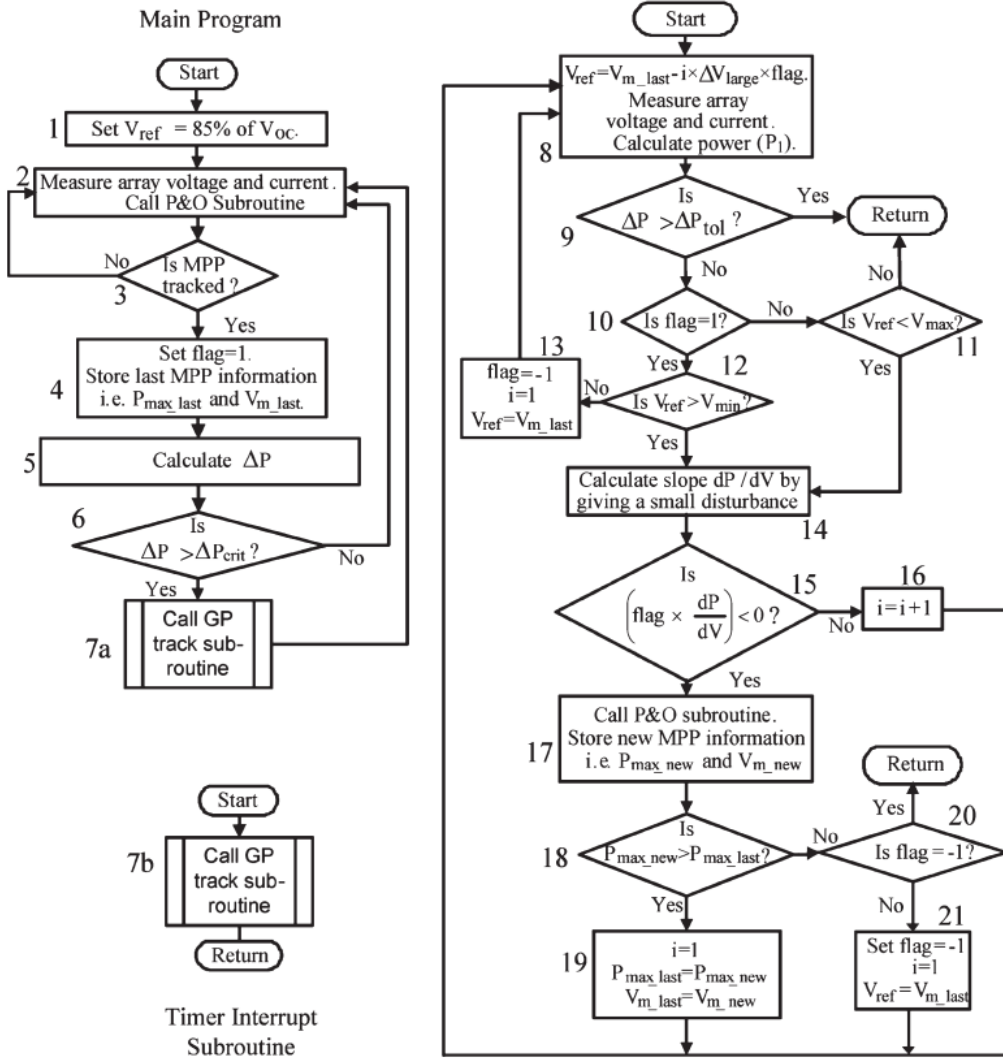
AI algoritması, D&G'ye göre daha fazla işlem yüküne sahip olup daha karmaşıktır. Ayrıca D&G yöntemine benzer şekilde bu yöntemde de iyileştirme yapmak için çeşitli modifiyeler yapılmış, ve değişken adım boyutları geliştirilmiştir. Şekil 3.2'de Artımsal iletkenlik algoritmasının akış diyagramı gösterilmiştir.

gölgelenme durumunda FV sistemlerinin güç-gerilim eğrisi üzerindeki bu noktalara yakın bölgeler taranarak arama alanının daraltılması hedeflenir. Bu yöntem, arama alanını daraltarak daha hızlı ve verimli bir takip sağlar.

0.8Voc metodu, ilk olarak Patel ve Agarwal tarafından önerilmiştir. Sonrasında bu metodun geliştirilmesi için birçok çalışma yapılmıştır. Bu sebeple, literatürde 0.8Voc metodunun çeşitli varyasyonları bulunmaktadır. Aşağıda bu metodların bazılarının çalışma yapısı incelenmiş ve birbirlerine göre avantaj dezavantajları değerlendirilmiştir.

Patel ve Agarwal çalışmasında kısmi gölgelenme sırasında P -V eğrisinde tüm güç zirvelerinin (yerel ve global) her zaman Voc_mod'un %80'inin katlarının yakınında oluştuğunu, P-V eğrisinde tarama yapılırken (P-V eğrisinin hangi yönden tarandığı farketmeksizin) zirve büyüklüklerinin arttığı ve GMGN'ye ulaşıldıktan sonra zirve büyüklükleri sürekli olarak azaldığını ortaya koymuş ve bu bilgiler doğrultusunda 0.8Voc metodunu önermiştir .

Bu metotta FV sistemin çalışma gerilimi, modül açık devre gerilimin (Voc) %85'i olarak ayarlanır. Gerilim ve akım değerleri ölçülerek güç hesaplanır ve D&G metodu ile maksimum güç noktası takibi yapılır ve belirli periyotta güç değişimine bakılır. Güç değişimi belirli bir kritik değeri aştığında, algoritma Global Güç Noktası (GP) takip alt programını devreye sokar. Bu alt program, referans gerilimi ayarlayarak yeni zirve noktalarını arayacaktır. Taramaya öncelikle Vm_last (D&G metodundan çıkarken kaydedilen gerilim) geriliminin sol tarafından başlanır. Tarama aralığı $\Delta V < 0.8Voc$ olacak şekilde 0.6 - 0.7Voc civarında seçilir. Eğimin (dP/dV) pozitif olduğu durumlarda aynı yönde bir sonraki zirveyi arama devam ederken, negatif eğimde yeni bir zirve bulunur ve bu zirvede geleneksel MGNİ metodu uygulanır. Eğer bu zirve önceki zirveden daha düşük güç sağlıyorsa veya referans gerilimi Vmin değerine ulaşırsa, bu bölgedeki tarama sonlandırılır ve algoritma ters yönde (sağ tarafa) arama başlatır ve arama aynı şekilde ilerler. Pm_last'dan az güç üreten ilk tepe noktasına geldiğinde veya referans gerilimi, Vmax'a ulaştığında, kaydedilen yeni MGN verileri uygulanır ve D&G metoduna dönülür Şekil 3.3'te bu algoritmanın akış diyagramı verilmektedir [12].



Şekil 3.3. 0.8Voc metodu akış şeması [12]

Kim ve Kim'in (2013) çalışmasında [35], Patel ve Agarwal'ın (2008) yönteminden esinlenilmiş ve bu yönteme bazı geliştirmeler eklenmiştir. [12] yönteminden farklı olarak, tespit edilen yerel MGN zirvesi, önceki zirveden daha düşük güç sağlasa bile tarama sonlandırılmayıp devam edilir. Bu çalışma, belirli P-V eğrilerinde Patel ve Agarwal'ın yönteminin başarısız olduğu durumlarda bile MGN'yi daha doğru bir şekilde takip edebilmiştir. Ancak, bu kapsamlı tarama, ek tarama gereksinimi nedeniyle algoritmanın daha yavaş olmasına yol açmaktadır.

Kouchaki ve arkadaşları tarafından önerilen yöntemde ise, sistem düzenli ışınlım koşullarında çalışırken, tepe tırmanışı algoritması kullanılır. Ancak, kısmi gölgelenme tespit edildiğinde, sistem açık devre geriliminin %80'i (0.8Voc) değerinin tam sayı katlarını tarayarak global maksimum güç noktasını bulmaya çalışır.

Bu yöntemin temelinde, normalleştirilmiş akım değişimi ($\Delta I/I_c$) kavramı bulunmaktadır. Araştırmada, kısmi gölgeli koşullarda bu değişimin, tek tip ışıyım koşullarına kıyasla her zaman daha düşük olduğu belirtilmiştir. Normalleştirilmiş akım değişiminin kısmi gölgelenme ve düzenli ışıyım koşullarındaki ilişkisi 3.9'da verilmiştir.

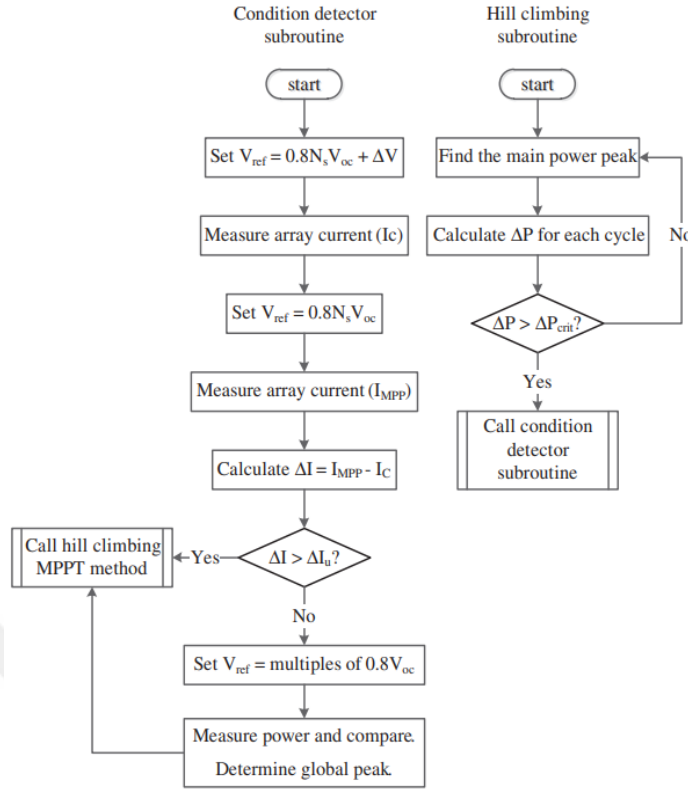
$$V_{array} = 0.8 \times N_s \times V_o \text{ civarında } \left(\frac{\Delta I}{I_c} \right)_u > \left(\frac{\Delta I}{I_c} \right)_{ps} \quad (3.9)$$

Burada I_c , dizi geriliminin MGN çevresinde biraz kaydırıldığı durumda elde edilen dizi akımını; ΔI , MGN çevresindeki akım değişimidir.

Algoritma, $0.8N_sV_{oc}$ çalışma noktasındaki $\Delta I/I_c$ 'yi, tek tip ışıyım koşullarında ($G = 1 \text{ kW/m}^2$) hesaplanan referans değer $(\Delta I/I_c)_{ref}$ ile karşılaştırır. Eğer ölçülen $\Delta I/I_c$, referans değerinden yüksekse, sistemin tek tip (düzenli) ışıyım koşullarında çalıştığı kabul edilir. Aksi takdirde, kısmi gölgelenme koşullarında çalıştığı tanımlanır.

Kısmi gölgelenme koşulu tespit edilirse, algoritma, global tepe noktasının konumunu bulmak için $0.8V_{oc}$ 'nin tam sayı katlarındaki dizi gerilimi ve akımından örnekleme yapar. Daha sonra, global maksimum güç noktasını izlemek için tepe tırmanışı algoritması devreye girer. Söz konusu MGNİ algoritmasının akış şeması Şekil 3.4'te gösterilmektedir [15].

Bu yöntemde, normalleştirilmiş akım değişimi ($\Delta I/I_c$), kısmi gölgelenme koşullarının tespiti için bir kriter olarak kullanılmıştır. Bu kriter sayesinde, yalnızca kısmi gölgelenme tespit edildiği durumlarda global maksimum güç noktası (GMGN) taraması yapılmaktadır. Bu yaklaşımın en önemli avantajı, kısmi gölgelenme olmayan, yani düzenli ışıyım koşullarında gereksiz yere global tarama yapılmasının önlenmesidir.



Şekil 3.4. 0.8Voc metodu akış şeması [15]

3.2.2. Arama-atlama-değerlendirme metodu

Arama-Atlama-Değerlendirme (SSJ) metodu, Wang ve arkadaşları tarafından ortaya konmuş olup kısmi gölgelenme koşulları altında FV dizilerinin maksimum güç noktasını hızlı ve doğru bir şekilde izlemek amacıyla geliştirilmiş bir algoritmadır. SSJ metodunun çalışma prensibi ve süreçleri şu şekilde açıklanabilir:

Öncelikle referans gerilimi açık devre geriliminin %60'ı olarak ayarlanır. Bu başlangıç değeri, ilk yerel güç zirvesini bulmayı garanti eder. Ardından, dizinin %90 açık devre gerilimi (Voc) sınır gerilimi (Vend) olarak belirlenir, çünkü bu değer üzerindeki gerilimlerde maksimum güç noktası oluşmaz.

▪ Arama süreci

İlk arama sürecinde, Artımsal İletkenlik yöntemi ile ilk yerel MGN bulunur. YMGN'nin gücü ve gerilimi P_m ve V_m olarak kaydedilir. Daha sonra çalışma gerilimi ileri yönde değiştirilir. dp/dv işaretinin negatiften pozitive geçtiği nokta belirlenir ve A_n olarak isimlendirilir. Bu noktanın akımı, bir sonraki modülün kısa devre akımı (I_{scn}) olarak kabul edilir.

▪ Atlama Süreci

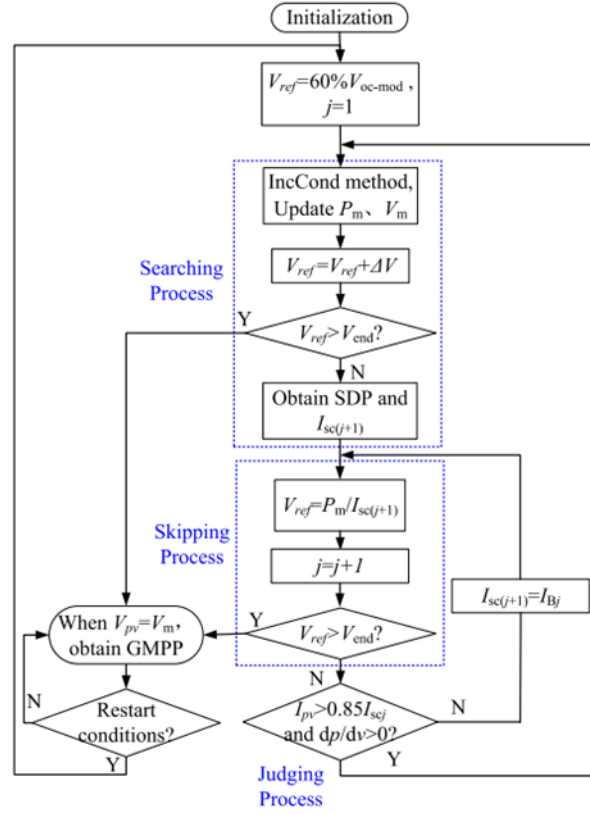
Atlama Sürecinde $P_m/I_{sc(j+1)}$ denklemi kullanılarak yeni gerilim noktası belirlenir ve B_n olarak isimlendirilir. Bu gerilim, kaydedilen en yüksek güç (P_m) ile A_n noktasındaki kısa devre akımının (I_{sc}) bölünmesiyle hesaplanır. A_n ve B_n arasındaki aralığın taranmasına gerek yoktur. Çünkü $P_m = V_{Bn} \times I_{scn}$ olduğundan B_n noktasına kadar P_m gücünden yüksek güç elde edilmesi mümkün değildir.

Algoritma arama ve atlama süreçlerinin ikisinde de V_{ref} ile V_{end} arasında bir karşılaştırma yapar. V_{ref} 'in V_{end} 'den büyük olması durumunda tarama bitirilir. V_{ref} , maksimum güç noktası gerilimi V_m 'e ayarlanır ve sistem GMGN'de çalıştırılmış olur. Aksi halde sonraki aşamaya geçilir.

▪ Değerlendirme Süreci

Değerlendirme sürecinde iki ana kriter dikkate alınır: $I_{Bn} > 0.85I_{An}$ $dV/dP > 0$. $dV/dP > 0$ durumu, bir maksimum güç noktasına yaklaşıldığını, $dV/dP < 0$ ise bu noktadan uzaklaşıldığını gösterir. $I_{Bn} > 0.85I_{An}$ koşulu sağlandığında, A_n ve B_n noktalarının aynı akım basamağında olduğu ve bir sonraki güç zirvesinin (M_{n+1}), mevcut güç zirvesinden M_n daha büyük olduğu anlamına gelir ($P_{M(n+1)} > P_{M(n)}$). Bu durumda, algoritma yeni güç zirvesini bulmak için arama sürecine geri döner. Ancak, $I_{Bn} < 0.85I_{An}$ olduğunda, A_n ve B_n noktaları arasında bir akım basamağı farkı vardır, bu da bir sonraki güç zirvesinin M_{n+1} A_n ve B_n aralığında olduğunu ve B_n 'nin M_{n+1} 'in sağında kaldığını gösterir. Bu durumda, $P_{M(n)} > P_{M(n+1)}$ olduğundan bu zirvenin bulunmasına gerek yoktur, bu nedenle algoritma atlama sürecine geri döner. Değerlendirme sürecindeki bu iki temel kriter sayesinde, algoritma güç zirvelerini doğru bir şekilde tanımlayarak gereksiz taramalardan kaçınır ve böylece SSJ metodunun hassasiyeti ve doğruluğu sağlanır [17].

Şekil 3.5'te, SSJ'nin blok diyagramı gösterilmektedir. Şekil 3.6'da metodun daha iyi açıklanabilmesi için kısmi gölgelenme altında seri bağlı üç FV panelden oluşan bir dizide SSJ yönteminin izleme süreci gösterilmektedir.

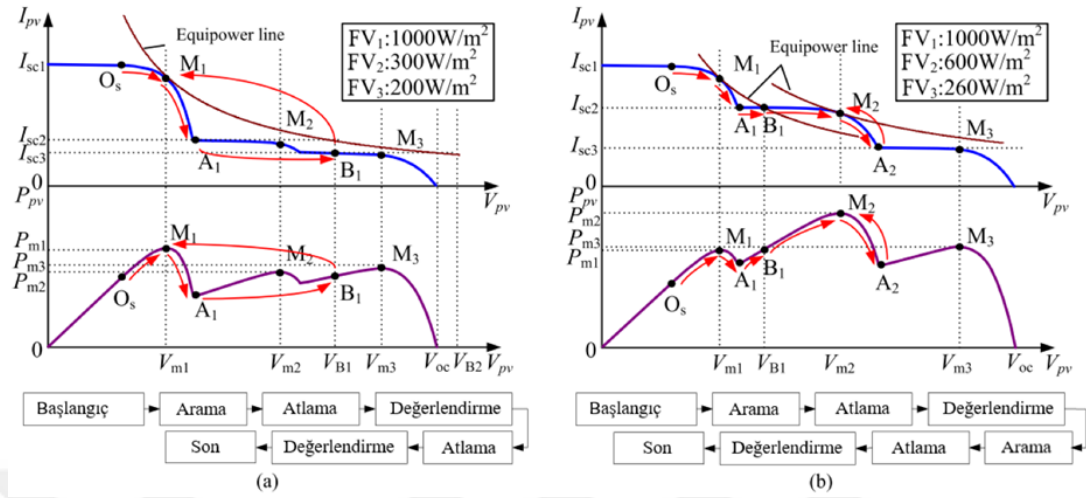


Şekil 3.5. SSJ metodu akış şeması [17]

Şekil 3.6a)'da sistem referans gerilimi, açık devre geriliminin %60'ı olan V_{oc} noktasından başlar. Aİ yöntemi ile ilk yerel MGN noktası M_1 bulunur ve gerilimi ileri yönde artırılarak dp/dv işaretinin negatiften pozitifte geçtiği nokta A_1 'e kadar tarama işlemi yapılır. Atlama sürecinde P_{M1}/I_{sc2} denklemi kullanılarak sistem yeni gerilim noktası B_1 'e getirilir. $I_{B1} < 0.85I_{A1}$ olduğundan, A_1 ve B_1 noktaları arasında bir akım basamağı farkı vardır, bu da bir sonraki güç zirvesinin M_2 'nin A_1 ve B_1 aralığında olduğunu gösterir. Algoritma atlama sürecine geri döner. P_{M1}/I_{sc3} ile belirlenen yeni gerilim noktası V_{end} 'den büyük olduğu için tarama bitirilir ve sistem global maksimum güç noktası olan M_1 'de çalıştırılır.

Şekil 3.6 b)'de ise sistem B_1 noktasına gelene kadar bir önceki örnekle aynı adımları izler. Değerlendirme sürecinde $I_{B1} > 0.85I_{A1}$ koşulu sağlanır, bu durum A_1 ve B_1 noktalarının aynı akım basamağında olduğu ve bir sonraki güç zirvesinin (M_2), mevcut güç zirvesinden M_1 daha büyük olduğu anlamına gelir. Bu durumda, algoritma yeni güç zirvesini bulmak için arama sürecine geri döner ve Aİ yöntemi ile M_2 güç zirvesi belirlenir. Gerilim ileri yönde artırılarak dp/dv işaretinin negatiften pozitifte geçtiği nokta A_2 belirlenir. P_{M2}/I_{sc3} ile belirlenen yeni gerilim noktası

Vend'den büyük olduğu için tarama bitirilir ve sistem global maksimum güç noktası olan M_2 'de çalıştırılır.



Şekil 3.6. Kısmi gölgelenme altında SSJ yönteminin izleme süreci. (a) Durum 1 (b) Durum 2

Görüldüğü üzere SSJ metodu, FV dizinin karakteristiklerini kullanarak arama gerilim aralığını daraltır ve YMGN'lerin (yerel maksimum güç noktaları) etrafındaki alanları atlayarak daha hızlı sonuç elde eder. GMGN'nin gerilim profilinin sol tarafında olduğu durumlarda, izleme hızını önemli ölçüde artırmaktadır. Ancak bu metot daha az sayıda FV panel içeren sistemlerde başarıyla daha büyük sistemlerde izleme hızı açısından yetersiz kalabilmektedir.

3.2.3. Atlamalı adaptif D&G metodu

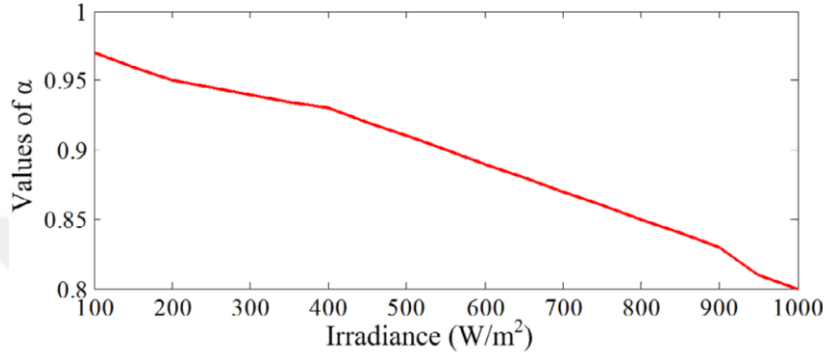
Atlamalı Adaptif D&G Metodu (AA-D&G), Kısmi gölgelenme durumunda tarama yaparken sabit bir $0.8V_{oc}$ değeri yerine adaptif bir adım boyutu (ΔV) kullanarak maksimum güç noktasını daha hassas bir şekilde belirlemeyi amaçlar. Bu yöntemde, adım boyutu (ΔV) aşağıdaki denklemle ifade edilir:

$$\Delta V = \alpha \times V_{oc} \quad (3.10)$$

Bu adaptif yaklaşımın temel dayanağı, bir fotovoltaik sistemde seri bağlı panel sayısı arttıkça ve gölgelenme seviyeleri değiştikçe, yerel zirve konumlarının gerilim aralığında sağa doğru kayması ve $0.8V_{oc}$ 'nin katları ile gerçek zirve noktaları arasında sapmalar meydana gelmesidir [16]. Bu sapmalar, standart sabit adım $0.8V_{oc}$

yöntemleriyle doğru şekilde tespit edilemez ve bu da sistemin verimliliğini olumsuz etkiler.

Bu durumu düzeltmek ve yerel zirve noktalarını doğru bir şekilde belirlemek amacıyla, ışınlam seviyesi (G) ile α (alfa) parametresi arasında bir ilişki ortaya konmuştur. Şekil 3.7’de, ışınlam seviyesi ile α arasındaki bu ilişki detaylı olarak gösterilmektedir.



Şekil 3.7. Işınlam seviyesi ile α arasındaki ilişki [16]

Alfa parametresi şu şekilde formüle edilir:

$$\alpha = 0.97 + \left(\frac{0.8 - 0.97}{1000 - 100} \right) (G - 100) = 0.99 - \frac{0.17}{900} G \quad (3.11)$$

Alfa parametresi, ışınlam seviyesindeki değişimlerle neredeyse doğrusal bir ilişki içindedir ve bu doğrusal ilişki, yerel zirvelerin doğru konumlarını belirlemek için kullanılır. Bu sayede, sistemdeki tepe noktaları adaptif bir şekilde daha hassas olarak tespit edilir, gereksiz arama süreleri kısaltılır ve enerji verimliliği artırılır.

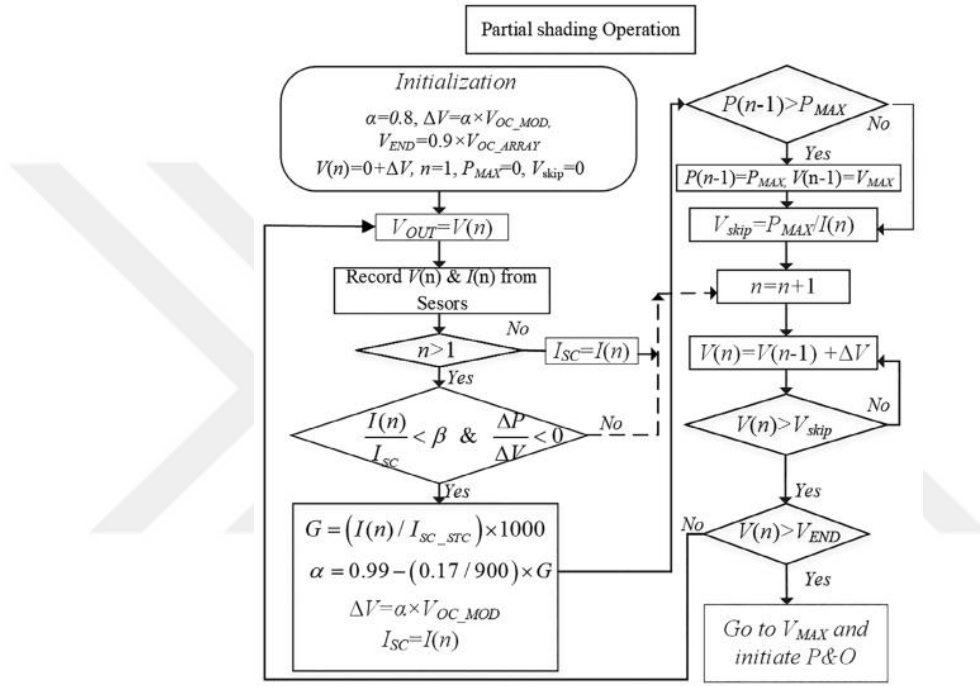
AA-D&G metodunun çalışma prensibinde, SSJ metoduna benzer bir atlama mekanizması kullanılır. Tarama sırasında sistem, adım boyutunu (ΔV) adım adım kullanarak ilerler. Eğer $I_n/I_{SC} < \beta$ ve $dV/dP < 0$ koşulları sağlanırsa, sistem yeni bir akım basamağına geçtiğini anlar. Bu durumda, ışınlam şiddeti (G) hesaplanır, α ve ΔV yeniden belirlenir ve yeni akım basamağı I_{sc} olarak kaydedilir.

Atlama mekanizması, Vatlama gerilimini (3.12) denklemi ile belirler:

$$V_{skip} = \frac{P_{max}}{I_n} \quad (3.12)$$

Sonrasında, $V(n) = V(n-1) + \Delta V$ denklemiyle Vatlama geriliminini aşan $V(n)$ noktası yeni tarama noktası olarak belirlenir. Bu atlama mekanizması, sistemin hızlı ve doğru bir şekilde maksimum güç noktasına ulaşmasını sağlar.

$I_n/I_{SC} < \beta$ ve $dV/dP < 0$ koşulları sağlanmadığı durumda ise n bir artırılarak yeni tarama noktası belirlenir ve taramaya devam edilir. Taranacak gerilim maksimum gerilim sınırı V_{END} 'i aştığı noktada, kaydedilen GMGN verileri uygulanır ve D&G metoduna dönülür.



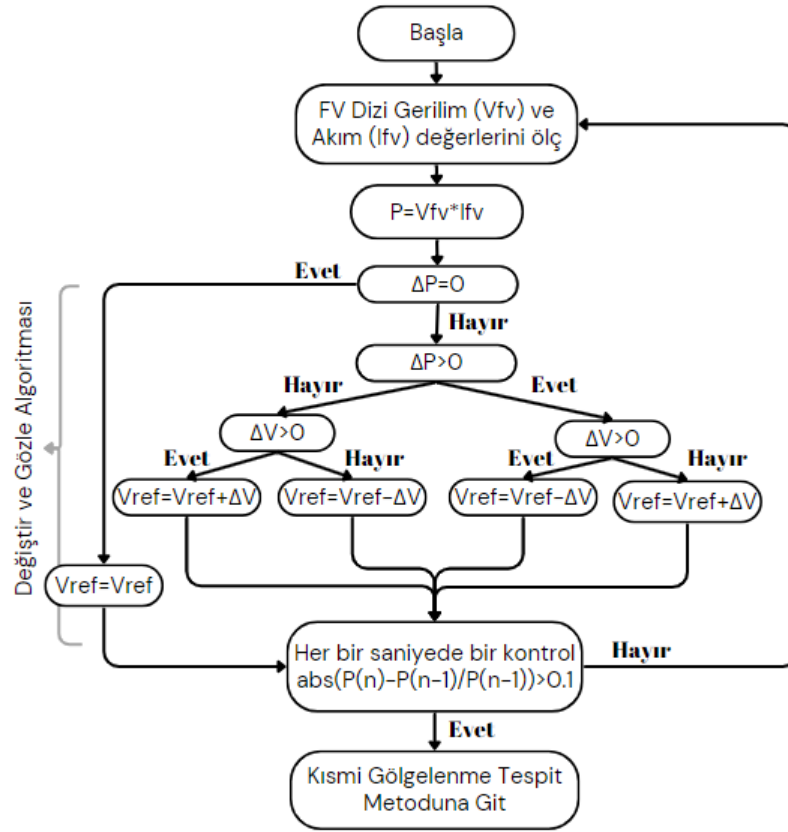
Şekil 3.8. Atlamalı Adaptif D&G metodu akış şeması [37]

AA-D&G yöntemi, derin gölgelenme koşullarında, özellikle global zirvenin gerilim profilinin sol tarafında olduğu durumlarda, izleme hızını önemli ölçüde artırmaktadır. Ancak, bu yöntemde kısmi gölgelenmeyi tespit için yapılan ışınım şiddeti hesabı, mono ve polikristal temelli FV paneller için uygun olduğundan, bu tip panellerde etkin şekilde çalışır. İnce film FV modüllerinde ise AA-D&G (SA-P&O) uygulanamaz [37].



4. ÖNERİLEN MAKSİMUM GÜÇ NOKTASI İZLEYİCİ ALGORİTMASI

Bu çalışmada, FV sistemlerde verim ve performansın artırılması amacıyla yeni bir hibrit MGNİ algoritması tasarlanmıştır. Bu algoritma, üç ana bileşenden oluşmaktadır. Sistem, normal koşullar altında değiştir ve gözle metodunu kullanırken, kısmi gölgelenme ve ani ışıınım değişimlerinin ayrımını yapabilen bir tespit metodu içermekte ve kısmi gölgelenme senaryolarına bağlı olarak özel olarak geliştirilmiş yeni bir Global MGNİ algoritmasını barındırmaktadır. Tasarlanan sistemin düzenli ışıınım altında çalışma akış diyagramı Şekil 4.1'de gösterilmektedir.



Şekil 4.1. Düzenli ışıınımda MGNİ'nin akış şeması

4.1. Düzenli Işıınımda Sistemin Çalışma Yapısı

Standart koşullar altında sistem, Değiştir ve Gözle algoritmasını kullanmaktadır. Bu metot, maksimum güç noktasını bulmak için iteratif bir yaklaşımla çalışır. FV dizi

gerilimi (V_{fv}) ve akımı (I_{fv}) sürekli olarak ölçülür ve bunlardan üretilen güç $P = V_{fv} \times I_{fv}$ hesaplanır. Mevcut güç ile bir önceki ölçülen güç arasındaki fark bulunur. Eğer bu fark ΔP pozitif ise, gerilim yönünde yapılan değişiklik aynı yönde devam ettirilir; aksi takdirde, ters yönde bir değişiklik yapılır. Bu döngü, tekrarlanarak FV sistemin maksimum güç noktasında çalışması sağlanır.

Sistemde güç değişimini değerlendirmek için 4.1'deki denklem esas alınmıştır. 4.1'de verilen güç değişim oranına bakılarak sistemde ani bir güç değişimi olup olmadığı tespit edilir. Ani güç değişimleri iki ana sebepten kaynaklanabilir. Bunlar ani ışıyım değişikliği ve kısmi gölgelenme durumudur.

$$\frac{\Delta P}{P} = \frac{P(k) - P(k-1)}{P(k-1)} > 0.1 \quad (4.1)$$

Bu çalışmada güç değişim oranının ($\Delta P/P$) eşik değeri 0.1 kabul edilmiştir. Bir saniyelik periyotlarla güç değişim oranı kontrol edilir. Eğer güç değişim oranı eşik değerini aşıyorsa, sistemde ani bir güç değişimi olduğu kabul edilir. Bu güç değişiminin kısmi gölgelenmeden mi yoksa ani ışıyım değişikliğinden mi kaynaklandığını ayırt edebilmek için de ek bir mekanizmaya ihtiyaç vardır. Burada kısmi gölgelenme tespit metodu devreye girer.

4.2. Kısmi Gölgeleme Tespit Metodu

Genellikle fotovoltaik dizinin çıkış gücünde büyük bir değişiklik (ΔP) meydana geldiğinde gölgelenme durumunun tespit edildiği varsayılır ve buna göre MGN taraması yapılır. Ancak, bu varsayımda güç değişiminin kısmi gölgelenmeden mi yoksa ani ışıma değişiminden mi kaynaklandığı belirsizdir. Bu nedenle, bu çalışmada, ani ışıma değişimi ve kısmi gölgelenme durumlarını birbirinden ayırt edecek bir yapı kullanılmıştır.

Bu çalışmada, referans alınan orijinal versiyon ve geliştirilen modifikasyon, iki ayrı alt başlık altında ayrıntılı olarak açıklanmaktadır.

4.2.1. Orijinal Kısmi Gölgeleme Tespit Metodu

FV sistemlerde panel akımı (I_{fv}) ile ışıyım arasındaki ilişki denklem 4.2'deki gibi ifade edilir.

$$I_{fv} = \frac{G}{G_{stc}} \times (I_{fv_stc} + K_I \times \Delta T) \quad (4.2)$$

Burada:

I_{fv} : Panelden geçen akım,

G : Işınım seviyesi,

G_{stc} : Standart test koşullarında ışınlm (1000 W/m²)

ΔT : Panel sıcaklığındaki değişim (Kelvin cinsinden),

K_I : Kısa devre akımının sıcaklık katsayısı,

I_{fv_stc} : Standart test koşullarında FV panel akımıdır.

Sıcaklık değişimlerinin ihmal edilmesi durumunda, 4.3 denklemi elde edilir:

$$G = \frac{I_{fv}}{I_{fv_stc}} G_{stc} \quad (4.3)$$

Denklem 4.3 ışınlm seviyesinin yaklaşık olarak hesaplanabilmesini sağlar. FV sistemin standart test koşulları altındaki akım değeri ile o anki ölçülen akım değeri bilindiğinde ışınlm seviyesi tahmin edilebilir. Panel kataloglarından standart test koşullarındaki I_{sc_stc} ve I_{mgn_stc} değerlerine erişilebilir.

Düzgün ışınlm altında, I_{sc} , tek bir modülün açık devre geriliminin %80'ine ($0.8V_{oc}$) karşılık gelen akıma; I_{mgn} , FV dizi açık devre geriliminin %80'ine ($0.8V_{oc_dizi}$) karşılık gelen akıma yakın bir değerdir. Burada V_{oc} , tek bir modülün açık devre gerilimini, V_{oc_dizi} ise tüm dizinin açık devre gerilimini ifade eder. I_{sc} ve I_{mgn} akımlarını ölçmek için Sistem, $0.8V_{oc}$, $0.8V_{oc_dizi}$ gerilim değerlerinde çalıştırılır. Sistemden I_{sc} ve I_{mgn} akımları ölçülerek, bu akımların oranları kullanılarak ışınlm seviyeleri elde edilebilir:

$$G_{sc} = \frac{I_{sc}}{I_{sc_stc}} G_{stc} = \frac{I_{0.8V_{oc}}}{I_{sc_stc}} G_{stc} \quad (4.4)$$

$$G_{mgn} = \frac{I_{mgn}}{I_{mgn_stc}} G_{stc} = \frac{I_{0.8V_{oc_dizi}}}{I_{mgn_stc}} G_{stc} \quad (4.5)$$

Düzenli ışınım altında, maksimum güç noktası akımının (I_{mgn}) genellikle kısa devre akımının (I_{sc}) yaklaşık %90'ı olduğu göz önünde bulundurarak, 4.4 ve 4.5 yaklaşık olarak 4.6 şeklinde ifade edilebilir:

$$G \approx \frac{I_{sc}}{I_{sc_stc}} G_{stc} \approx \frac{I_{mgn}}{I_{mgn_stc}} G_{stc} \quad (4.6)$$

$$G_{sc} \approx G_{mgn} \quad (4.7)$$

Denklem 4.7'den görülmektedir ki, G_{sc} ve G_{mgn} ışınımları yaklaşık olarak aynı değerde olmakla birlikte, akım ve gerilim ölçümlerindeki küçük hatalar, I_{mgn} 'nin I_{sc} 'nin %90'ına eşit olduğu varsayımına dayandırılan yaklaşık bir oran kullanılması, bu iki G_{sc} ve G_{mgn} ışınım değeri arasında kaçınılmaz olarak bir fark (uyumsuzluk) oluşturacaktır.

[36]'daki çalışmada düzenli ışınım altında çeşitli monokristal ve polikristal paneller üzerinde yapılan testler sonucu ışınım farkının ($G_{sc}-G_{mgn}$) 40 W/m^2 'i aşmadığı tespit edilmiş ve aşağıda açıklanan şekilde bir yöntem sunulmuştur.

Sistem, $0.8V_{oc_dizi}$ ve $0.8V_{oc}$ olmak üzere iki spesifik gerilim seviyesini tarar. Bu gerilimlerde sırasıyla $I_{0.8V_{oc_dizi}}$ ve $I_{0.8V_{oc}}$ akım değerlerini ölçer. Daha sonra, 4.4 ve 4.5 denklemleri kullanılarak G_{mgn} ve G_{sc} değerleri hesaplanır. Son olarak, G_{mgn} ve G_{sc} arasındaki uyumsuzluk (mutlak fark) hesaplanır. Eğer bu fark 40 W/m^2 'den büyükse, sistem kısmi gölgelenme durumunun mevcut olduğuna karar vererek kısmi gölgelenme metodunu devreye alır. Aksi takdirde, sistemde kısmi gölgelenme olmadığı ve yalnızca ani ışınım değişimi yaşandığı varsayılır ve sistem, maksimum güç noktasını izleme işlemine geri döner.

Büyük FV dizilerde, MGNİ algoritması sırasında $0.8V_{oc_dizi}$ 'den $0.8V_{oc}$ seviyesine geçiş yaparken, PI kontrolcü istenen gerilim seviyesine atlamada güçlük yaşayabilir. Mevcut yöntemde bu sorunun önüne geçmek için, bu iki gerilim noktası arasına ek tarama noktası konulabilmektedir.

Bu çalışmada ise mevcut gölgelenme tespit metoduna ek bir yapı eklenerek, tasarlanan yeni GMGNİ algoritmasına uygun biçimde optimize edilmiştir. Eklenen yapı ile, sistemin $0.8V_{oc}$ gerilim noktasında çalıştırılmadan kısmi gölgelenme tespiti yapılabilirse, bu tespit önceden gerçekleştirilir ve kısmi gölgelenme durumu

doğrulandığında, sistemin tarama sürecini optimize edecek şekilde başlangıç tarama noktası belirlenir. Bu durumda, sistem $0.8V_{oc}$ geriliminde doğrudan tarama yapmaktan kaçınarak tarama süresini kısaltır ve gereksiz güç kayıplarını önler.

4.2.2. Modifiye Edilmiş Kısmi Gölgeleme Tespit Metodu

Şekil 4.2’de modifiye edilmiş kısmi gölgeleme tespit metodunun akış şeması verilmiştir. Bu çalışmada, maksimum güç noktası, FV panelinin açık devre geriliminin 0.8 katı olarak değil, kullanıcı tarafından sağlanan panel özelliklerine dayalı olarak V_{mgn_stc}/V_{oc_stc} oranı şeklinde belirlenen bir katsayı üzerinden tanımlanmış ve bu katsayı α (alfa) olarak adlandırılmıştır. β ise standart test koşullarındaki MGN akımının kısa devre akımına oranıdır.

Bu çalışmada N seri bağlı panel sayısını, t_{min} taranacak aralığın alt sınırını, t_{ara} taranacak aralığın içinde belirlenen bir değeri, t_{mak} ise taranacak aralığın üst sınırını ifade eder.

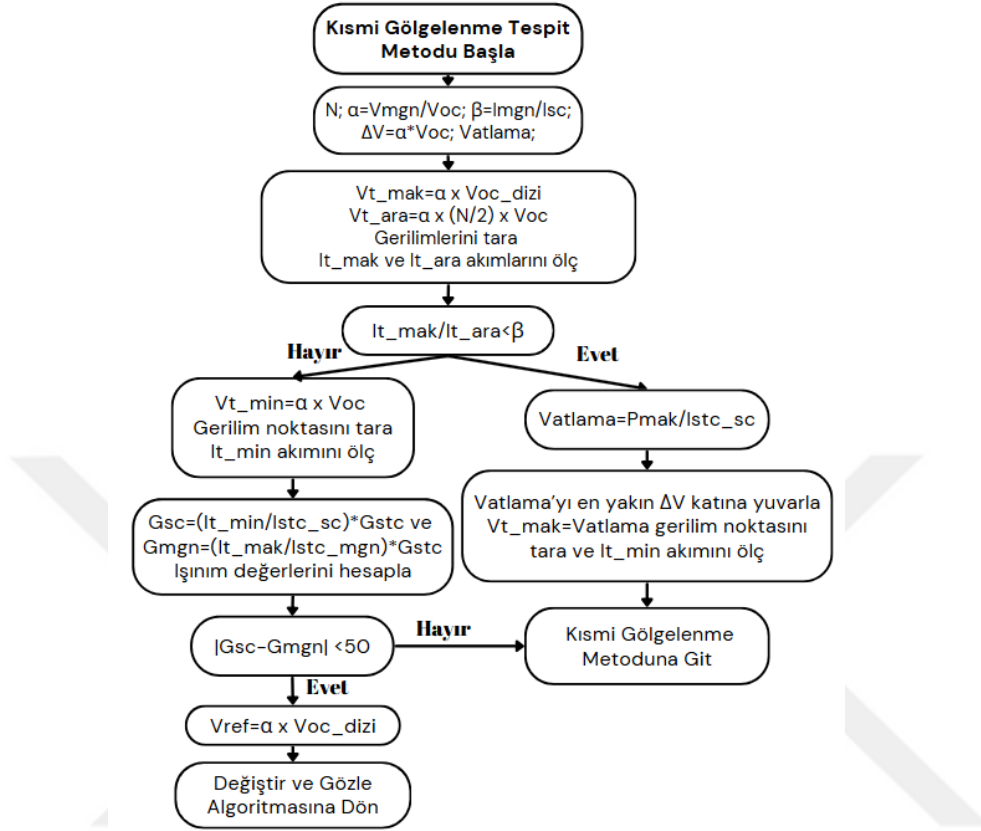
FV dizi $V_{t_mak} = \alpha \times V_{oc_dizi}$ ve $V_{t_ara} = (N/2) \times \alpha \times V_{oc}$ (Eğer N tek sayı ise, (N/2) yerine ((N+1)/2) kullanılır) gerilim seviyelerinde çalıştırılır ve bu seviyelerde sırasıyla I_{t_mak} ve I_{t_ara} akımları ölçülür. Bu iki noktadaki güç değerleri hesaplanır, maksimum güç değeri P_{mak} ’a atanır ve I_{t_mak}/I_{t_ara} oranı analiz edilir.

Eğer $I_{t_mak}/I_{t_ara} < \beta$ şartı sağlanıyorsa, bu durum akımlar arasında bir basamak farkı olduğunu ve kısmi gölgelemenin mevcut olduğunu gösterir. Bu aşamada, kısmi gölgeleme tespit edilir ve başlangıç gerilim sınırı V_{t_min} , $V_{atlama} = P_{mak} / I_{sc_stc}$ formülü kullanılarak hesaplanır. Hesaplanan V_{atlama} değeri, en yakın ΔV ($\alpha \times V_{oc}$) gerilim katsayısına yuvarlanarak V_{t_min} değeri elde edilir. Bu V_{t_min} gerilimi, kısmi gölgeleme algoritmasında taranacak gerilim sınırının başlangıç noktası olarak kullanılır ve bu gerilim seviyesi taranarak I_{t_min} akımı ölçülür.

V_{t_min} geriliminin bu şekilde belirlenmesinin temel avantajı, sistemin normalde tarama yapması gereken bazı gerilim noktalarını atlayarak, tarama süresini kısaltmasıdır. V_{atlama} geriliminin altında kalan tarama noktaları sistem tarafından atlanır; böylece gereksiz taramalar önlenerek tarama süresi önemli ölçüde azaltılır. Bu yaklaşım, özellikle büyük dizilerde zaman kazandırarak sistemin verimliliğini artırır.

Eğer $I_{t_mak}/I_{t_ara} < \beta$ şartı sağlanmıyorsa, bu durumda akımlar aynı akım basamağındadır ve sistem $V_{t_min} = \alpha \times V_{oc}$ gerilimini tarayarak I_{t_min} akımını ölçer.

Bu ölçümler sonucunda G_{sc} ve G_{mgn} ışıınım değeri hesaplanır ve aralarındaki fark analiz edilir.



Şekil 4.2. Kısmi Gölgeleme Tespit Metotunun akış şeması

Sistem bu ışıınım uyumsuzluklarına dayanarak, aşağıdaki denklemlerle durumu değerlendirir:

$$G_{sc} = \frac{I_{t_min}}{I_{sc_stc}} G_{stc} \quad (4.8)$$

$$G_{mgn} = \frac{I_{t_mak}}{I_{mgn_stc}} G_{stc} \quad (4.9)$$

Burada G_{sc} ve G_{mgn} , sırasıyla kısa devre ve maksimum güç noktası akımları üzerinden elde edilen ışıınım değeri. Işıınım uyumsuzluğu ($G_{sc}-G_{mgn}$) 50 W/m² eşik değeri altında kaldığında, algoritma bu durumu düzenli ışıınım olarak kabul eder ve sistemi $V_{ref} = \alpha \cdot V_{oc_dizi}$ gerilim seviyesinde çalıştırarak D&G metoduna geri döndürür. Eşik değeri aşılması durumunda ise kısmi gölgeleme tespit edilmiş olur ve algoritma kısmi gölgeleme metoduna geçiş yapar.

Bu çalışmada, hata payı da göz önünde bulundurularak $G_{sc}-G_{mgn}$ ' nin eşik değeri 50 W/m^2 seçilmiştir.

$$G_{sc} - G_{mgn} < 50 \text{ Uniform (düzenli) ışınım durumu} \quad (4.10)$$

$$G_{sc} - G_{mgn} > 50 \text{ Kısmi Gölgeleme durumu geçerli olur.} \quad (4.11)$$

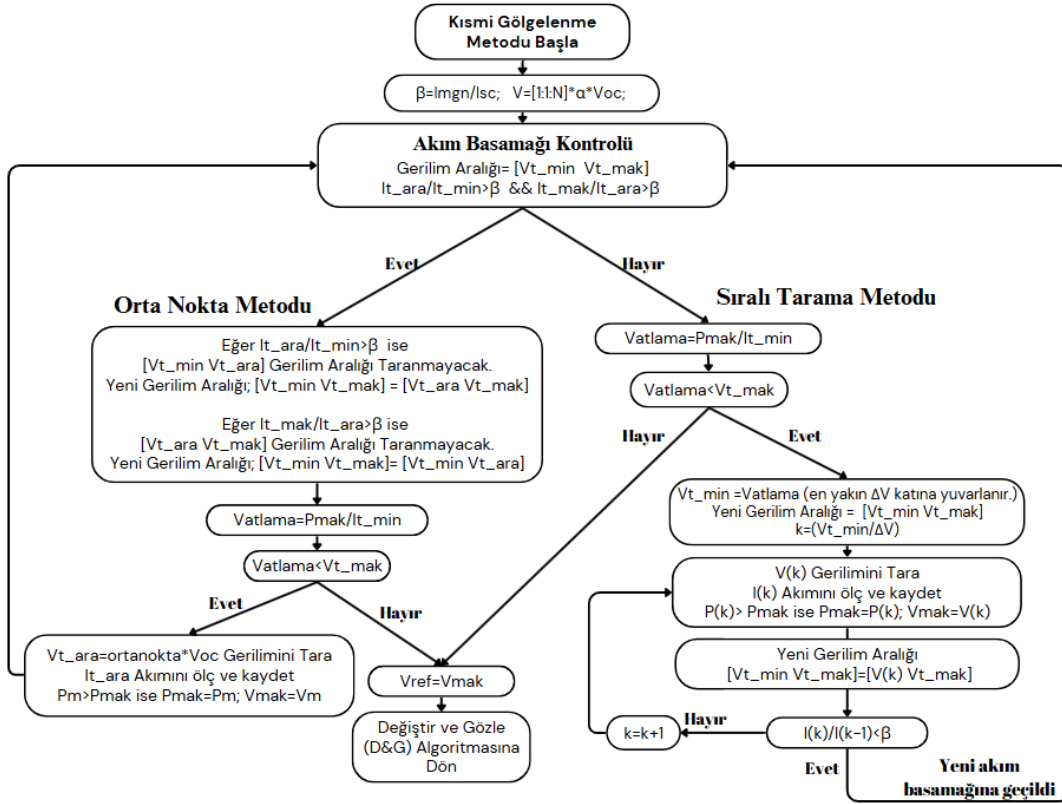
4.3. Önerilen Yeni Global MGNİ Algoritması

Bu çalışmada kısmi gölgeleme durumları için tasarlanan MGNİ algoritması, temel olarak $0.8V_{oc}$ metodundan esinlenmiştir. Bölüm 3.2'de detaylı biçimde açıklanan mevcut yöntemler, özellikle az sayıda seri bağlı FV sistemlerde etkili olsa da, sistemdeki seri bağlı panel sayısı arttıkça global maksimum güç noktasını bulma süreleri belirgin bir şekilde uzamaktadır. Bu durum büyük FV dizilerde verimliliği olumsuz yönde etkileyerek, izleme süresinde gecikmelere neden olmaktadır.

Bu bağlamda, tasarlanan yeni MGNİ algoritması, yapısıyla bu dezavantajı gidermeyi amaçlamaktadır. Önerilen algoritma, global maksimum güç noktası tespit sürecini hızlandırmak için orta nokta ve sıralı tarama yöntemlerini bir arada kullanmakta ve bu yöntemler arasından en uygun olanı seçerek sistem performansını optimize etmektedir. Böylece, tarama süresi ve işlem yükü azaltılarak, kısmi gölgeleme durumlarında dahi MGN'nin daha hızlı bir şekilde bulunması sağlanmakta; böylelikle büyük FV sistemlerinde verimlilik artırılmaktadır.

Bir önceki bölümde kısmi gölgeleme tespiti için V_{t_min} , V_{t_ara} ve V_{t_mak} gerilim noktaları taranmış ve ilgili akım değerleri tespit edilmişti. Şekil 4.3'te Kısmi Gölgeleme Algoritmasının akış şeması verilmiştir.

Akış şeması incelendiğinde I_{t_ara} / I_{t_min} veya I_{t_mak} / I_{t_ara} akım oranları β kriteri ile kıyaslanmakta ve buna göre uygulanacak uygun metod belirlenmektedir. Eğer akım oranlarından biri β değerinden büyükse "Orta Nokta Metodu", her iki oran da β değerinden küçükse "Sıralı Tarama Metodu" kullanılmaktadır.



Şekil 4.3. Kısmi gölgeleme metodu akış şeması

4.3.1. Orta nokta metodu

Bu metotta, akım oranından biri (I_{t_ara} / I_{t_min} veya I_{t_mak} / I_{t_ara}) $> \beta$ olduğunda, β 'dan büyük olan kısmın aynı akım seviyesinde olduğu, diğer kısımda akım seviyesi farkı olduğu belirlenir. Akımların aynı seviyede olduğu belirlenen gerilim aralığı taranmaz ve yeni gerilim aralığı sınırları V_{t_min} ve V_{t_mak} 'a, yeni akım aralığı sınırları I_{t_min} ve I_{t_mak} atanır. Her tarama sonrasında gerilim ve akım değerleri çarpılıp güç değeri hesaplanır. Elde edilen güç, önceki P_{mak} değerinden büyükse güncellenir ve maksimum gücün gerçekleştiği gerilim V_{mak} olarak belirlenir.

Yeni gerilim aralığı belirlendikten sonra, atlama gerilimi V_{atlama} şu ana kadar tespit edilen maksimum güç P_{mak} 'ın, I_{t_min} akımına bölünmesi ile hesaplanır. Bu tarama bölgesinde akım I_{t_min} 'in değişmediği (akım basamağı oluşmadığı) varsayılır.

V_{atlama} değerine kadar, şu ana kadar elde olan maksimum güce ulaşamayacağı için V_{atlama} gerilim değeri öncesinde tarama yapmak gereksizdir. Hesaplanan V_{atlama} değeri gerilim tarama sınırının üst değeri V_{t_mak} ile kıyaslanır ve V_{t_mak} 'tan büyükse V_{mak} V_{ref} 'e atanıp D&G metoduna döndürülür. V_{atlama} V_{t_mak} 'tan küçük ise hesaplanan

V_{atlama} değeri, en yakın $\Delta V (\alpha \times V_{oc})$ gerilim katına yuvarlanarak V_{t_min} değeri elde edilir ve taranacak gerilim aralığı güncellenir.

Ardından gerilim tarama sınırının orta noktası tespit edilir ve taranır; V_{t_ara} , I_{t_ara} gerilim ve akım değerleri kaydedilir, V_{t_ara} gerilimi tarama bölgesinin yeni orta noktasıdır. Şuan da taranacak bölge $V_{t_min} - V_{t_ara}$ ve $V_{t_ara} - V_{t_mak}$ olarak iki bölgeye ayrılabilir. Bu aşamadan sonra algoritma akım basamağı kontrol aşamasına geri döner.

4.3.2. Sıralı tarama metodu

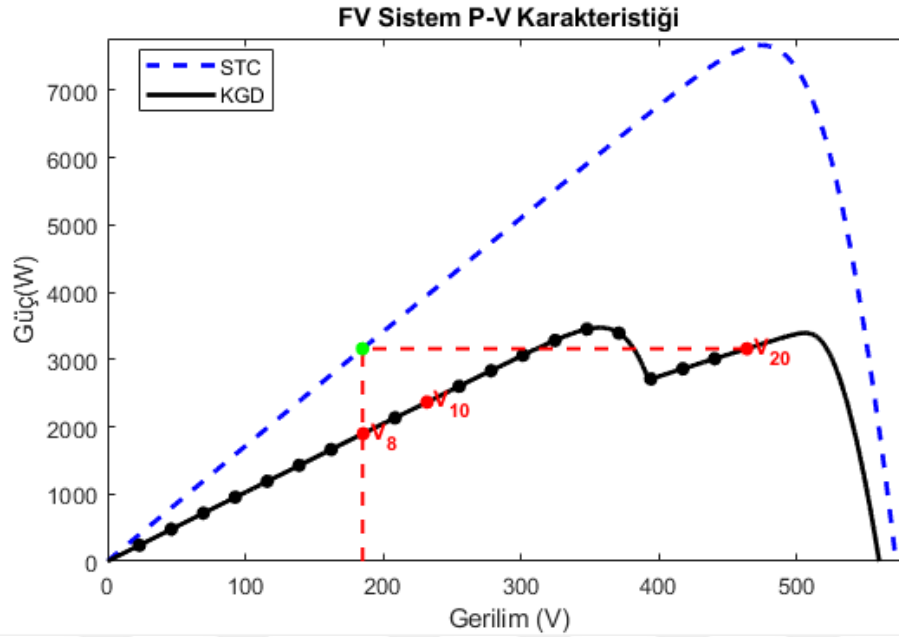
I_{t_ara} / I_{t_min} veya I_{t_mak} / I_{t_ara} akım oranlarının her ikisinin de β değerinden küçük olması durumunda Sıralı Tarama Metodu uygulanır. Bir önceki bölümde de açıklanmış olan V_{atlama} sınır tespiti yapılır. $V_{atlama} = P_{mak} / I_{t_min}$ hesaplanır. Hesaplanan V_{atlama} değeri gerilim tarama sınırının üst değeri V_{t_mak} ile kıyaslanır ve V_{t_mak} 'tan büyükse $V_{ref} = V_{mak}$ 'a atanır ve değiştir ve gözle metoduna dönülür. V_{atlama} V_{t_mak} 'tan küçük ise $V_{t_min} = V_{atlama}$ değeri olarak güncellenip taranacak gerilim aralığı güncellenir. $k = V_{t_min} / \Delta V$ olmak üzere V_k gerilimi taranır ve I_k akımı kaydedilir; P_k P_{mak} 'tan büyükse P_{mak} , V_{mak} değeri güncellenir.

Bu aşamadan sonra taranan akım ve bir önceki tarama noktasındaki akımın oranına bakılır. I_k / I_{k-1} β değerinden büyükse I_{k-1} ve I_k aynı akım basamağındadır, k değeri bir artırılır, yeni V_k gerilimi taranır. Bu işlem yeni akım basamağına geçilene kadar devam edilir. Eğer I_k / I_{k-1} , β değerinden küçük ise yeni bir akım basamağına geçilmiştir ve algoritma akım basamağı kontrol aşamasına geri döner. Akımların birbiri ile oranlarına göre sıralı veya orta nokta metodu takip edilir. Taranacak nokta bittiğinde veya V_{atlama} gerilimi sınır gerilimini aştığında algoritma sonlanır.

4.4. Önerilen Hibrit MGNİ Algoritmasının Farklı Kısmi Gölgeleme Durumlarında Çalışması

Önerilen Hibrit MGNİ algoritmasının çalışma prensibi ve sağladığı avantajlar, 20 seri bağlı bir FV dizi üzerinde üç farklı kısmi gölgeleme senaryosu üzerinden açıklanmaktadır.

4.4.1. Senaryo 1: Modifiye KGTM'nin Vatlama Gerilimi ile Sağladığı Avantaj



Şekil 4.4. Modifiye KGTM ile Vatlama Avantajının P-V Karakteristiğinde Gösterimi

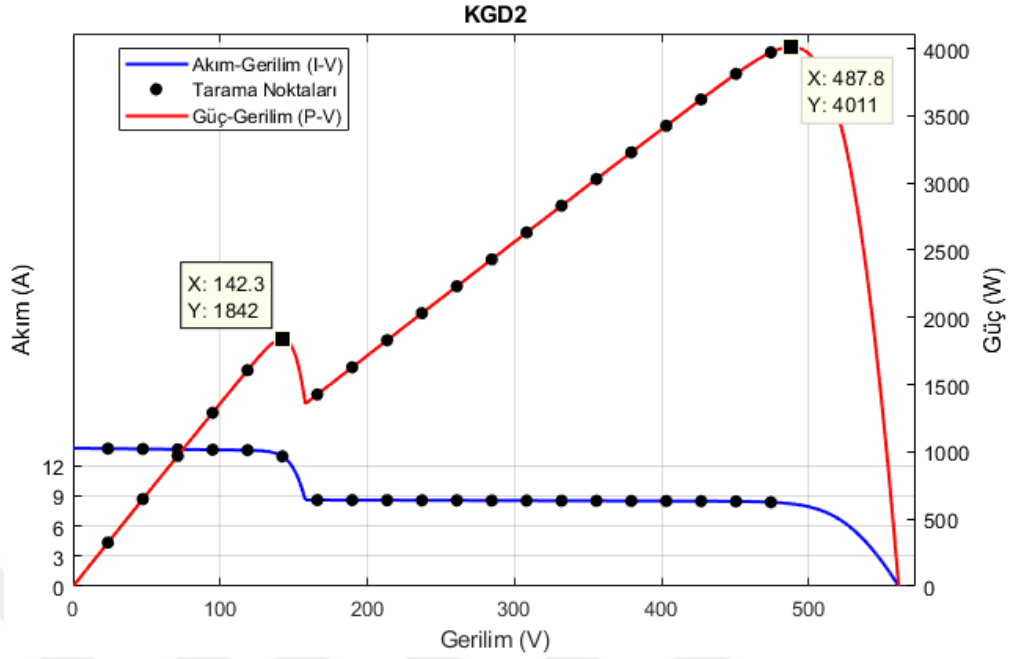
Şekil 4.4'te, 15 panele 600 W/m^2 ve 5 panele 400 W/m^2 ışınlam düşmesiyle oluşan kısmi gölgelenme durumu siyah renkle, STC altındaki ideal güç eğrisi kesikli mavi ile gösterilmektedir.

Sistemin ilk aşamasında, tarama noktaları olarak V_{t_mak} (V_{20}) ve V_{t_ara} (V_{10}) gerilim seviyeleri taranmış ve bu gerilimlerde sırasıyla I_{t_mak} (I_{20}) ve I_{t_ara} (I_{10}) akımları ölçülmüş, ilgili güç değerleri hesaplanmıştır. Elde edilen güç değerleri karşılaştırıldığında, en yüksek güç değeri P_{mak} (P_{20}) olarak atanmıştır.

STC altındaki güç eğrisinde P_{mak} değerine karşılık gelen nokta yeşil ile işaretlenmiştir, bu noktadaki gerilim değeri V_{atlama} 'a denk gelmektedir. V_{atlama} değerine en yakın gerilim adımı olan V_8 , V_{t_min} olarak tanımlanmıştır. Bu durumda, sistem V_8 geriliminden daha düşük seviyelerde tarama yapmak zorunda kalmamış, bu da gereksiz tarama noktalarını ortadan kaldırmıştır.

Standart yöntemle çalışılan bir sistemde, $V_{t_min} = \alpha \times V_{OC}$ gerilim seviyesi gibi daha düşük bir gerilimde tarama yapılması gerekirdi. Ancak, modifiye edilmiş KGTM sayesinde V_{atlama} kullanılarak gereksiz tarama noktaları atlanmış, düşük gerilimlerdeki taramalardan kaçınılarak güç kaybı minimize edilmiş, gereksiz taramalardan doğan gecikmelerin önlenmesi, sistemin daha hızlı ve verimli çalışması sağlanmıştır.

4.4.2. Senaryo 2: KGD'de Hibrit MGNİ algoritmasının çalışması



Şekil 4.5 KGD: 6 panel 800 W/m², 14 panel 500 W/m² için akım-gerilim (I-V) ve güç-gerilim (P-V) karakteristik eğrileri.

Bu durumda, sistem 800 W/m² ışınlıma maruz kalırken, 14 panel üzerinde gölgelenme meydana gelmiş ve bu panellerin üzerine düşen ışınlım 500 W/m² olmuştur.

Adım 1: Sistem değiştir ve gözle algoritmasında çalışırken güç değişim oranı ($\Delta P/P$) eşliğinin aşıldığı tespit edilir ve KGTM devreye girer.

Adım 2: KGTM devredeyken, gerilim tarama noktaları belirlenir:

$$V_{t_mak}=V_{20}=20 \times \alpha \times V_{oc} \text{ (Maksimum gerilim noktası)}$$

$$V_{t_ara}=V_{10}=10 \times \alpha \times V_{oc} \text{ (Ara gerilim noktası)}$$

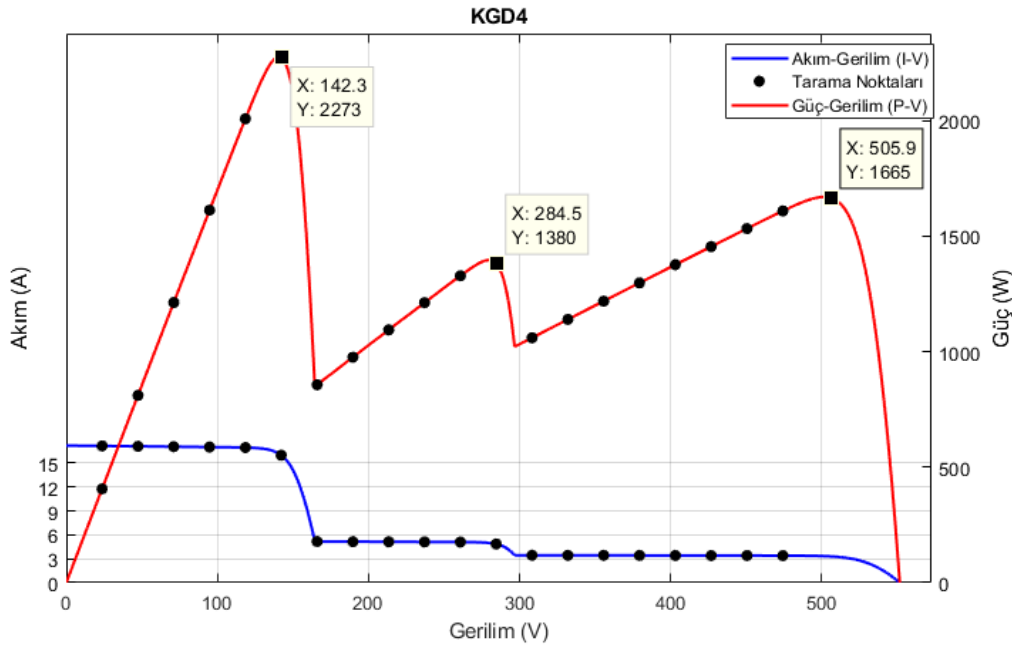
Bu noktalar taranarak, akım oranı değerlendirilir ($I_{20}/I_{10} > \beta$). Sonuç olarak, taranan noktalar arasında basamak farkı olmadığı tespit edilir. Bunun ardından minimum gerilim noktası $V_{t_min}=V_1 = \alpha \times V_{oc}$ taranır ve kısmi gölgelenme metoduna geçilir.

Adım 3: Kısmi gölgelenme metodunda Akım Basamağı kontrolü yapılır. I_{10} ve I_{20} aynı akım basamağında bulunurken, I_1 akımı farklı bir akım basamağında yer alır ($I_{20}/I_{10} > \beta$ ve $I_{10}/I_1 < \beta$). Bu durumda, "Orta Nokta Metodu" seçilir. Yeni maksimum gerilim sınırı V_{t_ara} olarak güncellenir ($[V_{t_min} \ V_{t_mak}] = [V_{t_min} \ V_{t_ara}] = [V_1 \ V_{10}]$).

Daha sonra V_{atlama} kriteri uygulanır. Hesaplanan V_{atlama} değeri, gerilim tarama sınırının üst değeri olan $V_{t_{mak}}$ 'tan (V_{10}) büyük olduğu için, maksimum gücü veren gerilim değeri V_{mak} , V_{ref} 'e atanır. Bu noktada, KG metodu sonlanır ve algoritma "Değiştir ve Gözle" metoduna geri döner.

Bu senaryo kapsamında, yalnızca 3 örnekleme ile maksimum güç noktası hızlı ve etkin bir şekilde bulunur. (Simulasyon sonuçları için Bölüm 5.2.3'e bakınız.)

4.4.3. Senaryo 3: KGD'de Hibrit MGNİ algoritmasının çalışması



Şekil 4.6. KGD: 6 panel 1000 W/m², 5 panel 300 W/m², 9 panel 200 W/m² için akım-gerilim (I-V) ve güç-gerilim (P-V) karakteristik eğrileri.

Adım 1: Sistem değiştir ve gözle algoritmasında çalışırken güç değişim oranı ($\Delta P/P$) eşliğinin aşıldığı tespit edilir ve KGTM devreye girer.

Adım 2: KGTM devredeyken, gerilim tarama noktaları belirlenir: $V_{t_{mak}}=V_{20}$, $V_{t_{ara}}=V_{10}$. Bu noktalar taranarak, akım oranı değerlendirilir. Sonuç olarak, taranan noktaların farklı akım basamağında olduğu tespit edilir ($I_{20}/I_{10} < \beta$). Bunun ardından $V_{atlama}=P_{20}/I_{stc}$ denklemiyle belirlenen minimum gerilim noktası $V_{t_{min}}=V_4=4 \times \alpha \times V_{oc}$ taranır ve kısmi gölgelenme metoduna geçilir.

Adım 3: Kısmi gölgelenme metodunda "Akım Basamağı Kontrolü" yapılır. I_4 , I_{10} ve I_{20} akım noktaları farklı akım basamağında yer alır. Bu durumda, "Sıralı Tarama Metodu" seçilir. V_5 gerilimi taranır ve I_5 akımı kaydedilir; P_5 mevcut P_{mak} 'tan

büyüktür ve P_{mak} , V_{mak} değeri güncellenir. Yeni gerilim sınırı $[V_{t_min} V_{t_mak}] = [V_5 V_{20}]$ olarak güncellenir.

Adım 4: $I_5/I_4 > \beta$ olması I_4 ve I_5 aynı akım basamağında olduğunu gösterir. Tarama noktası bir artırılır. V_6 gerilimi taranır ve I_6 akımı kaydedilir. P_6 mevcut P_{mak} 'tan büyüktür ve P_{mak} , V_{mak} değeri güncellenir. Yeni gerilim sınırı $[V_{t_min} V_{t_mak}] = [V_6 V_{20}]$ olarak güncellenir.

Adım 5: $I_6/I_5 > \beta$ olması I_5 ve I_6 aynı akım basamağında olduğunu gösterir. Tarama noktası bir artırılır, V_7 gerilimi taranır ve I_7 akımı kaydedilir. Yeni gerilim sınırı $[V_{t_min} V_{t_mak}] = [V_7 V_{20}]$ olarak güncellenir.

Adım 6: $I_7/I_6 < \beta$ yeni akım basamağına geçildiğini gösterir. "Akım Basamağı Kontrolü" noktasına gidilir. I_7 ve I_{10} aynı akım basamağında bulunurken, I_{20} akımı farklı bir akım basamağında yer alır. Bu durumda, "Orta Nokta Metodu" seçilir. Yeni minimum gerilim sınırı V_{t_ara} olarak güncellenir ($[V_{t_min} V_{t_mak}] = [V_{t_ara} V_{t_mak}] = [V_{10} V_{20}]$). Daha sonra V_{atlama} kriteri uygulanır. Hesaplanan V_{atlama} değeri, V_{t_mak} 'tan (V_{20}) küçüktür ve bir sonraki aşamaya geçilir.

Adım 7: Ara nokta gerilimi V_{t_ara} (V_{15}) taranır, I_{t_ara} akımı ölçülür. Akım Basamağı kontrolü noktasına gidilir. I_{15} ve I_{20} aynı akım basamağında bulunurken, I_{10} akımı farklı bir akım basamağında yer alır. Yeni maksimum gerilim sınırı V_{t_ara} olarak güncellenir ($[V_{t_min} V_{t_mak}] = [V_{t_min} V_{t_ara}] = [V_{10} V_{15}]$). V_{atlama} kriteri uygulanır. Hesaplanan V_{atlama} değeri, gerilim tarama sınırının üst değeri olan V_{t_mak} 'tan (V_{15}) büyük olduğu için, maksimum gücü veren gerilim değeri V_{mak} , V_{ref} 'e atanır. Bu noktada, KG metodu sonlanır ve algoritma "Değiştir ve Gözle" metoduna geri döner.

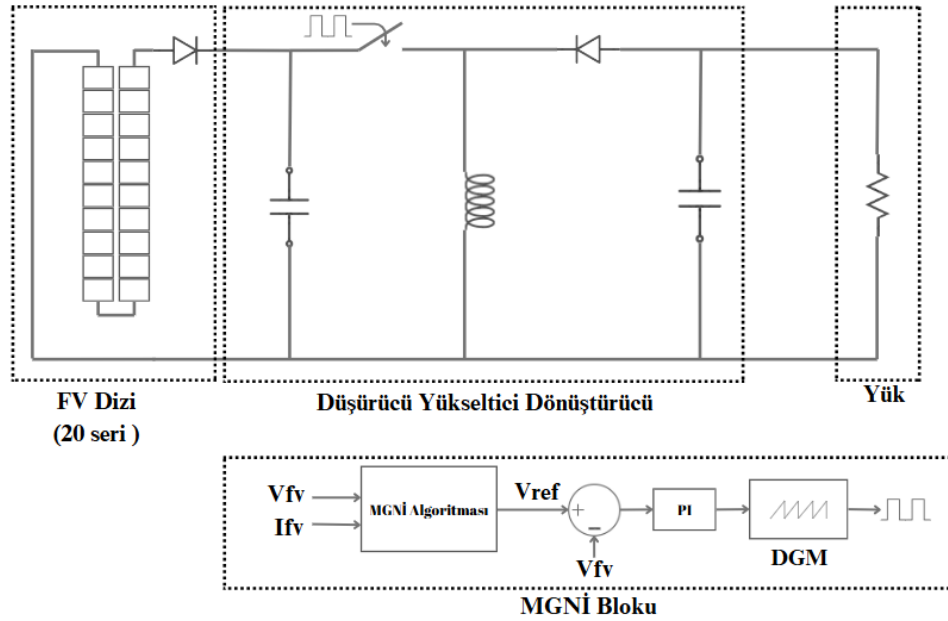
Bu senaryo kapsamında, 7 örnekleme ile maksimum güç noktası hızlı ve etkin bir şekilde bulunur. Sırasıyla tarama noktaları V_{20} , V_{10} , V_4 , V_5 , V_6 , V_7 ve V_{15} 'dir.



5. TASARIM VE BENZETİM ÇALIŞMALARI

5.1. Sistem Tasarımı

Bu bölümde önerilen Hibrit MGNİ algoritmasının uygulanacağı bir FV sistem tasarlanmıştır. Bu sistem FV dizi, DA-DA düşürücü yükseltici dönüştürücü, yük ve MGNİ algoritmasından oluşmaktadır. Benzetim çalışması MATLAB/SIMULINK programında gerçekleştirilmiştir. Hibrit MGNİ algoritmasının farklı atmosferik koşullardaki (gölgeleme, ani ışınım değişimi) performansı simüle edilmiş ve MGNİ takip yeteneği incelenmiştir. Ayrıca, önerilen Global MGNİ metodu; Artımsal İletkenlik ve Atlamalı Adaptif D&G metotları ile global MGNİ'ye ulaşabilme, izleme hızları ve verimlilik açısından performansları karşılaştırılmıştır. Şekil 5.1'de tasarlanan sistemin genel modeli verilmiştir.

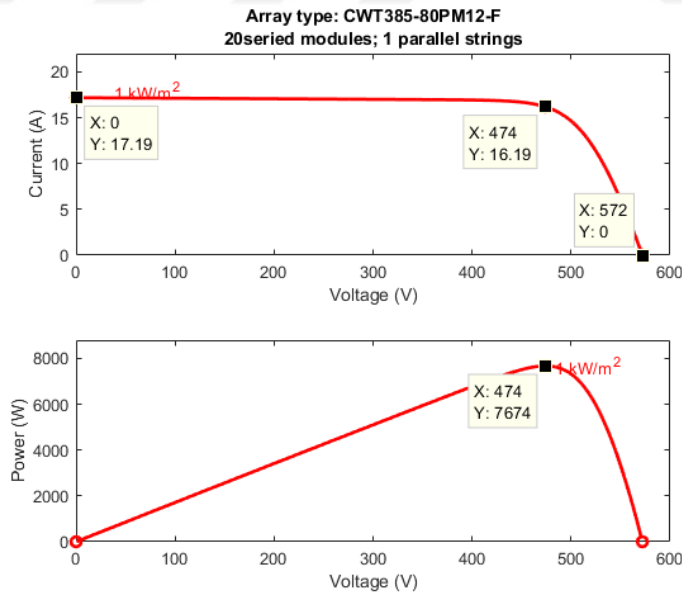


Şekil 5.1. Sistemin genel yapısı

Bu sistemde, FV diziden elde edilen gerilim (V_{fv}) ve akım (I_{fv}) değerleri ölçülür. Bu veriler, MGNİ algoritması tarafından işlenir ve sistem için bir referans gerilimi (V_{ref}) üretilir. Üretilen bu V_{ref} gerilimi, mevcut giriş gerilimiyle karşılaştırılarak, elde edilen fark PI denetleyicisine iletilir. PI denetleyicisi, bu farkı minimize etmek

amacıyla gerekli düzeltmeyi yapar ve çıkışında görev döngüsü (duty cycle) değeri belirlenir. PI denetleyicisinin çıkışı, testere dişi şeklindeki referans sinyaliyle karşılaştırılarak, darbe genişliği modülasyonu (DGM) sinyali üretilir. Bu DGM sinyali, dönüştürücünün çalışma oranını yani görev döngüsünü (D) kontrol etmek için kullanılır. Görev döngüsü değeri, düşürücü-yükseltici dönüştürücüyü, MGNİ algoritması tarafından belirlenen maksimum gücü elde etmesini sağlayacak uygun gerilim değerinde çalışmasını sağlar.

Bu çalışmada FV sistem için 385Wp'lik bir güneş paneli (CWT385-80PM12-F) tercih edilmiştir. Panelin kısa devre akımı 17.19A, açık devre gerilimi (V_{oc}) 28.6 V, maksimum güç noktası gerilimi (V_{MGN}) 23.7 V, akımı ise 16.19 A dir. Toplamda 20 adet güneş paneli seri olarak bağlanarak bir FV dizi oluşturulmuştur. Toplam açık devre gerilimi $V_{oc_dizi} = 28.6 \text{ V} \times 20 = 572\text{V}$ ve toplam kısa devre akımı $I_{sc_dizi} = 17.19\text{A}$ dir. Bu dizinin maksimum güç noktası gerilimi $V_{mgn_dizi} = 23.7 \text{ V} \times 20 = 474\text{V}$ ve akımı ise $I_{mgn_dizi} = 16.9\text{A}$ olarak belirlenmiştir. Dolayısıyla, STC altında sistemin maksimum güç noktasındaki gücü $P_{mgn} = 474\text{V} \times 16.19\text{A} = 7675 \text{ W}$ olarak hesaplanmaktadır. Şekil 5.2'deki akım - gerilim, güç - gerilim grafiklerinde dizinin V_{oc} , I_{sc} , V_{mgn} , I_{mgn} , P_{mgn} değerleri işaretlenmiş olarak gösterilmektedir.



Şekil 5.2. STC altında FV dizi akım - gerilim ve güç - gerilim eğrileri

Sistem için düşürücü - yükseltici (buck-boost) dönüştürücü kullanımı tercih edilmiştir. Bu dönüştürücünün tasarımında, sürekli indüktör akım modunda çalışması hedeflenmiş ve belirli tasarım kriterleri göz önünde bulundurulmuştur.

Dönüştürücünün anahtarlama frekansı $f_{sw}=50$ kHz, yük değeri 100Ω olarak belirlenmiştir. İndüktör akım dalgalanması (ΔI_L) maksimum akımın %20'si, kapasitör gerilim dalgalanması (ΔV_{out}) ise 1 V seçilmiştir.

Dönüştürücü tasarımı, sistemin farklı ısıtım seviyelerindeki (1000 W/m^2 , 200 W/m^2) davranışları dikkate alınarak yapılmıştır. Bu tasarım sürecinde, güç kayıplarının ihmal edildiği ve giriş gücünün çıkış gücüne yaklaşık eşit olduğu kabul edilmiştir. Bu kabul, güç korunumu prensibiyle 5.1'deki şekilde ifade edilmektedir:

$$P_{in} \approx P_{out} \quad (5.1)$$

Çıkış gücü, yük direnci (R_L) ve çıkış gerilimi (V_{out}) kullanılarak aşağıdaki denklemle hesaplanabilir:

$$P_{out} = \frac{(V_{out})^2}{R_L} \quad (5.2)$$

Bu denklemden V_{out} gerilimi ise şu şekilde ifade edilir:

$$V_{out} = \sqrt{P_{out} \times R_L} \quad (5.3)$$

Parametreler sistemin normal koşullarda maksimum güç noktasında çalışacağı varsayımıyla hesaplanmıştır. İlgili değerler Tablo 5.1'de verilmiştir.

Tablo 5.1. Düşürücü yükseltici dönüştürücü tasarımı.

	Isıtım 1000 W/m^2	Isıtım 200 W/m^2
V_{MGN}	474 V	468.8 V
I_{MGN}	16.19 A	3.25 A
P_{MGN}	7674 W	1524 W
V_{out}	$\sqrt{7674 \times 100} = 876 \text{ V}$	$\sqrt{1524 \times 100} = 390.38 \text{ V}$
$D = \frac{V_{out}}{V_{in} + V_{out}}$	$\frac{876}{474 + 876} = 0,648$	$\frac{390.38}{468.8 + 390.38} = 0,454$
$I_{Lmax} = \frac{V_o}{(1 - D) \times f_{sw}}$	$\frac{876}{(1 - 0.648) \times 50k} = 24.95 \text{ A}$	$\frac{390.38}{(1 - 0.454) \times 50k} = 7.15 \text{ A}$
$L = \frac{V_{in} \times D}{\Delta I_L \times f_{sw}}$	$\frac{474 \times 0.69}{(0.2 \times 24.95) \times 50k} = 1.2 \text{ mH}$	$\frac{390.38 \times 0.454}{(0.2 \times 7.15) \times 50k} = 3 \text{ mH}$
$C_o = \frac{V_{out} \times D}{R_L \times \Delta V_{out} \times f_{sw}}$	$\frac{876 \times 0,648}{100 \times (1) \times 50k} = 114 \mu\text{F}$	$\frac{354 \times 0,49}{100 \times (1) \times 50k} = 35.5 \mu\text{F}$

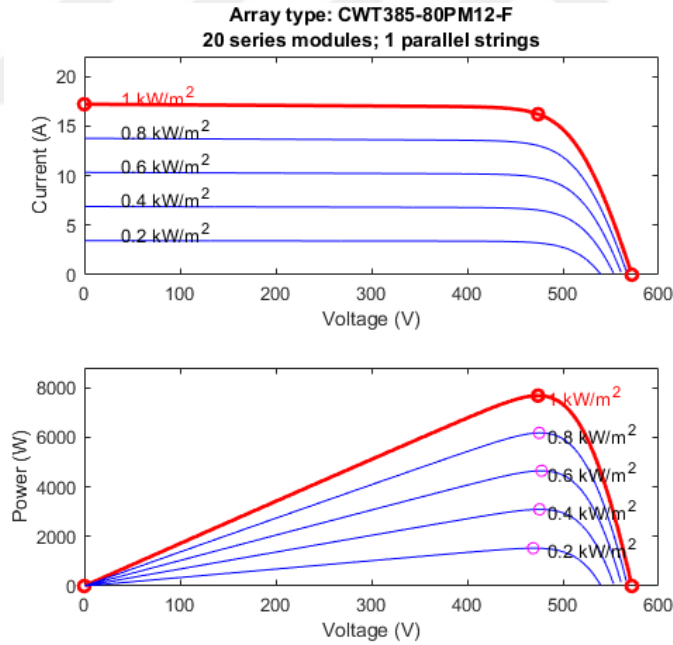
Düşürücü-yükseltici (buck-boost) dönüştürücülerde giriş kondansatörü (C_{in}) giriş gerilimindeki dalgalanmayı sınırlandırmak ve kararlı bir çalışma sağlamak için konulur. Giriş kondansatör, dönüştürücünün anahtarlama sürecinde, özellikle (1-D)T süresi boyunca, giriş gerilimini sabit tutmaya yardımcı olur.

Tasarımda sistem gereklilikleri göz önünde bulundurularak indüktör değeri 5mH, giriş ve çıkış kapasitör değerleri ise sırasıyla 220 μ F ve 120 μ F olarak seçilmiştir.

5.2. Simülasyon Çalışmaları

5.2.1. Düzgün ışınlm durumunda MGNİ'nin performansı

Bu bölümde, farklı düzgün ışınlm seviyelerinde FV sistemin MGNİ performansı değerlendirilmektedir. Simülasyon, FV sistemin sırasıyla 1000 W/m², 800 W/m², 600 W/m², 400 W/m² ve 200 W/m² ışınlm seviyelerinde çalıştırılmasıyla gerçekleştirilmiştir. Her bir ışınlm seviyesi 1 saniyelik periyotlarla uygulanmış ve MGNİ'nin maksimum güç noktasını (MGN) doğru bir şekilde takip etmesi amaçlanmıştır.



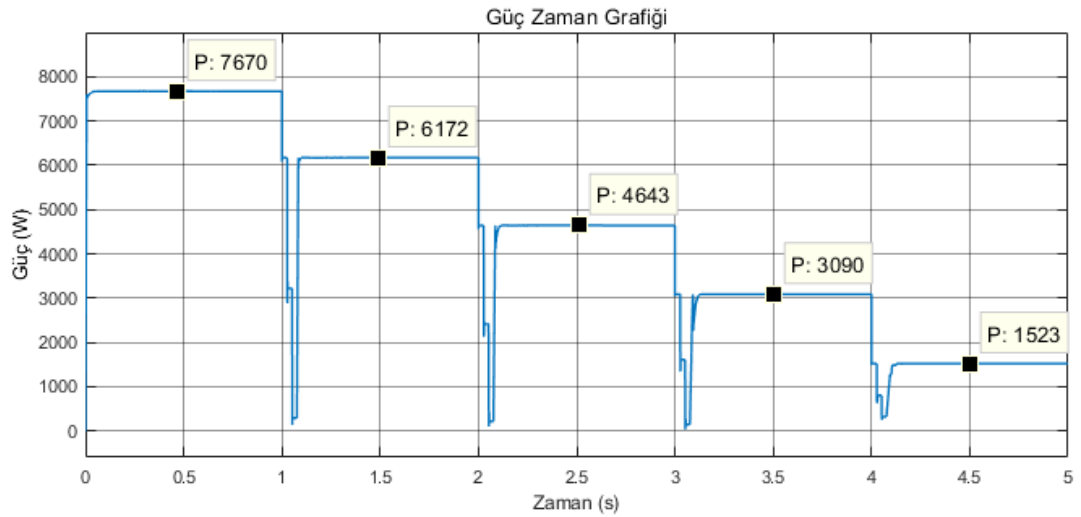
Şekil 5.3. Düzgün ışınlm seviyeleri altında FV sistemin akım-gerilim, güç gerilim karakteristik eğrileri

Şekil 5.3'te farklı ışınlm seviyeleri altında FV sistemin akım-gerilim, güç gerilim karakteristik eğrileri görülmektedir. Bu eğrilerdeki maksimum güç noktasına karşılık gelen gerilim, akım ve güç değerleri Tablo 5.2'de verilmiştir.

Tablo 5.2. Farklı ışınlm seviyeleri altında FV sistemin MGN'deki gerilim, akım ve güç değerleri.

İşınım (W/m^2)	Gerilim (V)	Akım (A)	Güç (W)
1000	474	16.19	7674
800	475.1	12.99	6173
600	477.7	9.72	4644
400	475.5	6.49	3090
200	468.8	3.25	1524

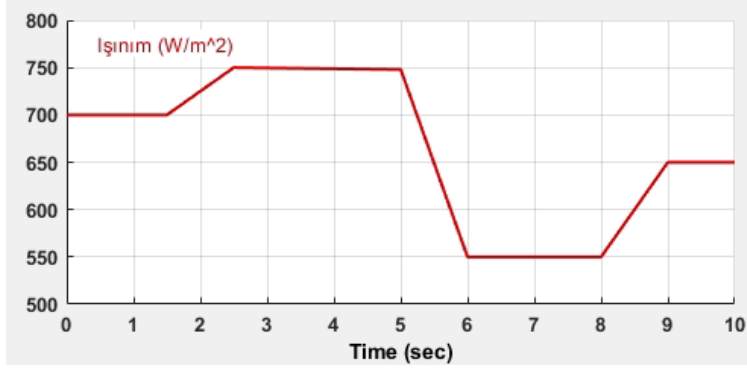
Şekil 5.4'te sunulan simülasyon sonuçlarına göre, her bir ışınlm seviyesi için elde edilen güç değerleri, Tablo 5.2'de gösterilen teorik maksimum güç değerleriyle uyumludur. Grafik incelendiğinde her bir ışınlm seviyesinde teorik değerlere yakın sonuçlar elde edildiğı gözlemlenmiştir. Bu sonuçlar, düzgün ışınlm koşullarında sistemin hızlı ve başarılı bir şekilde MGN'ye ulaşabildiğini göstermektedir.



Şekil 5.4. Farklı ışınlm seviyelerine maruz kalan sistemin güç - zaman grafiğı

5.2.2. Farklı ışınlm değişim hızlarında MGNİ'nin çalışması

Farklı ışınlm değişim hızlarını içeren bir zaman dilimi oluşturularak sistemin performansı incelenmiştir. Bu değişimler, ışınlm-zaman grafiğinde Şekil 5.5'te detaylı olarak gösterilmiştir.



Şekil 5.5. Farklı ışınlam hızlarında ışınlam-zaman grafiği

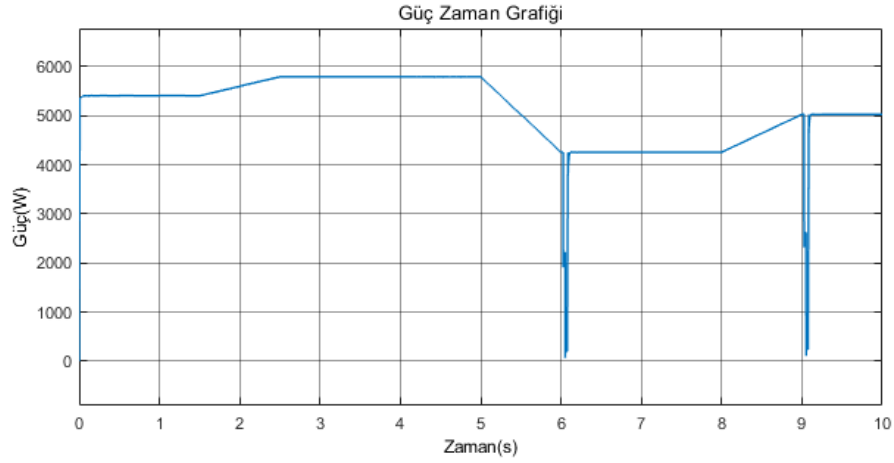
Güç değişim tespit mekanizması 1 saniye aralıklarla çalıştırılmakta, ikinci, altıncı ve dokuzuncu saniyelerde algoritmada uygulanan güç değişim oranları aşağıda verilmektedir.

$$\frac{\Delta P}{P} = \frac{P(2.sn) - P(1.sn)}{P(1.sn)} = \frac{5600 - 5409}{5409} = 0.035$$

$$\frac{\Delta P}{P} = \frac{P(6.sn) - P(5.sn)}{P(5.sn)} = \frac{4255 - 5775}{5775} = 0.263$$

$$\frac{\Delta P}{P} = \frac{P(9.sn) - P(8.sn)}{P(8.sn)} = \frac{5026 - 4251}{4251} = 0.183$$

Güç değişim oranları incelendiğinde, altıncı (200 W/m²/s'lik azalış) ve dokuzuncu (100 W/m²/s'lik artış) saniyedeki kontrol de 0.1 eşik değerininin aşıldığı görülmektedir. Bu durumda Kısmi Gölgeleme Tespit Metodu çalışır, KGD olmadığı tespit edilir ve D&G metoduna geri dönlür. Diğer yandan, İkinci saniyedeki kontrolde ($\Delta P/P$) 0.1 eşik değerinin altındadır. Ani ışıma değişimi tespit edilmemiştir ve sistem D&G metodu ile çalışmaya devam eder. Şekil 5.5'te gösterilen ışınlam grafiğine göre çalışan sistemin güç – zaman grafiği Şekil 5.6'da görülmektedir. Burada altıncı ve dokuzuncu saniyelerde Kısmi Gölgeleme Tespit Metodunun çalıştığı ve kısmi gölgeleme tespit edilmediği için sistemin kaldığı yerden çalışmaya devam ettiği görülmektedir.



Şekil 5.6. Değişen ışınlam durumuna göre FV dizi çıkış gücü

5.2.3. Önerilen metot ve diğer metotların farklı kısmi gölgelenme durumlarındaki performansı

Bu bölümde, önerilen hibrit MGNİ algoritmasının, farklı kısmi gölgelenme durumlarındaki performansı incelenmiş ve Artımsal İletkenlik, Atlamalı Adapif D&G yöntemleriyle karşılaştırılmıştır. Atlamalı Adaptif D&G ve önerilen hibrit MGNİ metodunda, kısmi gölgelenme koşulları altında çalışan algoritmanın her bir tarama noktası için örnekleme süresi 25 ms olarak belirlenmiştir.

Yedi farklı kısmi gölgelenme durumu senaryosu üzerinden analiz gerçekleştirilmiştir. Bu örneklerin seçimi sırasında şu unsurlar dikkate alınmıştır:

- Farklı ışınlam seviyelerine maruz kalma: İki, üç ve dört farklı ışınlam seviyesi içeren gölgelenme tipleri değerlendirilmiştir.
- Global maksimum güç noktasının konumu: Farklı gölgelenme senaryolarında, global maksimum güç noktasının gerilim profilinde farklı bölgelerde (sağ, sol ve orta) bulunmasına dikkat edilmiştir.

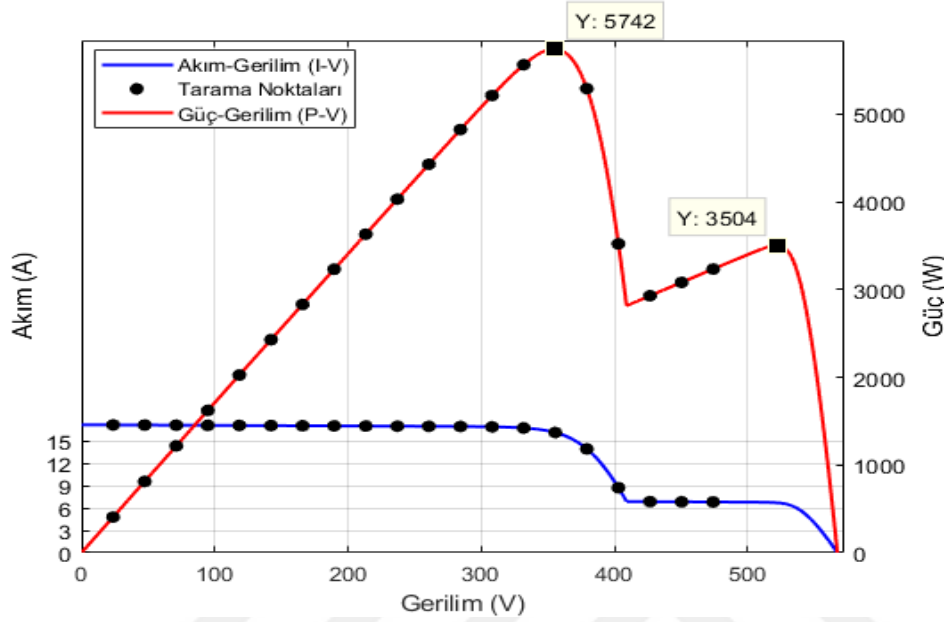
5.2.3.1. İki farklı ışınlam seviyesi içeren gölgelenme senaryoları

Bu gölgelenme durumlarında, sistemde farklı ışınlam seviyelerine sahip iki grup panel bulunmaktadır. Simulasyonda, düzgün ışınlam maruz kalan bir sistemde birinci saniyeden itibaren kısmi gölgelenme durumu oluşmaktadır.

Kısmi gölgelenme durumu 1

KGD1’de sistem 1000 W/m^2 ışınlam maruz kalırken, 5 panel üzerinde gölgelenme meydana gelmiştir. Bu panellerin üzerine düşen ışınlam 400 W/m^2 dir. Şekil 5.7’de

KGD1 için güç - gerilim, akım - gerilim karakteristik eğrileri verilmektedir. Bu koşullarda sistemin global maksimum güç noktası (GMGN) gücü 5742 W olarak belirlenirken, yerel maksimum güç noktası (YMGN) gücü 3504 W olarak tespit edilmiştir.



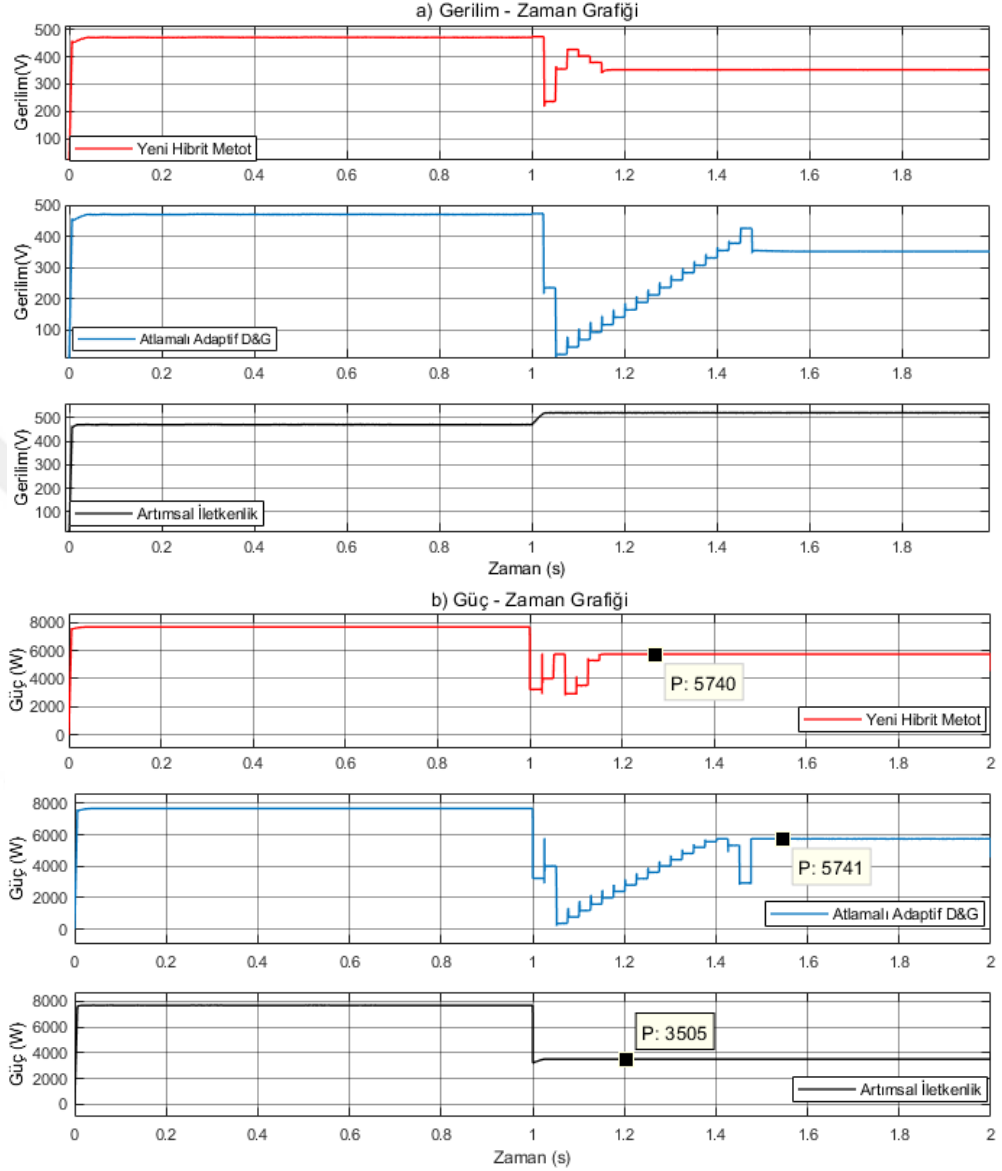
Şekil 5.7. KGD1'in güç - gerilim, akım - gerilim karakteristiği

KGD1'e ait gerilim-zaman ve güç-zaman grafikleri Şekil 5.8'de sunulmuştur. Sonuçlar incelendiğinde, önerilen hibrit MGNİ algoritmasının yalnızca 6 örnekleme ile global maksimum güç noktasını başarıyla tespit ettiği görülmüştür. Algoritmanın izlediği tarama noktaları sırasıyla V_{20} , V_{10} , V_{15} , V_{18} , V_{17} ve V_{16} 'dir. Bu süreçte yalnızca orta nokta yöntemi uygulanmış ve işlem toplamda 150 ms sürmüştür.

Atlamalı Adaptif D&G yöntemi, Kısmi Gölgeleme Tespit Metodu (KGTM) aşamasında 3 örnekleme, kısmi gölgeleme tarama aşamasında ise 16 örnekleme olmak üzere toplamda 19 örnekleme kullanarak GMGN'yi 475 ms sürede tespit edebilmiştir. Buna karşılık, Artımsal İletkenlik (Aİ) metodu, GMGN'yi tespit etmede başarısız olmuş ve yerel maksimum güç noktasında takılı kalmıştır. Bu bulgular, önerilen hibrit algoritmanın daha az örnekleme ile daha kısa sürede GMGN'yi tespit edebildiğini açıkça ortaya koymaktadır. Önerilen hibrit algoritma, Atlamalı Adaptif D&G yöntemine kıyasla yaklaşık %68 daha hızlı çalışmıştır.

Sistem verimlilikleri incelendiğinde, önerilen hibrit algoritmanın verimi %97.94, Atlamalı Adaptif D&G yönteminin verimi %91.26 ve Artımsal İletkenlik yönteminin

verimi %83.1 olarak tespit edilmiştir. (Bu çalışmada, verim hesaplamaları, simülasyon süresi boyunca FV dizinin ürettiği gücün, sistemin teorik olarak üretebileceği toplam güce oranlanmasıyla gerçekleştirilmiştir.)

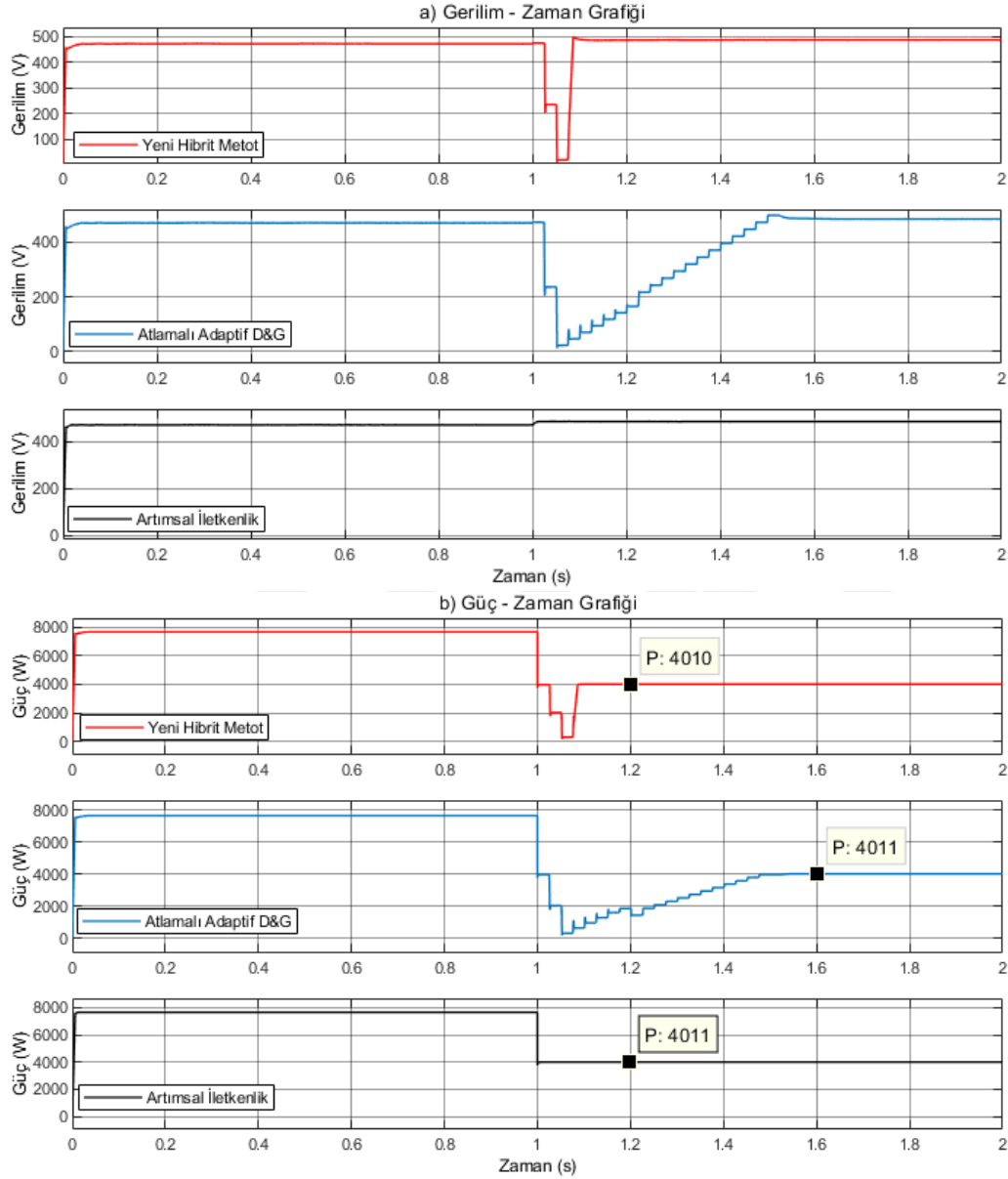


Şekil 5.8. KGD1: Önerilen Hibrit Metot ile Atlamalı Adaptif D&G ve Artımsal İletkenlik metotlarının a) gerilim-zaman ve b) güç-zaman grafikleri

Kısmi gölgelenme durumu 2

Bölüm 4.4.2’de çalışma mantığı detaylı olarak açıklanan kısmi gölgelenme senaryosuna (bkz. Şekil 4.5) ilişkin simülasyon sonuçları Şekil 5.9’da verilmiştir. Bu kısmi gölgelenme durumunda global maksimum güç noktası gücü 4011W olarak tespit edilirken yerel global maksimum güç noktası gücü 1842W olarak belirlenmiştir. Bu senaryoda, önerilen hibrit MGNİ algoritması, KGTM aşamasında

alınan yalnızca 3 örnekleme (75 ms) ile kısmi gölgelenme durumunu doğru bir şekilde tespit etmiş ve ek bir işlem veya örnekleme gerek kalmadan GMGN'yi başarıyla belirlemiştir. Simülasyon sonuçlarının, teorik olarak öngörülen işleyişle tamamen uyumlu olduğu gözlemlenmiştir.



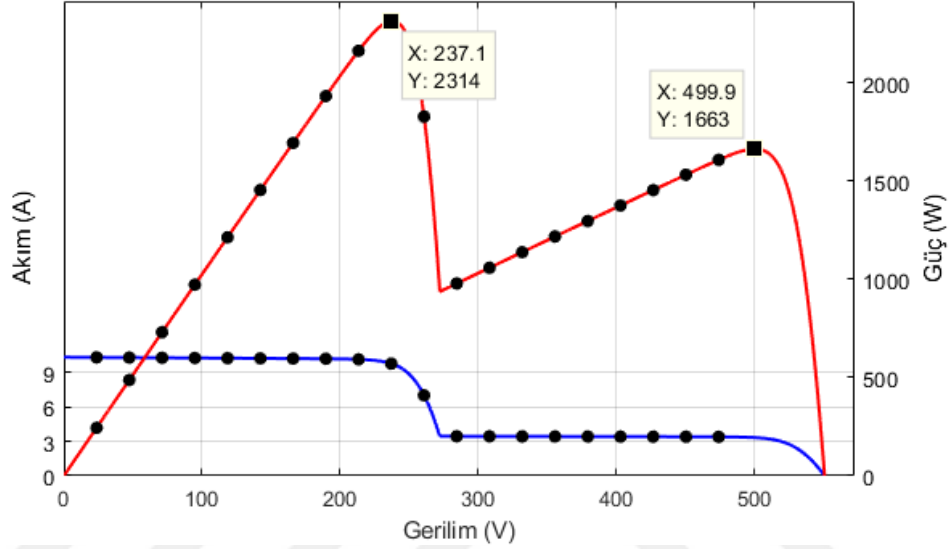
Şekil 5.9. KGD2: Önerilen Hibrit Metot ile Atlamalı Adaptif D&G ve Aİ metotlarının a) gerilim-zaman ve b) güç-zaman grafikleri

Atlamalı Adaptif D&G metodu ise KGTM aşamasında 3 örnekleme, kısmi gölgelenme tarama aşamasında 18 örnekleme olmak üzere toplamda 21 örnekleme ile GMGN'yi 525 ms sürede tespit etmiştir. Bu senaryoda, önerilen metodun, Atlamalı Adaptif D&G metoduna kıyasla yaklaşık %85.7 daha hızlı çalıştığı ve daha

az örnekleme ile aynı doğruluğa ulaştığı görülmektedir. Artımsal İletkenlik metodu da GMGN’i başarılı bir şekilde takip etmiştir.

Sistem verimliliği açısından yapılan değerlendirmelerde, önerilen hibrit algoritmanın %98.4, Atlamalı Adaptif D&G yönteminin %92.5 ve Artımsal İletkenlik yönteminin %99.7 verimlilik değerlerine ulaştığı belirlenmiştir.

Kısmi gölgelenme durumu 3



Şekil 5.10. KGD3’ün güç - gerilim, akım - gerilim karakteristiği

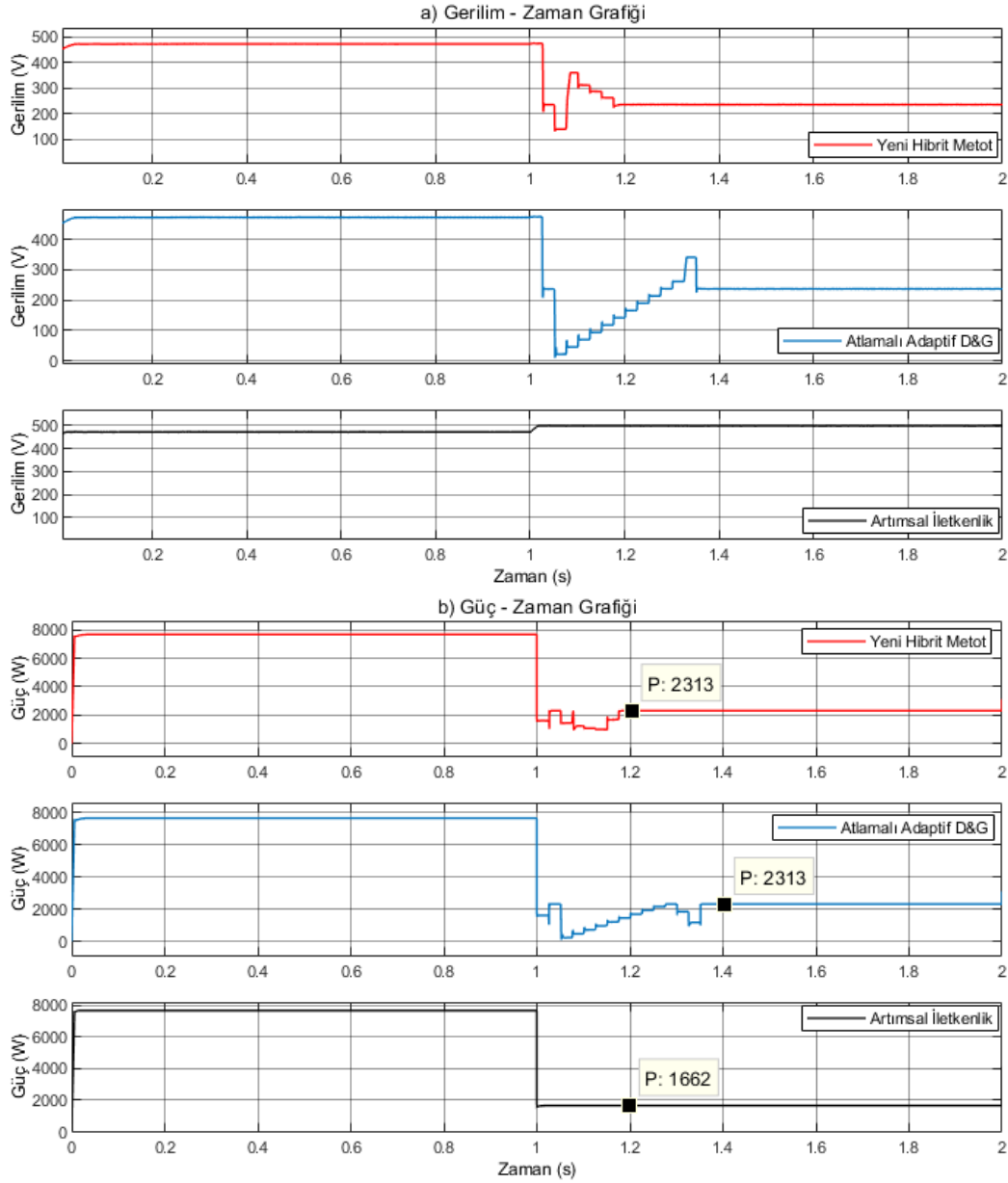
KGD3 için gerçekleştirilen simülasyon sonuçları incelendiğinde, önerilen hibrit MGNİ algoritmasının KGTM aşamasında 3 örneklem, kısmi gölgelenme tarama aşamasında ise 4 örneklem olmak üzere toplamda yalnızca 7 örneklem kullanarak yaklaşık 200 ms içinde global maksimum güç noktasını (GMGN) başarıyla tespit ettiği görülmüştür.

Atlamalı adaptif D&G metodunda ise KGTM aşamasında 3 örneklem, kısmi gölgelenme tarama aşamasında 11 örneklem olmak üzere toplamda 14 örneklem kullanarak GMGN’yi yaklaşık 350 ms sürede belirlemiştir. Burada Şekil 5.10’da görüldüğü üzere 11. tarama noktasından sonra yeni akım basamağına geçildiği için şuana kadar elde edilen güce, kalan gerilim aralığında erişilemeyeceğinden kalan kısım taranmadan daha az örnekleme ile GMGN’ye ulaşılmıştır.

Artımsal İletkenlik (Aİ) metodu ise bu gölgelenme senaryosunda GMGN’yi tespit edememiş ve yerel maksimum güç noktası olan 500 V, 1663 W değerinde takılı

kalmıştır. Bu durum, Aİ metodunun bazı kısmi gölgelenme durumlarında GMGN'yi doğru şekilde izleyemediğini ve yerel maksimumlarda takılabildiğini göstermektedir.

Sistem verimliliklerine ilişkin değerlendirmeler sonucunda, önerilen hibrit algoritmanın %98.25, Atlamalı Adaptif D&G yönteminin %96.6 ve Artımsal İletkenlik yönteminin %93.2 verimlilik değerlerine ulaştığı tespit edilmiştir.

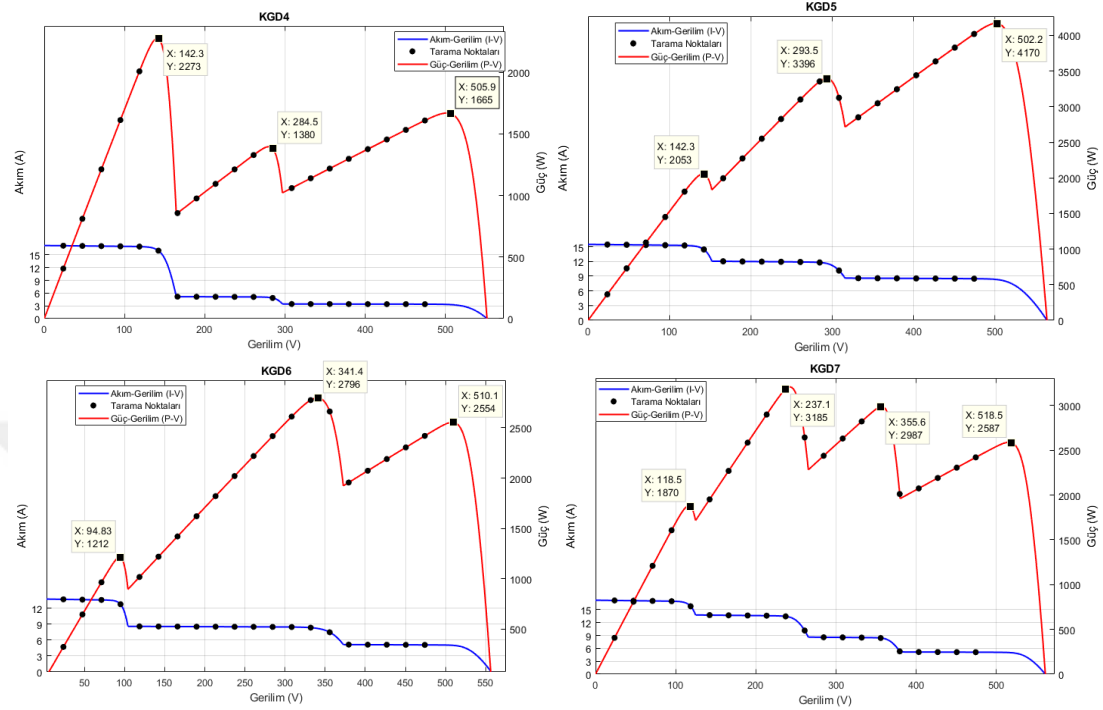


Şekil 5.11. KGD3: Önerilen Hibrit Metot ile Atlamalı Adaptif D&G ve Aİ metodlarının a) gerilim-zaman ve b) güç-zaman grafikleri

5.2.3.2. Üç ve dört farklı ışınlam seviyesi içeren gölgelenme senaryoları

Bu bölümde üç ve dört farklı ışınlam seviyesi içeren daha karmaşık kısmi gölgelenme durumları ele alınmıştır. KGD4, KGD5, KGD6 ve KGD7 olarak adlandırılmıştır.

Oluşturulan bu gölgelenme senaryolarının güç-gerilim (P-V) ve akım-gerilim (I-V) karakteristikleri Şekil 5.12’de verilmiştir. Hangi panel grubunun, hangi ışınım seviyesine maruz kaldığı ise Tablo 5.3’te özetlenmiştir.



Şekil 5.12. KGD4, KGD5, KGD6 ve KGD7’nin güç - gerilim, akım - gerilim karakteristikleri

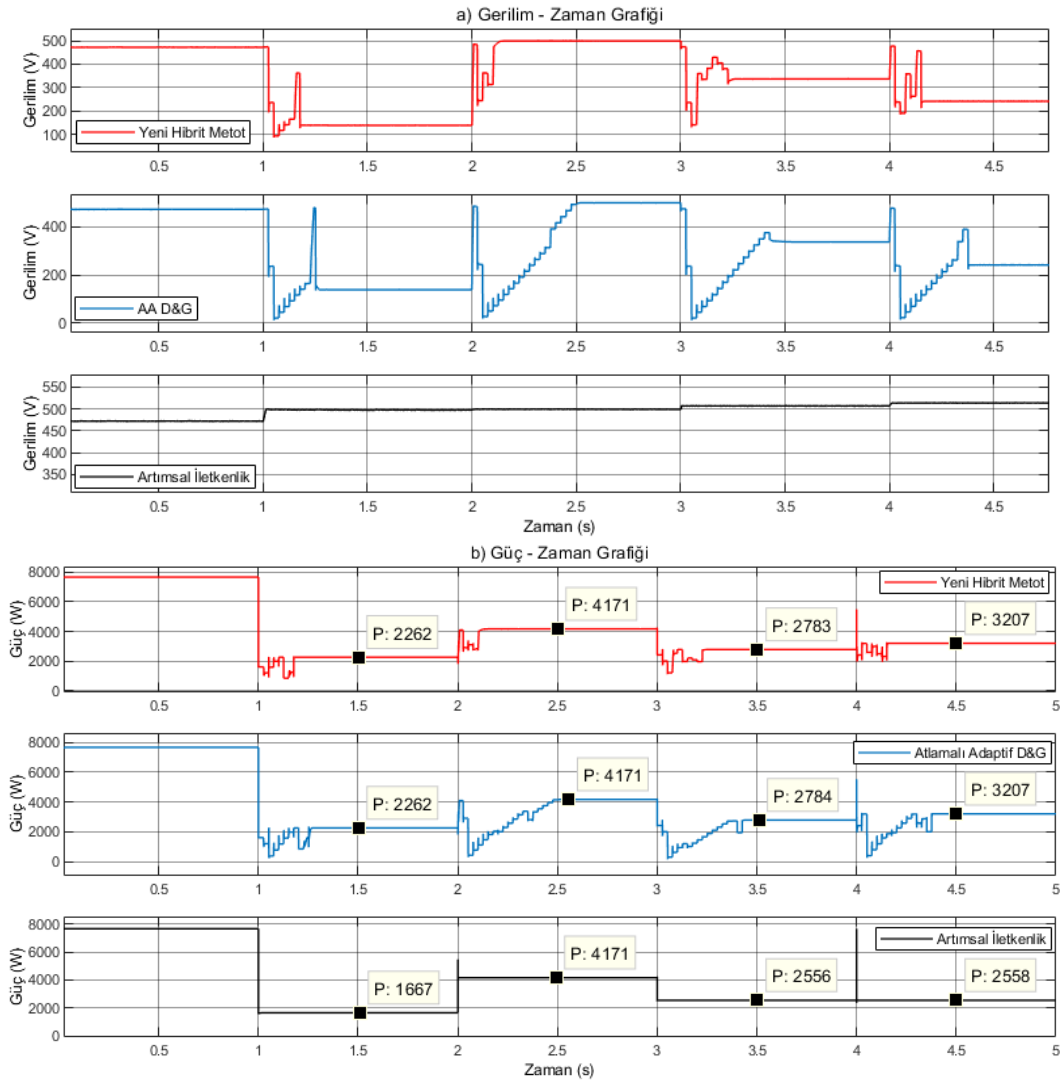
Sistem 1 saniye boyunca standart test koşulunda çalıştırılıp sonrasında kısmi gölgelenme durumları her saniyede bir sırayla uygulanmıştır.

Tablo 5.3. Üç ve dört farklı ışınım seviyesi içeren KGD’lerin gölgelenme durumları.

	1.Grup	2.Grup	3.Grup	4.Grup
KGD4	6 Panel	5 Panel	9 Panel	—
	1000 W/m ²	300 W/m ²	200 W/m ²	—
KGD5	6 Panel	6 Panel	8 Panel	—
	900 W/m ²	700 W/m ²	500 W/m ²	—
KGD6	4 Panel	10 Panel	6 Panel	—
	800 W/m ²	500 W/m ²	300 W/m ²	—
KGD7	5 Panel	5 Panel	4 Panel	6 Panel
	1000 W/m ²	800 W/m ²	500 W/m ²	300 W/m ²

Atlamalı Adaptif D&G metodu KGD4, KGD5, KGD6 ve KGD7 senaryolarında sırasıyla 10, 20, 17 ve 15 örnekleme adımında global maksimum güç noktasını başarıyla tespit ederken, önerilen hibrit MGNİ ise 7, 4, 9 ve 6 örnekleme adımıyla GMGN'yi tespit etmiştir. Açıkça görülmektedir ki farklı senaryolarda dahi önerilen metot hız açısından üstünlük sağlamaktadır.

Artımsal iletkenlik metodu, bu dört kısmi gölgelenme durumunun üçünde (KGD4, KGD6, KGD7) global maksimum güç noktasını tespit etmede başarısız olmuştur. Bu metodun kısmi gölgelenme durumunda, öncesinde çalıştığı gerilim bölgesine en yakın tepe noktasını bulabildiği, ancak global maksimum güç noktası (GMGN) ve yerel maksimum güç noktası (YMGN) ayrımı yapamadığı gözlemlenmiştir.



Şekil 5.13. KGD4, KGD5, KGD6 ve KGD7'nin a) gerilim - zaman , b) güç - zaman grafikleri

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, fotovoltaik sistemlerin kısmi gölgelenme durumlarındaki verimliliğini artırmak amacıyla yeni bir hibrit maksimum güç noktası izleyici (MGNI) algoritması geliştirilmiştir. 20 seri bağlı panelden oluşan bir FV sistem tasarlanmış, bu sistem üzerinden benzetimi çalışmaları yapılmıştır.

Kısmi Gölgeleme Tespit Metoduna yapılan iyileştirmenin düşük gerilimlerde gereksiz taramaları önleyerek güç kayıplarını azalttığı ve tarama süresini iyileştirdiği görülmüştür. Geleneksel yöntemlerden olan Artımsal İletkenlik (AI) yöntemi, birçok kısmi gölgelenme durumunda global maksimum güç noktası takibinde başarısız olurken, önerilen hibrit metot ve Atlamalı Adaptif D&G metodunun her durumda GMGN'yi başarılı bir şekilde takip ettiği belirlenmiştir.

Atlamalı Adaptif D&G yöntemi, incelenen 7 farklı kısmi gölgelenme senaryosunda 10-21 örnekleme adımında (0,25 - 0,525 sn) global maksimum güç noktasını tespit ederken, önerilen hibrit MGNI yöntemi 3-9 örnekleme adımında (0,075 - 0,225 sn) GMGN'yi başarıyla tespit etmiştir. Bu bulgular, önerilen algoritmanın Atlamalı Adaptif D&G yöntemine kıyasla daha hızlı GMGN'yi tespit edebildiğini ortaya koymaktadır.

Sonuç olarak önerilen hibrit MGNI algoritması özellikle birçok modülün seri bağlandığı FV sistemlerde, tarama süresini azaltarak hızlı ve doğru bir şekilde global maksimum güç noktasını tespit etme yeteneğiyle sistem verimliliğini artırma potansiyeli sunmaktadır. Bununla birlikte, algoritmanın daha geniş kapsamlı olarak değerlendirilmesi ve geliştirilmesi için gelecekte, geliştirilen algoritmanın gerçek zamanlı donanım platformlarında uygulanıp sistemin pratikteki performansı değerlendirilebilir.



KAYNAKLAR

- [1] Panwar, N. L., Kaushik, S. C., & Kothari, S. (2011). Role of renewable energy sources in environmental protection: A review. *Renewable and sustainable energy reviews*, 15(3), 1513-1524. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.11.037>
- [2] IRENA (2024), Renewable capacity highlights, International Renewable Energy Agency. Erişim adresi https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2024/Mar/IRENA_RE_Capacity_Highlights_2024.pdf
- [3] Sampaio, P. G. V., & González, M. O. A. (2017). Photovoltaic solar energy: Conceptual framework. *Renewable and sustainable energy reviews*, 74, 590-601. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.02.081>
- [4] Bendib, B., Belmili, H., & Krim, F. (2015). A survey of the most used MPPT methods: Conventional and advanced algorithms applied for photovoltaic systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 45, 637-648. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.02.009>
- [5] Ramli, M. A., Twaha, S., Ishaque, K., & Al-Turki, Y. A. (2017). A review on maximum power point tracking for photovoltaic systems with and without shading conditions. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 67, 144-159. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.09.013>
- [6] Bollipo, R. B., Mikkili, S., & Bonthagorla, P. K. (2020). Hybrid, optimal, intelligent and classical PV MPPT techniques: A review. *CSEE Journal of Power and Energy Systems*, 7(1), 9-33. <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/9171659>
- [7] Liu, F., Duan, S., Liu, F., Liu, B., & Kang, Y. (2008). A variable step size INC MPPT method for PV systems. *IEEE Transactions on industrial electronics*, 55(7), 2622-2628. <https://doi.org/10.1109/TIE.2008.920550>
- [8] Simulation and experimental design of a new advanced variable step size Incremental Conductance MPPT algorithm for PV systems. *ISA transactions*, 62, 30-38. <https://doi.org/10.1016/j.isatra.2015.08.006>
- [9] Tey, K. S., & Mekhilef, S. (2014). Modified incremental conductance MPPT algorithm to mitigate inaccurate responses under fast-changing solar irradiation level. *Solar Energy*, 101, 333-342. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2014.01.003>
- [10] Abdelsalam, A. K., Massoud, A. M., Ahmed, S., & Enjeti, P. N. (2011). High-performance adaptive perturb and observe MPPT technique for photovoltaic-based microgrids. *IEEE Transactions on power electronics*, 26(4), 1010-1021. <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/5688336>

- [11] Ahmed, J., & Salam, Z. (2016). A modified P&O maximum power point tracking method with reduced steady-state oscillation and improved tracking efficiency. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 7(4), 1506-1515. <https://doi.org/10.1109/TSTE.2016.2568043>
- [12] Patel, H., & Agarwal, V. (2008). Maximum power point tracking scheme for PV systems operating under partially shaded conditions. *IEEE transactions on industrial electronics*, 55(4), 1689-1698. <https://doi.org/10.1109/TIE.2008.917118>
- [13] Tey, K. S., & Mekhilef, S. (2014). Modified incremental conductance algorithm for photovoltaic system under partial shading conditions and load variation. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 61(10), 5384-5392. <https://doi.org/10.1109/TIE.2014.2304921>
- [14] Kermadi, M., Salam, Z., Ahmed, J., & Berkouk, E. M. (2018). An effective hybrid maximum power point tracker of photovoltaic arrays for complex partial shading conditions. *IEEE transactions on industrial electronics*, 66(9), 6990-7000. <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/8511077>
- [15] Kouchaki, A., Iman-Eini, H., & Asaei, B. (2013). A new maximum power point tracking strategy for PV arrays under uniform and non-uniform insolation conditions. *Solar Energy*, 91, 221-232. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2013.01.009>
- [16] Ahmed, J., & Salam, Z. (2015). An improved method to predict the position of maximum power point during partial shading for PV arrays. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 11(6), 1378-1387. <https://doi.org/10.1109/TII.2015.2489579>
- [17] Wang, Y., Li, Y., & Ruan, X. (2015). High-accuracy and fast-speed MPPT methods for PV string under partially shaded conditions. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 63(1), 235-245. <https://doi.org/10.1109/TIE.2015.2465897>
- [18] Luque, A., & Hegedus, S. (Eds.). (2011). *Handbook of photovoltaic science and engineering*. John Wiley & Sons.
- [19] Al-Ezzi, A. S., & Ansari, M. N. M. (2022). Photovoltaic Solar Cells: A Review. *Applied System Innovation*, 5(4), 67. <https://doi.org/10.3390/asi5040067>
- [20] Öztürk, H. H. (2008). Güneş Enerjisinden Fotovoltaik Yöntemle Elektrik Üretiminde Güç Dönüşüm Verimi ve Etkili Etmenler. https://www.emo.org.tr/ekler/3a921ffad054cb0_ek.pdf
- [21] Bagher, A. M., Vahid, M. M. A., & Mohsen, M. (2015). Types of solar cells and application. *American Journal of optics and Photonics*, 3(5), 94-113. https://barghnews.com/files/fa/news/1397/10/27/72825_110.pdf
- [22] Pastuszak, J., & Węgierek, P. (2022). Photovoltaic cell generations and current research directions for their development. *Materials*, 15(16), 5542. <https://doi.org/10.3390/ma15165542>

- [23] Rathore, N., Panwar, N. L., Yettou, F., & Gama, A. (2021). A comprehensive review of different types of solar photovoltaic cells and their applications. *International Journal of Ambient Energy*, 42(10), 1200-1217. <https://doi.org/10.1080/01430750.2019.1592774>
- [24] Karagözoğlu, L., & Duranay, Z. B. (2023). Investigation of Maximum Power Point Tracking Methods in Photovoltaic Sytems. *International Journal of Innovative Engineering Applications*, 7(1), 86-95. <https://dergipark.org.tr/en/download/article-file/1077400>
- [25] İşen, E., & Koçhan, Ö. (2020). Fotovoltaik panelin tek diyotlu modellenmesi. *Mühendislik Bilimleri ve Araştırmaları Dergisi*, 2(1), 1-10. <https://dergipark.org.tr/en/download/article-file/1077400>
- [26] Bader, S., Ma, X., & Oelmann, B. (2019). One-diode photovoltaic model parameters at indoor illumination levels—A comparison. *Solar Energy*, 180, 707-716. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.01.048>
- [27] Fouad, M. M., Shihata, L. A., & Morgan, E. I. (2017). An integrated review of factors influencing the performace of photovoltaic panels. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 80, 1499-1511. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.141>
- [28] Nakir, İ. (2012). *Ulaşım araçlarında fotovoltaik yapılar için uygun bir maksimum güç takip algoritması ile verimliliğin artırılması* [Doktora tezi]. Yıldız Teknik Üniversitesi
- [29] Clean Energy Reviews. (2024, 22 Ekim). Solar panel shading: Failing bypass diodes & solutions. <https://www.cleanenergyreviews.info/blog/solar-panel-shading-problems-bypass-diodes-optimisers>
- [30] Seyedmahmoudian, M., Mekhilef, S., Rahmani, R., Yusof, R., & Renani, E. T. (2013). Analytical modeling of partially shaded photovoltaic systems. *Energies*, 6(1), 128-144. <https://doi.org/10.3390/en6010128>
- [31] Enrique, J. M., Duran, E., Sidrach-de-Cardona, M., & Andujar, J. M. (2007). Theoretical assessment of the maximum power point tracking efficiency of photovoltaic facilities with different converter topologies. *Solar Energy*, 81(1), 31-38. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2006.06.006>
- [32] Lopa, S. A., Hossain, S., Hasan, M. K., & Chakraborty, T. K. (2016). Design and simulation of DC-DC converters. *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*, 3(01), 63-70.
- [33] Arifoğlu, U. (2020). *Güç elektroniği Ders Notları*
- [34] Bollipo, R. B., Mikkili, S., & Bonthagorla, P. K. (2020). Critical review on PV MPPT techniques: classical, intelligent and optimisation. *IET Renewable Power Generation*, 14(9), 1433-1452. <https://doi.org/10.1049/iet-rpg.2019.1163>
- [35] Kim, R. Y., & Kim, J. H. (2013). An improved global maximum power point tracking scheme under partial shading conditions. In *Journal of International Conference on Electrical Machines and Systems* (Vol. 2, No. 1, pp. 65-68). <https://doi.org/10.11142/jicems.2013.2.1.65>

- [36] Ahmed, J., & Salam, Z. (2017). An accurate method for MPPT to detect the partial shading occurrence in a PV system. *IEEE transactions on industrial informatics*, 13(5), 2151-2161. <https://doi.org/10.1109/TII.2017.2703079>
- [37] Ahmed, J., Salam, Z., Kermadi, M., Afrouzi, H. N., & Ashique, R. H. (2021). A skipping adaptive P&O MPPT for fast and efficient tracking under partial shading in PV arrays. *International Transactions on Electrical Energy Systems*, 31(9), e13017. <https://doi.org/10.1002/2050-7038.13017>



ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad : Tuğba ŞAHİN

ÖĞRENİM DURUMU:

- Lisans** : 2021, Sakarya Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik & Elektronik Mühendisliği Bölümü
- Yükseklisans** : 2025, Sakarya Üniversitesi, Elektrik & Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, Elektrik Bilim Dalı

MESLEKİ DENEYİM:

- Mayıs 2023'ten beri İçişleri Bakanlığında Elektrik & Elektronik Mühendisliği olarak çalışmaktadır.

TEZDEN TÜRETİLEN ESERLER: