

**MAKSİMUM GÜÇ NOKTASI TAKİBİ ALGORİTMALARININ GERÇEK
ZAMANLI TESTİ İÇİN MİKRODENETLEYİCİ TABANLI BİR PLATFORM
TASARLANMASI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ
Mehmet ÇELİK

Danışman

Doç. Dr. Said Mahmut ÇINAR

YENİLENEBİLİR ENERJİ SİSTEMLERİ

Temmuz, 2025

AFYON KOCATEPE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**MAKSİMUM GÜÇ NOKTASI TAKİBİ ALGORİTMALARININ
GERÇEK ZAMANLI TESTİ İÇİN MİKRODENETLEYİCİ
TABANLI BİR PLATFORM TASARLANMASI**

Mehmet ÇELİK

Danışman

Doç. Dr. Said Mahmut ÇINAR

YENİLENEBİLİR ENERJİ SİSTEMLERİ ANABİLİM DALI

TEMMUZ, 2025

TEZ ONAY SAYFASI

Mehmet ÇELİK tarafından hazırlanan “Maksimum güç noktası takibi algoritmalarının gerçek zamanlı testi için mikrodenetleyici tabanlı bir platform tasarlanması” adlı tez çalışması lisansüstü eğitim ve öğretim yönetmeliğinin ilgili maddeleri uyarınca 01/07/2025 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından **oy birliği** ile Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü **Yenilenebilir Enerji Sistemleri Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Danışman : Doç.Dr.Said Mahmut ÇINAR

Başkan : Prof.Dr.Ali Bekir YILDIZ
Kocaeli Üniversitesi,Mühendislik Fakültesi,

Üye : Doç.Dr.Said Mahmut ÇINAR
Afyon Kocatepe Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi,

Üye : Doç.Dr.Emre AKARSLAN
Afyon Kocatepe Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi,

Afyon Kocatepe Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu’nun
..... /..... /..... tarih ve
..... sayılı kararıyla onaylanmıştır.

.....
Prof. Dr. Bekir YALÇIN
Enstitü Müdürü

BİLİMSEL ETİK BİLDİRİM SAYFASI
Afyon Kocatepe Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içindeki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu,
- Atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- Ve bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı

beyan ederim.

01/07/2025

İmza

Mehmet ÇELİK

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

MAKSİMUM GÜÇ NOKTASI TAKİBİ ALGORİTMALARININ GERÇEK ZAMANLI TESTİ İÇİN MİKRODENETLEYİCİ TABANLI BİR PLATFORM TASARLANMASI

Mehmet ÇELİK

Afyon Kocatepe Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Yenilenebilir Enerji Sistemleri Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Said Mahmut ÇINAR

Güneş panelleri, doğrusal olmayan karakteristikleri nedeniyle ürettikleri gücü çevresel ve yapısal birçok parametreye bağlı olarak değişken biçimde üretir. Bu gücün her durumda yüke maksimum düzeyde aktarılması, sistem verimliliği açısından önemlidir. Literatürde, değiştir ve gözle (P&O), artan iletkenlik (IC), sabit gerilim (CV) ve kısa devre akımı gibi geleneksel MPPT algoritmalarının yanı sıra gelişmiş yöntemler de sunulmuştur. Ancak çoğu çalışma yalnızca simülasyon ortamına odaklanmış, gerçek zamanlı uygulamalar sınırlı kalmıştır. Bu çalışmada, iki MPPT algoritmasının eşzamanlı testine imkân tanıyan donanım tabanlı bir platform geliştirilmiştir. Platform, 100–300 W aralığında çalışan paneller ve 400 W'lık direnç yükleriyle yapılandırılmış; panel ile yük arasına STM32F4 mikrodeneleyici kontrollü 1 kW'lık yükselten tip DC/DC dönüştürücü entegre edilmiştir. Mikrodeneleyici, dönüştürücü kontrolü yanında panel gerilimi, akımı, sıcaklığı, ışıınım ve çıkış parametrelerini de ölçmektedir. MATLAB/Simulink tabanlı bir arayüzle mikrodeneleyiciyle iletişim sağlanmakta, veriler anlık izlenebilmektedir. Her algoritma için elde edilen P–V grafikleri üzerinden performans karşılaştırması yapılmıştır. P&O ve IC algoritmaları ayrı ayrı test edilmiş; P&O'nun MPP noktasına daha hızlı ulaştığı, ancak kısmi gölgelenmede yerel maksimumda takılı kalarak salınımlar yaptığı gözlemlenmiştir.

2025, vii + 61 sayfa

Anahtar Kelimeler: Değiştir ve gözle, maksimum güç noktası takibi, mikrodeneleyici güneş paneli

ABSTRACT

M.Sc. Thesis

DESIGNING A MICROCONTROLLER-BASED PLATFORM FOR REAL-TIME TESTING OF THE MAXIMUM POWER POINT TRACKING ALGORITHMS

Mehmet ÇELİK

Afyon Kocatepe University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Electrical Engineering

Supervisor: Assoc. Prof. Said Mahmut ÇINAR

Due to their nonlinear characteristics, photovoltaic (PV) panels produce power that varies with environmental and structural conditions. Maximizing power transfer to the load is essential for system efficiency. Traditional Maximum Power Point Tracking (MPPT) algorithms such as Perturb and Observe (P&O), Incremental Conductance (IC), Constant Voltage (CV), and Short-Circuit Current have been widely studied, yet most evaluations remain limited to simulations. This study introduces a hardware platform that enables real-time, simultaneous testing of two MPPT algorithms. The setup includes 100–300 W PV panels, 400 W resistive loads, and a 1 kW boost converter controlled by an STM32F4 microcontroller. The system measures voltage, current, temperature, irradiance, and output data, with real-time monitoring via a MATLAB/Simulink interface. Performance was assessed through P–V curves, revealing that although P&O reached the maximum power point faster, it became stuck at local maxima and exhibited oscillations under partial shading.

2025, vii + 61 pages

Keywords: Perturb & observe, maximum power point tracking, microcontroller, photovoltaic panel

TEŞEKKÜR

Bu araştırmanın konusu, deneysel çalışmaların yönlendirilmesi, sonuçların değerlendirilmesi ve yazımı aşamasında yapmış olduğu büyük katkılarından dolayı tez danışmanım Sayın Doç.Dr.Said Mahmut ÇINAR'a, araştırma ve yazım süresince yardımlarını esirgemeyen Sayın Doç.Dr.Emre AKARSLAN'a, Kocaeli Üniversitesinden kalkıp buralara kadar gelen Sayın Prof.Dr.Ali Bekir YILDIZ hocama her konuda öneri ve eleştirileriyle yardımlarını gördüğüm hocalarıma ve arkadaşlarıma teşekkür ederim.

Bu araştırma boyunca manevi desteklerinden dolayı sevgili eşim Ayşegül Çelik'e ve beni hep destekleyen sevgili Anneme ve Babama teşekkür ederim.

Mehmet ÇELİK
AFYONKARAHİSAR, 2025

İÇİNDEKİLER DİZİNİ

	Sayfa
ÖZET	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR	iii
İÇİNDEKİLER DİZİNİ.....	iv
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ	vii
TABLolar DİZİNİ.....	ix
1.GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR BİLGİLERİ	4
2.1 Değişir ve Gözle	4
2.2 Artan iletkenlik	7
2.3 Bulanık mantık ve yapay sinir ağı	9
3. MATERYAL ve METOT	12
3.1 MATERYAL	12
3.1.1 Güneş paneli.....	12
3.1.2 Güneş paneli eşdeğer matematiksel modeli ve devresi.....	13
3.1.3 Panelin maksimum güç noktası.....	14
3.1.4 MPPT Algoritmaları	17
3.1.4.1 Değişir-Gözle (P&O) algoritması	19
3.1.4.2 Artan İletkenlik Yöntemi.....	22
3.1.4.3 Sabit gerilim ve sabit akım metodu.....	24
3.1.5 Genel PV panel çalışma döngüsü.....	26
3.1.6 DC/DC dönüştürücüler.....	26
3.2 METOT.....	30
3.2.1 Matlab Arayüzü.....	31
3.2.1 Tasarlanan DC/DC dönüştürücü devresi.....	33
4. BULGULAR	38
4.1 Deney 1	38
4.2 Deney 2	40
4.3 Deney 3	41
4.4 Deney 4	43
4.5 Deney 5	45

4.6 Deney 6	47
4.7 Deney 7	50
5. TARTIŞMA ve SONUÇ	52
6. KAYNAKLAR.....	54
6.1 İnternet kaynakları	60



SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler

W/m^2	Watt/metrekare
K	Kelvin
A	Amper
V	Volt
J/V	Joule/Volt
kWh	Kilowatt/saat
Ω	Ohm

Kısaltmalar

AC	Alternating current (Alternatif akım)
ANN	Artificial neural network (Yapay sinir ağı)
DC	Direct current (Doğru akım)
FOCV	Fractional Open Circuit Voltage
IC	Artan İletkenlik(Incremental Conductance)
MPPT	Maximum power point tracking
MGNT	Maksimum Güç Noktası Takibi
MGNİ	Maksimum Güç Noktası izleyicisi
MGN	Maksimum Güç Noktası
M-VSS	Modified variable step size (Değiştirilmiş değişken adım boyutu)
PV	Fotovoltaik panel
PSC	Partial Shaded Conditions(Kısmi gölgelenme şartı)
PSO	Particle swarm optimization (parçacık sürüsü optimizasyonu)
P&O	Değiştir & gözle
STC	Standard test conditions(Standart test koşulları)
YSA	Yapay sinir ağı
PWM	Darbe genişlik modülasyonu
YEK	Yenilenebilir Enerji Kaynakları

ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa
Şekil 3.1 FV panel eşdeğer devre modeli.....	13
Şekil 3.2 Fotovoltaik panel tipik akım-gerilim (I-V) karakteristiği.....	14
Şekil 3.3 MPPT'nin panel çıkış gücüne etkisi	16
Şekil 3.4 PV panelin çalışma eğrisi ve maksimum güç noktasının değişimi.....	17
Şekil 3.5 Fotovoltaik (PV) Modül Güç-Gerilim (P-V) Eğrisinde MPP ve Çalışma Bölgeleri.....	20
Şekil 3.6 Geleneksel P&O algoritması akış şeması	21
Şekil 3.7 Artımlı iletkenlik (IC) akış diyagramı	23
Şekil 3.8 Sabit gerilim yöntemi blok yapısı	25
Şekil 3.9 MPPT kontrollü PV sistem blok diyagramı	26
Şekil 3.10 PV Sistemi ile Boost Dönüştürücü devresi.....	28
Şekil 3.11 Platform sistemin genel yapısı	31
Şekil 3.12 Matlab arayüzü.....	32
Şekil 3.13 Matlab/simulink yapısı.....	32
Şekil 3.14 Simulink platform verileri.....	33
Şekil 3.15 Tasarımı yapılan pano test platformu, DC/DC dönüştürücü ve besleme kartı	34
Şekil 3.16 PT100 sıcaklık sensörlerinin panel üzerindeki konumu	36
Şekil 3.17 Kullanılan güneş panelleri ve karakteristik bilgileri	36
Şekil 3.18 Yük direnci.....	37
Şekil 4.1 Gölgeleme olmadığı durumdaki panellerin konumu.....	38
Şekil 4.2 Gölgeleme olmadığı durumdaki grafik	39
Şekil 4.3 Farklı doluluk oranında gölgeleme olmadığı durumdaki grafik	39
Şekil 4.4 Rastgele gölgelemenin olduğu panellerin konumu	40
Şekil 4.5 Rastgele gölgeleme olduğu durumdaki grafik	41
Şekil 4.6 Bir hücre grubu için %30 gölgelemenin olduğu panellerin konumu	41
Şekil 4.7 %30 Gölgeleme olduğu durumdaki grafik.....	42
Şekil 4.8 Farklı duty cycle ile %30 Gölgeleme olduğu durumdaki grafik.....	43
Şekil 4.9 İki hücre grubu için %30 ve %70 gölgelemenin olduğu panellerin konumu	44
Şekil 4.10 Hücre grupları için %30 ve %70 Gölgeleme olduğu durumdaki grafik	44

Şekil 4.11 Farklı duty cycle ile %30 ve %70 gölgelenme olduğu durumdaki grafik.....	45
Şekil 4.12 İki hücre grubu için %30 ve %50 gölgelenmenin olduğu panellerin konumu	46
Şekil 4.13 Hücre grupları için %30 ve %50 gölgelenme olduğu durumdaki grafik	46
Şekil 4.14 Farklı duty cycle ile %30 ve %50 gölgelenme olduğu durumdaki grafik.....	47
Şekil 4.15 Özdeş panellere uygulanan farklı gölgelenme koşulları	48
Şekil 4.16 Master panele %30, %30, %50 slave panele ise sadece bir hücre grubuna %50 gölgelenme koşulunu gösteren grafik	48
Şekil 4.17 Farklı duty cycle ile birinci panele %30, %30, %50 ikinci panele ise sadece bir hücre grubuna %50 gölgelenme koşulunu gösteren grafik.....	49
Şekil 4.18 %100 duty cycle ile master panele %30, %30, %50 slave panele ise sadece bir hücre grubuna %50 gölgelenme koşulunu gösteren grafik	50
Şekil 4.19 İki farklı algoritmanın platformda eşzamanlı çalışması ve performansının izlenmesi	51
Şekil 4.20 Arayüzde farklı algoritmaların tek platform üzerinde çalıştırılıp karşılaştırılması	51

TABLÖLAR DİZİNİ

Tablo 3.1 MPPT algoritmalarının izleme yöntemine göre sınıflandırılması	18
--	----



1. GİRİŞ

Güneş enerjisi, tarihsel süreçte özellikle ısıtma ve sıcak su temini gibi alanlarda çeşitli uygulamalarda kullanılmış olup, günümüzde ise önemli bir yenilenebilir enerji kaynağı olarak değerlendirilmektedir. Güneş ışınımının doğrudan elektrik enerjisine dönüştürülmesini sağlayan sistemler, gelişen teknolojiyle birlikte fotovoltaik sistemler adı altında geliştirilmiştir. Başlangıçta uzay araştırmaları için tasarlanan bu sistemler, zamanla elektrik şebekesinden bağımsız bölgelerde; özellikle orman gözetleme kuleleri, dağ evleri ve tarımsal sulama sistemleri gibi alanlarda enerji ihtiyacını karşılamak amacıyla yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır (Fahrenbruch ve Bube 1983).

1.1. Güneş Enerjisi

Güneş enerjisinden elektrik üretimi, fosil yakıtlara dayalı elektrik üretimine kıyasla günümüzde hâlen daha yüksek maliyetli bir yöntem olarak değerlendirilmektedir. Bu durum, güneş enerjisinin diğer elektrik üretim kaynaklarıyla rekabet edebilmesini sağlayacak verim artırıcı çalışmaları gündeme getirmiştir. Özellikle inverter sistemleri (%95–98 verim aralığında çalışabilmektedir) (İnt.Kyn.1) ve Maksimum Güç Noktası Takibi (MPPT) yöntemleri (%98'in üzerinde verimle) (İnt.Kyn.2) bu doğrultuda ön plana çıkan teknolojiler arasında yer almaktadır. Bununla birlikte, fotovoltaik (FV) panellerin kurulu bulunduğu alanlardaki kirlenme düzeyi ve sistemin kullanım süresi gibi çevresel ve yapısal etkenler de tesisin genel verimini etkilemektedir. Bu nedenle, panel verimliliğini artırmaya yönelik ilave çalışmalar da sürdürülmektedir. Mevcut teknolojilerle panel ve inverter veriminin yükseltilmesi, genellikle yüksek maliyet gerektiren bir süreçtir. Buna karşılık, MPPT sistemlerinin verimliliğinin artırılması, daha düşük maliyetli çözümler sunması nedeniyle literatürde birçok araştırmacı tarafından odak noktası haline gelmiştir. Bu bağlamda, yeni nesil kontrol algoritmalarıyla MPPT performansının iyileştirilmesi, güneş enerjisi sistemlerinin ekonomik ve teknik açıdan daha uygulanabilir hâle gelmesine katkı sağlamaktadır.

1.2. Türkiye’de Güneş Enerjisi Potansiyeli

Türkiye'nin coğrafi konumu ve sahip olduğu iklimsel koşullar dikkate alındığında, yenilenebilir enerji kaynakları içerisinde güneş ve rüzgâr enerjisi sistemleri ön plana çıkmaktadır. Özellikle güneş enerjisi sistemlerinde kullanılan fotovoltaik (PV) paneller; doğrudan doğru akım (DA) elektrik üretimi yapabilmeleri, sistemlere kolayca entegre edilebilmeleri, bakım gereksinimlerinin oldukça düşük olması ve çalışmaları için herhangi bir ara dönüştürücüye ihtiyaç duymamaları gibi teknik avantajları sayesinde, en çok tercih edilen yenilenebilir enerji teknolojileri arasında yer almaktadır (DPT.2001).

Türkiye, sahip olduğu coğrafi konum sayesinde yüksek düzeyde güneş enerjisi potansiyeline sahip ülkeler arasında yer almaktadır. Yenilenebilir Enerji Genel Müdürlüğü tarafından yayımlanan Güneş Enerjisi Potansiyeli Atlası (GEPA) verilerine göre, Türkiye’de yıllık ortalama güneşlenme süresi 2.737 saat olarak belirlenmiş olup, bu süre günlük ortalama yaklaşık 7,5 saate tekabül etmektedir. Aynı çalışmada, ülkemizin yıllık ortalama yüzeysel güneş enerjisi miktarının 1.527 kWh/m² yıl (günlük ortalama 4,2 kWh/m²) olduğu tespit edilmiştir (İnt.Kyn.3). Bu veriler, Türkiye’nin güneş enerjisine dayalı yenilenebilir enerji yatırımları açısından önemli bir potansiyele sahip olduğunu ortaya koymaktadır.

Güneş enerjisinde radyasyonun günlük ve mevsimlik değişimleri önemli bir konudur. Ayrıca PV panellerinden güç üretiminin günlük güneşlenme saatleriyle sınırlı olduğu bir gerçektir. Bu durum ile güneşten alınabilecek maksimum gücün elde edilmesi ve bu gücün kullanılacağı yük kısmına maksimum şekilde transfer edilmesi büyük önem arz etmektedir ve birçok araştırmaya konu edilmiştir.

Atmosferik koşulların süreklilik arz etmeyen yapısı, güneş enerjisinden elde edilen verimin istikrarsız olmasına neden olmakta ve enerji talebinin her zaman karşılanamamasına yol açmaktadır. Bu durum, enerji üretiminin sürekliliğini sağlamak amacıyla enerji depolama ünitelerinin kullanımını zorunlu kılmıştır. Diğer bir ifadeyle, güneş panelleri tarafından üretilen ve doğrusal olmayan akım-gerilim karakteristiğine sahip olan güç yalnızca uygun depolama sistemleri özellikle akü gibi üniteler aracılığıyla

istenilen seviyelerde elde edilebilmektedir. Bununla birlikte, kullanılan enerji depolama biriminin (örneğin akü) akım ve gerilim karakteristikleri, şarj işlemi için gerekli elektriksel parametreleri belirlemektedir. Güneş panelinden elde edilen anlık güç ile akünün gereksinim duyduğu akım veya gerilim değerleri genellikle örtüşmediğinden, üretilen enerjiden yalnızca sınırlı ölçüde yararlanılabilmektedir. Bu bağlamda, fotovoltaiik (PV) sistemlerin ürettiği enerjiden maksimum düzeyde fayda sağlanabilmesi amacıyla, doğru akım–doğru akım (DC-DC) dönüştürücüler ile entegre edilen Maksimum Güç Noktası Takibi (MPPT) yöntemlerinin kullanımı kaçınılmaz hale gelmiştir. MPPT, PV panellerinin üretebileceği en yüksek güç değerini elde etmeye yönelik çalışan elektronik kontrol sistemleri olarak tanımlanabilir. Söz konusu sistemler, panellerin fiziksel konumunu ya da açısını değiştiren mekanik sistemler değil; güneş panelleri ile bağlı oldukları yük devresinin elektriksel karakteristiklerini (özellikle direnç değerlerini) eşleştirmeye çalışan kontrol temelli çözümlerdir.

İzleyen bölümlerde detaylandırılacağı üzere, MPPT sistemlerinde doğrudan denetim ve dolaylı denetim temelli olmak üzere iki ana algoritma sınıfı bulunmaktadır. Bu iki temel yaklaşım etrafında şekillenen çok sayıda MPPT yöntemi, literatürde önerilmiş ve uygulamaya geçirilmiştir (Çalışkan, 2011).

Bu tez çalışmasında iki farklı MPPT algoritmasının performansını ve testini yapabilen mikrodenetleyici tabanlı bir platform tasarımı yapılmıştır. Tasarlanan bu platform ile algoritmaların testini performanslarını PV panellerin ışıyım verilerini ölçüp aynı zamanda başlatıp aynı zamanda durdurma yeteneğine sahip bir arayüz tasarımı ile verileri izleme imkânı olmuştur. Bu kapsamda ikinci bölümde, literatürde yer alan maksimum güç noktası algoritmaları ve matlab simülasyon ortamlarında denenmiş çalışmalara ve literatür özetine yer verilmiştir. Tezin üçüncü bölümünde, araştırma kapsamında kullanılan donanım ve yazılım bileşenleri ile birlikte geliştirilen platformun yapısı ve sistemde uygulanan algoritmalar ayrıntılı şekilde ele alınmıştır. Ayrıca bu bölümde gerçekleştirilen deneysel çalışmalara ait grafiksel veriler ve ilgili açıklamalara da yer verilmiştir. Dördüncü bölümde ise çalışmanın sonucunda elde edilen bulgular sistematik biçimde sunulmuş; son bölümde ise elde edilen sonuçlar tartışılarak genel değerlendirmelere ve çıkarımlara ulaşılmıştır.

2. LİTERATÜR BİLGİLERİ

Güneş panellerinden elde edilen gücün maksimum düzeyde yüke aktarılabilmesi amacıyla çeşitli maksimum güç noktası izleme (MPPT) algoritmaları kullanılmaktadır. Literatürde yer alan bu algoritmalar arasında P&O (Perturb and Observe), artan iletkenlik yöntemi, tepe tırmanışı algoritması, üç nokta ağırlıklı karşılaştırma yöntemi, sabit gerilim yöntemi ve kısa devre akımı tekniği gibi farklı yaklaşımlar öne çıkmaktadır. Bunlara ek olarak, son yıllarda yapay zekâ tabanlı kontrol teknikleriyle geliştirilen çok sayıda MPPT algoritması da önerilmiş ve uygulamalarda yer bulmuştur. Aşağıda, söz konusu algoritmaların temel prensiplerini, avantajlarını ve sınırlılıklarını ele alan literatür özeti sunulmuştur.

2.1 Değiştir ve Gözle

Nadkarni ve ark. (2018), MPPT teknolojisinin fotovoltaik sistemlerde kararlı çalışma koşullarında maksimum güç noktasını izleme açısından önemli bir role sahip olduğunu belirtmişlerdir. Ancak güneş ışınımı ve sıcaklık gibi çevresel koşullar değiştiğinde, bu rolün daha da kritik hale geldiğini vurgulamışlardır. Söz konusu iki faktör, sistemin enerji üretimini doğrudan etkileyerek güneş enerjisi sistemlerinin verimliliği üzerinde belirleyici bir etkiye sahiptir. Bu bağlamda, değişken çevre koşullarında sistem verimliliğinin korunmasında MPPT'nin rolü, DC-DC dönüştürücü üzerindeki anahtarlama elamanının doluluk oranı kontrolüyle öne çıkmaktadır. Algoritma tabanlı MPPT teknolojisi, DC-DC dönüştürücünün çalışmasını kontrol etmek ve değişen koşullara rağmen sürekli olarak gerekli güç çıkışına sürmek için darbeler üretir ve burada algoritmaların rolü maksimum güç noktasını izlemedeki hızlarıyla vurgulanmaktadır. Nadkarni ve ark. (2018), çalışmalarında iki farklı algoritma kullanmıştır: geleneksel P&O algoritması ile DC-DC dönüştürücü tabanlı IC algoritması. Bu algoritmalar MATLAB/Simulink ortamında simüle edilmiştir. Simülasyon sonuçları, P&O algoritmasının uygulanmasının kolay olduğunu, ancak değişen hava koşullarına karşı yavaş tepki verdiğini ve maksimum güç noktası (MPP) etrafında salınımlara neden olarak güç kaybına yol açtığını ortaya koymuştur. IC algoritmasına gelince, güç noktası etrafındaki salınım sorunu ele alınmıştır ve koşullar değiştiğinde güç noktasını takip için

daha hızlı bir tepkiye sahiptir, bu nedenle P&O algoritmasından daha iyi kabul edilir.

Salem ve ark. (2021), fotovoltaik hücrelerin düşük enerji dönüşüm verimliliği ve yüksek ilk yatırım maliyeti gibi dezavantajlara sahip olduğunu, bu nedenle maksimum güç noktasının (MPP) elde edilmesi için klasik MPPT yöntemlerinin kullanıldığını belirtmiştir. Çalışmada Elbarbary ve Alranini (2021) ise sabit hava koşulları altında, sabit radyasyon yoğunluğu ve sıcaklık değerlerinde, DC-DC yükseltici dönüştürücü kullanarak iki geleneksel algoritmayı (P&O ve IC) karşılaştırmak amacıyla bir simülasyon gerçekleştirmiştir. Elde edilen simülasyon sonuçları, standart test koşullarında (sıcaklık = 25 °C, radyasyon yoğunluğu = 1000 W/m²) P&O algoritmasının IC algoritmasına kıyasla daha hızlı tepki verdiğini ortaya koymuştur.

Onat ve Ersöz (2009) tarafından gerçekleştirilen çalışmada; P&O, Sabit Gerilim ve Akım, Artan İletkenlik ile Parazit Kapasite yöntemleri teorik düzeyde karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Söz konusu yöntemlerin her biri için temel çalışma prensipleri ile birlikte karakteristik denklemler detaylı biçimde sunulmuştur. Sekiz farklı parametre esas alınarak yapılan karşılaştırma, ilgili yöntemlere ait verilerin yer aldığı tablo aracılığıyla analiz edilmiş ve en yüksek verime sahip tasarım parazit kapasite algoritması olarak gözlenmiştir.

Xuenjun (2004) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, Değiştir ve Gözle yöntemi detaylı olarak ele alınmış ve yöntemin performansını artırmaya yönelik iyileştirmeler önerilmiştir. Özellikle yöntemin düşük takip ve yanıt hızları gibi dezavantajlarını ortadan kaldırmak amacıyla akım tepe değeri kontrolü ile anlık örnekleme teknikleri kullanılmıştır. Hem simülasyon hem de deneysel ortamda gerçekleştirilen uygulamalar sonucunda, klasik P&O algoritmasına kıyasla önemli ölçüde takip doğruluğu ve dinamik yanıt süresinde iyileşmeler elde edildiği gözlenmiştir.

Yu ve Lin (2010) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, bir fotovoltaik (PV) sistemin davranışlarını incelemek amacıyla bir simülasyon modeli geliştirilmiştir. Gerilim seviyesinin istenilen aralıklarda ayarlanabilmesi için sistemde Buck/Boost tipi bir DC-DC dönüştürücü kullanılmıştır. Çalışmada, üç farklı Maksimum Güç Noktası Takibi

(MPPT) algoritması Değiştir ve Gözle, Artan İletkenlik ve Tepe Tırmanma yöntemleri birbirleriyle karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir. Matlab/Simulink ortamında gerçekleştirilen benzetim çalışmaları kapsamında, söz konusu algoritmaların farklı iklim koşulları altındaki dinamik tepkileri değerlendirilmiş ve performans farkları ortaya konulmuştur.

Faranda ve Leva (2008) tarafından yürütülen çalışmada; kısa devre akımı, sabit gerilim, P&O ile IC gibi klasik MPPT yöntemleri, farklı ışıınım seviyeleri altında MATLAB/Simulink ortamında karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir. Bu algoritmalar; takip hızı, uygulanabilirlik düzeyi, maliyet etkinliği ve verimlilik açısından değerlendirilmiştir. Gerçekleştirilen testlerin sonuçlarına göre, P&O ve IC algoritmalarının, diğer yöntemlere kıyasla daha yüksek performans sergilediği ve genel sistem başarımı açısından avantaj sağladığı belirlenmiştir.

C. Hua ve C. Shen (1998) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, gerilim geri beslemeli kontrol algoritması ile güç geri beslemeli kontrol algoritması ve yaygın olarak kullanılan P&O ile IC algoritmaları, iki farklı güneş ışıınıma koşulu altında karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Yapılan değerlendirmeler sonucunda, her iki ışıınım düzeyinde de en yüksek performansı sergileyen tekniğin IC algoritması olduğu belirlenmiştir.

T. Eswam ve arkadaşları (2007) ise, 19 farklı Maksimum Güç Noktası Takibi (MGNT) algoritmasını maliyet ve performans kriterleri doğrultusunda değerlendirdikleri kapsamlı bir çalışma sunmuştur. Araştırmacılar, farklı uygulama senaryoları için farklı algoritmaların daha uygun olabileceğini belirtmişlerdir. Örneğin, uzay ve uydu teknolojilerinde performansın kritik öneme sahip olması nedeniyle maliyetin ikinci planda kaldığı ve bu bağlamda P&O ve IC algoritmalarının tercih edilebileceği ifade edilmiştir. Buna karşılık, güneş enerjili araçlar gibi hızlı tepkime gerektiren sistemlerde ise bulanık mantık (Fuzzy Logic), yapay sinir ağları (Neural Network) ve RCC (Ripple Correlation Control) yöntemlerinin daha uygun seçenekler olduğu vurgulanmıştır. Yerleşim alanlarında kurulu fotovoltaik sistemler içinse, hem hızlı maksimum güç noktası takibi hem de yatırım geri dönüş süresinin kısaltılması amacıyla IC algoritmasının tercih edilmesi önerilmiştir.

Dong Jie, Zhang Chun-jiang ve Li Yan-bang (2012) tarafından yapılan çalışmada ise, Değiştir ve Gözle algoritmasının iki farklı varyantı biri doluluk-boşluk oranı (duty cycle) değişimine, diğeri ise referans gerilim değişimine dayalı karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Çalışmada, her iki algoritmanın çalışma prensipleri açıklanmış ve her iki yöntem, benzer çevresel koşullarda tipik bir fotovoltaiik sistem üzerinde simülasyon yoluyla uygulanarak karşılaştırılmıştır.

Morales (2010) tarafından yürütölen çalışmada, üç farklı MPPT algoritması P&O, IC ve Bulanık Mantık Denetleyicisi karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir. Simölasyon temelli değeriendirmeler sonucunda, Bulanık Mantık Denetleyicisi yöntemi düşük performans sergilemesi nedeniyle uygun bulunmamış ve analiz dışında bırakılmıştır. Çalışmanın bulgularına göre, P&O ve IC algoritmalarının benzer düzeyde performans gösterdiği, ancak yapısal olarak daha sade ve uygulanabilir olması nedeniyle P&O yönteminin tercih edilmesinin daha uygun olacağı sonucuna varılmıştır.

Chowdhury ve çalışma arkadaşları (2016) ise, gerçekleştirdikleri araştırmada MPPT yöntemi olarak Değiştir ve Gözle algoritmasını uygulamışlardır. Çalışmada yalnızca simölasyon verileri değil, aynı zamanda deneysel sonuçlara da yer verilerek gerçek sistem davranışı kapsamlı biçimde değeriendirilmiştir. Uygulama kapsamında Buck tipi azaltan dönüştürücü kullanılmış; mikrodnetleyici olarak ise Arduino Nano tercih edilmiştir. Dönüştürücü devresine ilişkin teorik altyapı ve temel denklemler detaylı biçimde sunulmuş, deneysel gözlemler doğrultusunda sistemin beklenildiği üzere maksimum güç noktası civarında salınım davranışı gösterdiği gözlenmiştir.

2.2 Artan iletkenlik

Banu ve çalışma arkadaşları (2013), düşüren tipte bir DC/DC dönüştürücü devresi kullanarak, IC ve P&O algoritmalarının farklı çevresel koşullar altındaki performanslarını MATLAB/Simulink ortamında karşılaştırmalı olarak incelemişlerdir. Gerçekleştirilen simölasyonlar sonucunda, farklı doluluk oranlarında yapılan analizlerde IC algoritmasının, maksimum güç noktasına ulaşma açısından P&O yöntemine kıyasla daha yüksek tepki hızına sahip olduğu gözlemlenmiştir.

Li ve arkadaşları (2016) tarafından yürütülen başka bir çalışmada ise, Artan İletkenlik algoritması kullanılarak değişken çevre koşulları altında maksimum güç noktası takibi gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmanın özgün yönü, klasik IC algoritmasında kullanılan sabit büyüklükteki adım boyutu yerine, değişken adım boyutuna dayalı bir yaklaşımın tercih edilmiş olmasıdır. Başlangıç adım büyüklüğü, açık devre gerilimi ile maksimum güç noktası gerilimi arasındaki doğrusal ilişkiye dayanarak belirlenmiştir. Geliştirilen yöntem öncelikle MATLAB/Simulink ortamında modellenmiş ve simülasyonları yapılmış; ardından sistem, bir güneş paneli simülatörü ve artıran (boost) tipi DC/DC dönüştürücü ile deneysel düzlemde uygulanarak doğrulanmıştır.

Sahoo ve Singh (2016), yaptıkları çalışmalarında Artan İletkenlik Yöntemi üzerinde çalışmışlardır. Sabit adım boyutuna (step size) sahip algoritma yerine adım boyutunun sürekli değiştirilmesine dayalı adaptif bir algoritma öne sunmuşlardır. Klasik algoritma ve önerdikleri adaptif algoritmayı simülasyon ortamında denemişlerdir.

Gupta ve çalışma arkadaşları (2017), gerçekleştirdikleri araştırmada değişken hava koşulları altında Artan İletkenlik yöntemi ile çeşitli diğer MPPT algoritmalarının performanslarını karşılaştırmalı olarak incelemişlerdir. Söz konusu analizler, MATLAB/Simulink platformunda yürütülen simülasyon tabanlı deneyler aracılığıyla gerçekleştirilmiştir.

D. P. Hohm ve M. E. Ropp (2003) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, üç farklı Maksimum Güç Noktası Takibi (MGNT) algoritması aynı deneysel platform üzerinde karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir. İncelenen algoritmalar arasında P&O, IC ve Sabit Gerilim (Constant Voltage- CV) yöntemleri yer almaktadır. Elde edilen bulgular doğrultusunda, P&O algoritmasının yaklaşık %97'ye ulaşan verim değeriyle diğer iki algoritmaya kıyasla daha üstün bir performans sergilediği belirlenmiştir.

Kırcıoğlu ve çalışma arkadaşları (2018) ise gerçekleştirdikleri araştırmada, bir fotovoltaiik simülatör ile SEPIC tipi DC-DC dönüştürücü kullanarak, Artan İletkenlik ve Değiştir ve Gözle algoritmalarını değişken ışıınım koşulları altında karşılaştırmalı olarak değerlendirmişlerdir. Bu kapsamda her iki yöntemin farklı radyasyon seviyeleri altındaki

dinamik tepkileri analiz edilmiştir.

Khodair ve ark. (2020), araştırmacı iki geleneksel algoritma olan P&O algoritması ile IC algoritması arasında karşılaştırmalı bir çalışma sunar ve değişken adım boyutu değiştirilmiş iki algoritmayla (M-VSS-P&O ve M-VSS-IC) karşılaştırılır ve bu algoritmalar, bir DC-DC yükseltici dönüştürücünün duty cycle değerini kontrol etmek için MPPT kontrol tekniği aracılığıyla uygulanır. Simülasyon, üç farklı tipte güneş paneli (polikristalin KC200GT, monokristalin SQ85 ve ST40 ince film güneş hücreleri) ile MATLAB/Simulink kullanılarak yapılmıştır. Fotovoltaik sistemin simülasyonu, standart test koşulları (STC) altında dört algoritma ile gerçekleştirilip güneş radyasyonunun biçimlerinin değiştiği koşullar altında test edilmiştir. Araştırmacılar tarafından elde edilen simülasyon sonuçları, modifiye edilmiş geleneksel algoritmaların (M-VSS-P & O ve M-VSS-IC), MPP izleme hızı, verimlilik ve performans açısından geleneksel algoritmalara (P&O, IC) göre üstün olduğunu göstermiştir.

2.3 Bulanık mantık ve yapay sinir ağı

Salah ve Ouali (2011) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, fotovoltaik (PV) sistemler için Bulanık Mantık (Fuzzy Logic) ve Yapay Sinir Ağı (Artificial Neural Network- ANN) tabanlı MPPT kontrolörleri geliştirilmiştir. Her iki kontrolörde de sistem giriş değişkenleri olarak güneş ışıınımı ve PV hücre sıcaklığı kullanılmıştır. Yapılan simülasyonlar ve deneysel testler sonucunda, söz konusu yapay zekâ tabanlı kontrolörlerin klasik MPPT algoritmalarına kıyasla daha yüksek performans sergilediği ortaya konmuştur.

Bouchafaa ve çalışma arkadaşları (2011) ise PV sistemlerinde maksimum güç noktası izleme amacıyla bulanık mantık temelli bir kontrol algoritması önermişlerdir. Bu algoritma, P&O ile IC yöntemleriyle karşılaştırılmış ve önerilen yöntemin salınımları azalttığı ve izleme doğruluğunu artırdığı gözlemlenmiştir.

Chekired ve arkadaşları (2011), değişken sıcaklık ve ışıınım koşulları altında çalışan bir fotovoltaik sistem için bulanık mantık tabanlı bağımsız bir MPPT algoritması

geliştirmiştir. Önerilen yöntem, Xilinx Virtex-II tabanlı Memec Design Virtex-II V2MB1000 FPGA geliştirme kartı üzerinde uygulanmış ve donanımsal olarak test edilmiştir.

Ali Reza Reisi, Mohammad Hassan Moradi ve Shahriar Jamasb (2012) tarafından yayımlanan kapsamlı çalışmada ise çok sayıda MPPT algoritması benzetim tabanlı yaklaşımla karşılaştırılmıştır. Bu algoritmalar, çevrim içi (online), çevrim dışı (offline) ve hibrit yöntemler olmak üzere üç ana sınıfta incelenmiştir. Benzetim sonuçlarına göre, Yapay Sinir Ağları ve Bulanık Mantık temelli yöntemlerin yüksek verimle çalıştığı; buna karşın Değiştir-Gözle, Açık Devre Gerilimi ve Kısa Devre Akımı gibi geleneksel yöntemlerin izleme verimliliğinin görece düşük olduğu belirlenmiştir. Hibrit sınıfta yer alan ve akım, gerilim ile sıcaklık bilgilerini eşzamanlı kullanarak MPPT gerçekleştiren yöntem ise, karşılaştırılan tüm algoritmalar arasında en yüksek verim sağlayan yaklaşım olarak öne çıkmıştır.

Jouda vd. (2017), yaptıkları çalışmada klasik MPPT yöntemleri yerine bulanık mantık temelli bir denetleyici geliştirmişlerdir. Artıran dönüştürücü kullanılan bu sistemi değişik hava koşullarında hem simülasyon ortamında hem de gerçek zamanlı olarak denemişler ve klasik değiştir ve gözle algoritmasına göre %14 oranda daha yüksek güç elde etmişlerdir.

Putri ve ark (2019), PSO (particle swarm optimization) parçacık sürüsü optimizasyon algoritmasına dayalı MPPT teknolojisini kullanarak güneş panellerinin maruz kaldığı kısmi gölgeleme koşulları altında elektrik sisteminin verimliliğini artırmaya yönelik bir çalışma sundular. Bu çalışmada birincisi PSO'ya dayalı MPPT teknolojisi kullanan ve diğeri MPPT teknolojisi kullanmayan iki güneş hücresi tasarımını karşılaştırmak için MATLAB/Simulink kullanılarak simüle edilmiştir. Simülasyon sonuçlarına göre araştırmacı, PSO (particle swarm optimization) parçacık sürüsü optimizasyonu algoritmasının kullanılmasının sistemin performansını iyileştirdiğini ve PSC koşulları altında sistem verimliliğini artırdığını göstermiştir.

Jyothy ve Sindhu (2018), MPPT teknolojisinin değişken ışı nım ve sıcaklık koş ulları altında fotovoltai k panellerden maksimum gücü elde etmek amacıyla Yapay Sinir Ağı (YSA) tabanlı bir algoritma ile uygulandı ğını ortaya koymuştur. Çalışmada, YSA algoritması MATLAB/Simulink ortamında simüle edilmiş ve elde edilen sonuçlar geleneksel yük kontrol yöntemleriyle karşılaştırılmıştır. (P&O, IC, FOCV (Fractional Open Circuit Voltage)) gibi simülasyon sonuçları, YSA algoritmasına dayalı MPPT teknolojisinin izleme hız ı, MPP etrafında daha az sal ınım ve daha düşük yerleşme süresi gereksinimleri yoluyla daha iyi performans sağlad ı ğını göstermiştir.

Nour (2019), fotovoltai k (PV) sistemlerde maksimum güç noktasını izlemek ve geleneksel yöntemlerin (P&O, IC) karşılaşt ı ğı sorunları aşmak amacıyla yapay sinir ağı (YSA) tabanlı bir yaklaşım kullanmıştır. Araştırmacı, YSA teknolojisinin yeterli şekilde eğitildi ğinde daha iyi yanıt verebilece ğini öne sürmüş ve literatürdeki MPPT tabanlı YSA algoritmalarında giriş parametresi olarak güneş ışı nım ı ve sıcaklık verilerinin kullanıld ı ğını belirtmiştir. Bu araştırmada araştırmacı, ANN algoritmasının performans ını iyileştirmek için yeni girdiler önermiştir ve ayrıca her katmandaki nöron sayısını, türünü ayarlayarak ANN algoritmasını tasarlamak için Genetik Algoritmayı (GA) kullanarak ikinci bir iyileştirme önermiştir. Öğrenme algoritması ve aktivasyon fonksiyonu ve sonrasında sistemi MATLAB / Simulink kullanarak simüle etmiştir. Sonuç ise de ğiştirilmiş ve geliştirilmiş ANN algoritmasının geleneksel yöntemlerden daha iyi performans, güvenilirlik ve yanıt verebilirliğ e sahip oldu ğu ve güneş sisteminin verimlili ğini artırd ı ğı gözlenmiştir.

Tez kapsamında, literatürde örnekleri bulunan çeşitli algoritmaların denendi ği, verilerin gerçek zamanlı olarak ölçüldü ğü ve en az iki farklı algoritmanın karşılaştırmalı olarak de ğerlendirilebildi ği platform çalışmalar ının say ıca sınırlı oldu ğu görülmüştür. Bu çalışma ile, farklı algoritmaların test edilmesine ve performans analizlerinin yapılmasına imkân tanıyan araştırmalara katkı sağlanması amaçlanmıştır.

3. MATERYAL ve METOT

Güneş panellerinden elde edilen enerji kapasitesinin sürekli değiştiği ve enerji verimini sürekli arttırmaya yönelik olduğu çalışmalar göz önünde bulundurulduğunda bu alanda çalışmaları yapılan mühendislik araştırmalarına katkı sunmak kaçınılmaz ve gereklilik haline gelmiştir.

Bu tür çalışmalarda, öncelikle güneş panellerinin eşdeğer modelleri, maksimum güç noktası dönüştürücüleri, DC-DC dönüştürücüler ve doluluk oranı (duty cycle) gibi kavramların literatürde nasıl kullanıldığının ve bu terimlerle neyin kastedildiğinin doğru şekilde anlaşılması gerekmektedir.

3.1 MATERYAL

3.1.1 Güneş paneli

Güneş panelleri, güneş ışınımını elektrik enerjisine dönüştüren yarı iletken yapıdaki enerji dönüşüm elemanlarıdır. Bu paneller, doğrusal olmayan bir akım-gerilim (I-V) karakteristiğine sahiptir ve panelin çıkış gerilimi ile ürettiği güç, yük tarafından çekilen akıma bağlı olarak değişkenlik göstermektedir. Bununla birlikte, panelin yüzeyine düşen ışınımın şiddeti ve açısı ile ortam sıcaklığı gibi çevresel faktörler de panelin elektriksel karakteristiğini doğrudan etkilemekte ve toplam enerji üretim miktarında önemli farklılıklara neden olmaktadır. Bu değişken koşullar altında, herhangi bir kontrol mekanizması uygulanmaksızın panel çıkışının doğrudan kullanılması, elde edilebilecek enerji miktarının önemli ölçüde azalmasına yol açmaktadır.

Bu sorunun üstesinden gelebilmek amacıyla, her bir çalışma koşulunda panel karakteristiği üzerinde yer alan maksimum güç noktasını (Maximum Power Point- MPP) sürekli olarak izleyip hedefleyen Maksimum Güç Noktası İzleme (MGNI) algoritmaları geliştirilmiştir. Bu yöntemler, fotovoltaiik modülden anlık olarak elde edilen güç verilerini analiz ederek, sistemin o anda sağlayabileceği en yüksek güç değerini tespit eder. MGNI algoritması, bu maksimum güce erişilebilmesi için gerekli kontrol işaretlerini oluşturarak, sistemin çalışma noktasını sürekli olarak bu noktaya yönlendirir ve böylece enerji

üretiminde verimlilik artışı sağlanır.

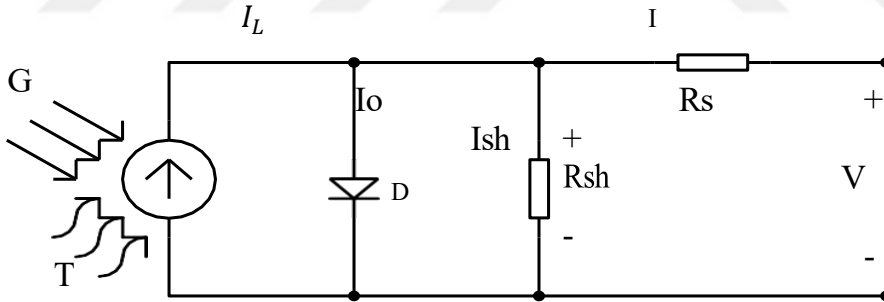
3.1.2 Güneş paneli eşdeğer matematiksel modeli ve devresi

Güneş panellerinden elde edilebilecek elektrik enerjisi belirlemek, incelemek ve analiz etmek için çeşitli elektrik eşdeğer devreleri önerilmiştir. Bunlardan tek diyotlu model olarak bilinen eşdeğer devre aşağıda verilmiştir (Şekil 3.1).

Fotovoltaik panellerin I-V karakteristiği temel olarak Eşitlik 1’de ki Shockley diyot eşitliğine dayanmaktadır. Ancak tam bir gösterim için diğer parametreleri içeren genel güneş pili eşitliği Eşitlik 2’deki gibi verilmiştir.

$$I = I_0 \left[e^{\frac{qV}{kT}} - 1 \right] \quad (1)$$

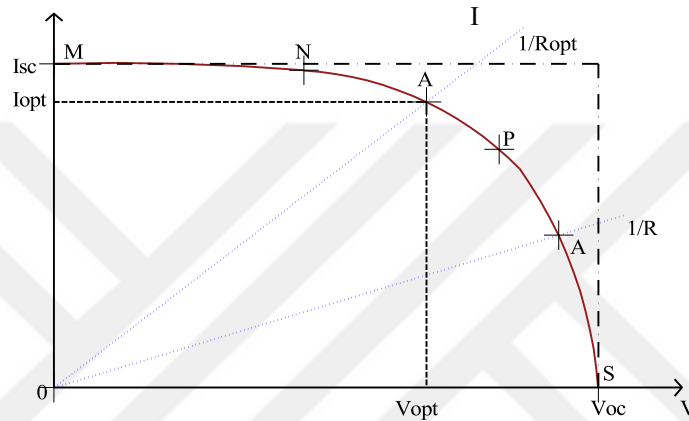
$$I = I_L - I_0 \left[e^{\frac{q(V+R_s I)}{nkT}} - 1 \right] - \frac{V+R_s I}{R_{sh}} \quad (2)$$



Şekil 3.1 FV panel eşdeğer devre modeli.

Burada ideallik faktörü (η), seri direnç (R_s) ve paralel direnç (R_{sh}) bu dirençten akan akım ise (I_{sh}) güneş pilinin özelliğine göre değişen parametrelerdir. Diğer parametreler ise Boltzmann sabiti (k), elektron yükü (q) ve güneş pilinin sıcaklığı (T) dir. Panel çıkışlarından okuduğumuz gerilim (V) dir. Panel üzerine düşen ışığın şiddeti (G) dir. Diyota ilişkin diyot akımı (I_0) dır. Burada (I_L) güneş ışıyım akımı olarak geçer ve hücrenin ışıktan elektrik enerjisi üretme kapasitesi ile ilgilidir. Panel çıkış akımı ise (I) dır. FV Panelinin tipik I-V karakteristiği sabit sıcaklık (T) ve belirli bir ışık şiddeti (G)

için Şekil 3.2'deki gibidir. Omik bir yük için yük karakteristiği doğrusal olarak $I/V = 1/R$ 'nin eğimi olarak bulunabilir. Yüke aktarılan gücün sadece dirence bağlı olduğu söylenebilir. Buna göre şayet R yükü çok küçükse FV paneli Şekil 3.2'deki M-N aralığında bir akım kaynağı olarak kısa devre akımına yakın bir akım değerinde çalışacaktır. Şayet R yükü oldukça büyük değerdeyse bu durumda da FV panel eğrinin P-S aralığında sabit bir gerilim kaynağı olarak açık devre gerilimine yakın bir gerilim değerinde çalışacaktır (Hansen A. D).



Şekil 3.2 Fotovoltaik panel tipik akım-gerilim (I-V) karakteristiği.

Yüke aktarılan gücün maksimum olduğu noktaya maksimum güç noktası denir. Ve bu nokta Şekil 3.2'de A (I_{opt} , V_{opt}) noktasıdır. Bu nokta için yükün aldığı uygun değer R_{opt} olur. Maksimum güç P_{max} ise Eşitlik 3'deki gibi yazılabilir.

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

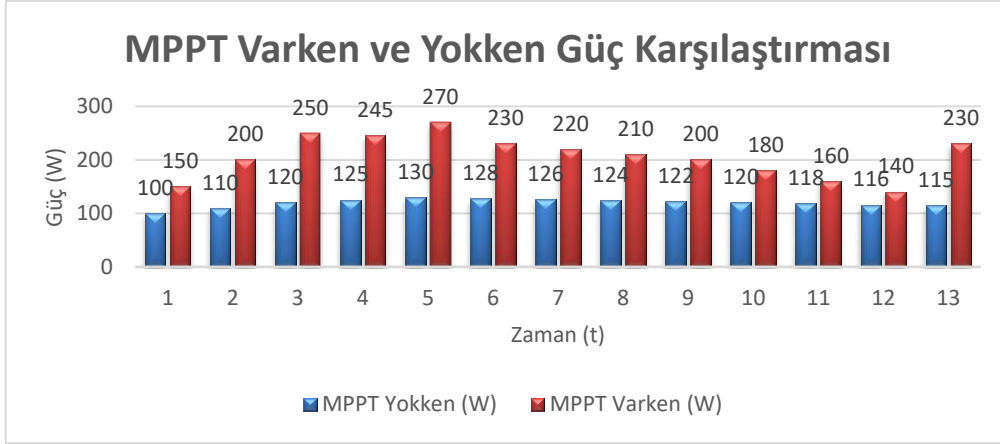
3.1.3 Panelin maksimum güç noktası

Üstteki grafikten (Şekil 3.2)'de anlaşılabacağı üzere FV paneller doğrusal olmayan (non-linear) bir yapıya sahiptir. Güneş paneli bir kaynak ve çıkışına bağlanan direnç yük olarak düşünüldüğünde yüke maksimum gücü transfer edebilmek için panel direnci/empedansı ile yük direnci/empedansının eşit olması gerekmektedir. Yükün direncinin/empedansının sabit olduğunu ve kaynağın/güneş panelinin direncinin/empedansının da pek çok parametreye göre doğrusal olmayan bir karakteristikle değiştiğini düşündüğümüzde bu

iki direnci/empedansı eşitlemenin yolu kaynak ile yük arasına bir DC/DC dönüştürücü bağlamak ve dönüştürme oranını bir maksimum güç izleyici kontrolör ile denetlemektir. Bu kontrol işlemi maksimum güç noktası takibi (maximum power point tracking-MPPT) algoritması adı verilen yöntemler kullanılarak gerçekleştirilmektedir. Güneş panellerinin maksimum güç noktası (Maximum Power Point – MPP), ortam koşullarına bağlı olarak değişkenlik göstermektedir. Yükün değişmesi, ışınım şiddetindeki dalgalanmalar ve ortam sıcaklığındaki farklılıklar gibi etkenler, bu noktada meydana gelen kaymaları doğrudan etkilemektedir. Bu nedenle, fotovoltaik sistemlerden en yüksek düzeyde verim elde edilebilmesi için panelin çalışma noktasının her an maksimum güç noktasında tutulması gerekmektedir. Başka bir ifadeyle, sistemin performansını optimize edebilmek adına dinamik koşullara uyum sağlayarak MPP'nin sürekli izlenmesi ve bu noktada çalışma zorunluluğu ortaya çıkmaktadır (Bakım,2016). Maksimum güç noktası izleme algoritmalarını kullanmanın amacı, fotovoltaik güneş modüllerinden maksimum kullanılabilir gücü elde etmektir. Bu algoritmalar şebekeden bağımsız FV sistemleri ve şebekeye bağlı FV sistemleri için de uygulanabilir. Maksimum güç noktası izleyicisi, FV sisteminin mümkün olan maksimum gücü üretmesine izin vermek için bazı akıllı yöntemler kullanarak FV panellerini çalıştıran elektronik sistemdir. Maksimum güç noktası izleme süreci, izleme sisteminin, güneş panellerini doğrudan güneşe daha fazla yönlendirecek şekilde fiziksel olarak hareket ettiren bir mekanik olduğu anlamına gelmez. Fotovoltaik (FV) panellerin verimliliğini doğrudan etkileyen çok sayıda parametre bulunmaktadır. Bu nedenle, sistem performansını artırmak amacıyla güneş takip mekanizmaları gibi ilave teknolojiler sisteme entegre edilebilmektedir. Ancak, çevresel koşullar sürekli değişkenlik gösterdiğinden, panelin her zaman optimum verimle çalışabilmesi için Maksimum Güç Noktası Takibi (MPPT) yöntemlerinin uygulanması gerekmektedir.

MPPT algoritmaları, fotovoltaik panellerin güç üretim verimliliğini önemli ölçüde artıran kontrol tabanlı tekniklerdir. Bu tekniklerin uygulanması sayesinde, kontrolsüz sistemlere kıyasla elde edilen çıkış gücünde yaklaşık %45'e varan artış sağlanabildiği belirtilmiştir (Panwar, 2012). Şekil 3.3'te MPPT kullanılan ve kullanılmayan sistemlerden elde edilen güç çıktıları karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Elde edilen güç değeri; güneş ışınımı, sıcaklık ve benzeri çevresel değişkenlere bağlı olarak, yalnızca belirli bir akım-gerilim

(I-V) kombinasyonu üzerinden maksimum seviyeye ulaşmaktadır.



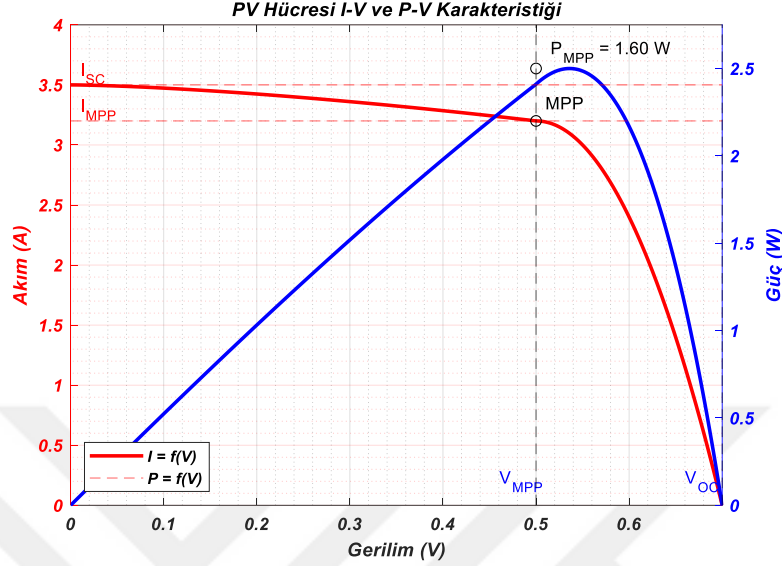
Şekil 3.3 MPPT'nin panel çıkış gücüne etkisi.

Fotovoltaik (FV) karakteristik eğrisi üzerinde yer alan belirli bir nokta, panelin maksimum güç üretim kapasitesini temsil etmektedir (Chaichan, 2015). Bu maksimum güç noktasının (Maximum Power Point- MPP) etkin bir şekilde belirlenebilmesi için, FV sistem ile bağlı olduğu yük arasına uygun bir izleme algoritması veya kontrol mekanizmasının entegre edilmesi gerekmektedir. Sistem performansını etkileyen çevresel parametrelerdeki değişimleri sürekli takip eden bir kontrol yapısının bulunması, panelin sağladığı enerjiden en yüksek oranda faydalanılması ve genel verimliliğin artırılması açısından kritik öneme sahiptir.

FV panelin elektriksel karakteristiği dikkate alındığında, panelin maksimum güçte çalışıyor olması, bu enerjinin doğrudan ve tam olarak yük devresine aktarılabilirdiği anlamına gelmemektedir. FV paneller, oldukça geniş bir akım ve gerilim aralığında çalışabilme özelliğine sahiptir ve bu durum, performanslarının büyük ölçüde çevresel faktörlere bağlı olmasından kaynaklanmaktadır. Şekil 3.4'te gösterildiği üzere, bu geniş çalışma aralığı içerisinde yalnızca tek bir noktada güç üretimi maksimuma ulaşmakta ve bu nokta sistemin maksimum güç noktası olarak tanımlanmaktadır (Özçelik, 2015).

Ancak söz konusu nokta, sabit bir değerde kalmamakta; ısınım şiddeti, ortam sıcaklığı, panelin eğim açısı, fiziksel eskime (yaşlanma) gibi çeşitli çevresel ve yapısal etmenlere bağlı olarak sürekli değişmektedir. Bu nedenle, sistemin gerçek zamanlı olarak bu

değişken maksimum güç noktasını takip etmesi ve çalışma koşullarını bu noktaya uyarlayacak şekilde düzenlemesi büyük önem arz etmektedir.



Şekil 3.4 PV panelin çalışma eğrisi ve maksimum güç noktasının değişimi.

Şekilde (Şekil 3.4) görüldüğü gibi iki eğri tam doğrusal olmayan nonlinear bir eğridir. Panelin ürettiği güç doğrudan yüke aktarılması için bağlandığında, panel çıkışı nadiren maksimum güç noktasında çalışmış olacaktır ve bu çalışma noktası optimal değildir. MPPT sistemlerin yük ve panel arasına bağlanmasıyla bu durum kontrol altına alınmış olmaktadır. MPPT sistemi, çevresel koşulların takibinden sonra FV sistemin bu noktada çalışmasını ve her değişiklikte de bu noktanın tespit edilmesiyle o noktada çalışmasına devam etmesini sağlamaktadır. Önceki bölümde de anlatıldığı üzere bu noktayı bulmak için literatürde farklı çalışmalar yapılmıştır. Bunlardan bazıları ve yapılan örnekler şu şekildedir; P&O, IC ve tepe tırmanma (HC) algoritmaları yaygın olarak geleneksel MPPT algoritmaları olarak bilinir.

3.1.4 MPPT Algoritmaları

MPPT algoritmaları, PV sistemlerden elde edilecek enerjinin maksimize edilmesini sağlayan kontrol yöntemleridir. PV panellerden üretilen akım ve gerilim değerleri panel yüzeyine ulaşan ışıyım miktarına, sıcaklığa ve gölgelenme durumuna bağlı olarak değişkenlik göstermektedir (Ali *et al.* 2020; Mohanty *et al.* 2014; Bendib *et al.* 2015;

Selvan & Nair, 2016; Singh & Gupta, 2018; Mohapatra *et al.* 2017). PV panellerde sistemin her koşulda MPP’de çalışması istenmektedir. MPPT algoritmaları panelden üretilen akım ve gerilim değerlerini sürekli izleyerek sistemin maksimum noktada çalışmasını sağlayacak çalışma noktasını belirlemektedir. Bu sayede panellerden elde edilen gücün en yüksek seviyede olması sağlanmaktadır. Bu algoritmalar PV sistemlerde verimliliği artırırken aynı zamanda enerji maliyetini azaltmaktadır. MPPT algoritmalarının MPP’yi izleme yöntemlerine göre sınıflandırılması tablo 3.1’de verilmiştir.

Tablo 3.1 MPPT algoritmalarının izleme yöntemine göre sınıflandırılması (Katche et al.2023).

Klasik MPPT Algoritmaları	Akıllı MPPT Yöntemleri	Metasezgisel MPPT Algoritmaları	Hibrit Yöntemler
- Değiştir-Gözle Algoritması - Sabit Gerilim Algoritması - Dalgalanma Korelasyon Kontrol Algoritması - Tepe Tırmanma Algoritması - Kısa Devre Akım Algoritması - Artırılmış İletkenlik Algoritması	- Yapay Sinir Ağı - Bulanık Mantık Kontrol - Kayan Kipli Kontrol - Makine Öğrenmesi - Derin Öğrenme - Gauss Newton Tekniği	- Parçacık Sürü Optimizasyonu - Genetik Algoritma - Gri Kurt Algoritması - Guguk Kuşu Arama Algoritması - Arama ve Kurtarma Algoritması - Harris Şahini Optimizasyon Algoritması - En Değerli Oyuncu Algoritması - Balina Optimizasyon Algoritması - Çiçek Tozlaşması Algoritması	- Yapay Sinir Ağı+Metasezgisel - Bulanık Mantık+Metasezgisel - Makine Öğrenmesi+Metasezgisel - Bulanık Mantık+Klasik - Makine Öğrenmesi+Klasik - Derin Öğrenme+Klasik

3.1.4.1 Değiştir-Gözle (P&O) algoritması

Değiştir ve Gözle yöntemi, literatürde sıklıkla çalışılan ve uygulaması görece daha basit olan bir maksimum güç noktası izleme (MPPT) algoritmasıdır. Bu yöntem, bazı kaynaklarda 'Tepe Tırmanma' (Hill Climbing) tekniği olarak da anılmaktadır. Her iki yöntemin temel prensipleri benzerlik gösterse de aralarında önemli bir fark bulunmaktadır. P&O algoritmasında izleme süreci, panel çıkış geriliminin (V) küçük adımlarla değiştirilmesine dayanırken; Tepe Tırmanma yönteminde, sistemin kontrol parametresi olarak doluluk-boşluk oranı (duty cycle – D) esas alınmaktadır.

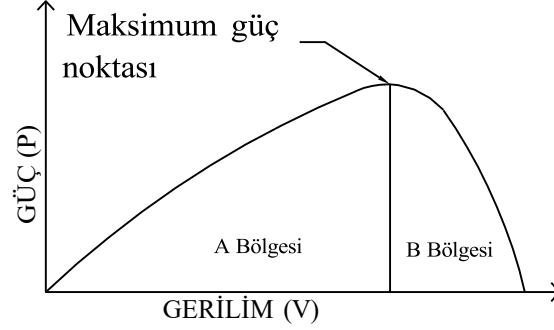
Doluluk-boşluk oranı, MPPT algoritmalarında kullanılan yarı iletken anahtar elemanının bir anahtarlama periyodu içerisindeki iletim süresinin toplam periyoda oranı olarak tanımlanır. Bu oran DC-DC dönüştürücü devrelerinin kontrolünde önemli bir parametre olup, maksimum güç noktasına ulaşılmasında belirleyici bir rol oynamaktadır.

MPPT sistemlerinde Değiştir-Gözle (Perturb and Observe) yöntemi, yaygın olarak kullanılan bir MPPT algoritmasıdır. Bu yöntem, panellerin güç çıkışını takip ederek optimum çalışma noktasını bulmaya çalışır.

Değiştir-Gözle yöntemi, basit bir geri besleme döngüsüne dayanır. İlk olarak, MPPT kontrolcüsü panellerin çıkış gerilimini ve akımını ölçer. Ardından, mevcut güç çıkışını hesaplamak için gerilim ve akım değerlerini çarpar. Bu hesaplanan güç, maksimum güç noktasına (MPP) ulaşıldığında en yüksek değeri verecektir.

MPPT kontrolcüsü, güncel güç çıkışının MPP'de olup olmadığını belirlemek için gerilimi bir miktar değiştirir. Bunun için genellikle panellerin gerilimini bir adım artırır veya azaltır. Ardından, güncellenmiş gerilimdeki güç çıkışını tekrar ölçer ve önceki değerle karşılaştırır. Eğer güncellenmiş gerilimdeki güç çıkışı artmışsa, MPPT kontrolcüsü aynı yönde bir sonraki adımı atar. Ancak, güç çıkışı azalmışsa, kontrolcü adımı ters yönde atar. Bu şekilde, MPPT kontrolcüsü MPP'ye yaklaşır ve panellerin en verimli çalışma noktasını bulur. Değiştir-Gözle yöntemi, basit ve etkili bir MPPT algoritması olmasına rağmen, bazı durumlarda hızlı geçişler ve dalgalanmalar nedeniyle tam istikrar

sağlamayabilir. Bu nedenle, daha gelişmiş MPPT algoritmaları da mevcuttur ve farklı uygulamalara göre tercih edilebilir.

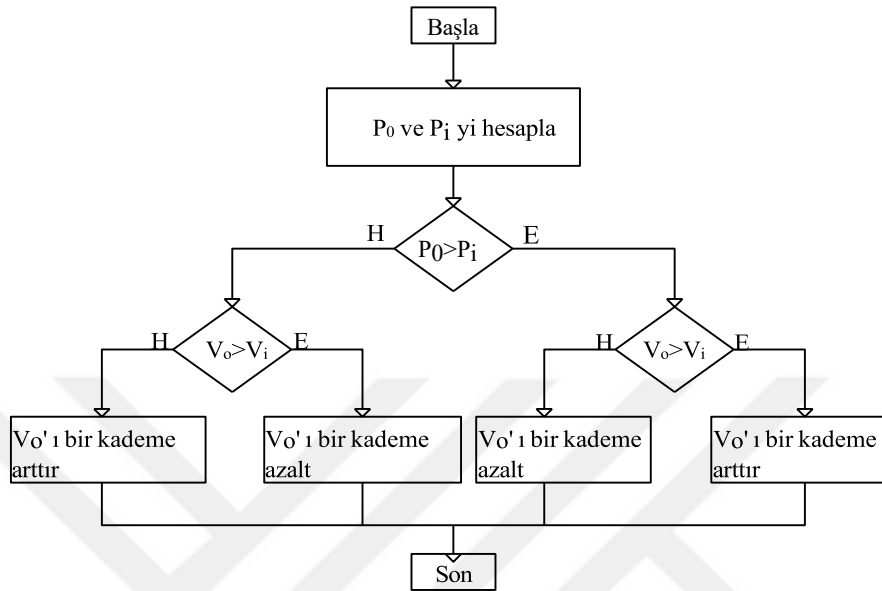


Şekil 3.5 Fotovoltaik (PV) Modül Güç-Gerilim (P-V) Eğrisinde MPP ve Çalışma Bölgeleri.

Şekil 3.5'te sunulan güç-gerilim (P-V) karakteristik eğrisi, analiz kolaylığı sağlamak amacıyla iki temel bölgeye A ve B bölgeleri ayrılmıştır. A bölgesi, çalışma noktasının Maksimum Güç Noktasına (MPP) doğru yaklaştığı alanı temsil ederken; B bölgesi, bu noktayı aştıktan sonraki kısmı ifade etmektedir. A bölgesinde, gerilim arttıkça çıkış gücü de artış göstermektedir. Diğer bir ifadeyle, sistem bu bölgede çalışırken gerilimde meydana gelen pozitif yöndeki bir değişim, panele ait çıkış gücünde de artışa neden olmaktadır. Buna karşılık, B bölgesinde ise gerilimdeki artış, çıkış gücünde azalmaya yol açmaktadır. Bu karakteristik davranışa dayanarak, izleme algoritmalarında kullanılabilecek bazı mantıksal karar durumları aşağıda sunulmuştur:

1. Durum 1: Çalışma noktası A bölgesindeyse ve gerilim artıyorsa, sistem çıkış gücü de artış gösterir.
2. Durum 2: Çalışma noktası A bölgesindeyse ve gerilim azalıyorsa, sistem çıkış gücü azalır.
3. Durum 3: Çalışma noktası B bölgesindeyse ve gerilim artıyorsa, sistem çıkış gücü azalır.
4. Durum 4: Çalışma noktası B bölgesindeyse ve gerilim azalıyorsa, sistem çıkış gücü artar.

Bu dört durum, P&O yöntemi gibi gerilim temelli MPPT algoritmalarının karar verme sürecine temel oluşturarak, sistemin MPP çevresinde kararlı bir şekilde çalışmasına katkı sağlamaktadır.



Şekil 3.6 Geleneksel P&O algoritması akış şeması.

Değiştir ve Gözle algoritması, yalnızca sınırlı sayıda parametreye dayanması, sade bir geri besleme mekanizmasına sahip olması, düşük maliyetli oluşu, kolay uygulanabilirliği ve kabul edilebilir düzeyde performans sunması nedeniyle maksimum güç noktası izleme (MGNI) uygulamalarında en yaygın kullanılan yöntemlerden biri olarak öne çıkmaktadır. Bu algoritma, atmosferik koşulların sabit olduğu durumlarda maksimum güç noktasına yakın bölgede küçük salınımlar yaparak çalışmasını sürdürmektedir. Ancak, ışıının şiddeti ve ortam sıcaklığının ani değişim gösterdiği dinamik koşullarda, MPP'yi yeterince hızlı takip edememe gibi bir zafiyeti bulunmaktadır (Kollimala, 2013; Dhivya, 2017).

Algoritmanın temel prensibi, çıkış gücü ile gerilimdeki değişimlerin işaretlerine bağlı olarak karar vermeye dayanmaktadır. Güç ve gerilim farklarının pozitif ya da negatif olmasına göre, sistem gerilim değerini artırmakta veya azaltmaktadır. Aynı zamanda, bu değişiklikler dönüştürücünün yarı iletken anahtarlama elamanının doluluk oranının (duty cycle) da ayarlamalara neden olmakta ve bu döngü, maksimum güç noktasına ulaşıncaya dek devam etmektedir (Nigam, 2016; Riby, 2017). D&G algoritmasının karar verme yapısını ve izlediği süreci gösteren akış diyagramı Şekil 3.6'da sunulmuştur.

3.1.4.2 Artan İletkenlik Yöntemi

Bu yöntemde, önceki algoritma olan P&O yöntemine benzer bir yaklaşım izlenmekle birlikte, farklı bir fotovoltaiik (PV) karakteristik eğrisinden yararlanılarak maksimum güç noktası (MPP) tespiti gerçekleştirilir. Uygulama kapsamında PV panele ait anlık akım (I) ve gerilim (V) değerleri sürekli olarak izlenir ve bu iki değişkenin türevleri olan dI ve dV 'nin oranı üzerinden analiz yapılır. Panelin akım-gerilim (I - V) karakteristiği, çalışma noktasının MPP'ye doğru hareket yönünü belirlemede temel bir referans olarak kullanılır. Görece daha karmaşık bir yapıya sahip olmasına rağmen, bu yöntem P&O algoritmasına kıyasla daha başarılı bir izleme performansı sunduğu için, özellikle sabit çevresel koşullar altında literatürde sıklıkla tercih edilen yöntemlerden biri hâline gelmiştir (Ahmed ve Miyatake, 2008).

IC algoritmasında, güç-gerilim eğrisinin türevi olan dP/dV ifadesi üzerinden güç değişimlerinin izlenmesi sağlanmakta ve bu ifadenin sıfıra eşit olduğu nokta, sistemin MPP üzerinde çalıştığını göstermektedir. Bu yaklaşımda, dI/dV oranı, PV panelin artan iletkenliği olarak değerlendirilmekte ve toplam iletkenlikle karşılaştırılarak karar mekanizması yürütülmektedir (Koutroulis ve Blaabjerg, 2012). Diğer bir ifadeyle, PV panelin gerilim değeri belirli oranlarda değiştirilerek, PV güç çıkışının değişiminin sıfıra eşit olduğu nokta maksimum güç noktası olarak kabul edilmektedir. Artan iletkenlik yöntemine ait karar bölgeleri ile maksimum güç noktası (MPP)'ni tanımlayan matematiksel ifadeler sırasıyla Eşitlik (4), Eşitlik (5), Eşitlik (6) ve Eşitlik (7)'de ayrıntılı olarak sunulmuştur.

$$\frac{dP}{dV} = \frac{d(VI)}{dV} = I + V \frac{dI}{dV} = 0 \quad (4)$$

$$\frac{\Delta I}{\Delta V} = -\frac{I}{V} = MPP \quad (5)$$

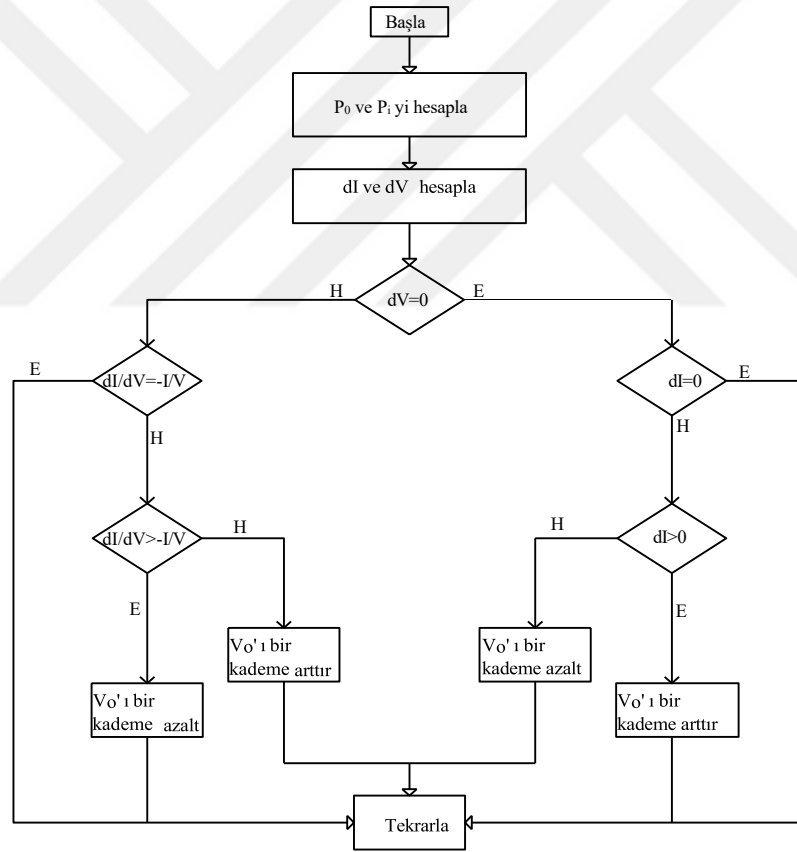
$$\frac{\Delta I}{\Delta V} > -\frac{I}{V} = MPP'nin \text{ solunda} \quad (6)$$

$$\frac{\Delta I}{\Delta V} < -\frac{I}{V} = MPP'nin \text{ sağında} \quad (7)$$

Artan İletkenlik yöntemi, Değiştir ve Gözle algoritmasına kıyasla maksimum güç noktası (MPP) çevresinde oluşan salınımı ve buna bağlı güç kaybını daha düşük seviyede tutma

avantajına sahiptir. Ayrıca, çevresel koşullarda meydana gelen ani değişimlere karşı daha hızlı tepki verebilmesi ve daha kararlı bir izleme performansı sunması, bu yöntemin tercih edilme nedenleri arasındadır. Bununla birlikte, IC algoritması da P&O yöntemiyle benzer şekilde, kısmi gölgelenme (partial shading) gibi karmaşık durumlarda sistemin global MPP noktasını tespit etme konusunda yetersiz kalmaktadır.

Şekil 3.7’de, IC yöntemine ait akış diyagramı sunulmakta olup, bu yöntemin temel karar yapısı ve izleme süreci ayrıntılı biçimde gösterilmektedir. IC algoritması, PV panelin anlık akım ve gerilim değerlerinin uygun sensörler aracılığıyla okunması ve piyasada yaygın olarak bulunan düşük maliyetli mikrodenetleyiciler yardımıyla işlenmesi yoluyla kolaylıkla uygulanabilir bir yapıya sahiptir.



Şekil 3.7 Artımlı iletkenlik (IC) akış diyagramı.

IC algoritması, ani çevresel değişimlere karşı her zaman yeterli tepkiyi verememekte ve bu durum sistemin izleme doğruluğunu olumsuz etkileyebilmektedir. Özellikle kısmi gölgelenme gibi karmaşık ışınım dağılımlarında, birden fazla yerel maksimum güç

noktası (MPP) oluşabilmektedir. Bu gibi durumlarda IC algoritması, en yüksek güç noktasına yönelmek yerine bulunduğu noktaya en yakın yerel MPP'ye ulaşmakta ve bu da potansiyel güç kayıplarına yol açmaktadır. Bunun yanı sıra, algoritmanın maksimum güç noktasına erişim hızı, kullanılan adım büyüklüğüne doğrudan bağlıdır. Daha büyük adım boyutları tercih edildiğinde MPP'ye daha hızlı ulaşmak mümkün olmakla birlikte, bu yaklaşım sistemin maksimum güç noktası etrafında kararsız salınımlar yapmasına neden olabilmektedir (Loukriz, 2016). Bu durum, özellikle istikrarlı güç üretimi hedeflenen uygulamalarda sistem verimliliğini olumsuz etkileyebilecek bir sınırlılık olarak değerlendirilmektedir.

3.1.4.3 Sabit gerilim ve sabit akım metodu

Fotovoltaik (PV) hücrelerde, maksimum güç noktasına karşılık gelen çalışma gerilimi ile açık devre gerilimi (V_{OC}) arasında sabit bir oran olduğu varsayımına dayanan sabit gerilim yöntemi (Constant Voltage – CV), bu temel prensip doğrultusunda çalışmaktadır. Bu yöntemde, PV panelin yüke bağlı olmadığı açık devre durumu oluşturularak V_{OC} değeri ölçülmektedir. Elde edilen bu açık devre gerilimi temel alınarak, panelin maksimum güç üretimini sağladığı çalışma gerilimi yaklaşık olarak hesaplanmaktadır.

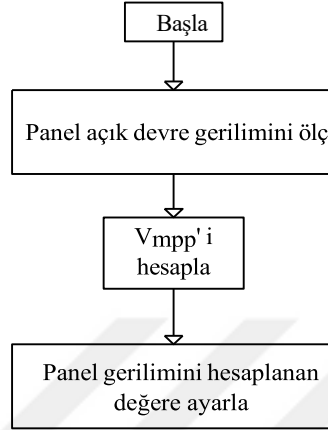
Sistemin gerilim seviyesi, darbe genişlik modülasyonu (PWM) tekniği kullanılarak ayarlanmakta ve böylece PV panelin, bu hesaplanan optimum gerilimde çalışması sağlanarak maksimum güç noktası hedeflenmektedir. Sabit gerilim yöntemine ait temel matematiksel ilişki Eşitlik (8)'de sunulmuştur.

$$V_{MPP} = k.V_{OC} \quad (8)$$

Bu yöntemde, maksimum güç noktası belirli zaman aralıklarında yapılan ölçümlerle periyodik olarak izlenmektedir. Söz konusu yöntemin temelinde yer alan 'k' katsayısı, panelin tipine bağlı olarak farklılık göstermekte olup, literatürde bu katsayının genellikle %73 ile %80 arasında bir değere sahip olduğu belirtilmektedir (Yakışan, 2008). 'k' katsayısı, aynı zamanda doldurma faktörü (fill factor) olarak da adlandırılmakta ve güneş hücresinin elektriksel modelinde yer alan seri ve paralel (şönt) direnç bileşenleri hakkında

dolaylı bilgi sağlamaktadır.

Bu yöntemin genel işleyişini ve bileşenler arasındaki ilişkiyi gösteren blok diyagramı Şekil 3.8’de sunulmaktadır.



Şekil 3.8 Sabit gerilim yöntemi blok yapısı.

Dolaylı MPPT yöntemleri sınıfında değerlendirilen sabit akım yöntemi (Constant Current Method), uygulama prensibi açısından sabit gerilim yöntemine benzerlik göstermektedir. Bu yöntemde, fotovoltaik panelin çıkış ucu kısa devre edilerek kısa devre akımı (I_{SC}) ölçülmekte ve bu değere dayanarak panelin maksimum güç noktasına karşılık gelen çalışma akımı yaklaşık olarak hesaplanmaktadır. Söz konusu ölçüm işlemi belirli aralıklarla periyodik olarak tekrarlanmakta ve sistemin bu hesaplanan akım değeri etrafında çalışması sağlanmaktadır.

Bu yönteme ait akış diyagramı, sabit gerilim metoduyla büyük ölçüde benzerlik göstermekte olup, kullanılan temel matematiksel ilişki Eşitlik (9)'da sunulmuştur.

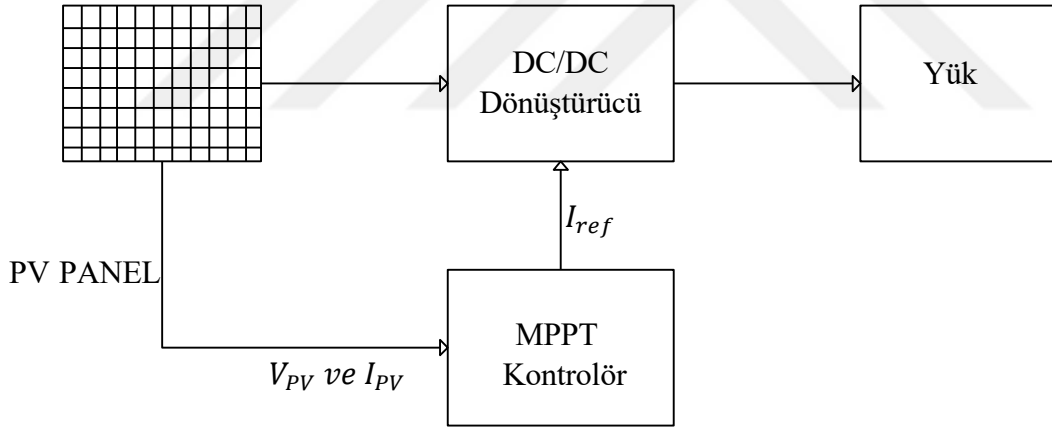
$$I_{MPP} = k \cdot I_{SC} \quad (9)$$

Her iki yöntemin uygulama kolaylığı önemli bir avantaj olarak öne çıkarken, k katsayısının doğru şekilde belirlenmesindeki zorluk ise bu yöntemlerin başlıca dezavantajı olarak ifade edilebilir.

3.1.5 Genel PV panel çalışma döngüsü

Güneş enerjisi sistemlerinin genel çalışma döngüsü Şekil 3.9’da şematik olarak sunulmaktadır. Şekilde görüldüğü üzere sistem; fotovoltaiik (PV) panel, maksimum güç noktası izleyicisi (MPPT), doğru akım–doğru akım (DC-DC) yükseltici tip dönüştürücü ve yük biriminden oluşmaktadır. Bu yapı içerisinde MPPT algoritması, PV panel tarafından üretilen enerjiden maksimum gücün elde edilmesi ve bu gücün yüke verimli şekilde aktarılması amacıyla kullanılmaktadır.

Maksimum gücün etkili biçimde aktarılabilmesi için DC-DC yükseltici tip dönüştürücü, PV panel ile yük arasındaki elektriksel uyumu sağlayan bir arayüz görevi görmektedir. Bu dönüştürücü, yarı iletken anahtarlama elemanının doluluk oranında (duty cycle) yapılan ayarlamalar yoluyla PV panelin kaynak empedansı ile yük empedansının eşlenmesini (impedance matching) sağlar. Böylece panel, maksimum güç noktasında çalıştırılarak sistemin genel verimliliği artırılmış olur (Subudhi, 2015).



Şekil 3.9 MPPT kontrollü PV sistem blok diyagramı.

3.1.6 DC/DC dönüştürücüler

Doğru akım–doğru akım (DA/DA veya DC/DC) dönüştürücüler, bir doğru akım (DC) giriş gerilimini istenilen başka bir DC gerilim seviyesine dönüştüren elektronik devre elemanlarıdır. Bu dönüştürücüler, fotovoltaiik (PV) panel ile yük arasında yer alarak, maksimum enerji aktarımını sağlayacak şekilde sistemin gerilim ve akım parametrelerini düzenlemektedir. Panel ile yük arasına entegre edilen bu yapılar, panelin ürettiği enerjiyi

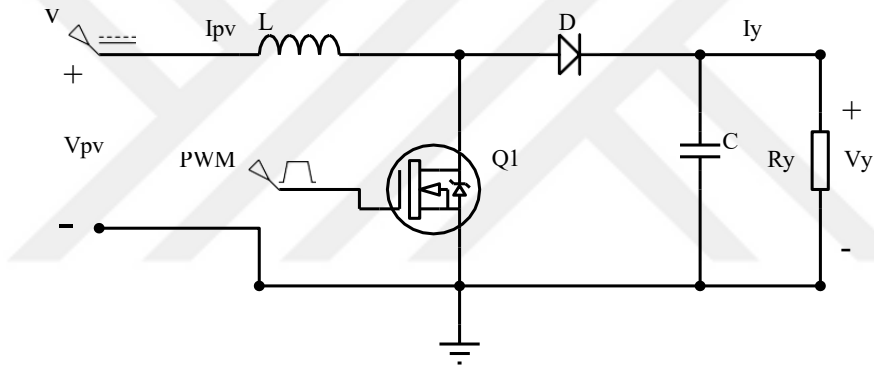
kontrol altına alarak yüke her zaman optimum düzeyde güç iletilmesini mümkün kılmaktadır.

Bu kontrol süreci, Maksimum Güç Noktası İzleme (MPPT) algoritmaları ile senkronize çalışan DC/DC dönüştürücü üzerinden gerçekleştirilmekte ve sistemin gerçek zamanlı olarak maksimum güç noktasında çalışması sağlanmaktadır. Yük tarafındaki dinamik profil değişimleri, atmosferik koşullardaki ani dalgalanmalar ve sistemin genel yapısına bağlı farklılıklar nedeniyle, literatürde çeşitli koşullara uygun çok sayıda MPPT yöntemi geliştirilmiştir.

Fotovoltaik (FV) panellerin herhangi bir dönüştürücü devre kullanılmaksızın doğrudan yüke bağlanması her ne kadar mümkün olsa da bu durumda sistemi kontrol etmek ve verimliliği artırmak neredeyse imkânsızdır. Bu sebepten dolayı yukarıda verilen kontrol yöntemlerinin uygulanabilmesi için kesinlikle dönüştürücü bir ara devreye ihtiyaç vardır. Bu dönüştürücü devreler, yüke bağlı veya bağımsız bir şekilde çıkışta istenilen değerlerin elde edilebilmesi ve aynı zamanda FV panelden elde edilen doğrusal olmayan formdaki elektrik enerjisinin filtrelenebilmesi için kullanılmaktadır. Bu ara devre elemanları DC/DC dönüştürücü devreleridir. Kullanım alanı, gelişen teknolojiyle her geçen gün genişleyen DC/DC dönüştürücüler birçok alanda yaygın olarak kullanılmaktadır. Özellikle yenilenebilir enerji kaynaklarını kullanarak elektrik enerjisi üretebilen sistemler için çok önemli olan DC/DC dönüştürücüler; elektrikli araçlar, sağlık cihazları, uzay sanayisi, haberleşme ve taşınabilir elektrikli cihazlar gibi alanlarda oldukça yaygın olarak kullanılmaktadır (Goudarzian ve ark. 2021). DC/DC dönüştürücüler izole ve izole olmayan olmak üzere iki ana başlık altında toplanmaktadır. İzole DC/DC dönüştürücüler tam köprü, yarım köprü, push-pull ve flyback vb. gibi devrelerde oluşurken izole olmayan DC/DC dönüştürücüler yükselten (boost), düşüren (buck), CUK, SEPIC ve düşüren-yükselten (buck- boost) vb. gibi devrelerden meydana gelir (Shahir ve Babaei, 2017; Jou ve ark., 2019). İzole dönüştürücüler transformatör kullanılarak elde edilir ve bu tür dönüştürücülerin ebatları transformatörden dolayı büyük olmaktadır. Yüksek frekanslı transformatör kullanılarak bu dönüştürücülerin ebatları küçültülebilmektedir. Kontrollerinin zor olması, transformatörün doyumuna gitmesi ve kaçak endüktanstan dolayı izole DC/DC dönüştürücülerin kullanımını çok tercih edilmemektedir (Samuel ve ark.,

2020). Güneş enerjisini kullanarak elektrik enerjisi üretebilen FV panellerin çıkışındaki düşük gerilim değerlerinin yüksek gerilimli ve güçlü sistemlerde kullanılabilmesi için yükselten izole olmayan DC/DC dönüştürücülere ihtiyaç vardır. İzole olmayan doğru akım–doğru akım (DC/DC) dönüştürücüler arasında yer alan yükseltici (boost) tip dönüştürücüler, giriş terminaline uygulanan gerilimi, yükün ihtiyaç duyduğu daha yüksek bir seviyeye çıkarmak amacıyla kullanılan elektronik devrelerdir. Bu tip dönüştürücülerde temel amaç, giriş geriliminde dalgalanmalar veya değişiklikler olsa dahi çıkış geriliminin belirlenen seviyede sabit tutulmasını sağlamaktır (Lopa ve ark., 2016).

Bu tez çalışmasında kullanılan yükseltici DC/DC dönüştürücüye ait temel çalışma prensibini gösteren şematik yapı Şekil 3.10’da sunulmuştur.



Şekil 3.10 PV Sistemi ile Boost Dönüştürücü devresi.

$$P_{giriş} = P_{çıkış} \quad (10)$$

$$V_{pv} * I_{pv} = V_y * I_y \quad (11)$$

$$V_{pv} * \frac{V_{pv}}{R_g} = V_y * \frac{V_y}{R_y} \quad (12)$$

Boost dönüştürücüye ait çıkış gerilimi;

$$V_y = \frac{V_{pv}}{1-D} \quad (13)$$

şeklindedir ve DC/DC boost dönüştürücünün temel gerilim kazanç eşitliğidir. D ne kadar artarsa, çıkış gerilimi de o kadar yükselir. Ancak D %100'e yaklaşırsa, teorik olarak çıkış

sonsuz olur ki bu pratikte mümkün değildir (anahtar, diyot ve diğer kayıplar dikkate alınır).

$$D = 1 - \frac{V_{pv}}{V_y} \quad (14)$$

Bu ifade, Eşitlik (13) ve Eşitlik (12)'de yerine konur.

$$\frac{V_{pv}^2}{R_g} = \frac{V_{pv}^2}{(1-D)^2 R_y} \quad (15)$$

Buradan, panel tarafına indirgenmiş yük direnci değeri belirlenir.

$$R_g = (1 - D)^2 * R_y \quad (16)$$

Eşitlik (16)'da elde edilen R_g değeri, Şekil 3.10'daki sistemde, tek diyotlu FV hücre/panel tarafına indirgenmiş/yansıyan direnç eşdeğeridir.

$$R'_y = R_g \quad (17)$$

Eşitlik (16)'dan görüldüğü gibi, güneş panel sistemini maksimum güç noktasında çalıştırmak için, Boost dönüştürücünün iletim oranı (D) değiştirilerek, istenen yük değerleri belirlenebilir.

Çeşitli koşullar altında, güneş panelinin maksimum güç noktasında çalıştırılması istenir. Bu amaçla, güneş paneli ile yük arasına DC/DC dönüştürücü devreleri eklenir. DC/DC dönüştürücü olarak, genellikle boost devresi kullanılır. Bu nedenle çalışmada, Boost yapısı ele alınmıştır (Şekil 3.10). Ancak, diğer yapılar için de analiz yöntemi geçerlidir. Şekil 3.10'daki sistemde, dönüştürücünün çıkışına bağlanan yükün, panel tarafına yansıyan/indirgenmiş değerinin belirlenmesinde güç dengesi kullanılır. Tüm ideal dönüştürücülerde olduğu gibi, boost dönüştürücüde de giriş gücü çıkış gücüne eşittir (Rashid 2011, Erickson 2001, Mohan 2003). Dönüştürücünün giriş gerilim akım değerleri (dolayısıyla FV panelin çıkış gerilim akım değerleri), V_{pv} , I_{pv} , yük tarafındaki çıkış

gerilim-akım değerleri V_y , I_y olmak üzere eşitlikler elde edilecektir. R_y , yük direncini, R_g , dönüştürücünün girişinden görülen dolayısıyla panel tarafına indirgenmiş yük direncini ifade etmektedir. D ise Duty Cycle, PWM sinyalinin açık kalma oranıdır (Eşitlik 18).

Devredeki anahtar (MOSFET veya IGBT) bir periyotta ne kadar süre açık (iletimde) kalıyorsa, bu orana D denir.

$$D = \frac{T_{on}}{T_{on}+T_{off}} = \frac{T_{on}}{T_s} \quad (18)$$

D: Duty Cycle (0 ile 1 arasında bir değer veya % cinsinden ifade edilir).

T_{on} : Anahtarlama elemanının açık (iletimde) olduğu süre.

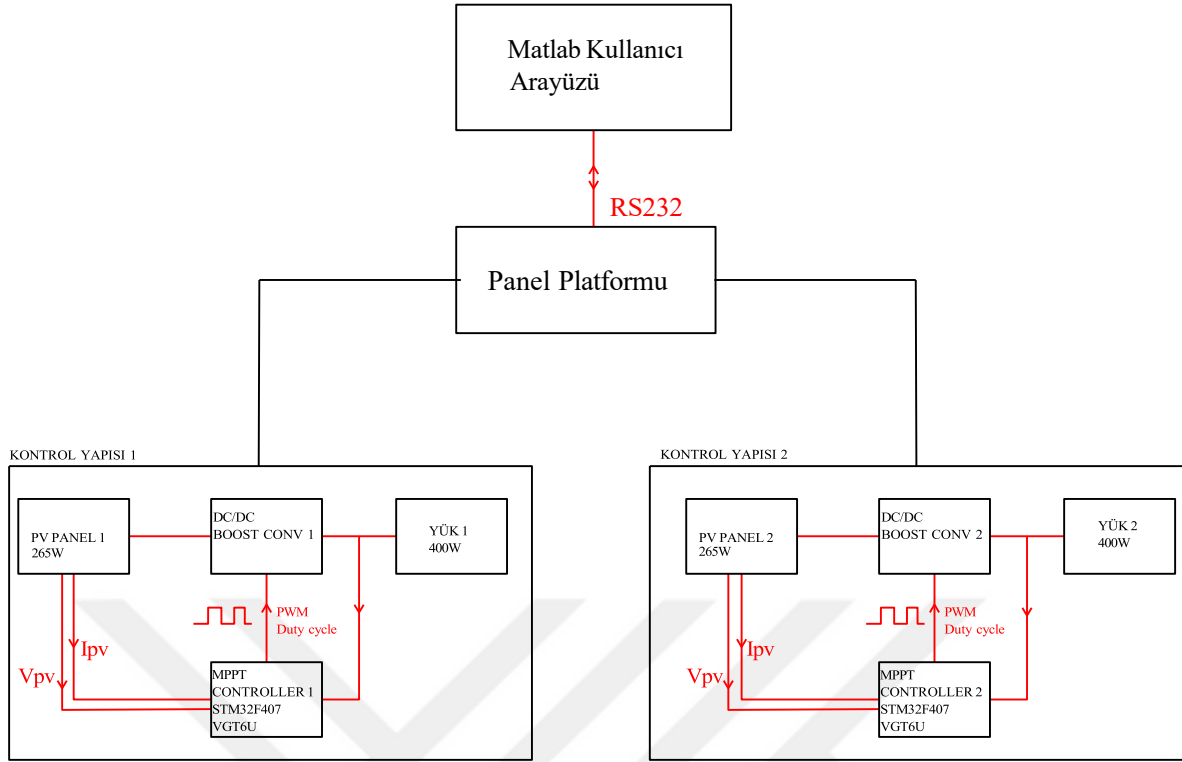
T_{off} : Anahtarın kapalı olduğu süre.

T_s : Toplam periyot süresi.

3.2 METOT

Bu bölümde, tez kapsamında geliştirilen genel sistemin blok şeması ile birlikte, sistemin temel bileşenlerinden biri olan DC/DC dönüştürücü devresinin tasarımı ayrıntılı bir şekilde ele alınacaktır. Tasarım sürecinde izlenen metodoloji, devre topolojisinin belirlenmesi ve kullanılan kontrol stratejileri açıklanacaktır. Ayrıca, tasarlanan dönüştürücü kartlarında tercih edilen elektriksel bileşenler, seçim kriterleri ve bu donanımın sistem performansına olan etkileri değerlendirilecektir. Devre yapısının fiziksel yerleşimi ve uygulama alanına uygunluğu da kapsamlı şekilde sunulacaktır.

Sistem, temel olarak kontrol devrelerinin yer aldığı panel platformu ile veri alışverişi sağlayan bilgisayar tabanlı MATLAB arayüzünden oluşmaktadır. Bu yapı ile sistem parametrelerinin izlenmesi, kontrol edilmesi ve veri analizi gerçek zamanlı olarak ölçülebilmektedir. Geliştirilen platform hem donanım hem de yazılımsal bileşenlerin etkileşimini sağlamak üzere yapılandırılmış olup, kullanıcıya müdahale imkânı sunan etkileşimli bir kontrol ortamı sağlamaktadır. Tasarımı yapılan platformun genel sistem yapısını gösteren şematik gösterimi Şekil 3.11’de ayrıntılı biçimde sunulmuştur.

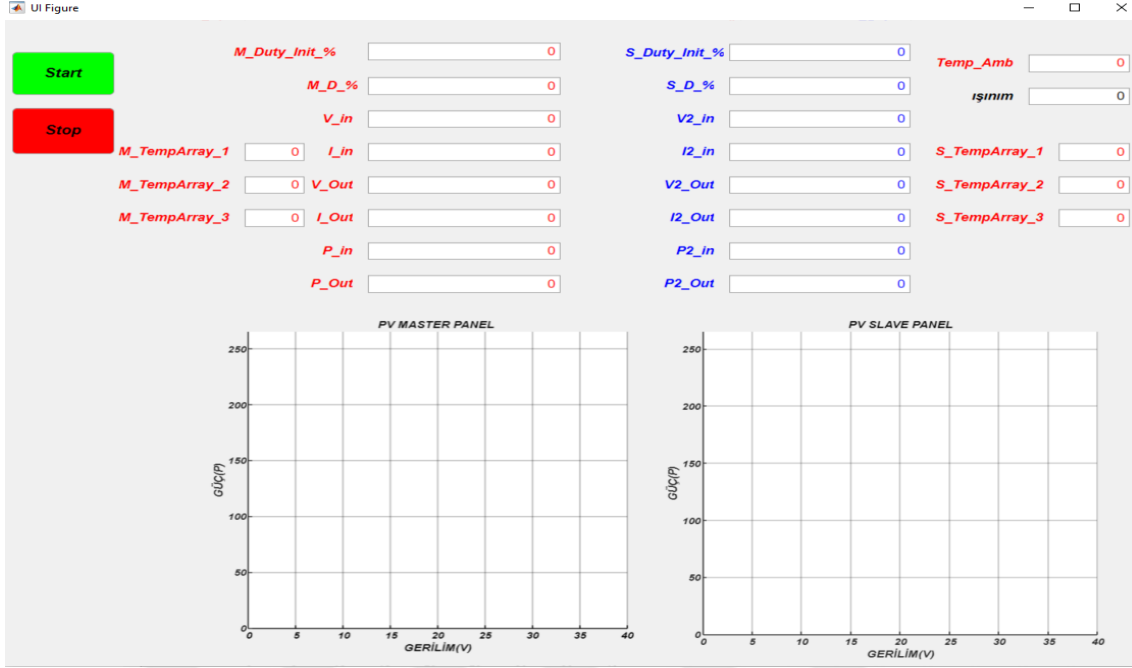


Şekil 3.11 Platform sistemin genel yapısı.

3.2.1 Matlab Arayüzü

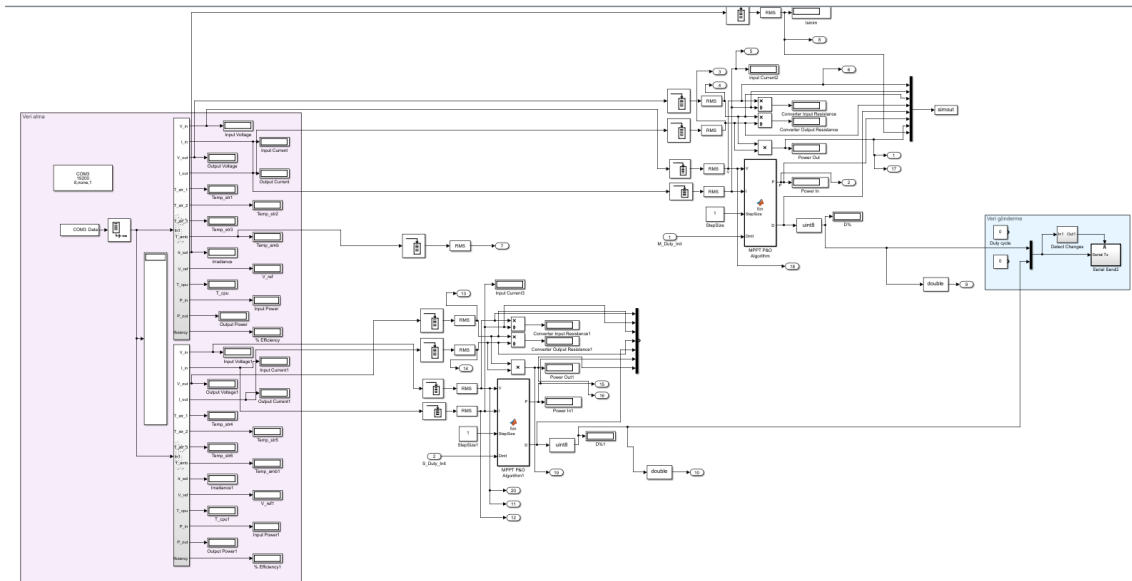
DC/DC dönüştürücü devresini kontrol eden mikrodeneleyicinin işlevselliğini değerlendirebilmek ve dönüştürücülerin sistem üzerindeki etkilerini gözlemleyebilmek amacıyla, kullanıcı dostu ve kolay anlaşılabilir bir arayüz tasarımı bu tez çalışması kapsamında gerçekleştirilmiştir. Geliştirilen arayüz, güneş panellerinden elde edilen anlık güç değerleri, dış ortam sıcaklığı, anlık ışıınım seviyesi ve panel gerilim bilgilerini tek bir platform üzerinden eşzamanlı olarak izleme imkânı sunmaktadır. Ayrıca, iki farklı kontrol kartının senkronize şekilde çalışmasını sağlayan bir 'başlat' butonu yardımıyla, dönüştürücülere ait anahtarlama elemanlarının doluluk oranı (duty cycle) kullanıcı tarafından istenilen değerlerde ayarlanabilmekte ve sistemin kontrolü sağlanabilmektedir. Arayüzün bu yapısı, deneysel testlerin doğruluğunu artırmakta ve kullanıcıya sistem dinamiklerini detaylı şekilde gözlemleme fırsatı sunmaktadır.

RS232 protokolü üzerinden PC ile haberleşme sağlayan bu arayüz, aynı zamanda panellere ait P-V karakteristiklerini tek bir ekran üzerinden görüntüleme imkânı sunmaktadır (Şekil 3.12).

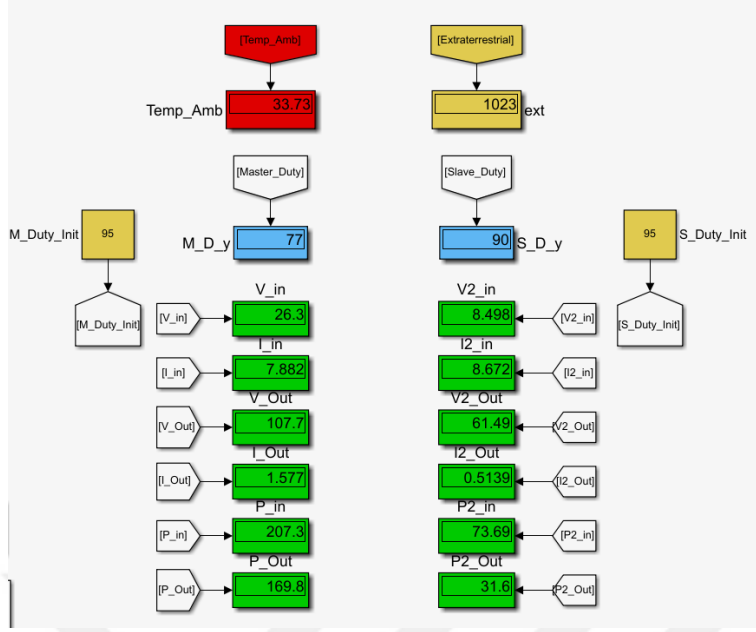


Şekil 3.12 Matlab arayüzü.

Bu arayüz, aynı zamanda MATLAB/Simulink ile eşzamanlı olarak haberleşmektedir. Simulink ortamındaki karmaşık tasarım yapısı (Şekil 3.13), bu arayüz aracılığıyla daha anlaşılır ve okunabilir bir veri yapısına dönüştürülmüştür. Böylece Simulink'teki karmaşık yapı, eşzamanlı olarak sade ve anlaşılır biçimde izlenebilmekte ve kullanıcıya takip kolaylığı sağlamaktadır (Şekil 3.14).



Şekil 3.13 Matlab/simulink yapısı.



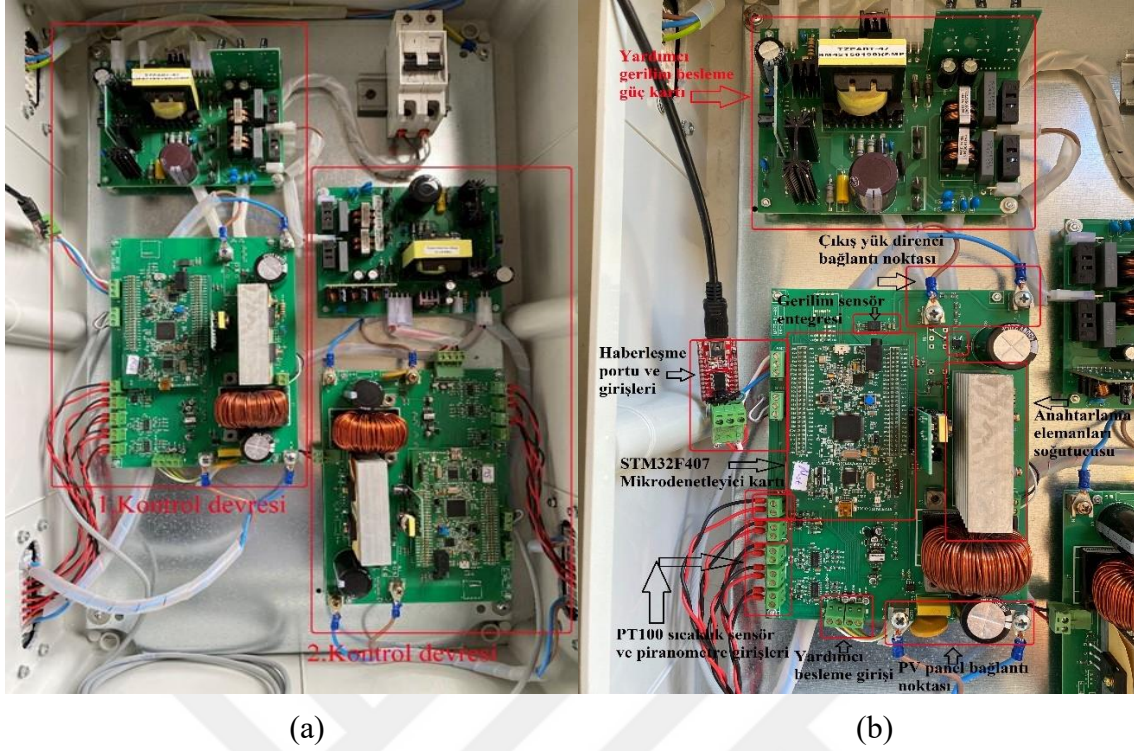
Şekil 3.14 Simulink platform verileri.

3.2.1 Tasarlanan DC/DC dönüştürücü devresi

Önceki bölümlerde sunulan literatür özetlerinde, maksimum güç noktası izleme (MPPT) algoritmalarının geliştirilmesine yönelik teorik yaklaşımlar ile bu algoritmaların deneysel simülasyon ortamlarında test edildiği çalışmalara yer verilmiştir. Ancak, literatürde farklı MPPT yöntemlerinin gerçek zamanlı olarak karşılaştırmalı şekilde test edilebildiği ve performans analizlerinin yapıldığı donanım tabanlı platformların sayısı oldukça sınırlıdır. Bu durum, özellikle algoritmaların pratik uygulanabilirliğinin ve dinamik koşullara verdiği tepkilerin değerlendirilmesi açısından önemli bir yeri doldurması düşünülmüştür.

Bu bağlamda, tez kapsamında geliştirilen donanım ve yazılım bütünleşik test platformunun, çeşitli MPPT algoritmalarının gerçek zamanlı uygulanabilirliğini test etmeye, geçici rejim ve kararlı durum davranışlarını gözlemlemeye ve algoritmalar arası performans farklılıklarını nicel olarak değerlendirmeye olanak sağlaması hedeflenmiştir. Söz konusu platformun hem akademik çalışmalara hem de endüstriyel uygulamalara referans olabilecek nitelikte bir test ortamı sunması amaçlanmaktadır.

Aşağıda tasarımı yapılan DC/DC dönüştürücü devresinin görsel şeması verilmiştir (Şekil 3.15).



Şekil 3.15 Tasarımı yapılan pano test platformu, DC/DC dönüştürücü ve besleme kartı.

Şekil 3.15'te sol tarafında (a) bulunan platform yapısı test için tasarlanan panonun iç tasarımını göstermektedir. 1. Kontrol devresi ve 2. Kontrol devresi olarak ayrı ayrı dönüştürücü devreleri bulunmaktadır. DC/DC dönüştürücü devresinin (b) üst kısmındaki güç kartı farklı gerilimlerde çıkış üreten yardımcı gerilim besleme kartıdır. Dönüştürücü kart üzerine entegre edilecek mikrodnetleyici kartı, harici olarak bağlanacak sıcaklık sensörlerinin opamp devrelerinin sabit referans beslemeleri ile panel akım ve gerilimlerini ölçen sensör devrelerinin harici beslemeleri için kullanılmaktadır. Mikrodnetleyiciler genellikle 3.3V ya da 5V seviyelerinde çıkış gerilimi üretir. Bu ise dönüştürücü üzerindeki anahtarlama elemanını sürmeye yetmez. Bu nedenle, harici yardımcı gerilim sağlayan besleme kartından, DC-DC dönüştürücü kart üzerindeki yarıiletken anahtarlama elemanının (gate) tetiklenerek ilettime geçmesini desteklemek amacıyla çıkış alınmıştır. Bu gerilimler, yüksek gerilim kartından dönüştürücü karta herhangi bir fiziksel temas olmaksızın, galvanik izolasyon sağlanarak aktarılmış; dönüştürücü kart üzerinde ise optik sensörler aracılığıyla yeniden izole edilerek gerilimler elde edilmiştir. Dönüştürücü kart üzerinde ilave olarak gate sürücü devresi de bulunmaktadır. Bu devre mikrodnetleyiciden aldığı düşük gerilimli kontrol sinyalini harici alınan yardımcı gerilim ile dönüştürücünün anahtarlama elemanının gate'ine uygular. Anahtarlama

işlemleri için harici besleme sağlanması, sistemin hem daha hızlı tepki vermesini hem de verimlilik açısından daha etkin çalışmasını sağlamaktadır. Anahtarlama elemanlarını etkin ve güvenli bir şekilde sürmek için harici beslemelerin olması bu devreler için önem arz etmektedir.

DC/DC dönüştürücü devresinin tasarımında boost (yükselten) tipi kullanılmıştır. Tez kapsamında kullanılan panellerin giriş gerilimleri düşük olduğu için yükselten tip çeşidinde devre tasarımına gidilmiştir. Güneşin konumu ve dış çevresel koşullar göz önünde bulundurulduğunda, çıkış geriliminin sürekli değişken bir aralıkta olması beklenir; bu nedenle, çıkış geriliminin yüksek seviyede tutulması sistem açısından avantaj sağlayacaktır. Ayrıca üstte anlatılan duty cycle ile kolayca müdahale edilebildiğinden çıkış geriliminin daha hızlı yükseltilmesi sağlanır. Buradan hareketle çalıştırılan MPPT algoritması, duty cycle'ı değiştirerek panelin gerilim ve akımını ayarlayabilir. Bu da maksimum güç noktasını yakalamak için paneli en uygun noktaya "sürmek" anlamına gelir. Bu yüzden MPPT uygulamalarında boost dönüştürücü, özellikle düşük-voltajlı güneş panellerinde en pratik ve etkili çözüm olur.

Mikrodenetleyici olarak, STM32F407 geliştirme kartı kullanılmıştır. Bu kart ile hızlı ve kaliteli PWM sinyalleri üretme imkanının olduğu hem daha kolay konfigüre edilebilme ve hemde kolay ulaşılabilme imkanları da tercih sebebi olmuştur. Enerji verimliliği açısından düşük güç modlarıyla çalışabilme imkanları ile birlikte geniş bir donanım desteği sunmaktadır (UART, I2C, SPI, CAN, USB vs).

Kart üzerinde mikrodenetleyici kartını kolayca monte edebilecek uygun pin yapıları bulunmaktadır. Monte edildikten sonra mikrodenetleyici kartının harici beslemesi için DC/DC dönüştürücü devresinde izole devreleri tasarlanmıştır. Bu izole devreler, kartın çalışabileceği gerilim seviyelerinin uygun aralıkta tutulmasını sağlamıştır. Bu sayede mikrodenetleyicinin yüksek voltaj ile teması minimuma indirgenmiştir.

Dönüştürücü kartlarında üzerinde iki ayrı güneş panelinin hücre sıcaklıklarını ölçmeye imkân sağlayacak her iki kartta 3 adet sıcaklık sensör girişi (PT100) bulunmaktadır (Şekil 3.16). Ayrıca 1 adet dış ortam sıcaklığını ölçecek giriş de bulunmaktadır. DC/DC

dönüştürücü kartın üzerinde ışıyım ölçmeyi sağlayacak piranometre girişi de bulunmaktadır (Şekil 3.15(b)).



Şekil 3.16 PT100 sıcaklık sensörlerinin panel üzerindeki konumu.

Dönüştürücü üzerinde panellerin giriş ve çıkış akımlarını, giriş ve çıkış gerilimlerini ölçen sensör devreleri bulunmaktadır. Bu sensör devreleri her bir dönüştürücü kartında hem giriş hem çıkış olmak üzere iki adet olarak kullanılmıştır.

DC/DC dönüştürücü kart girişinde (Şekil 3.15(b)) güçleri 265W olan polikristal tipinde güneş paneli kullanılmıştır (Şekil 3.17(a)). Tez kapsamındaki deneylerde kullanılmak üzere iki ayrı güneş panelinin karakteristikleri aynıdır (Şekil 3.17(b)). Paneller ayrı ayrı tasarlanan dc/dc dönüştürücü kartın girişlerine bağlantıları yapılmıştır.



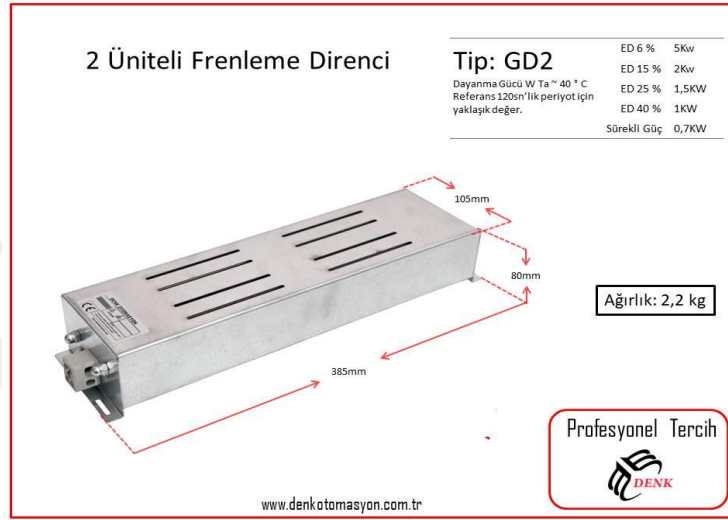
(a)



(b)

Şekil 3.17 Kullanılan güneş panelleri ve karakteristik bilgileri.

Dönüştürücü kartın çıkışlarına yani yük kısmına ise her iki kartın çıkışına olmak üzere 400W gücünde 65Ω'luk yük direnci bağlanmıştır (Şekil 3.18). Bağlanan yükler ile hem panelden çekilen akımı hem de yüke giden akımı izleme şansı elde edilmiştir. Dönüştürücülerin çıkışlarına bağlanan yük dirençleri ile gerçek zamanlı olarak kartların hızlı tepkilerini görmek mümkün hale gelmiştir.



Şekil 3.18 Yük direnci.

Dönüştürücü kart üzerinde iki haberleşme portu bulunmaktadır (Şekil 3.15(b)). Bunlardan ilki, tez kapsamında tasarlanan iki ayrı kartın birbiriyle haberleşmesini sağlayan ve RS232 standardına uygun olarak çalışan kabloyla iletişim kuran porttur. Diğeri ise, PC ile kart arasında USB üzerinden seri haberleşmeye imkân tanıyan ve TTL dönüştürücü modülü kullanılarak mikrodenetleyiciye veri gönderme-alma işlemlerini gerçekleştiren bir ara donanım aracılığıyla iletişim sağlamaktadır.

Bu durumda kontrol kartları kendi aralarında haberleşip PC üzerinden tek bir haberleşme kanalı ile haberleşebilmekte, güneş panellerinin dönüştürücülere giriş ve yüke çıkış akımlarının ölçümleri yapılabilmekte aynı şekilde panellerin dönüştürücüye giriş ve yüke çıkış gerilimlerinin ölçümleri yapılabilmektedir. Aynı zamanda MPPT kontrol ünitesi olarak görev yapacak olan STM32F407 mikrodenetleyici kartı bu kontrol kartları üzerine ayrı ayrı monte edilebilmektedir. Sonuç olarak iki ayrı kontrol kartı, iki ayrı yük direnci, iki ayrı özdeş güneş paneli, iki ayrı mikrodenetleyici kartı, iki ayrı besleme kartı tek bir platform üzerinde kullanılmak üzere bu tez kapsamında kullanılmaktadır (Şekil 3.15(a)).

4. BULGULAR

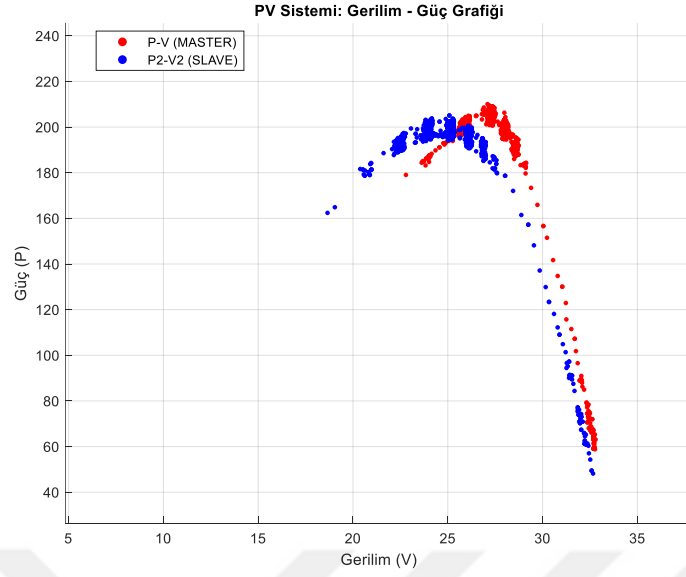
Bu bölümde, iki farklı MPPT algoritmasının eşzamanlı olarak çalıştırılmasına olanak tanıyan bir platform aracılığıyla gerçekleştirilen gerçek zamanlı deneylerin sonuçları sunulmuştur. MATLAB ortamında elde edilen grafiksel verilerle desteklenen bu deneyler kapsamında, farklı gölgelenme koşullarında test edilen MPPT algoritmalarının tepkisi ve her iki algoritmanın performansı analiz edilmiştir. Böylece, algoritmaların aynı anda çalıştırılmasıyla gölgelenme durumlarına karşı verdikleri tepkiler karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiş ve performans farkları görsel çıktılarla ortaya konmuştur.

4.1 Deney 1

Deneyde, her iki kartta çalışan MPPT algoritmaları olarak P/O yöntemi tercih edilmiştir. Bu deney, algoritmaların çalışma durumlarının gözlemlenmesi ve sensörlerin kalibrasyon ayarlarının yapılması amacıyla gerçekleştirilmiştir. Doluluk oranı %50 iken, Afyonkarahisar'da 15:10 saatinde ölçülen ışınlam değeri 961 W/m^2 olup, paneller üzerinde herhangi bir gölgelenme bulunmamaktadır. Bu duruma ait panellerin konumu Şekil 4.1'de, grafiksel çıktı ise Şekil 4.2'de sunulmuştur. Platform üzerinde çalışan MPPT algoritmaları, bu koşullarda doluluk oranını %75 ile %85 arasında maksimize etmiştir.

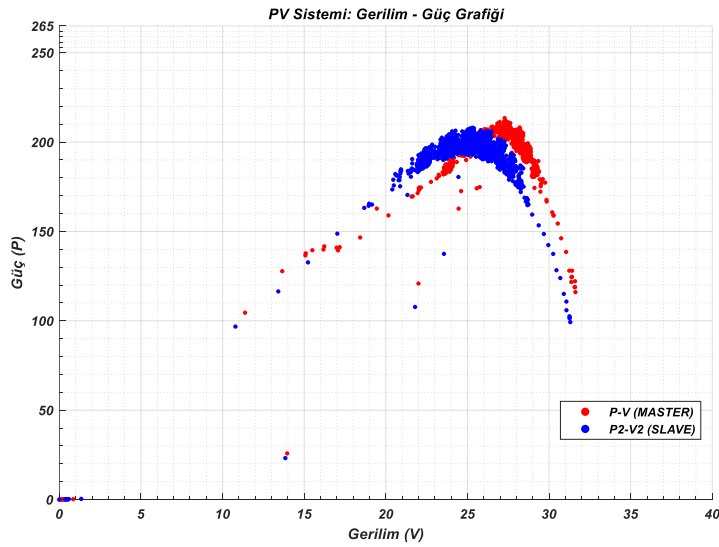


Şekil 4.1 Gölgelenme olmadığı durumdaki panellerin konumu.



Şekil 4.2 Gölgeleme olmadığı durumdaki grafik.

Doluluk oranı %95 iken, öğlen saat 15:33'te Afyonkarahisar'da ölçülen ışıınım değeri 947 W/m² olup, paneller üzerinde herhangi bir gölgeleme bulunmamaktadır. Bu duruma ait grafiksel görünüm Şekil 4.3'te sunulmuştur. Platform üzerinde çalışan MPPT algoritmaları, bu koşullar altında doluluk oranını %75 ile %85 aralığında ayarlamıştır. Doluluk oranı farklı olarak yapılan bu deneyde çıkış gücü neredeyse yine aynı değerlerde kalmıştır. Bunun nedeni çalışan aynı P/O algoritmalarının aynı koşullarda aynı performans sergilediğinin göstergesidir.



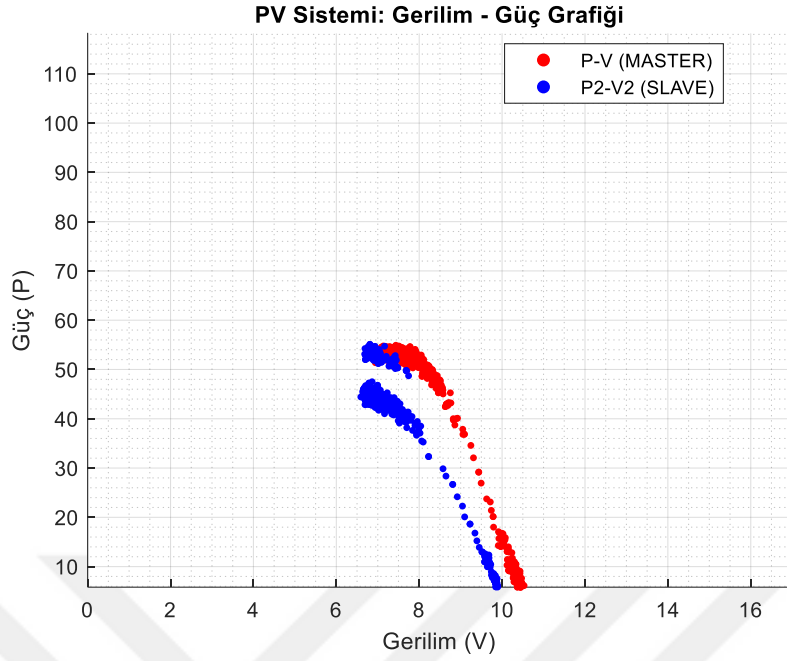
Şekil 4.3 Farklı doluluk oranında gölgeleme olmadığı durumdaki grafik.

4.2 Deney 2

Doluluk oranının %60 olarak belirlendiği bir durumda, 09:43 saatinde Afyonkarahisar’da ölçülen anlık güneş ışınlamı değeri 961 W/m^2 olarak kaydedilmiş olup, bu esnada fotovoltaik paneller üzerinde Şekil 4.4’te gösterildiği üzere düzensiz ve rastgele bir gölgelenme durumu meydana gelmiştir. Her iki kontrol kartında da Perturb and Observe (P/O) algoritması çalıştırılmakta olup, bu duruma ait sistem tepkisi ve güç değişimi Şekil 4.5’te grafiksel olarak sunulmuştur. Gerçekleşen gölgelenme koşulları altında, MPPT algoritmaları doluluk oranını %75 ile %85 arasında dinamik olarak ayarlamış ve maksimum güç noktasına mümkün olduğunca yakın bir çalışma koşulu sağlamayı hedeflemiştir. Grafikler üzerinden yapılan incelemelerde, sistem çıkış gücünün oldukça düşük seviyelerde seyrettiği görülmektedir. Bu performans düşüşü, gölgelenmenin iki hücre grubunu tamamen örtmesi ve bu hücrelerin by-pass diyotları üzerinden kısa devre konumuna geçerek sistem üretimine katkı sağlayamamasıyla ilişkilendirilebilir. Bu senaryoda yalnızca bir hücre grubunun aktif olarak enerji üretimine katılması nedeniyle, P/O algoritması sınırlı çalışma koşulları altında kalan bu yapıda elde edilebilecek maksimum çıkış gücünü sağlamaya çalışmıştır. Bu sonuç, kısmi gölgelenme altında MPPT algoritmalarının performans sınırlarının değerlendirilmesi açısından önemli veriler sunmaktadır.



Şekil 4.4 Rastgele gölgelenmenin olduğu panellerin konumu.



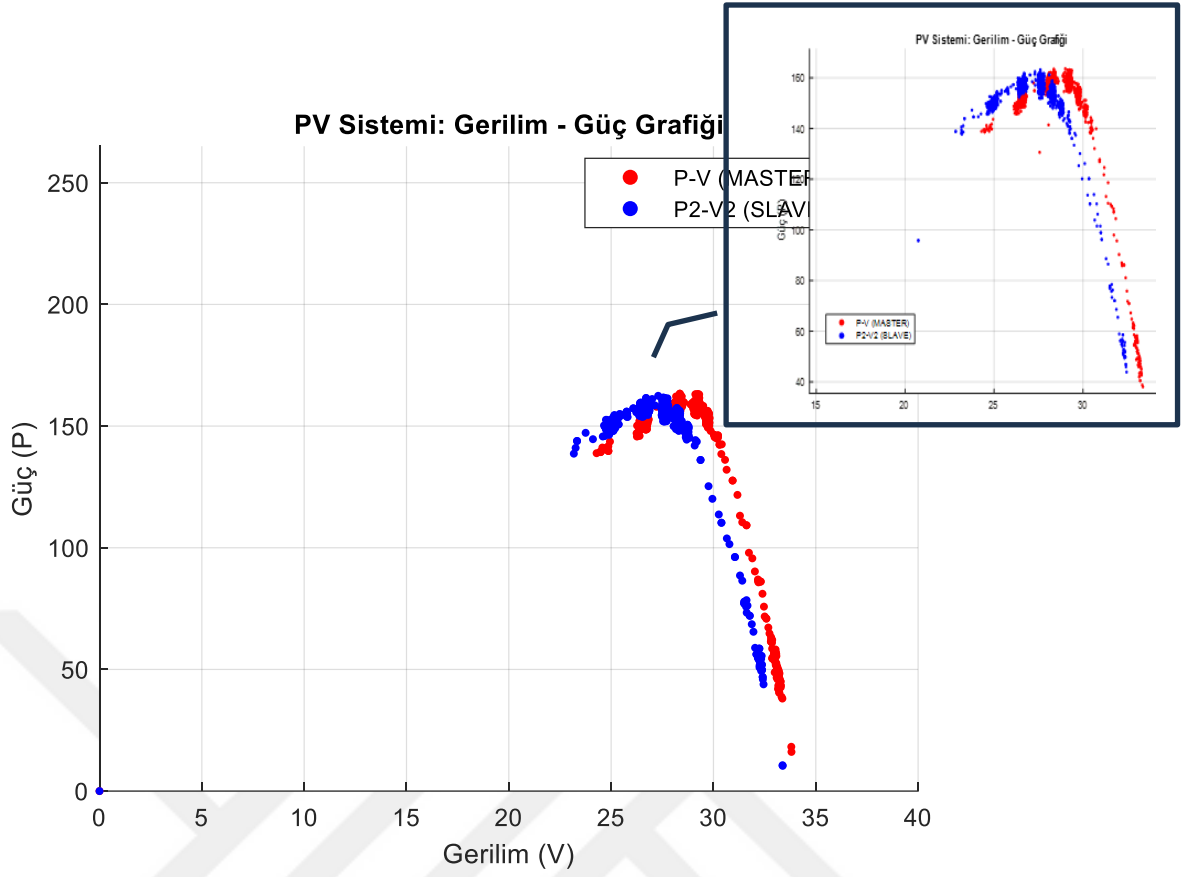
Şekil 4.5 Rastgele gölgelenme olduğu durumdaki grafik.

4.3 Deney 3

Doluluk oranı %50 iken, öğleden sonra saat 14:53'te Afyonkarahisar'da ölçülen ışıınım değeri 965 W/m^2 olup, panellerde yalnızca bir hücre grubunda %30 oranında gölgelenme mevcuttur (Şekil 4.6). Bu duruma ait grafiksel veriler Şekil 4.7 'de sunulmuştur. Platform üzerinde çalışan P/O algoritmaları, bu koşullar altında doluluk oranını %70 ile %75 aralığında ayarlamış ve tek bir tepede global maksimum noktasına ulaşmıştır.



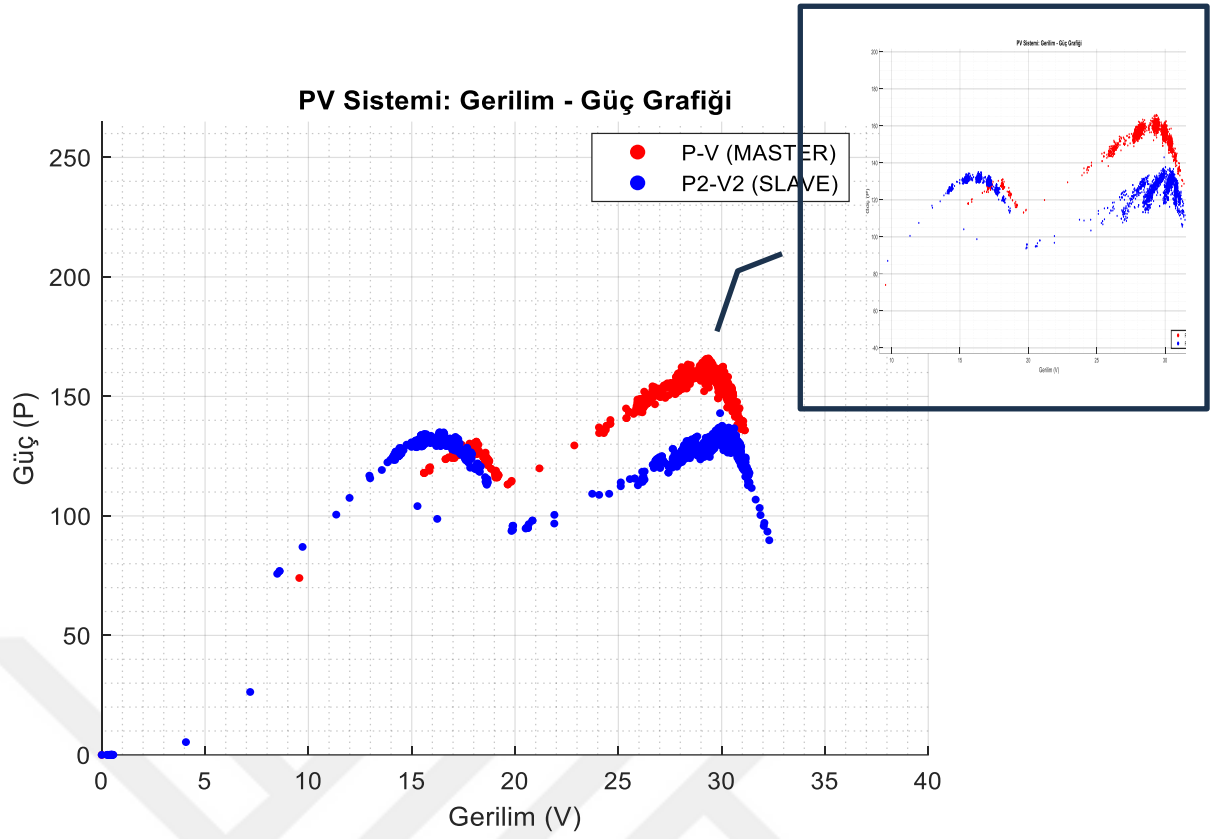
Şekil 4.6 Bir hücre grubu için %30 gölgelenmenin olduğu panellerin konumu.



Şekil 4.7 %30 Gölgeleme olduğu durumdaki grafik.

Aynı deneysel koşullarda, yarı iletken anahtarlama elemanının başlangıç doluluk oranı %95 olarak ayarlandığında, sabah saat 09:26'da Afyonkarahisar'da ölçülen güneş ışınlamı 948 W/m^2 olarak kaydedilmiştir. Bu sırada, her iki fotovoltaiik panelde yalnızca birer hücre grubunda yaklaşık %30 oranında kısmi gölgeleme meydana gelmiştir (Şekil 4.6). İlgili koşullara ait sistem tepkileri ve performans eğrileri Şekil 4.8'de grafiksel olarak sunulmuştur. Platform üzerinde çalışan Perturb and Observe (P/O) algoritmaları, bu koşullar altında doluluk oranını %65 ile %75 aralığında optimize ederek hem yerel hem de global maksimum güç noktalarına ulaşmıştır.

Bu durum, algoritmanın başlangıçta yüksek duty cycle değeri ile yerel maksimuma erişip, ardından sistem dinamiklerini izleyerek global maksimumu tespit edip bu noktada çalışmayı sürdürmesiyle açıklanabilir. Sonuçlar, P/O algoritmasının çoklu maksimum noktaların olduğu kısmi gölgeleme senaryolarında adaptif davranarak sistem performansını etkin biçimde optimize edebildiğini göstermektedir.



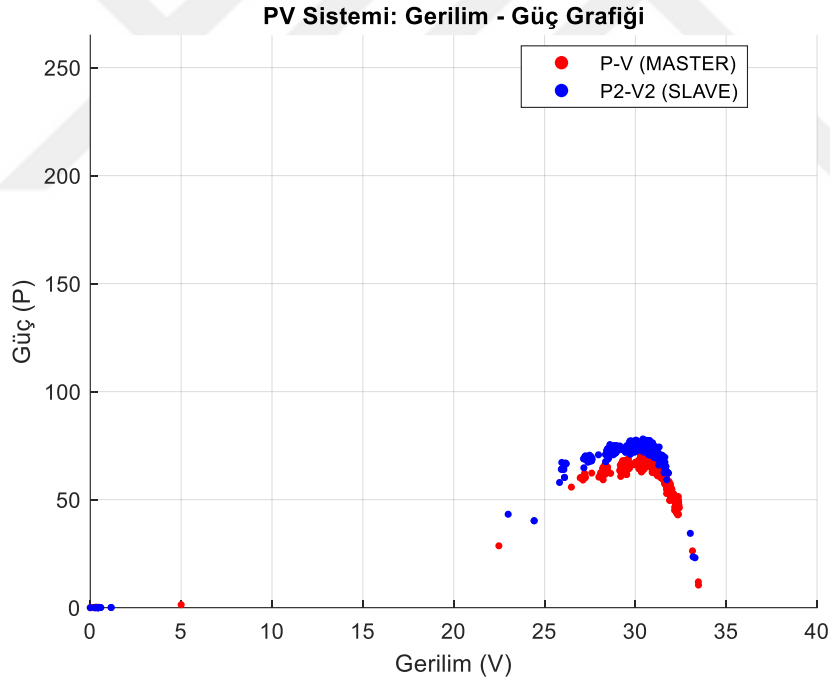
Şekil 4.8 Farklı duty cycle ile %30 Gölgeleme olduğu durumdaki grafik.

4.4 Deney 4

Doluluk oranının %50 olarak ayarlandığı bir çalışma koşulunda, 13:46’da Afyonkarahisar’da ölçülen güneş ışınlamı 885 W/m^2 olarak kaydedilmiştir. Bu sırada her iki panelde yer alan iki ayrı hücre grubunda sırasıyla %30 ve %70 oranında kısmi gölgeleme gözlemlenmiş, bu durum Şekil 4.9’da sunulmuştur. İlgili koşullara ait sistem tepkileri ise Şekil 4.10’da grafiksel olarak verilmiştir. Platform üzerinde çalışan Perturb and Observe (P/O) algoritmaları, ışınlam ve gölgeleme durumuna bağlı olarak doluluk oranını %55–60 aralığında ayarlamış ve sistem, tek bir tepe içeren global maksimum güç noktasında çalışmayı sürdürmüştür. %70 oranında gölgelemiş hücre grubunun by-pass diyotları üzerinden kısa devre davranışı sergileyerek üretime katkı sağlayamadığı, buna karşın %30 oranında gölgelenen hücre grubunun aktif kalarak algoritmanın çıkış gücünü bu sınırlı koşullarda maksimize etmesini sağladığı belirlenmiştir. Elde edilen bulgular, P/O algoritmasının çoklu gölgeleme senaryolarında dahi global maksimum noktaya ulaşabildiğini ve kararlı çalışma koşullarını sürdürebildiğini göstermektedir.



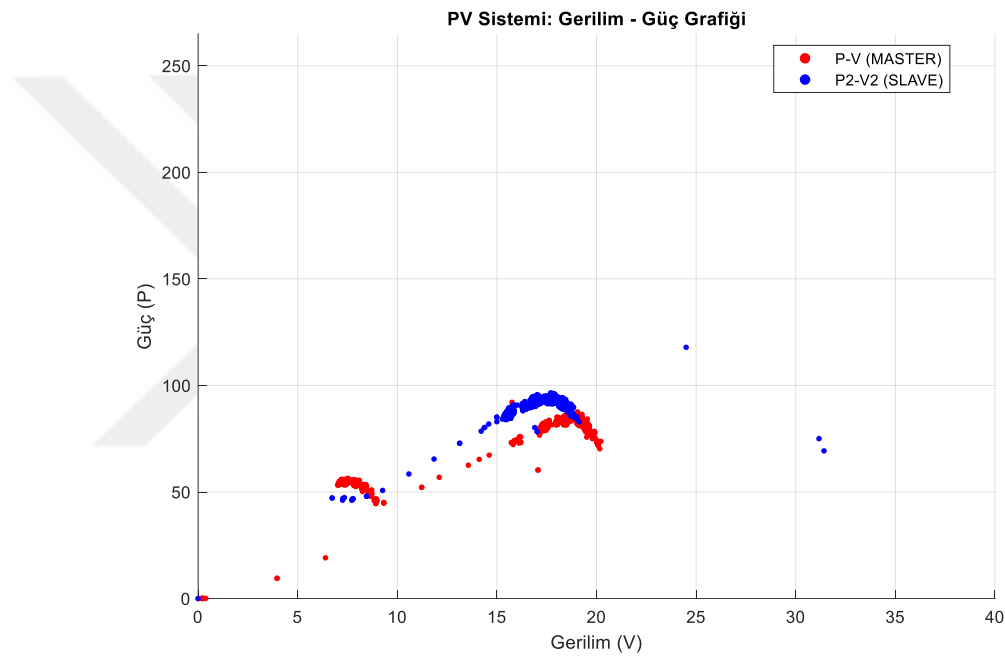
Şekil 4.9 İki hücre grubu için %30 ve %70 gölgelenmenin olduğu panellerin konumu.



Şekil 4.10 Hücre grupları için %30 ve %70 Gölgeleme olduğu durumdaki grafik.

Doluluk oranı %100 iken, öğleden sonra saat 13:58'de Afyonkarahisar'da ölçülen ışıınım değeri 838 W/m² olup, her iki panelde iki hücre grubunda sırasıyla %30 ve %70 oranında gölgelenme gözlemlenmiştir (Şekil 4.9). Bu duruma ait grafiksel çıktı Şekil 4.11'de sunulmuştur. Platform üzerinde çalışan MPPT algoritmaları, söz konusu koşullar altında

doluluk oranını %75 ile %80 aralığında ayarlamış ve hem yerel hem de global maksimum noktalara ulaşmıştır. Farklı doluluk oranları ile çalıştırılan platformda, P/O algoritmasının başlangıçta yerel maksimum noktayı hızlıca tespit ettiği, bir süre sonra ise bu noktadan global maksimum noktaya geçiş yaptığı gözlemlenmiştir. Çeşitli gölgelenme koşulları ve doluluk oranlarında çalışan aynı algoritmaların performansları incelendiğinde, düşük doluluk oranıyla başlatılan algoritmanın yerel maksimumda takılı kaldığı; yüksek doluluk oranında başlatılan algoritmanın ise belirli bir süre sonunda global maksimum noktayı bulup bu noktada çalışmayı sürdürdüğü gözlenmiştir.



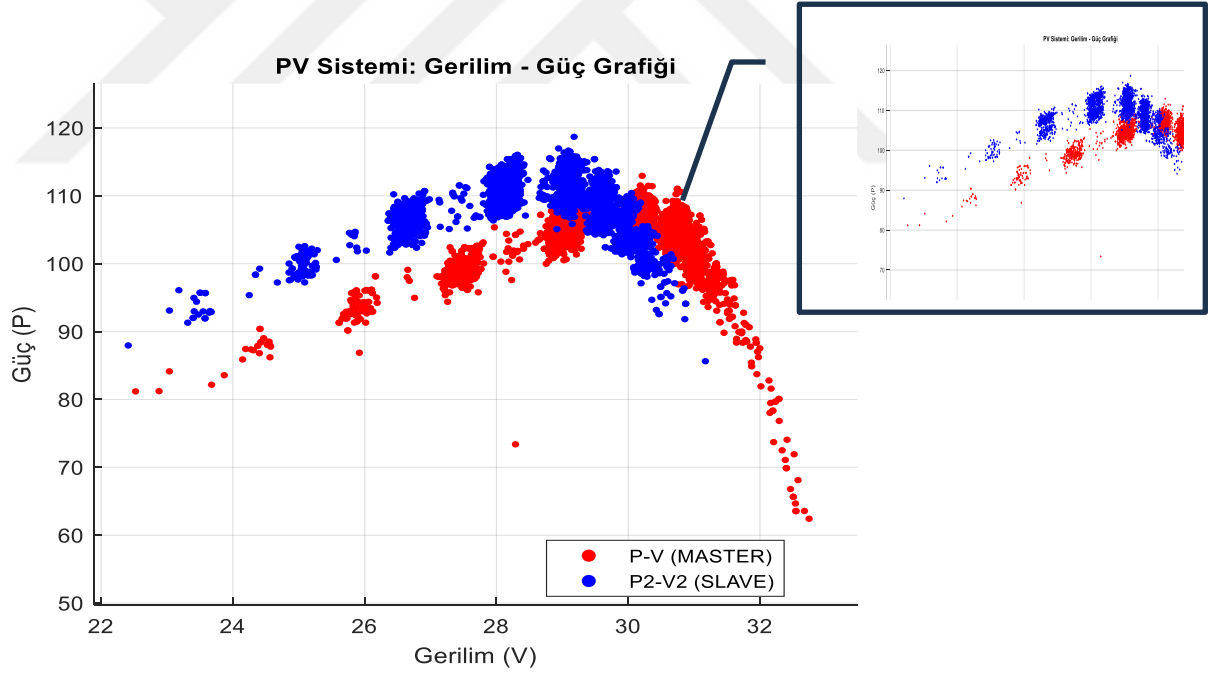
Şekil 4.11 Farklı duty cycle ile %30 ve %70 gölgelenme olduğu durumdaki grafik.

4.5 Deney 5

Doluluk oranı %75 iken, sabah saat 10:47’de Afyonkarahisar’da ölçülen ışıınım değeri 930 W/m² olup, her iki panelde iki hücre grubunda sırasıyla %30 ve %50 oranında gölgelenme mevcuttur (Şekil 4.12). Bu duruma ait grafiksel çıktılar Şekil 4.13’te sunulmuştur. Platform üzerinde çalışan P/O algoritmaları, bu koşullar altında doluluk oranını %70 ile %72 aralığında ayarlamış ve tek bir tepe noktasında global maksimum noktasına ulaşmıştır.



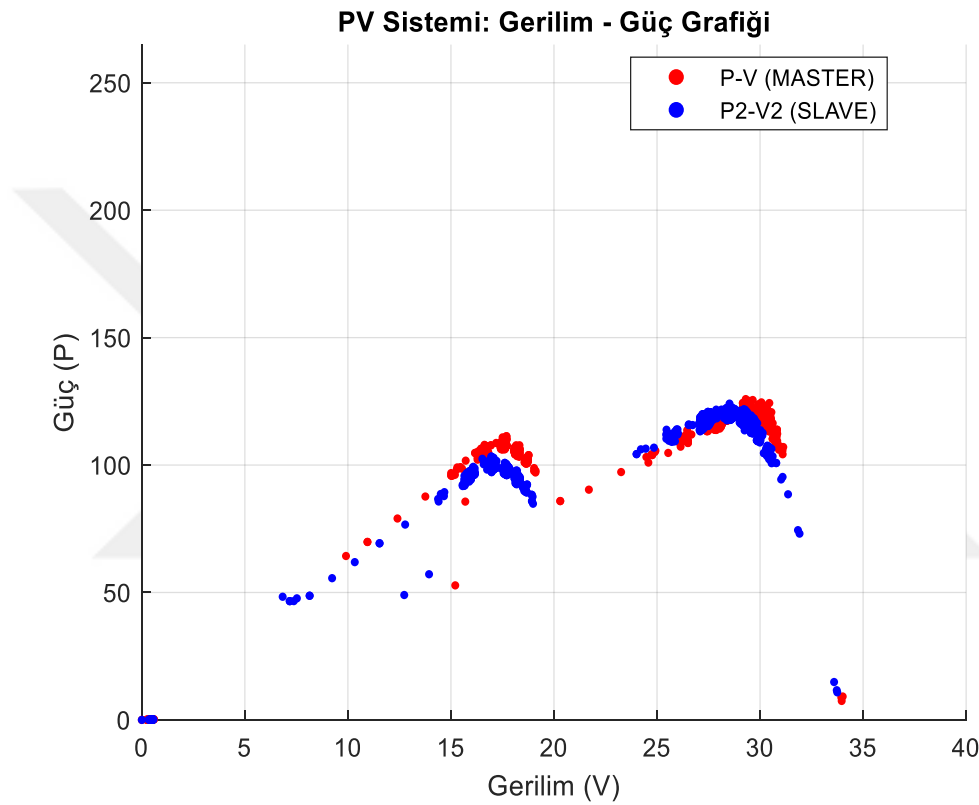
Şekil 4.12 İki hücre grubu için %30 ve %50 gölgelenmenin olduğu panellerin konumu.



Şekil 4.13 Hücre grupları için %30 ve %50 gölgelenme olduğu durumdaki grafik.

Doluluk oranı %100 iken, öğle saat 12:07’de Afyonkarahisar’da ölçülen ışıınım değeri 1029 W/m² olup, her iki paneldeki iki hücre grubunda sırasıyla %30 ve %50 oranında gölgelenme gözlemlenmiştir (Şekil 4.12). Bu duruma ait grafiksel çıktılar Şekil 4.14’te sunulmuştur. Platform üzerinde çalışan P/O algoritmaları, belirtilen koşullar altında

doluluk oranını %65 ile %68 aralığında ayarlamış ve hem yerel hem de global maksimum noktalara ulaşmıştır. Düşük doluluk oranında başlatılan algoritmalar aynı gölgelenme koşullarında yalnızca tek bir maksimum nokta tespit ederken, yüksek doluluk oranıyla başlatılan bu deneyde hem yerel hem de global maksimum noktalar belirlenmiştir. Bu sonuçlar, algoritmaların yüksek doluluk oranıyla çalıştırılmasının yerel ve global maksimum nokta tespitinde daha etkili olduğunu göstermektedir.



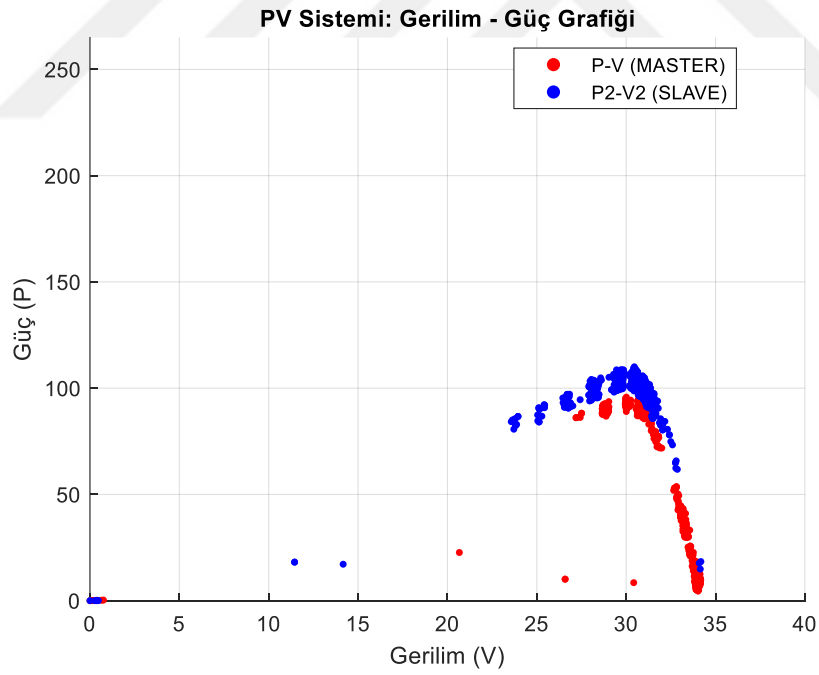
Şekil 4.14 Farklı duty cycle ile %30 ve %50 gölgelenme olduğu durumdaki grafik.

4.6 Deney 6

Doluluk oranı %60 iken, sabah saat 10:00'da Afyonkarahisar'da ölçülen ışıınım değeri 851 W/m^2 olup, master panelde üç hücre grubunda sırasıyla %30, %30 ve %50 oranlarında; slave panelde ise yalnızca bir hücre grubunda %50 oranında gölgelenme tespit edilmiştir (Şekil 4.15). Bu duruma ilişkin grafiksel çıktı Şekil 4.16'da sunulmuştur. Platform üzerinde çalışan P/O algoritmaları, ilgili koşullar altında doluluk oranını %62 ile %66 aralığında ayarlamış ve global maksimum güç noktasına ulaşmıştır.



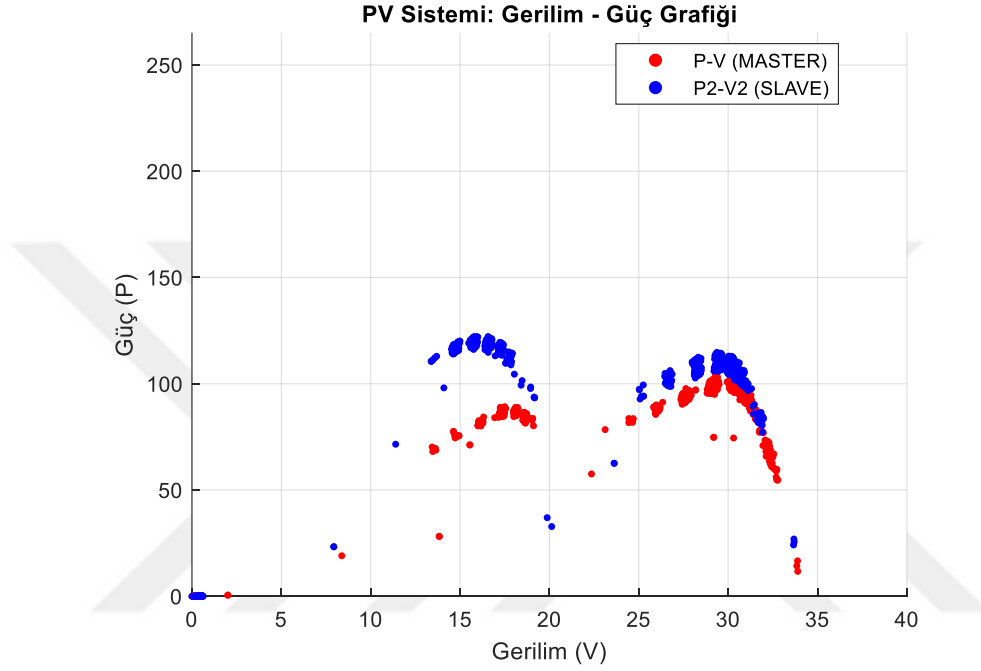
Şekil 4.15 Özdeş panellere uygulanan farklı gölgelenme koşulları.



Şekil 4.16 Master panele %30, %30, %50 slave panele ise sadece bir hücre grubuna %50 gölgelenme koşulunu gösteren grafik.

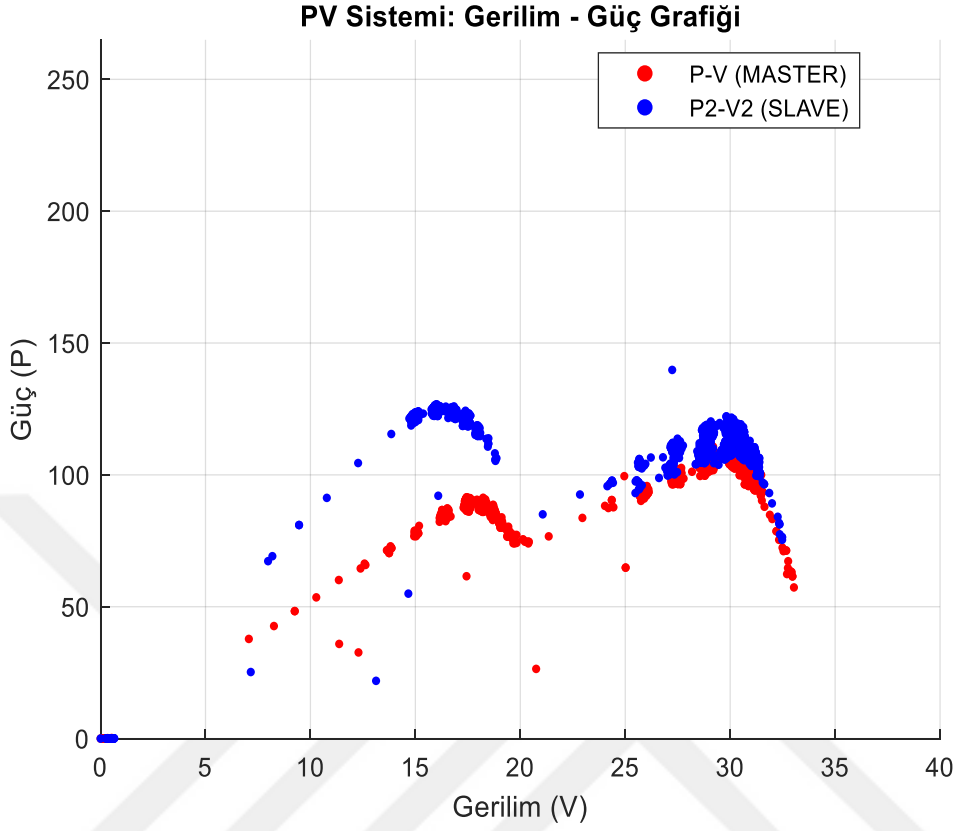
Doluluk oranı %80 iken, sabah saat 10:30'da Afyonkarahisar'da ölçülen ışıınım değeri 868 W/m² olup, master panelde üç hücre grubunda sırasıyla %30, %30 ve %50

oranlarında; slave panelde ise yalnızca bir hücre grubunda %50 oranında gölgelenme mevcuttur (Şekil 4.15). Bu duruma ait grafiksel çıktı Şekil 4.17’de sunulmuştur. Platform üzerinde çalışan MPPT algoritmaları, bu koşullar altında doluluk oranını %65 ile %70 aralığında ayarlamış ve hem yerel maksimum hemde global maksimum noktasına ulaşılmıştır.



Şekil 4.17 Farklı duty cycle ile birinci panele %30, %30, %50 ikinci panele ise sadece bir hücre grubuna %50 gölgelenme koşulunu gösteren grafik.

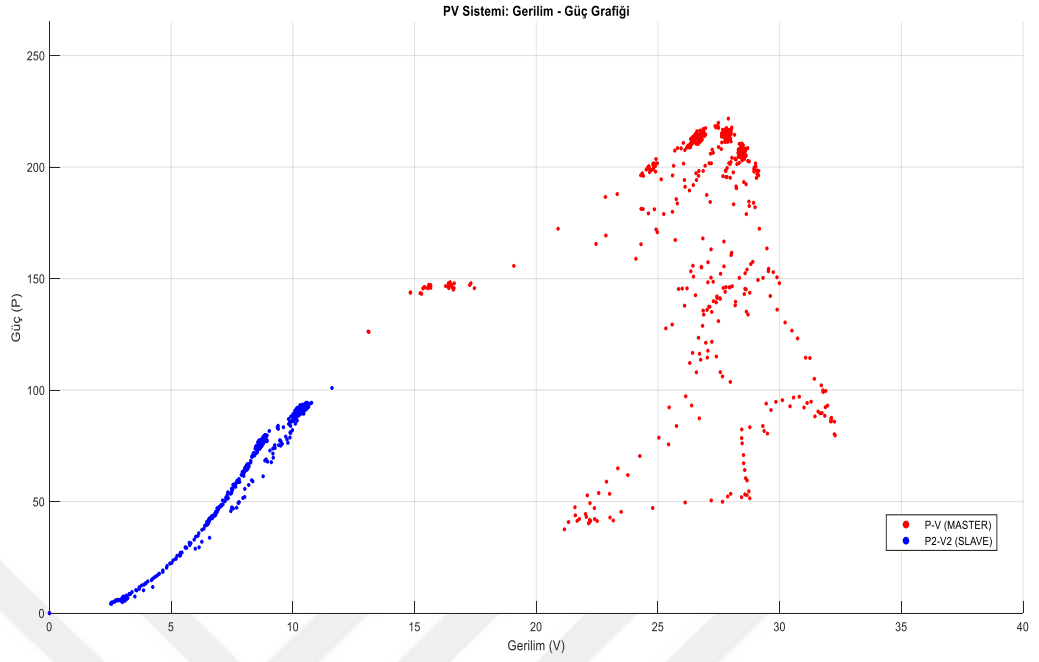
Doluluk oranı %100 iken, sabah saat 10:50’de Afyonkarahisar’da ölçülen ışınlım değeri 893 W/m^2 olup, master panelde üç hücre grubunda sırasıyla %30, %30 ve %50 oranlarında; slave panelde ise yalnızca bir hücre grubunda %50 oranında gölgelenme mevcuttur (Şekil 4.15). Bu duruma ait grafiksel çıktı Şekil 4.18’de sunulmuştur. Platform üzerinde çalışan MPPT algoritmaları, ilgili koşullar altında doluluk oranını %65 ile %70 aralığında ayarlamış ve birden fazla yerel maksimum nokta içeren karakteristik üzerinde global maksimum güç noktasına ulaşmıştır. Bu deneyde panellere uygulanan farklı oranlardaki gölgelenme koşulları ile aynı P/O algoritmasının farklı doluluk oranlarındaki performans kıyaslaması gözlenmiştir. Yine düşük doluluk oranında yerel maksimum noktasında takılı kalırken yüksek oranlı duty cycle ölçümlerinde birden fazla maksimum noktasını yakalayıp global maksimum noktasına erişebildiği gözlenmiştir.



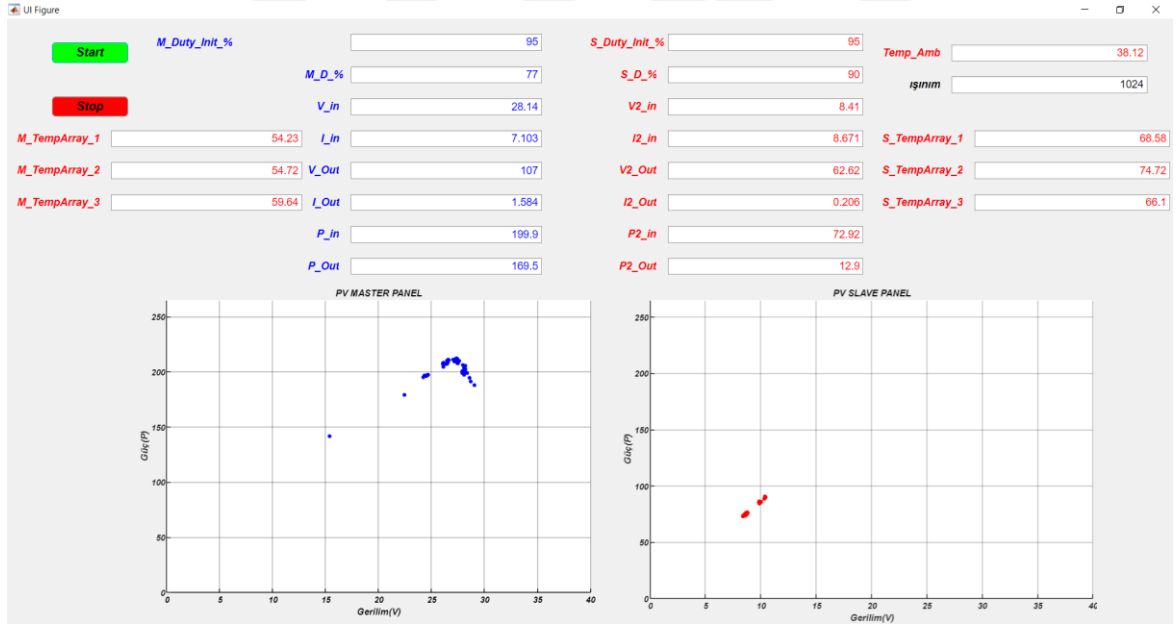
Şekil 4.18 %100 duty cycle ile master panele %30, %30, %50 slave panele ise sadece bir hücre grubuna %50 gölgelenme koşulunu gösteren grafik.

4.7 Deney 7

Doluluk oranı %95 iken, sabah saat 11:54'te Afyonkarahisar'da ölçülen ışıınım değeri 1023 W/m^2 olup, panellerde gölgelenme bulunmamakta; ancak hava koşullarına bağlı olarak geçici bulut gölgelemesi oluşmuştur. Bu koşullar altında platformda çalışan farklı MPPT algoritmalarına ait grafiksel çıktılar Şekil 4.19'da sunulmuştur. Doluluk oranı P/O algoritması için yaklaşık %80, artan iletkenlik algoritması için ise yaklaşık %90 seviyelerinde ayarlanmıştır. Birinci kartta çalışan P&O algoritması ikinci tepe noktasına hızla ulaşırken, ikinci kartta çalışan Artan İletkenlik algoritması yerel maksimumda kalmıştır. Her panelin üst yüzeyine monte edilen PT100 sıcaklık sensörleri aracılığıyla alınan hücre sıcaklıkları, arayüz üzerinden izlenmiş ve Şekil 4.20'de sunulmuştur.



Şekil 4.19 İki farklı algoritmanın platformda eşzamanlı çalışması ve performansının izlenmesi.



Şekil 4.20 Arayüzde farklı algoritmaların tek platform üzerinde çalıştırılıp karşılaştırılması.

5. TARTIŞMA ve SONUÇ

Bu çalışmada, MPPT uygulamalarında kullanılan iki farklı algoritmanın gerçek zamanlı olarak eşzamanlı testine imkân tanıyan bir donanım tabanlı test platformu tasarlanmıştır. Platform, Afyon Kocatepe Üniversitesi Yenilenebilir Enerji Sistemleri Anabilim Dalı laboratuvarında yer alan, birbirinin aynısı 265 W gücünde iki güneş paneli ve ışıyım ölçer kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Böylece, MATLAB/Simulink ortamında test edilen MPPT algoritmalarının doğrudan güneş panellerinden elde edilen gerçek zamanlı verilerle karşılaştırılması mümkün olmuştur.

Çalışmada yaygın olarak kullanılan Perturb and Observe ve Artan İletkenlik algoritmalarının performansları karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Platformda, her biri 1 kW gücünde yükselten tip DC/DC dönüştürücü devresi ve bu devreleri ayrı ayrı kontrol eden STM32F407 mikrodenetleyici kartları yer almaktadır. Dönüştürücülerden biri “master”, diğeri ise “slave” olarak senkronize çalışmaktadır ve aralarında haberleşme sağlayabilmektedir.

Kontrol ve izleme işlemleri, MATLAB/Simulink tabanlı bir kullanıcı arayüzü üzerinden gerçekleştirilmekte, haberleşme için RS232 protokolü kullanılmaktadır. Panel hücre sıcaklıklarını ölçmek amacıyla PT100 sensörleri, ortam sıcaklığını ölçmek içinse ayrı bir sensör kullanılmıştır. Her dönüştürücü çıkışına 400 W gücünde 65Ω'luk yük dirençleri bağlanarak ölçümlerin daha gerçekçi hâle gelmesi sağlanmıştır. Akım ve gerilim ölçümleri izole edilmiş sensörler aracılığıyla gerçekleştirilmiş, hassasiyetin artırılması için filtre devreleri eklenmiştir.

Platform, arayüz üzerinden başlatıldığında mikrodenetleyicilere yüklenen MPPT algoritmaları eşzamanlı olarak çalışmaya başlamakta ve elde edilen gerçek veriler anlık olarak P–V grafiği üzerine işlenebilmektedir. Böylece, iki algoritmanın aynı anda ve özdeş paneller üzerinde nasıl performans gösterdiği izlenebilmekte; ayrıca sistem, belirli gölgelenme senaryoları altında algoritmaların tepkisini gözlemlemeye olanak tanımaktadır.

Dönüştürücülerin doluluk oranı (duty cycle) değerleri manuel olarak ayarlanabilmekte ve her bir algoritmanın sistemi maksimum güç noktasında çalıştırmak için hangi duty cycle değerini kullandığı da gözlemlenebilmektedir. Elde edilen sonuçlara göre, örneğin P&O algoritması MPP noktasına IC algoritmasından daha hızlı ulaşırken; IC algoritması bazı durumlarda yerel maksimum noktasında takılı kalmıştır. Kısmi gölgelenme altında ise her iki algoritma da benzer sınırlamalar göstermiştir.

Bu platform sayesinde, literatürde sıkça bahsedilen MPPT algoritmalarının zayıf yönleri gerçek zamanlı olarak doğrulanabilmiş; farklı ışıınım ve gölgelenme koşullarında algoritmaların eşzamanlı olarak karşılaştırılması mümkün olmuştur. Geliştirilen sistem, 300 W'a kadar güneş panelleri ve 1 kW'a kadar dönüştürücü desteği ile gelecekte farklı MPPT algoritmalarının test edilmesine ve performanslarının hızlı biçimde değerlendirilmesine katkı sağlayacak bir altyapı sunmaktadır.

6. KAYNAKLAR

- Fahrenbruch, A.L. and Bube, R.T. (1983). Fundamentals of Solar Cells.
- DPT. (2001) Sekizinci Beş Yıllık Kalkınma Planı Elektrik Enerjisi Özel İhtisas Komisyonu Raporu. Resmi Gazete. DPT: 2569 – ÖİK: 585 2001.
- Çalışkan, E. (2011). Fotovoltaik Sistemler için DSP Temelli Güneş Çeviricisi Tasarımı ve Uygulaması. (Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü)
- Nadkarni, S. S., Angadi, S. and Raju, A. B. 2018. Simulation and Analysis of MPPT Algorithms for Solar PV based Charging Station. Proceedings of the International Conference on Computational Techniques, Electronics and Mechanical Systems., 21(8): 45–50.
- Khodair, D., Salem, M. S., Shaker, A., El Munim, H. E. A. and Abouelatta, M. 2020. Application of Modified MPPT Algorithms: A Comparative Study between Different Types of Solar Cells. Applied Solar Energy (English Translation of Geliotekhnika)., 56(5): 309–323.
- Elbarbary, Z. M. S. and Alranini, M. A. 2021. Review of maximum power point tracking algorithms of PV system. Frontiers in Engineering and Built Environment., 1(1): 68–80.
- Onat, N. & Ersöz, S. (2009). Fotovoltaik Sistemlerde Maksimum Güç Noktası İzleyici Algoritmalarının Karşılaştırılması. 5.Yenilenebilir Enerji Kaynakları Sempozyumu, 19-21 Haziran, Diyarbakır, 50-55.
- Xuenjun, L. (2004). An Improved Perturbation and Observation Maximum Power Point Tracking Algorithm for PV Panels. (Yüksek Lisans Tezi, Concordia University Electrical and Computer Engineering)
- Yu, T. & Lin, Y. (2010). A Study on Maximum Power Point Tracking Algorithms for Photovoltaic Systems. Erişim Tarihi: 16.06.2017. [5%AE%9A%E4%B8%ADA%20Study%20on%20Maximum%20Power%20Point%20Tracking%20Algorithms%20for%20Photovoltaic%20Systems.pdf](#)

- Faranda, R. and Leva, S. (2008). Energy comparison of MPPT techniques for PV systems. *Wseas Transactions on Power Systems*, 3(6): 446-455.
- Hua, C. ve Shen, C., (1998). "Comparative Study of Peak Power Tracking Techniques for Solar Storage System", *IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition- Proceedings of the 1998 13th Annual Applied Power Electronics Conference and Exposition*, 15-19 Feb., California.
- Esram, T. ve Chapman, P. L., (2007). "Comparison of Photovoltaic Array Maximum Power Point Tracking Techniques", *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 22.2:439-449.
- Jie D., Chun-jiang Z., Yan-bang L., Comparison of duty ratio perturbation and observation and reference voltage perturbation and observation methods applied in MPPT, *Power Electronics and Motion Control Conference*, China, 2-5 June 2012.
- Morales, D. (2010). *Maximum Power Point Tracking Algorithms for Photovoltaic Applications*. (Yüksek Lisans Tezi, Aalto University School of Science and Technology)
- Chowdhury, S., Hamid, M., Rahimi, J. & Sunny M. (2016). Design and Development of a Maximum Power Point Tracking(MPPT) charge controller 60 for Photo-Voltaic(PV) generation system. *American Journal of Engineering Research*, 5(5), 15-22.
- Banu I. V., Beniuga R. and Istrate M. (2013). Comparative analysis of the perturb-and observe and incremental conductance MPPT methods, *8th International Symposium on Advanced Topics in Electrical Engineering*, Bucharest, 23-25 May.
- Li, C., Chen, Y., Zhou, Dongbau., Liu, J. & Zeng, J. (2016). A High-Performance Adaptive Incremental Conductance MPPT Algorithm for Photovoltaic Systems. *Energies*, 9. <https://doi.org/10.3390/en9040288>
- Sahoo, R. & Singh, M. (2016). Analysis of Variable Step Incremental Conductance MPPT Technique for PV System. *IOSR Journal of Electrical an Electronics Engineering*, 11(2), 41-48.

- Gupta, A., Chauhan, Y. & Maity, T. (2018). Experimental investigations and comparison of various MPPT techniques for photovoltaic system. *Sadhana*, 43(132). <https://doi.org/10.1007/s12046-018-0815-0>
- Hohm, D.P. ve Ropp, M.E., (2003). “Comparative study of maximum power point tracking algorithms”, *Prog. Photovolt: Res. Appl.*, 11: 47–62.
- Kırcioğlu, O., Ünlü, M. & Çamur, S. (2018). Değiştir&gözle ve artımsal iletkenlik algoritmalarının EN 50530 dinamik verim testine göre performanslarının değerlendirilmesi. *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 22(1), 85-93.
- Khodair, D., Salem, M. S., Shaker, A., El Munim, H. E. A. and Abouelatta, M. 2020. Application of Modified MPPT Algorithms: A Comparative Study between Different Types of Solar Cells. *Applied Solar Energy (English Translation of Geliotekhnika)*., 56(5): 309–323.
- Salah, C.B. and Ouali, M. (2011). Comparison of Fuzzy Logic and Neural Network in Maximum Power Point Tracker for PV Systems. *Electric Power Systems Research* 81.1: 43-50.
- Bouchafaa, F., Hamzaoui, I. and Hadjammar, A. (2011). Fuzzy Logic Control for the tracking of maximum power point of a PV system. *Energy Procedia*, 6: 633-642.
- Chekired, F., Larbes, C., Rekioua, D. and Haddad, F. (2011). Implementation of a MPPT fuzzy controller for photovoltaic systems on FPGA circuit. *Energy Procedia*, 6: 541-549.
- Reisi A. R., Moradi M. H., Jamasb S., Classification and comparison of maximum power point tracking techniques for photovoltaic system: A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2013, 19, 433-443.
- Jouda, A., Elyes, F., Abdelhamid, R. & Abdelkader, M. (2017). Simulation and Real Implementation of the Fuzzy MPPT Algoritihm for Photovoltaic Panel. *Indian Journal of Science and Technology*, 10(17) <https://doi.org/10.17485/ijst/2017/v10i17/90437>

- Putri, R. I., Wiyanto, S., Syamsiana, I. N., Junus, M., Rifa'I, M. and Putra, E. S. 2019. Maximum power point tracking based on particle swarm optimization for photovoltaic system on greenhouse application. *Journal of Physics: Conference Series.*, 1402(3): 2 9.
- Jyothy, L. P. N. and Sindhu, M. R. 2018. An Artificial Neural Network based MPPT Algorithm for Solar PV System. *Proceedings of the 4th International Conference on Electrical Energy Systems ICEES.*, 21(8): 375–380.
- Nour Ali, M. 2019. Improved Design of Artificial Neural Network for MPPT of Grid-Connected PV Systems. *2018 20th International Middle East Power Systems Conference.*, 11: 97–102.
- Hansen A. D., Sørensen P., Hansen L. H., Bindner H., “Models for a Stand-Alone PV System”, Risø National Laboratory, Roskilde, December 2000.
- Bakım, S., 2016, Yeni Bir P&O Tabanlı Mppt Algoritması Tasarımı ve Performansının Testi.
- Panwar S. ve Saini R.P, Development and Simulation of SolarPhotovoltaic model using Matlab/simulink and its parameter extraction. (ICCCE 2012) International Conference on Computing and Control Engineering, pp 2- 5, 12 - 13 April, 2012.
- Chaichan MT., Mohammed BA., Kazem HA. Effect of pollution and cleaning on photovoltaic performance based on experimental study. *International Journal of Scientific and Engineering Research* 2015; 6(4): 594-601.
- Özçelik MA. Fotovoltaik sistemlerde verim ve performansın artırılmasına yönelik maksimum güç noktası izleyicisi tasarımı. Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Doktora Tezi, Kahramanmaraş, Türkiye, 2015.
- Ali, A., Almutairi, K., Padmanaban, S., Tirth, V., Algarni, S., Irshad, K., ... & Malik, M. Z.(2020). Investigation of MPPT techniques under uniform and non-uniform solar irradiation condition—a retrospection. *Ieee Access*, 8, 127368-127392.

- Mohanty, P., Bhuvaneswari, G., Balasubramanian, R., & Dhaliwal, N. K. (2014). Matlab based modeling to study the performance of different MPPT techniques used for solar PV system under various operating conditions. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 38, 581-593.
- 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.
- Selvan, S., & Nair, P. (2016). A Review on Photo Voltaic MPPT Algorithms. *International Journal of Electrical & Computer Engineering* (2088-8708), 6(2).
- Singh, O., & Gupta, S. K. (2018, March). A review on recent Mppt techniques for photovoltaic system. In *2018 IEEMA Engineer Infinite Conference (eTechNxtT)* (pp. 1-6). IEEE.
- Mohapatra, A., Nayak, B., Das, P., & Mohanty, K. B. (2017). A review on MPPT techniques of PV system under partial shading condition. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 80, 854-867.
- Katche, M. L., Makokha, A. B., Zachary, S. O., & Adaramola, M. S. (2023). A comprehensive review of maximum power point tracking (mppt) techniques used in solar PV systems. *Energies*, 16(5), 2206.
- Kollimala S.K. and Mishra M.K., "Adaptive perturb & observe MPPT algorithm for photovoltaic system", 2013 IEEE Power and Energy Conference at Illinois (PECI), Champaign, IL, 42-47, (2013).
- Dhivya P. and Kumar K.R., "MPPT based control of sepic converter using firefly algorithm for solar PV system under partial shaded conditions", 2017 International Conference on Innovations in Green Energy and Healthcare Technologies (IGEHT), Coimbatore, 1-8, (2017).
- Nigam A. and Gupta A.K., "Performance and simulation between conventional and improved perturb&observe MPPT algorithm for solar PV cell using MATLAB/Simulink", 2016 International Conference on Control, Computing, Communication and Materials (ICCCCM), Allahbad, 1-4, (2016).

- Riby J., Sheik M.S. and Richu Z., “Variable step size perturb and observe Mppt algorithm for standalone solar photovoltaic system”, 2017 IEEE International Conference on Intelligent Techniques in Control, Optimization and Signal Processing (INCOS), Srivilliputhur, 1-6, (2017).
- Yakışan Ö., Güneş Enerjisi Üretim Sistemlerinde Bir Maksimum Güç Noktası İzleme Yöntemi ile Bir Şebeke Bağlantılı Eviricinin Geliştirilmesi ve Gerçekleştirilmesi, Doktora tezi, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli, (2008).
- Ahmed, N.A. and Miyatake, M., 2008, A Novel Maximum Power Point Tracking for Photovoltaic Applications under Partially Shaded Insolation Conditions, *Electric Power Systems Research*, 78(5): 777–784pp.
- Koutroulis, E. and Blaabjerg F., 2012, A New Technique for Tracking the Global Maximum Power Point of PV Arrays Operating Under Partial-Shading Conditions, *IEEE Journal of Photovoltaics*, 2(2): 184–190pp.
- A.Loukriz, M. Haddadi ve S. Messalti, “Simulation and Experimental Design Of A New Advanced Variable Step Size Incremental Conductance Mppt Algorithm For PV Systems”, *ISA Transactions*, cilt 62, s. 30-38, 2016
- Subudhi, Bidyadhar and Pradhanhen, Raseswari —A comparative study on maximum power point tracking technique for photovoltaic power system, *IEEE Trans. on Sustainable energy*, vol. 4, pp. 89-98, Jan.2013.
- Goudarzian, A., Khosravi, A., Raeisi, H.A., 2022. Modeling, design and control of a modified flyback converter with ability of right-half-plane zero alleviation in continuous conduction mode. *International Journal Engineering Science and Technology*. 26: 101007.
- Shahir, F.M., Babaei, E., 2017. A new structure for non-isolated boost dc-dc converter based on voltage-lift technique. 8th Power Electronics, Drive Systems and Technologies Conference (PEDSTC), 14-16 Şubat 2017, Mashhad, İran. 25-30.
- Jou, H.L., Wu, K.D., Wu, J.C., Lin, Y.Z., Su, L.W., 2019. Asymmetric isolated unidirectional multi-level DC-DC power converter. *International Journal Engineering Science and Technology*, 22 (3): 894-898.

- Samuel, V.J., Keerthi, G., Mahalingam, P., 2020. Interleaved quadratic boost DC–DC converter with high voltage gain capability. *Electrical Engineering*, 102 (2): 651-662.
- 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 (1):63-70.
- Muhammad H. Rashid, “Power Electronics Handbook: Devices, Circuits, Applications” Elsevier, 3rd. Edition, 2011.
- Robert W. Erickson, Dragan Maksimovic, “Fundamentals of Power Electronics” 2nd. Edition, 2001.
- N. Mohan, T. Undeland, W. Robbins, “Güç Elektroniği: Çeviriciler, Uygulamalar ve Tasarım”, Literatür Yayınları (Çeviri), 2003.

6.1 İnternet kaynakları

- [1] www.solarchoice.net., Erişim Tarihi: 11.04.2025.
- [2] www.solar-electric.com., Erişim Tarihi: 11.04.2025.
- [3] <https://enerji.gov.tr/bilgi-merkezi-enerji-gunes> Erişim Tarihi: 30.04.2025.