



T.C.
KONYA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ



FOTOVOLTAİK UYGULAMALAR İÇİN
MODEL TABANLI HİBRİT BİR MPPT
YÖNTEMİNİN GELİŞTİRİLMESİ

Sümeyye BÜYÜKKELEK

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Ocak-2024
KONYA
Her Hakkı Saklıdır

TEZ KABUL VE ONAYI

Sümeyye BÜYÜKKELEK tarafından hazırlanan “Fotovoltaik Uygulamalar İçin Model Tabanlı Hibrit Bir MPPT Yönteminin Geliştirilmesi” adlı tez çalışması .../.../... tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği / oy çokluğu ile Konya Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

İmza

Başkan

Doç. Dr. Mustafa YAĞCI
(Necmettin Erbakan Üniversitesi)

.....

Danışman

Prof. Dr. Ahmet Afşin KULAKSIZ
(Konya Teknik Üniversitesi)

.....

Üye

Dr. Öğr. Üyesi Emre Hasan DURSUN
(Konya Teknik Üniversitesi)

.....

Yukarıdaki sonucu onaylarım.

Prof. Dr. Mevlüt UYAN
Enstitü Müdürü

TEZ BİLDİRİMİ

Bu tezdeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini ve tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

DECLARATION PAGE

I hereby declare that all information in this document has been obtained and presented in accordance with academic rules and ethical conduct. I also declare that, as required by these rules and conduct, I have fully cited and referenced all material and results that are not original to this work.

Sümeyye BÜYÜKKELEK

Tarih:

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

FOTOVOLTAİK UYGULAMALAR İÇİN MODEL TABANLI HİBRİT BİR MPPT YÖNTEMİNİN GELİŞTİRİLMESİ

Sümeyye BÜYÜKKELEK

Konya Teknik Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Ahmet Afşin KULAKSIZ

2024, 69 Sayfa

Jüri

Prof. Dr. Ahmet Afşin KULAKSIZ
Doç. Dr. Mustafa YAĞCI
Dr. Öğr. Üyesi Emre Hasan DURSUN

Elektrikli araçların da gittikçe yaygınlaşmasıyla elektrik enerjisi tüketiminde önümüzdeki yıllarda sürekli bir artış beklenmektedir. Ülkemizde elektrik enerjisi üretiminde rezervleri kısıtlı olan fosil yakıtlar büyük bir oranda kullanılmaktadır. Yenilenebilir enerji kaynakları fosil yakıtlar kullanılmadan enerji ürettikleri için günümüzde cazip hale gelmiştir. Fotovoltaik (PV) hücrelerin ışıyım, sıcaklık ve diğer çevresel etkilere bağlı olarak üretebileceği maksimum güç miktarı değişmekte, bu etkenlere bağlı olarak farklı çalışma karakteristikleri ortaya çıkmaktadır. Bu karakteristiklerin belirlenebilmesi için hücrelerin eşdeğer devre modellerinin oluşturulması gerekir. Bu tez çalışmasında, PV panel olarak 1Soltech 1STH-215-P modeli seçilmiştir ve tek diyot modeli yardımıyla PV hücrenin Matlab/Simulink'te modeli oluşturulmuştur. Hazır PV model ve matematiksel model yardımıyla oluşturulan PV modele ait I-V ve P-V eğrileri karşılaştırılmış ve maksimum güç noktaları (MPP) model kullanılarak belirlenmiştir.

Panelin fiziksel yıpranması, toz, kir gibi dış etkenler nedeniyle eşdeğer devre parametreleri değişikliğe uğrayabildiğinden, model kullanılarak hesaplanan MPP değeri zamanla değişebilmektedir. Önerilen yöntemde, maksimum güç noktasına erişimde model tabanlı maksimum güç noktası izleme (MPPT) algoritması kullanılmış, ideal olmayan durumda MPP hesabında ortaya çıkacak değişimler dikkate alınarak MPP yakınında değiştir ve gözle (P&O) algoritmasına geçiş yapılmıştır. Matlab/Simulink simülasyon ortamında yapılan bu çalışmayla, eşdeğer devre parametreleri elde edilerek gerçekleştirilen model tabanlı MPPT algoritmasının kullanıldığı hibrit yöntem ile geleneksel P&O algoritmasının MPP'ye yakınsama süreleri, MPP çevresinde ortaya çıkan salınımlar karşılaştırılmış ve önerilen model tabanlı hibrit algoritmanın, geleneksel algoritmaya göre avantajları gözlemlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Fotovoltaik, fotovoltaik hücre eşdeğer devre parametreleri, hibrit algoritma, matematiksel model, maksimum güç noktası izleme, değiştir ve gözle algoritması

ABSTRACT

MS THESIS

DEVELOPMENT OF A MODEL-BASED HYBRID MPPT METHOD FOR PHOTOVOLTAIC APPLICATIONS

Sümeyye BÜYÜKKELEK

**Konya Technical University
Institute of Graduate Studies
Department of Electrical-Electronics Engineering**

Advisor: Prof. Dr. Ahmet Afşin KULAKSIZ

2024, 69 Pages

Jury

**Prof. Dr. Ahmet Afşin KULAKSIZ
Assoc. Prof. Dr. Mustafa YAĞCI
Asst. Prof. Dr. Emre Hasan DURSUN**

As electric vehicles become increasingly widespread, a continuous increase in electrical energy consumption is expected in the coming years. In our country, mostly fossil fuels are used in electrical energy production and their reserves are limited. Renewable energy sources have become attractive today because they produce energy without using fossil fuels. The maximum amount of power that photovoltaic (PV) cells can produce varies depending on radiation, temperature and other environmental effects, and different operating characteristics occur depending on these factors. In order to determine these characteristics, cells need to be modeled. In this thesis study, 1Soltech 1STH-215-P model was chosen as the PV panel and the model of the PV cell was created in Matlab/Simulink with the help of the single diode model. The I-V and P-V curves of the PV model created with the help of the ready-made PV model and the mathematical model were compared and the maximum power points (MPP) were determined using the model.

Since equivalent circuit parameters may change due to external factors such as aging of the panel, dust and dirt, the MPP value calculated using the model may change over time. In the proposed method, the model-based maximum power point tracking (MPPT) algorithm was used to reach the maximum power point, and a switch was made to the perturb and observe (P&O) algorithm near the MPP, taking into account the changes that would occur in the MPP calculation in non-ideal situations. With this study conducted in the Matlab/Simulink simulation environment, the hybrid method using the model-based MPPT algorithm, which is implemented by obtaining equivalent circuit parameters, and the traditional P&O algorithm's convergence speed to reach the MPP and the oscillations around the MPP were compared and the advantages of the proposed model-based hybrid algorithm over the traditional algorithm were observed.

Keywords: Photovoltaics, photovoltaic cell equivalent circuit parameters, hybrid algorithm, mathematical model, maximum power point tracking, perturb and observe algorithm

ÖNSÖZ

Tez çalışmam süresince engin bilgi ve tecrübeleriyle sabırla bana yol gösteren saygıdeğer danışman hocam Prof. Dr. Ahmet Afşin KULAKSIZ'a teşekkürlerimi sunarım. Desteğini her zaman yanımda hissettiğim değerli arkadaşlarıma ve yüzümdeki gülümsemenin kaybolmaması için uğraşan sevgili ailem; Seyde BÜYÜKKELEK ve Hasan BÜYÜKKELEK'e teşekkür ederim.

Sümeyye BÜYÜKKELEK
KONYA-2024



İÇİNDEKİLER

ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
ÖNSÖZ	vi
İÇİNDEKİLER	vii
SİMGELER VE KISALTMALAR	ix
1. GİRİŞ	1
2.KAYNAK ARAŞTIRMASI	3
2.1. PV Hücre Eşdeğer Devre Parametrelerinin Belirlenmesi ile İlgili Çalışmalar	3
2.2. MPPT Yöntemi ile İlgili Çalışmalar	4
3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	8
3.1. Fotovoltaik (PV) Sistemler	8
3.1.1. Güneş pilleri.....	9
3.1.2. PV hücre parametreleri	11
3.1.3. Sıcaklık ve ışık şiddeti etkisi	15
3.1.4. PV Hücre Eşdeğer Devresi ve Matematiksel Modeli	16
3.2. Maksimum Güç Noktası İzleme (MPPT)	23
3.2.1. MPPT Kavramı	24
3.2.2. MPPT Prensibi.....	25
3.2.3. MPPT Yöntemleri.....	27
3.3. DC-DC Dönüştürücüler	32
3.3.1. Anahtarlamalı DC-DC dönüştürücüler	32
3.3.2. Darbe genişlik modülasyonu (PWM) tekniği	37
3.4. Matlab/Simulink ile PV Panel Modellenmesi	39
3.4.1. Model tabanlı MPPT yönteminin ve PV panelin modellenmesi	39
4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA.....	48
4.1. Hazır PV modelin ve sunulan PV modelin karşılaştırılması	48
4.1.1. Hazır PV model ve sunulan PV model üzerinde ışıınım etkisi.....	49
4.1.2. Hazır PV model ve sunulan PV model üzerinde sıcaklık etkisi	51
4.2. Matematiksel model kullanılarak oluşturulan PV modelin incelenmesi	52
4.2.1. Işıınımda ani değişimler olduğu durumun incelenmesi	52
4.2.2. Yük direnci değişimlerinin incelenmesi	55
4.2.3. Geleneksel P&O ve hibrit algoritmanın karşılaştırılması	56
4.2.4. Ppv ve Po' nun incelenmesi.....	64
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	65
5.1. Sonuçlar	65

5.2. Öneriler	66
KAYNAKLAR	67



SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

E_{g0}	: Yarı iletken bant aralığı enerjisi (eV)
f	: Frekans (Hz)
G	: Güneş ışınlamı (W/m^2)
I	: Akım (A)
I_{ph}	: Foto akım (A)
I_{sc}	: Kısa devre akımı
k_i	: 25°C 1000 W/m^2 'de hücrenin kısa devre akımı
K	: Boltzmann sabiti (J/K)
L	: Endüktans (H)
n	: Diyot idealite faktörü
N_s	: Seri bağlı hücre sayısı
N_p	: Paralel bağlı modül sayısı
P	: Güç (W)
q	: Elektron yükü (C)
R_s	: Seri bağlı direnç (Ω)
R_{sh}	: Paralel bağlı direnç (Ω)
T	: Çalışma sıcaklığı (K)
T_n	: Nominal sıcaklık (K)
V	: Gerilim (V)
V_{oc}	: Açık devre gerilimi

Kısaltmalar

CMPPT	: Akım Tabanlı Maksimum Güç Noktası İzleme
DC	: Doğru Akım
FF	: Doluluk Faktörü (Fill Factor)
MATLAB	: Matrix Laboratory
MPPT	: Maksimum Güç Noktası İzleme
P&O	: Değiştir ve Gözle (Perturb & Observe)
PF	: Güç faktörü
PV	: Fotovoltaik
PWM	: Darbe Genişlik Modülasyonu
VMPPT	: Voltaj Tabanlı Maksimum Güç Noktası İzleme
YSA	: Yapay Sinir Ağları

1. GİRİŞ

Daha sürdürülebilir ve doğa dostu ulaşım sistemleri için elektrikli araçların gittikçe yaygınlaşmasıyla birlikte elektrik enerjisi tüketiminde önümüzdeki yıllarda sürekli bir artış beklenmektedir. Elektrik enerjisi üretiminde ise fosil yakıtlar yaygın olarak kullanılmaktadır ve rezervleri kısıtlıdır. Yenilenebilir enerji kaynakları fosil yakıtlar kullanılmadan enerji ürettikleri için günümüzde cazip hale gelmiştir. Fotovoltaik (PV) sistemler; hareketli parça içermediklerinden bakım maliyetleri düşüktür, çevre dostudur ve güvenilirdir. Ancak yatırım maliyetleri yüksek olan PV sistemlerin verimleri nispeten düşüktür ve üretilen elektrik enerjisi depolanırken zorluklar yaşanmaktadır. PV sistemlerin başlıca dezavantajlarından olan verim konusunun çözüme kavuşturulabilmesi için literatürde PV sistemlerden maksimum güç elde edilmesine yönelik çalışmalar yapılmaktadır.

PV hücrenin çıkış gücünün sıcaklık ve ışıınımdan etkilenmesi nedeniyle değişkenlik göstermesi ve düşük verimliliğe sahip olması istenmeyen durumlardır. Farklı hava koşullarında sistemin verimliliğini arttırarak maksimum gücü elde etmek gerekmektedir. Bunun için kullanılabilir yöntemlerden biri eşdeğer devre parametrelerinin belirlenmesiyle fotovoltaik hücrenin modellenmesidir. Bu eşdeğer devre modeli kullanılarak, belirli ışıını ve sıcaklık değerlerine karşılık gelen maksimum güç noktaları (MPP) hesaplama yoluyla doğrudan belirlenebilir. Panelde zamanla ortaya çıkan fiziksel yıpranmalar, toz, kir gibi dış etkenler nedeniyle devre parametreleri kullanılarak yapılan hesaplamalar gerçek çalışma koşullarında maksimum güç noktasını doğru olarak vermez. Bu durumda kararlı durumda maksimum güç noktasına daha hassas bir erişim sağlamak için, geleneksel değiştir ve gözle (P&O) algoritmasına geçiş yapılarak hibrit bir algoritma oluşturulmuştur. Eşdeğer devre parametreleri kullanılarak hesap yoluyla belirlenen MPP noktasına yüksek doğrulukta erişim sağlanamasa bile MPP noktasını bulmak için bu yöntemle daha az arama yapılabilmekte, MPP noktasından uzakta daha büyük adım büyüklüğü, MPP yakınlarında daha düşük adım büyüklüğü kullanılabilmesi sebebiyle yakınsama hızı artırılarak MPP etrafındaki salınımların azaltılması mümkün olabilmektedir.

Bu amaçla; bu tez çalışması kapsamında öncelikle PV hücre eşdeğer devre parametreleri belirlenerek matematiksel model oluşturulmuştur. PV hücre eşdeğer devre parametrelerinin belirlenmesi ve model tabanlı hibrit MPPT yöntemi Matlab/Simulink ortamında gerçekleştirilmiştir. Az sayıda parametre içerdiğinden dolayı kolay

uygulanabilen P&O algoritması literatürde yaygın olarak kullanılmaktadır ve iyi bir performansa sahiptir. Geleneksel yöntemlerde gerekli olan doğrusal olmayan dolaylı denklemlerin çözülmesi bu yöntemde gerekli değildir. Geleneksel P&O algoritması ile karşılaştırıldığında, MPP önceden elde edildiğinden ve arama gerektirmediğinden, model tabanlı algoritma daha iyi bir geçici yanıt sağlayabilmektedir. Bu yöntemde, hesaplamalar çok hızlı bir şekilde gerçekleştirildiğinden ve MPP, elde edilen referans değer kullanılarak izlendiğinden, hızla değişen atmosferik koşullar için de iyi performans gösterir.

Bu tezde, her iki yöntemin avantajlarına aynı anda sahip olabilmek amacıyla hibrit bir MPPT yöntemi önerilmiştir. PV modülü maksimum güç noktasında çalıştırmak için güç dönüştürücü olarak PWM kontrollü DC-DC yükseltici (boost) dönüştürücü kullanılmıştır. Simülasyon ortamında yapılan bu çalışmayla geleneksel ve model tabanlı hibrit MPPT yöntemi için elde edilen MPP değerleri, MPP noktasına ulaşma süreleri, MPP noktası civarındaki salınımları karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Ayrıca farklı ortam sıcaklığı ve güneş ışıınımı değerleri için panelin I-V, P-V karakteristik eğrileri karşılaştırmalı olarak verilerek önerilen yöntemin geleneksel P&O algoritmasına göre üstünlüklerinin gösterilmesi amaçlanmıştır.

2.KAYNAK ARAŞTIRMASI

Bu tez çalışmasında PV hücre eşdeğer devre parametrelerinin belirlenmesi ve MPPT yöntemi konuları üzerine literatür taraması gerçekleştirilmiştir. Kaynak araştırması bölümü PV hücre eşdeğer devre parametrelerinin belirlenmesi ve MPPT yöntemleri ile ilgili çalışmalar olarak iki alt başlıkta incelenmiştir.

2.1. PV Hücre Eşdeğer Devre Parametrelerinin Belirlenmesi ile İlgili Çalışmalar

(Özçalık ve diğ., 2013) fotovoltaiik güneş pilinin modellenmesinde tek diyotlu model kullanmıştır. Tek diyotlu model ile güneş ışıını, ortam sıcaklığı, seri bağı hücre sayısı, paralel bağı hücre sayısı ve seri direnç parametrelerinin PV panelden üretilen akım, gerilim, güç değerleri üzerindeki etkisini incelemiştir. Sıcaklık arttıkça akımın arttığını, gücün ve gerilimin azaldığını; ışıık şiddeti arttıkça akım ve gücün arttığını, eşdeğer devredeki seri direnç değeri arttıkça gücün azaldığını, paralel bağı hücre sayısı arttıkça gücün ve akımın arttığını belirtmiştir.

(Şahin ve Okumuş, 2013) yaptıkları çalışmada, PV hücrenin matematiksel modelini Matlab/Simulink ile oluşturmuşlardır. Oluşturdukları model ile parametrelerin verim üzerindeki etkilerini incelemişler ve elde ettikleri sonuçların teorik sonuçlara yakın olduğunu gözlemlemişlerdir. Matematiksel modelin çıkışına omik bir yük ve doğrusal olmayan karakteristiğe sahip olan bir akü yükü bağlanarak farklı yükler için çıkış gerilimi, çıkış akımı ve çıkış gücünün zamanla değişimi gözlenmiştir ve teorikteki ideal bir kaynağa benzer sonuçlar elde etmişlerdir. Matematiksel modeli oluşturulan PV hücrenin farklı sistemlerde kullanılabileceğini görmüşlerdir. Farklı ışıınım ve sıcaklık değerleri için matematiksel modelin I-V ve P-V karakteristik eğrileri elde edilerek benzetimlerin doğruluğu kanıtlanmış ve en düşük ışıınım için kurulacak gerçek bir sistemde en iyi çalışma noktası belirlenmeye çalışılmıştır.

(İşen ve Koçhan, 2020) tarafından PV hücrenin tek diyotlu modellemesi yapılmıştır. Altı adet PV panelden oluşan dizinin elektriksel karakteristik eğrilerini farklı ışıınım ve sıcaklık değerleri için elde etmişlerdir. Modellenen 1Soltech 1STH-215-P PV panele ait akım, gerilim ve güç eğrileri çıkarmışlar. Matlab/Simulink yazılımında mevcut olan hazır fotovoltaiik panel bloğu kullanılarak elde edilen karakteristik eğriler ile bu eğrileri karşılaştırmışlardır. Oluşturulan modelin, kullanılması planlanan PV panelin simüle edilmesinde kullanılabileceği anlaşılmıştır.

2.2. MPPT Yöntemi ile İlgili Çalışmalar

Sıcaklık, ışık şiddeti gibi çalışma koşullarından etkilenmeden PV panellerden maksimum güç elde edilebilmesi için uygun bir kontrol algoritmasının çalıştırılması gerekir. Yük üzerindeki gücün maksimum değerinde elde edilebilmesi için DC-DC dönüştürücü MPPT algoritması ile kontrol edilmektedir. Kullanıldıkları alanlara göre bazı teknik farklılıklar gösterse de MPPT'lerin işleyiş şekilleri genellikle aynıdır. PV panellerde maksimum güç noktası izleme (MPPT) metodu literatürde pek çok çalışmada kullanılmıştır. Geleneksel MPPT algoritmalarını içeren çalışmalardan bazıları bu kısımda özet olarak verilmiştir.

(Masoum, 2002), bu çalışmada PV sistemler için on-line voltaj ve akım ölçümleri yapabilen gerilim tabanlı (VMPPT) ve akım tabanlı (CMPPT) algoritmaları ile programlanmış mikroişlemci kontrollü bir izleme cihazı geliştirmiştir. Yöntemin temel avantajı mevcut izleyicilere kıyasla daha verimli, daha ucuz ve daha güvenilir bir PV sistem oluşturularak referans PV hücre kullanımını elimine etmektir.

(Santos ve Antenus, 2003), PV panel gerilim ve akım bilgisi kullanılarak P&O algoritmasını kullanan gerçek zamanlı bir MPPT algoritması gerçekleştirmişler ve PV sistemin enerji dönüşüm veriminin artırılmasını hedeflemişlerdir. Darbe genişlik modülasyonu (PWM) ile bir dc-dc yükseltici dönüştürücünün görev döngüsünü kontrol etmek için tek çipli mikrodenetleyici kullanılmıştır. Bir PV panele referans olarak gerek duymaması dolayısıyla PV panel karakteristiklerinin bilinmesine ihtiyaç olmaması önerilen yöntemin başlıca avantajıdır.

(Cesare ve diğ., 2004), PV sistemi MPPT devresini kullanarak tam omik bir yük ile göstermişlerdir. Sonuç olarak bu çalışmada maliyet, boyut ve güç verimliliği konularını da kapsayan bir MPPT devresi taşınabilir uygulamalara uygun PV sistem için tasarlanmıştır. MPPT devresi ile tam omik yükün oluşturduğu bir sistemin verimliliği %90 civarında ölçülmüştür.

(Salas ve diğ., 2005) herhangi bir sıcaklık ve ışık şiddeti değeri için PV panel akımını kullanan bir algoritma ile MPPT işlemini gerçekleştirmişlerdir. DC/DC dönüştürücü sisteminde yük olarak akü ve direnç kullanan mikrodenetleyici ile geliştirilmiş örnek bir sistem kullanmışlardır. PV panele ait tek bir parametrenin ölçümünün yeterli olması sistemin temel avantajıdır.

(Kulaksız, 2007), şebekeden bağımsız bir PV güç sisteminde genetik algoritma yardımı ile yapay sinir ağı tabanlı bir MPPT yaklaşımı sunmuştur. İnverter

frekansındaki değişme miktarının ayarlanması için oransal-integral (PI) denetleyici kullanılmıştır ve hızlı yakınsama elde edilmiştir. Bu sayede maksimum güç noktası civarındaki dalgalanmalar önlenmiş ve güç izleme hatası azaltılmıştır. Genetik optimizasyonun kullanılmadığı yapay sinir ağı (YSA) yapısına sahip MPPT algoritması için elde edilen sonuçlara göre, teorik olarak hesaplanan PV panel gücünün ortalama %95.14'ü kullanılabilir. Genetik optimizasyonlu YSA yapısını içeren MPPT algoritması için ise %97.58'inin kullanılabildiği anlaşılmıştır. Tezde geliştirilen MPPT algoritmasında çıkış frekansındaki değişmenin sabit olmamasından dolayı cevap süresi kısadır. PV panel çıkış geriliminin ölçümü algoritma için yeterlidir. Bu durumlar diğer geleneksel metotlara göre avantaj sağlamaktadır.

(Roberto ve Sonia, 2008), bir PV sistemin çıkış karakteristiğinin doğrusal olmadığını ve PV sistemin çıkış karakteristiğinin güneş ışıınımı ve hücrenin sıcaklığı ile değiştirdiğini açıklamış, güneş ışıınımı çeşitliliğine göre 10 farklı teknikteki davranışları karşılaştırarak üretilen enerjiyi en üst düzeye çıkarmayı hedeflemiştir.

(Sirdi ve diğ., 2013) çalışmalarında, en sık kullanılan algoritmaların karşılaştırmalı bir incelemesinden sonra, kontrol problemlerini açıklayan maksimum güç noktasını izlemek için sağlam bir kontrolün nasıl tasarlanacağını gösteren bir kontrol metodolojisi sunmuştur. Değişken Yapı Otomatik Sistemler adı verilen bu teknik ile değiştir ve gözle, artımlı iletkenlik ve tepe tırmanma algoritmaları gibi literatürdeki bazı tekniklerle karşılaştırılmıştır. Maksimum güç; geliştirilmiş değiştir gözle ve çalışma zamanı yaklaşımı kullanılarak çevrimiçi olarak hesaplanır. Bu yöntemin avantajı basit yapısı, kolay uygulanması, daha az parametre gerektirmesi ve önerilen yöntemin farklı çalışma koşullarında nispeten yüksek yakınsama hızı altında iyi izleme verimliliği göstermesidir.

(Kulaksız, 2013) çalışmasında, adaptif nöro-bulanık çıkarım sistemleri (ANFIS), PV hücrelerinin tek diyot modelinde, yani seri direnç, şönt direnç ve diyot idealite faktörü parametrelerinde 3 parametre elde etmek için kullanılmıştır. ANFIS için giriş parametreleri olarak PV modülün I-V eğrisi altındaki birim alanı, PV modüllerin malzeme tipi, kısa devre akımı ve açık devre voltajı kullanmıştır. Önerilen yöntemin avantajı, eşdeğer parametrelerin, kolaylıkla elde edilebilir elektriksel parametreler kullanılarak farklı tipteki (monokristal, çok kristalli ve ince) PV modüller için elde edilebilmesidir. Önerilen modelin doğruluğunu göstermek için MPPT kontrolü, 3 farklı PV modül tipi için akü şarj uygulaması olan bir PV sisteme uygulanmıştır.

(Bataineh ve Hamzeh, 2014) çalışmalarında, tam gölgeli ve ani kısmi gölgeli koşullar altında MPPT algoritmasının performansı ve değişken izolasyon seviyelerini araştırmıştır. Geliştirilen algoritma, hızla değişen hava koşullarını tespit etmek için geniş aralıklı bir arama gerçekleştirir ve tek başına veya şebekeye bağlı sistemleri sürekli olarak maksimum güç noktasına yakın bir yerde tutar. Geliştirilen algoritmanın performansının, çok az değişen çevresel koşullarına göre, diğer geleneksel algoritmalarından daha üstün olduğu bulunmuştur. Ayrıca, PV ani kısmi gölgeleme koşullarına maruz kaldığında, algoritma değişikliklerini hızla algılar ve bir saniyeden daha kısa sürede yeni maksimum güç noktasına ulaşır.

(Aldair ve diğ., 2016) fotovoltaiik hücreler ve yük arasındaki yük eşleşmesi için DC-DC düşüren (buck) dönüştürücünün tasarımı ve uygulaması ile ilgili bir çalışma yürütmüşlerdir. Sabit voltajda artımlı iletkenlik ve önerilen ANFIS referans model yöntemlerini tasarlamışlar ve Altera EP4CE6E22C8N FPGA kartını kullanarak uygulamışlardır. FPGA kartı kullanan fotovoltaiik sistem için ANFIS referans model tabanlı MPPT'nin pratik uygulamasını kullanan ilk çalışmayı gerçekleştirmişlerdir.

(Yamaçlı ve Abacı, 2017) maksimum güç noktasını elde etmenin en kolay yolunun güneş enerjisini, gün ışığını, güneş pili veya panelindeki ışık yoğunluğunu eş eksenli olarak ölçerek takip etmek olduğunu belirtmiştir. Bu çalışmada, tasarlanan gömülü sistem yardımıyla gün ışığı fiziksel olarak ölçüldükten sonra güneş paneli üzerindeki ışık yoğunluğu vektörünün optimize edilmesi ve yeni geliştirilmiş bir yöntem olan Diferansiyel Arama Algoritması kullanılarak gerçek değerlerin işlenmesiyle elde edilmektedir. Bu çalışmada DSA'nın iyi bir çözüm performansı, sağlamlık ve üstünlük sağladığını ve yüksek çözüm kalitesi ve hızlı yakınsaması sayesinde parametre tahmini ve maksimum güç noktası izleme alanında büyük ölçekli, doğrusal olmayan ve konveks olmayan problemlerde etkin bir şekilde kullanılabileceği sonucuna varılmıştır.

(Hussain ve diğ., 2018) çevresel koşullardaki değişim PV dizisinin karakteristiğini değiştirirken, yük değişimi aynı eğri içerisinde çalışma noktasını değiştirir mantığına dayanarak PV dizisinin çalıştığı sıcaklık ve ışıınımı bularak MPP'yi tek bir adımda belirleyen bir yöntem önermişlerdir. Her bir değişiklik türünü, PV voltajı ve akım ölçümleri geçmişisi kullanılarak tanımlamışlardır. Ayrıca, PV voltaj ve akımın ölçülen değerlerine dayanarak, indüktör akımı ve yük voltajı da hesaplanarak ek sensörlere duyulan ihtiyacı ortadan kaldırmışlardır.

(Kulaksız ve diğ., 2019), MPPT algoritmalarından değiştir ve gözle, artımlı iletkenlik ve bulanık mantık yöntemlerinin algoritma modelleri Matlab/Simulink'te oluşturulmuş ve karşılaştırılmıştır. Değişken ışıınım ve sıcaklık için bulanık mantık tekniği ile maksimum güç elde edilmiş ve MPP noktasındaki salınımların geleneksel tekniklere kıyasla daha az meydana geldiği görölmüşür. Bulanık mantık algoritmasının geleneksel tekniklere kıyasla daha iyi takip başarısına sahip olduğu anlaşılmışır.



3. MATERYAL VE YÖNTEM

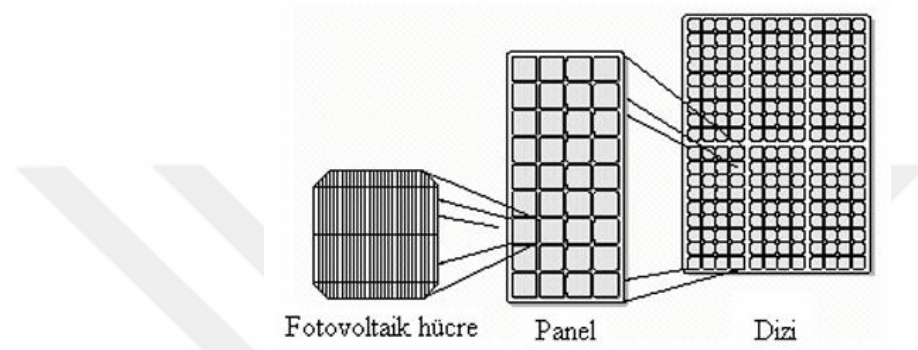
PV hücrenin çıkış gücünün sıcaklık ve ışıınımdan etkilenmesi ve düşük verimliliğe sahip olması önemli dezavantajlarındanr. Farklı hava koşullarında sistemin verimliliğini arttırarak maksimum gücü elde etmek gerekmektedir. Bunun için kullanılabilecek yöntemlerden biri eşdeğer devre parametrelerinin belirlenmesi ile PV hücrenin eşdeğer devre modelinin elde edilmesidir. Bu parametrelerin belirlenmesi ile MPP noktası, model üzerinde yapılan hesaplamalar ile doğrudan belirlenebilir ve MPP noktasına hızlı şekilde erişim sağlanabilir. Bununla birlikte, panelin zamanla fiziksel olarak yıpranması, toz, kir gibi dış etkenler nedeniyle devre parametreleri değişime uğrayabileceğinden maksimum güç noktasını tam olarak doğru değerde göstermez. Bu durumda, model hesaplamaları yerine bir arama algoritmasının kullanılması sürekli durumda daha doğru bir güç izleme sağlayabilir. Eşdeğer devre parametreleri MPP noktasını hassas bir doğrulukla göstermese bile MPP noktasını bulmak için daha az arama yapar. Bu aşamada adım büyüklüğü yüksek tutulabilir ve maksimum güç noktasına böylece daha hızlı bir erişim sağlanması mümkün olur. Bu avantajı elde etmek için bu tezde öncelikle PV hücre eşdeğer devre parametreleri belirlenerek matematiksel model oluşturulmuştur. Oluşturulan bu model maksimum güç noktasından uzakta çalışılan durumlarda maksimum güç noktasına hızlı bir erişim için model-tabanlı MPPT algoritması olarak çalıştırılmıştır. Model üzerinden ışıını ve sıcaklık değerleri de kullanılarak hesaplanan maksimum güç noktasına erişildikten sonra geleneksel değiştir ve gözle (P&O) algoritmasına geçiş yapılmıştır. Maksimum güç noktası takibi için P&O algoritması literatürde yaygın olarak kullanılması ve birkaç parametre içermesinden dolayı uygulama kolaylığına sahiptir. İyi bir performans sunduğundan dolayı tercih edilmiştir. PV modülü MPP'de çalıştırmak için güç elektroniği dönüştürücüsü olarak PWM kontrollü DC-DC yükselten (boost) dönüştürücü kullanılmıştır. Simülasyonlar için Matlab/Simulink programından yararlanılmıştır. Panele ait I-V, P-V karakteristikleri farklı sıcaklık ve ışıını değerleri için çizdirilmiştir.

3.1. Fotovoltaik (PV) Sistemler

Enerji tüketiminin artmasıyla birlikte elektrik enerjisine olan talep gün geçtikçe artmaktadır. Çevre dostu olması ve doğada sürekli olarak kendini yenilemesi sebebiyle yenilenebilir enerji kaynakları elektrik enerjisi üretiminde yaygın olarak

kullanılmaktadır. Güneş ve rüzgâr enerjisi yenilenebilir enerji kaynaklarının başında yer almaktadır. Güneş enerjisinden elektrik üretimi, PV sistemler ve güneş termal enerjisinden faydalanılarak gerçekleştirilmektedir (Kırcıoğlu ve Yıldız, 2015).

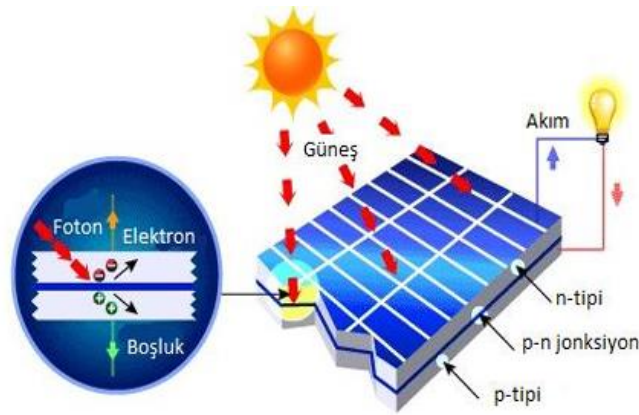
PV hücreler yarı iletkenlerdir, güneş ışığını doğrudan elektrik enerjisine çevirirler. Güç ihtiyacını karşılamak için PV hücrelerin birleştirilmesiyle modüller, modüllerin bir araya gelmesiyle PV paneller, PV panellerin birleşimiyle diziler oluşturulmaktadır. Aynı şekilde PV hücrelerin paralel veya seri bağlanmasıyla PV diziler oluşturulmaktadır.



Şekil 3.1. PV hücre, panel, dizi oluşumları (Kırcıoğlu ve Yıldız, 2015).

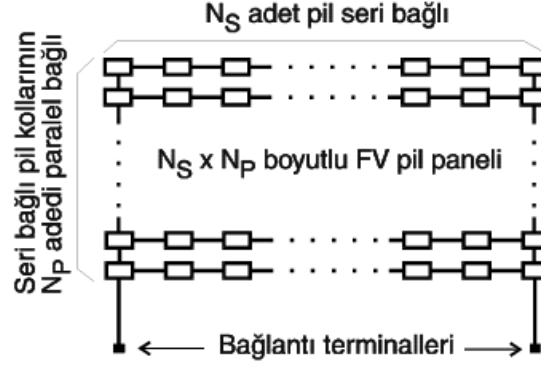
3.1.1. Güneş pilleri

Güneş pilleri, güneş tarafından yayılan ışınları emerler ve elektrik akımı oluşturan yarı iletken malzemelerden üretilirler. Işığa maruz kaldıklarında elektrik üreten bir bileşendir. Şekil 3.2’de güneş pilinin iç yapısı verilmiştir. Fotovoltaik malzemelerin temelleri kristal ve amorf silikondur.



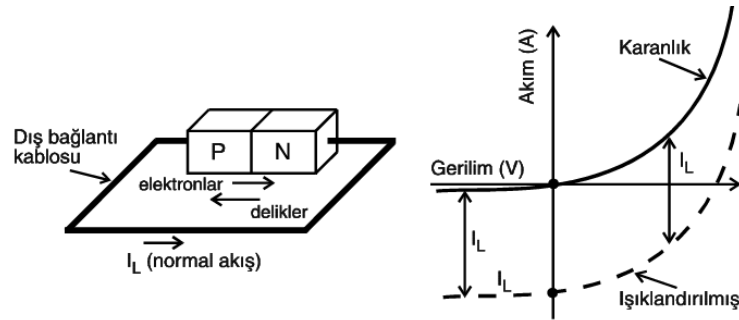
Şekil 3.2. PV hücre iç yapısı (Özçalık ve diğ., 2013)

Güneş panelleri, fotovoltaiik hücrelerin seri ve paralel bağlanmasıyla elde edilir. Şekil 3.3'te Güneş pillerinin seri-paralel bağlanması ile oluşturulan PV güneş paneli gösterilmiştir.



Şekil 3.3. PV hücrelerin seri-paralel konfigürasyonu ile oluşturulan PV panel (Altaş,98).

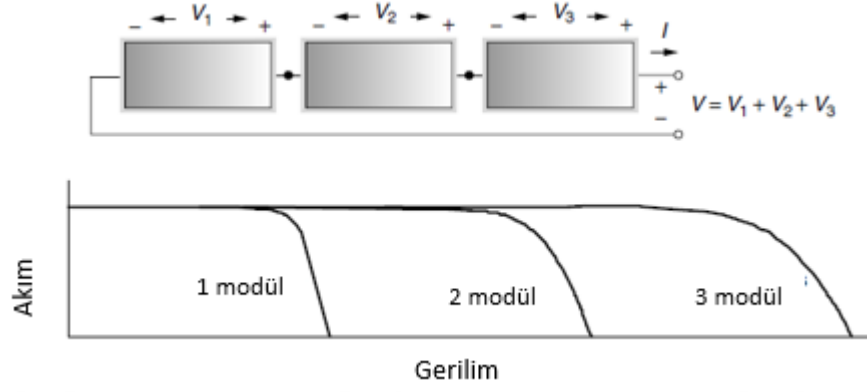
Güneş pilleri ile pozitif-negatif (P-N) eklemlili bir diyodun çalışması benzerdir. Elektronlar N katmanından çıkıp dış devre üzerinden P katmanına dönerler ve burada deliklerle yeniden birleşirler. Şekil 3.4'te de bu P-N birleşimi basitçe gösterilmiştir. Pozitif (P) tipi ve negatif (N) tipteki iki yarıiletken malzemenin birleştirilmesi ile yarıiletken bir diyot oluşturulur. Örneğin saf Silikon malzemeye bir miktar (1:1.000.000 oranında) Boron eklenerek P tipi bir malzeme elde edilir. Saf Silikona bir miktar Fosfor eklenerek de N tipi bir malzeme elde edilir. Boron eklenen parçada boşluklar (delikler) oluşur, fosfor eklenen parçada ise serbest elektronlar oluşur (Altaş, 98).



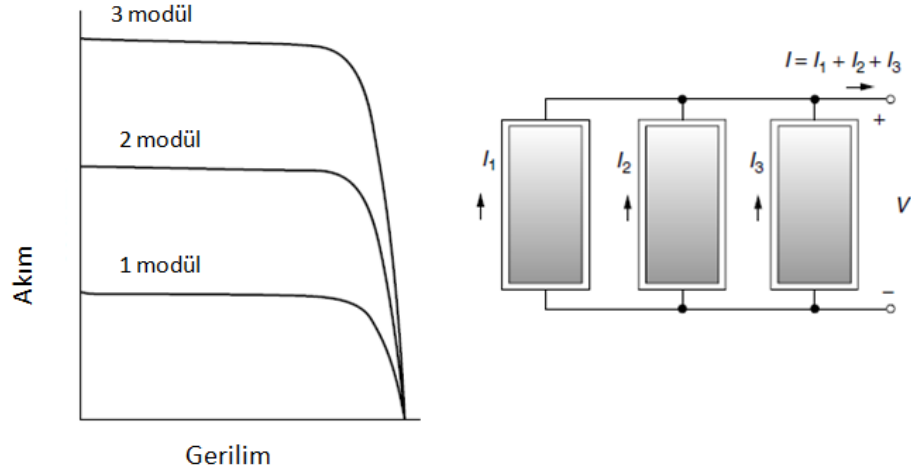
Şekil 3.4. P-N eklemlili bir diyodun simetrik özellikleri ve diyodun karanlık altındaki I-V karakteristiği (Altaş, 98)

Gerekli güç ihtiyacına göre PV hücrelerin birleştirilmesiyle modüller, modüllerin bir araya gelmesiyle PV paneller, PV panellerin birleşimiyle diziler oluşturulmaktadır. Aynı şekilde PV hücrelerin paralel veya seri bağlanmasıyla PV

diziler oluşturmaktadır. PV modülde seri bağlı hücre sayısı (N_s) Şekil 3.5'te panel gerilimini arttırırken, paralel bağlı hücre sayısı (N_p) Şekil 3.6'da panel akımını arttırmaktadır.



Şekil 3.5. PV modüllerin seri bağlanmasının akım ve gerilim üzerindeki etkisi (Smets ve diğ., 2016).



Şekil 3.6. PV modüllerin paralel bağlanmasının akım ve gerilim üzerindeki etkisi (Smets ve diğ., 2016).

3.1.2. PV hücre parametreleri

Bu çalışmada 1Soltech 1STH-215-P model güneş paneli kullanılmıştır ve panele ait karakteristik özellikler Çizelge 3.1'de verilmektedir.

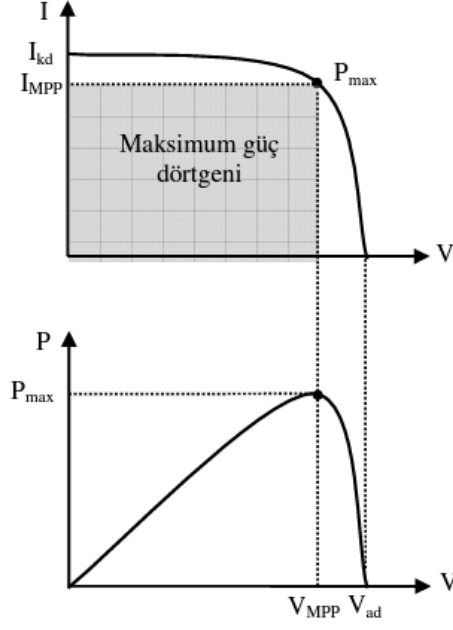
Çizelge 3.1. 1Soltech 1STH-215-P model panel karakteristikleri

Maksimum Güç (W)	213.15
Açık Devre Gerilimi V_{oc} (V)	36.3
Maksimum Güç Noktasındaki Gerilim V_{MPP} (V)	29
Açık Devre Gerilim Sıcaklık Katsayısı (%/deg.C)	-0.36099
Modüldeki Hücre Sayısı N_{cell}	60
Kısa devre Akımı I_{sc} (A)	7.84
Maksimum Güç Noktasındaki Akım I_{MPP} (A)	7.35
Kısa Devre Akım Sıcaklık Katsayısı (%/deg.C)	0.102

3.1.2.1. Akım-gerilim (I-V) ve güç-gerilim (P-V) karakteristikleri

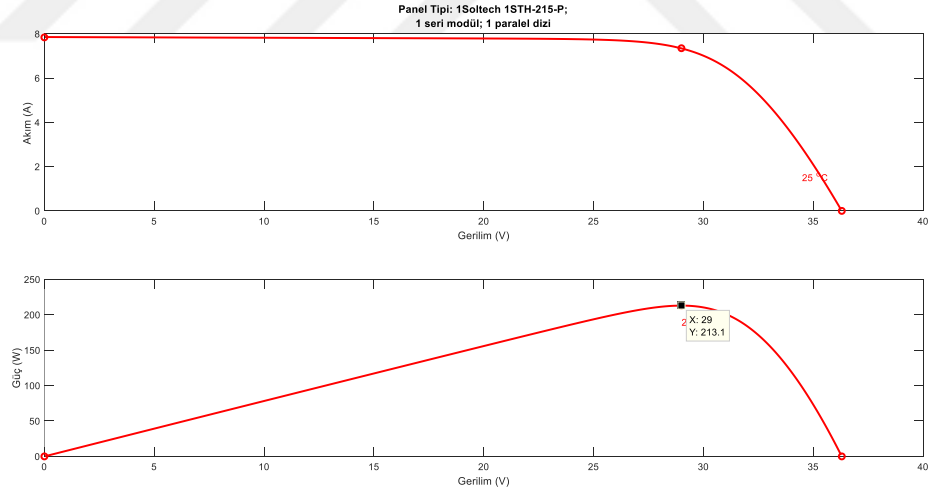
PV hücrenin I-V karakteristik eğrisi Şekil 3.7' de verilmiştir. Eğriden anlaşılacağı üzere yüke bağlı olarak PV hücrenin herhangi bir noktada çalıştırılması mümkündür. Eğrideki iki önemli nokta açık devre gerilimi V_{oc} ve kısa devre akımı I_{sc} 'dir. Bu iki parametre fotovoltaiik hücrenin elektriksel performansını belirlemekte kullanılır.

Fotovoltaiik hücre, maksimum gücü maksimum gerilim noktası V_{MPP} ve maksimum akım noktasında I_{MPP} üretir. Şekil 3.7'de verilen taralı alanın ($I_{MPP} \times V_{MPP}$) mümkün olan maksimum değerde olması durumunda maksimum güç elde edilir. Şekilde taralı alanın oluşturduğu maksimum güç dörtgeni, maksimum güç noktasında üretilen gücü belirler. I-V eğrisinin dikdörtgen şekline yakın olmasıyla doluluk faktörü (FF) ilişkilidir. Maksimum hücre gerilimi ise açık devre halinde oluşur. Kısa devre ve açık devre halinde çıkış gücü sıfırdır (Kulaksız, 2007).



Şekil 3.7. İdeal PV hücrenin I-V ve P-V karakteristikleri (Kulaksız,2007)

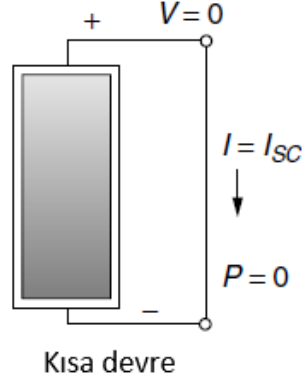
Bu çalışmada kullanılan 1Soltech 1STH-215-P model PV modüle ait akım-gerilim (I-V) ve güç-gerilim (P-V) karakteristikleri Şekil 3.8’de verilmiştir.



Şekil 3.8. 1Soltech 1STH-215-P model panel I-V ve P-V karakteristikleri

3.1.2.1.1. Kısa devre akımı (I_{sc})

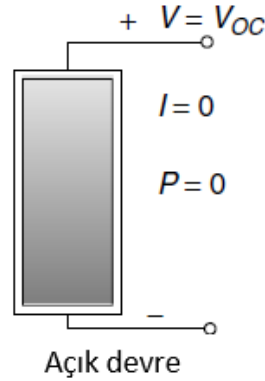
Kısa devre akımı (I_{sc}), tam ışıma altında çıkış uçları kısa devre edilip çıkış akımı ölçülerek belirlenir. Kısa devre akımı, ışık şiddeti seviyesi ile doğru orantılıdır. Şekil 3.10’da da görüldüğü gibi kısa devre iken güç üretilmemektedir.



Şekil 3.9. Kısa devre akımı (Smets ve diğ., 2016).

3.1.2.1.2. Açık devre voltajı (V_{oc})

Fotovoltaik güneş pili üzerinden akım akmadığında, bu hücre için mevcut maksimum voltaj açık devre voltajı (V_{oc}) olarak tanımlanır ve Şekil 3.10'da da görüldüğü gibi açık devre iken güç üretilmemektedir.



Şekil 3.10. Açık devre voltajı (Smets ve diğ., 2016).

3.1.2.1.3. Doluluk Faktörü (FF)

Eşitlik 3.1 ile PV hücrenin maksimum gücünün; açık devre gerilimi ve kısa devre akımının çarpılmasıyla bulunan teorik güce oranıyla doluluk faktörü hesaplanabilmektedir. Doluluk faktörüne fill faktörü de denilmektedir. Doluluk faktörüne ait denklem Eşitlik 3.1'de verilmiştir.

$$FF = \frac{I_{MPP} \times V_{MPP}}{I_{sc} \times V_{oc}} \quad (3.1)$$

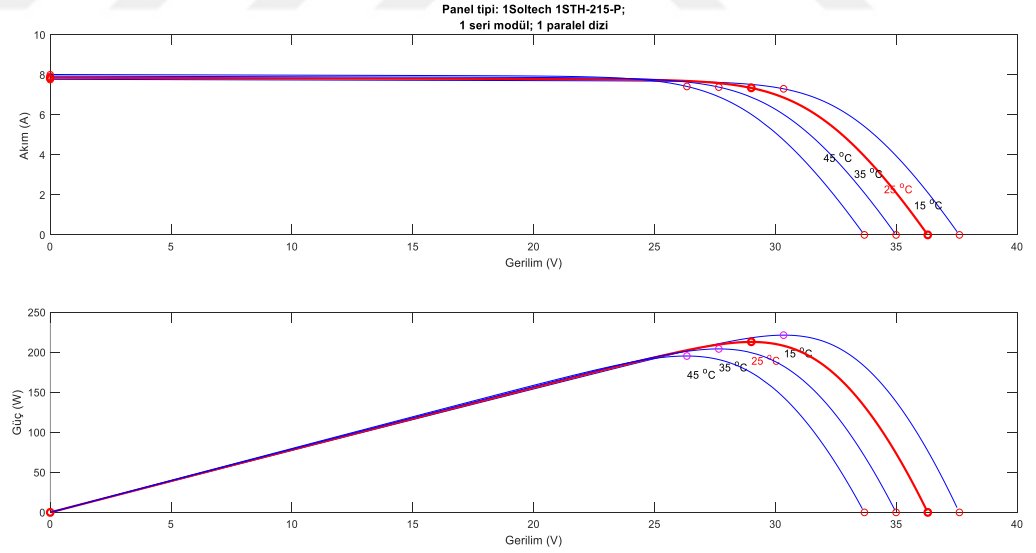
3.1.2.1.4. Verim (η)

Eşitlik 3.2 ile PV panellerinin ürettiği enerjinin güneş ışığında bulunan enerjiye oranı ile verimlilik hesaplanabilmektedir. Verim, ışınım yoğunluğuna ve hücrelerin sıcaklığına bağlıdır.

$$\eta = \frac{I_{sc} * V_{oc} * FF}{P_{in}} \quad (3.2)$$

3.1.3. Sıcaklık ve ışık şiddeti etkisi

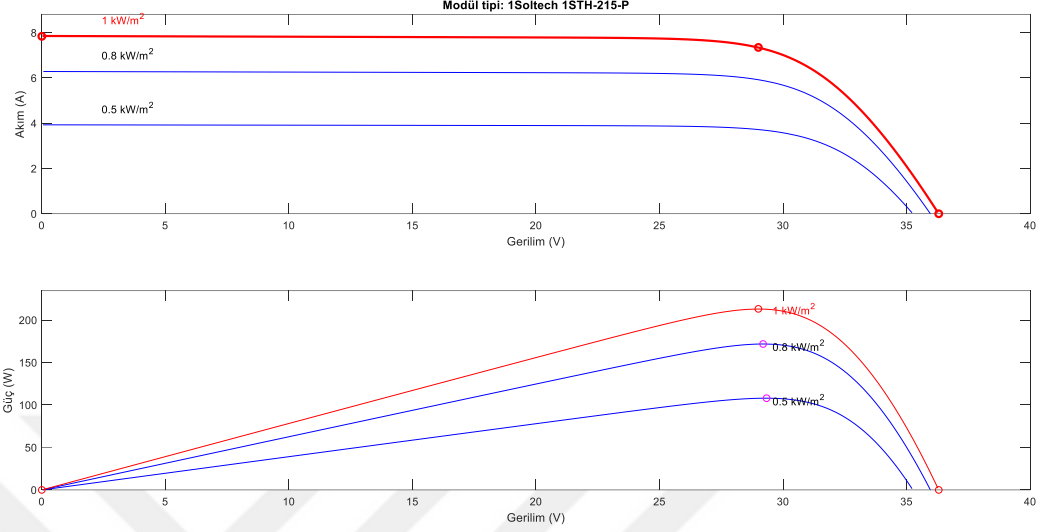
Bu çalışmada kullanılan 1Soltech 1STH-215-P model PV modülün sabit $1000W/m^2$ ışınım altında farklı sıcaklık değerlerinde ($15^\circ C$, $25^\circ C$, $35^\circ C$, $40^\circ C$) akım-gerilim (I-V) ve güç-gerilim (P-V) karakteristik eğrileri Şekil 3.11’de verilmiştir. Şekil 3.11’den de görüldüğü üzere aynı çıkış gerilimi için artan sıcaklıkla beraber çıkış akımı düşer. Bu nedenle sıcaklık artışı panel gücü ile ters orantılıdır ve sıcaklık arttıkça Şekil 3.11’de görüldüğü gibi panelin çıkış gücü azalır.



Şekil 3.11. 1Soltech 1STH-215-P model panelin sıcaklığa bağlı I-V ve P-V karakteristikleri

Bu çalışmada kullanılan 1Soltech 1STH-215-P model PV modülün sabit $25^\circ C$ sıcaklıkta farklı ışınım değerleri için ($500W/m^2$, $800W/m^2$, $1000W/m^2$,) akım-gerilim (I-V) ve güç-gerilim (P-V) karakteristik eğrileri Şekil 3.12’de verilmiştir. Şekilden

görüldüğü üzere aynı çıkış gerilimi için artan ışınlam değeriyle birlikte çıkış akımı ve panelin çıkış gücü de artmaktadır. Bu nedenle güneş ışınlamı ve panel çıkış gücü doğru orantılıdır.



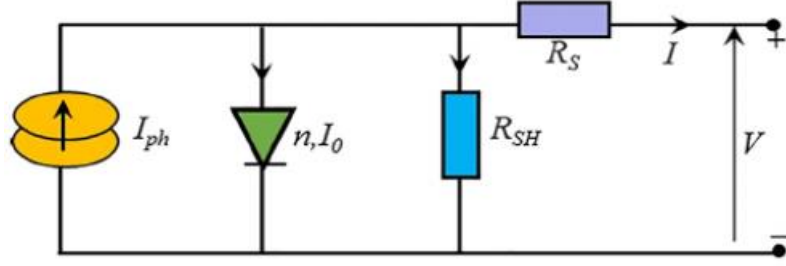
Şekil 3.12. 1Soltech 1STH-215-P model panelin ışınlamaya bağlı I-V ve P-V karakteristikleri

3.1.4. PV Hücre Eşdeğer Devresi ve Matematiksel Modeli

3.1.4.1. PV hücre eşdeğer devresi

Işınım, sıcaklık gibi çevresel etkilere bağlı olarak PV hücrelerden elde edilebilecek maksimum güç miktarı değişmektedir. PV hücrelerin üretebileceği gerilim, akım ve güç değerleri çevresel etkenlerin değerlerine göre değişmektedir. Değişen çevresel etkenlere göre çalışma karakteristikleri ortaya çıkmaktadır (Wang ve diğ., 2019). Bu karakteristiklerin belirlenebilmesi için hücrelerin modellenmesi gerekmektedir (Shannan ve diğ., 2013).

Bir aydınlatılmış güneş pili, tek bir diyottan, bir foto-kaynaklı akımdan (I_{ph}), bir seri dirençten (R_s) ve bir şönt dirençten (R_{SH}) oluşan bir elektrik devresi ile modellenebilir (Amiry ve diğ., 2018). PV hücrenin tek diyot eşdeğer devresi Şekil 3.13'te verilmiştir.



Şekil 3.13. PV hücre eşdeğer devresi tek diyot modeli (Amiry ve diğ., 2018)

Bir güneş pili tarafından sağlanan çıkış gerilimi (V) ve çıkış akımını (I) birbiriyle ilişkilendiren denklem Eşitlik 3.3 ile verilmektedir (Amiry ve diğ., 2018).

$$I = I_{ph} - I_0 \left[\exp \left(\frac{(V + I R_s)}{n V_{th}} \right) - 1 \right] - \frac{V + I R_s}{R_{SH}} \quad (3.3)$$

Burada

$$V_{th} = \frac{k_B T}{e} \quad (3.4)$$

I_0 : diyotun ters satürasyon akımı

n : idealite faktörü

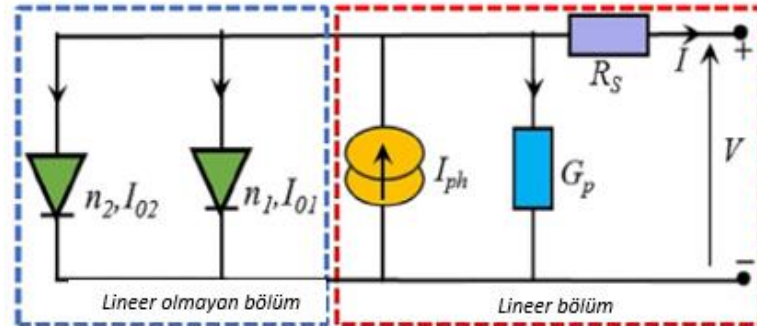
V_{th} : Termal voltaj

k_B : Boltzmann sabiti

T : Çalışma sıcaklığı

e : Elektron yükü

Bir PV hücre ayrıca bir foto-kaynaklı akım (I_{ph}), bir seri direnç (R_s) ve paralel iletkenliğe ($G_p = 1/R_{SH}$) ek olarak iki diyottan oluşan eşdeğer bir devre ile (Şekil 3.14) modellenebilir (Amiry ve ark, 2018).



Şekil 3.14. PV hücre eşdeğer devresi çift diyot modeli (Amiry ve diğ., 2018)

Thevenin teoremi uygulandığında çıkış voltajının bir fonksiyonu olarak terminal akımının ifadesini sağlayan alternatif bir modeli temsil eden başka bir devreye dönüştürülür (Amiry ve ark,2018).

$$V_{th} = \left(\frac{V}{R_s} + I_{ph} \right) R_{th} \quad R_{th} = \frac{R_s}{1 + R_s \cdot G_p} \quad (3.5)$$

$$I = I_{ph} - I_{01} \cdot \left[\exp \left(\frac{(V + I \cdot R_s)}{n_1 \cdot V_{th}} \right) - 1 \right] - I_{02} \cdot \left[\exp \left(\frac{(V + I \cdot R_s)}{n_2 \cdot V_{th}} \right) - 1 \right] - G_p (V + I \cdot R_s) \quad (3.6)$$

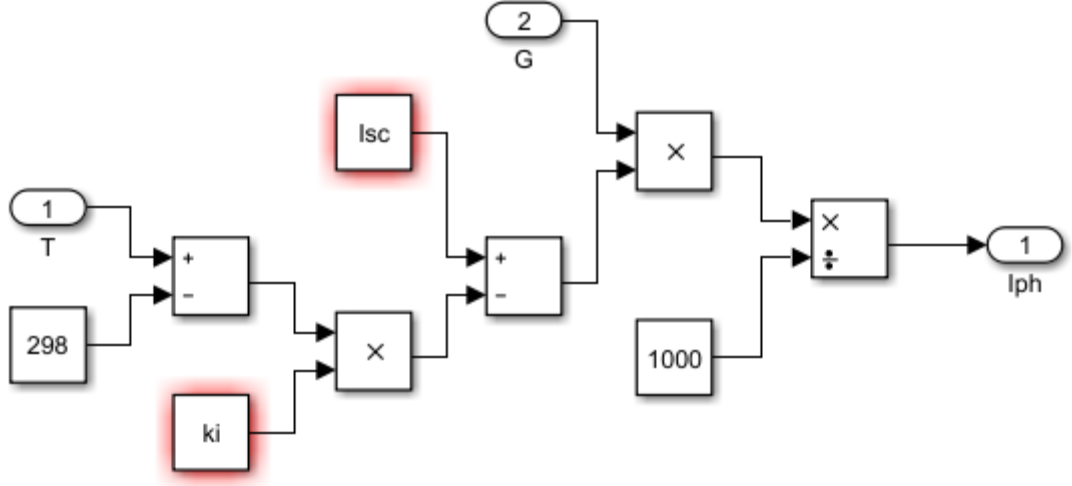
3.1.4.2. PV hücre matematiksel modeli

3.1.4.2.1. Işık akımının modellenmesi

Işık akımının hesaplanması için Eşitlik 3.7 kullanılmaktadır. Bu eşitliğin Matlab /Simulink modeli Şekil 3.15'te verilmiştir.

$$I_{ph} = [I_{sc} + k_i \cdot (T - 298)] \cdot \frac{G}{100} \quad (3.7)$$

- I_{ph} : ışık akımı (A)
- k_i : 25°C 1000 W/m²'de hücrenin kısa devre akımı
- T : çalışma sıcaklığı (K)
- T_n : nominal sıcaklık (K)
- G : Güneş ışıınımı (W/m²)



Şekil 3.15. Matlab/Simulink'te oluşturulan ışık akımı modeli

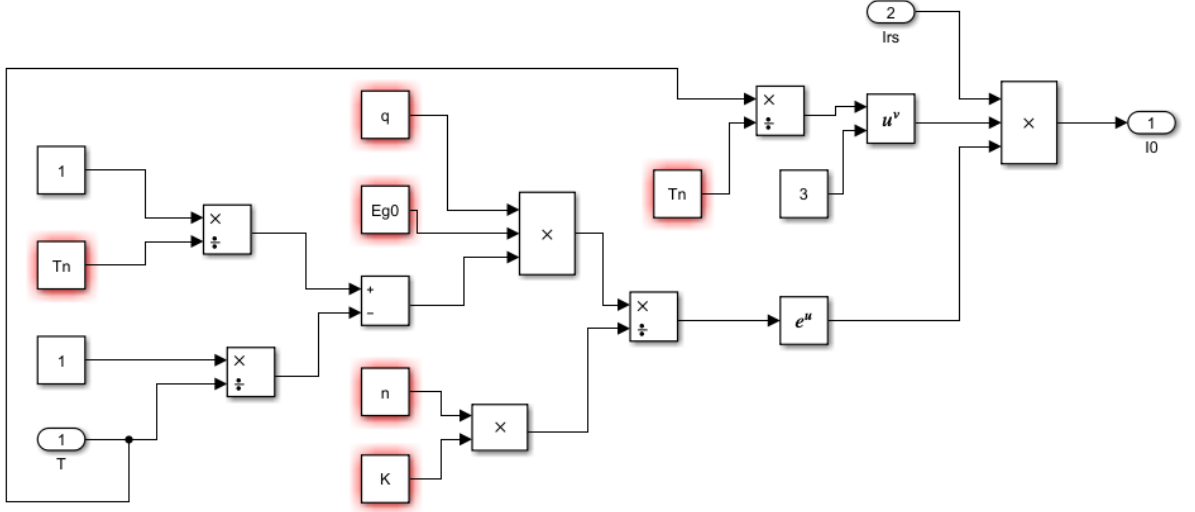
3.1.4.2.2. Sızıntı Akımının Modellenmesi

Sızıntı akımının hesaplanması için Eşitlik 3.8 kullanılmaktadır. Bu eşitliğin simulink modeli Şekil 3.16'da verilmiştir. Bu denklemden I_0 sızıntı akımını, I_{rs} satürasyon akımını ifade etmektedir. Eşitlik 3.9 ile satürasyon akımı (I_{rs}) hesaplanmaktadır. Bu eşitliğin Matlab/Simulink modeli Şekil 3.17' de verilmiştir.

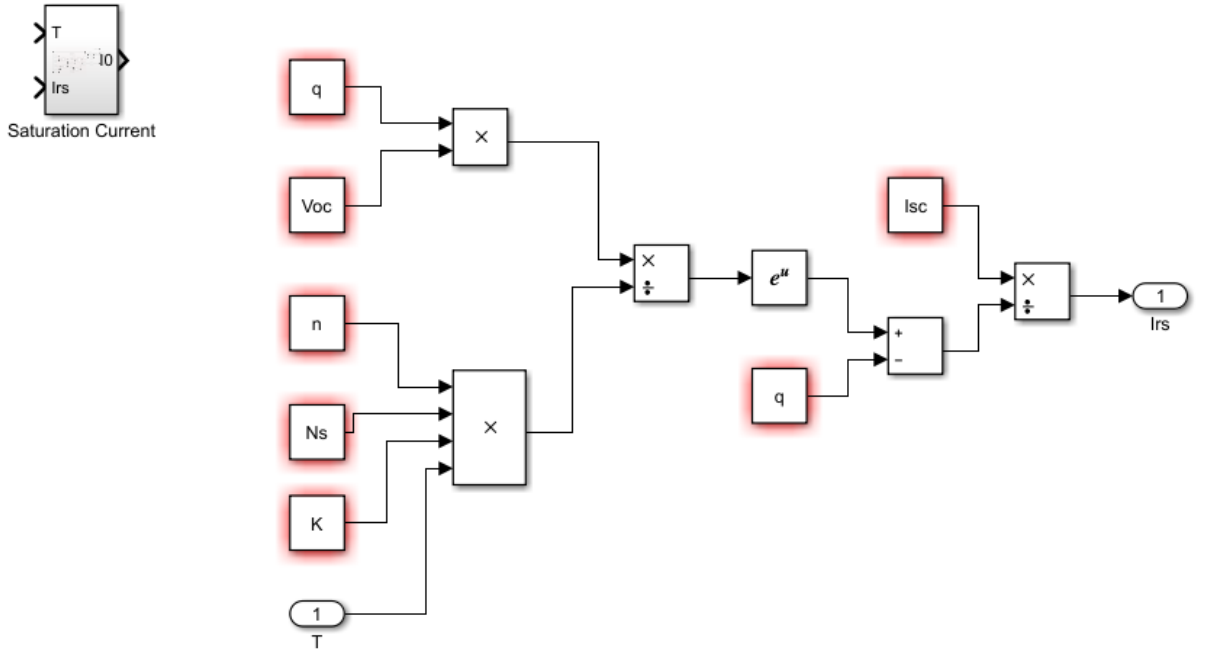
$$I_0 = I_{rs} \cdot \left(\frac{T}{T_n} \right)^3 \exp \left[\frac{q \cdot E_{g0} \cdot \left(\frac{1}{T_n} - \frac{1}{T} \right)}{n \cdot K} \right] \quad (3.8)$$

$$I_{rs} = \frac{I_{sc}}{e^{\left(\frac{q \cdot V_{oc}}{n \cdot N_s \cdot K \cdot T} \right)} - 1} \quad (3.9)$$

- I_{sc} : Kısa devre akımı
- T : Çalışma sıcaklığı (K)
- T_n : Nominal sıcaklık (K)
- q : Elektron yükü (C)
- V_{oc} : Açık devre gerilimi
- n : Diyot idealite faktörü
- K : Boltzmann sabiti (J/K)
- E_{g0} : Yarı iletken bant aralığı enerjisi (eV)
- N_s : Seri bağlı hücre sayısı



Şekil 3.16. Matlab/Simulink'te oluşturulan sızıntı akımı modeli



Şekil 3.17. Matlab/Simulink'te oluşturulan satürasyon akımı modeli

3.1.4.2.3. R_s ve R_{sh} dirençleri

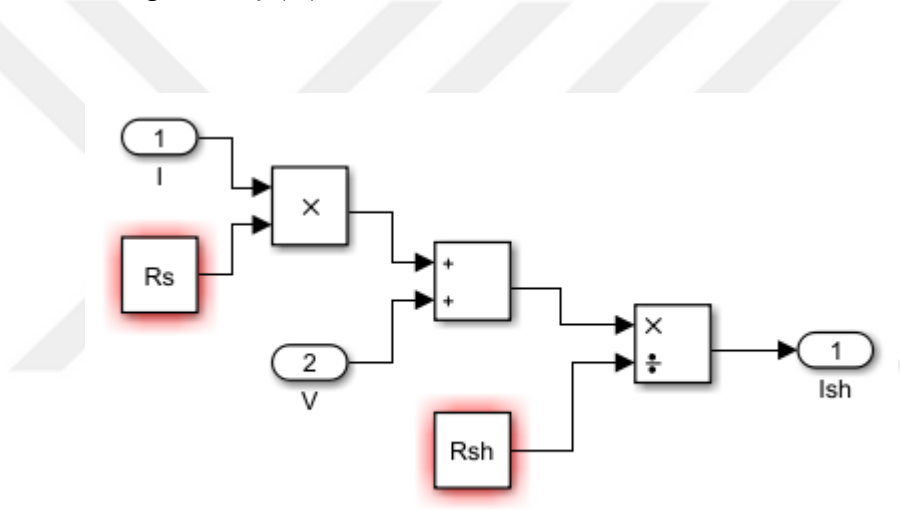
Bir PV panelin teknik kataloğunda R_s ve R_{sh} dirençlerinin değerleri bulunmamaktadır. Modeli idealleştirmek için R_s direnci sıfır olarak ve R_{sh} direnci de sonsuz değerde kabul edilir. Ancak gerçek duruma daha yakın bir model elde etmek için bu direnç değerleri de hesaba katılmalıdır. Panelin gerilim kaynağı gibi çalıştığı durumda R_s , panelin akım kaynağı gibi çalıştığı durumda ise R_{sh} etkindir. R_s ve R_{sh}

değerleri test sonuçlarından ya da veri sayfasındaki değerler ve eğrilerden de elde edilebilir. Matlab/Simulink PV dizisi hazır bloğunun hafızasında her bir panel için ayrı ayrı olarak değişen çevresel şartlar için elde edilen eğriler verilmektedir. Çalışmada kurulan modelde bu veriler kullanılmıştır (İşen ve Koçhan, 2020). Eşitlik 3.10'da I_{sh} 'ye ait denklem verilmiştir. Bu eşitliğin Matlab/Simulink modeli Şekil 3.18'de verilmiştir.

$$I_{sh} = \left(\frac{V + I.R_s}{R_{sh}} \right) \quad (3.10)$$

R_s : Seri bağlı direnç (Ω)

R_{sh} : Paralel bağlı direnç (Ω)



Şekil 3.18. Matlab/Simulink'te oluşturulan şönt akımı modeli

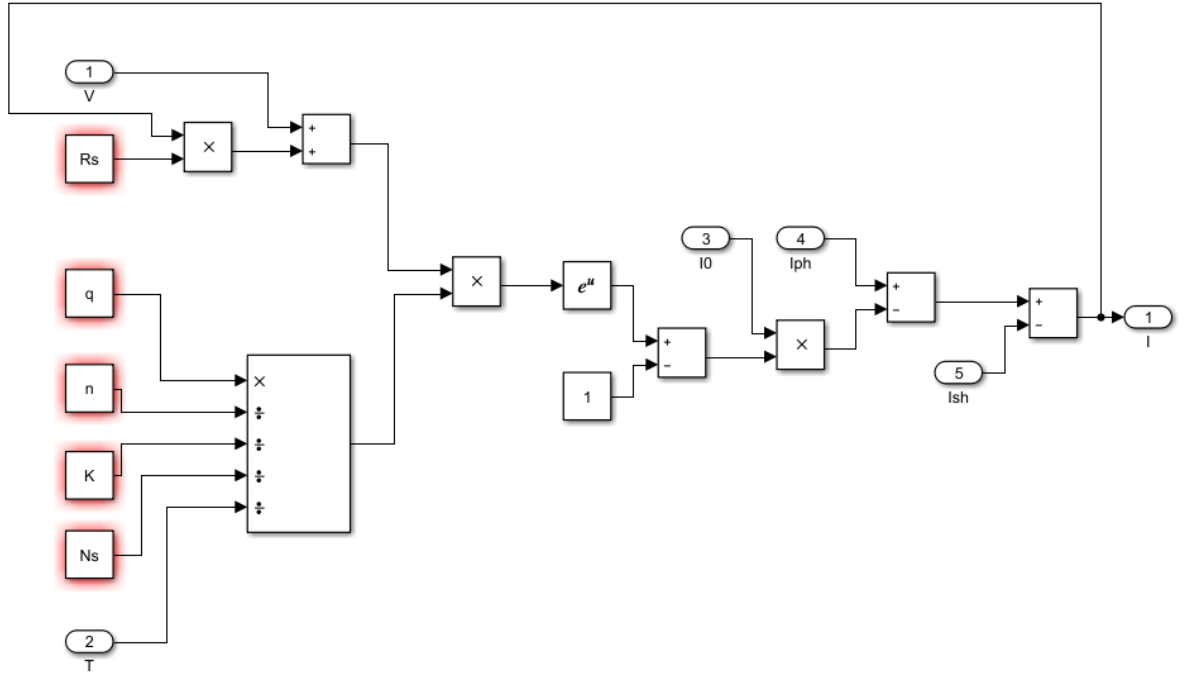
3.1.4.2.4. Panel akımının modellenmesi

Panel akımının hesaplanması için Eşitlik 3.11 kullanılmaktadır. Bu eşitliğin Matlab/Simulink modeli Şekil 3.19'da verilmiştir. Bu denklemde I_0 sızıntı akımını, I_{ph} ışık akımını ifade etmektedir. Eşitlik 3.8 ile I_0 , Eşitlik 3.10 ile I_{sh} , Eşitlik 3.7 ile I_{ph} hesaplanmaktadır. Eşitlik (3.8-3.11) den yararlanılarak oluşturulan PV panel matematiksel modelinin Matlab/Simulink modeli Şekil 3.20'de verilmiştir.

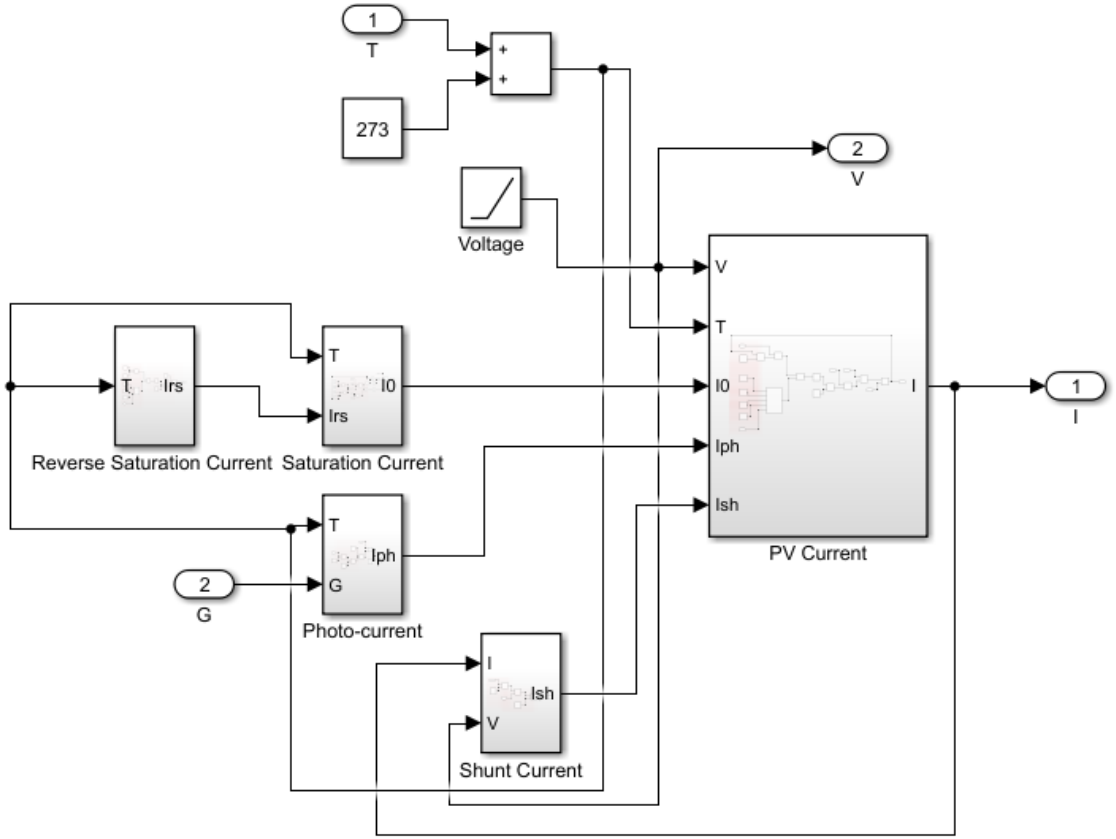
$$I = I_{ph} - I_0 \cdot \left[\exp \left(\frac{q \cdot (V + I.R_s)}{n \cdot K \cdot N_s \cdot T} \right) - 1 \right] - I_{sh} \quad (3.11)$$

I_{ph} : foto akım (A)

- T : çalışma sıcaklığı (K)
 q : Elektron yükü (C)
 n : Diyot idealite faktörü
 K : Boltzmann sabiti (J/K)
 N_s : Seri bağlı hücre sayısı
 R_s : Seri bağlı direnç (Ω)



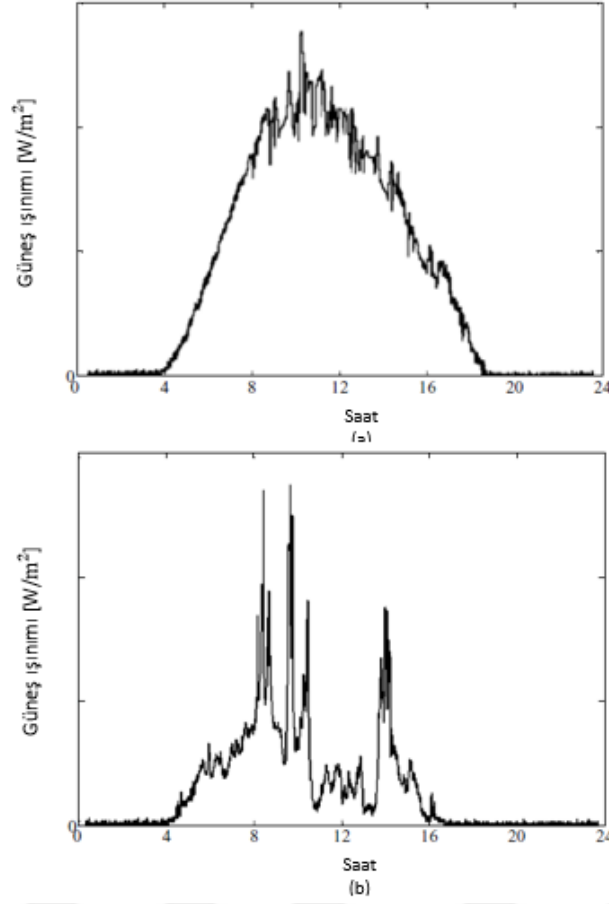
Şekil 3.19. Matlab/Simulink'te oluşturulan panel akımı modeli



Şekil 3.20. Matlab/Simulink'te oluşturulan PV hücre modeli

3.2. Maksimum Güç Noktası İzleme (MPPT)

PV sisteminin çıkış gücü, sıcaklık ve güneş ışınımından etkilenir. Işınım ve sıcaklık eğrilerinin fonksiyonları doğrusal değildir. Ayrıca günlük güneş ışınım diyagramında Şekil 3.21'de gösterildiği gibi gün boyunca ani değişimler görülür. Güneş ışınımındaki bu değişimler sebebiyle PV sistemin maksimum güç noktası sürekli olarak değişmektedir. PV sistemden üretilen enerjiyi maksimuma çıkarmak için çalışma noktasının değişmesi gerekir. Bu nedenle PV sistemin çalışma noktasını maksimum güç noktasında tutmak için MPPT (Maksimum Güç Noktası Takip) tekniği kullanılır (Faranda ve Leva, 2008).

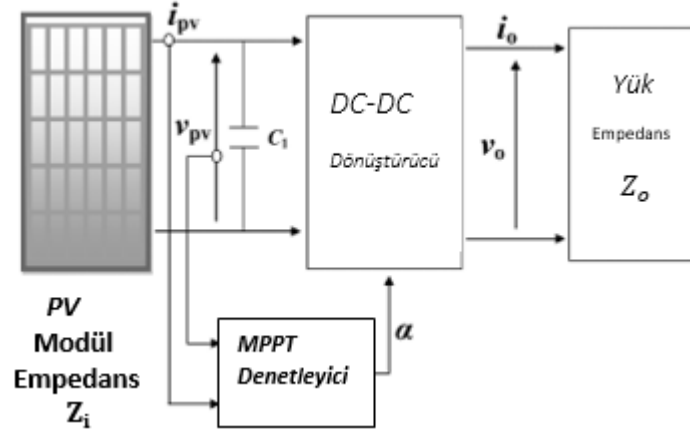


Şekil 3.21. Günlük güneş ışıınımı diyagramı a) güneşli gün b) bulutlu gün (Faranda ve Leva, 2008)

3.2.1. MPPT Kavramı

PV modül genel olarak bir akım kaynağı olarak kabul edilir, bu nedenle bir voltaj kaynağına dönüştürmek için kapasitör (C1) eklenmesi gerekir. PV modülün gücü; sıcaklık, ışıınım ve yükteki değişikliklerden büyük ölçüde etkilenir. Değişiklikleri izlemek ve PV modülden elde edilen gücü en üst düzeye çıkarmak için MPPT denetleyici kullanılır. Bir MPPT DC-DC dönüştürücünün bağıl iletim süresini (duty cycle, α) kontrol etmek için uygulanan genellikle PV modülü MPP’de çalıştırmak için kullanılan bir elektronik devredir. MPPT denetleyicisi, PV modülün terminallerinde ölçülen empedansı (Z_i) değiştirmeye zorladığı ve çıkışta ölçülen empedansa (Z_o) maksimum güç sağladığı için empedans uyumlandırıcı rolü oynar (Bouarroudj ve ark, 2019).

Şekil 3.22’ de MPPT kontrolörlü bir PV sistemin modeli verilmiştir.

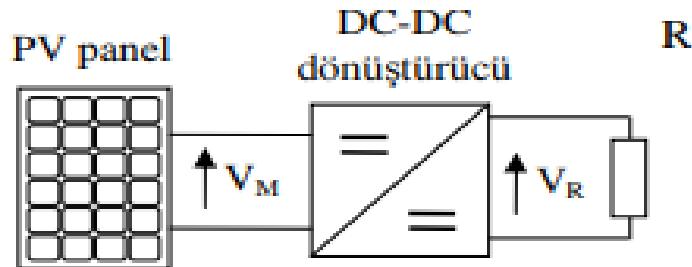


Şekil 3.22. MPPT kontrolörlü bir PV sistemin blok diyagramı (Bouarroudj ve diğ., 2019).

3.2.2 MPPT Prensibi

PV panelin mekaniki olarak güneşi takip edecek şekilde hareket ettirilmesi, panelden maksimum güç elde edilmesini garanti etmez. Panelden maksimum güç alınması için PV panelin mevcut durumdaki çalışma koşullarında maksimum güç noktasına (MPP) karşılık gelen belirli bir seviyede çalıştırılması sağlanmalıdır. Maksimum güç noktası izleyiciler (MPPT) ile PV panellerden yüke sürekli olarak maksimum gücün sağlanması mümkün olur. Şekil 3.23'te DC-DC dönüştürücü ile çalıştırılan temel bir MPPT yapısı verilmiştir. Güneş panelinin omik bir yükü beslemesi durumu için, bir DC-DC dönüştürücü yardımıyla Eşitlik 3.12'ye göre ayarlanan yük gerilimi ile maksimum güç transferi sağlanabilmektedir (Markvart, 2000).

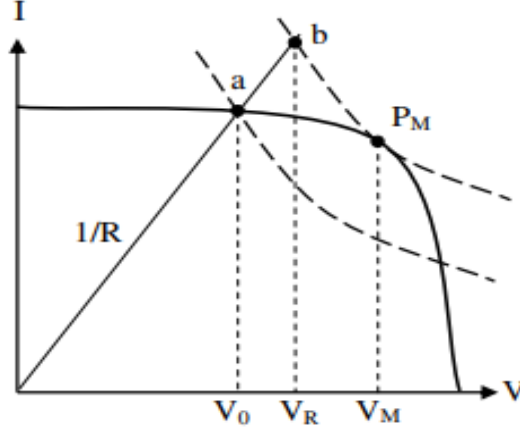
$$V_R = \sqrt{P_{max} R} \quad (3.12)$$



Şekil 3.23. Temel bir MPPT yapısı (Kulaksız, 2007)

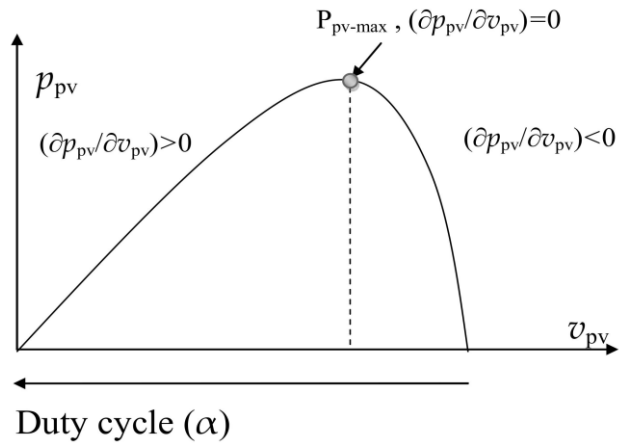
Şekil 3.24'te PV panele ve yüke ait I-V karakteristikleri ve sabit güç eğrileri verilmiştir. Panelin yüke bir güç dönüştürücü olmadan doğrudan bağlı olduğu

durumdaki kesişme noktasında (a noktası) elde edilecek güç, maksimum değerinden daha düşüktür. DC-DC dönüştürücü yardımıyla yük geriliminin Eşitlik 3.12 denkleminde bulunacak değere getirilmesi halinde çalışma noktası maksimum güç noktasına (b noktası) doğru kaymaktadır (Kulaksız,2007).



Şekil 3.24. MPPT'nin çalışması (Kulaksız,2007)

MPPT yönteminin en temel çalışma prensibi $\frac{\partial P_{PV}}{\partial V_{PV}}$ pozitif olduğunda V_{PV} 'yi artırarak (bağıl iletim süresi α artırılarak) veya $\frac{\partial P_{PV}}{\partial V_{PV}}$ negatif olduğunda V_{PV} 'yi azaltarak (duty cycle α azaltılarak) çalışma noktasını taşımaktır. Şekil 3.25'te MPPT arama mekanizmasına ait grafik verilmiştir.



Şekil 3.25. MPPT arama mekanizması (Bouarroudj ve ark, 2019).

3.2.3. MPPT Yöntemleri

Değiştir & Gözle (Perturb & Observe), artımlı iletkenlik (Incremental Conductance) algoritmaları literatürde yaygın olarak araştırılan ve kullanılan MPPT algoritmalarıdır. Değiştir & Gözle (P&O), artımlı iletkenlik (Incremental Conductance) algoritmalarına ve tezde gerçekleştirilen model tabanlı algoritmaya ait bilgiler bu bölümde açıklanmıştır.

3.2.3.1. P&O algoritması

“Tepe tırmanma” algoritması olarak da bilinen değiştir ve gözle (Perturb and Observe, P&O) algoritmasında modülün o an çalıştığı voltajda bir değişim (pertürbasyon) sağlanır. Gerilimdeki bu değiştirme etkisi, çıkış gücünde de bir değişikliğe sebep olacaktır. Artan bir gerilim gücünde bir artışa yol açıyorsa, çalışma noktası MPP’den daha düşük bir gerilimdedir ve dolayısıyla MPP’ye ulaşmak için daha yüksek gerilimlere doğru daha fazla gerilim değişimine ihtiyaç vardır. Bunun tersi; eğer artan bir gerilim gücünün azalmasına neden oluyorsa, MPP’ye ulaşmak için daha düşük gerilimlere doğru daha fazla gerilim değişimine ihtiyaç vardır. Bu prensip Çizelge 3.2’de özetlenmiştir (Smets ve diğ., 2016).

Çizelge 3.2. P&O algoritmasında olası seçeneklerin özeti (Smets ve diğ., 2016).

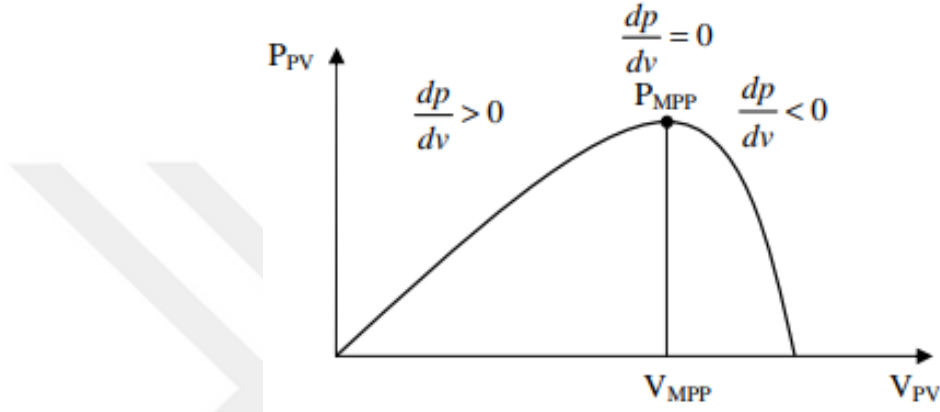
Önceki Pertürbasyon	Güçteki Değişim	Sonraki Pertürbasyon
Pozitif	Pozitif	Pozitif
Pozitif	Negatif	Negatif
Negatif	Pozitif	Negatif
Negatif	Negatif	Pozitif

P&O algoritması birkaç parametre içermesinden dolayı uygulama kolaylığına sahiptir. İyi bir performansa sahiptir, düşük maliyetlidir ve geri besleme yapısı oldukça basittir. Bu sebeplerle maksimum güç noktası takibi için yaygın olarak tercih edilen bir MPPT yöntemidir (Gümüş ve Demirtaş, 2020).

P&O algoritmasının bir dezavantajı maksimum güç noktası etrafında osilasyonlar oluşturmaktır. Kontrol değişkeni olarak kullanılan parametre için kullanılan adım büyüklüğünün azaltılmasıyla salınımlar azaltılabilir. Adım büyüklüğünün azaltılması ise maksimum güç noktası izlemeyi yavaşlatabilir. Değişken bir adım büyüklüğünün kullanılarak bu problem çözülebilir. Bu yöntem geliştirilmiş

P&O algoritması olarak adlandırılır ve maksimum güç noktası etrafında adım büyüklüğü küçültülür (Hua ve Lin 2001; Xiao ve Dunford 2004).

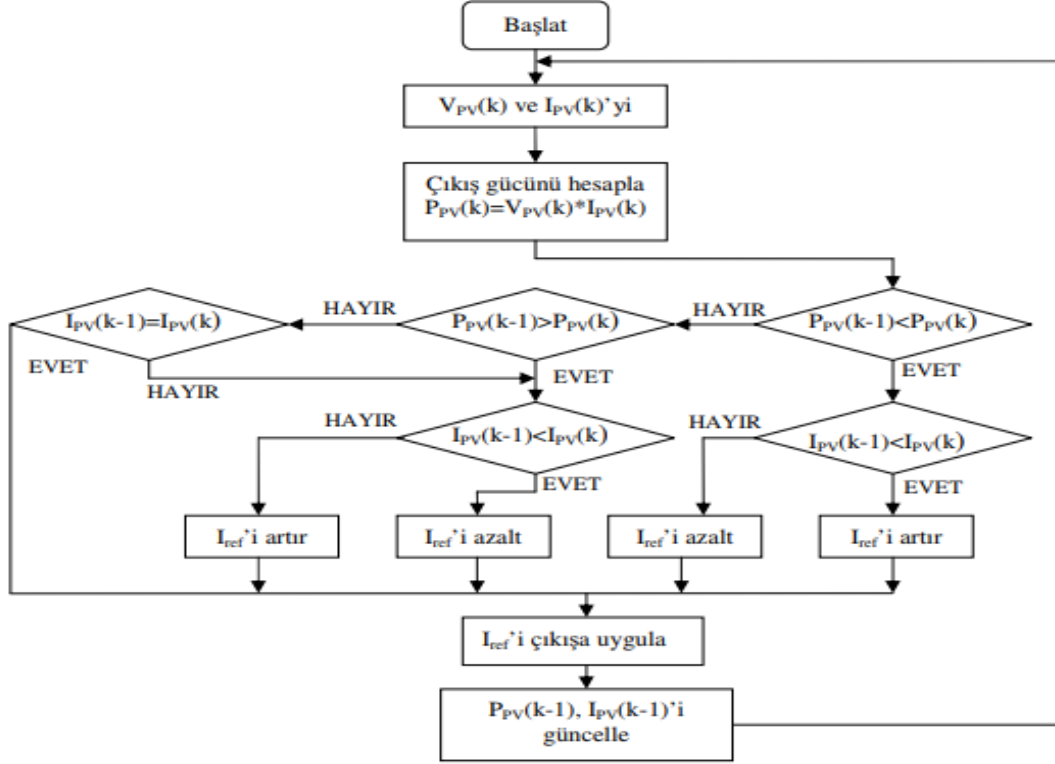
Bu metotta, Şekil 3.26'da görüldüğü gibi PV panellerin çıkış gerilimi izlenir, çalışma noktası maksimum güç noktasının solunda ise $dp/dv > 0$ olarak bulunur. Bu durumda PV panel referans gerilimini P&O algoritması maksimum güç noktasına yaklaştırmak için artırır. Çalışma noktası maksimum güç noktasının sağında ise $dp/dv < 0$ olarak bulunur ve PV panelin referans gerilimi düşürülür (Kulaksız,2007).



Şekil 3.26. $P_{pv} - I_{pv}$ karakteristiğinde ortaya çıkan çalışma bölgeleri (Kulaksız,2007).

Şekil 3.27'de P&O algoritmasına ait akış diyagramı verilmiştir (Xuejun 2004). Referans değişken olarak akımın seçildiği bu algoritmanın akış diyagramında sırasıyla aşağıdaki işlemler gerçekleştirilmektedir.

- Kontrol değişkeni olarak panel gerilimi (V_{pv}) kullanılır.
- Panel gerilimi (V_{pv}) ve panel akımı (I_{pv}) ölçülür.
- Çıkış gücü (P_{pv}) hesaplanır.
- Panel gerilimindeki artış sonucunda panel çıkış gücü de artıyorsa referans akımı (I_{ref}) artırılır.
- Panel gerilimi azalıyorken panel çıkış gücü artıyorsa referans akımı (I_{ref}) azaltılır.
- Panel gerilimi artıyorken panel çıkış gücü azalıyorsa referans akımı (I_{ref}) azaltılır.
- Panel gerilimi azalıyorken panel çıkış gücü azalıyorsa referans akımı (I_{ref}) artırılır.



Şekil 3.27. P&O algoritmasının akış diyagramı (Xuejun 2004).

3.2.3.2. Artımlı iletkenlik yöntemi

Bir elektriksel komponentin iletkenliği G , Eşitlik 3.13’de verilmiştir.

$$G = \frac{1}{V} \quad (3.13)$$

Dolayısıyla MPP’de P-V eğrisinin eğimi sıfırdır. Eşitlik 3.14’te verilmiştir.

$$\frac{dP}{dV} = 0 \quad (3.14)$$

$$\frac{dP}{dV} = \frac{d(IV)}{dV} = I + V \frac{dI}{dV} \quad (3.15)$$

Örnekleme adımları yeterince küçükse, yaklaşım Eşitlik 3.16’daki gibi ifade edilebilir.

$$\frac{dI}{dV} \approx \frac{\Delta I}{\Delta V} \quad (3.16)$$

$\frac{\Delta I}{\Delta V}$ artan iletkenliği, $\frac{I}{V}$ ise sürekli iletkenliği ifade eder. $\frac{\Delta I}{\Delta V}$ ile $\frac{I}{V}$ ile kıyas edilerek Eşitlik (3.17) ve (3.18) ve (3.19) sonuçları elde edilir (Smets ve diğ., 2016).

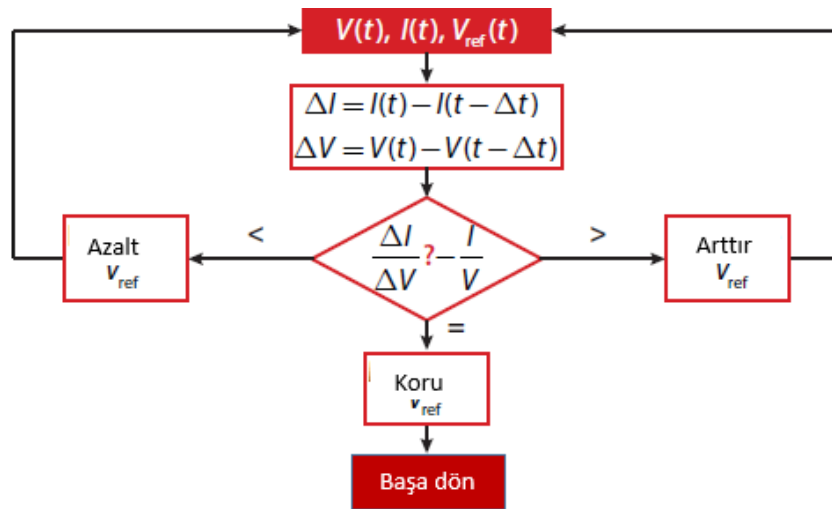
$$\frac{\Delta I}{\Delta V} = -\frac{I}{V} \quad \text{ise } V = V_{MPP} \quad (3.17)$$

$$\frac{\Delta I}{\Delta V} > -\frac{I}{V} \quad \text{ise } V < V_{MPP} \quad (3.18)$$

$$\frac{\Delta I}{\Delta V} < -\frac{I}{V} \quad \text{ise } V > V_{MPP} \quad (3.19)$$

Şekil 3.28’de artımlı iletkenlik algoritmasının akış diyagramı verilmiştir.

- $I(t)$ ve $V(t)$ değerleri ölçülür.
- Akım ve gerilim değerleri için; önceki ölçümden ölçülen değerlerle yeni ölçümden ölçülen değerler arasındaki fark bulunur ve ΔI ile ΔV değerleri elde edilir.
- $\frac{\Delta I}{\Delta V}$ ile $-\frac{I}{V}$ karşılaştırılır.
- $\frac{\Delta I}{\Delta V} > -\frac{I}{V}$ ise çalışma noktası MPP’ nin solundadır ve V_{ref} arttırılır.
- $\frac{\Delta I}{\Delta V} < -\frac{I}{V}$ ise çalışma noktası MPP’ nin sağındadır ve V_{ref} azaltılır.
- $\frac{\Delta I}{\Delta V} = -\frac{I}{V}$ ise çalışma noktası MPP’ dedir ve V_{ref} sabit kalır.

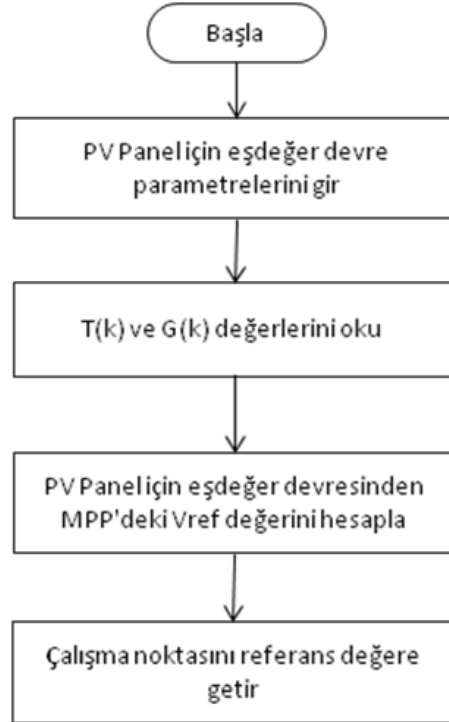


Şekil 3.28. Artımlı iletkenlik algoritmasının akış diyagramı (Smets ve diğ., 2016).

Artımlı iletkenlik algoritması kararlı durum koşulları altında MPP çevresinde salınım yapmaz ve küçük örnekleme aralıklarına sahip olması değişen aydınlatma koşullarından daha az etkilenmesine sebep olur. Bu sebeplerle P&O algoritmasına göre daha verimlidir. Fakat güçlü değişen koşullar altında ve kısmi gölgeleme altında verimi düşer. Sadece akım ve gerilim ölçülmemeli aynı zamanda anlık artan iletkenlikler hesaplanıp karşılaştırılmalıdır. Donanım uygulamasının karmaşıklığı en büyük dezavantajıdır (Smets ve diğ., 2016).

3.2.3.3. Model Tabanlı Algoritma

Model tabanlı algoritmaya ait akış diyagramı Şekil 3.29’da verilmiştir. Model tabanlı algoritmada PV panel için eşdeğer devre parametreleri girilerek matematiksel model oluşturulur. Ortam sıcaklığı ve güneş ışınım değerleri okunur. PV panel eşdeğer devresinden faydalanılarak MPP’deki V_{ref} değeri hesaplanır ve çalışma noktası büyük adım büyüklüğünde referans değere getirilir. Bu döngü belirlenen zaman aralıklarında sürekli olarak tekrarlanır. Maksimum güç noktası hesabının hassasiyeti eşdeğer devre parametrelerinin doğruluğuna bağlı olduğundan bu yöntemde güç izleme hatalarının ortaya çıkması yüksek ihtimaldir.



Şekil 3.29. Model tabanlı algoritmanın akış diyagramı

3.3. DC-DC Dönüştürücüler

DC transformatörler olarak da adlandırılan bu dönüştürücülerden geniş bir aralıkta ayarlanabilen, düzgün ve regüleli bir DC çıkış gerilimi ile yüksek bir verimde çalışma istenmektedir. Anahtarlamalı DC-DC dönüştürücüler ve rezonanslı DC-DC dönüştürücüler olmak üzere DC-DC dönüştürücüler ikiye ayrılmaktadır. Bununla beraber, DC-DC dönüştürücüler içerisinde anahtarlamalı dc-dc dönüştürücüler daha yaygın şekilde kullanılmaktadır. Bu durumda, rezonanslı dönüştürücüler özel bir tür olarak da kabul edilebilir (Bodur ve diğ., 2004).

3.3.1. Anahtarlamalı DC-DC dönüştürücüler

Anahtarlamalı DC-DC dönüştürücüler, genellikle Darbe Genişlik Modülasyonu (PWM) tekniği ile kontrol edilmektedir. Hızlı geçiş cevabı ve yüksek güç yoğunluğu sunması sebebiyle endüstride yaygın olarak bu dönüştürücülerden yararlanılmaktadır. Geniş bir aralıkta ayarlanabilen, düzgün ve regüleli bir DC gerilim bu dönüştürücüler ile sağlanabilmektedir.

Bir kontrollü yarı iletken güç elemanı, bir yarı iletken güç diyodu ve bir endüktanstan oluşan üç temel elemanın farklı şekillerde bağlanmasıyla anahtarlamalı temel DC-DC dönüştürücüler elde edilmektedir. Devrede ya tam iletim modunda veya tam kesim modunda çalıştırılan kontrollü güç elemanı, güç anahtarı veya aktif eleman; yarı iletken pasif güç elemanı ise diyottur. Çalışma frekansına bağlı olarak hesaplanan endüktans değerinin yeterince büyük olduğu ve böylece endüktans akımının genellikle düzgün ve kesintisiz olduğu kabul edilmektedir.

Anahtarlamalı DC-DC dönüştürücülerin çalışma prensibi, anahtarlanan endüktans üzerinde gerçekleşen enerji aktarımına dayanmaktadır. Bu dönüştürücülerde, bir anahtarlama periyodu içerisinde belirli bir anda ya güç anahtarlama elemanı ya da güç diyodu iletimdedir. Genellikle, anahtar iletimde iken endüktansa depo edilen enerji, diyot iletimde iken çıkışa aktarılır (Bodur, 2003).

Bu bölümde DC-DC dönüştürücülerden olan dc-dc yükseltici (boost) ve dc-dc düşürücü (buck) dönüştürücülerden bahsedilmektedir.

3.3.1.1. DC-DC yükseltici (boost) dönüştürücü

Çıkış voltajı giriş voltajından büyük olan DC-DC anahtarlamalı dönüştürücülerdir. İdeal durumda devrenin giriş gücü ile çıkış gücü eşit olacağından çıkış akımı giriş akımından küçüktür. Şekil 3.30'da DC-DC yükseltici dönüştürücüye ait devre verilmiştir.

DC-DC yükseltici (boost) dönüştürücüler, bağımsız PV güç sistemlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Giriş voltajının fonksiyonu olarak çıkış voltajının ortalama değerini ifade etmeye yardımcı olan α duty cycle ($0 \leq \alpha \leq 1$) ile nitelendirilir (Belkaid ve diğ., 2016).

Eşitlik 3.20' de ideal transfer fonksiyonu verilmiştir.

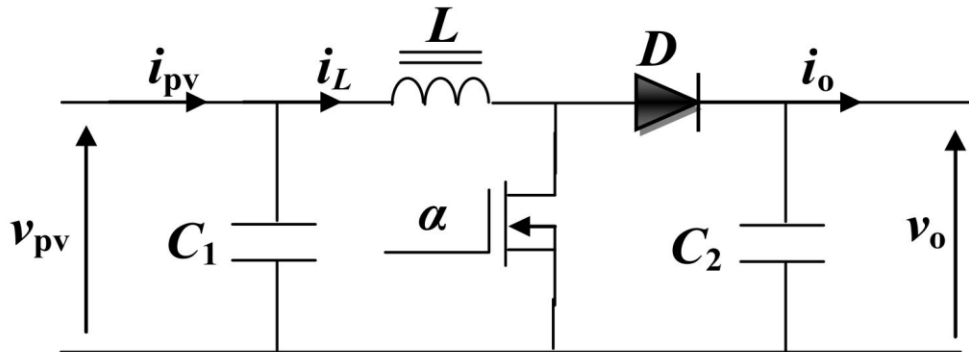
$$\frac{V_o}{V_{pv}} = \frac{1}{1-\alpha} \quad (3.20)$$

Boost dönüştürücünün matematiksel modeli Eşitlik 3.21, 3.22 ve 3.23 ile tanımlanır.

$$\frac{dV_{pv}}{dt} = \frac{(i_{pv} - i_L)}{C_1} \quad (3.21)$$

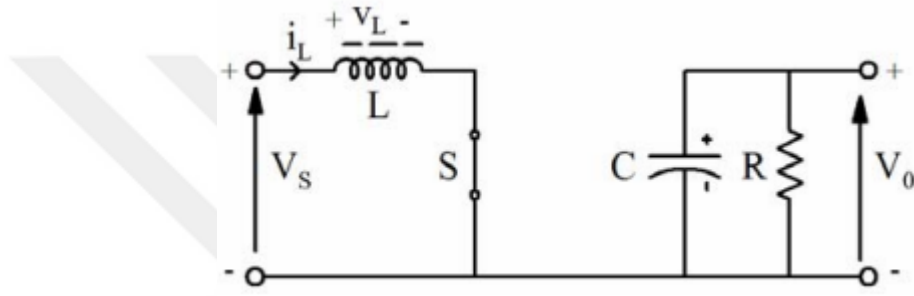
$$\frac{di_L}{dt} = \frac{(v_{pv} - (1-\alpha)v_o)}{L} \quad (3.22)$$

$$\frac{dV_o}{dt} = \frac{(1-\alpha)i_L - (v_o/R)}{C_2} \quad (3.23)$$



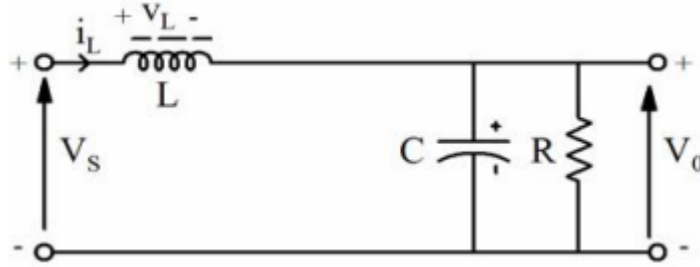
Şekil 3.30. DC-DC yükseltici dönüştürücü

DC-DC yükseltici dönüştürücülerin yarı iletken güç anahtarının iletme ve kesime götürülmesine göre kontrol mekanizması gerçekleştirilmektedir. Anahtar iletimdeyken bobin içerisindeki akım artar ve bobin üzerinde enerji artışı gerçekleşir. Anahtar kesimdeyken bobin üzerindeki şarj akımı D diyotu üzerinden yüke doğru akar. Enerjisi deşarj olan bobin üzerindeki gerilimin polaritesinin yönü gerilim kaynağının polaritesinin yönü ile aynı olur. D diyotu üzerinden yüke bağlanan devrenin çıkış geriliminin seviyesi yükseltilir. Şekil 3.31’de D diyotu kesimdeyken iki farklı parçaya bölünen devre verilmiştir. Anahtarlama periyodu RC devresinin zaman sabitinden çok küçük olduğu sürece çıkış gerilimi sabit kalır.



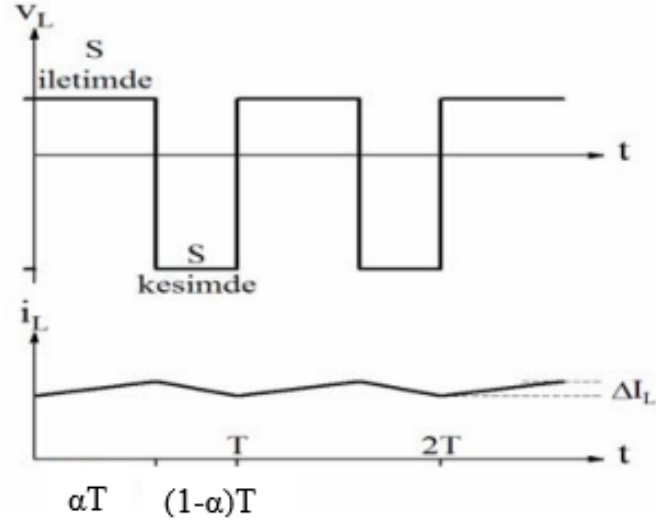
Şekil 3.31. Yarıiletken anahtarın iletim durumu (Çoruh ve ark, 2008).

Şekil 3.32’de yarıiletken anahtarın kesim durumu verilmektedir ve yük kaynak üzerinden beslenmektedir.



Şekil 3.32. Yarıiletken anahtarın kesim durumu (Çoruh ve ark, 2008).

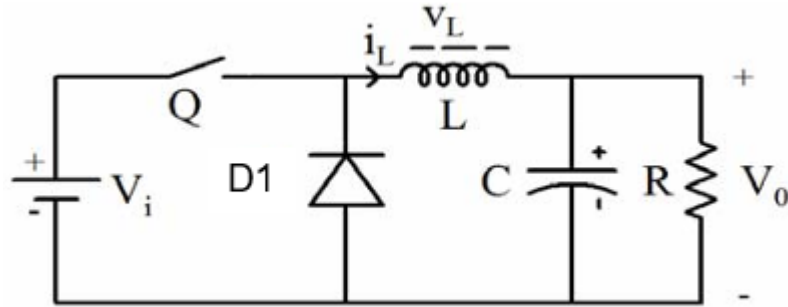
Şekil 3.33’te bobin üzerindeki akım ve gerilim değişimleri verilmiştir.



Şekil 3.33. Yarıiletken anahtarın kesim durumu (Çoruh ve ark, 2008).

3.3.1.2. DC-DC düşürücü (buck) dönüştürücü

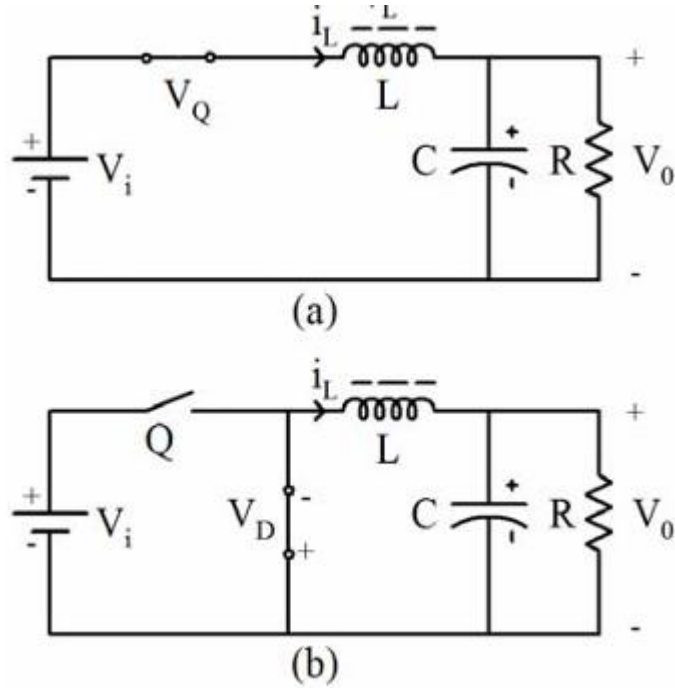
Şekil 3.34’te basit bir düşürücü tip dönüştürücü yapısının şeması görülmektedir. Devrede, çıkış gerilimini filtrelemek için L bobini ve C kondansatörü bulunmakta, çıkış yükü olarak R direnci kullanılmaktadır. Devredeki D diyotu, güç anahtarı kesime götürüldüğünde devrede bir akım yolu oluşturarak endüktans akımının sürekliliğini temin ettiğinden serbest geçiş diyotu olarak da adlandırılır.



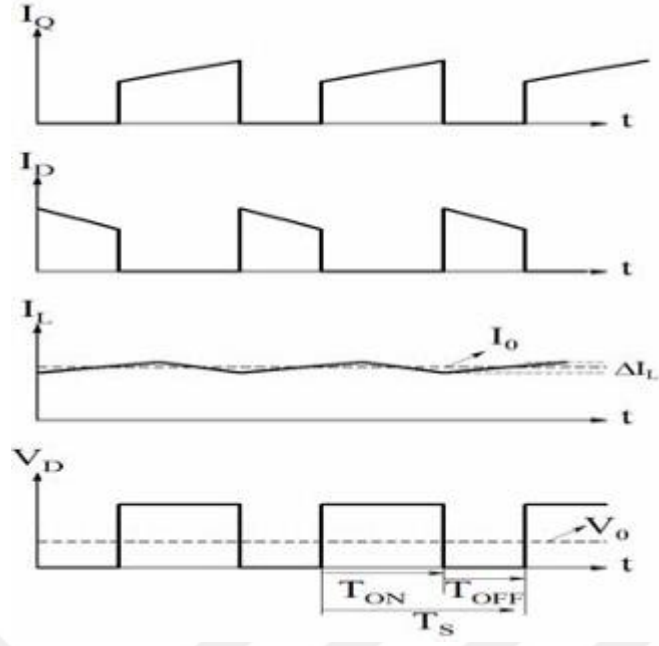
Şekil 3.34. DC-DC düşüren dönüştürücü

Dönüştürücünün güç katı, bobin akımının sürekli veya süreksiz olması durumlarına göre iki farklı şekilde sınıflandırılabilen sürekli ya da süreksiz akım modunda çalışır. Sürekli akım modunda kararlı durumda bobin içerisinden geçen akım kesintisizdir, yani akım değeri sıfıra düşmez. Süreksiz çalışma modunda ise bir periyot boyunca bobin akımı sıfırdan başlar, tepe değerine yükseldikten sonra anahtarlama

periyodu tamamlanmadan tekrar sıfır değerine ulaşır. Sürekli akım modunda düşürücü güç katının iki farklı çalışma durumu dikkate alınır. İlk olarak yarı iletken güç anahtarı, Q iletimde ve D1 diyotu kesimdedir. Diğer çalışma durumunda ise Q kesimde ve D1 iletimdedir. Şekil 3.35'te basitleştirilmiş bir lineer devrede güç anahtarı ve diyot yerine anahtar eşdeğeri kullanılarak bu iki çalışma durumu verilmiştir. Yarı iletken anahtarın iletimde kaldığı süre $D \times T_s = T_{on}$ ile ifade edilir ve burada D kontrol devresi tarafından belirlenen T_s periyodundaki iletim süresidir. Kesim süresi ise T_{off} sembolü ile ifade edilir. Şekil 3.35 ve Şekil 3.36'ya göre bobin akımındaki artış uç denklemleri kullanılarak elde edilebilir.



Şekil 3.35. Lineerleştirilmiş güç katı, (a) anahtarın iletim durumu ve (b) anahtarın kesim durumu (Ürgün ve ark,2008).



Şekil 3.36. Sürekli çalışma modu için dalga şekilleri (Ürgün ve ark,2008).

Teorik olarak giriş ve çıkış geriliminin bağıl iletim süresi üzerindeki etkisi Eşitlik 3.24'te verilmiştir.

$$\frac{V_o}{V_{pv}} = D \quad (3.24)$$

L'nin üzerinde depolanan enerji Eşitlik 3.25'te verilmiştir.

$$E_L = \frac{1}{2} L I_L^2 \quad (3.25)$$

L'nin üzerindeki gerilim Eşitlik 3.26'da verilmiştir.

$$V_L = L \frac{dI}{dt} \quad (3.26)$$

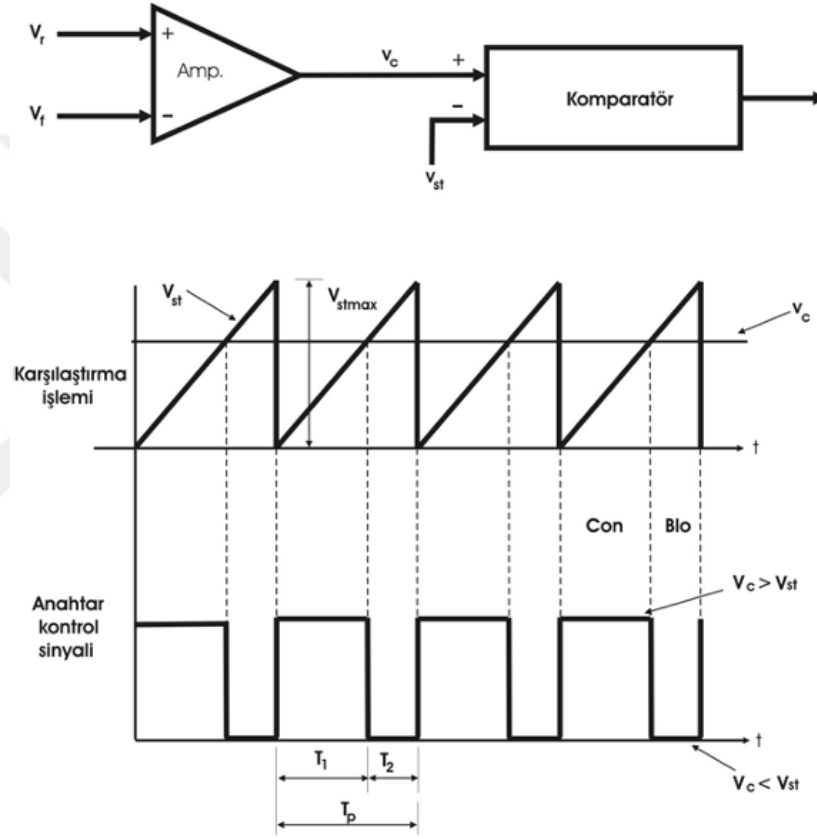
3.3.2. Darbe genişlik modülasyonu (PWM) tekniği

Anahtarlama DC–DC dönüştürücülerde, bir anahtarlama periyodu içerisinde güç anahtarı iletim süresinin anahtarlama periyoduna oranı, darbe/periyot oranı veya bağıl iletim süresi olarak tanımlanır. Güç anahtarı iletim süresi T_1 ile anahtarlama periyodu T_p ile gösterilir. Böylece, bağıl iletim süresi için Eşitlik 3.27 ve 3.28 yazılabilir.

$$D = \frac{T_1}{T_p} \quad (3.27)$$

$$0 < D < 1 \quad (3.28)$$

DC çıkış geriliminin ayarlanması ve bu gerilimin giriş gerilimi ile çıkış akımındaki değişmelere karşı regüle edilmesi Bağlı iletim süresi D'nin kontrolü ile sağlanmaktadır.



Şekil 3.37. Prensip olarak PWM tekniği (Bodur ve diğ, 2004).

Bu yöntemde, sabit çalışma frekansı altında güç anahtarının iletimde kaldığı süre değiştirilerek, bağlı iletim süresi D değişmektedir. Bu sayede DC çıkış geriliminin kontrolü sağlanmaktadır. PWM tekniğinde, güç anahtarı kontrol sinyalinin nasıl elde edildiği ve kontrolün nasıl sağlandığı Şekil 3.37’de görülmektedir. Şekilde görüldüğü gibi PWM tekniğinde, çıkış gerilimini belirlemekte kullanılan bir referans gerilim V_r ile regülasyonu sağlamakta kullanılan geri besleme gerilimi V_f ’nin bir amplifikatöre uygulanmasıyla kontrol gerilimi V_c elde edilmekte ve bu gerilim ile anahtarlama

frekansını belirleyen frekans değerinde bir testere dişi gerilim V_{st} 'nin karşılaştırılmasıyla güç anahtarının kontrol sinyali elde edilmektedir (Bodur ve diğ., 2004).

3.4. Matlab/Simulink ile PV Panel Modellenmesi

Elektrik enerjisine olan ihtiyacın artmasıyla beraber yenilenebilir enerji kaynakları kullanılarak elektrik enerjisi üretimi de yaygınlaşmaktadır. Yenilenebilir enerji kaynaklarından olan PV sistemler sürdürülebilirdir, çevreye duyarlıdır ve kurulumları kolaydır. Bu sebeplerle yaygın olarak kullanılmaktadır. Ancak gün içerisindeki ani ışıınım, sıcaklık değişiklikleri PV sistemlerden elde edilen verimi etkilemektedir. PV sistemlerin başlıca dezavantajlarından olan verim konusunun çözüme kavuşturulabilmesi için literatürde PV sistemlerden maksimum güç elde edilmesine yönelik çalışmalar yapılmaktadır.

Bu tez çalışmasında, PV hücre eşdeğer devre parametrelerinin belirlenmesi ve model tabanlı MPPT yöntemi Matlab/Simulink ortamında modellenmiştir. Simülasyon ortamında yapılan bu çalışmayla eşdeğer devre parametrelerini belirledikten sonra kullanılan model tabanlı MPPT algoritması ile eşdeğer devre modelinin kullanılmadığı geleneksel P&O algoritmasının kullanıldığı durumlar için MPP doğruluğu ve MPP noktasına ulaşma süresinin karşılaştırılması amaçlanmaktadır.

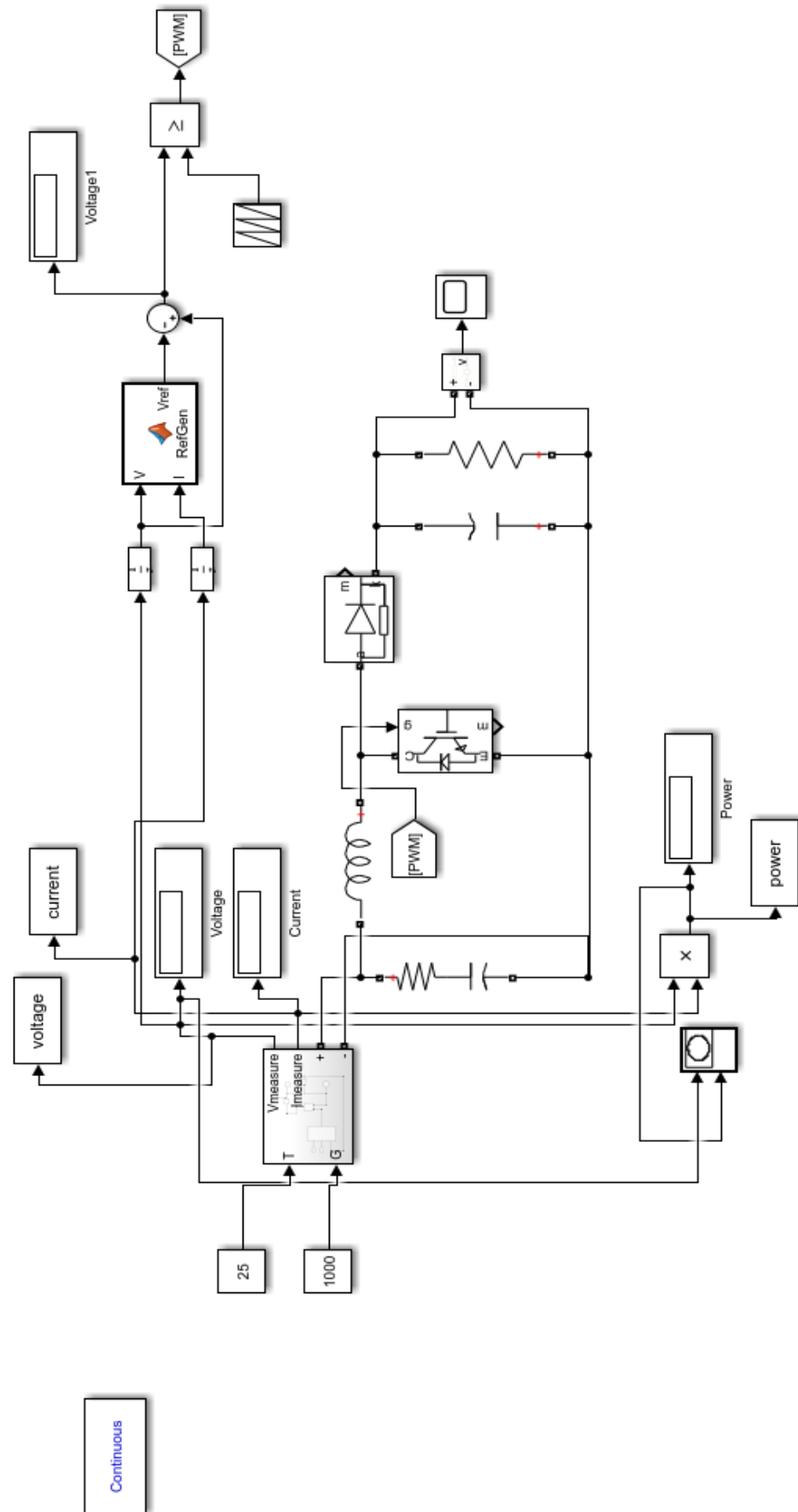
Panelin eskimesi, toz, kir gibi dış etkenler nedeniyle devre parametreleri kullanılarak elde edilen modelde yapılan hesaplamalar sonucu belirlenen maksimum güç noktası tam olarak doğru değerde elde edilemeyebilir. Bu durumda bir arama algoritmasının devreye girmesi MPPT performansını iyileştirebilir. Bu tez çalışmasında önerilen bu hibrit yöntem ile klasik P&O yöntemi için MPP'deki salınımların ve MPP noktasına ulaşmak için gereken sürelerin karşılaştırılması amaçlanmaktadır. Ayrıca, PV sisteminin çıkış gücü, sıcaklık ve güneş ışıınımından etkilendiğinden, farklı sıcaklık ve ışıınım değerleri için panelin I-V, P-V grafiklerinin karşılaştırılması amaçlanmaktadır.

3.4.1. Model tabanlı MPPT yönteminin ve PV panelin modellenmesi

Güneş paneli olarak 1Soltech 1STH-215-P modeli seçilmiştir. Fotovoltaik panelin gücü 213.15 W, MPP noktasındaki gerilim 29 V'tur. 1Soltech 1STH-215-P model panele ait eşdeğer devre parametrelerine göre Matlab/Simulink'te PV panel

tasarlanmıştır. PV modülü MPP’de çalıştırmak için güç elektroniği devresi olarak PWM kontrollü DC-DC yükseltici (boost) dönüştürücü kullanılmaktadır. Değişiklikleri izlemek ve PV modülden elde edilen gücü en üst düzeye çıkarmak için MPPT denetleyici uygulanmıştır. MPPT algoritması olarak öncelikle P&O algoritması daha sonra önerilen hibrit algoritma kullanılmış ve karşılaştırmalı olarak sonuçlar sunulmuştur. Matlab/Simulink ile modellenen sistem Şekil 3.38’de verilmiştir.

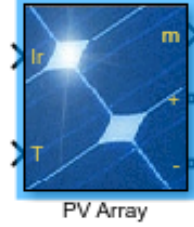




Şekil 3.38. Model tabanlı MPPT yöntemine ait Matlab/Simulink modeli

3.4.1.1 PV panelin modellenmesi

Güneş paneli olarak Şekil 3.39’da Matlab/Simulink hazır modeli verilen 1Soltech 1STH-215-P modeli seçilmiştir.



Şekil 3.39. 1Soltech 1STH-215-P modeline ait Matlab/Simulink hazır modeli

PV panel üzerinde; güneş ışınlamına ait değer (I_r) W/m^2 cinsinden bulunur ve farklı ışınlam değerleri için simülasyon imkanı sağlar, sıcaklığa ait değer (T) $^{\circ}C$ cinsinden bulunur ve farklı sıcaklık değerleri için simülasyon imkanı sağlar. Panel akımı (I_{pv}) ve panel gerilimi (V_{pv}) ölçümleri m ile simgelenen kısımdan alınır. PV panelin + ve – uçları ise dc-dc yükseltici (boost) dönüştürücü devresine bağlanmaktadır.

PV panelin üzerine çift tıklandığında Şekil 3.40’da verilen PV panelinin parametrelerine ulaşılır ve buradan güneş panelinin seri, paralel bağlanan modül sayısı gibi özellikleri girilebilir. Panele ait I-V, P-V grafiklerini farklı sıcaklık ve ışınlam değerleri için çizdirme imkanı sağlar. Sıcaklık ve ışınlam değerlerinin değişiminin panelden elde edilen güce olan etkisini karşılaştırma imkanı sunar. Şekil 3.41’de sabit sıcaklıkta ($25^{\circ}C$) $100 W/m^2$, $500 W/m^2$ ve $1000 W/m^2$ için; sabit ışınlamda ($1000 W/m^2$) $15^{\circ}C$, $25^{\circ}C$ ve $45^{\circ}C$ için panele ait Matlab/Simulink tarafından sunulan I-V, P-V karakteristikleri verilmektedir.

1Soltech 1STH-215-P model panele ait Çizelge 3.1’de verilen eşdeğer devre parametrelerine göre ve Bölüm 3.1.4.2’de verilen Şekil 3.15, Şekil 3.16, Şekil 3.17, Şekil 3.18, Şekil 3.19’da oluşturulan matematiksel modeller kullanılarak Şekil 3.42’de verilen PV panel tasarlanmıştır.

Block Parameters: PV Array

PV array (mask) (link)

Implements a PV array built of strings of PV modules connected in parallel. Each string consists of modules connected in series. Allows modeling of a variety of preset PV modules available from NREL System Advisor Model (Jan. 2014) as well as user-defined PV module.

Input 1 = Sun irradiance, in W/m², and input 2 = Cell temperature, in deg.C.

Parameters Advanced

Array data

Parallel strings 40

Series-connected modules per string 10

Module data

Module: 1Soltech 1STH-215-P

Maximum Power (W) 213.15

Open circuit voltage Voc (V) 36.3

Voltage at maximum power point Vmp (V) 29

Temperature coefficient of Voc (%/deg.C) -0.36099

Cells per module (Ncell) 60

Short-circuit current Isc (A) 7.84

Current at maximum power point Imp (A) 7.35

Temperature coefficient of Isc (%/deg.C) 0.102

Display I-V and P-V characteristics of ...

array @ 1000 W/m² & specified temperatures

T_cell (deg. C) [45 25]

Plot

Model parameters

Light-generated current IL (A) 7.8649

Diode saturation current IO (A) 2.9259e-10

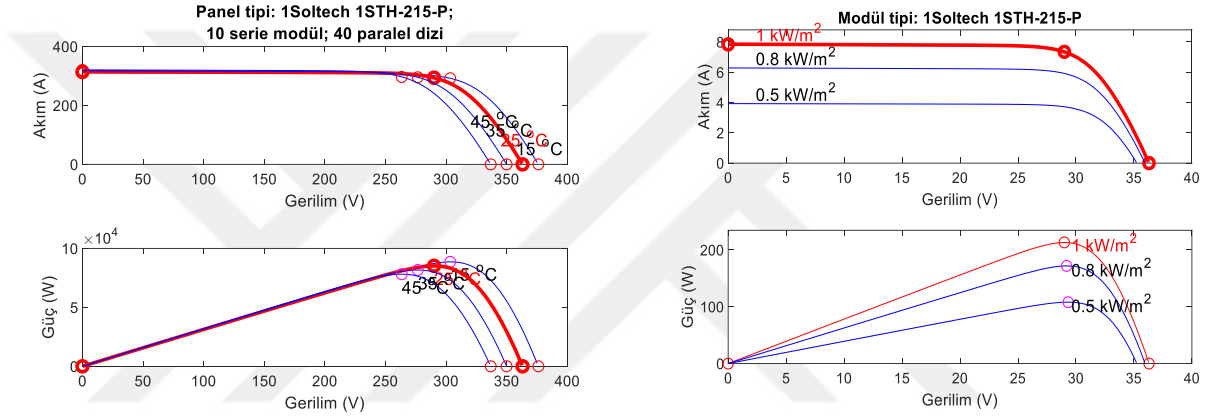
Diode ideality factor 0.98117

Shunt resistance Rsh (ohms) 313.3991

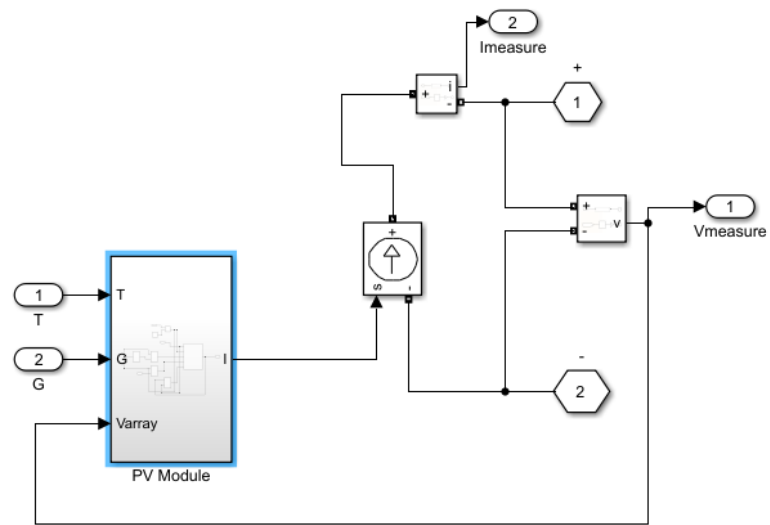
Series resistance Rs (ohms) 0.39383

OK Cancel Help Apply

Şekil 3.40. 1Soltech 1STH-215-P modeline ait panel özellikleri



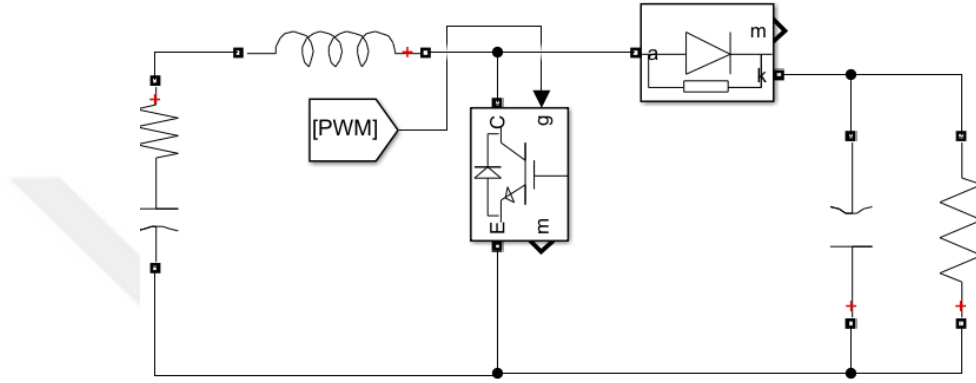
Şekil 3.41. Panele ait değişen I_r ve T değerleri için I-V ve P-V karakteristikleri



Şekil 3.42. Matematiksel model kullanılarak oluşturulan PV model

3.4.1.2 Yükseltici dönüştürücünün modellenmesi

Yükseltici tip (boost) dönüştürücü giriş geriliminden daha büyük bir çıkış gerilimine sahiptir. Çıkış akımı giriş akımından küçüktür. Şekil 3.43'te DC-DC yükseltici (boost) dönüştürücüye ait Matlab/Simulink'te kurulan devre, Çizelge 3.3'te boost dönüştürücüye ait belirlenen değerler verilmiştir. Bu değerler kullanılarak Çizelge 3.4'teki değerler hesaplanmıştır.



Şekil 3.43. Yükseltici dönüştürücünün Matlab/Simulink modeli

Çizelge 3.3. Yükseltici dönüştürücüye ait belirlenen değerler

Giriş gerilimi (V_{input})	29 V
Çıkış gerilimi (V_{output})	60 V
Hedeflenen güç (P)	213.15 W
Anahtarlama frekansı	5 kHz
Akım dalgalanması	%5
Gerilim dalgalanması	%1

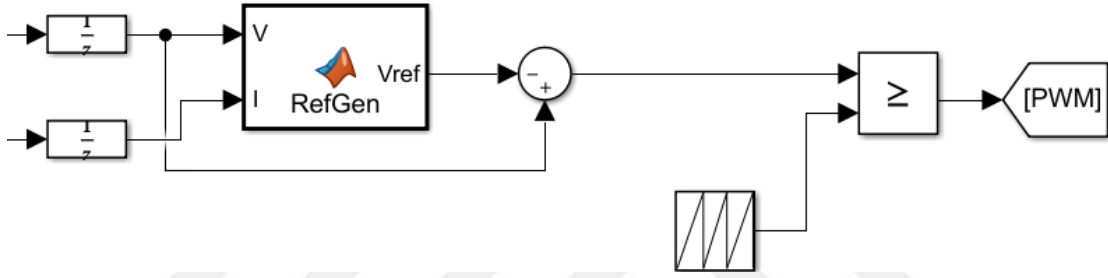
Çizelge 3.4. Yükseltici dönüştürücüye ait hesaplanan değerler

Giriş akımı	$\frac{213.15 \text{ W}}{29 \text{ V}} = 7.35 \text{ A}$
Akım dalgalanması (ΔI)	$7.35 \text{ A'nın } \%5'i = 0.3675 \text{ A}$
Voltaj dalgalanması (ΔV)	$60 \text{ V'nin } \%1'i = 0.6 \text{ V}$
Çıkış akımı (I_{op})	$\frac{213.15 \text{ W}}{60 \text{ V}} = 3.5525 \text{ A}$
Endüktans (L)	$\frac{V_{ip}*(V_{op}-V_{ip})}{f_{sw}*\Delta I*V_{op}} = \frac{29(60-29)}{5*10^3*0.3675*60} = 0.0081542 \text{ H} = 8.22 \text{ mH}$
Kapasitans (C)	$\frac{I_{op}*(V_{op}-V_{ip})}{f_{sw}*\Delta V*V_{op}} = \frac{3.5525(60-29)}{5*10^3*0.6*60} = 0.00061182 \text{ C} = 611.82 \text{ }\mu\text{F}$
Pulse width ya da duty cycle (d)	$d = 1 - \frac{V_{in}}{V_o} = 0.52 \text{ } \%52$
Periyot = 1/f	$1/5000 = 0.0002 \text{ s}$

3.4.1.3 MPPT fonksiyonu

PV panellerden çekilen akım veya PV panel uçlarındaki gerilim yüke maksimum güç sağlanabilmesi için maksimum güç noktası civarında sabit tutulur. Bunun için, yük karakteristiğine uygun şekilde seçilmiş olan güç elektroniği dönüştürücüleri MPPT algoritmaları ile kontrol edilmelidir (Kulaksız, 2007).

MPPT, P&O algoritması kullanılarak fonksiyon oluşturulmuştur. MPPT fonksiyonu için; panel akımı (I_{pv}) ve gerilimi (V_{pv}), giriş parametreleri olarak, referans gerilimi (V_{ref}) ise çıkış parametresi olarak kullanılmıştır. Şekil 3.44'te Matlab/Simulink'te oluşturulan MPPT fonksiyonu görülmektedir.



Şekil 3.44. MPPT fonksiyonu

3.4.1.3.1 Sum işlemi

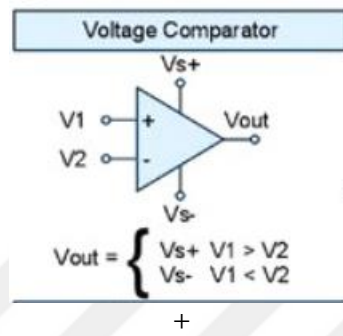
Sum operatörü matematiksel işlemlerin yapılmasına imkan sunar. MPPT algoritmasının çıkışından referans gerilimi $V_{refold} \pm \Delta V_{ref}$ 'e eşit olarak elde edilir. Şekil 3.45'te gösterilen sum işlemi ile $-V_{ref} + V_{pv}$ değeri elde edilir. Eğer ΔV_{ref} değeri azaltılmışsa $dp/dv < 0$ 'dır ve $-V_{ref} + V_{pv}$ değeri pozitif çıkar. α artırılır, V_{pv} azaltılır. Eğer ΔV_{ref} değeri artırılmışsa $dp/dv > 0$ 'dır ve $-V_{ref} + V_{pv}$ değeri negatif bulunur. α azaltılır, V_{pv} artırılır.



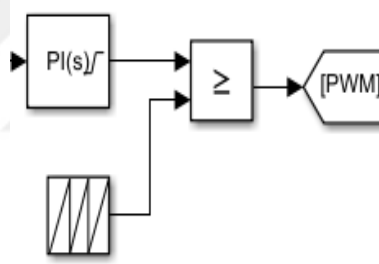
Şekil 3.45. Sum operatörü

3.4.1.3.2 Relational operatör

Şekil 3.46’da voltaj karşılaştırıcı opampa ait çalışma prensibi verilmektedir. Opamlarda V1 ve V2 değerlerinin büyüklüğünün karşılaştırılmasına dayanarak çıkış gerilimi üretilmektedir. Bu mantık doğrultusunda Matlab/Simulinkte relational operatörden yararlanarak Şekil 3.47’ deki gibi büyük eşittir ile bu karşılaştırma yapılabilmektedir.



Şekil 3.46. Voltaj karşılaştırıcı opamp



Şekil 3.47. Relational operatör

3.4.1.3.3 Tekrarlanan sıra enterpolasyonlu bloğu

Şekil 3.48’de görülen tekrarlanan sıra enterpolasyonlu bloğu, zaman değerleri vektörü ve çıkış değerleri vektörü parametrelerindeki değerlere dayalı olarak periyodik bir ayrık zaman dizisinin çıktısını verir. Veri noktaları arasında blok, çıkışı belirlemek için arama yöntemi parametresi için belirtilen yöntemi kullanır. Periyot = 1/f değeri zaman kısmına yazılır.



Şekil 3.48. Tekrarlanan sıra enterpolasyonlu bloğu

3.4.1.3.4 PWM bloğu

Şekil 3.49’da PWM bloğuna ait görsel verilmiştir. Bağlı iletim süresi (duty cycle (α)) 0 ile 1 arasındadır.



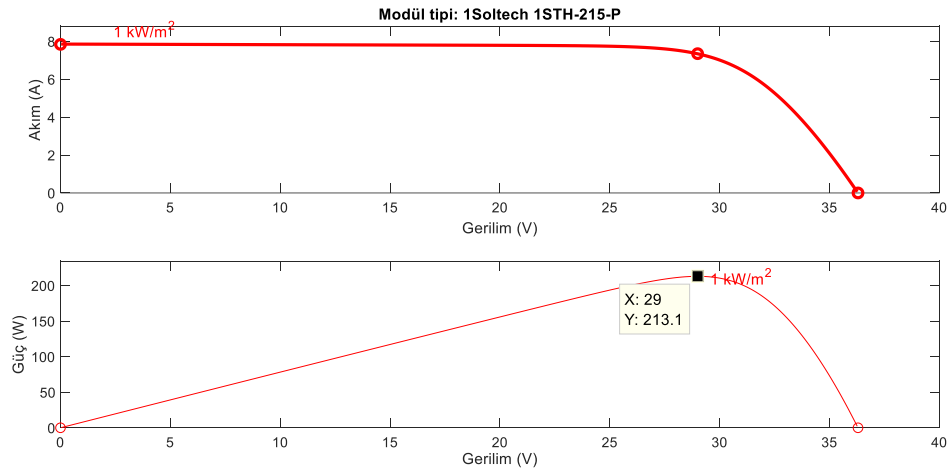
Şekil 3.49. PWM bloğu



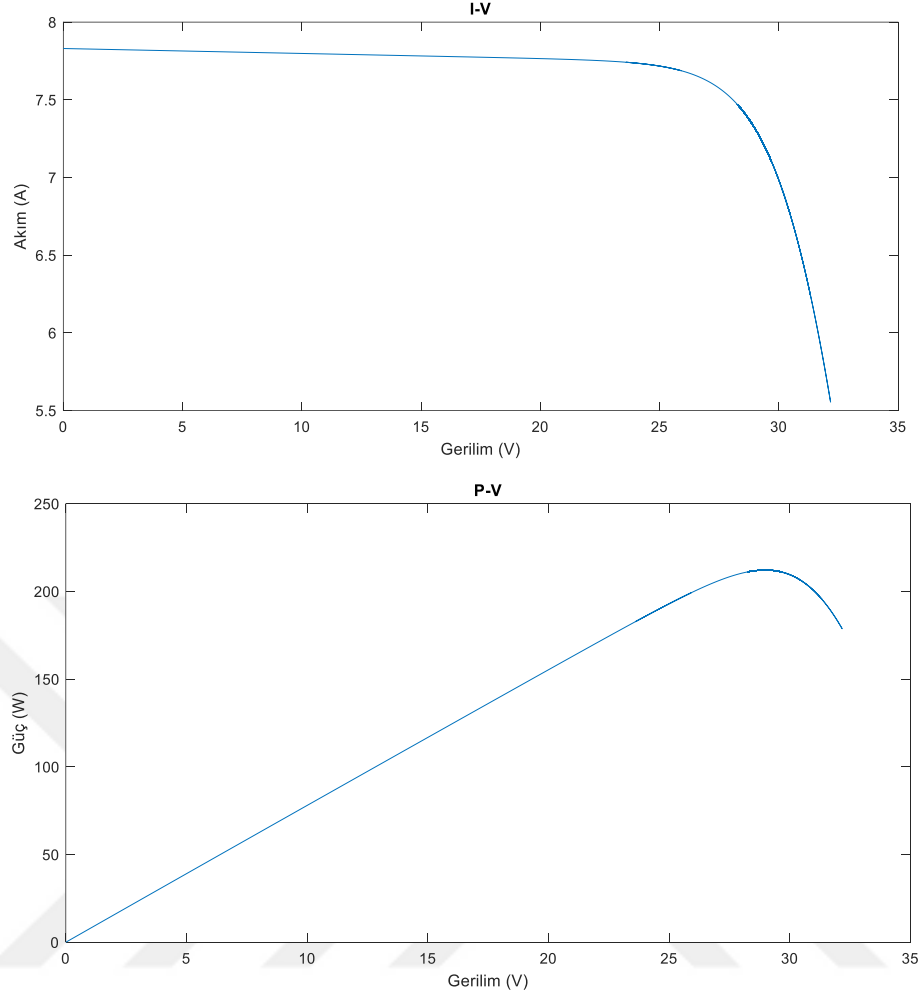
4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA

4.1. Hazır PV modelin ve sunulan PV modelin karşılaştırılması

Bu bölümde öncelikle model tabanlı MPPT yönteminin gerçekleştirilmesi için Matlab/Simulink ortamındaki hazır bir modeli kullanmak yerine eşdeğer devre parametreleri kullanılarak bir güneş panelinin matematiksel modeli 3. Bölümde verilen teorik bilgiler kullanılarak oluşturulmuş ve farklı ortam şartlarındaki karakteristik eğrilerinin hazır model ile karşılaştırmaları verilmiştir. Güneş paneli olarak Matlab/Simulink'te hazır modeli verilen 1Soltech 1STH-215-P modeli seçilmiştir. 1Soltech 1STH-215-P model panele ait Çizelge 3.1'de verilen eşdeğer devre parametrelerine göre ve Başlık 3.1.4.2'de verilen Şekil 3.15, Şekil 3.16, Şekil 3.17, Şekil 3.18, Şekil 3.19'da oluşturulan matematiksel modeller kullanılarak Şekil 3.42'de verilen PV panel tasarlanmıştır. Şekil 4.1'de Matlab tarafından sunulan panele ait I-V, P-V karakteristikleri ile Şekil 4.2'de matematiksel model kullanılarak oluşturmuş olduğumuz panele ait I-V, P-V karakteristikleri aşağıda verilmiştir. Hazır modelin maksimum gücü $P_{max}=213.1$ W, MPP noktasındaki gerilimi 29 V olarak verilmiştir. Matematiksel model kullanılarak oluşturmuş olduğumuz panelin maksimum gücü $P_{max}=212.2$ W, MPP noktasındaki gerilimi 29 V olarak ölçülmüştür.



Şekil 4.1 Hazır modele ait I-V ve P-V karakteristikleri

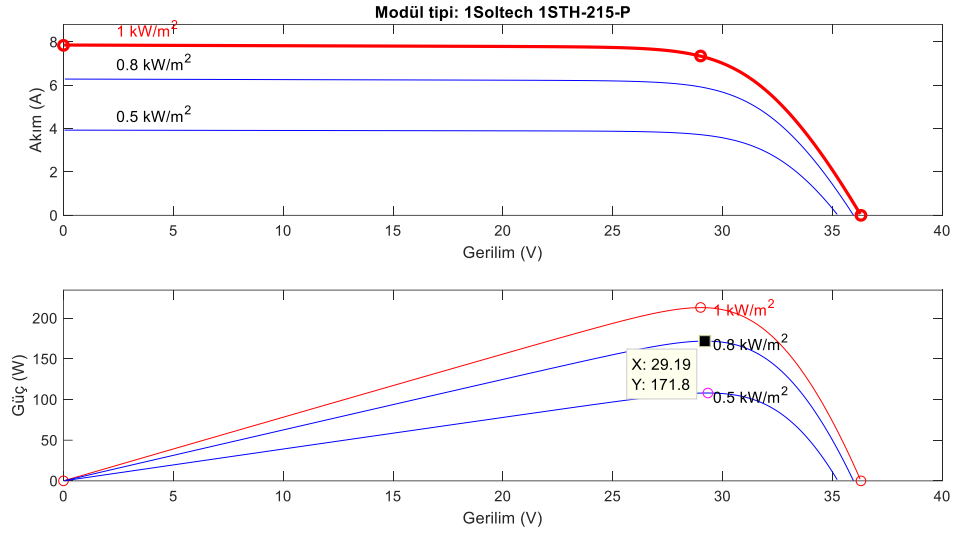


Şekil 4.2 Sunulan modele ait I-V ve P-V karakteristikleri

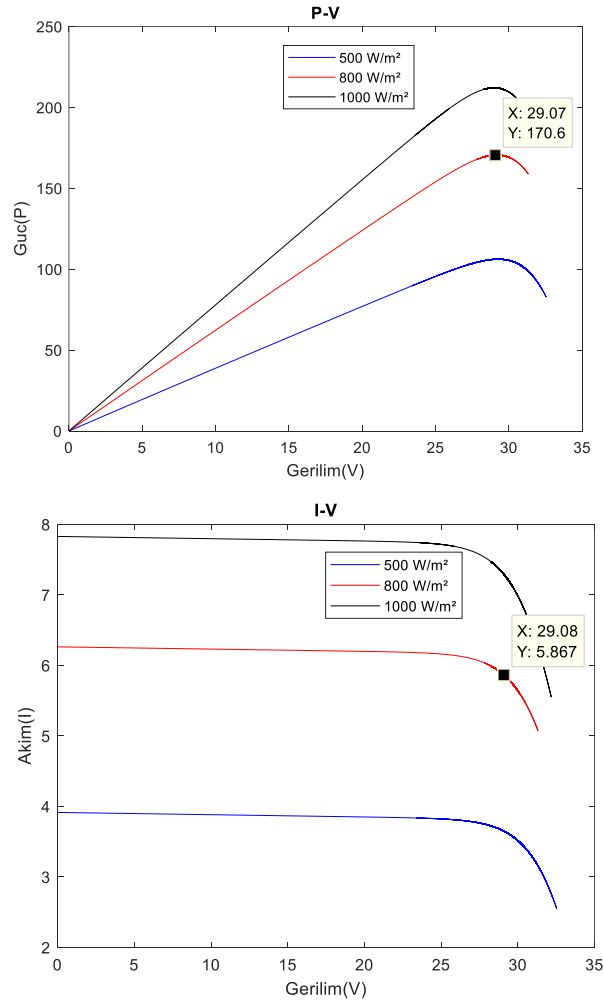
4.1.1. Hazır PV model ve sunulan PV model üzerinde ısıtım etkisi

PV panel üzerinde ısıtım etkisini incelemek için değişen ısıtım değerleri için sıcaklık sabit tutulmuştur. Sabit sıcaklıkta (25°C), güneş ısıtımını $G=1000\text{ W/m}^2$, $G=800\text{ W/m}^2$, $G=500\text{ W/m}^2$ değerleri için hazır modele ait I-V ve P-V karakteristikleri Şekil 4.3'te ve sunulan modele ait I-V ve P-V karakteristikleri Şekil 4.4'te verilmiştir.

Işık şiddeti ile PV panel gücünün doğru orantılı olduğu elde edilen grafiklerden anlaşılmaktadır. Işık şiddeti $G=1000\text{ W/m}^2$ iken görülen güç değeri, ışık şiddeti $G=500\text{ W/m}^2$ iken görülen güç değerinin iki katıdır. Güneş ısıtımını 800 W/m^2 için: hazır modelde $P_{max}=171.8\text{ W}$, MPP noktasındaki gerilimi 29.19 V olarak; sunulan modelde $P_{max}=170.3\text{ W}$, MPP noktasındaki gerilim 29.57 V olarak ölçülmüştür. Farklı ısıtım değerleri için sunulan modelden ve hazır modelden ölçülen değerlerin birbirine oldukça yakın olduğu görülmektedir.



Şekil 4.3 Hazır modele ait ışıınım etkisini gösteren I-V ve P-V karakteristikleri

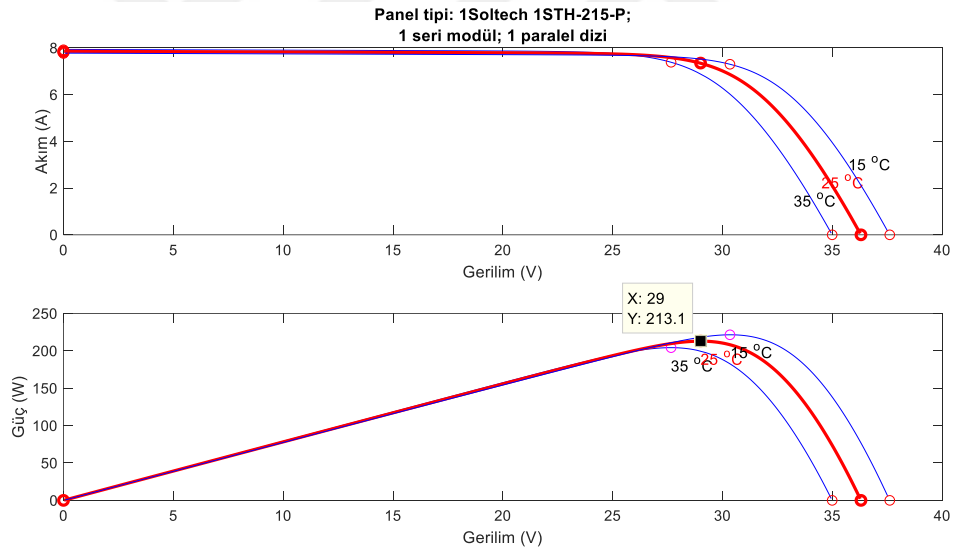


Şekil 4.4 Sunulan modele ait ışıınım etkisini gösteren I-V ve P-V karakteristikleri

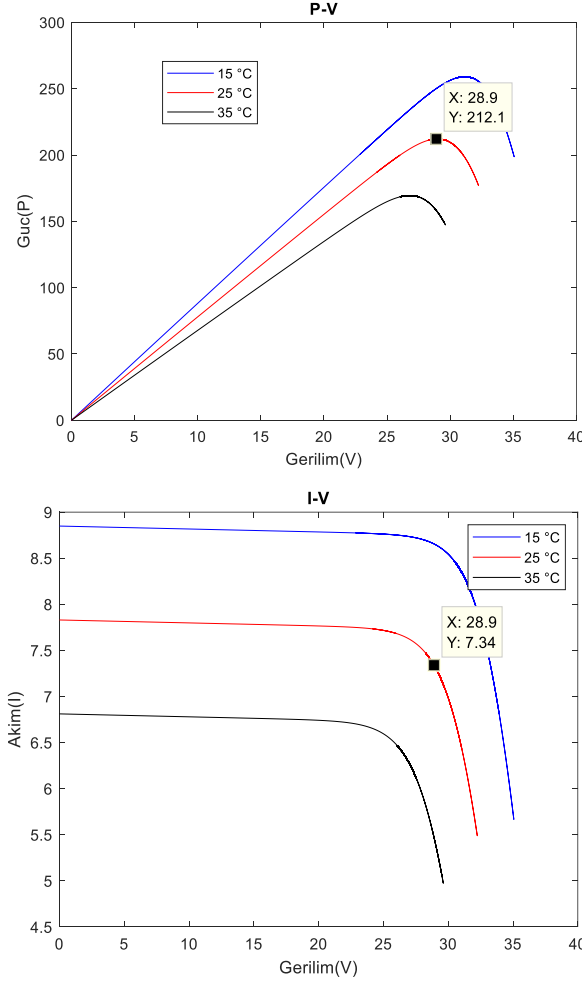
4.1.2. Hazır PV model ve sunulan PV model üzerinde sıcaklık etkisi

PV panel üzerinde sıcaklık etkisini incelemek için değişen sıcaklık değerleri için ışıyım sabit tutulmuştur. Sabit ışık şiddetinde $G=1000 \text{ W/m}^2$; sıcaklık $T=15 \text{ }^\circ\text{C}$, $T=25 \text{ }^\circ\text{C}$, $T=35 \text{ }^\circ\text{C}$ değerleri için hazır modele ait I-V ve P-V karakteristikleri Şekil 4.5'te ve sunulan modele ait I-V ve P-V karakteristikleri Şekil 4.6' da verilmiştir.

Elde edilen grafiklerden sıcaklık ile gücün ters orantılı olduğu, sıcaklık arttıkça gücün azaldığı anlaşılmaktadır. Bunun nedeni grafiklerde görüldüğü üzere aynı çıkış gerilimi için artan sıcaklıkla beraber çıkış geriliminin düşmesidir. Akımda ise gerilime göre çok daha düşük oranda bir artış gözlenmektedir. Sıcaklık $25 \text{ }^\circ\text{C}$ için: hazır modelde $P_{max}=213.1 \text{ W}$, MPP noktasındaki gerilimi 29.0 V olarak; sunulan modelde $P_{max}=212.1 \text{ W}$, MPP noktasındaki gerilimi 28.9 V olarak ölçülmüştür. Farklı ışıyım değerleri için sunulan modelden ve hazır modelden ölçülen değerlerin birbirine oldukça yakın olduğu görülmektedir.



Şekil 4.5 Hazır modele ait sıcaklık etkisini gösteren I-V ve P-V karakteristikleri

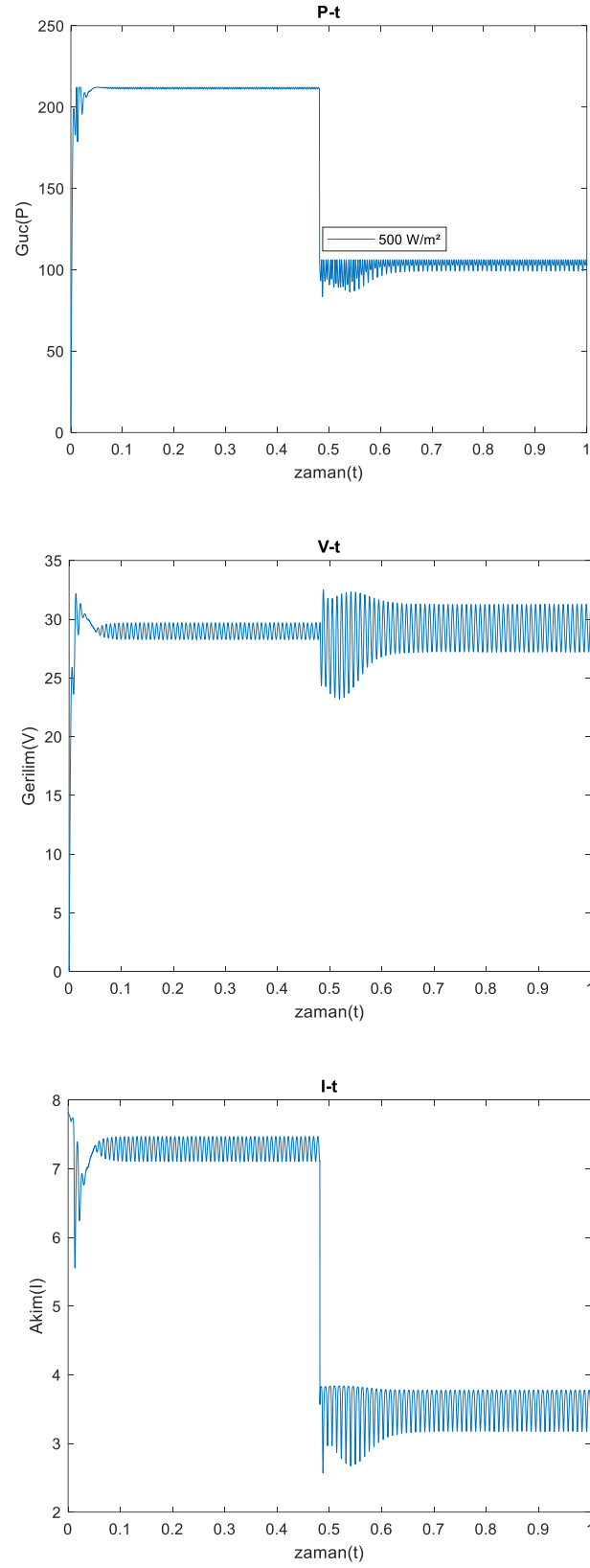


Şekil 4.6 Sunulan modele ait sıcaklık etkisini gösteren I-V ve P-V karakteristikleri

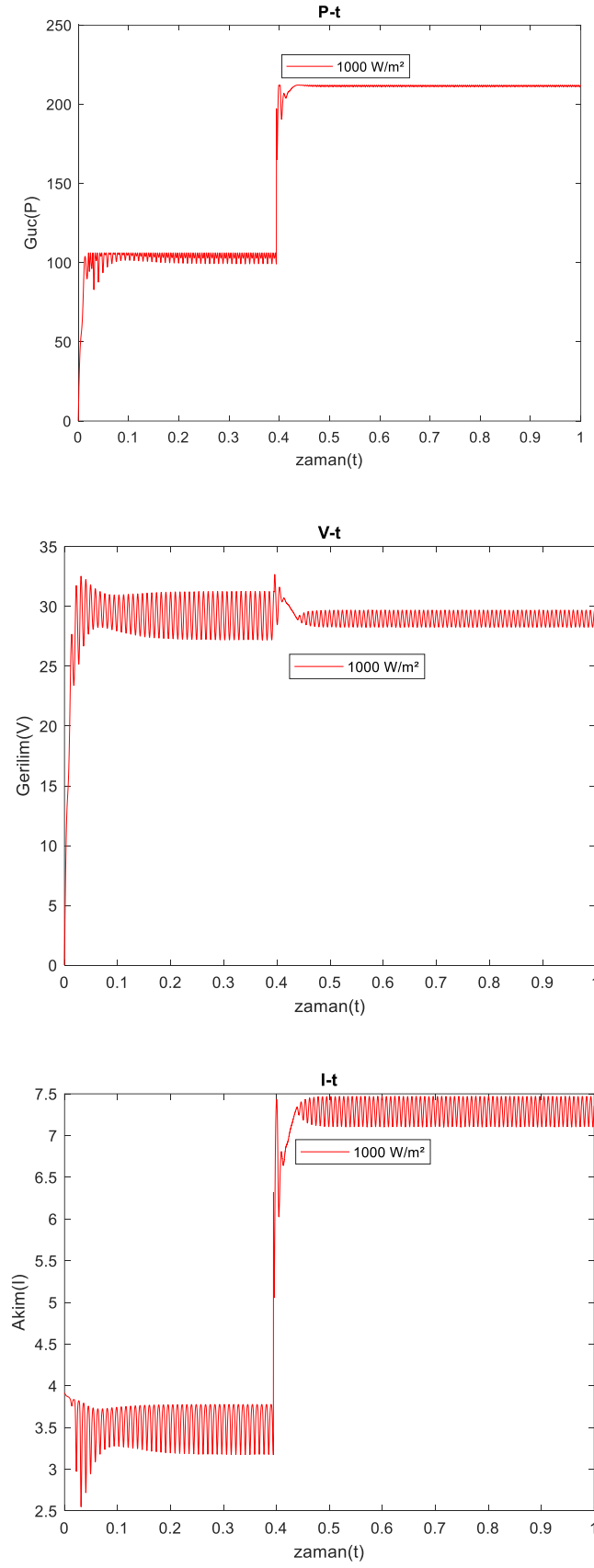
4.2. Matematiksel model kullanılarak oluşturulan PV modelin incelenmesi

4.2.1. Işınımda ani değişimler olduğu durumun incelenmesi

Işınımda meydana gelen ani değişimlerde panele ait P-t, V-t ve I-t karakteristikler panel sıcaklığı $T=25^{\circ}\text{C}$ 'de sabit tutulduğu durum için elde edilmiştir. Güneş ışınımı 1000 W/m^2 'den 500 W/m^2 'ye azalış gösterdiğindeki değişim Şekil 4.7'de verilmiştir. Şekil 4.8'de güneş ışınımı 500 W/m^2 'den 1000 W/m^2 'ye artış gösterdiğinde panelin MPP noktasında çalıştığı gözlemlenmiştir. Sistemin güneş ışınımındaki ani değişikliklere tepki verdiği gözlemlenmiştir.



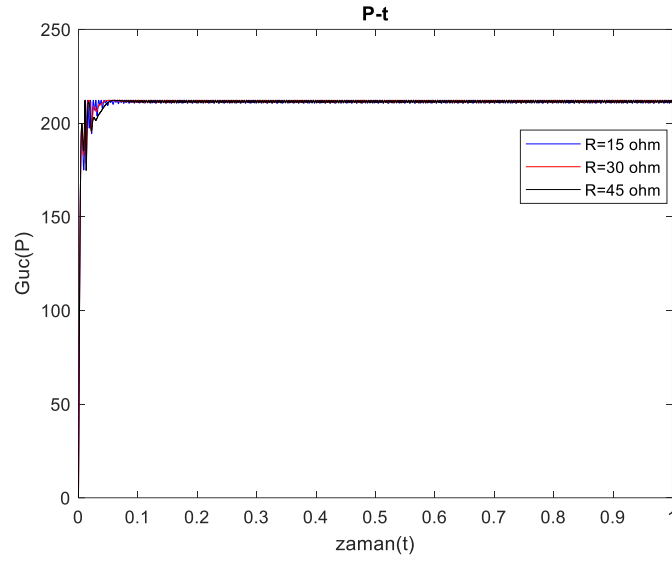
Şekil 4.7. Anlık ısıtım değişimine ait P-t, V-t, I-t grafikleri (1000 W/m²'den 500 W/m² değişim)



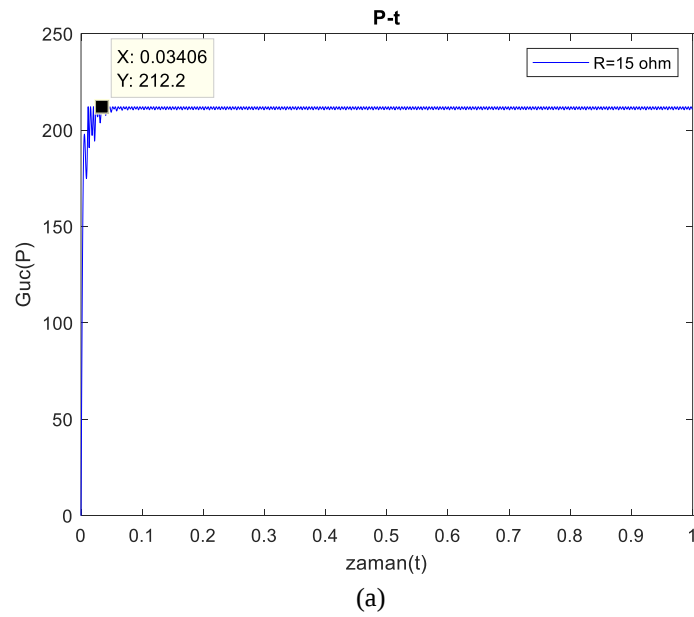
Şekil 4.8. Anlık ışınlım değişimine ait P-t, V-t, I-t grafikleri (500 W/m^2 'den 1000 W/m^2 değişim)

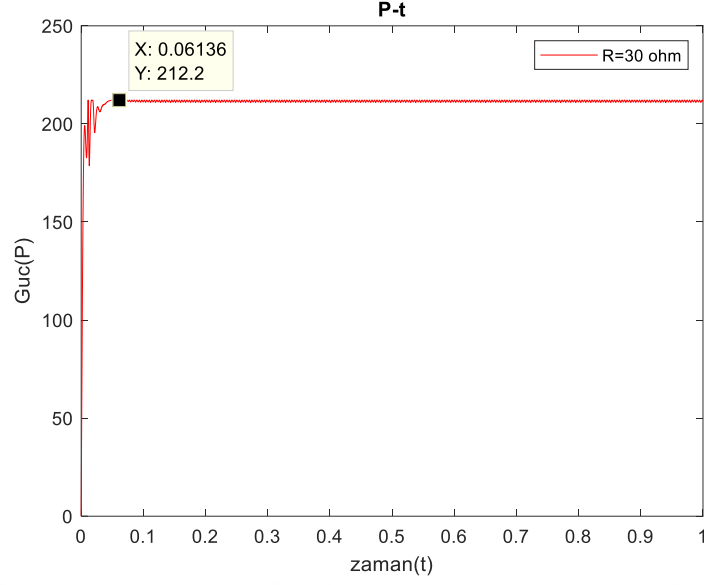
4.2.2. Yük direnci değişimlerinin incelenmesi

$G=1000 \text{ W/m}^2$, $T=25^\circ\text{C}$ ortam şartlarında farklı yük dirençleri için Şekil 4.9’da P-t grafiği verilmiştir. Farklı yükler için sistemin MPP noktasına yerleşme süreleri ve salınım durumları değişse bile sistemin MPP noktasında çalıştığı görülmüştür. Şekil 4.10’da $R=15 \text{ } \Omega$, $R=30 \text{ } \Omega$ ve $R=45 \text{ } \Omega$ yk dirençlerine ait P-t grafiği verilmiştir. Bu grafiklerden MPP noktasına ulaşma süreleri $R=15 \text{ } \Omega$ için 0.03406 s, $R=30 \text{ } \Omega$ için 0.06136 s ve $R=45 \text{ } \Omega$ için 0.06958 s olarak okunmaktadır.

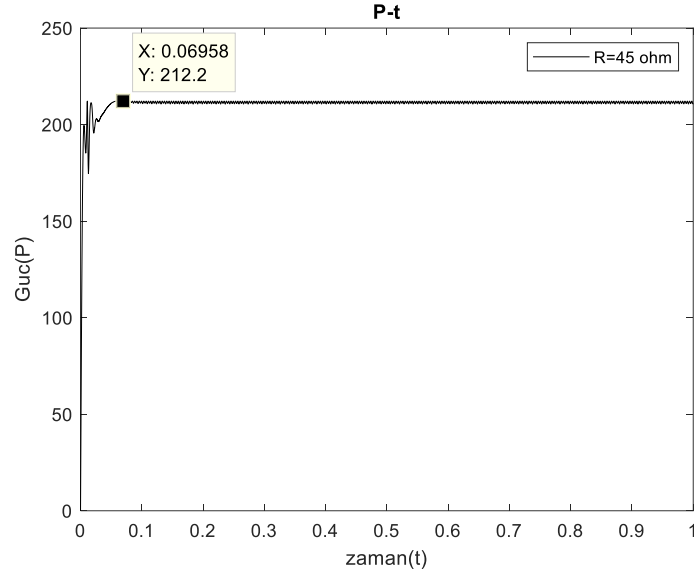


Şekil 4.9 Farklı yük direnci değerleri için P-t grafiği





(b)



(c)

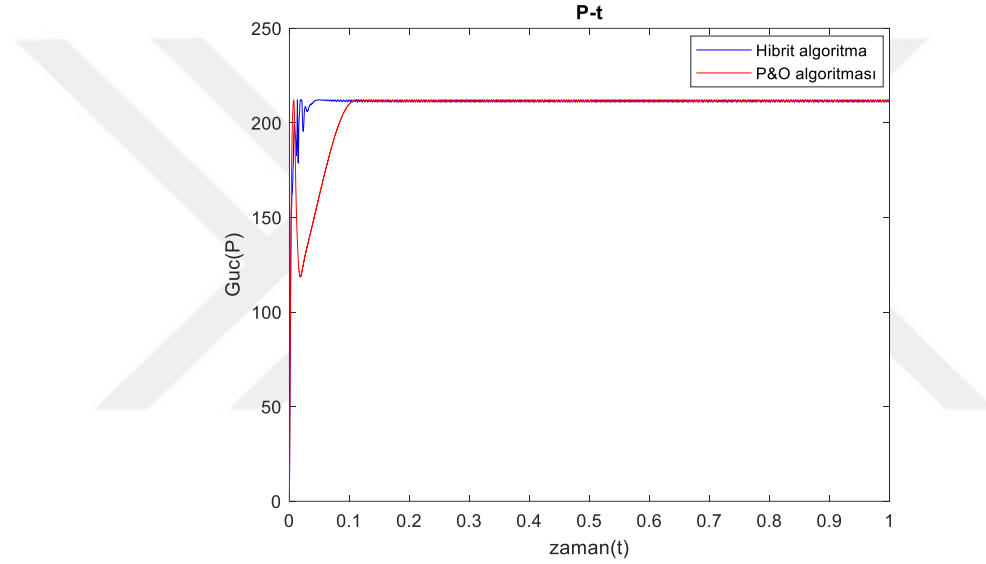
Şekil 4.10. a) $R=15 \Omega$, b) $R=30 \Omega$ ve c) $R=45 \Omega$ yük dirençlerine ait P-t grafiği

4.2.3. Geleneksel P&O ve hibrit algoritmanın karşılaştırılması

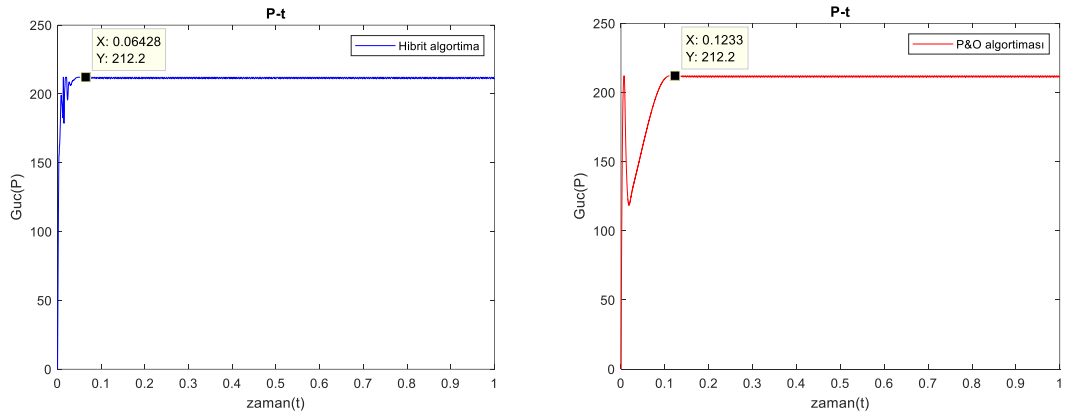
Matematiksel model yardımıyla maksimum güç noktasındaki gerilim değeri $G=1000 \text{ W/m}^2$, $T=25^\circ\text{C}$ ortam şartlarında hesaplanmış, buna göre MPPT algoritmasının başlangıç değeri $V_{refinit}=29.0 \text{ V}$ olarak belirlenmiştir. Matematiksel model ile bu değer belirlenmemiş olsaydı güç dönüştürücü çıkışına bir yük bağlanmadığında güneş paneli açık devre durumunda olacağı için $V_{oc}=36.3 \text{ V}$ a eşit olacaktı. $V_{refinit}$ değerini 29 V olarak belirleyerek ilk aşamada model tabanlı algoritma yürütüldüğünde ve panel gerilimi açık devre durumdayken (36.3 V) P&O algoritmasının kullanıldığı durum için

simüle ettiğimizde Şekil 4.11'deki grafikten salınım durumlarında farklılık olsa bile MPP'ye ulaştıkları görülmektedir. Bu durum MPPT algoritması kullanılarak PV sistemin MPP'de çalıştırıldığını göstermektedir.

Şekil 4.12'deki grafiklerden MPP noktasına ulaşma süreleri önerilen hibrit algoritma için ($V_{refinit}=29.0$ V) 0.06428 s, geleneksel P&O algoritmasının açık devre durumunda başlatıldığı durum için 0.1233 s olarak okunmaktadır. Grafiklerden de anlaşılacağı üzere model tabanlı MPPT ile P&O algoritması hibrit şekilde çalıştırıldığında MPP noktasına ulaşma süresinin kısaldığı, maksimum güç noktası etrafındaki salınımların daha az görüldüğü anlaşılmaktadır.

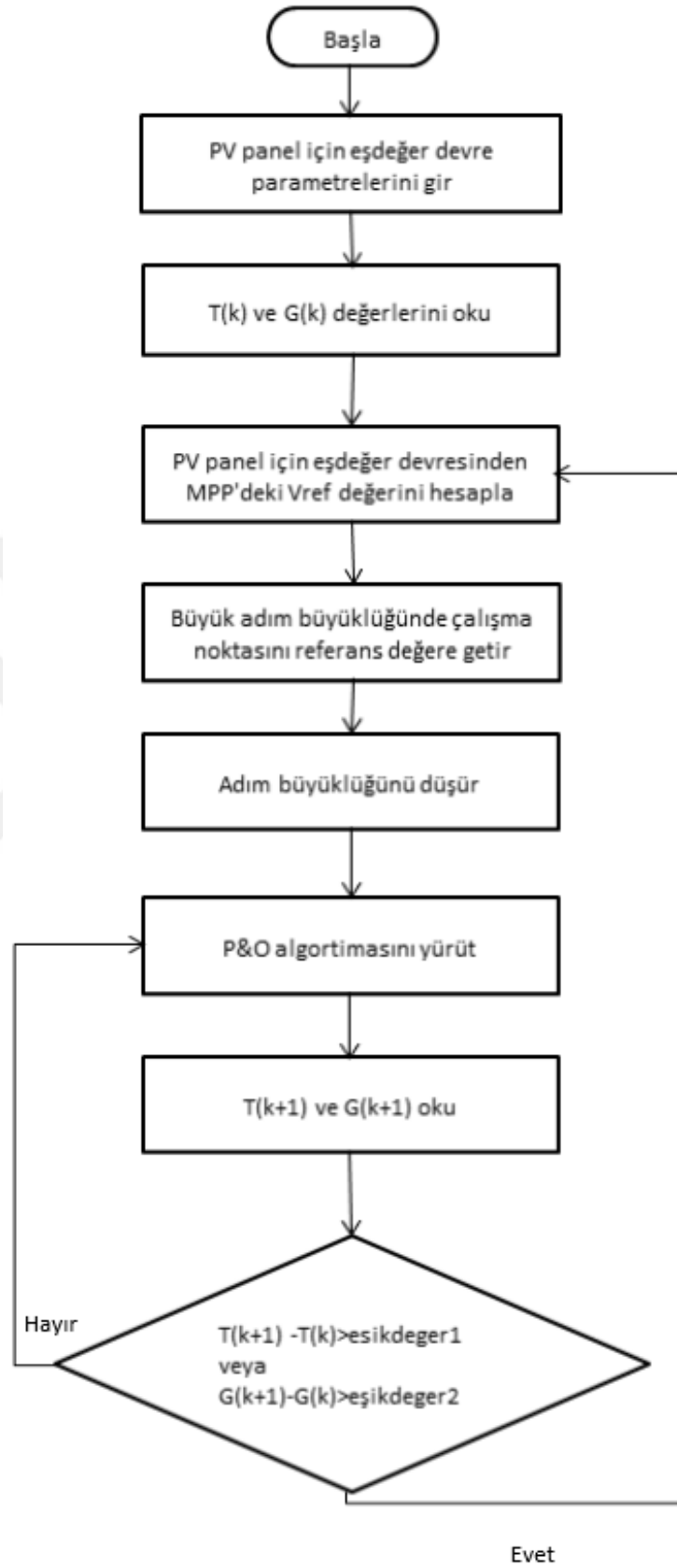


Şekil 4.11 Hibrit algoritma ($V_{refinit}=29.0$ V) ve P&O algoritması için P-t grafiği

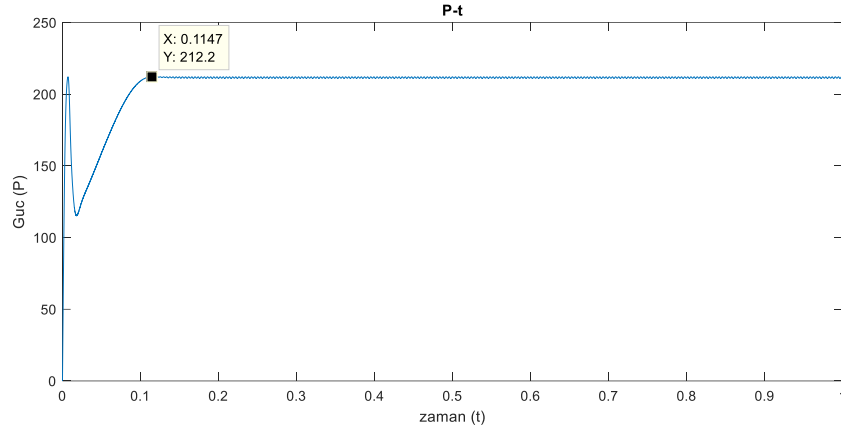


Şekil 4.12. Hibrit algoritma ($V_{refinit}=29.0$ V) ve P&O algoritması için MPP'ye ulaşma süreleri

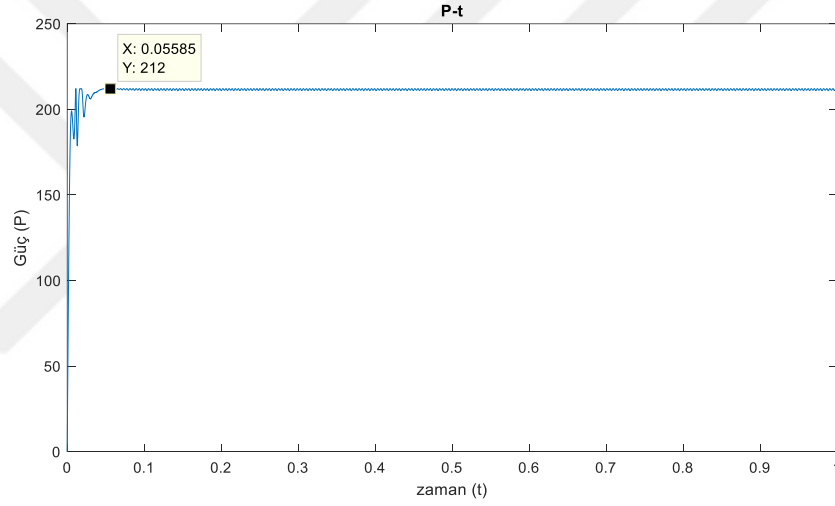
Tezde gerçekleştirilen hibrit algoritmaya ait akış diyagramı Şekil 4.13'te verilmiştir. Matematiksel model yardımıyla önceden MPP noktası belirlenebildiğinde; adım büyüklüğünü nispeten büyük değerlerde seçme imkanı olduğundan maksimum güç noktasına daha hızlı yakınsama sağlanmaktadır. Referans değere ulaşım sağlandığında MPPT işlemi klasik model tabanlı MPPT yönteminden farklı olarak sonlandırılmamaktadır. Panelin daha önceden belirlenmiş olan eşdeğer devre parametrelerinde zamanla ortaya çıkabilecek değişimler, ışık şiddeti ve sıcaklık sensörünün ölçüm hatalarına bağlı olarak maksimum güç noktası hesabında oluşabilecek farklılıklardan dolayı bu aşamada daha küçük adım büyüklüğüne sahip P&O algoritmasına geçiş yapılır ve MPP etrafında arama daha küçük adımlarla devam eder. Bu aşamada adım büyüklüğünün düşürülmesi maksimum güç noktası etrafındaki salınımların da düşmesine sebep olur. P&O algoritması MPP'yi tepe tırmanma mantığına uygun olarak arayarak bulur; ancak matematiksel model yardımıyla önceden MPP belirlendiğinde sistem MPP'yi aramakla zaman kaybetmediğinden MPP'ye daha hızlı ulaşır. Şekil 4.14'te geleneksel P&O algoritmasına ait P-t grafiği verilmiştir ve MPP'ye ulaşma süresi 0.1147 s olarak okunmaktadır. Şekil 4.15'te model tabanlı ve geleneksel P&O algoritmasının birlikte kullanıldığı, tezde önerilen hibrit algoritmaya ait P-t grafiği verilmiştir ve MPP'ye ulaşma süresi 0.0558 s olarak okunmaktadır. Hibrit algoritmanın, geleneksel P&O algoritmasına göre daha iyi yakınsama hızına sahip olduğu ve MPP çevresinde daha az salınım meydana getirdiği görülmüştür.



Şekil 4.13. Hibrit algoritmaya ait akış diyagramı



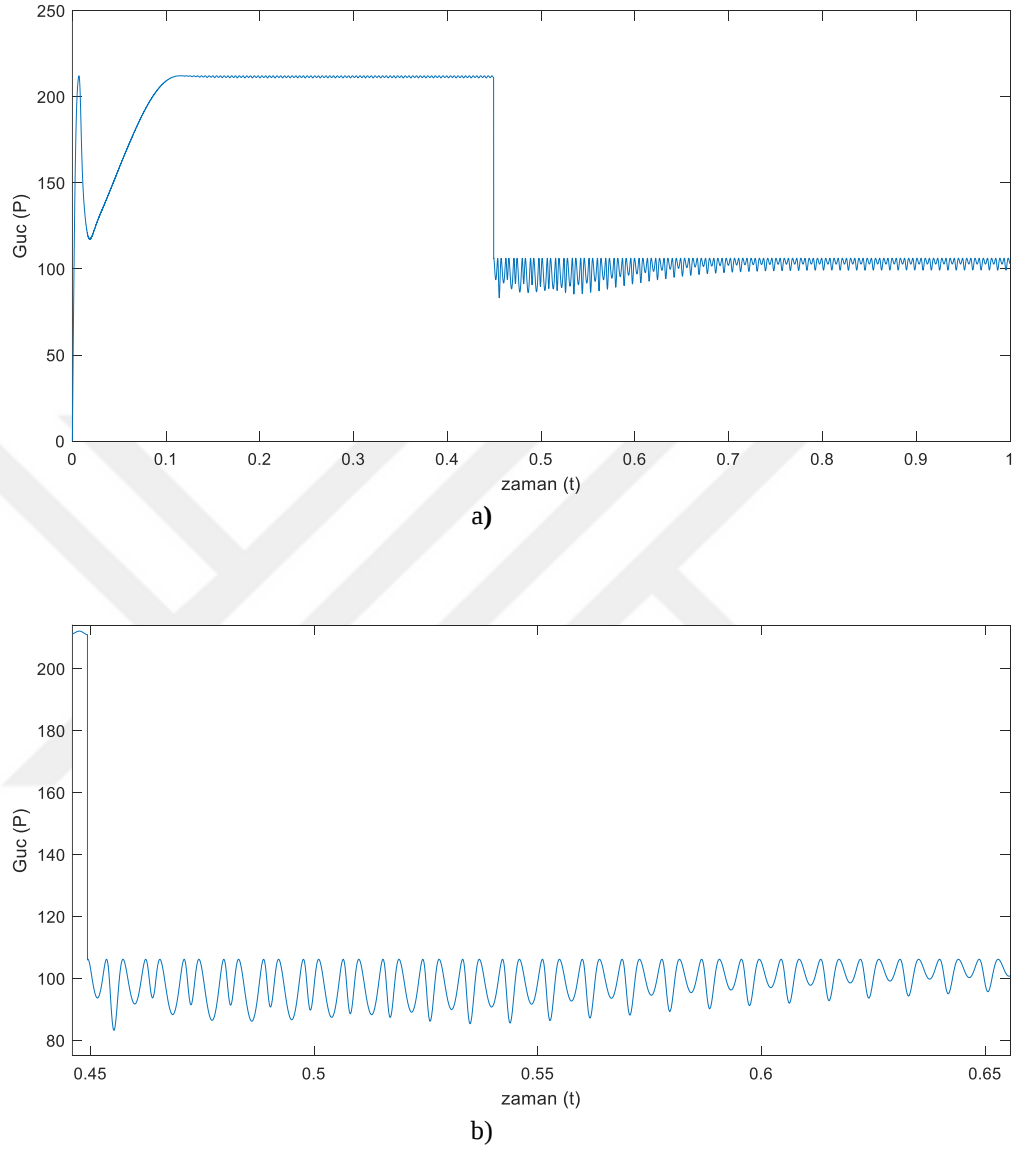
Şekil 4.14. Geleneksel P&O algoritmasına ait P-t grafiği



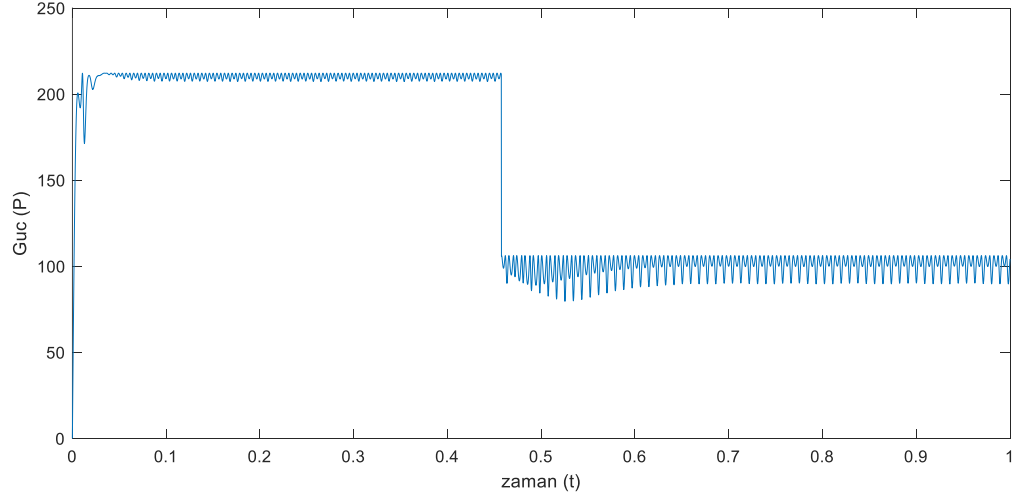
Şekil 4.15. Hibrit algoritmaya ait P-t grafiği

Işınımda ani değişimler meydana geldiğinde geleneksel P&O ve hibrit algoritmanın verdiği tepkileri karşılaştırmak amacıyla sabit sıcaklık altında ($T=25^{\circ}\text{C}$) güneş ışıını 1000 W/m^2 'den 500 W/m^2 'ye düşürülmüştür. Hibrit algoritmada ışık şiddeti ve/veya sıcaklıkta önemli bir değişim algılandığında daha büyük adım büyüklüğüne sahip model tabanlı algoritmaya geçiş yapılmakta ve referans gerilim değeri tekrar hesaplanmakta, referans değere erişim sağlandığında ise tekrar büyük bir değişim algılanana kadar daha düşük adım büyüklüğündeki geleneksel P&O algoritmasında çalışmaya devam edilmektedir. Geleneksel P&O algoritmasının anlık ışıını değişimine ait P-t grafiği ve tepki süresini görmek için grafiğin yakınlaştırılmış hali Şekil 4.16'da verilmektedir. Tezde önerilen hibrit algoritmanın anlık ışıını değişimine ait P-t grafiği ve tepki süresini görmek için grafiğin yakınlaştırılmış hali

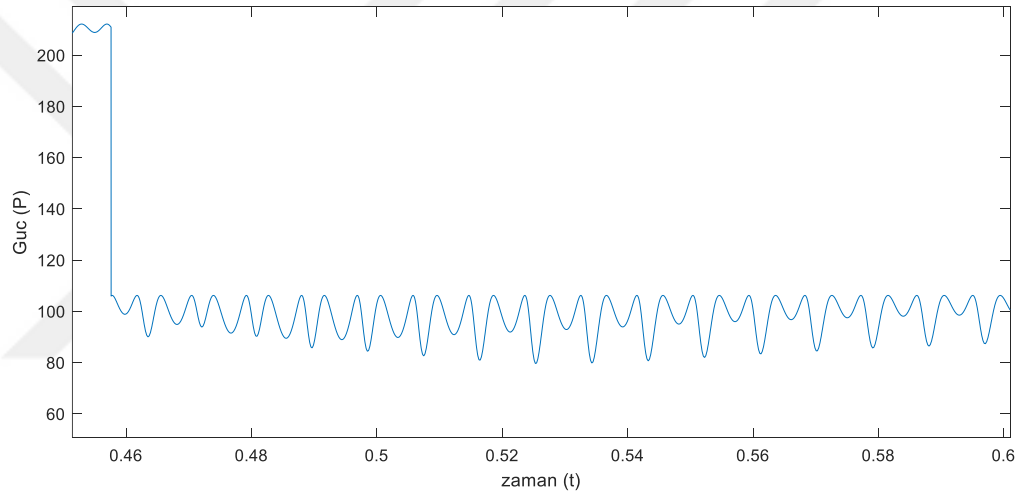
Şekil 4.17’de verilmektedir. Anlık ısıtım değişimlerine, hibrit algoritmanın geleneksel P&O algoritmasına göre daha hızlı tepki verdiği anlaşılmıştır.



Şekil 4.16. a) Geleneksel P&O algoritmasına ait anlık ısıtım değişimindeki P-t grafiği
b) Geleneksel P&O algoritmasına ait değişim anında şeklin büyütülmüş hali



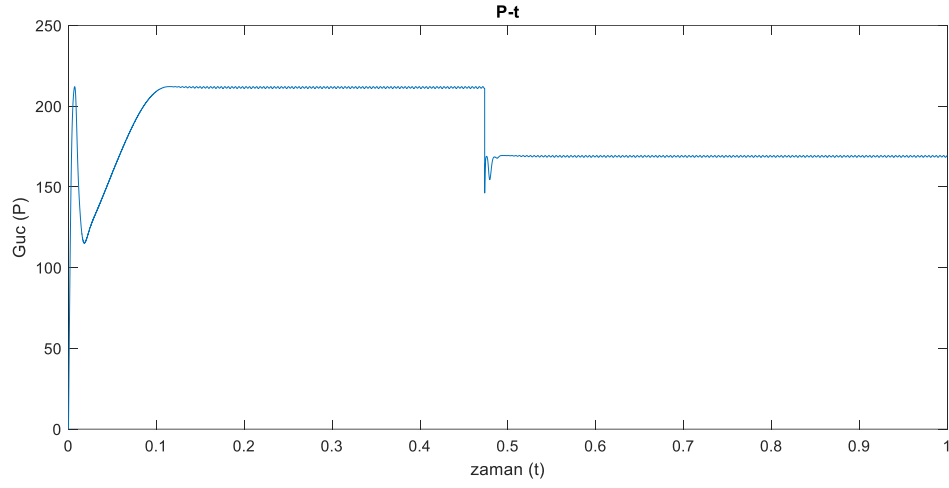
a)



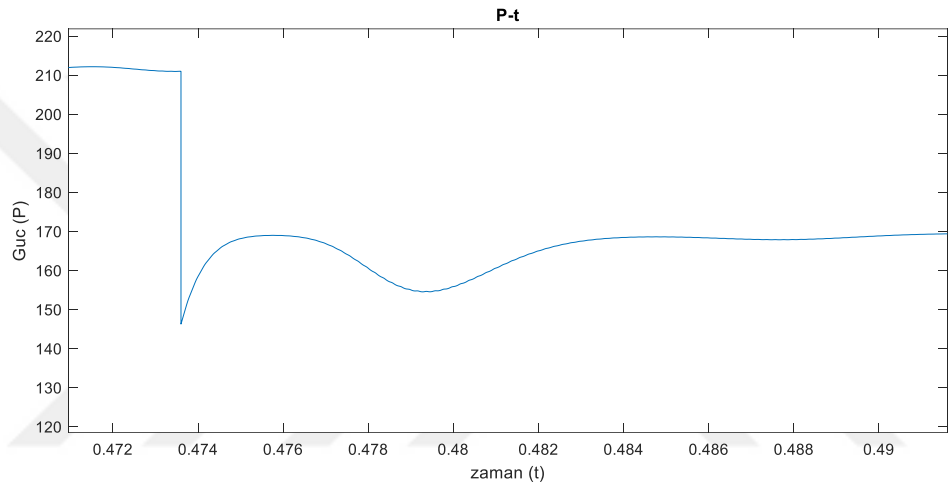
b)

Şekil 4.17. a) Hibrit algoritmaya ait anlık ısıtım değişimindeki P-t grafiği
b) Hibrit algoritmaya ait değişim anında şeklin büyütülmüş hali

Sıcaklıkta ani değişim meydana geldiğinde geleneksel P&O ve hibrit algoritmanın verdiği tepkileri karşılaştırmak amacıyla sabit ışık şiddeti için sıcaklık 25°C'den 35°C'ye yükseltilmiştir. Geleneksel P&O algoritmasının anlık sıcaklık yükselmesine ait P-t grafiği ve tepki süresini görmek için grafiğin yakınlaştırılmış hali Şekil 4.18'de verilmektedir. Hibrit algoritmanın anlık ısıtım değişimine ait P-t grafiği ve tepki süresini görmek için grafiğin yakınlaştırılmış hali Şekil 4.19'da verilmektedir. Anlık sıcaklık değişimlerine hibrit algoritmanın geleneksel P&O algoritmasına göre daha hızlı tepki verdiği anlaşılmıştır.

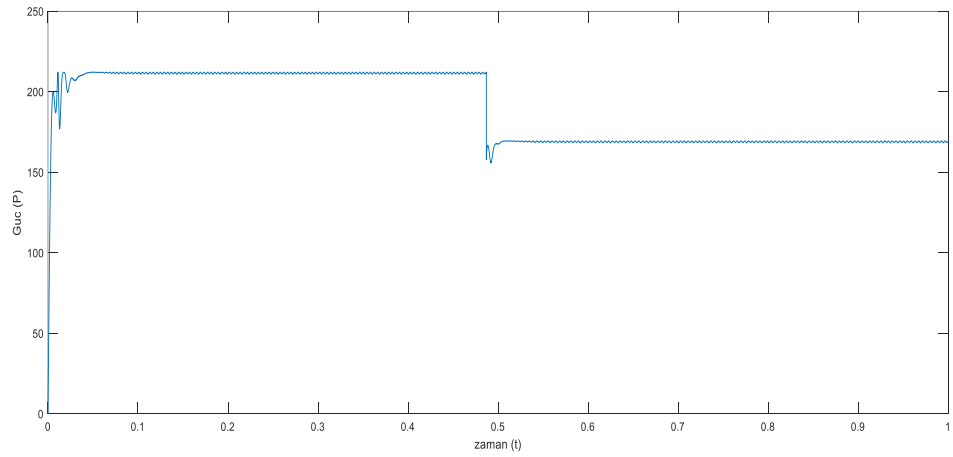


a)

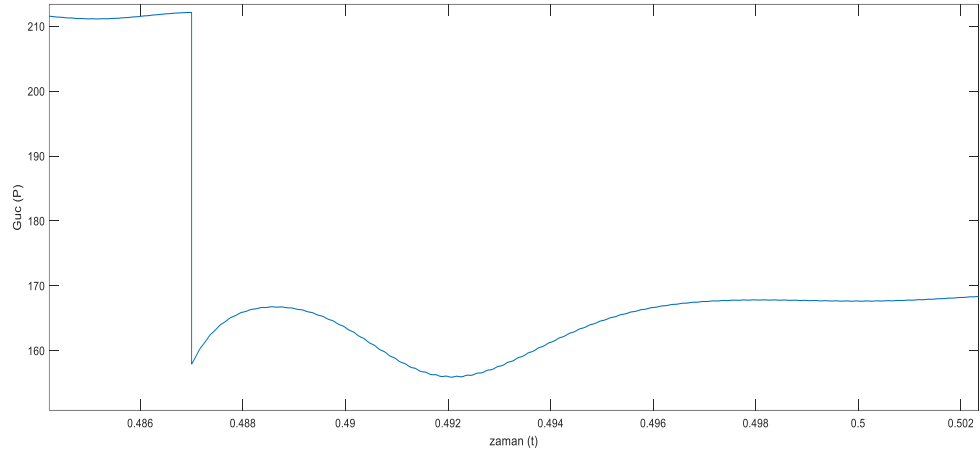


b)

Şekil 4.18. a) Geleneksel P&O algoritmasına ait anlık sıcaklık değişimindeki P-t grafiği
b) Geleneksel P&O algoritmasına ait değişim anında şeklin büyütülmüş hali



a)



b)

Şekil 4.19. a) Hibrit algoritmaya ait anlık sıcaklık değişimindeki P-t grafiği
b) Hibrit algoritmaya ait değişim anında şeklin büyütülmüş hali

4.2.4. P_{pv} ve P_o ' nun incelenmesi

Panel çıkış değerleri olan V_{pv} ve I_{pv} , MPPT algoritmasının giriş değerleridir. Farklı ΔV_{ref} değerleri için panel çıkışından ölçülen güç (P_{pv}) ile yük direncinden ölçülen gücün (P_o) değerlerine ait ölçüm sonuçları ve MPP'ye ulaşma süreleri Çizelge 4.1'de verilmiştir. Çizelge 4.1'de görüldüğü üzere P_{pv} ve P_o değerleri birbirine yakındır ve aradaki farklar güç dönüştürücüdeki kayıplardan kaynaklanmaktadır. ΔV_{ref} değeri arttıkça MPP'ye ulaşma süresinin azaldığı görülmektedir.

Çizelge 4.1 Değişen ΔV_{ref} değerleri için P_{pv} ve P_o

ΔV_{ref}	Panel Çıkışından Ölçülen Güç (P_{pv})	Yük Direncinden Ölçülen Güç (P_o)	MPP'ye ulaşma süresi
0.01 V	204.7 W	202.8 W	0.0558 s
0.2V	212.1 W	194.26 W	0.0092 s
0.3 V	206.4 W	195.28 W	0.0088 s

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

5.1. Sonuçlar

Bu çalışmada PV hücre tek diyot eşdeğer devresi yardımıyla modellenerek PV panelin farklı ışıınım ve sıcaklık değerlerinde I-V ve P-V elektriksel karakteristik eğrileri elde edilmiştir. Güneş paneli olarak 1Soltech 1STH-215-P kullanılmıştır ve bu güneş paneline ait eşdeğer devre parametreleri kullanılarak eşdeğer devre modeli elde edilmiştir. Matlab/Simulink'te hazır modeli de verilen bu güneş paneline ait I-V, P-V grafikleri farklı ışıınım ve sıcaklık değerleri için elde edilmiştir. Simulink modeline ve bu tezde açıklanan matematiksel denklemler kullanılarak elde edilen matematiksel model yardımıyla oluşturulan PV modele ait eğriler karşılaştırılmıştır ve ölçülen değerlerin birbirine oldukça yakın olduğu görülmüştür. Elde edilen sonuçlara bakıldığında matematiksel model yardımıyla oluşturulan PV panele ait modellemenin, model tabanlı MPPT algoritmasının gerçekleştirilmesinde ve PV panelin simüle edilmesinde kullanılabilir olduğu anlaşılmıştır.

Bu çalışmada PV panellerin maksimum güç noktası tespiti amacıyla, model tabanlı ve geleneksel P&O yöntemlerinin birlikte kullanıldığı hibrit bir MPPT algoritması geliştirilmiştir. MPPT algoritmasında kontrol değişkeni olarak PV panel gerilimi kullanılmıştır. Matematiksel model yardımıyla MPP noktasının hesaplanabildiği ve model hesabının kullanılmadığı P&O algoritmasının açık devre şartlarından itibaren çalıştırılması durumlarında; MPP noktasına ulaşma süreleri ve MPP noktası çevresindeki salınımları karşılaştırılmıştır. Matematiksel model yardımıyla önceden MPP noktası belirlenebildiği için daha büyük adımlarla MPP noktasına yaklaşım sağlanabilmektedir. Teorik olarak MPP'ye ulaşınca P&O algoritmasına geçiş yapılarak daha küçük adımlarla MPP etrafında arama yapmaya devam eder. Bunun sebebi teorik olarak hesaplanan MPP değeriyle gerçek değerde panelin fiziksel olarak yıpranması, toz, kir etkileri ve ışık şiddeti ve sıcaklık değerlerinin sensörün ölçüm hassasiyetine bağlı olarak gerçek değerinden farklı olabilmesidir. P&O algoritması MPP'yi arama algoritması mantığına uygun şekilde bulur; ancak matematiksel model yardımıyla önceden MPP noktası belirlendiğinde sistem MPP'yi aramakla zaman kaybetmez ve MPP'ye daha hızlı ulaşım sağlanabilir. Model tabanlı MPPT ile P&O algoritması hibrit şekilde çalıştırıldığında MPP noktasına ulaşma süresinin kısaldığı, maksimum güç noktası etrafındaki salınımların daha az görüldüğü anlaşılmıştır.

Işınımında ya da sıcaklıkta ani değişimler için geleneksel P&O algoritması ile önerilen hibrit algoritma karşılaştırılmıştır ve hibrit algoritmanın geleneksel algoritmaya göre daha hızlı tepki verdiği anlaşılmıştır.

Eşdeğer devre parametrelerini belirleyerek geleneksel P&O algoritmasına model tabanlı MPPT algoritmasının eklenmesinin avantajlı olduğu bu çalışmada simülasyon sonuçları ile gösterilmiştir. Işık şiddeti ve/veya sıcaklıkta ortaya çıkan büyük değişimlerde P&O algoritmasından model tabanlı algoritmaya geçiş yapılması, ortam şartlarındaki hızlı değişimlere karşı daha iyi bir çıkış elde edilmesini sağlamıştır. Ayrıca model tabanlı algortmada daha büyük adım büyüklüğü, P&O algoritmasında daha küçük adım büyüklüğünün seçilmesinden dolayı hızlı tepki sağlanabilmiş ve maksimum güç noktası etrafındaki salınımlar azaltılmıştır.

5.2. Öneriler

Tez çalışması kapsamında matematiksel model yardımıyla oluşturulan PV panele ait modellemenin, kurulacak olan sistemde kullanımı planlanan bir PV panelin simüle edilmesinde ve model tabanlı MPPT algoritmasında kullanılabilir olduğu anlaşılmıştır. PV panel model parametrelerinin farklı modellerdeki paneller için de doğru şekilde belirlenebilmesi için çeşitli optimizasyon algoritmalarının kullanılması daha iyi sonuçlar elde edilmesini sağlayabilir.

PV sistemlerden elde edilen gücün ve verimin; sıcaklık ve ışık şiddetinden etkilendiği, dolayısıyla sistemin MPP noktasında çalıştırılmasında sıcaklık ve ışık şiddetinin büyük öneme sahip olduğu gözlemlenmiştir. Değişken ışıınım ve değişken sıcaklık altında MPPT yöntemlerinin sistemdeki etkilerinin gözlemlenebilmesi adına farklı MPPT tekniklerine ait algoritma modelleri Matlab/Simulink'te oluşturulup simülasyon sonuçları elde edilebilir. Bu modeller üzerinde PI kontrol, bulanık kontrol, kayan kipli kontrol gibi farklı kontrol yöntemleri kullanılarak MPPT algoritmalarının performanslarının iyileştirilmesi yönünde çalışmalar yapılabilir. PV sistemin verimini arttırmak ve MPP'de kararlı durumdaki salınımların ve güç kayıplarının daha fazla azaltılması hedeflenebilir.

KAYNAKLAR

- Altaş İ. H., 1998, “Fotovoltaik Güneş Pilleri: Yapısal Özellikleri ve Karakteristikleri”, Karadeniz Teknik Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Enerji, Elektrik, Elektromekanik, Bileşim Yayıncılık A.Ş.
- Amiry, H., Benhmida,M.,Bendaoud,R.,Hajjaj,C.,Bounouar,S.,Yadir,S.,Rais,K.,Sidki,M. 2018. Design and implementation of a photovoltaic I-V curve tracer: Solar modules characterization under real operating conditions.Science Direct 206-216.
- Belkaid, A., Gaubert ,J-P., Gherbi,A.,2016. An Improved Sliding Mode Control for Maximum Power Point Tracking in Photovoltaic Systems. CEAI, Vol.18, No.1 pp. 86-94, 2016.
- Bodur, H., Bakan, A. F. 2004. An Improved ZCT-PWM DC–DC Converter for High-Power and Frequency Applications. IEEE Transaction Industrial Electronics, 51, 89-95.
- Bouarroudj, N., Boukhetala, D., Feliu-Battle, V., Boudjema, F., Benlahbib, B., Batoun, B. 2019. Maximum Power Point Tracker Based on Fuzz Adaptive Radial Basis Function Neural Network for PV-System. Energies.
- Bataineh, K.M. and Hamzeh, A. 2014, Efficient maximum power point tracking algorithm for application under rapid changing weather condition. Hindawi Publishing Corporation ISRN Renewable Energy(2014),Jordan .
- Cesare,G., Caputo,D., Nascetti,A. 2005, Maximum power point tracker for portable photovoltaic systems with resistive-like load.Solar Energy 80(16):982-988.
- Çoruh, N., Ürgün, S., Erfidan, T., Çoruh, N., 2008. DA-DA Boost Tipi Dönüştürücü Tasarımı ve Gerçeklenmesi, Elektrik-Elektronik-Bilgisayar Mühendisliği Sempozyumu (ELECO 2008), 1,362-365.
- Faranda, R. and Leva, S. 2008, A comparative study of mppt techniques for PV systems.7th WSEAS International Conference on Application of Electrical Engineering (AEE’08), Trondheim, Norway, July 2-4.
- Gümüş, Z. ve Demirtaş, M. 2020, “Fotovoltaik sistemlerde maksimum güç noktası takibinde kullanılan algoritmaların kısmi gölgeleme koşulları altında karşılaştırılması”, Politeknik Dergisi, 2021; 24(3) : 853-865.
- Hua, C., Lin, J. 2004. A modified tracking algorithm for maximum power tracking of solar array. Energy Conversion and Management 45(6):911-925.
- Hussain, A., Garg,M.M., Korukonda, M.P., Hasan,S., Behera,L. 2018, IEEE Transactions on Sustainable Energy, October.
- İşen, E., Koçhan,Ö., 2020. “Fotovoltaik panelin tek diyotlu modellenmesi”Müh. Bil. ve Araş. Dergisi, 2020; 2(1) 1-10.

- Kharb Ravinder K, Ansari Md Fahim, Shimi SL. Design and implementation of ANFIS based MPPT scheme with open loop boost converter for solar PV module. *Int J Adv Res Electr, Electron Instrum Eng* 2014;3(1).
- Kırcıoğlu, O., Yıldız, A.B., 2015, Fotovoltaik panelin tek diyotlu eşdeğer devresine ait büyük sinyal analizi, TMMOB Elektrik Mühendisleri Odası Enerji Verimliliği ve Kalite Sempozyumu 2015.
- Kulaksız, A. A. 2007, Maksimum güç Noktası izleyicili ve UVM inverterli fotovoltaik sistemin yapay sinir ağları tabanlı kontrolü. Doktora Tezi, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya, 1-189.
- Kulaksız, A. A., ANFIS-based parameter estimation of one-diode equivalent circuit model of PV modules, *IEEE 12th International Symposium on Computational Intelligence and Informatics*, pp. 415–420, 2011.
- Markvart, T. 2000. *Solar Electricity*, 2nd ed., John Wiley & Sons.
- Masoum, M.A.S, Dehbonei, H., Funchs, E.F. 2002, Theoretical and experimental analysis of photovoltaic systems with voltage and current-based maximum power-point tracking. *IEEE Trans.on Energy Conversion* 17(4): 514–522.
- Mousazadeh H, Keyhani A, Javadi A, Mobli H, Abrinia K, Sharifi A. A review of principle and sun-tracking methods for maximizing solar systems output. *Renew Sustain Energy Rev* 2009;13(8):1800–18.
- Özçalık, H.R, Yılmaz, Ş., Kılıç,E. 2013, Güneş Pilinin Bir Diyotlu Eşdeğer Devre Yardımıyla Matematiksel Modelinin Çıkartılması ve Parametrelerinin İncelenmesi. *KSU Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 16(1),2013.
- Faranda, R, Leva,S., Kılıç,E. 2008, Energy comparison of MPPT techniques for PV Systems. *Wseas Transactions on Power Systems*.
- Omar, F. A., Gökkuş, G. ve Kulaksız, A. A. “Şebekeden bağımsız FV sistemde maksimum güç noktası takip algoritmalarının değişken hava şartları altında karşılaştırmalı analizi”, *Konya Mühendislik Bilimleri Dergisi*, vol. 7, no. 3, pp. 585-594, 2019.
- Radziemska, E, “Dark I-U-T measurements of single crystalline silicon solar cells”, *Energy Conversion and Management*, Vol. 46, pp. 1485–1494, 2005.
- Salas, V., Olías, E., Lázaro, A., Barrado, A. 2005, New algorithm using only one variable measurement applied to a maximum power point tracker. *Solar Energy Materials and Solar Cells* 87(1-4): 675-684.
- Shannan, N. M. A. A., Yahaya N. Z. and Singh, B., Single-diode model and two-diode model of PV modules: a comparison”, 2013 *IEEE International Conference on Control system, Computing and Engineering*, pp. 210-214, 2013.

- Santos, J.L., Antunes, F.L.M. 2003, Maximum power point tracker for PV systems. RIO 3- World Climate & Energy Event, Rio de Janeiro, Brazil, December 1-5.
- Sirdi, N.K.M, Radhi,A., Abarkan,M. 2013, A new VSAS approach for maximum power tracking for renewable energy sources(RES).Energy procedia The Mediterranean Green Energy Forum 2013- MGEF-13, 708-717.
- Smets, A.,Jager, K., Isabella, O., Swaaij, R.V.,Zeman, M., 2004. “Components of PV Systems” in Solar Energy, pp.297-303, 2016.
- Şahin M. E., Okumuş H. İ., 2013, Güneş Pili Modülünün Matlab/Simulink ile Modellenmesi ve Simülasyonu, Cilt 3, Sayı 5, Syf 17-25, Haziran.
- Ürgün, S., Erfidan, T., Çoruh, N., 2008. DA-DA Buck Dönüştürücü Tasarımı ve Gerçeklenmesi, Elektrik-Elektronik-Bilgisayar Mühendisliği Sempozyumu (ELECO 2008), 358-361.
- Yamaçlı, V. and Abacı, K. 2017, Maximum Power Point Tracking in Solar Power Systems by Using Differential Evolution Methods with Embedded Systems. International Journal of Engineering Research and Development 9(3): 163-173.
- X. Li, Q. Wang, H. Wen and W. Xiao, “Comprehensive studies on operational principles for maximum power point tracking in photovoltaic systems”, IEEE Access Special Section on Emerging Technologies for Energy Internet, vol. 7, pp. 121407-121420, 2019.
- Xiao, W. ve Dunford, W.G. 2004. A modified adaptive hill climbing MPPT method for photovoltaic power systems. 35th Annual IEEE Power Electron. Specialists Conf, pp. 1957-1963.
- Zagrouba, M., Sellami, A., Bouaicha, M., Ksouri, M., “Identification of PV solar cells and modules parameters using the genetic algorithms: application to maximum power extraction”, Solar Energy, Vol. 84, pp. 860–866, 2010.