

**KISMİ GÖLGELENME ETKİLERİNİ MODELLEYEBİLEN BİR PV
EMÜLATÖR TASARIMI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Burak ARSEVEN

Danışman

Dr. Öğretim Üyesi Said Mahmut ÇINAR

**ELEKTRİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI YENİLENEBİLİR ENERJİ
SİSTEMLERİ BİLİM DALI**

Haziran 2019

Bu tez çalışması 16.FEN.BİL.33 numaralı proje ile AKÜ BAP birimi tarafından desteklenmiştir.

AFYON KOCATEPE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

KISMİ GÖLGELENME ETKİLERİNİ MODELLEYEBİLEN BİR
PV EMÜLATÖR TASARIMI

Burak ARSEVEN

Danışman
Dr. Öğretim Üyesi Said Mahmut ÇINAR

ELEKTRİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI YENİLENEBİLİR
ENERJİ SİSTEMLERİ BİLİM DALI

Haziran 2019

TEZ ONAY SAYFASI

Burak ARSEVEN tarafından hazırlanan “Kısmi Gölgeleme Etkilerini Modelleyebilen Bir PV Emülatör Tasarımı” adlı tez çalışması lisansüstü eğitim ve öğretim yönetmeliğinin ilgili maddeleri uyarınca 25/06/2019 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından **oy birliği** ile Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü **Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı Yenilenebilir Enerji Sistemleri Bilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Danışman : Dr. Öğretim Üyesi Said Mahmut ÇINAR

Başkan : Prof. Dr. Nurettin ABUT

Kocaeli Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi

İmza



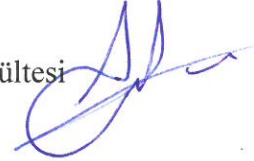
Üye : Dr. Öğr. Üyesi Said Mahmut ÇINAR

Afyon Kocatepe Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi



Üye : Dr. Öğr. Üyesi Emre AKARSLAN

Afyon Kocatepe Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi



Afyon Kocatepe Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun

...../...../..... tarih ve

..... sayılı kararıyla onaylanmıştır.

.....
Prof. Dr. İbrahim EROL

Enstitü Müdürü

BİLİMSEL ETİK BİLDİRİM SAYFASI
Afyon Kocatepe Üniversitesi

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

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

beyan ederim.

25/06/2019

Burak ARSEVEN

İmza



ÖZET
Yüksek Lisans Tezi

**KISMİ GÖLGELENME ETKİLERİNİ MODELLEYEBİLEN BİR PV EMÜLATÖR
TASARIMI**

Burak ARSEVEN

Afyon Kocatepe Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı Yenilenebilir Enerji Sistemleri Bilim Dalı

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Said Mahmut ÇINAR

Güneş panellerinin çıkış karakteristikleri ışınım, sıcaklık, gölgelenme ve yüzey temizliği gibi pek çok parametreden etkilenmektedir. Bu etkileri incelemek için güneş panelleriyle yapılan testlerin aynı şartlarda tekrarlanması ışınım şiddeti ve sıcaklığın olasılıksal değişimleri sebebiyle mümkün olamamaktadır. Ancak güneş paneli gibi davranan emülatörler sayesinde deneylerin aynı şartlarda tekrarı sağlanabilmektedir. Bu tezde güneş panellerinin kısmi gölgelenme etkilerini modelleyebilen bir güneş paneli emülatörü tasarımı gerçekleştirilmiştir. Tasarlanan emülatör üç seri bağlı hücre dizisinden oluşmakta ve toplam 250 W çıkış gücüne sahiptir. Emülatörün hücre dizileri azaltan tip doğru akımdan doğru akıma (DC/DC) dönüştürücü ile gerçekleştirilmiştir. DC/DC dönüştürücülerin kontrolü için 32 bitlik bir mikrodenetleyici geliştirme kartı kullanılmış ve mikrodenetleyicinin aygıt yazılımı MATLAB/Simulink ortamında grafiksel olarak hazırlanmıştır. Ayrıca emülatörün istenilen senaryo ile işletilmesi ve çalışma noktası verilerinin toplanması için LabVIEW ortamında bir ara yüz tasarlanmıştır. Tasarlanan emülatör bu çalışma için oluşturulan beş farklı ışınım ve sıcaklık senaryosuyla test edilmiştir. Elde edilen deneysel sonuçlar, MATLAB/Simulink ortamında alınan simülasyon sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. İstatistiksel analizler deneysel ve simülasyon sonuçlarının örtüştüğünü göstermiştir.

2019, x + 89 sayfa

Anahtar Kelimeler: Emülatör, güneş paneli, kısmi gölgelenme

ABSTRACT
M.Sc. Thesis

AN EMULATOR DESIGN WHICH CAN MODELING THE EFFECTS OF PARTIAL SHADOWING

Burak ARSEVEN

Afyon Kocatepe University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Electrical Engineering - Renewable Energy Systems

Supervisor: Asst. Prof. Said Mahmut ÇINAR

The output characteristics of photovoltaic (PV) panels are affected by many parameters such as radiation, temperature, shading, and surface cleanliness. It cannot possible to repeat the tests with PV panels to examine these effects under the same conditions due to stochastic changes in radiation intensity and temperature. However, thanks to emulators that act like PV panels, experiments can be repeated under the same conditions. In this thesis, we designed a PV panel emulator which can model the partial shading effects of PV panels. The designed PV emulator consists of three series connected cell strings and has a total output power of 250 W. The cell strings of emulator were implemented with DC/DC buck converters. A 32-bit microcontroller development board was used to control the DC/DC converters and the firmware of microcontroller was graphically prepared in MATLAB/Simulink environment. In addition, an interface is designed in LabVIEW environment for operating the emulator with the desired scenario and acquiring the operating point data. The designed emulator was tested with five different radiation and temperature scenarios prepared for this study. The obtained experimental results were compared with the simulation results achieved in MATLAB/Simulink program. Statistical analysis showed that experimental and simulation results overlap.

2019, x + 89 pages

Keywords: Emulator, solar panel, partial shading

TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmasının gerçekleştirilmesi için vermiş oldukları desteklerinden dolayı Afyon Kocatepe Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi'ne, teşekkür ederim (16.FEN.BİL.33).

Bu araştırmanın konusu, deneysel çalışmaların yönlendirilmesi, sonuçların değerlendirilmesi ve yazımı aşamasında yapmış olduğu büyük katkılarından dolayı tez danışmanım Sayın Dr. Öğretim Üyesi Said Mahmut ÇINAR, araştırma ve yazım süresince yardımlarını esirgemeyen görev arkadaşlarım Arş. Grv. Fatih SERTTAŞ ve Arş. Grv. Ardan Hüseyin EŞLİK' e, her konuda öneri ve eleştirileriyle yardımlarını gördüğüm hocalarıma ve arkadaşlarıma teşekkür ederim.

Bu araştırma boyunca maddi ve manevi desteklerinden dolayı en başta eşim Avukat Nur BOZOK ARSEVEN' e, anneme, babama, kardeşime ve eşimin ailesine teşekkür ederim.

Burak ARSEVEN
AFYONKARAHİSAR, 2019

İÇİNDEKİLER DİZİNİ

	Sayfa
ÖZET	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR	iii
İÇİNDEKİLER DİZİNİ.....	iv
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ	vii
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	ix
RESİMLER DİZİNİ	x
1. GİRİŞ	1
2. LİTERATÜR BİLGİLERİ	3
2.1 Fotovoltaik Model.....	3
2.2 Kontrol Stratejisi.....	8
2.3 Güç Dönüştürücüleri.....	11
3. MATERYAL ve METOT	14
3.1 Azaltan Tip DC/DC Dönüştürücüler	14
3.2 Ayarlanabilir Direnç Yüğü	17
3.3 Mikrodenetleyici Geliştirme Kartı.....	20
3.4 Gerilim ve Akım Sensörleri	22
3.5 Grafıksel Kodlama Programı (MATLAB/Simulink).....	23
3.6 Mikrodenetleyici Projesi Yapılandırma Programı (CubeMX)	23
3.7 Gömülü Aygıt Yazılımı Geliştirme Platformu (IAR Embedded Workbench) ..	24
3.8 Grafıksel Veri Toplama ve Arayüz Geliştirme Ortamı (LabVIEW)	25
3.9 Deney Platformunun Donanımsal Tasarımı	25
3.10 Aygıt Yazılımının Tasarımı	27
3.11 Kullanıcı Arayüzü Oluşturulmasında Kullanılan Metot.....	43
3.12 PV Emülatörü Simülasyon Modeli	46
4. BULGULAR	47
4.1 PI Kontrolör Katsayılarının Belirlenmesi	47
4.2 Senaryo 1	55
4.3 Senaryo 2	59
4.4 Senaryo 3	62
4.5 Senaryo 4	66
4.6 Senaryo 5	70

4.7 I-V Karakteristiği.....	74
4.8 Hata Analizleri.....	75
5. TARTIŞMA ve SONUÇ.....	78
6. KAYNAKLAR.....	81
ÖZGEÇMİŞ.....	88

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler

A	Amper
GW	Giga Watt
GΩ	Giga Ohm
V	Volt
Hz	Hertz
kHz	Kilo Hertz
ms	Mili Saniye
mV	Mili Volt
mΩ	Mili Ohm
s	Saniye
V	Volt
W/m ²	Metrekare başına Watt
μs	Mikro Saniye
Ω	Ohm

Kısaltmalar

AC	Alternatif akım (Alternative Current)
ARM	Advanced RISC machines
CCM	Sürekli akım modu (Continuous Current Mode)
CPU	Merkezi işlem birimi (Central Processing Unit)
Cr-Ni	Krom nikel
DC	Doğru akım (Direct Current)
DC/DC	Doğru akımdan doğru akıma
DCM	Süreksiz akım modu (Discontinuous Current Mode)
DTI	Ayrık zamanlı entegratör (Discrete Time Integrator)
GPL	Grafiksel programlama dili
IAE	Mutlak hataların integrali
IDE	Entegre geliştirme ortamı
I-V	Akım-gerilim
LabVIEW	Laboratory virtual instrument engineering workbench
MATLAB	Matrix laboratory
MOSFET	Metal oksit yarı-iletken alan etkili transistör
PI	Oransal entegratör
PID	Oransal integral ve türevsel
PV	Fotovoltaik (PhotoVoltaic)
PWM	Darbe genişlik modülasyonu
RISC	Azaltılmış komut seti bilgisayarı
SMPS	Anahtarlamalı mod güç kaynağı
RMSE	Kök ortalama kare hatası (Root Mean Square Error)
USART	Evrensel senkron alıcı verici
USB	Evrensel seri veriyolu (Universal Serial Bus)
vb.	Ve benzeri
.txt	Text dosyası uzantısı

ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa
Şekil 2.1 Tek diyotlu elektriksel eşdeğer devre modeli	4
Şekil 2.2 Çift diyotlu elektriksel eşdeğer devre modeli	5
Şekil 3.1 DC/DC azaltan tip dönüştürücü devresi.....	15
Şekil 3.2 Ayarlanabilir yük devresi prensip şeması	17
Şekil 3.3 PV emülatörün donanım kısmının genel yapısı	25
Şekil 3.4 PV emülatörün aygıt yazılımı tasarım prosedürüne ait akış diyagramı	28
Şekil 3.5 STM32CubeMX işlemci yapılandırma ekranı görünümü	29
Şekil 3.6 ADC ayarları	30
Şekil 3.7 TIMER 1 ayarları	30
Şekil 3.8 TIMER 2 ayarları	31
Şekil 3.9 TIMER 3 ayarları	31
Şekil 3.10 USART ayarları	32
Şekil 3.11 Simulink programında oluşturulan koda ait bir ekran görüntüsü.....	33
Şekil 3.12 STM32F407VG işlemcisi yapılandırma bloğu	34
Şekil 3.13 'PV Models' fonksiyon bloğu ve zamanlayıcısı	34
Şekil 3.14 Akım sensöründen okunan verilerin dönüştürülmesi.....	34
Şekil 3.15 PV model girişlerine uygulanan ışınım ve sıcaklık değerlerinin üretimi.....	35
Şekil 3.16 Sinir ağı yöntemiyle oluşturulan PV modeller.....	36
Şekil 3.17 ADC değerlerinin matematiksel fonksiyonlara giriş olarak uygulanması ...	37
Şekil 3.18 PI kontrolörlerin ve DTI' ların uygulanması i	38
Şekil 3.19 'PV Models' bloğunun tasarımının son basamağı	38
Şekil 3.20 PWM üretimi için gerekli verilerin elde edilmesi.....	39
Şekil 3.21 PWM değerlerinin üretilmesi	40
Şekil 3.22 ADC değerlerinin üretilmesi	40
Şekil 3.23 USART veri gönderme zamanlayıcısı	40
Şekil 3.24 Veri gönderme görevini üstlenen USART' a yazılan veriler	41
Şekil 3.25 USART birimiyle verilerin işlemciye gönderilmesi	42
Şekil 3.26 USART veri alma bloklarının görünümü.....	42
Şekil 3.27 LabVIEW programı vasıtasıyla tasarlanan kullanıcı arayüzü.....	43
Şekil 3.28 Veri gönderen USART' ın LabVIEW programındaki blok diyagramı.....	44
Şekil 3.29 Veri alan USART' ın LabVIEW programındaki blok diyagramı	44
Şekil 3.30 Arayüzde PV dizisi çıkış değerlerinin elde edilmesi	45

Şekil 3.31 Farklı senaryolarla PV modellerinin simüle edilmesi.....	46
Şekil 4.1 K_p karşılaştırması için PV emülatörü hücrelerine uygulanan ışınım şiddeti değişimi.....	49
Şekil 4.2 Farklı K_p değerleri için PV emülatörü çıkış akımı değişimi	50
Şekil 4.3 Farklı K_p değerleri için PV emülatörü hücre gerilimlerinin değişimi	50
Şekil 4.4 Hücre gerilimlerinin oturma süreleri (Versiyon-I).....	51
Şekil 4.5 K_i karşılaştırması için PV emülatörü hücrelerine uygulanan ışınım şiddeti değişimi.....	52
Şekil 4.6 Farklı K_i değerleri için PV emülatörü çıkış akımı değişimi.....	53
Şekil 4.7 Farklı K_i değerleri için PV emülatörü hücre gerilimlerinin değişimi.....	53
Şekil 4.8 Hücre gerilimlerinin oturma süreleri (Versiyon-II)	54
Şekil 4.9 Senaryo 1 gereği hücrelerin aldıkları ışınımların zamanla değişimi.....	55
Şekil 4.10 Senaryo 1 için deney ve model sonuçlarının karşılaştırılması.....	57
Şekil 4.11 Senaryo 1 için deney ve model güç sonuçlarının karşılaştırılması	58
Şekil 4.12 Senaryo 2 gereği hücrelerin aldıkları ışınımların zamanla değişimi.....	59
Şekil 4.13 Senaryo 2 için deney ve model sonuçlarının karşılaştırılması.....	60
Şekil 4.14 Senaryo 2 için deney ve model güç sonuçlarının karşılaştırılması	61
Şekil 4.15 Senaryo 3 gereği hücrelerin aldıkları ışınımların zamanla değişimi.....	62
Şekil 4.16 Senaryo 3 için deney ve model sonuçlarının karşılaştırılması.....	64
Şekil 4.17 Senaryo 3 için deney ve model güç sonuçlarının karşılaştırılması	65
Şekil 4.18 Senaryo 4 gereği hücrelerin aldıkları ışınımların zamanla değişimi.....	66
Şekil 4.19 Senaryo 4 gereği hücrelerin sıcaklıklarının zamanla değişimi	67
Şekil 4.20 Senaryo 4 için deney ve model sonuçlarının karşılaştırılması.....	68
Şekil 4.21 Senaryo 4 için deney ve model güç sonuçlarının karşılaştırılması	69
Şekil 4.22 Senaryo 5 gereği hücrelerin aldıkları ışınımların zamanla değişim.....	70
Şekil 4.23 Senaryo 5 gereği hücrelerin sıcaklıklarının zamanla değişimi	71
Şekil 4.24 Senaryo 5 için deney ve model sonuçlarının karşılaştırılması.....	72
Şekil 4.25 Senaryo 5 için deney ve model güç sonuçlarının karşılaştırılması	73
Şekil 4.26 Deneysel sonuçlardan ve PV modelinden elde edilen I-V karakteristikleri .	75

ÇİZELGELER DİZİNİ

	Sayfa
Çizelge 4.1 K_p ve K_i değerleri	49
Çizelge 4.2 K_i değerleri	52
Çizelge 4.3 IAE, RMSE ve R^2 değerleri	77

RESİMLER DİZİNİ

	Sayfa
Resim 3.1 Yük anahtarlama devresi kartı	19
Resim 3.2 Yük direnci görünümü	19
Resim 3.3 STM32F4 Discovery geliştirme kartının bir görüntüsü.....	21
Resim 3.4 Emülatörün donanım kısmına ait bir görüntü	26

1. GİRİŞ

Güneş enerjisinden elektrik enerjisi üretiminde birçok yöntem kullanılmaktadır. Bu yöntemlerden bir tanesi olan güneş ışınımından elde ettiği enerjiyi doğrudan elektrik enerjisine çeviren güneş panelleri çok yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. '21. Yüzyıl için Yenilenebilir Enerji Politika Ağı' nın (REN21) 17 Haziran 2018 tarihinde yayınlamış olduğu Küresel Durum Raporu incelendiğinde küresel bazda toplam güneş (PhotoVoltaic-PV) paneli kurulu gücünün 2017 yılı sonu itibari ile 402 GW' a ulaştığı görülmektedir. REN21, 2017 yılı başından sonuna kadarki her bir saatlik dilimde 40.000 adetten fazla PV paneli kurulduğunu yine aynı raporunda (Renewables 2018 Global Status Report) açıkça ifade etmektedir.

PV panelleri yarı iletken hücrelerin seri ve paralel bağlanmasıyla 300W çıkış gücü mertebelerine kadar üretilebilmektedir. Fakat PV panelleri yarı iletken malzemelerden üretildiklerinden dolayı doğrusal olmayan güç üretim karakteristiğine sahiptir. PV panellerinin bu karakteristiklerinden dolayı maksimum güç noktasında işletilmesi panellerden yüksek verim elde edebilmek adına oldukça önemli bir konudur.

Düşük verimli (%20 civarında) PV panellerinden azami verim elde edebilmek için, literatürde en genel kullanımıyla Maksimum Güç Noktası Takibi (MPPT) olarak adlandırılan, kontrol yöntemleri üzerine pek çok akademik çalışma gerçekleştirilmiştir. Güneş enerji sistemlerinde MPPT üzerine gerçekleştirilen çalışmaların birçoğu ya gerçek güneş enerji sistemlerinde ya da bilgisayar ortamında oluşturulmuş olan benzetim ortamlarında test edilmektedir. Ancak güneş ışınımı ve ortam sıcaklığının olasılıksal değişiminden dolayı gerçek güneş enerji sistemlerinde yapılan çalışmalarda bir testin aynı şartlarda tekrarı mümkün olamamaktadır. Söz konusu testlerin gerçek ortamda aynı şartlarda tekrarlanabilmesi için PV paneli gibi davranan ve hem yazılımsal hem donanımsal kısımlardan oluşan emülatör devrelerine ihtiyaç duyulmaktadır.

PV emülatörleri PV modeli, kontrol stratejisi ve güç dönüştürücü sistemi olmak üzere üç ana kısımdan oluşmaktadır. Bu kısımlardan ilki olan PV model tarafından taklit edilecek olan PV panelinin akım-gerilim (I-V) karakteristiği üretilir. Daha sonra belirlenen kontrol

stratejisi PV model tarafından oluşturulmuş olan I-V karakteristiği üzerindeki çalışma noktası belirlenir ve güç dönüştürücüsü sisteminin çalışma noktası için referans sinyali üretilir. Üçüncü ve son kısım olan güç dönüştürücü sisteminde ise belirlenen kontrol stratejisi tarafından alınan referans sinyali takip edilerek gerçek PV modülü ile aynı çıkış oluşturulur.

Bu tez kapsamında PV panelleri üzerine gerçekleştirilen akademik çalışmalarda kullanılacak bir PV emülatörü deney platformu tasarımı gerçekleştirilmiştir. Tasarlanan PV emülatörünün 250W çıkış gücünde ve kısmi gölgelenmeye maruz kalan PV panellerini modelleyebilecek özelliklere sahip olması hedeflenmiştir. PV emülatörünün PV modelleme kısmında yapay sinir ağı yöntemi kullanılmıştır. Emülatörün güç devresi yapısında birbirine seri bağlı üç tane azaltan tip DC/DC dönüştürücü kullanılmıştır ve bu dönüştürücülerin kontrolü STM32F4 Discovery mikrodenetleyici geliştirme kartına gömülen aygıt yazılımı ile gerçekleştirilmiştir. Ayrıca emülatörün işletileceği ışınım ve sıcaklık veri setlerinin aygıt yazılımına gönderilmesini ve emülatörden dönüştürücülere ait çalışma noktası verilerinin toplanması görevlerini yerine getiren bir arayüz tasarımı da gerçekleştirilmiştir.

Tasarımı gerçekleştirilen PV emülatörü bu tez için özel tasarlanmış ışınım ve sıcaklık veri setlerini barındıran senaryolarla test edilmiştir. Senaryolarda ışınım ve sıcaklık veri değerlerinin ani artış ve düşüş sergilediği veri setlerinin yanı sıra rampa ve sinüs formunda yavaş değişim gösteren veri setlerine de yer verilmiştir. Böylece PV emülatör çıkış karakteristiğinin gerçek bir PV paneli çıkışını ne kadar yansıtabildiği test edilmeye çalışılmıştır. Gerçekleştirilen deneylerde elde edilen sonuçlar tasarımı gerçekleştirilen PV emülatörünün simülasyon sonuçlarıyla çok benzer karakteristik sergilediğini ortaya koymuştur.

2. LİTERATÜR BİLGİLERİ

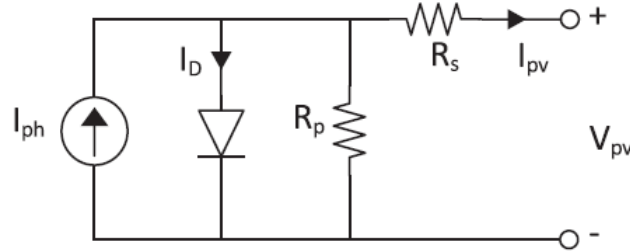
Güneş enerjisinin yetkin bir enerji kaynağı olduğu kanıtlandıktan ve uluslararası çevrelerce kabul gördükten sonra güneş enerjisinden elektrik enerjisi üretimi konusunda yapılan bilimsel çalışmalar oldukça artmıştır ve konu halen daha popülerliğini korumaktadır. Bu bağlamda PV emülatörler üzerine yapılmış çalışmalar incelendiğinde giriş kısmında da bahsedildiği üzere literatür araştırmasını PV model üzerine yapılan çalışmalar, kontrol stratejisi üzerine yapılan çalışmalar ve güç dönüştürücüleri üzerine yapılan çalışmalar olmak üzere üç grupta incelemek mümkündür. Aşağıda üç ana başlık altında literatürde yer alan çalışmaların bir özeti sunulmaktadır.

2.1 Fotovoltaik Model

Fotovoltaik emülatörlerin vazgeçilmez unsurlarından biri olan fotovoltaik model kısmı, taklit edilecek olan fotovoltaik modülün I-V grafiğinin oluşturulduğu kısımdır. Fotovoltaik model üzerine yapılmış olan çalışmalar dikkatlice incelendiğinde konunun fotovoltaik modelin tipinin belirlenmesi ve belirlenen modelin uygulanması ana başlıkları etrafında toplandığı söylenebilir (Ayop ve Tan 2017). Fotovoltaik model tiplerini elektrik devresi modeli ve enterpolasyon modeli olmak üzere iki ana başlık altında toplamak mümkündür.

Literatürdeki diğer bir ismi analitik model olan ve PV emülatörlerde yer alan PV model kısmında yaygın bir şekilde kullanılan elektrik devresi modeli isminden de anlaşılacağı üzere bir elektrik devresi şeklinde gösterilebilen PV modül modellemesidir. Burada elektrik devresine indirgenen PV modülün Kirchoff' un akım yasası kullanılarak karakteristik denklemi türetilmiştir (Piazza ve Vitale 2012). Elektrik devresi modeli çıkarılırken elektrik devresinde kullanılan diyot sayısına göre tek diyotlu ve çift diyotlu olmak üzere iki tip elektrik devresi modeli vardır. Şekil 2.1'de verilmiş olan tek diyotlu elektrik devresi modelinin literatürde sıkça kullanılan diğer isimleri devrede yer alan devre elemanlarına atfen seri ve paralel dirençli tek diyot modeli, devre elemanlarının sayısı ve kısaltmalarının kullanıldığı 1D2R modeli ve parametre sayısına atfen beş parametre modeli olarak sıralanabilir (De Blas *et al.* 2002, Lee *et al.* 2009, İçkilli vd.

2012, Tang *et al.* 2012, Cubas *et al.* 2014, Balakishan and Sandeep 2014, Agrawal and Aware 2016).



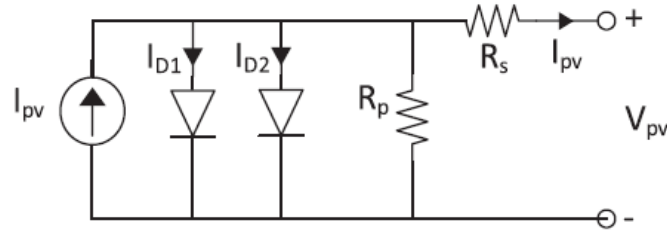
Şekil 2.1 Tek diyotlu elektriksel eşdeğer devre modeli

Tek diyotlu elektriksel eşdeğer devre modeline ait denklem, Denklem 2.1’ de verilmiştir (Gow and Manning 1999).

$$I_{pv} = I_{ph} - I_s \left[e^{\frac{V_{pv} + I_{pv} R_s}{AV_T}} - 1 \right] - \frac{V_{pv} + I_{pv} R_s}{R_p} \quad (2.1)$$

Denklemin sol kısmında yer alan I_{pv} PV modülün akım değerini temsil etmektedir. Sağ kısmında yer alan I_{ph} ışınım tarafından oluşturulan akım olan foto akım değerini, I_s doyma akımı değerini, V_{pv} PV modülün gerilim değerini, R_s Şekil 2.1’de yer alan devredeki direncin değerini, R_p yine Şekil 2.1’de yer alan devredeki diyoda paralel bağlı olan direncin değerini ve A diyot kalite faktörünü temsil etmektedir.

Şekil 2.2’de verilmiş olan çift diyotlu elektrik eşdeğer devresi modelinin ise literatürde sıkça kullanılan diğer isimleri devrede yer alan devre elemanlarına atfen seri ve paralel dirençli çift diyot modeli, devre elemanlarının sayısı ve kısaltmalarının kullanıldığı 2D2R modeli ve parametre sayısına atfen sekiz parametre modeli olarak sıralanabilir (De Soto *et al.* 2006, Midtgard 2007, Chowdhury *et al.* 2008, Ishaque *et al.* 2011, Attivissimo *et al.* 2012, Atoche *et al.* 2015).



Şekil 2.2 Çift diyotlu elektriksel eşdeğer devre modeli.

Çift diyotlu elektriksel eşdeğer devre modeline ait denklem, Denklem 2.2’de verilmiştir.

$$I_{pv} = I_{ph} - I_{s1} \left[e^{\frac{V_{pv} + I_{pv} R_s}{AV_T}} - 1 \right] - I_{s2} \left[e^{\frac{V_{pv} + I_{pv} R_s}{AV_T}} - 1 \right] - \frac{V_{pv} + I_{pv} R_s}{R_p} \quad (2.2)$$

Tıpkı tek diyotlu elektriksel devre modelinde olduğu gibi denklemin sol kısmında yer alan I_{pv} PV modülün akım değerini ve sağ kısmında yer alan I_{ph} ışınım tarafından oluşturulan akım olan foto akım değerini, I_s doyma akımı değerini, V_{pv} PV modülün gerilim değerini, R_s Şekil 2.1’de yer alan devredeki diyoda seri bağlı olan direncin değerini, R_p yine Şekil 2.1’de yer alan devredeki diyoda paralel bağlı olan direncin değerini, A diyot kalite faktörünü temsil etmektedir. Bunlara ek olarak yapısında iki adet diyot barındırmasından mütevellit I_{s1} ve I_{s2} olmak üzere iki adet doyma akımı değeri denklemde yer almaktadır.

Bu iki elektriksel eşdeğer devresi modelinden tek diyotlu elektrik devresi modeli sadeliği ve doğruluğu sebebiyle emülatörlerde daha sıkça kullanılmaktadır (Arseven ve Çınar 2017, Lee *et al.* 2009, Koran *et al.* 2010, Tang *et al.* 2012, Agrawal ve Aware 2012, İçkili vd. 2012, Chen *et al.* 2013, Xenophontos *et al.* 2014, Balakishan ve Sandeep 2014). Çift diyotlu elektrik devresi modelinin kullanıldığı emülatör yapıları da bulunmaktadır (Midtgard 2007, Atoche *et al.* 2015).

PV enterpolasyon modeli, emülatör yapılarındaki PV modeli üretmekte kullanılan bir diğer yöntemdir. Enterpolasyon modeli en genel ifadesiyle kısa devre akım değeri ile açık devre gerilim değerinin kesişiminin matematiksel fonksiyon olarak ifade edilmesi mantığıyla oluşturulmaktadır (Ayop ve Tan 2017).

Enterpolasyon modelini oluşturabilmek için PV modülün I-V karakteristiği üzerindeki bazı özel noktalara ve ekstra bazı diğer değerlere ihtiyaç vardır. Bunun için genellikle standart test koşullarındaki açık devre gerilimi ve kısa devre akımı değerlerini içeren ortak nokta seçilmektedir. Standart test koşullarından kasıt, ışıınım değerinin 1000 W/m^2 ve sıcaklık değerinin 25°C olduğu koşullardır. Khouzam ve Hoffman (1996) 'ın yaptıkları çalışmada standart test koşulları olarak PV modülün açık devre gerilimi, kısa devre akımı, azami güç noktasındaki gerilim ve akım değerlerini belirlemişler, sıcaklık katsayıları olarak kısa devre akımının sıcaklık katsayısını (K_{ii}) ve açık devre geriliminin sıcaklık katsayısını (K_{iv}) kullanmışlar, ek olarak seri bağlı direncin değerinin gerekli olduğu modelin girişine PV modülün gerilim, ışıınım ve sıcaklık değerlerini vermişler ve model çıkışından PV modülün akım değerini elde etmişlerdir. Gonzalez-Llorente vd. (2016) da standart test koşulları olarak PV modülün açık devre gerilimi, kısa devre akımı, azami güç noktasındaki gerilim ve akım değerlerini belirlemişler, sıcaklık katsayıları olarak K_{ii} ve K_{iv} değerlerini kullanmışlar, başka herhangi bir değere gereksinim duymadan modelin girişine PV modülün gerilim, ışıınım ve sıcaklık değerlerini vermişler ve model çıkışından PV modülün akım değerini elde etmişlerdir.

PV emülatörlerinde güç dönüştürücü birimlerinin çalışma noktaları kontrol birimi tarafından işletilen bir PV modelle üretilir. Eğer işletilen PV modelin yapısında karmaşık matematiksel denklemler var ise bu kontrol birimi işlemcisini oldukça zorlar ve bunun sonucunda referans noktasının üretilmesi işlemi gecikebilir. Bu nedenle, kontrol biriminin kapasitesine ve PV modelin karmaşıklığına bağlı olarak uygun yöntemin seçilmesi, işlem yükünün azaltılması ve güç dönüştürücülerinin çalışma noktalarının hızlı biçimde belirlenmesi açısından oldukça önemlidir.

Doğrudan hesaplama yöntemi, PV modelin doğrudan emülatörün kontrol birimine uygulanması yöntemidir ve bu yöntem genellikle yapısı gereği fazla matematiksel denklemin olmadığı PV model olarak tek diyotlu elektriksel devre modeli ile birlikte kullanılmaktadır (Vijayakumari *et al.* 2012, İçkili vd. 2012, Erkaya vd. 2015, Patel ve Rana 2016). Yine Abbes vd. (2014) çalışmalarında tek diyotlu elektriksel devre modeline nazaran daha karmaşık olmasına rağmen çift diyotlu elektriksel devre modelini kullanmış

olmalarına rağmen modelin PV emülatöre uygulanması noktasında doğrudan hesaplama yöntemini kullanmışlardır.

PV modelin uygulanmasıyla ilgili yaygın bir kullanıma sahip diğer bir yöntem de arama tablosu yöntemidir. Arama tablosu yönteminde giriş değerine karşılık elde edilen çıkış değeri ile PV emülatörün kapalı çevrim dönüştürücü sistemi için referans sinyali üretilir. Bu yöntem en temelde akım-gerilim ve gerilim-akım arama tablosu olmak üzere iki tiptir. Akım-gerilim arama tablosu yönteminde PV modülün gerilim değeri tablonun girişi, akım değeri ise çıkışıdır (Zhao ve Kimball 2012, Weichao ve Kimball 2016). Buna karşılık gerilim-akım arama tablosu yönteminde PV modülün akım değeri tablonun girişi, gerilim değeri ise çıkışıdır (Gadelovits *et al.* 2014). Yuan vd. (2009) ise bu iki arama tablosu yönteminden farklı olarak hem akım-gerilim hem de gerilim-akım tablolarını kullanarak referans sinyalini ürettirmişlerdir.

PV modelin kontrol birimine uygulanmasında kullanılan başka bir yöntem de parçalı doğrusal yöntemdir. En temelde, parçalı doğrusal model, PV modülün I-V karakteristik eğrisini takip eden çoklu şekilde bölümlenmiş düz çizgiler kullanarak eğri adaptasyon işlemidir (Ayop ve Tan 2017). Bu yöntem genellikle yöntemin uygulanması için gereken asgari çizgi sayısına da eşit olan iki adet doğrusal çizgiden oluşur (Martin-Segura *et al.* 2007, Masashi *et al.* 2012). Lu ve Nguyen (2012) ise PV modelin doğruluğunu artırmak adına ikiden daha fazla doğrusal çizgiden oluşan parçalı doğrusal yöntem geliştirmişlerdir.

PV modeli oluşturulmasında başvurulan bir diğer yöntem yapay sinir ağı yöntemidir. Bu yöntemde ilk olarak modellenecek olan PV paneline ait I-V karakteristik eğrisi verileri çevrim dışı olarak yapay sinir ağını eğitmekte kullanılır. Genel olarak I-V karakteristik eğrisi verileri ya deneysel işlemler sonucunda (Gomez-Castaneda *et al.* 2014) ya da elektrik devresi PV modelinden (Di Piazza *et al.* 2010) farklı yüklerde, ışınımlarda ve sıcaklıklarda elde edilir. Eğitimi yapılan yapay sinir ağının PV modeli kontrol birimi için gerekli çalışma noktasını üretmekte kullanılır.

Bu tez kapsamında yapay sinir ağı ile PV modelleme yöntemi tercih edilmiştir. Yapay

sinir ağını eğitmek için kullanılan veriler MATLAB/Simulink ortamında deneysel olarak farklı ışınım ve sıcaklıklar için elde edilmiştir. Söz konusu yapay sinir ağı PV ıkış akımı, ışınımı ve yüzey sıcaklığı girişleriyle PV gerilimi çıkışı olmak üzere üç giriş ve bir çıkışa sahiptir. Ağın eğitimi, testi ve doğrulaması MATLAB/Neural Network Toolbox yazılımında yapılmıştır. PV modellemede yapay sinir ağı yöntemini kullanmakla ağın işletildiği işlemcinin hesaplama yükü azaltılabilmifitir. Bu sayede işlemcinin çalışma noktası üretme süresi de kısaltılabilmifitir.

2.2 Kontrol Stratejisi

Kontrol stratejisi PV emülatörün kontrol biriminde işletilen bir algoritmayla sağlanmaktadır. Kontrol biriminde PV modeli tarafından oluşturulan çalışma noktasında g dönüştürücüsünü işletecek kontrol sinyalleri üretilmektedir.

Doğrudan referanslama yöntemi olarak bilinen kontrol stratejisinde akım modu ve gerilim modu kontrollü olmak üzere iki türü bulunmaktadır. Akım modu kontrollü PV emülatörün çıkış gerilim PV modelinin girişine de bağlanır. Başlangıçta ıkış geriliminin değeri sıfırdır ve belirli bir ışınım ve sıcakta PV modeli kısa devre akımına eşit olan referans akım sinyali üretilir. Daha sonra çıkış geriliminin değeri artmaya başladığıca referans akım değeri I-V karakteristik eğrisini takip edecek şekilde azalmaya başlar ve sonunda I-V karakteristik eğrisindeki çıkış gerilimi ve çıkış akımı değerlerini barındıran noktada PV emülatörü sabit bir çalışma noktasına ulaşır (Agrawal ve Aware 2012, Abbas *et al.* 2014). Gerilim modu kontrollü PV emülatörün çıkış akımı PV modelin girişine bağlanır. Başlangıçta ıkış akımının değerleri sıfırdır ve belirli bir ışınım ve sıcaklıkta PV modeli açık devre gerilimine eşit olan referans gerilim sinyali üretilir. Daha sonra çıkış akımının değerleri artmaya başladığıca referans gerilim değerleri I-V karakteristik eğrisini takip ederek azalmaya başlar ve sonunda I-V karakteristik eğrisindeki çıkış akımı ve çıkış gerilimi değerlerini barındıran noktada PV emülatörü sabit bir çalışma noktasına ulaşır (Martin-Segura *et al.* 2007, Di Piazza *et al.* 2010, Masashi *et al.* 2012, Algaddafi *et al.* 2015).

Hibrit mod kontrollü yöntemi uygularken ya tek kaynak ya da çift kaynak kullanılır. Tek

kaynaklı hibrit mod kontrollü yöntem sadece bir güç dönüştürücüsünü kullanırken çift kaynaklı hibrit mod kontrollü yöntem bir gerilim kaynağı ve bir akım kaynağından oluşan iki güç dönüştürücüsünü kullanır.

Yuan vd. (2009) tarafından önerilen tek kaynaklı hibrit mod kontrollü yöntemde anahtarlamalı mod güç kaynağı kullanılır. PV emülatör ve hibrit mod kontrollü yöntem tek bir anahtarlamalı mod güç kaynağı kullanır. Güç dönüştürücüsü çalışma noktası oransal entegratör (PI) denetleyicisi kullanılarak kontrol edilir. PV emülatörü, akım-gerilim, gerilim-direnç ve gerilim-akım tablolarından oluşan üç arama tablosu kullanır. PV panelinin I-V karakteristik eğrisi, analitik işlemle elde edilen R_I ve R_V olmak üzere iki direnç noktasına bölünür (burada; $R_I < R_V$). Bu sayede PV panelinin I-V karakteristik eğrisi üç bölüme ayrılmış olur. İlk bölüm sabit akım bölgesi olarak nitelendirilir ve çıkış direnci R_I değerinin altında kaldığı duruma karşılık gelir. Bu bölgede kontrol stratejisi referans akımı elde etmek için akım-gerilim tablosunu kullanır. Sabit akım bölgesinde çalışan PV emülatörü akım mod kontrollü, yani sürekli akım modunda (continuous current mode-CCM) işletimde demektir. Eğer çıkış direnci R_V değerinin üzerinde ise bu kez PV emülatörü gerilim mod kontrollü, yani sürekli gerilim modunda (continuous voltage mode-CVM) işletimde demektir. Çıkış direncinin değeri R_I ve R_V değerlerinin arasında ise sabit gerilim ve akım bölgelerinin arasında kalan MPP bölgesi olarak değerlendirilmektedir.

Kim vd. (2013) tarafından önerilen çift kaynaklı hibrit mod kontrollü yöntemde doğrusal gerilim ve akım regülatörü kullanılır. Yüke paralel bağlanan bu iki regülatör iki ayrı oransal integral ve türevsel (PID) kontrolörü kullanılarak kontrol edilir ve aralarında yumuşak bir geçiş temin edebilmek adına iki regülatöre ayrı ayrı seri birer diyot bağlanır.

Tepe tırmanma yönteminde PV emülatör çalışmaya başladığında çıkış gerilimi (V_o) ve akımı (I_o) değerleri ölçülür. Ölçülen çıkış gerilimi, ışınım ve sıcaklık değerleri kullanılarak PV emülatörün akım değeri olan I_{pv} değeri hesaplanır. I_{pv} değeri ve I_o karşılaştırılır ve I_{pv} değeri I_o değerinden büyükse I_o değeri arttırılır. I_o değerini arttırmak için darbeleme oranını (D) arttırılır ve dolayısıyla V_o değeri arttırılmış olur (Erkaya *et al.* 2015, Gonzalez-Llorente *et al.* 2016). I_{pv} değeri I_o değerinden küçükse yukarıdaki

işlemlerin tam tersi uygulanır. Doğrudan referanslama yönteminden farklı olarak, tepe tırmanma yöntemi daha kararlı bir çıktı üreten sabit bir basamak boyutu kullanır (Ayop ve Tan 2017).

Tepe tırmanma yöntemi, basit bir yapıya sahip olması hasebiyle sıkça kullanılan yöntemlerden birisidir. Çalışma detayı için; ilk olarak panel çıkış gücü ve yükün olduğu taraftaki çıkış gücü değeri akım ve gerilim değerlerinden yararlanılarak hesaplanır ve karşılaştırılır. Sonra referans alınan gerilim değeri belirlenen miktar oranında azaltılır ya da artırılır, ta ki azami güç noktasına ulaşıncaya kadar salınımlar yaparak işlem devam eder (Tafticht *et al.* 2008).

Değiştir ve gözle yönteminde, D değerini doğrudan arttırmak yerine bir PI kontrolörü kullanılır. Tepe tırmanma yöntemine benzer şekilde; I_{pv} değeri I_o ' dan büyükse, referans akım değeri (I_{ref}), I_{pv} değerini adım büyüklüğü ($I_{adım}$) kadar azaltır, I_{pv} değeri I_o ' dan küçükse, I_{ref} , I_{pv} değerini adım büyüklüğü kadar artırılır (Özden *et al.* 2016).

Direnç karşılaştırma yöntemi en temelde çıkış gerilim değerinin çıkış akım değerine bölünmesi ile bulunan çıkış direnci değeri (R_o) ile PV modülün gerilim değerinin akım değerine bölünmesi ile elde edilen PV direnç (R_{pv}) değerinin karşılaştırılması mantığına dayanır (Qingrong *et al.* 2002, Rana ve Patel 2013).

Bu tez kapsamında kontrol stratejisi olarak doğrudan referanslama yöntemi tercih edilmiştir. Başlangıçta PV emülatör çıkışı açık devre yapılarak akım sıfırda tutularak azaltan tip DC/DC dönüştürücülerin çıkış gerilimleri açık devre gerilimi değeri olan V_{OC} değerine ayarlanmıştır. Ardından çıkışa bağlanan yük tarafından çekilen akım değeri (I_{PV}) yapay sinir ağına gönderilir. Yapay sinir ağı bu akım değeri, ışınım ve sıcaklığa karşılık gelen çalışma noktası gerilimi olan V_{PV} değerini üretir. Bu gerilim değeri aynı zamanda tasarlanan PV emülatörünün yapısında yer alan PI kontrolörün çalışma noktası referansı olan V_{REF} değerine karşılık gelmektedir. V_{PV} ve V_{REF} değerlerinin farkından yararlanarak hata (e) belirlenir. Hatanın değerine bağlı olarak PI kontrolör bir çıkış üretir ve Bu çıkış kontrolörün çıkışındaki bir entegratörde saklanır. Entegratör çıkışı sıfır ile yüz arasında ölçeklemiştir ve bu çıkış PWM darbeleme oranı (D) girişlerine bağlanmıştır.

Kontrolörlerin çıkışında değiştirilen darbeleme oranıyla dönüştürücü çıkış gerilimi (V_o) kontrol edilmiştir.

2.3 Güç Dönüştürücüleri

Güç dönüştürücüleri, emülatörün kontrol biriminden aldıkları referans sinyalini takip ederek gerçek PV modülü ile aynı çıkışı oluştururlar. En genelde, PV emülatör uygulamalarında kullanılan üç tür güç dönüştürücünün varlığından söz edilebilir (Ayop ve Tan 2017).

PV emülatör yapılarında yer alan güç dönüştürücü kısımlarında anahtarlama mod güç kaynağı (switching mode power supply-SMPS) sıkça kullanılır. Güç dönüştürücünün güç anahtarı kesim bölgesinde ya da doyum bölgesinde çalıştığından, anahtarda meydana gelen güç kaybı oldukça düşüktür. Bu durum doğal olarak PV emülatörün verimini artırmaktadır. Darbeleme oranı (D) ayarlanarak anahtarlama mod güç kaynağının çıkış gerilimi rahatlıkla kontrol edilebilir. Dönüştürücünün güç anahtarını kontrol etmek için darbe genişlik modülasyonu (Pulse Width Modulation-PWM) diye adlandırılan bir yöntem kullanılır (Ayop ve Tan 2017).

Bugüne kadar yapılan çalışmalarda anahtarlama mod güç kaynağının uygulandığı emülatörler incelendiğinde, birçok topoloji ile karşılaşılmaktadır. Bu topolojiler arasında azaltan tip dönüştürücüler, giriş geriliminin çıkıştan ya da PV açık devre geriliminden yüksek olduğu ve dönüştürücü çıkış geriliminin I-V karakteristiği üzerindeki birçok noktayı kapsamasından dolayı sıkça tercih edilmiştir (Koutroulis *et al.* 2009, Koran vd. 2010, Di Piazza *et al.* 2010). Azaltan-artıran ve iki kadranlı dönüştürücüler ise giriş geriliminin I-V karakteristiği değerlerinden küçük olduğu durumlarda tercih edilen diğer topolojiler olarak göze çarparlar (Lu ve Nguyen 2012, Cordeiro *et al.* 2015). Chavarria vd. (2014) iki çalışmada şebekeye bağlı PV invertör sistemini test etmek amacıyla kullandıkları PV emülatöründe artıran tip dönüştürücüye yer vermişlerdir.

Dönüştürücü topolojilerinden başka PV emülatörü tasarımında programlanabilir güç kaynaklarının kullanımı da göze çarpmaktadır. Programlanabilir güç kaynağı uygulaması

diğer güç dönüştürücülerinin uygulanmasına nazaran daha kolaydır. Çünkü programlanabilir güç kaynaklarında dönüştürücü denetimini gerçekleştiren gömülü kontrol birimleri bulunmasından dolayı herhangi bir başka dönüştürücü kontrolörü kullanımına gereksinim duyulmaz. Programlanabilir güç kaynağı uygulamasının gerçekleştirilebilmesi için tek ihtiyaç duyulan bileşen PV panelinin I-V karakteristiği sinyalin üretecek olan PV modeldir. PV modeli oluştururken üstün performanslı bir bilgisayar programına ihtiyaç duyulur. Diğer programlama dillerine kıyasla daha hızlı bir şekilde işlem gerçekleştirebilme yeteneğine ve üst düzey grafik seviyesine sahip LabVIEW (Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench) programı kullanılabilir (Bernal 2012). Ayrıca LabVIEW programı 'Sandia PV Veritabanı' diye adlandırılan 284 adet PV panel karakteristiğinin yer aldığı bir veritabanı sunarak, kullanıcıların PV modellerinin doğruluğunu test edebilmeleri noktasında kullanıcılara büyük bir avantaj sağlar (Durago 2011). Yine Matrix Laboratory (MATLAB) ile entegre bir şekilde çalışan Simulink programı da programlanabilir güç kaynağı için PV modelin üretilmesi noktasında başvurulabilecek diğer bir yüksek performanslı bilgisayar programıdır (Ebrahim *et al.* 2015).

LabVIEW veya MATLAB programlarında oluşturulan sinyalin programlanabilir güç kaynağına gönderilmesi için iletişim arayüzüne ihtiyaç vardır. Eğer TDKLambda gibi bir programlanabilir güç kaynağı tercih edilmiş ise yapısında iletişim arayüzü barındırmasından dolayı herhangi bir başka iletişim arayüzüne ihtiyaç duyulmaz (Bhise *et al.* 2012).

Yarıkkaya ve Çınar (2015) ise yapmış oldukları çalışmada programlanabilir bir güç kaynağının yanı sıra kendi tasarımları olan bir emülatör kartı ile aynı güneş panelini taklit eden iki farklı emülatör tasarlamıştır. Yaptıkları deneyler sonucunda kendi tasarımları olan emülatör kartının programlanabilir güç kaynağına nazaran daha iyi sonuç verdiğini gözlemlemişlerdir.

Doğrusal regülatörler, giriş gerilimini azaltarak çıkış gerilimini düzenlerler. PV emülatör yapılarında yer alan güç dönüştürücü kısmında doğrusal regülatör kullanımı için iki yol vardır. Bunlardan ilki doğrusal regülatör entegre devresini kullanarak uygulamaktır (Kim

et al. 2013, Soetedjo *et al.* 2015). Doğrusal regülatörün uygulanmasının ikinci yolu ise güç transistörü kullanmaktır. Schofield vd. (2011) çalışmalarında güç transistörü olarak bipolar eklem transistörünü (bipolar junction transistor-BJT) kullanırlarken, Jin ve Zhang (2016) ise kontrolünün daha kolay olması gerekçesiyle metal oksit yarı-iletken alan etkili transistör (Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor-MOSFET) kullanmışlardır.

Tez kapsamında güç dönüştürücüsü olarak azaltan tip DC/DC dönüştürücü kullanılmıştır. Bu dönüştürücüde güç anahtarı olarak bir MOSFET kullanılmıştır. Güç anahtarının denetimi STM32F4 Discovery geliştirme kartında üretilen PWM sinyali ile gerçekleştirilmiştir. Güç anahtarı kapı devresi ile STM32 PWM bacağı arasına elektriksel yalıtım yapması için bir optik izolatör bağlanmıştır. Bu sayede güç devresinde olası yüksek gerilim darbelerinin mikro denetleyici tarafına geçip zarar vermesi de engellenmiştir. Ayrıca DC/DC dönüştürücü giriş ve çıkışlarında MOSFET'in anahtarlama gürültülerinden sistemin etkilenmesini önlemek için filtre elemanları kullanılmıştır. PV emülatörü 250 W gücünde ve üç PV hücresi dizisinden oluşan bir PV panelini modelleyebilecek şekilde tasarlandığından söz konusu PV panelinin üç hücre dizisini temsilen üç DC/DC dönüştürücü birbirine seri bağlanarak kullanılmıştır.

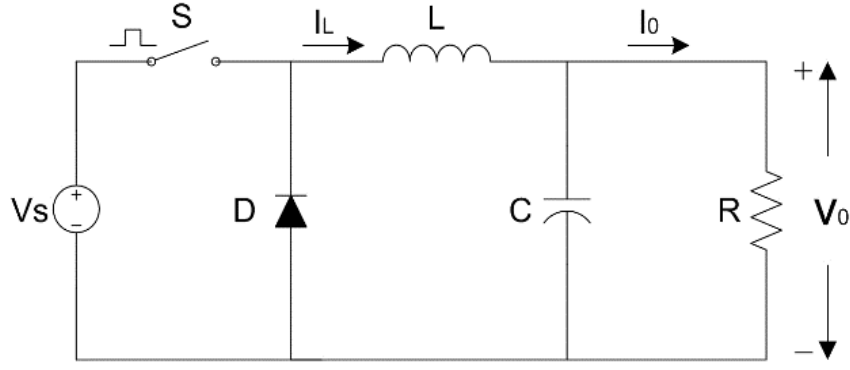
3. MATERYAL ve METOT

Bu bölümde ilk olarak tez kapsamında kullanılan materyallerden azaltan tip DC/DC dönüştürücü, ayarlı direnç yükü, mikrodenetleyici geliştirme kartı, gerilim ve akım sensörleri ile geliştirme kartını programlamakta kullanılan yazılımlar hakkında ayrıntılı bilgiler verilecektir. Ardından tez konusu olan PV emülatörünün modellenme yöntemi ve uygulanan kontrol stratejisi hakkında detaylı bilgiler sunulacaktır. Son olarak PV emülatörünün testinde kullanılan senaryolardan elde edilen sonuçların karşılaştırılmasında kullanılan PV emülatörün simülasyon modeli hakkında bilgiler verilmiştir.

3.1 Azaltan Tip DC/DC Dönüştürücüler

DC/DC dönüştürücüler bir doğru gerilim değerini başka bir doğru gerilim değerine dönüştüren devre yapılarıdır. Bir kaynaktan, sabit veya değişken bir yük için ayarlanmış bir gerilim üretmek için yaygın olarak kullanılmaktadırlar. DC/DC dönüştürücülerin avantajları arasında genellikle doğrusal regülatörlere göre çok daha verimli olmaları ve boyutlarının daha küçük olmaları sayılabilmektedir. Dezavantajları ise elektriksel gürültülerinin çok olması ve karmaşık yapılarıdır. DC/DC dönüştürücüler çalışma prensiplerine ve topolojilerine göre çok sayıda çeşidi bulunmakla birlikte en çok bilinen üçü; azaltan (buck), artıran (boost) ve azaltan-artıran (buck-boost) dönüştürücülerdir.

Azaltan tip DC/DC dönüştürücüler doğru gerilim girişini (V_s) daha düşük seviyede bir çıkış gerilimine (V_o) dönüştüren devrelerdir (Şekil 3.1). Azaltan tip dönüştürücülerin DC motor hız kontrolü, ayarlı çıkış üreten güç kaynakları gibi uygulamaları bulunmaktadır. Güç biriminde yer alan DC/DC dönüştürücülere ait prensip şeması Şekil 3.1' de verilmektedir.



Şekil 3.1 Azaltan tip DC/DC dönüştürücü devresi prensip şeması.

Azaltan tip DC/DC dönüştürücü çıkış geriliminin darbeleme oranı (D) cinsinden ifadesi aşağıda Denklem 3.1' de verilmiştir.

$$V_0 = \frac{1}{T_S} \int_0^{T_S} V_0(t) \cdot dt = \frac{1}{T_S} \left(\int_0^{t_{on}} V_S \cdot dt + \int_{t_{on}}^{T_S} 0 \cdot dt \right) = \frac{t_{on}}{T_S} \cdot V_S = D \cdot V_S \quad (3.1)$$

burada;

V_S : Dönüştürücü giriş gerilimini, [V],

V_0 : Dönüştürücü çıkış gerilimini, [V],

T_S : Periyodu, [s],

t_{on} : Anahtarın açık kalma süresini, [s] ve

D : Darbeleme oranını [%]

ifade etmektedir.

Dönüştürücü anahtarlama elemanının (S) darbeleme oranı (D) değiştirilerek dönüştürücü çıkış gerilimi doğrusal kontrol edilebilir. Dönüştürücü çıkışına bağlanacak olan yükün tipi (direnç, bobin veya kondansatör) anahtarlama elemanının anahtarlama verimini ve ömrünü dorudan etkilemektedir. Örneğin direnç yükleri dahi çok küçükte olsa bobin özelliği gösterebilmekte ve bobinde depolanan enerji anahtarlama elemanını olumsuz etkileyebilmektedir. Ayrıca anahtarlama frekansına bağlı olarak çıkış gerilimde sıfır ile giriş gerilimi tepe değeri (V_S) arasında dalgalanmalar olabilmektedir. Bu

dalganmalardan kurtulabilmek için dönüştürücü çıkışına, kesme frekansı (f_c) anahtarlama frekansından (f_s) çok düşük değerlere ayarlanan alçak geçiren filtre devreleri eklenir ve böylece anahtarlama frekansından dolayı oluşan dalganmalar yok edilebilir. Söz konusu filtre devresi Şekil 3.1’de verilen bobin ve kondansatör elemanlarından oluşmaktadır.

Azaltan tip DC/DC dönüştürücüler sürekli akım modu (Continuous Current Mode-CCM) veya süreksiz akım modu (Discontinuous Current Mode-DCM) durumlarında işletilebilmektedir. Bu tez kapsamında tasarımı gerçekleştirilen dönüştürücüler CCM durumunda işletilmiştir. CMM durumunda devredeki bobinden sürekli akım akmaktadır. Anahtar iletimde iken devredeki serbest geçiş diyodu ters yönde öngerilimlenir ve diyot kesimdedir. Bu durumda bobin üzerinde giriş gerilimi ile çıkış geriliminin farkı kadar bir gerilim endüklenir ($V_L = V_S - V_0$). Anahtar kesime gittiğinde bobinde depolanan enerji diyodu doğru yönde öngerilimler ve diyot iletime geçer. Böylece bobinde depolanan enerji sayesinde yükten akan akım, bobinde anahtarın iletim durumunda endüklenen gerilime zıt yönde bir gerilim endüklenir ($V_L = -V_0$). Bobinde endüklenen gerilimin ifadesi aşağıda Denklem 3.2’ de verilmiştir.

$$\int_0^{T_s} V_L \cdot dt = \int_0^{t_{on}} V_L \cdot dt + \int_{t_{on}}^{T_s} V_L \cdot dt = 0 \quad (3.2)$$

Burada bobin geriliminin bir periyot boyunca toplamının sifıra eşit olduğu görülmektedir. Denklem 3.2’ de verilen ifade integral alma işlemleri yapıldıktan sonra anahtarın kapalı ve açık olduğu durumdaki bobin gerilimleri birbirine eşitlenirse Denklem 3.3 elde edilebilir.

$$(V_S - V_0)t_{on} = V_0(T_S - t_{on}) \quad (3.3)$$

Denklem 3.3 yeniden düzenlenecek olursa aşağıdaki ifade bulunabilir (Denklem 3.4).

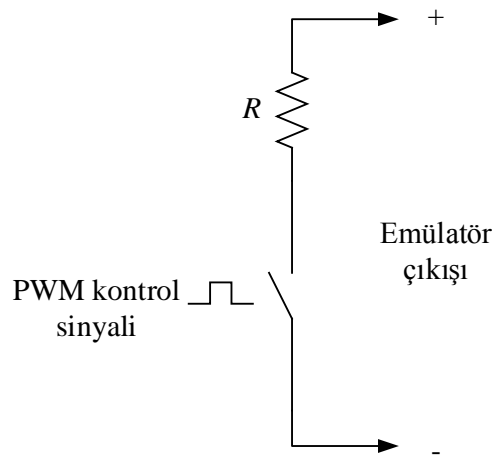
$$\frac{V_0}{V_S} = \frac{t_{on}}{T_S} = D \quad (3.4)$$

Burada elde edilen son ifade CCM çalışma durumunda azaltan tip dönüştürücünün çıkış geriliminin darbeleme oranına bağlı olarak doğrusal biçimde değiştiği ve devredeki diğer parametrelerin çıkış gerilimi üzerinde bir etkisinin bulunmadığını göstermektedir.

Tez kapsamında tasarlanan PV emülatörü kısmi gölgelenmeleri modelleyebilmesi için üç azaltan tip DC/DC dönüştürücü seri bağlanmıştır. Burada üç dönüştürücü kullanılmasının sebebi tez kapsamında modellenen PV panelinde üç hücre grubunun seri bağlı olmasıdır. Emülatör güç biriminde yer alan azaltan tip DC/DC dönüştürücülerin giriş gerilimleri 15-17 V arasında, çıkış gerilimleri 0-13 V arasında, çıkış akımı azami 9 A ve anahtarlama frekansı ise 15 kHz olacak şekilde tasarlanmıştır. DC/DC dönüştürücülerin beslemesinde her biri için 220 V alternatif akım (AC) / 24 V DC ve 15 A değerinde çıkış akımına sahip anahtarlama güç kaynakları kullanılmıştır.

3.2 Ayarlanabilir Direnç Yüğü

PV paneli emülatörünün çıkışını istenilen düzeyde bir yük değeri ile yükleyip PV emülatörün I-V karakteristiğini çıkarabilmek için ayarlanabilir bir yüke ihtiyaç duyulmaktadır. Bunun için piyasada çok profesyonel programlanabilir yükler bulunmakla birlikte tez kapsamında Şekil 3.2’ de prensip şeması verilen mütevazi bütçeli bir yük devresi kullanılmıştır.



Şekil 3.2 Ayarlanabilir yük devresi prensip şeması.

Tez kapsamında oluşturulan PV emülatörünün çıkışına bağlanan yükün ortalama direnci, D değerinin ayarlanması suretiyle, yüksüz çalışma durumundan tam yüklü (3.5Ω) durumuna kadar ayarlanabilmektedir (Denklem 3.5).

$$R = D \cdot \frac{V_0}{I} \quad (3.5)$$

Burada;

R : Yük direncini, [Ohm]

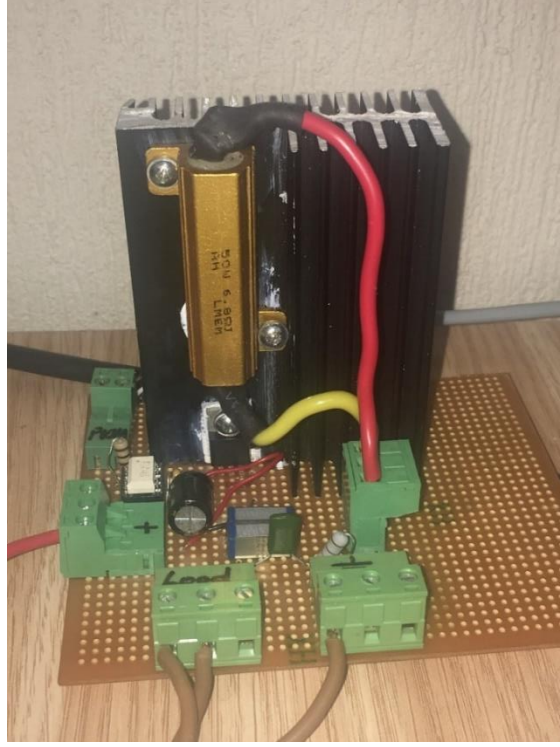
V_0 : Çıkış gerilimini, [V]

I : Çıkış akımını, [A]

D : Darbeleme oranını [%]

ifade etmektedir.

Resim 3.1' de yukarıda prensip şeması verilen yük anahtarlama devresinin imal edilmiş baskı devreli kartı görülmektedir. Burada güç anahtarı olarak MOSFET kullanılmış ve darbeleme oranı (D) değerinin ayarlanması ile yük direncinin ortalama değeri değiştirilebilmiştir.



Resim 3.1 Yük anahtarlama devresi kartı.

Resim 3.2’ de elektrikli ısıtıcılarda kullanılan krom nikel (Cr-Ni) alaşımlı tellerden ve ısıya dayanıklı seramik boru üzerine sarılarak oluşturulmuş olan yük direnci görülmektedir. Direnç boru üzerine torna tezgahı vasıtasıyla sabitlenmiştir.



Resim 3.2 Yük direnci görünümü.

3.3 Mikrodenetleyici Geliştirme Kartı

Kontrol birimi seri bağlı DC/DC dönüştürücülerin çıkış akım değeri ile her bir dönüştürücünün çıkış gerilim değerlerinin ölçülmesi, dönüştürücülerin yapılarında barındırdıkları anahtarlama elemanlarını kontrol etmek amacıyla üretilen PWM sinyallerinin üretilmesi, seri haberleşme terminalleri vasıtasıyla ara yüz yazılımına veri gönderilmesi esnasında ve ara yüz yazılımından veri alınması esnasında haberleşmesi ve DC/DC dönüştürücülerin çalışması gereken noktalarda çalıştırılmasına yarayan kontrolörlerin işletilmesi işlemlerini yerine getirmektedir. Bu tez kapsamında tasarlanan PV emülatörün kontrol biriminde bütün bu işlemleri yerine getirmesi için Advanced RISC machines (ARM) tabanlı olan ST Microelectronics firmasına ait STM32F407 kodlu mikro işlemcisi kullanılmıştır.

ARM dünyada yeni yeni popülerlik kazanmış azaltılmış komut seti bilgisayarı (RISC) mimarisine dayanan bir tür merkezi işlem birimi (CPU) ailesidir. 32 bit ve 64 bit çok çekirdekli işlemciler üretmektedir. RISC işlemcileri daha hızlı çalışmakla birlikte daha az sayıda bilgisayar talimatı gerçekleştirecek şekilde tasarlanmış oldukları için saniyede milyonlarca komutu yerine getirmektedirler. ARM işlemcilerinin yapısında az sayıda transistör barındırmaları sebebiyle boyutları da oldukça küçüktür. Yine yapılarının çok karmaşık olmaması ve güç tüketimlerinin de az olması ARM tabanlı işlemcilerin avantajları arasında yer almaktadır. ARM işlemcileri yükle-depola mimarisine sahip olması, dikey komut seti, çoğunlukla tek çevrim yürütme, gelişmiş güç tasarrufu tasarımı, ölçeklenebilir yüksek performans için 32 ve 64 bit yürütme durumları ve donanım sanallaştırma desteği gibi özelliklere sahiptirler (İnt. Kyn. 1).

ST Microelectronics firması tarafından üretilen birçok ARM tabanlı işlemci bulunmaktadır. STM32F407 türü işlemciler tıbbi, endüstriyel ve tüketici uygulamalarında sıkça kullanılmaktadır. STM32F407 türü işlemciler 10x10 mm boyutunda olup, entegrasyon ve performans seviyeleri oldukça yüksektir. Ayrıca, gömülü hafızalar ve zengin çevre birimlerine sahiptirler. Tam performansla çalışacakları zaman frekans hızları 168 MHz seviyelerine kadar ulaşır (İnt. Kyn. 2).

STM32F407VG işlemcisini bünyesinde barındıran STM32F4DISCOVERY devre kartı yapılan işlemler için çıktılar sağladığından dolayı bu tez kapsamında tercih edilmiştir. Resim 3.3’ de bir görüntüsü yer alan STM32F4DISCOVERY devre kartının başlıca özellikleri (İnt. Kyn. 3);

- 32 bit ARM Cortex-M4 işlemcisine bünyesinde barındırmaktadır.
- Evrensel seri veriyolu (USB) üzerinden veya 3-5 V’ luk harici güç kaynağından beslenebilmektedir.
- Biri USB bağlantısı, biri gücün açık olduğunu, biri aşırı akım durumunu gösteren, biri V_{BUS} sinyalinin durumunu gösteren ve dördü de kullanıcının işlemlerine göre aktif olan sekiz adet LED ışığa sahiptir.
- Kullanıcı ve sıfırlama durumu için iki adet butona sahiptir.
- Çok yönlü dijital mikrofon ses sensörü bulundurmaktadır.
- Üç eksenli ivme ölçer bulundurmaktadır.



Resim 3.3 STM32F4 Discovery geliştirme kartının bir görüntüsü.

3.4 Gerilim ve Akım Sensörleri

PV emülatörün ölçme biriminde seri bağlı üç hücrenin gerilimlerini ayrı ayrı ölçmek için üç adet gerilim sensörü ve toplam akımı ölçmek için bir adet akım sensörü kullanılmıştır.

Tasarlanan PV emülatörün güç biriminde yer alan seri bağlı DC/DC azaltan tip dönüştürücülerin çıkış gerilimlerini ölçmek adına ölçme biriminde optik yalıtımlı ACPLC87 kodlu gerilim sensörlerine yer verilmiştir. Bu gerilim algılayıcılarının 0-2 V nominal giriş aralığına ve 1 G Ω ' luk yüksek bir giriş empedansına sahip olması gibi özelliklerinden dolayı yenilenebilir enerji sistemlerinde yer alan elektronik güç dönüştürücü birimlerindeki izole gerilim algılama gereksinimlerini karşılamak için oldukça uygundur. ACPLC87 türü gerilim sensörleri -40 °C ila +105 °C gibi geniş bir sıcaklık aralığında bozulmadan ölçüm yapabilmektedirler ve 100 kHz gibi geniş bir bant genişliğine sahiptirler. Ayrıca, çıkış tarafı için 3-5.5 V arası geniş bir besleme aralığına sahiptirler.

Emülatörün yapısında yer alan üç adet seri bağlı DC/DC dönüştürücünün çıkış akım değerinin ölçümü için manyetik yalıtımlı ACS712 serisi, azami 20 A ölçme kapasitesine sahip akım algılayıcı kullanılmıştır. Bu akım sensörü, kalıp yüzeyine yakın bir yerde bulunan bakır bir iletim yoluna sahip hassas, düşük sapmalı (offset), doğrusal bir Hall sensörü devresinden oluşmaktadır. Bakır iletim yolu üzerinden akan uygulanan akım Hall entegre devresi tarafından algılanan ve orantılı bir gerilim değerine dönüştürülen bir manyetik alan oluşturmaktadır. Sensörün doğruluğu manyetik sinyalin Hall dönüştürücüsüne yakınlığı ile optimize edilmektedir.

Emülatörün ölçme biriminde ACS712 türü akım algılayıcılarının kullanılmasının başlıca sebepleri arasında:

- 80 kHz hızında bant genişliğine,
- 66-185 mV/A çıkış hassasiyetine,
- Düşük gürültülü analog sinyal yoluna,
- Son derece kararlı çıkış ofset gerilimine,
- Neredeyse sıfır manyetik histerezise,

- Besleme gerilimine karşılık oranlı çıkışa,
- 1.2 mΩ değerinde iç iletken direncine ve
- Adım giriş akımına 5 µs gibi kısa zamanlı çıkış yükselme süresine

sahip olması gibi özellikler sayılabilir.

3.5 Grafikselle Kodlama Programı (MATLAB/Simulink)

MATLAB, kullanıcılarına sayısal hesaplama, veri çözümleri ve grafikselle çizimler yapma gibi konularda çok büyük kolaylıklar sağlayan bir paket programlama dilidir. Bu tip genel amaçlı kullanımların dışında MATLAB programına eklenebilecek olan araç kutuları (toolbox) ile birlikte kullanıcılar kontrol, sinyal işleme, görüntü işleme, sinir ağları, bulanık mantık ve hatta havacılık ve uzay gibi çok daha spesifik konularda da araştırma ve geliştirmeler yapabilmektedirler.

MATLAB ile entegre bir şekilde çalışan Simulink programı dinamik ve gömülü sistemler için bir simülasyon ve model tabanlı tasarım ortamıdır. Bunların yanı sıra Simulink programı kullanıcılarına otomatik kod üretimine ve gömülü sistemlerin testine ve doğrulanmasına da olanak sağlamaktadır. Bütün bu sebeplerden dolayı bu tez kapsamında PV emülatörün aygıt yazılımı tasarlanmasında ve simülasyon sonuçlarının elde edilmesinde Simulink programı kullanılmıştır.

3.6 Mikrodenetleyici Projesi Yapılandırma Programı (CubeMX)

STM32CubeMX, STM32 türü mikroişlemcilerin yapılandırılmasına olanak sağlayan ve kolay kullanılabilir bir arayüze sahip olan grafikselle bir araçtır. STM32CubeMX programının bazı temel özellikleri şunlardır:

- Tüm STM32 türü mikroişlemcilerin yer aldığı geniş bir kütüphaneye sahiptir ve kullanıcının kullanacağı STM32 türü mikroişlemciyi kolayca seçmesine olanak sağlar.
- STM32 türü mikroişlemcileri bünyesinde barındıran tüm devre kartlarını seçenek olarak içerir ve bunlar arasından kullanıcının kullanacağı devre kartını kolayca seçmesine olanak sağlar.

- Mikrodenetleyicinin pinlerinin, zamanlayıcılarının, çevre birimlerinin ve ara katman yazılımlarının kolayca yapılandırılmasına yardımcı olur ve ilgili başlatma C kodunu oluşturur.
- Önceden kaydedilmiş bir yapılandırmayı yeni bir mikrodenetleyici birimi (MCU) projesine aktararak başka bir mikrodenetleyiciye kolayca geçilmesine olanak sağlar.
- Oluşturulmuş olan geçerli yapılandırmanın uyumlu bir MCU'ya kolayca aktarılması işlemini yapabilir.
- Yapılandırma raporlarının üretilmesi işlemini gerçekleştirir.
- Tümleşik geliştirme ortamı aracı zincirlerinin seçimi için gömülü C projelerinin üretilmesini sağlar.
- Kullanıcı tarafından tanımlanmış bir uygulama dizisi için güç tüketiminin hesaplanmasına olanak sağlar.

3.7 Gömülü Aygıt Yazılımı Geliştirme Platformu (IAR Embedded Workbench)

IAR gömülü tasarım platformu, gömülü sistemler için uygulama projelerinin geliştirilmesine ve geliştirilen bu uygulamaları yönetmeye olanak sağlayan bir entegre geliştirme ortamı (IDE) türüdür.

IAR gömülü tasarım platformu ile geliştirme işlemi yapmadan önce sistem gereksinimlerini ve tasarımını içinde barındıran uygulama mimarisi manuel veya otomatik kod oluşturma araçlarından herhangi birisi kullanılarak oluşturulmalıdır. Uygulama mimarisinin oluşturulmasının ardından IAR Embedded Workbench isimli IDE ile oluşturulabilecek bir tipik gelişim döngüsü şöyledir:

- Genel ve kullanılan araca özgü seçenekler içeren bir proje oluşturulur.
- Kaynak kod dosyaları C, C++ veya çeviricide oluşturulur.
- Oluşturulan dosyalar derletilir.
- Daha sonra hata ayıklama dosyaları bağlanır.
- Hatalar ayıklandıktan sonra varsa hatalar kullanıcı tarafından düzeltilir.
- Son olarak geliştirme işlemleri build edilir.

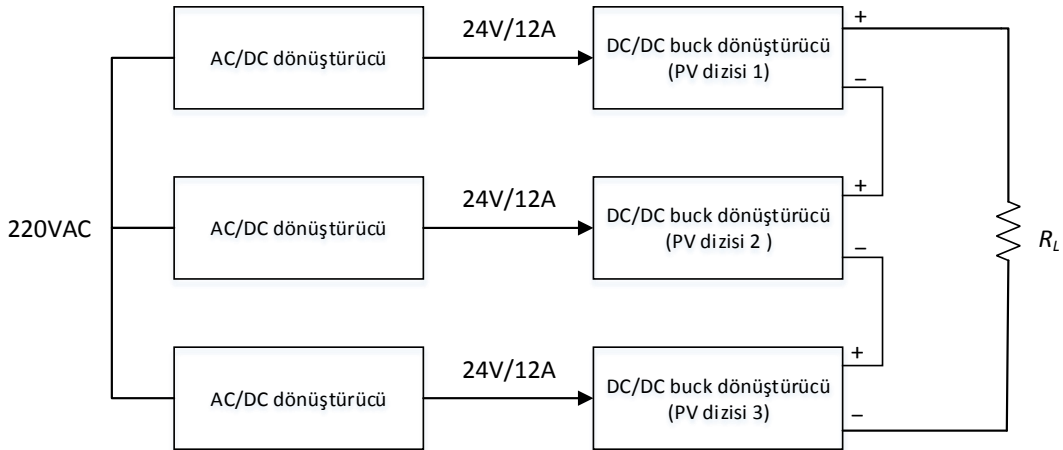
3.8 Grafiksel Veri Toplama ve Arayüz Geliştirme Ortamı (LabVIEW)

LabVIEW programı verilerin toplanması, analiz edilmesi, sentezlenmesi ve kontrol edilmesi noktalarında bütünleşik çözümler sağlayan bir grafiksel programlama dili (GPL) türüdür. LabVIEW programı sayesinde çok hassas ölçümler pratik bir şekilde gerçekleştirilmektedir (Ünsaçar ve Eşme 2009). Oldukça gelişmiş bir tür GPL olması hasebiyle sistemlerin analizi ve tasarımı işlemlerinde LabVIEW programı sıkça kullanılmaktadır.

3.9 Deney Platformunun Donanımsal Tasarımı

PV emülatörün donanımsal tasarımının genel yapısını gösterir blok şema Şekil 3.3’ de verilmektedir. Genel yapıyı özetlemek gerekirse:

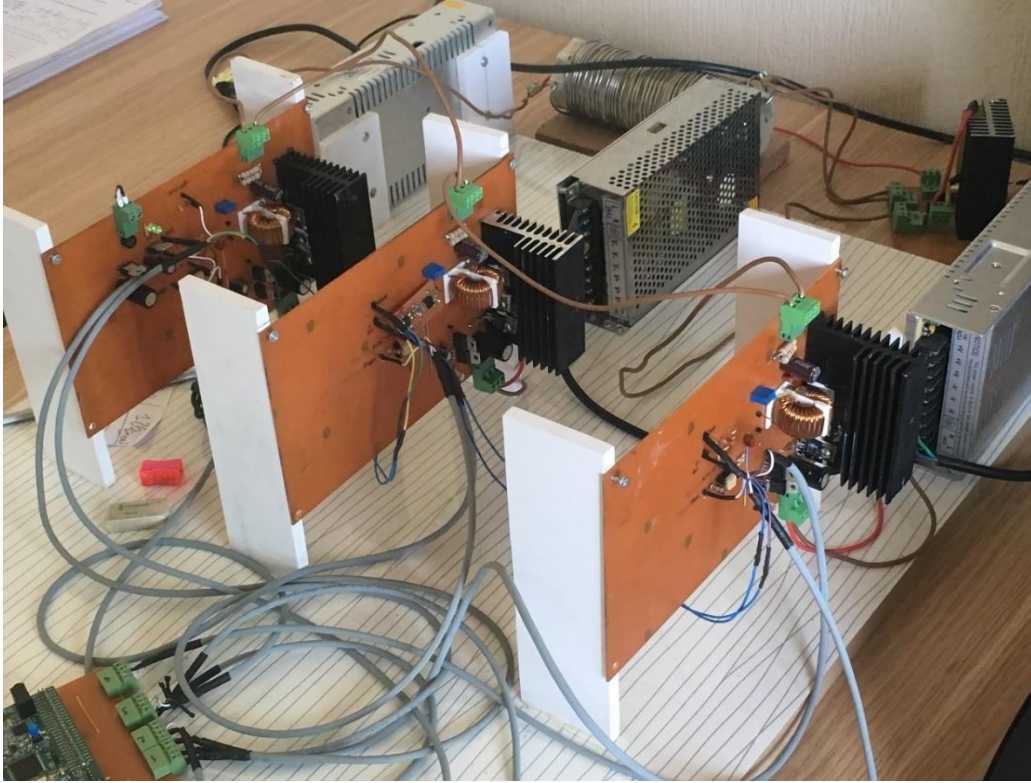
- Anahtarlama güç kaynaklarıyla azaltan tip DC/DC dönüştürücülerin besleme gerilimi sağlanmaktadır.
- Ardından tasarlanan azaltan tip DC/DC dönüştürücüleri tarafından 24 VDC’ den çalışma noktası gerilimine dönüşüm işlemi gerçekleştirilir.
- Son olarak dönüştürücü çıkışları birbiri seri bağlanmış emülatör çıkışı oluşturulmuştur.



Şekil 3.3 PV emülatörün donanım kısmının genel yapısı.

Aşağıda tez kapsamından tasarımı tamamlanmış olan deney platformunun bir görüntüsü verilmiştir. Yukarıda ayrıntılı teorik bilgileri verilen azaltan tip DC/DC dönüştürücüler

öncelikle Proteus yazılımında simülasyonları yapıldıktan sonra baskı devre şemaları oluşturularak imal edilmiştir. Resim 3.4’ de görülen dönüştürücü kartları üzerinde anahtarlama elemanını sürmekte kullanılan sürücü devreleri ve çalışma noktası ölçümlerini gerçekleştiren sensör devreleri yer almaktadır. Söz konusu anahtar sürme devresi ve ölçme devreleri güç devresi ile kontrol devresi arasında elektriksel izolasyon sağlayacak biçimde tasarlanmıştır. Bu sayede kontrol devresi, güç devresindeki yüksek gerilim seviyesinden ne olabilecek hasarlardan korunabilmiştir.



Resim 3.4 Emülatörün donanım kısmına ait bir görüntü.

PV emülatörü prensip olarak, verilen ışınım şiddeti ve sıcaklık veri setlerini kullanarak çıkışına bağlanan yüke söz konusu ışınım şiddeti ve sıcaklığa maruz kalan bir PV panelinin vereceği gücü yüke aktarmaktadır. Bu süreç sırasıyla;

- I. Işınım şiddeti ve sıcaklık verilerinin arayüzden mikrodenetleyici aygıt yazılımına gönderilmesi,
- II. Mikrodenetleyici aygıt yazılımına gömülmüş olan ve yapay sinir ağı yöntemi kullanılarak tasarlanan PV modeliyle veri setine uygun çalışma

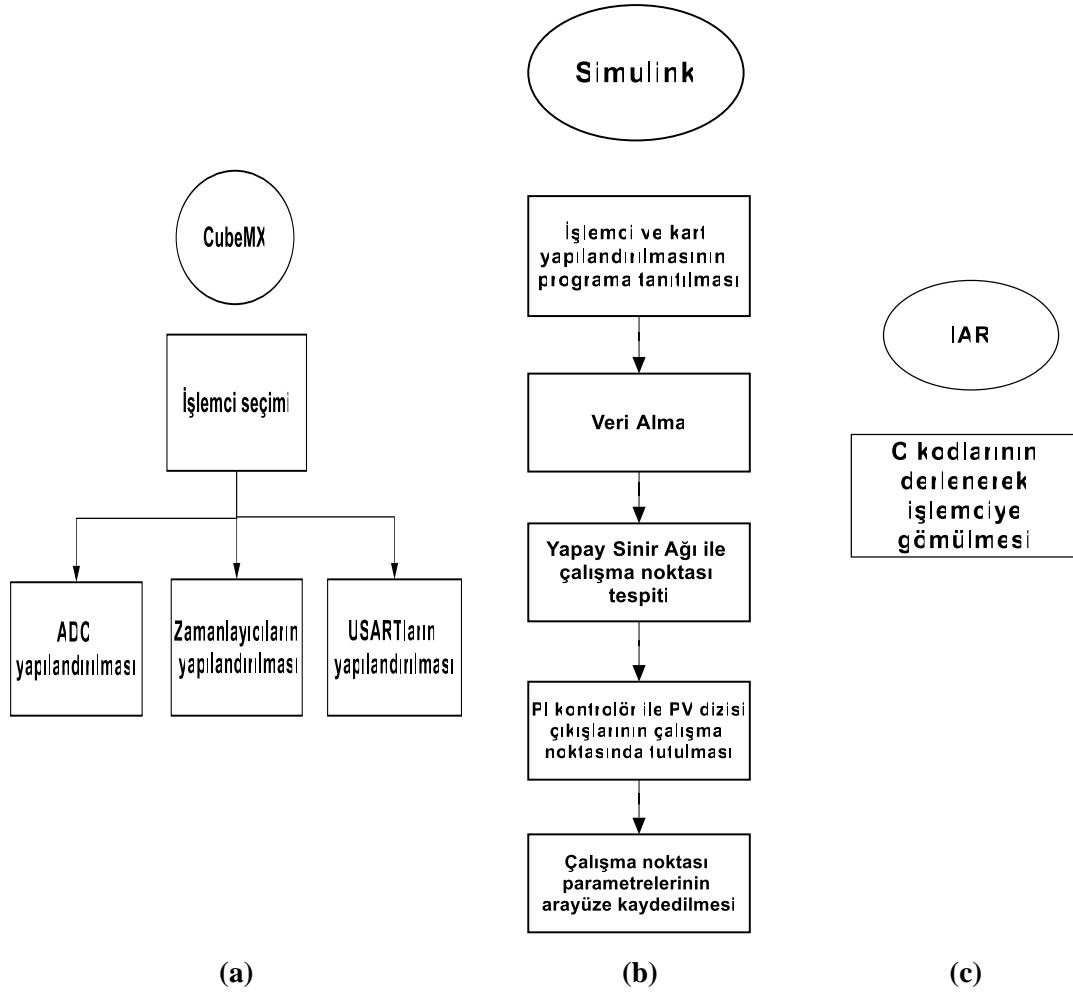
- noktalarının oluşturulması,
- III. PI kontrolörle PV dizi çıkışlarının istenilen çalışma noktasında tutulması ve
 - IV. Tercih edilen bir zaman aralığında çalışma noktası parametrelerinin bilgisayar arayüzüne gönderilerek toplanması

şeklinde sıralanabilecek dört alt işlemden oluşmaktadır. Bu alt işlemler PV emülatör platformunun aygıt yazılımı ve arayüz yazılımları ile gerçekleştirilmektedir. Aygıt yazılımı ve arayüz yazılımıyla ilgili ayrıntılı bilgiler aşağıda verilmektedir.

3.10 Aygıt Yazılımının Tasarımı

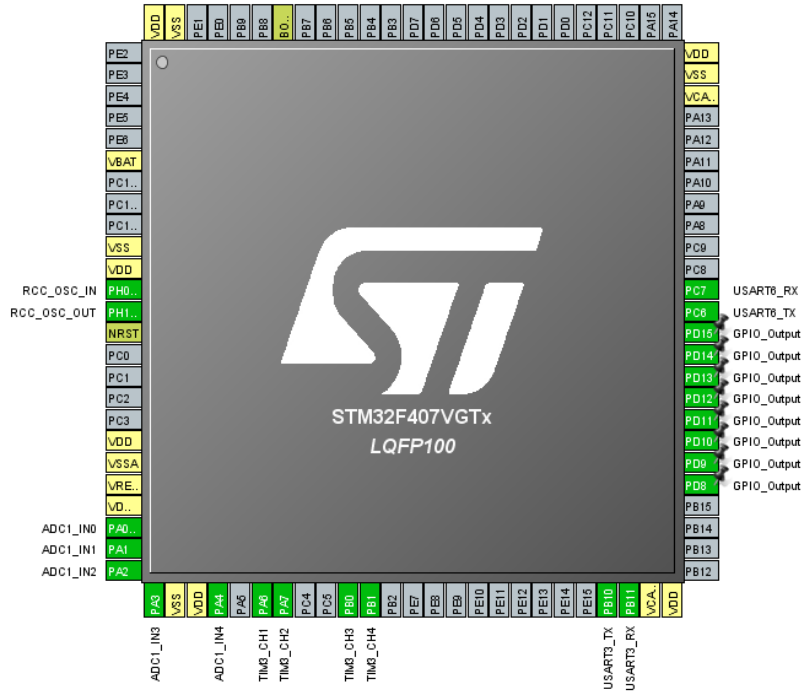
Tez kapsamında tasarlanan PV emülatörün aygıt yazılımı tasarım prosedürüne ilişkin akış diyagramı Şekil 3.4' de verilmiştir. Burada ilk olarak mikrodenetleyici geliştirme kartının çevre birimleri olan analogtan dijital dönüşürücü (ADC), zamanlayıcı (Timer), PWM, evrensel senkron alıcı verici (Universal Synchronous/Asynchronous Receiver Transmitter-USART) gibi CubeMX yazılımında yapılandırılması gerçekleştirilmektedir. Ardından CubeMZ yazılımında oluşturulan yapılandırma dosyası MATLAB/Simulink ortamında oluşturulan grafik tabanlı aygıt yazılım koduna eklenmektedir. Son olarak MATLAB/Simulinkte oluşturulan grafiksel kod yine MATLAB/Code Generation Toolbox ile C koduna dönüştürülmekte ve bu C kodu IAR derleyicisinde makine diline (hex kodu) dönüştürülerek mikodenetleyici geliştirme kartına gömülmektedir.

Tasarlanan PV emülatörün aygıt yazılımı tasarım prosedürüne ilişkin akış diyagramı Şekil 3.4' de verilmiştir



Şekil 3.4 PV emülatörün aygıt yazılımı tasarım prosedürüne ait akış diyagramı. (a) CubeMX programında mikrodenetleyici yapılandırması, (b) Simulink ortamında oluşturulan grafiksel koda ait akış diyagramı ve (c) IAR platformunda hex kodlarının oluşturulması.

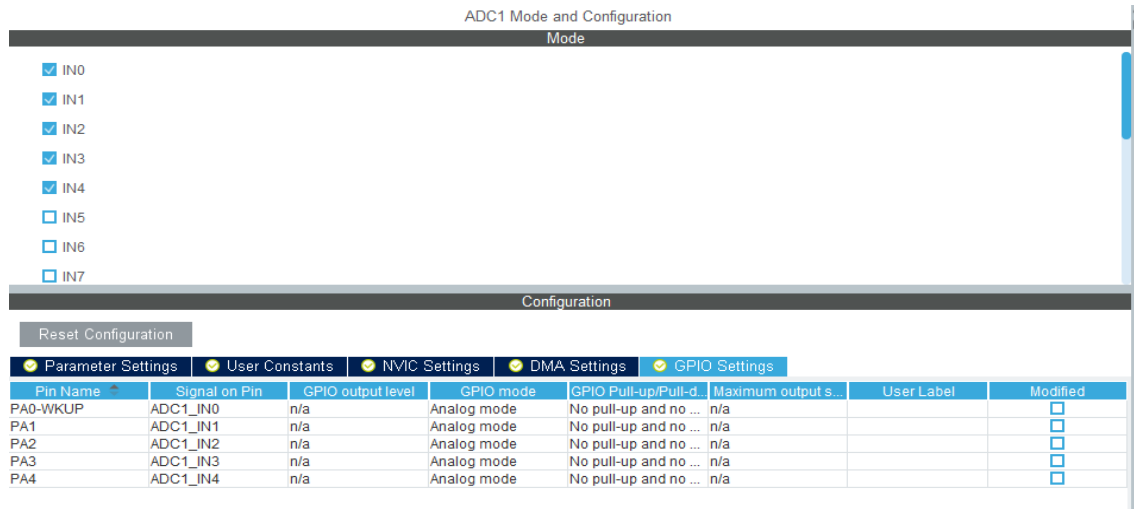
Yapılan çalışmada üzerinde STM32F407VG bulunan STM32F4 Discovery geliştirme kartı kullanılmıştır. Mikrodenetleyici bacaklarının, zamanlayıcılarının, gerekli çevre birimlerinin ve ara katman yazılımlarının kolayca yapılandırılması ve ilgili başlatma C kodunun oluşturulması STM32CubeMX programında gerçekleştirilmiştir. Şekil 3.7’ de STM32CubeMX programında oluşturulmuş ve tez kapsamında kullanılan işlemci yapılandırmasına ait işlev şeması yer almaktadır.



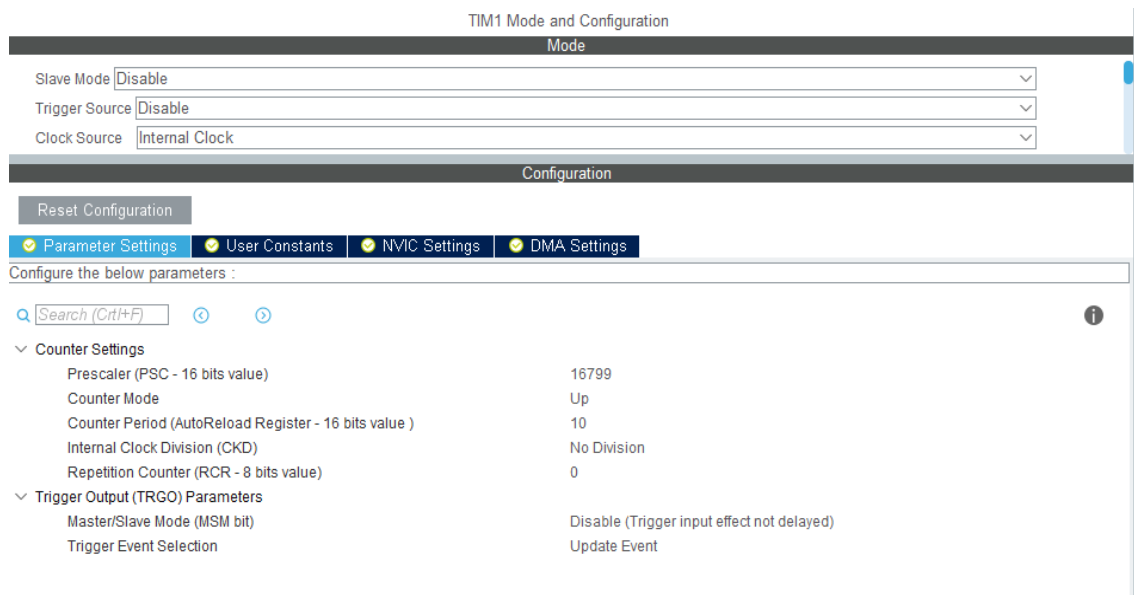
Şekil 3.5 STM32CubeMX işlemci yapılandırma ekranı görünümü.

STM32CubeMX programı kullanılarak işlemcinin yapılandırılması noktasında sırasıyla şu işlem basamakları uygulanmıştır:

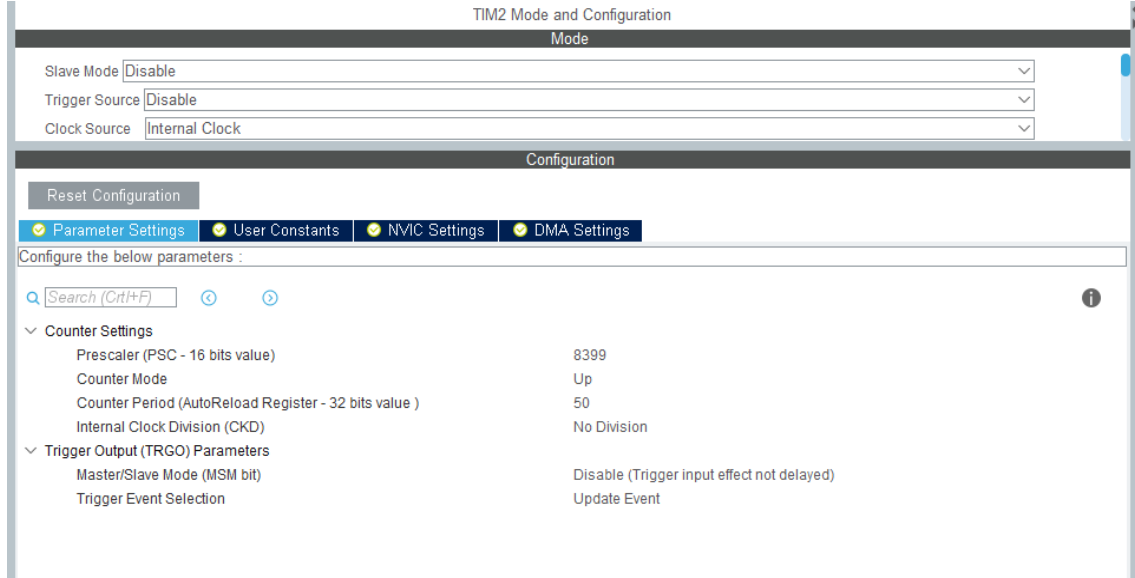
- İlk adım olarak tez kapsamında STM32F4DISCOVERY devre kartının kullanılmasından ve bu kartta yer alan STM32F407VG türü işlemcinin kullanılmasından dolayı programda bu işlemci seçilir.
- İşlemcinin seçilmesinin ardından ADC yapılandırılır (Şekil 3.6).
- Ardından gerekli zamanlayıcılar yapılandırılır. TIMER 1, TIMER 2 ve TIMER 3 isimli zamanlayıcıların ayarlarını gösterir ekran görüntüleri sırasıyla Şekil 3.7’ de, Şekil 3.8’ de ve Şekil 3.9’ da verilmiştir.
- Arayüz ile haberleşmek için seri haberleşme birimi USART’ ın alıcı ve verici ayarları yapılandırılır (Şekil 3.10).



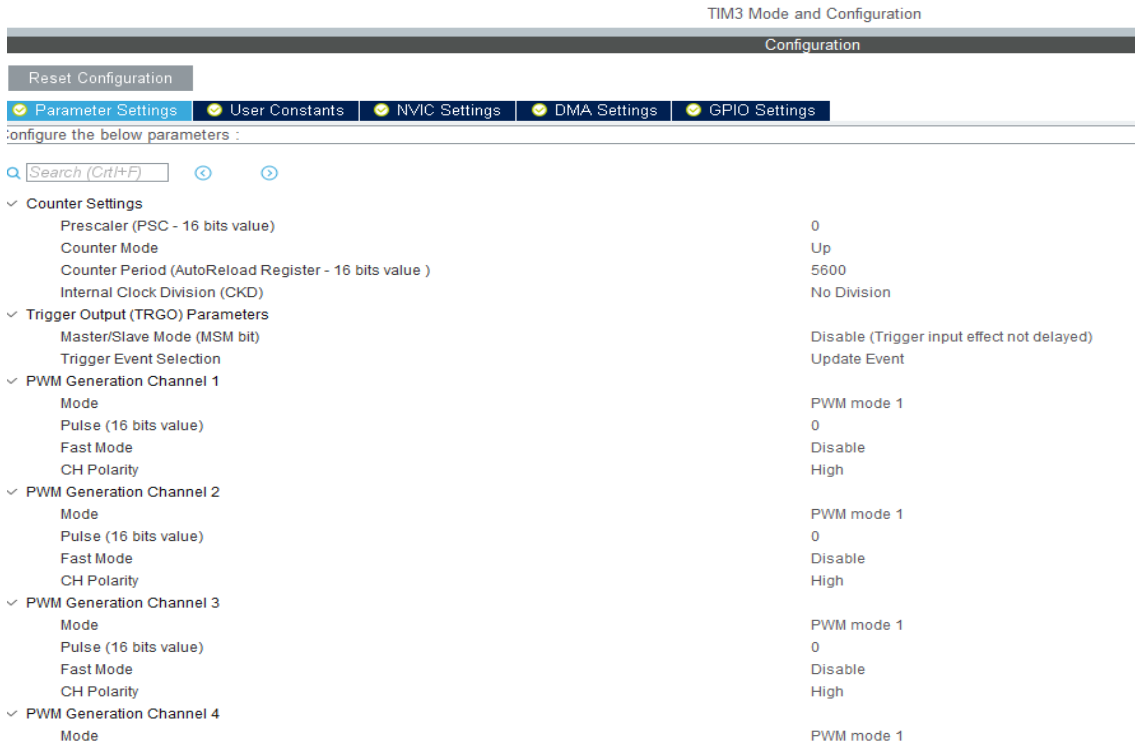
Şekil 3.6 ADC ayarları.



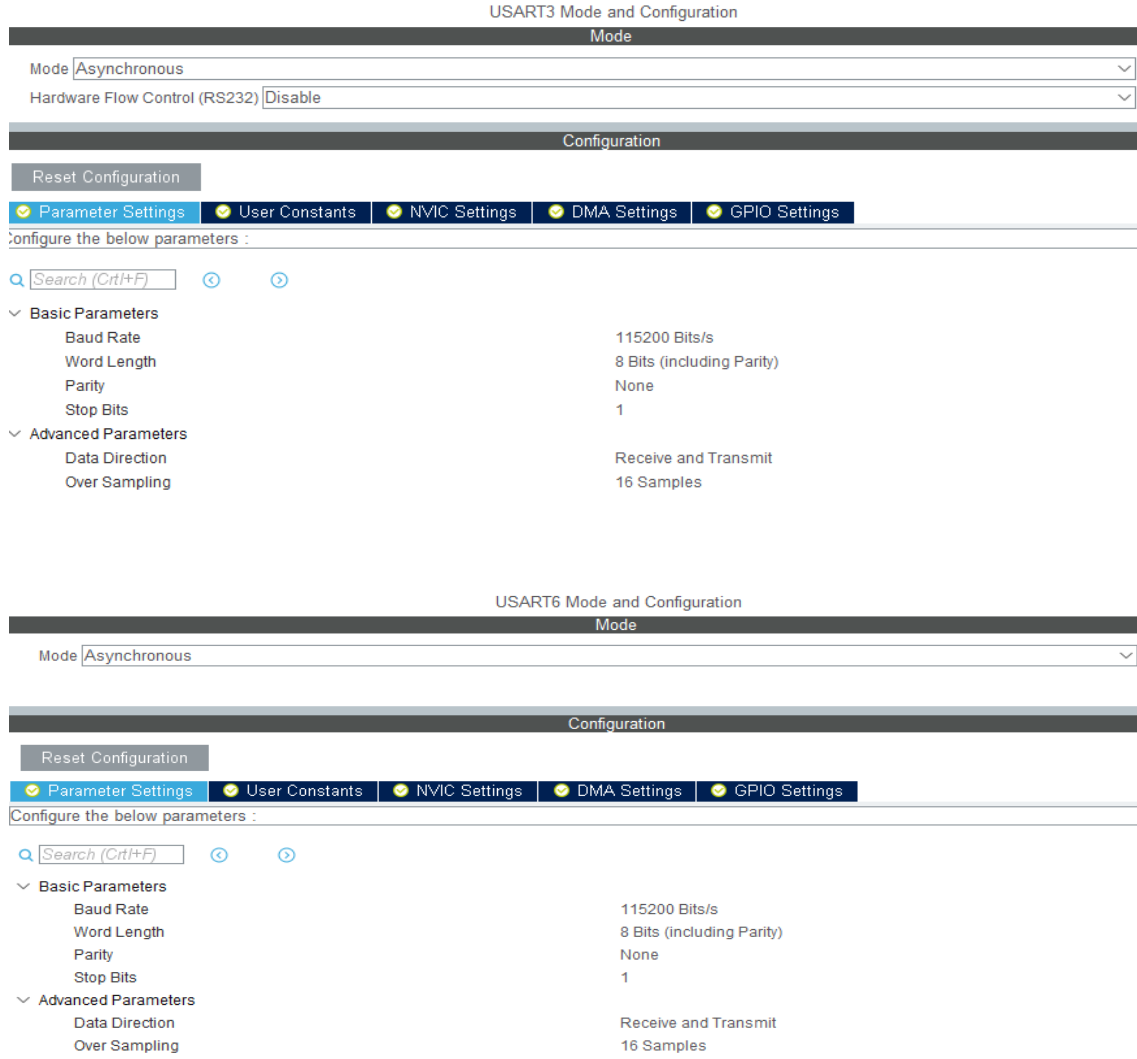
Şekil 3.7 TIMER 1 ayarları.



Şekil 3.8 TIMER 2 ayarları.



Şekil 3.9 TIMER 3 ayarları.



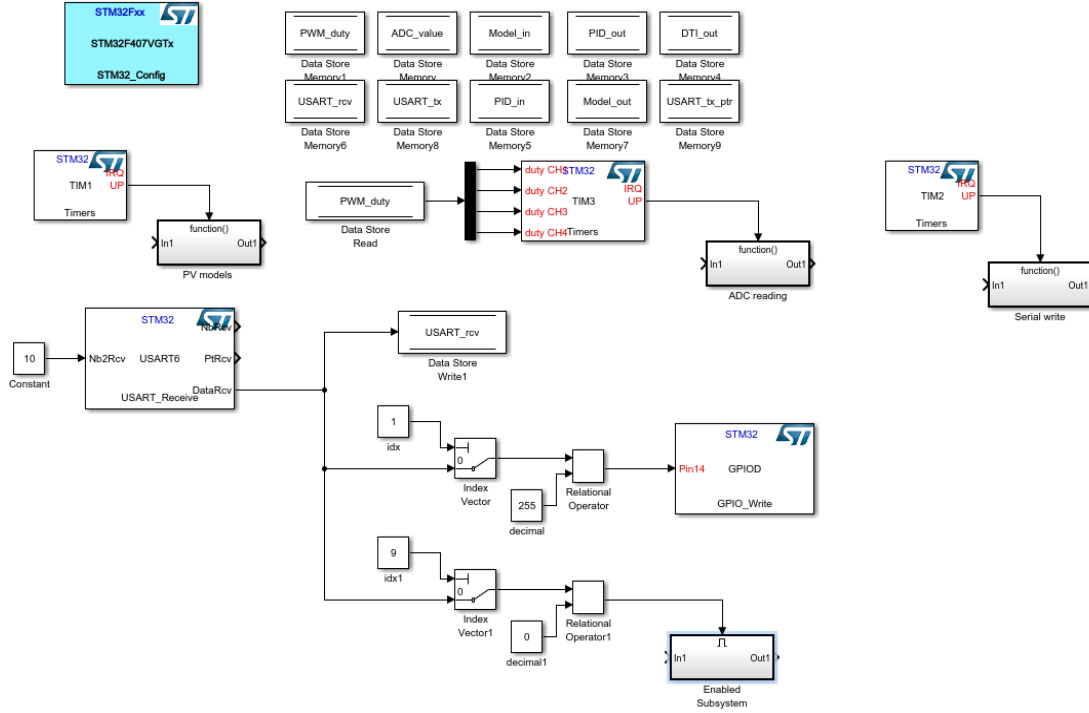
Şekil 3.10 USART ayarları.

Yukarıda CubeMX ekran görüntüleri verilen yapılandırma ayarları gerçekleştirilerek işlemci ve kartın kullanılacak bacakları, ADC, PWM, USART ve zamanlayıcı birimlerinin ön ayarlamaları tamamlanmış olur.

Uzun ve karmaşık kod yazma külfetini ortadan kaldırabilmek ve doğrudan mikrodenetleyiciye gömülecek kodu üretebilmek için MATLAB/Simulink programı ve Code Generation Toolbox yazılımlarından yararlanılmıştır.

Aygıt yazılımında; ışınım şiddeti ve sıcaklık verilerinin arayüzden mikrodenetleyici aygıt yazılımına alınması, yapay sinir ağı yöntemiyle PV panelinin modellenmesi ve ışınım ve

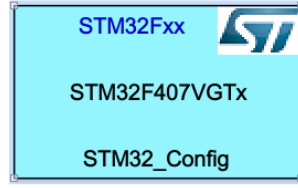
sıcaklık veri setine uygun çalışma noktasının oluşturulması, PI kontrolörle PV dizi çıkışlarının istenilen çalışma noktasında tutulması ve tercih edilen bir zaman aralığında çalışma noktası parametrelerinin bilgisayar arayüzüne gönderilerek toplanması işlemlerinin gerçekleştirilebilmesi adına gerekli düzenlemeler yapılmıştır (Şekil 3.11).



Şekil 3.11 Simulink programında oluşturulan koda ait bir ekran görüntüsü.

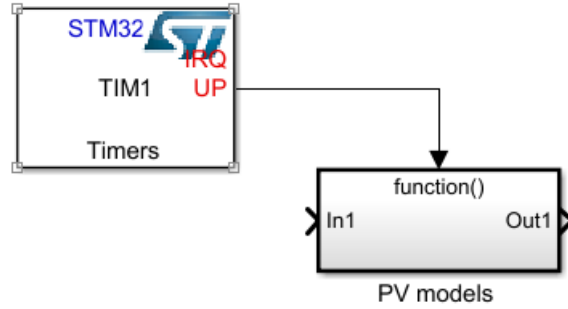
Şekil 3.11’de verilen Simulink kodu bileşenlerine bakıldığında; (i) işlemci yapılandırma bloğu, (ii) PV modeli işletme zamanlayıcısı, (iii) PWM üretici ve ADC okuma zamanlayıcısı, (iv) USART veri gönderme zamanlayıcısı ve (v) USART veri alma blokları görülmektedir.

(i) İşlemci yapılandırma bloğu: Şekil 3.12’de verilen blok CubeMX programında hazırlanan yapılandırma dosyasının yüklendiği ve mikro denetleyici çevre birimlerinin hangi şartlarda çalışacaklarını belirleyen en önemli bloktur. Mikro denetleyici yapılandırmasında yapılan her değişiklik sonrasında bu bloğa yüklenen yapılandırma dosyasının da güncellenmesi gerekmektedir.



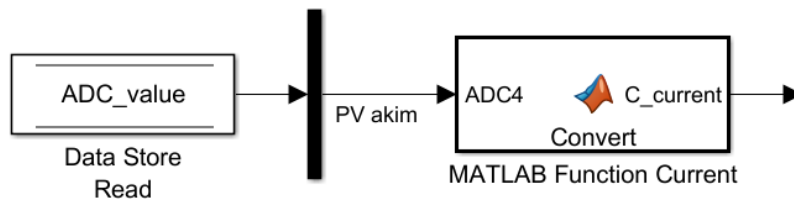
Şekil 3.12 STM32F407VG işlemcisi yapılandırma bloğu.

(ii) PV modeli işletme zamanlayıcısı: Şekil 3.13’ de verilen fonksiyon bloğu zamanlayıcıdan üretilen kesme sinyali ile beslenmektedir. Fonksiyon bloğunun içinde yer alan tüm işlemler zamanlayıcı kesme frekansında icra edilmektedir. PV model fonksiyon bloğu içinde icra edilen işlemler aşağıda ayrıntılarıyla verilmiştir.



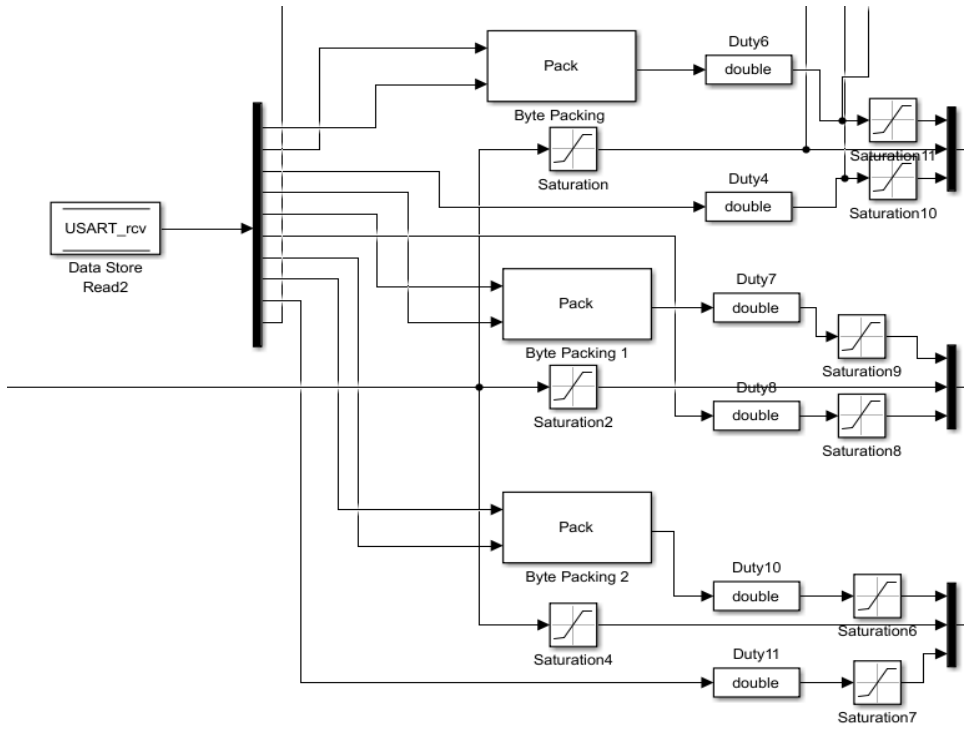
Şekil 3.13 ‘PV Models’ fonksiyon bloğu ve zamanlayıcısı.

İlk olarak Şekil 3.14’ de görüldüğü gibi analogdan dijitale dönüştürücüden (ADC) okunan akım sensörü verisi ‘MATLAB Function Current’ isimli fonksiyon bloğu girişine verilir. Girişe verilen ham ADC değeri MATLAB fonksiyon bloğu içerisinde bir dizi matematiksel işlemlere tabi tutularak fonksiyon bloğu çıkışında PV akım değerine dönüştürülmektedir. Böylece her bir seri bağlı hücre için programda yer alan PV modellerin çalışması gereken akım değeri üretilmiş olur.



Şekil 3.14 Akım sensöründen okunan verilerin dönüştürülmesi.

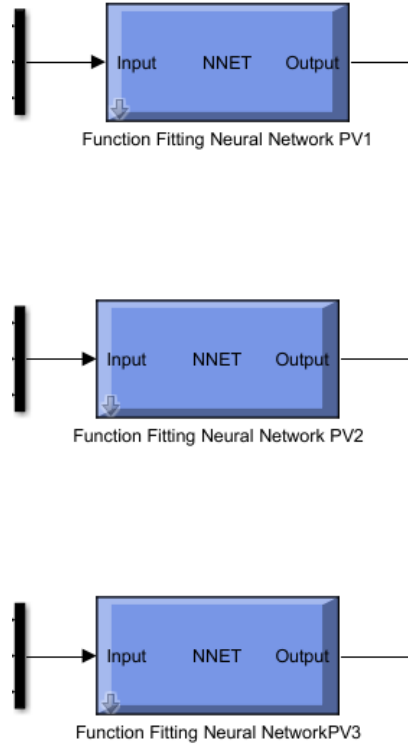
Akım değerleri dönüştürüldükten sonra Şekil 3.15’ de bir ekran görüntüsü verilen adıma geçilir. Bu adımda USART biriminden alınan 10 byte büyüklüğündeki veri paketi çoğullama çözücü ile ayrıştırılarak alınır. Bu veriler PV modellerin çalışması gereken ışınım ve sıcaklık değerleri bilgileri ile birlikte 1 byte büyüklüğünde karşılaştırma bilgisi içerir. Her bir hücre için ayrı ayrı 2 byte büyüklüğünde ışınım ve 1 byte büyüklüğünde sıcaklık değerleri bilgisi olmak üzere 3 adet seri hücre için toplam 9 byte büyüklüğünde bilgi PV modellerde kullanılır. Daha sonra 2 byte büyüklüğündeki ışınım değerleri ‘Byte Packing’ bloğu vasıtasıyla 16 byte olarak paketlenir. Paketlenen ışınım değerleri ile birlikte her bir PV modelin çalışması istenen sıcaklık bilgileri ve bir önceki adımda üretilen akım değeri çoklayıcılar vasıtasıyla seri bağlı hücre modellerinin girişlerine uygulanır.



Şekil 3.15 PV model girişlerine uygulanan ışınım ve sıcaklık değerlerinin üretimi.

Hücrelerin çalışacakları ışınım, sıcaklık ve akım değeri bilgileri yapay sinir ağı bloğu ile hücrenin çalışma gerilimi değerleri üretilir. Burada verilen yapay sinir ağı daha önce çevrimdışı olarak elde edilmiş PV panel verileri kullanılarak eğitilen ve Şekil 3.16’ da ekran görüntüsü verilen fonksiyon uydurma bloğudur. Tez kapsamında tasarlanan

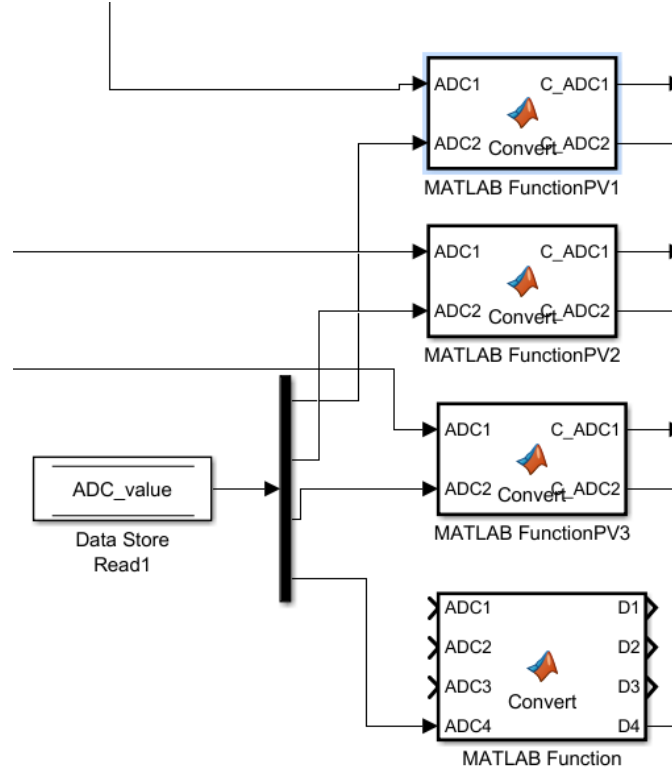
emulator yapısında literatürde yapay sinir ağı yöntemi olarak adlandırılan ve PV emulator çalışmalarında kullanımına çok da sık rastlanmayan bu yöntemin kullanılmasının sebebi PV modeli analitik denkleminde yer alan cebirsel döngülerin MATLAB kod üretici (Code generation) tarafından C koduna dönüştürülememesidir.



Şekil 3.16 Sinir ağı yöntemiyle oluşturulan PV modeller.

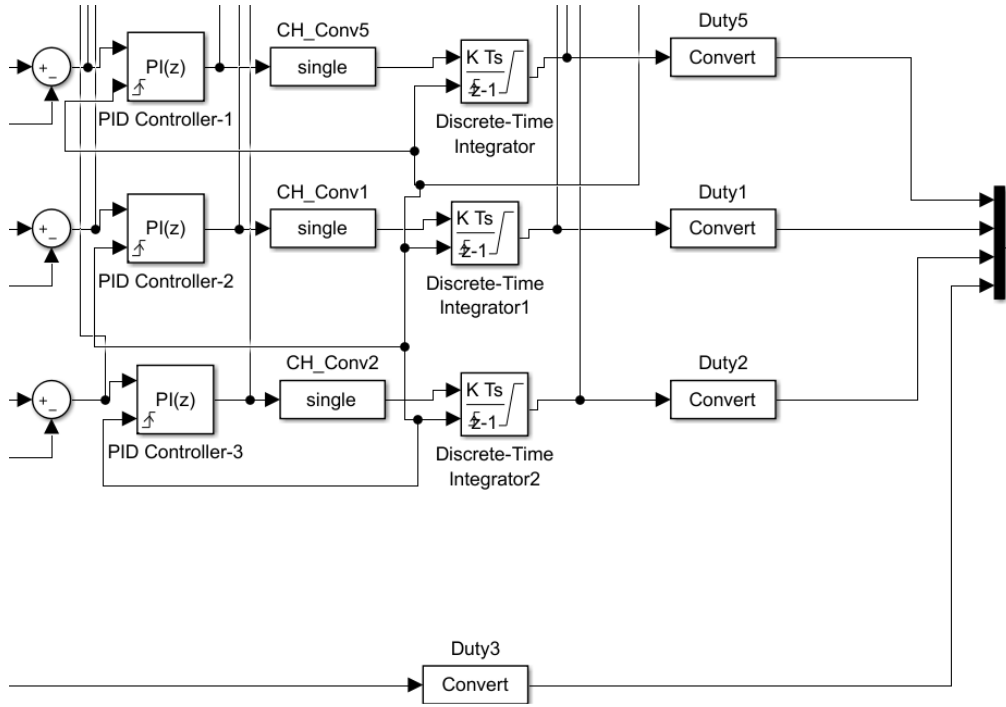
PV modelleri tarafından üretilen gerilim değerleri Şekil 3.17’ de yer alan MATLAB fonksiyonu bloklarında bir dizi matematiksel işlemlere tabi tutulurlar. ‘ADC_value’ isimli blok veri kaydının okunması işlemini yerine getirir. Okunan ADC değerleri çoklayıcı çözücü vasıtasıyla üç tanesi gerilim değerleri bir tanesi de akım değeri için olmak üzere dörde ayrıştırılır. ‘MATLAB FunctionPV1’, ‘MATLAB FunctionPV2’ ve ‘MATLAB FunctionPV3’ isimli fonksiyon bloklarında okunan ADC değerleri, aynı zamanda bu üç fonksiyon bloğunda da ikinci giriş olan bu değerlerin sadece veri tipleri değiştirilerek ikinci çıkışa aktarılırlar. Bir önceki adımda PV model tarafından üretilen ve DC/DC dönüştürücülerde yer alan optik yalıtımlı gerilim sensörleri tarafından okunan değerler, ‘MATLAB FunctionPV1’, ‘MATLAB FunctionPV2’ ve ‘MATLAB FunctionPV3’ isimli fonksiyon bloklarında birinci girişe uygulanır ve her bir DC/DC

dönüştürücü için devrelerinde yer alan gerilim bölücü ayarlı dirençlerin oranıyla belirlenen katsayılarla çarpılarak ve veri tipleri değiştirilerek birinci çıkışa aktarılırlar. ‘MATLAB Function’ isimli fonksiyon bloğunda ise aynı işlemler akım değeri için uygulanır. Böylece yapay sinir ağları ile çalışma noktaları tespit edilmiş olur.



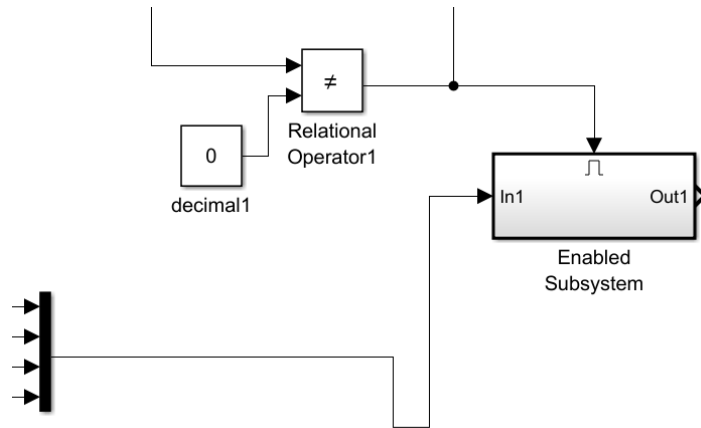
Şekil 3.17 ADC değerlerinin matematiksel fonksiyonlara giriş olarak uygulanması.

Şekil 3.18’ de yer alan tasarım sayesinde PI kontrolörler ile PV dizisi çıkışlarının çalışma noktasında tutulması işlemi gerçekleştirilir. Bu adımda, bir önceki adımda oluşturulan gerilim değerlerinin farkları alınarak hata değeri bulunur ve PI kontrolörlere uygulanır. PI kontrolörlerin çıkışı veri tipi dönüştürme blokları vasıtasıyla ayrık zamanlı toplayıcı (Discrete Time Integrator-DTI) girişine uygun veri tipi olan ‘single’ veri tipine dönüştürülürler ve DTI girişlerine uygulanırlar. Şekil 3.15’ de son adım olarak DTI çıkışlarındaki veriler ‘Duty 1’, ‘Duty 2’ ve ‘Duty 5’ isimli çevrim blokları vasıtasıyla çoğullayıcıya uygulanırlar. Yine bir önceki adımda elde edilen akım değeri ‘Duty 3’ isimli çevrim bloğu vasıtasıyla çoğullayıcıya uygulanır.



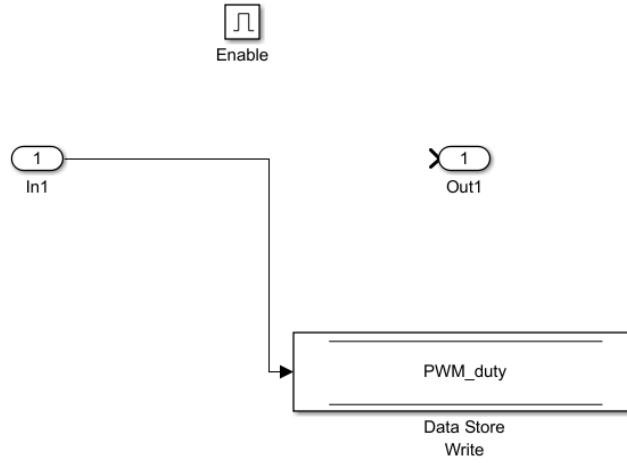
Şekil 3.18 PI kontrolörlerin ve DTI' ların uygulanması.

PI kontrolörlerden ve DTI' lardan geçirilerek çoğullayıcıya uygulanan veriler, Şekil 3.19' da yer alan 'Enabled Subsystem' bloğunun girişine uygulanır. Şekil 3.15' de USART biriminden alınmış ve çoğullama çözümüyle ayrıştırılmış 10 byte büyüklüğündeki veri paketinin en sonunda yer alan 1 byte büyüklüğündeki veri yine Şekil 3.19' da ondalık formatta bulunan 0 sabiti ile karşılaştırılıp 'Enabled Subsystem' bloğunun etkinleştirme portuna uygulanır.



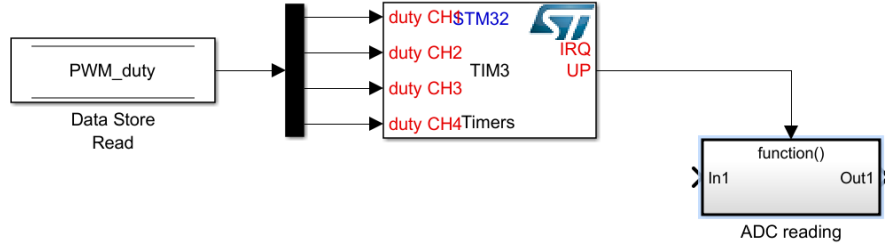
Şekil 3.19 'PV Models' bloğunun tasarımının son basamağı.

Şekil 3.13’ de yer alan ‘PV Models’ isimli fonksiyonun bloğunun tasarım aşamasının son basamağında Şekil 3.19’ da yer alan ‘Enabled Subsystem’ isimli bloğun etkinleştirilmesi için USART biriminden alınmış ve çoğullama çözümüyle ayrıştırılmış 10 byte büyüklüğündeki veri paketinin en sonunda yer alan 1 byte büyüklüğündeki verinin sıfır değerinden farklı bir değerde olması gerekir. Bu şartın sağlanması ile birlikte ‘Enabled Subsystem’ alt sistemi etkinleşmiş olur. Böylece PWM üretimi için gerekli veriler elde edilmiş olur. Şekil 3.20’ de alt sistemin içerisinde yapılan işleme ait bir ekran görüntüsü yer almaktadır. Bu işlem PV emülatörüyle çalışmaya başlamadan önce ve çalışmanın bitiminde PI kontrolörler ve DTI birimlerinin sıfırlanması amacıyla kullanılmaktadır.



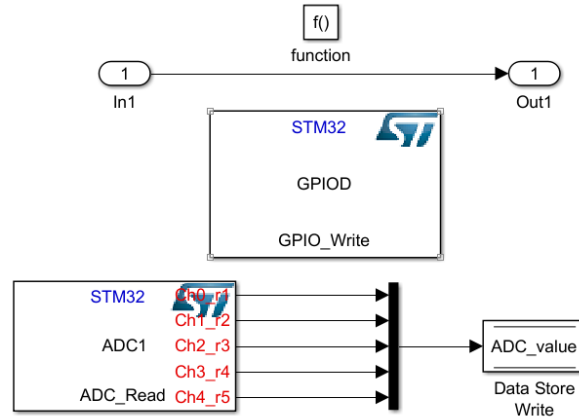
Şekil 3.20 PWM üretimi için gerekli verilerin elde edilmesi.

(iii) PWM üretici ve ADC zamanlayıcısı: PWM üretimi için gerekli verilerin elde edilmesinden sonra Şekil 3.21’ de yer alan adıma geçilmiş olur. Burada ‘Data Store Read’ isimli blok vasıtasıyla çoğullama çözümü kullanılarak üç adedi gerilim değerleri ve bir adedi de akım değeri için olmak üzere oluşturulan veriler ayrıştırılırlar. PWM üretici modunda kullanılmakta olan ‘TIM3’ zamanlayıcısı PWM değerlerini üretir. Aynı zamanda ‘ADC Reading’ fonksiyon bloğu tetikleme girişine kesme sinyali de yine ‘TIM3’ zamanlayıcısıyla verilir.

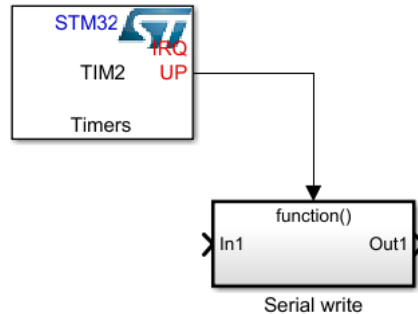


Şekil 3.21 PWM değerlerinin üretilmesi.

Şekil 3.22’ de ‘ADC Reading’ fonksiyon bloğunun içyapısına ait bir ekran görüntüsü yer almaktadır. Burada, üç adedi gerilim değerleri, bir adedi akım değeri ve bir adedi de yük değeri için olmak üzere beş adet ADC değeri üretilir. Üretilen bu değerler çoğullayıcı üzerinden ‘ADC_value’ isimli veri kaydı yazmaya yarayan bloğa verilir.



Şekil 3.22 ADC değerlerinin üretilmesi.

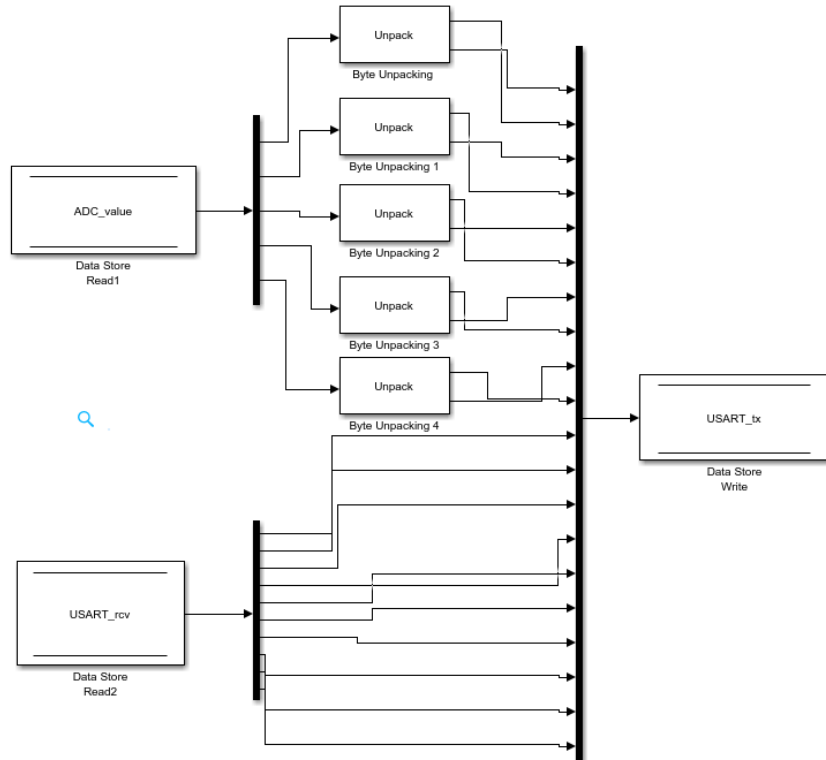


Şekil 3.23 USART veri gönderme zamanlayıcısı.

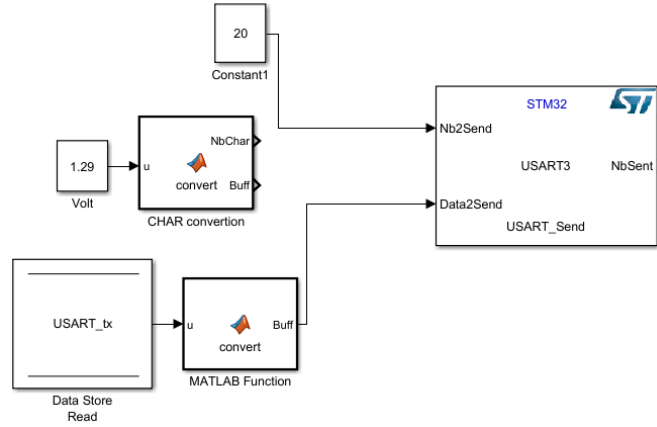
(iv) USART veri gönderme zamanlayıcısı: İşlemci bünyesinde yer alan ‘TIM2’ isimli

zamanlayıcısıyla işlem sıklığı belirlenen ‘Serial Write’ isimli fonksiyon bloğunun (Şekil 3.23) içyapısının tasarlanma aşamaları sırasıyla şöyle açıklanabilir:

- Okunan ADC değerleri çoğullama çözücüyle byte veri açıcılarına verilir.
- Aynı şekilde veri alma görevini üstlenen USART biriminden alınan değerler çoğullama çözücü vasıtasıyla ayrıştırılır.
- Çoğullama çözücüler vasıtasıyla ayrıştırılan değerler çoğullayıcı ile birleştirilerek veri gönderme görevini üstlenen USART’ a yazılır (Şekil 3.24).
- Yazılan değerlerin okunması ve bir takım matematiksel işlemlere tabi tutulması sonrasında veri gönderme görevini üstlenen USART olan USART3 vasıtasıyla veriler işlemciye gönderilir (Şekil 3.25).

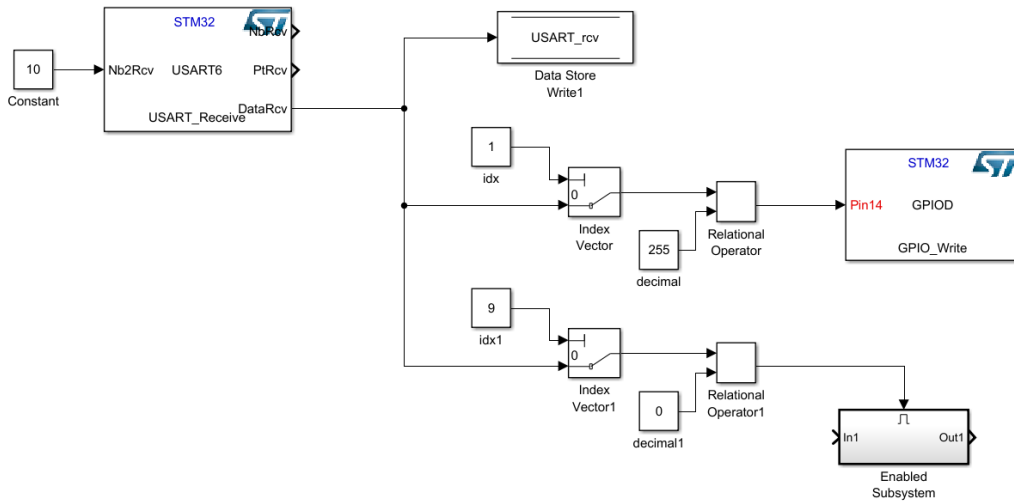


Şekil 3.24 Veri gönderme görevini üstlenen USART' a yazılan veriler.



Şekil 3.25 USART birimiyle verilerin işlemciye gönderilmesi.

(v) USART veri alma blokları: Bu bloklar arayüz yazılımından mikrodenetleyiciye gönderilen ışınım şiddeti, sıcaklık ve çıkış yükü değerini içeren verilerinin alınmasını sağlar. USART bloğu veri tamponu dolduğunda bir kesme oluşturur ve tampondaki veriler 'USART_rcv' isimli veri saklama değişkenine aktarılır. Bu veriler program içerisinde yukarıda ayrıntıları verilen PV model fonksiyon bloğunda kullanılmaktadır.



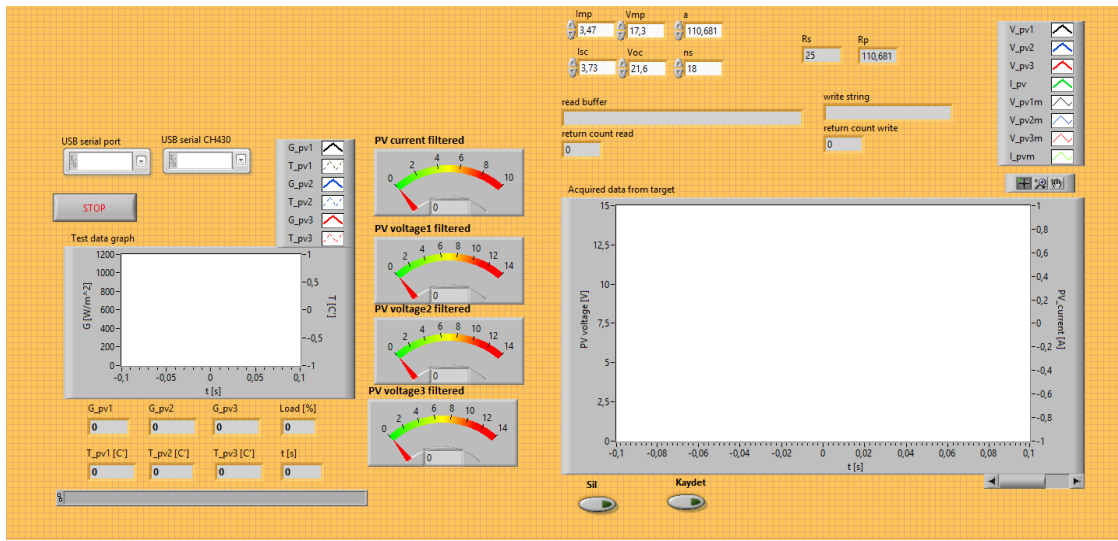
Şekil 3.26 USART veri alma bloklarının görünümü.

Tasarım işleminin sonlanmasının ardından MATLAB/Simulink programı bünyesinde yer alan kod üreticisi ile kod ürettirilerek yine STM32CubeMX programına geçilir. STM32CubeMX yazılımında son olarak aygıt yazılımının kaynak kodu C dilinde ürettirilir. Ardından IAR gömülü tasarım platformunda bu kod derlenerek işlemciye

gömülmüştür. Böylece aygıt yazılımı işlemi sonuçlandırılmıştır.

3.11 Kullanıcı Arayüzü Oluşturulmasında Kullanılan Metot

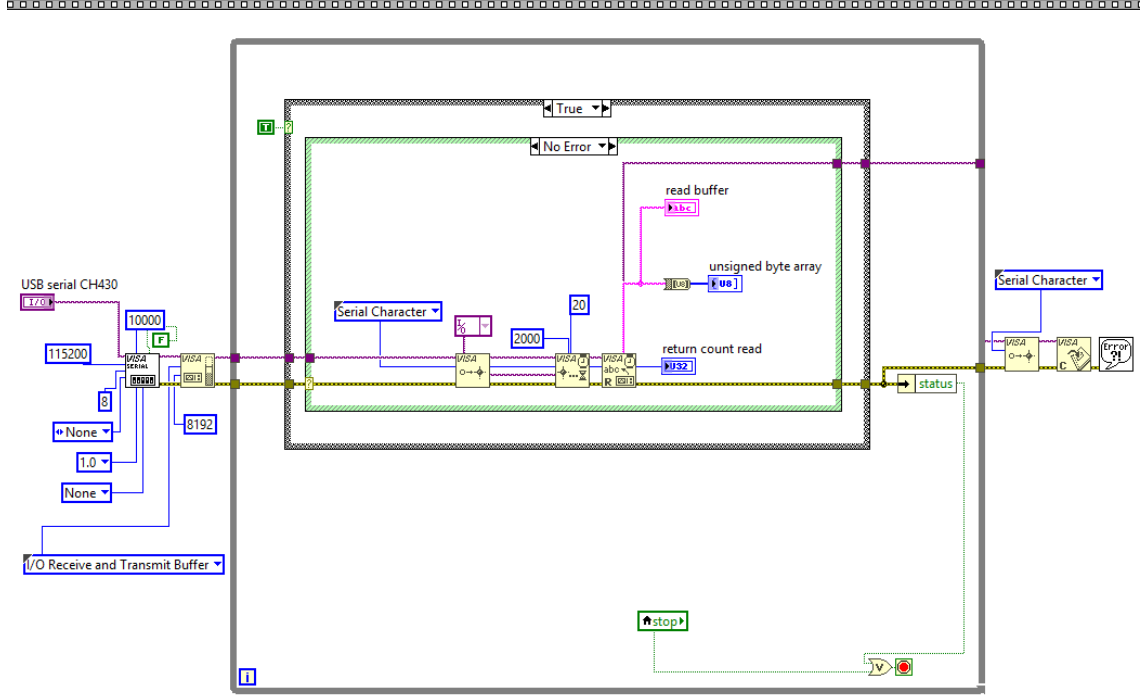
Tez kapsamında emülatör çıkış verilerinin (her bir seri bağlı hücre dizilerinin gerilim değerleri ile akım değeri) alınması için kullanıcı arayüzü tasarlamak için LabVIEW programı kullanılmıştır. Şekil 3.27’ de oluşturulan kullanıcı arayüzüne ait bir ekran görüntüsü yer almaktadır.



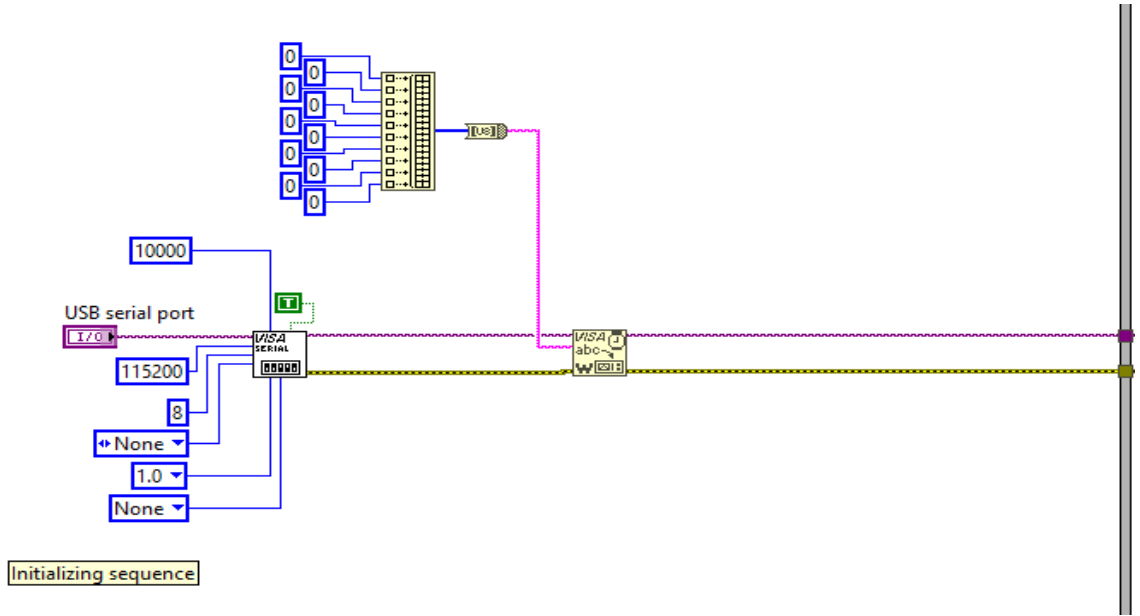
Şekil 3.27 LabVIEW programı vasıtasıyla tasarlanan kullanıcı arayüzü.

Şekil 3.27’ de verilen kullanıcı arayüzündeki blokların hangi işlevleri yerine getirdikleri şöyle özetlenebilir:

- İlk olarak seri haberleşmede veri alma ve verme görevlerini ayrı ayrı üstlenecek iki USART, ‘USB serial CH430’ ve ‘USB serial port’ isimli nesnelere kullanılarak seçilmektedir. Nesnelere altında yer alan ve veri alma ve veri gönderme işlemlerinin yapılması için tasarlanan blok diyagramlarına ait ekran görüntüleri Şekil 3.28’ de ve Şekil 3.29’ da verilmiştir.



Şekil 3.28 Veri gönderen USART' ın LabVIEW programındaki blok diyagramı.

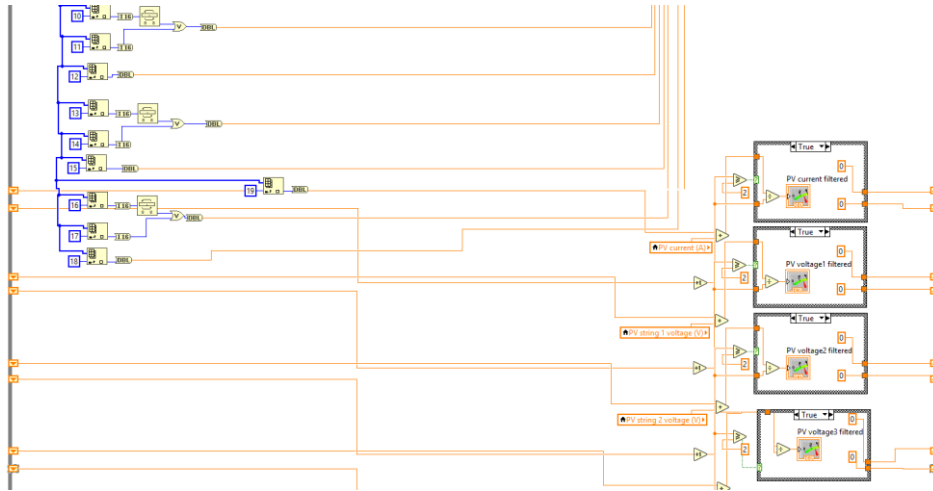


Şekil 3.29 Veri alan USART' ın LabVIEW programındaki blok diyagramı.

- 'Test data graph' isimli grafik bloğunda PV emülatörünün çalışacağı ışınım ve eklem sıcaklığı değerlerine ait kullanıcı tarafından tanımlanmış veri setleri

sisteme verilmektedir. Sisteme verilen bu veri setlerine ait grafikler yine aynı blok diyagramda görülebilmektedir.

- 'G_pv1', 'G_pv2' ve 'G_pv3' isimli sayısal bloklarında veri setlerinde yer alan sırasıyla birinci, ikinci ve üçüncü seri bağlı hücrelerin ışınım değerleri W/m^2 cinsinden, 'T_pv1 [C]', 'T_pv2 [C]' ve 'T_pv3 [C]' isimli sayısal bloklarında yine sırasıyla birinci, ikinci ve üçüncü seri bağlı hücrelerin eklem sıcaklıkları $^{\circ}C$ cinsinden, 'Load [%]' isimli sayısal bloğunda yük değeri yüzdesel olarak ve 't [s]' isimli sayısal bloğunda ise süre anlık bir şekilde kullanıcı tarafından gözlenebilmektedir.
- 'Acquired data from target' isimli grafik bloğunda PV emülatörünün çalışacağı ışınım ve eklem sıcaklığı değerlerine ait kullanıcı tarafından tanımlanmış veri setlerinin işletilmesi PV emülatörün çalıştığı akım değeri ile emülatördeki her bir seri hücreye, yani DC/DC dönüştürücülere ait gerilim değerleri anlık bir şekilde kullanıcı tarafından grafiksel olarak görülebilmektedir. Şekil 3.30' da bu işlemlerin yapılması için tasarlanan blok diyagrama ait bir adet ekran görüntüsü verilmiştir. Ayrıca emülatörün işletilmesi sonucu elde edilen veri setleri arayüzde 'Acquired data from target' isimli grafik bloğunun hemen altına konumlandırılmış 'Kaydet' isimli Boolean bloğuna tıklanarak istenilen formatta (.txt vb.) verilerin kaydı alınabilmektedir.

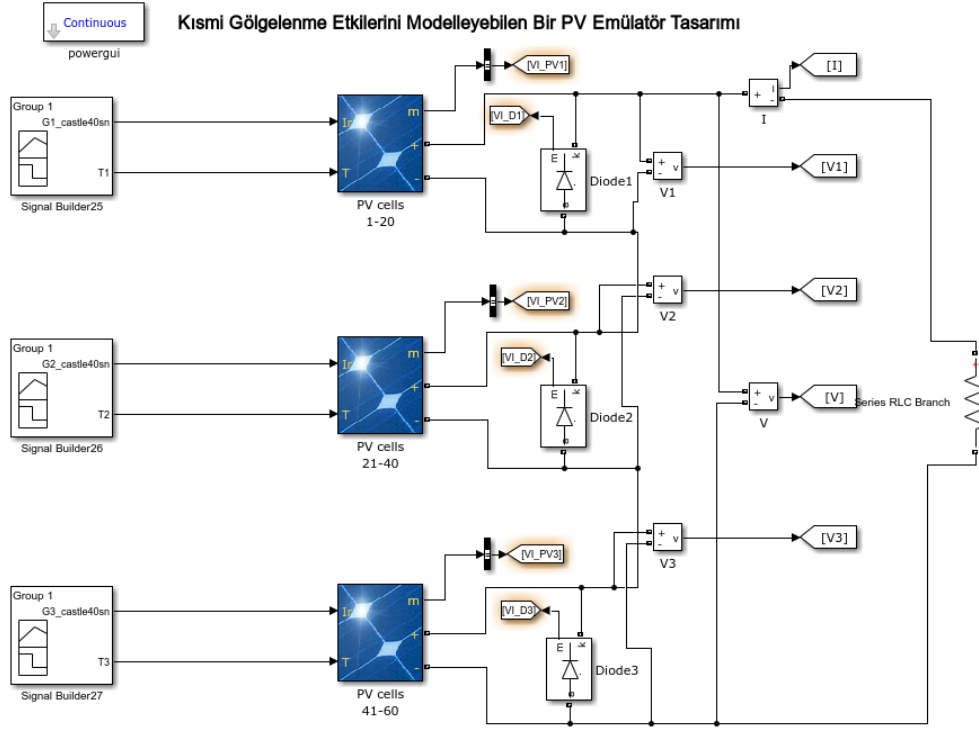


Şekil 3.30 Arayüzde PV dizisi çıkış değerlerinin elde edilmesi.

3.12 PV Emülatörü Simülasyon Modeli

PV emülatörünün simülasyon modeli MATLAB/Simulink programından hazırlanmıştır. Şekil 3.31’ de verilen PV modelinin çalışma prensibini kısaca şöyle özetlenebilir;

- Simulink kütüphanesinde yer alan PV hücrelerine ait hazır blok kullanılarak modeli çıkarılacak PV panelinin katalog bilgileri PV hücre bloğuna girilir.
- PV hücre bloklarının girişlerine modelin işletileceği ışınım ve sıcaklık veri setleri sinyal oluşturmaya yarayan ‘Signal Builder’ isimli fonksiyon blokları ile verilir.
- Direnç yük değeri ayarlanarak çıkış akım ve gerilim değerleri elde edilir.



Şekil 3.31 Farklı senaryolarla PV modellerinin simüle edilmesi.

Burada PV emülatörü deney platformuna uygulanan ışınım ve sıcaklık veri setleri çevrimdışı olarak yukarıdaki modele uygulanarak simülasyon yapılmış ve senaryolara ilişkin model sonuçları elde edilmiştir.

4. BULGULAR

Tez kapsamında tasarlanan PV emülatörü deneylerde kullanılmadan önce PV dizisi çıkış akım ve gerilimlerinin kalibrasyonu, PI tipi kontrolörlerin parametrelerinin belirlenmesi ve kullanıcı arayüzünün veri toplama zaman aralığının kalibrasyonu gibi bazı ön çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Bu ön çalışmalardan olan PI tipi kontrolörlerin parametrelerinin ayarlanması işlemi PV emülatörünün işletilmesinde hayati önem arz ettiğinden PI tipi kontrolörlerin parametrelerinin belirlenmesi noktasında yapılan çalışmalar ve bu çalışmalar sonucunda elde edilen sonuçlar bu bölüm altında ayrı bir başlık olarak ele alınmıştır. Emülatörün kalibrasyonu ve PI kontrolörlerin parametrelerinin belirlenmesi işlemlerinin tamamlanması sonrasında ise tasarlanan PV emülatörü ile farklı gölgelenme senaryoları kullanılarak çeşitli deneyler gerçekleştirilmiştir. PV emülatörüyle yapılan deneylerden elde edilen sonuçlar PV modelinin MATLAB programı ortamında simüle edilmesiyle elde edilen sonuçlar ile karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Ayrıca PV emülatörü çıkışının IV karakteristik eğrisi de hem deneysel hem de simülasyon sonuçlarıyla karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Son olarak deneylerde elde edilen sonuçların simülasyon sonuçlarıyla aralarındaki benzerlik ve farklılıklar istatistiksel yöntemlerle ortaya konulmuştur.

4.1 PI Kontrolör Katsayılarının Belirlenmesi

Oransal kontrolör emülatörün çalışma noktasına ulaşma zamanı (rising time), oturma zamanı (settling time), aşma miktarı (overshoot) ve çalışma noktası etrafındaki salınımların büyüklüğünü etkilemektedir. İntegral kontrolör ise kalıcı durum hatalarını azaltmakla ilgili görev üstlenmektedir. Kontrolörün oransal kısmının katsayı değeri olan K_p ve integral kısmının katsayı değeri olan K_i değerlerinin oldukça optimum bir değerde belirlenmesi emülatörün güneş panelini yüksek oranda takip edebilmesi noktasında hayati bir önem taşımaktadır. Şöyle ki; herhangi bir güneş paneli normal şartlar altında ışınım aldığı anda enerji üretmeye başlamaktadır. Dolayısıyla PV emülatörlerinin de ışınım aldıklarında olabildiğince hızlı bir şekilde enerji üretmeye başlaması, yani PV panelini olabildiğince yüksek oranda taklit etmesi gerekmektedir.

MATLAB programında yer alan PI bloğundaki parametrelerinin belirlenmesi işlemini maddeler halinde sıralamak gerekirse kontrolörlerin;

- Zaman bölgesi ayırık zamanlı olarak ayarlanmıştır.
- Entegratör metodu olarak ileri Euler yöntemi belirlenmiştir.
- Doğrusallaşırken sıfırlama yok sayılmıştır.
- Sıfırdan geçiş algılaması etkinleştirilmiştir.

Kontrolörün kompensatörüne ait formül Denklem 4.1' de verilmektedir.

$$C = K_p + K_i \cdot T_s \frac{1}{z - 1} \quad (4.1)$$

burada;

- C : Kompensatör değerini,
 K_p : Oransal kontrolör kazancını,
 K_i : İntegral kontrolör kazancını,
 T_s : Kontrolörün periyodunu, [s]
 z : Ayırık zaman domeni değişkenini

ifade etmektedir.

PI kontrolörlerin performansının yükseltilmesi adına PV emülatörün tasarlanması aşamasında yapılan birçok deneyden ikisine ait sonuçları gösterir grafikler ve grafiklerin yorumları bu bölümde verilmektedir.

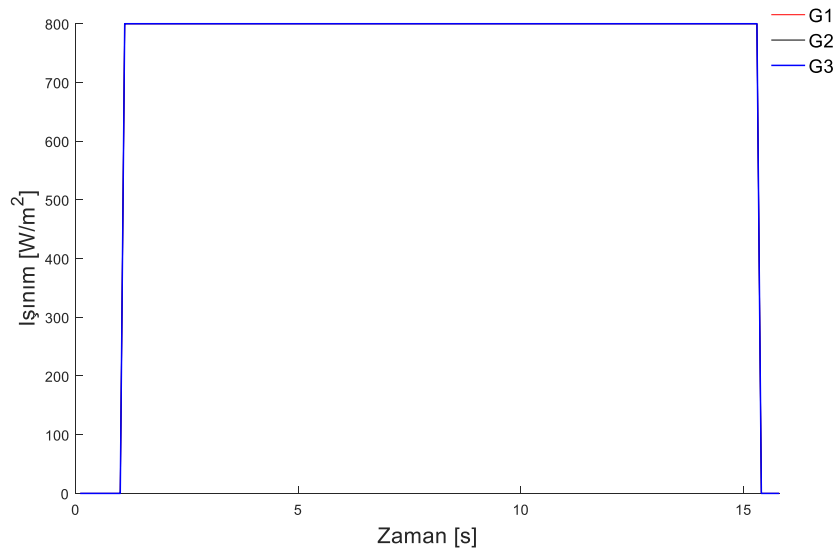
Kontrolörlerin K_p ve K_i değerlerinin PV emülatörün performansına etkisini gözlemleyebilmek adına seri bağlı üç hücrenin de aldıkları ışınlamalar ve hücrelerin sıcaklık değerleri eşit olacak şekilde ayarlanmıştır. Elde edilen verilerin grafiklere aktarılması noktasında yine MATLAB programı kullanılmıştır.

Şekil 4.1' de verildiği üzere seri bağlı üç hücrenin de ışınlamaları 800 W/m^2 olarak ayarlanmıştır. Seri bağlı hücrelerin sıcaklıkları da $25 \text{ }^\circ\text{C}$ olarak ayarlanmıştır. 0 A akım

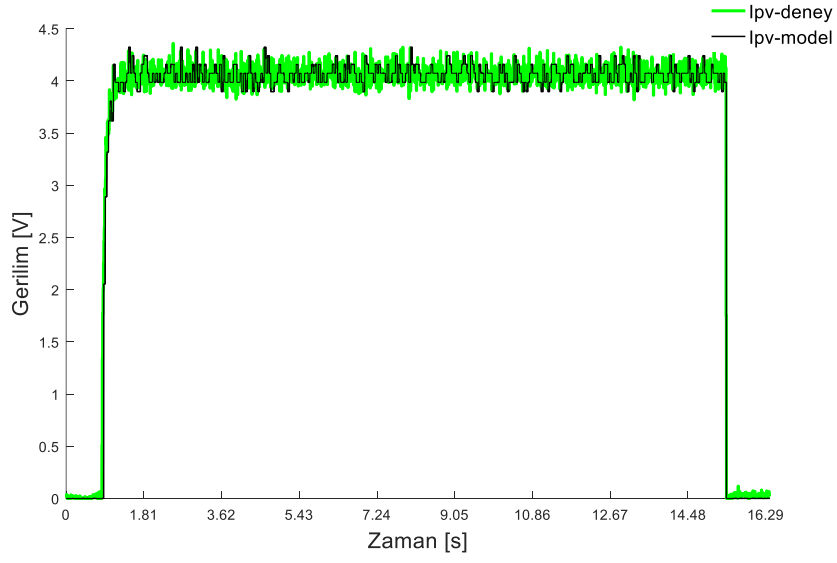
değerinden başlayarak I_{sc} değerine kadar birkaç çalışma noktasında K_p ve K_i değerlerinin deneysel sonuçlara etkileri incelenmiştir. Çalışma noktalarından birisine ait deney sonucunda elde edilen akım ve model akımı değerlerinin karşılaştırıldığı grafik Şekil 4.2’ de verilmiştir. Her bir seri bağlı hücrenin deney sonucunda elde edilen gerilim değerleri ve modelden elde edilen gerilim değerlerinin karşılaştırıldığı grafik (Şekil 4.3) ve kontrolörlerin çalışma noktasına oturma süresinin ve salınımının kolayca incelenebilmesi adına yakınlştırılmış grafik (Şekil 4.4) aşağıda verilmiştir. Kontrolörlerin katsayılarına ait değerler Çizelge 4.1’ de verilmiştir.

Çizelge 4.1. K_p ve K_i değerleri.

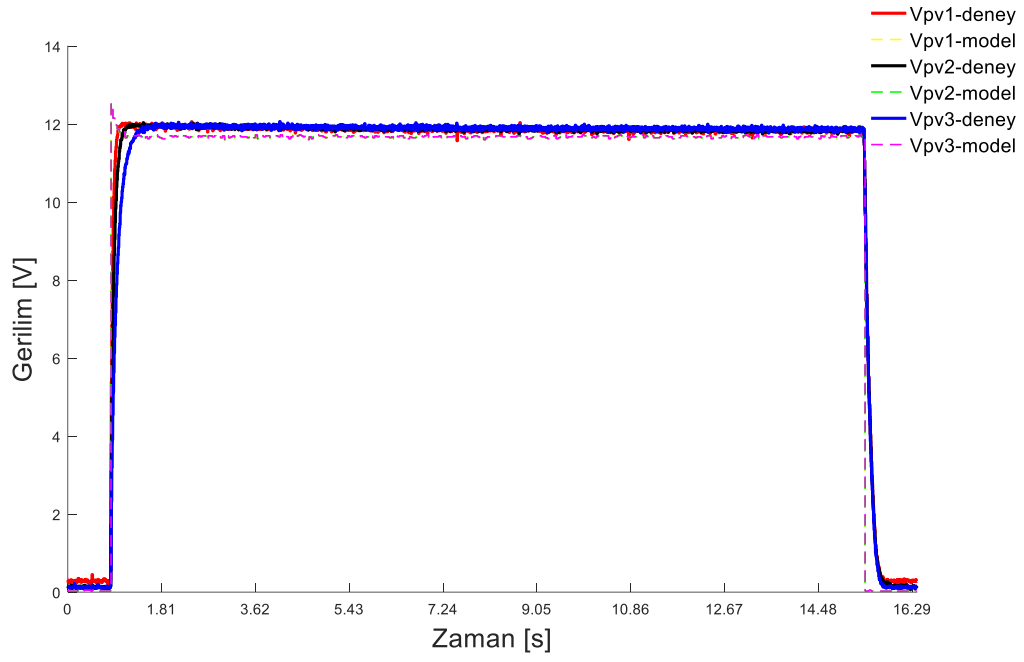
Açıklama	Sembol	Değer
Bir numaralı hücrenin K_p değeri	K_{p1}	20
İki numaralı hücrenin K_p değeri	K_{p2}	15
Üç numaralı hücrenin K_p değeri	K_{p3}	10
Tüm hücrelerin K_i değeri	K_i	0.3



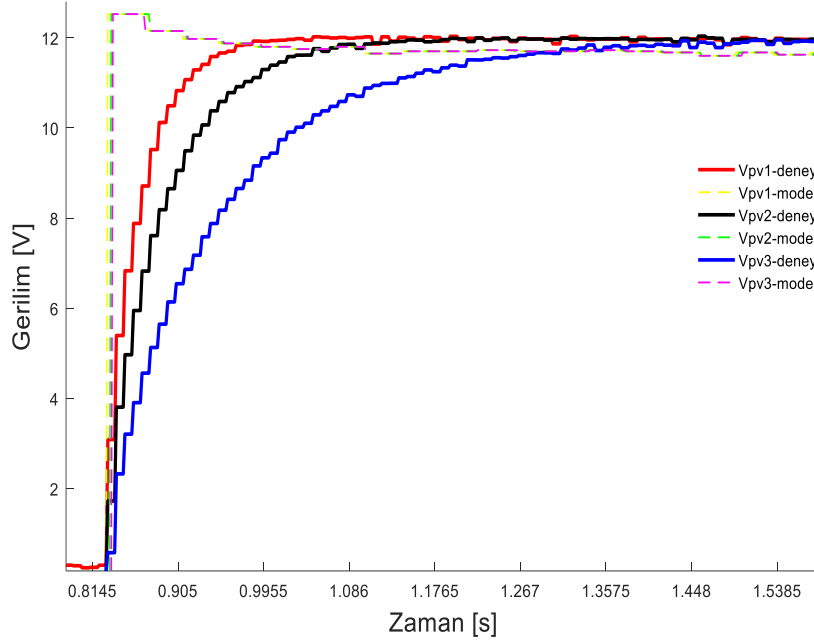
Şekil 4.1 K_p karşılaştırması için PV emülatörü hücrelerine uygulanan ışınım şiddeti değişimi.



Şekil 4.2 Farklı K_p değerleri için PV emülatörü çıkış akımı değişimi.



Şekil 4.3 Farklı K_p değerleri için PV emülatörü hücre gerilimlerinin değişimi.



Şekil 4.4 Hücre gerilimlerinin oturma süreleri (Versiyon-I).

Tasarlanan emülatörün Çizelge 4.1’ de yer alan K_p ve K_i değerleri ile işletilmesi sonucunda elde edilen sonuçlar maddeler halinde şöyle özetlenebilir:

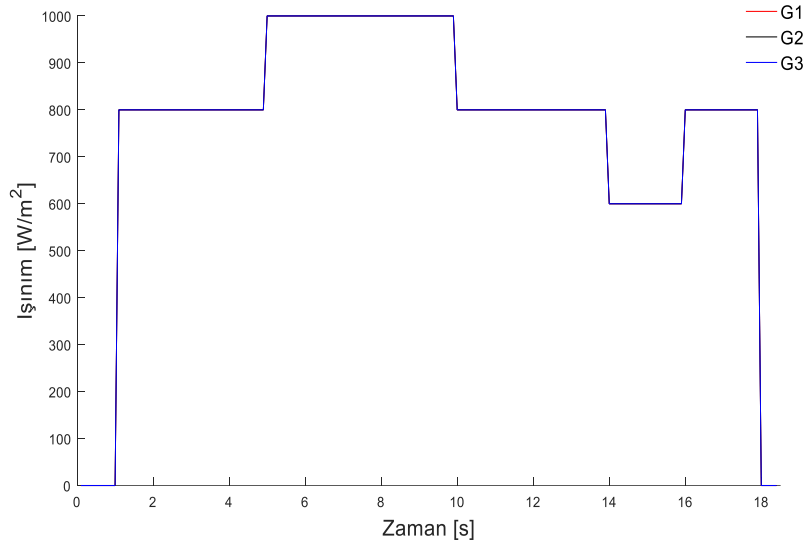
- PV modelin akımı ile PV emülatörün akım değerleri yüksek oranda birbirleriyle örtüşmektedir (Şekil 4.2).
- Yine akım değerlerinde olduğu gibi modellerin gerilimleri de, her bir hücre için, yüksek oranda birbirleriyle örtüşmektedirler (Şekil 4.3).
- Gerilim sonuçlarını karşılaştırır grafiğe yakından bakıldığında emülatörün Çizelge 4.1’ de yer alan K_p ve K_i değerleri ile işletilmesi sonucunda bir numaralı hücrenin en iyi tepkiyi verdiği gözlemlenmiştir. Sonuçları daha sayısal bir düzlemde ifade etmek gerekirse, bir numaralı hücre 0.4 saniyeden biraz daha az bir sürede, iki numaralı hücre yaklaşık 0.5 saniyede ve üç numaralı hücre ise 0.6 saniyeden biraz daha fazla bir sürede çalışma noktasına oturmuştur (Şekil 4.4)

K_p değerinin 20 olarak belirlenmesinin ardından K_i değerinin optimize edilmesi için deneyler yapılmıştır. Seri bağlı üç hücrenin de ışınımlarının anlık değerlerini gösterir grafik Şekil 4.5’ de verilmiştir. Yine, seri bağlı hücrelerin sıcaklıklarının da zamanla değişmediği varsayılarak işletilen senaryo süresince 25 °C noktasında sabit kalacak

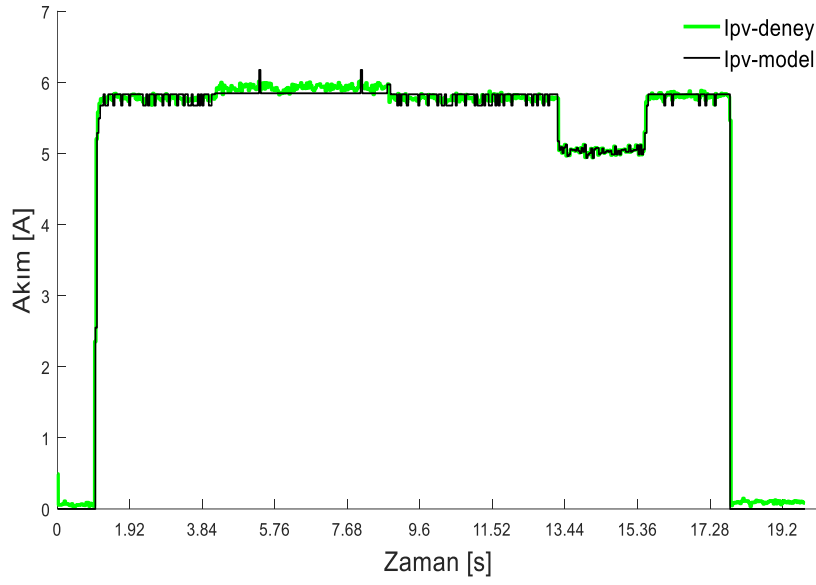
şekilde planlanmıştır. 0 A akım değerinden başlayarak I_{sc} değerine kadar birkaç çalışma noktasında K_i değerlerinin deneysel sonuçlara etkileri incelenmiştir. Şekil 4.6' nın, Şekil 4.7' nin ve Şekil 4.8' in elde edilmesinde kullanılan kontrolörlerin K_i katsayılarına ait değerler Çizelge 4.2' de detaylı bir şekilde verilmiştir.

Çizelge 4.2. K_i değerleri.

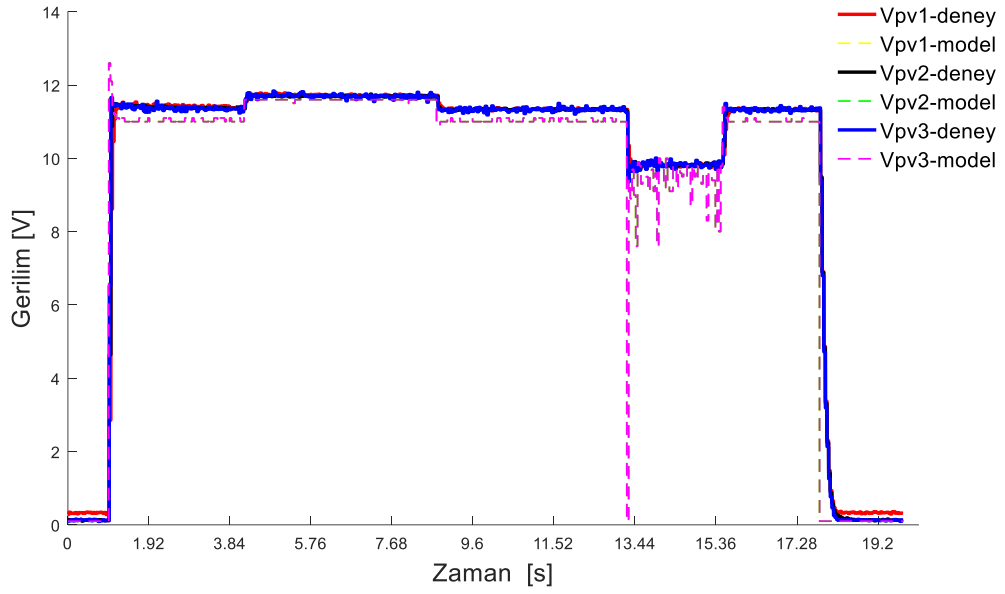
Açıklama	Sembol	Değer
Bir numaralı hücrenin K_i değeri	K_{i1}	1.5
İki numaralı hücrenin K_i değeri	K_{i2}	3
Üç numaralı hücrenin K_i değeri	K_{i3}	5



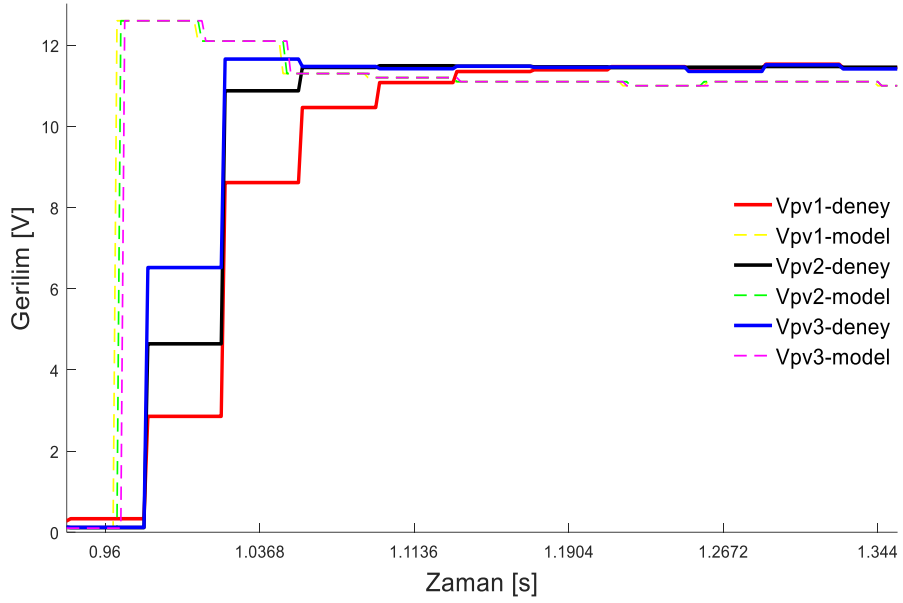
Şekil 4.5 K_i karşılaştırması için PV emülatörü hücrelerine uygulanan ışınım şiddeti değişimi.



Şekil 4.6 Farklı K_i değerleri için PV emülatörü çıkış akımı değişimi.



Şekil 4.7 Farklı K_i değerleri için PV emülatörü hücre gerilimlerinin değişimi.



Şekil 4.8 Hücre gerilimlerinin oturma süreleri (Versiyon-II).

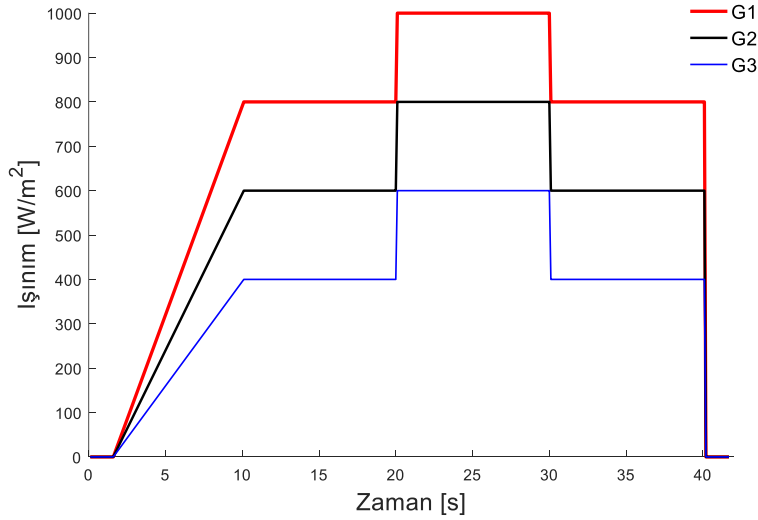
PV emülatörün Çizelge 4.2' de yer alan K_i değerleri ile işletilmesi sonucunda elde edilen sonuçlar maddeler halinde şöyle özetlenebilir:

- PV modelin akımı ile PV emülatörün akım değerleri çok yüksek oranda birbirleriyle örtüşmektedir (Şekil 4.6).
- Modellerin gerilimleri ile her bir hücrenin deneysel sonuçları da akım değerleri gibi oldukça yüksek oranda birbirleriyle örtüşmektedirler (Şekil 4.7).
- Gerilim sonuçlarını karşılaştırır grafiğe yakından bakıldığında emülatörün Çizelge 4.2' de yer alan K_i değerleri ile işletilmesi sonucunda bir numaralı hücrenin en iyi tepkiyi verdiği gözlemlenmiştir. Sonuçlar karşılaştırıldığında, K_i değeri en düşük olan üç numaralı hücre yaklaşık 0.16 saniyelik sürede, K_i değeri orta değer olarak belirlenen iki numaralı hücre yaklaşık 0.14 saniyede ve K_i değeri en yüksek ayarlanan bir numaralı hücre ise yaklaşık 0.04 saniyede çalışma noktasına oturmuştur (Şekil 4.8).

PI kontrolörlerin performansının artırılması adına yapılan çalışmalar sonucunda tüm hücrelerin K_p değerleri 20, K_i değerleri ise 5 olarak belirlenmiştir.

4.2 Senaryo 1

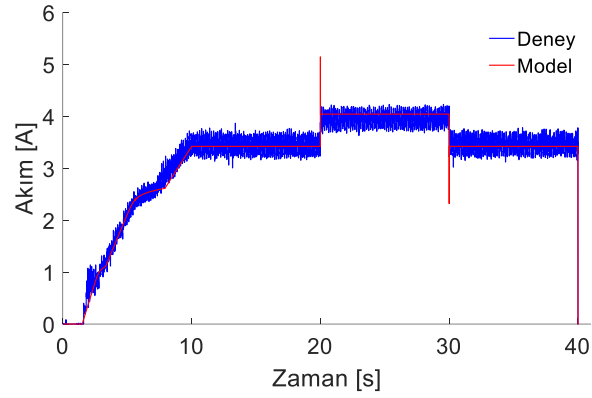
Eklem sıcaklıklarının zamanla değişmediği ve 25 °C olduğu bu senaryo gereği ilk başta 1.7 saniyelik süre boyunca hiçbir PV hücresi güneş ışığı almıyor durumdadır. Daha sonra her bir seri bağlı hücre 8.3 saniye boyunca farklı eğim açılarında sahip birer rampa fonksiyonları şeklinde artan güneş ışınımına tabi tutulmuştur. Ardından 10 saniye boyunca hücrelerin aldıkları ışınım değerleri sabit şekilde seyrettikten sonra her bir hücre üzerindeki gölgenin bir anda azaldığı varsayılarak her bir hücre için anlık bir şekilde hücrelerin aldıkları ışınım değerleri 200 W/m² kadar yükseltip 10 saniye boyunca aynı seviyede seyretmiştir. Son olarak her bir hücrenin aldığı ışınım değerleri tekrar anlık bir şekilde yükselmeden önceki değerlerine düşürülmüş, yani hücrelerin ışınım değerleri 200 W/m² kadar düşürülmüş ve 10.1 saniye boyunca hücrelerin aldıkları ışınım değerleri sabit şekilde seyretmiştir. Senaryo gereği son olarak tüm hücrelerin ani bir şekilde gölgelendiği varsayılarak aldıkları ışınım değerleri 0 W/m² değerine düşmüştür. Senaryoya ait hücrelerin aldıkları ışınım değerlerini gösterir grafik Şekil 4.9’ da verilmiştir.



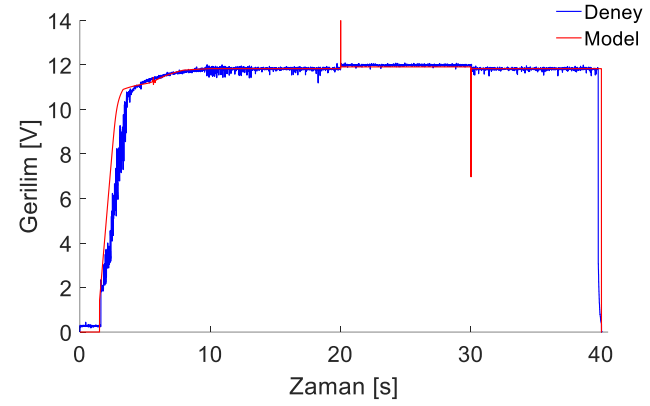
Şekil 4.9 Senaryo 1 gereği hücrelerin aldıkları ışınımın zamanla değişimi.

Şekil 4.10-a’ da emülatörün yükü %60 olacak şekilde işletilmesi sonucunda elde edilen çıkış akımı değeri ile MATLAB programında aynı yük için oluşturulan PV modelinden elde edilen akım değerleri karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Emülatörün çalıştığı bu akım değerine karşılık gelen hücrelerin gerilim değerleri ile yine MATLAB programında

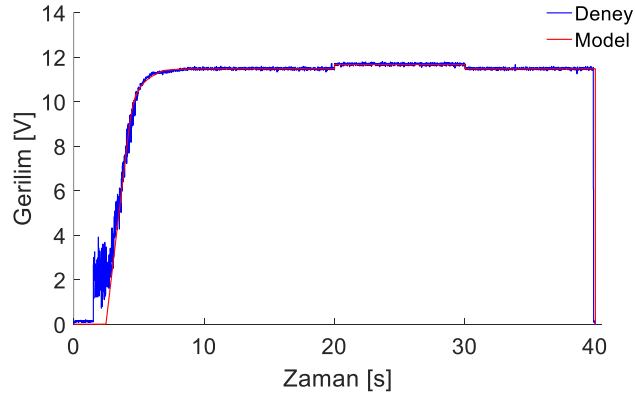
oluşturulan PV modelden elde edilen gerilim değerleri karşılaştırmalı bir şekilde verilmiştir (şekil 4.10-b, c ve d). Grafikler MATLAB programı vasıtasıyla elde edilmiştir.



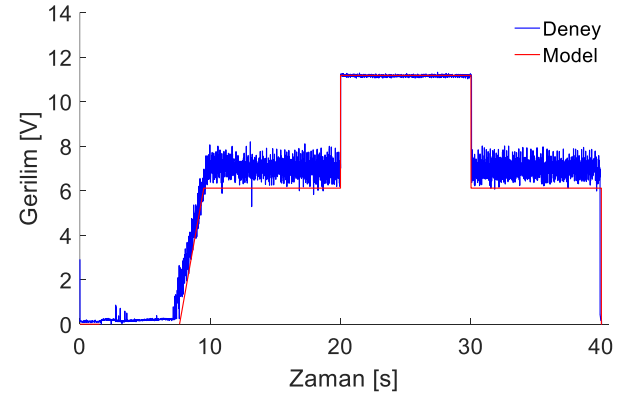
(a)



(b)



(c)

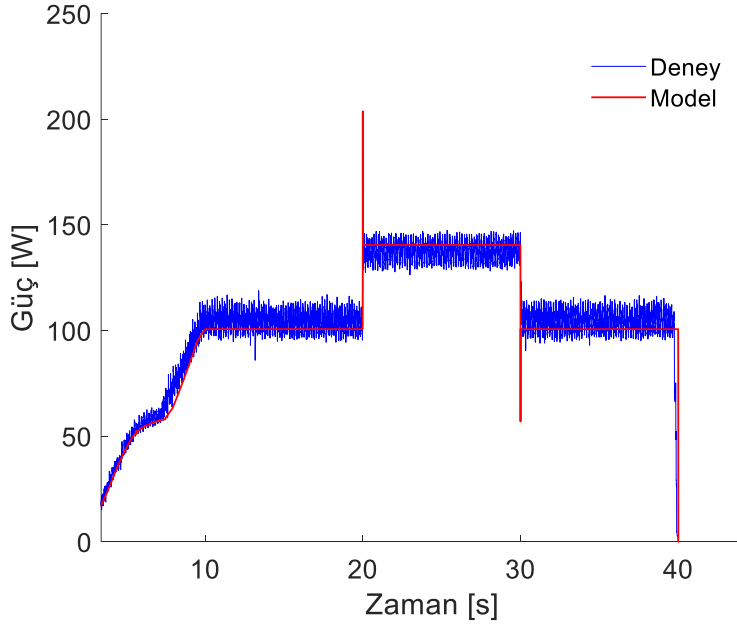


(d)

Şekil 4.10 Senaryo 1 için deney ve model sonuçlarının karşılaştırılması. (a) Akım değerleri, (b) birinci dizi gerilim değerleri, (c) ikinci dizi gerilim değerleri, (d) üçüncü dizi gerilim değerleri.

Senaryo 1' in işletilmesi sonucunda elde edilen sonuçlar maddeler halinde şöyle özetlenebilir:

- PV modelin akımı ile PV emülatörün akımları oldukça yüksek oranda birbirleriyle örtüşmektedir (Şekil 4.10-a).
- Şekil 4.10-b, c ve d' de seri bağlı hücrelerin modelden ve PV emülatörden elde edilen gerilim değerleri karşılaştırıldığında hücrelerin aldıkları ışınım miktarı arttıkça korelasyonunun da arttığını söylemek mümkündür.
- Kontrolörler 40 ms gibi kısa bir sürede tepkilere cevap verebildikleri için ışınım karakteristiklerinin değiştiği noktalarda emülatör çalışma noktasını oldukça hızlı bir şekilde yakalamaktadır.
- Işınımların rampa fonksiyonu şeklinde arttığı ve ani bir şekilde arttığı ve azaldığı durumlarda PV emülatör, modeli oldukça yüksek oranda taklit edebilmektedir.

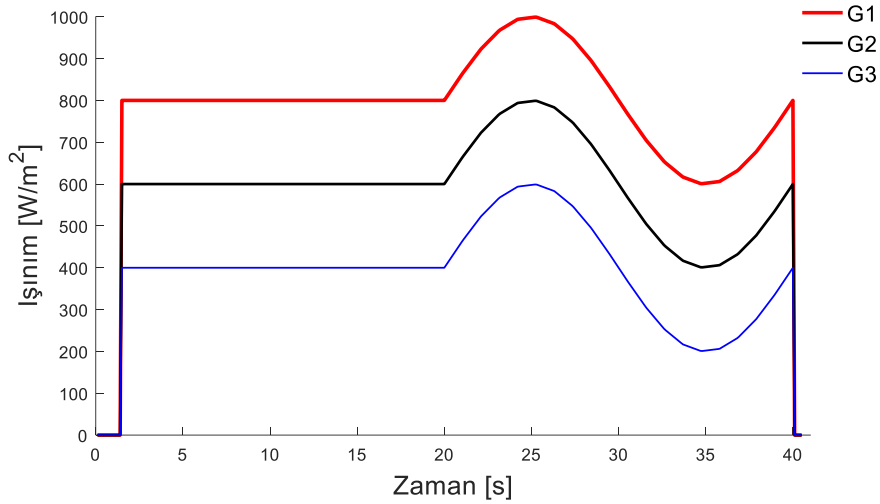


Şekil 4.11 Senaryo 1 için deney ve model güç sonuçlarının karşılaştırılması.

Ayrıca, Şekil 4.11' de senaryonun yürütülmesi sonucunda elde edilen deney ve model güç sonuçlarını karşılaştırır grafik verilmiştir. PV emülatörün ve modelin %60 oranında yük durumunda olmasından dolayı azami güç 150 W seviyelerine kadar çıkmıştır. Yine burada hücrelerin aldıkları ışınımlar azami gücü etkileyen faktörlerdir.

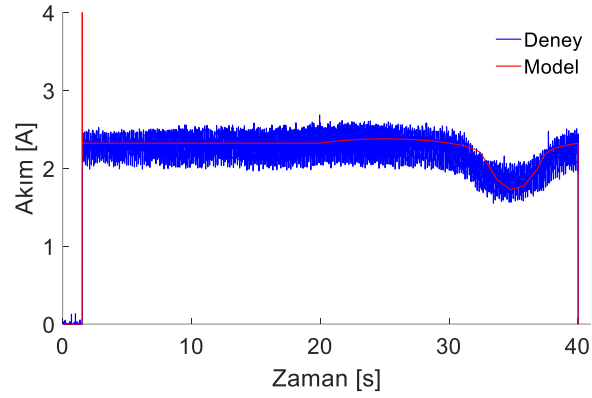
4.3 Senaryo 2

PV panelin eklem sıcaklığının zamanla değişmediği ve 25 °C olduğu bu senaryo gereği ilk başta 1.4 saniye boyunca hiçbir hücre güneş ışığı almıyor durumdadır. Daha sonra her bir seri bağlı hücre ani bir şekilde ışınım almaya başlamıştır. Seri bağlı hücrelerden ilki 800 W/m², ikincisi 600 W/m² ve üçüncüsü de 400 W/m² ışınım değerlerine ani bir şekilde set olmuşlar ve 18.6 saniye süresince bu ışınımlarla çalışmışlardır. Ardından yumuşak bir geçiş sağlamak adına periyodu 20 saniye olan bir sinüs dalgası şeklinde bir ışınım aldıkları varsayılmıştır. Senaryo gereği son olarak tüm hücrelerin ani bir şekilde gölgelendiği varsayılarak aldıkları ışınım değerleri 0 W/m² değerine, eklem sıcaklıkları ise 0 °C' ye düşmüştür. Senaryoya ait hücrelerin aldıkları ışınım değerlerini gösterir grafik Şekil 4.12' de verilmiştir.

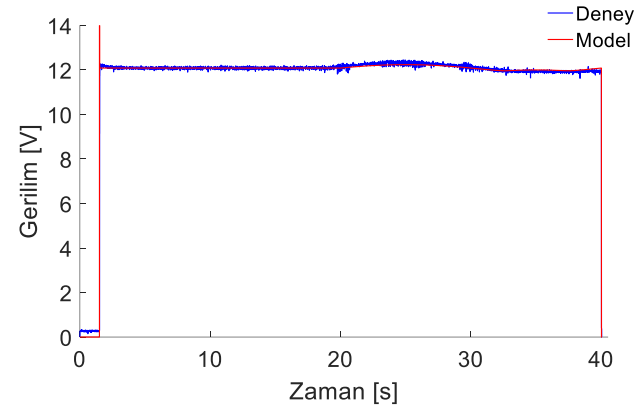


Şekil 4.12 Senaryo 2 gereği hücrelerin aldıkları ışınımların zamanla değişimi.

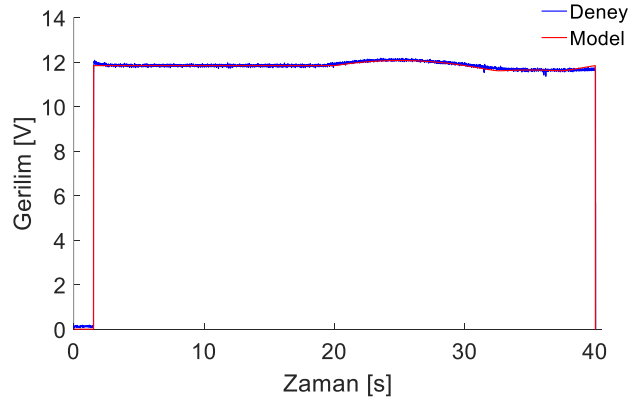
Şekil 4.13-a' da emülatörün yükü %40 olacak şekilde işletilmesi sonucunda elde edilen çıkış akımı değeri ile MATLAB programında aynı yük için oluşturulan PV modelinden elde edilen akım değerleri karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Emülatörün çalıştığı bu akım değerine karşılık gelen hücrelerin gerilim değerleri ile yine MATLAB programında oluşturulan PV modelden elde edilen gerilim değerleri karşılaştırmalı bir şekilde verilmiştir (Şekil 4.13-b, c ve d). Grafikler MATLAB programında elde edilmiştir.



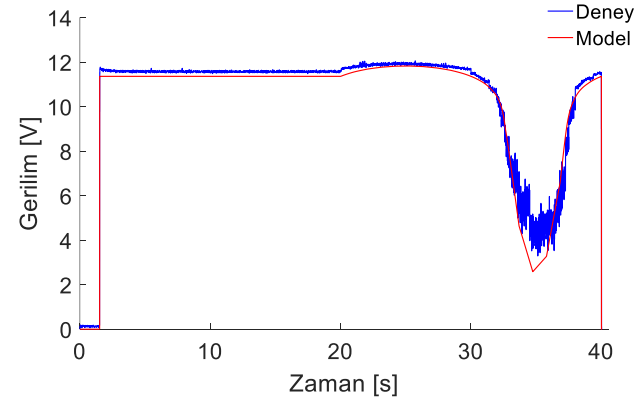
(a)



(b)



(c)

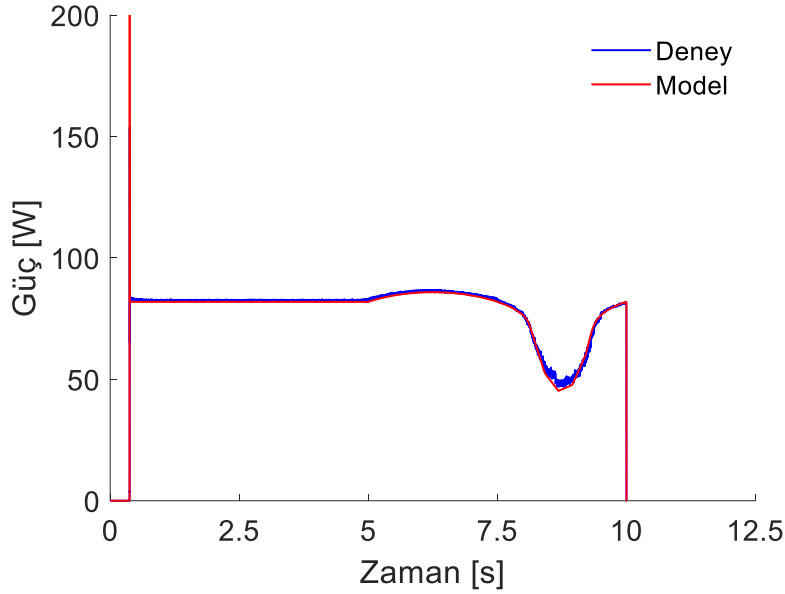


(d)

Şekil 4.13 Senaryo 2 için deney ve model sonuçlarının karşılaştırılması. (a) Akım değerleri, (b) birinci dizi gerilim değerleri, (c) ikinci dizi gerilim değerleri, (d) üçüncü dizi gerilim değerleri.

Senaryo 2' nin işletilmesi sonucunda elde edilen sonuçlar maddeler halinde şöyle özetlenebilir:

- PV modelin akımı ile PV emülatörün akımları oldukça yüksek oranda birbirleriyle örtüşmektedir (Şekil 4.13-a).
- Şekil 4.13-b, c ve d' de seri bağlı hücrelerin modelden ve emülatörden elde edilen gerilim değerleri karşılaştırıldığında hücrelerin aldıkları ışınım miktarı arttıkça örtüşmenin de arttığını söylemek mümkündür.
- Kontrolörler 40 ms gibi kısa bir sürede tepkilere cevap verebildikleri için ışınım karakteristiklerinin değiştiği noktalarda emülatör çalışma noktasını oldukça hızlı bir şekilde yakalamaktadır.
- Işınımların sinüsoidal biçimde arttığı ve azaldığı durumlarda PV emülatör, modeli oldukça yüksek oranda taklit edebilmektedir.

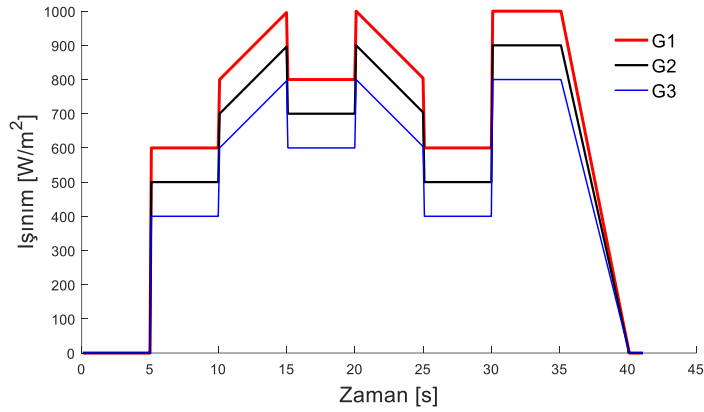


Şekil 4.14 Senaryo 2 için deney ve model güç sonuçlarının karşılaştırılması.

Ayrıca, Şekil 4.14' de senaryonun yürütülmesi sonucunda elde edilen deney ve model güç sonuçlarını karşılaştırır grafik verilmiştir. PV emülatörün ve modelin %40' lık yük durumunda olmasından dolayı azami güç 90 W seviyelerine kadar çıkmıştır. Yine burada hücrelerin aldıkları ışınımlar ve azami gücü etkileyen faktörlerdir.

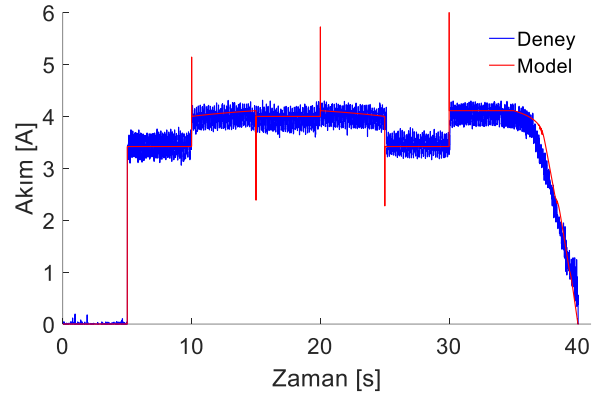
4.4 Senaryo 3

Eklem sıcaklıklarının zamanla değişmediği ve 25 °C olduğu bu senaryo gereği ilk 5 saniyeli zaman dilimi boyunca hiçbir hücre güneş ışığı almıyor durumdadır. Daha sonra her bir seri bağlı hücre ani bir şekilde ışınım almaya başlamıştır. Seri bağlı hücrelerden ilki 600 W/m², ikincisi 500 W/m² ve üçüncüsü de 400 W/m² ışınım değerlerine ani bir şekilde set olmuşlar ve 5 saniye süresince bu ışınım değerleriyle çalışmışlardır. Ardından ışınımalarının yine ani bir şekilde arttığı varsayılarak her bir hücrenin aldıkları ışınım değerleri 200 W/m² kadar artırılmıştır. Ani şekilde gerçekleşen bu artışın ardından her bir hücre 5 saniye boyunca eğim açıları aynı olan birer rampa fonksiyonu şeklinde artan ışınım aldıkları varsayılarak her bir hücrenin ışınım değeri 200 W/m² kadar artırılmıştır. Senaryonun bundan sonraki adımında tüm hücrelerin üzerinde ani bir şekilde gölgelenme olduğu varsayılarak ani bir şekilde her bir hücrenin ışınım değeri sonunda 200 W/m² kadar azaltılmış ve hücreler 5 saniye bu ışınım değerleri ile çalışmışlardır. Ani bir şekilde gerçekleşen bu azalmanın ardından her bir hücre 5 saniye boyunca eğim açıları aynı olan birer rampa fonksiyonu şeklinde gölgelendikleri varsayılarak her bir hücrenin ışınım değeri 200 W/m² kadar azaltılmıştır. Daha sonra gölgelenmenin aniden ortadan kalkmasıyla her bir hücrenin maruz kaldığı ışınım değerleri 400 W/m² kadar artırılmıştır. Senaryo gereği son olarak aldıkları ışınım değerleri her birinin eğimi farklı olan rampa fonksiyonları şeklinde 0 W/m² değerine ve eklem sıcaklıkları ise 0 °C değerine set edilmiştir. Senaryoda tüm hücrelerin aldıkları ışınımaları gösterir grafik Şekil 4.15’ de verilmiştir.

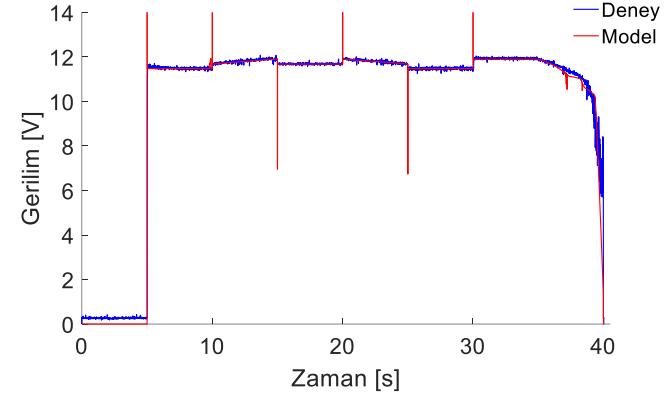


Şekil 4.15 Senaryo 3 gereği hücrelerin aldıkları ışınımın zamanla değişimi.

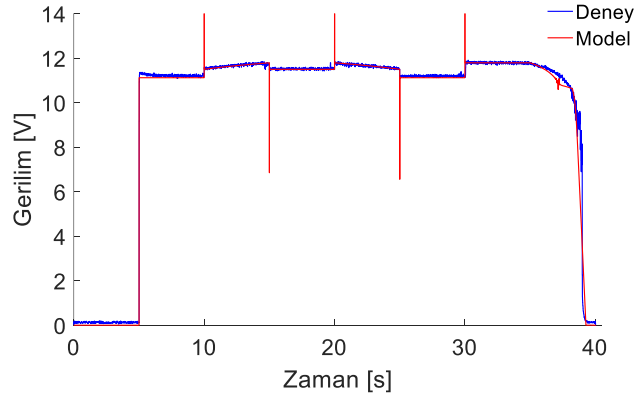
Şekil 4.16-a' da emülatörün yükü %80 olacak şekilde işletilmesi sonucunda elde edilen çıkış akımı değeri ile MATLAB programında aynı yük için oluşturulan PV modelinden elde edilen akım değerleri karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Emülatörün çalıştığı bu akım değerine karşılık gelen hücrelerin gerilim değerleri ile yine MATLAB programında oluşturulan PV modelden elde edilen gerilim değerleri karşılaştırmalı bir şekilde verilmiştir (Şekil 4.16-b, c ve d). Grafikler MATLAB programıyla elde edilmiştir.



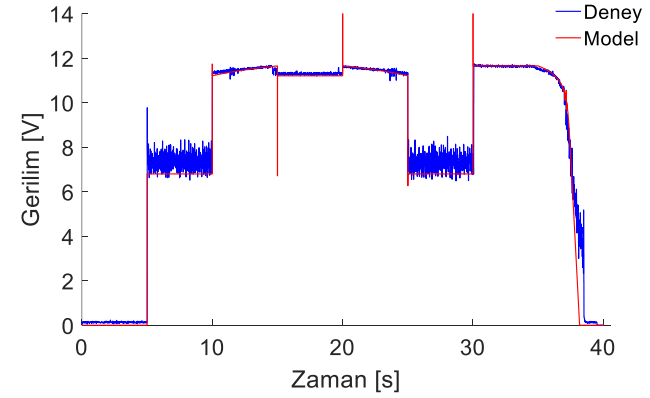
(a)



(b)



(c)

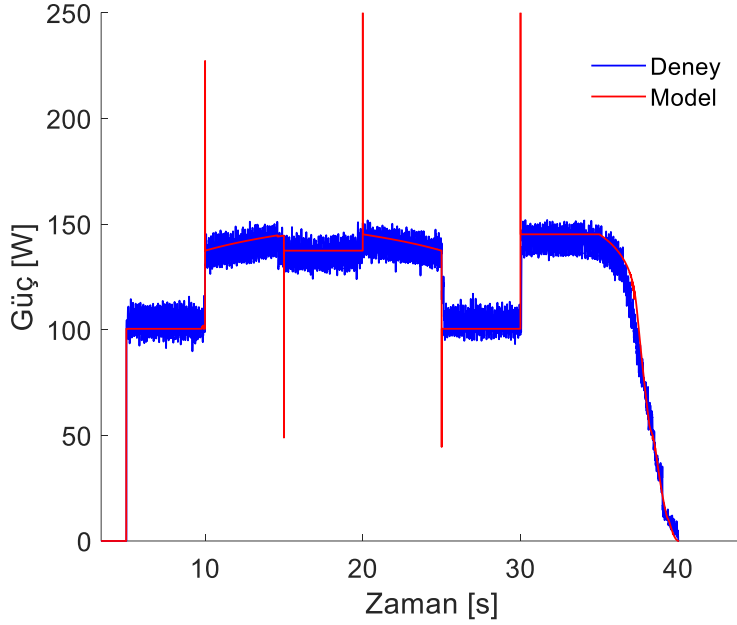


(d)

Şekil 4.16 Senaryo 3 için deney ve model sonuçlarının karşılaştırılması. (a) Akım değerleri, (b) birinci dizi gerilim değerleri, (c) ikinci dizi gerilim değerleri, (d) üçüncü dizi gerilim değerleri.

Senaryo 3' ün işletilmesi sonucunda elde edilen sonuçlar maddeler halinde şöyle özetlenebilir:

- PV modelin akımı ile PV emülatörün akımları oldukça yüksek oranda birbirleriyle örtüşmektedir (Şekil 4.16-a).
- Şekil 4.16-b, c ve d' de seri bağlı hücrelerin modelden ve emülatörden elde edilen gerilim değerleri karşılaştırıldığında hücrelerin aldıkları ışınım miktarı arttıkça örtüşmenin de arttığını söylemek mümkündür.
- Kontrolörler 40 ms gibi kısa bir sürede tepkilere cevap verebildikleri için ışınım karakteristiklerinin değiştiği noktalarda emülatör çalışma noktasını oldukça hızlı bir şekilde yakalamaktadır.
- Işınımların rampa fonksiyonu şeklinde arttığı ve azaldığı ve ani bir şekilde arttığı ve azaldığı durumlarda PV emülatör, modeli oldukça yüksek oranda taklit edebilmektedir.



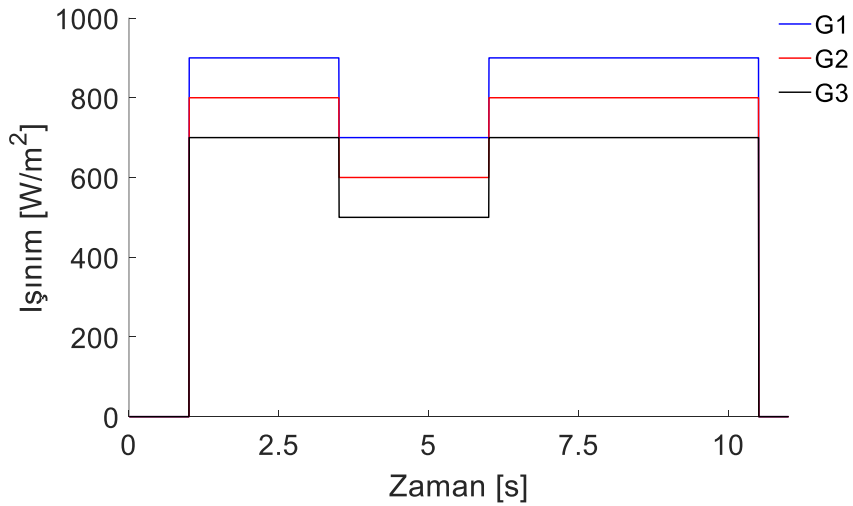
Şekil 4.17 Senaryo 3 için deney ve model güç sonuçlarının karşılaştırılması.

Ayrıca, Şekil 4.17' de senaryonun yürütülmesi sonucunda elde edilen deney ve model güç sonuçlarını karşılaştırır grafik verilmiştir. PV emülatörün ve modelin %60 oranında yük durumunda olmasından dolayı azami güç 150 W seviyelerine kadar çıkmıştır.

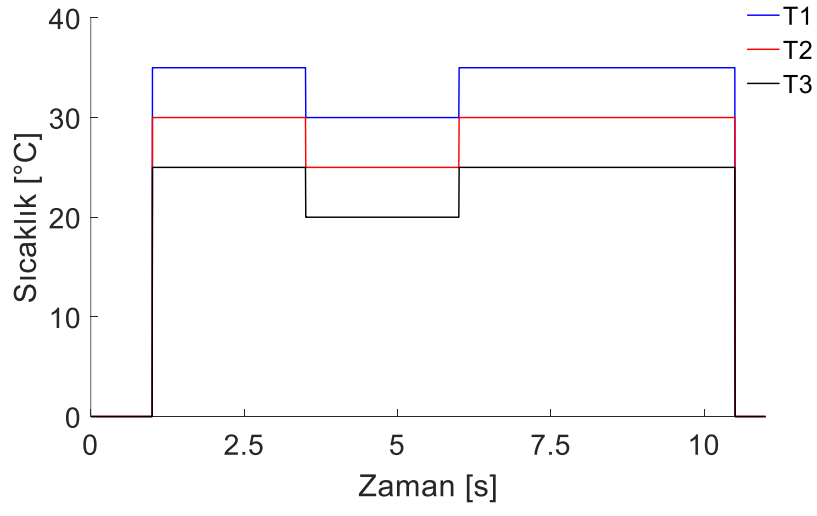
4.5 Senaryo 4

Daha önceki senaryolarda ışınım değerlerinin deneyler sonucunda elde edilen akım ve gerilim değerleri kıyaslanmıştır. Senaryo 4 ile birlikte ışınım ve sıcaklığın etkileri aynı anda gözlenmeye çalışılmıştır. Normal şartlar altında ışınım değerlerinde dalgalanmalar, ani artış ve/veya azalışlar gözüküyor ise belli bir zaman gecikmesi ve ışınım benzer bir karakteristikle hücrelerin sıcaklıklarında da dalgalanmalar, ani artış ve/veya azalışların olması beklenir. Senaryo 4 ve 5 bu minvalde oluşturulmaya ve hem ışınım değerlerinin hem de sıcaklık değerlerinin değişmesinin deneysel sonuçlara nasıl bir etki yaptığı gözlemlenmeye çalışılmıştır. Hücrelerin, Şekil 4.18’ de ışınım ve Şekil 4.19’ da sıcaklık değerlerinin zamanla değişimini gösterir grafikler yer almaktadır.

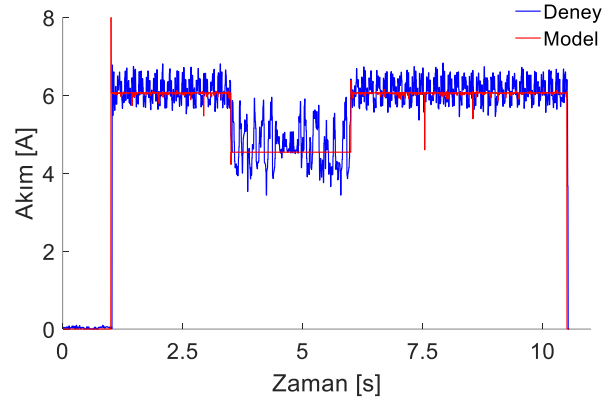
Şekil 4.20-a’ da emülatörün yükü %80 olacak şekilde işletilmesi sonucunda elde edilen çıkış akımı değeri ile MATLAB programında aynı yük için oluşturulan PV modelinden elde edilen akım değerleri karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Emülatörün çalıştığı bu akım değerine karşılık gelen hücrelerin gerilim değerleri ile yine MATLAB programında oluşturulan PV modelden elde edilen gerilim değerleri karşılaştırmalı bir şekilde verilmiştir (Şekil 4.20-b, c ve d). Grafikler MATLAB programıyla elde edilmiştir.



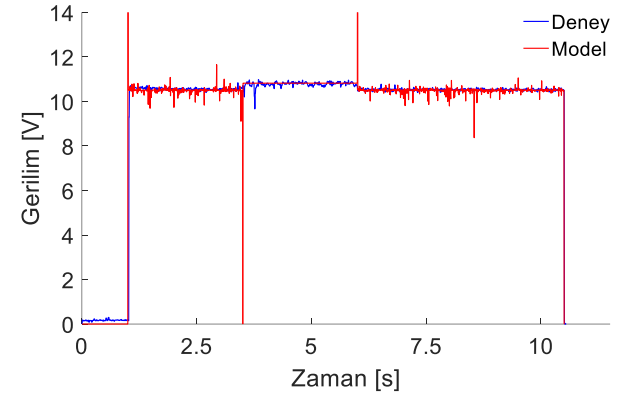
Şekil 4.18 Senaryo 4 gereği hücrelerin aldıkları ışınımın zamanla değişimi.



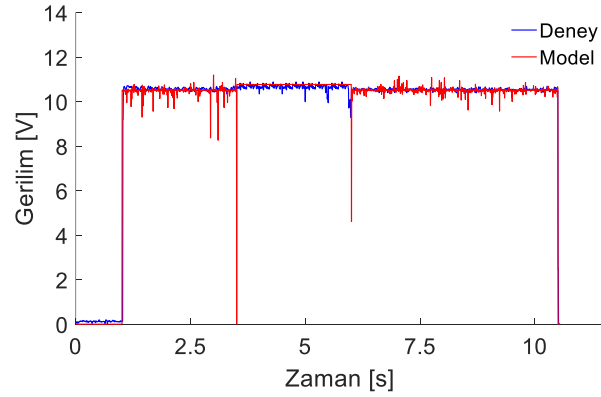
Şekil 4.19 Senaryo 4 gereği hücrelerin sıcaklıklarının zamanla değişimi.



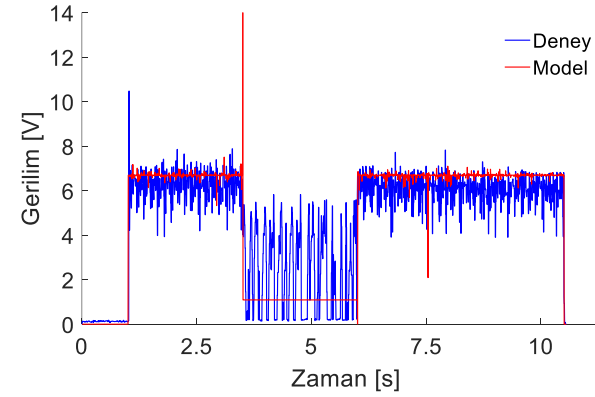
(a)



(b)



(c)

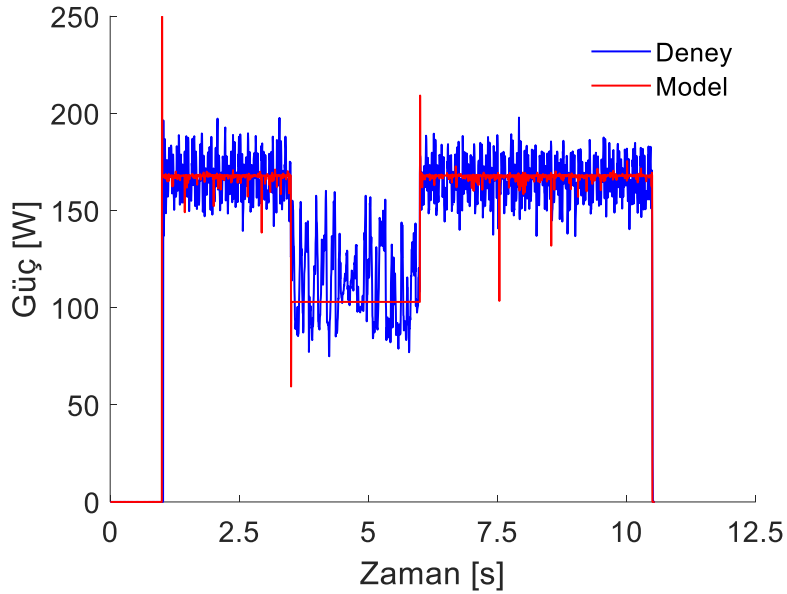


(d)

Şekil 4.20 Senaryo 4 için deney ve model sonuçlarının karşılaştırılması. (a) Akım değerleri, (b) 1 numaralı seri bağlı dizi gerilim değerleri, (c) 2 numaralı seri bağlı dizi gerilim değerleri, (d) 3 numaralı seri bağlı dizi gerilim değerleri.

Senaryo 4' ün işletilmesi sonucunda elde edilen sonuçlar maddeler halinde şöyle özetlenebilir:

- PV modelin akımı ile PV emülatörün akımları oldukça yüksek oranda benzeşmektedir.
- Sıcaklığın da ışınım gibi değiştiği bu senaryoda deney sonucu elde edilen verilerle modelin işletilmesi sonucunda elde edilen veriler birbirleriyle kıyaslandığında sadece ışınımın değişmesi sonucu elde edilen grafiklere nazaran bu senaryoda benzerlik oranı kısmen azalmıştır.
- Kontrolörler 40 ms gibi kısa bir sürede tepkilere cevap verebildikleri için ışınım ve sıcaklık karakteristiklerinin değiştiği noktalarda emülatör çalışma noktasını oldukça hızlı bir şekilde yakalamaktadır.
- Işınlımların ve sıcaklıkların rampa fonksiyonu şeklinde arttığı ve azaldığı durumlarda PV emülatör, modeli oldukça yüksek oranda taklit edebilmektedir.



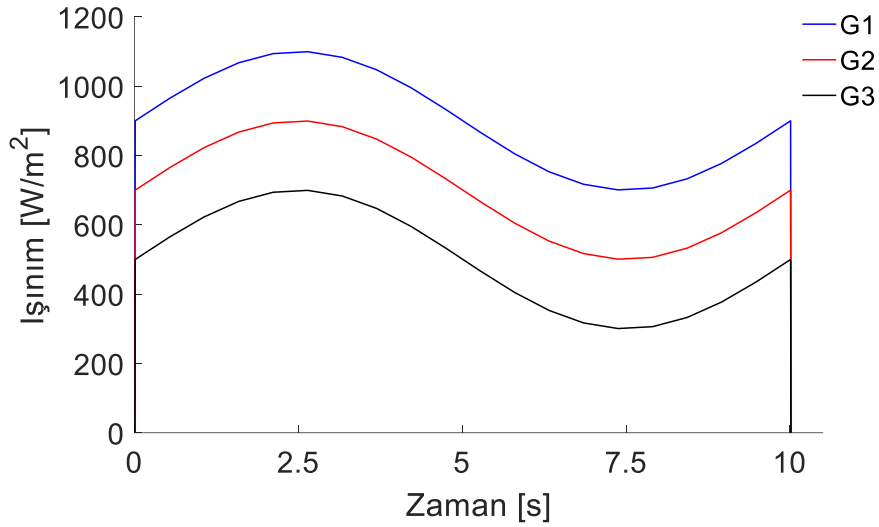
Şekil 4.21 Senaryo 4 için deney ve model güç sonuçlarının karşılaştırılması.

Ayrıca, Şekil 4.21' de senaryonun yürütülmesi sonucunda elde edilen deney ve model güç sonuçlarını karşılaştırır grafik verilmiştir. PV emülatörün ve modelin %80 oranında yük durumunda olmasından dolayı azami güç 170 W seviyelerine kadar çıkmıştır. Yine burada hücrelerin aldıkları ışınımlar ve hücrelerin sıcaklıkları azami gücü etkileyen faktörlerdir.

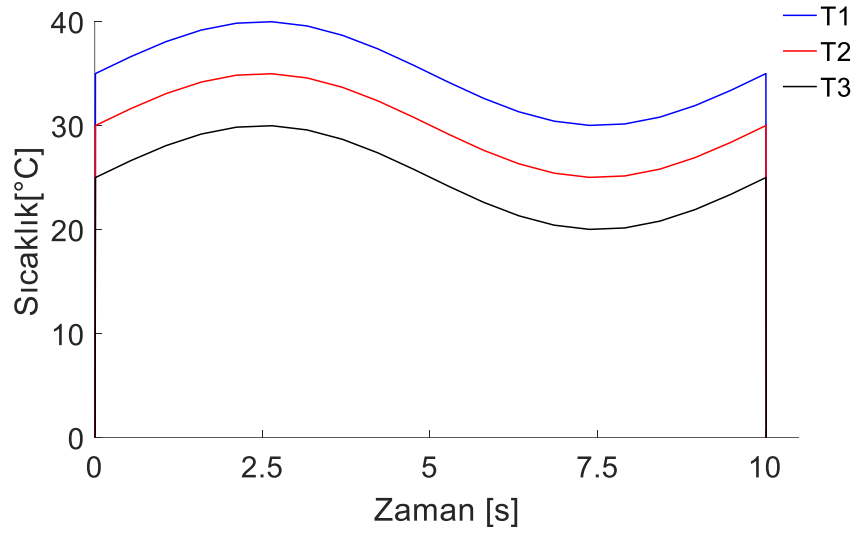
4.6 Senaryo 5

Hücre sıcaklıklarının ve ışınımlarının periyodu 10 saniye olan bir sinüs dalgası şeklinde değişiklik gösterdiği bu senaryoya ait hücrelerin aldıkları ışınımların ve sıcaklıklarının zamana göre nasıl değiştiğini gösterir grafikler sırasıyla Şekil 4.22' de ve Şekil 4.23' de yer almaktadır.

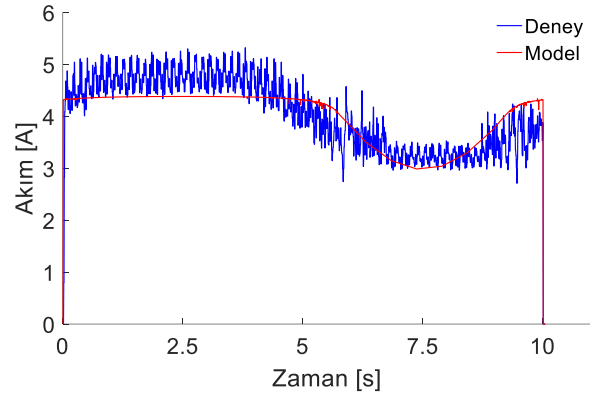
Şekil 4.24-a' da emülatörün yükü %60 olacak şekilde işletilmesi sonucunda elde edilen çıkış akımı değeri ile MATLAB programında aynı yük için oluşturulan PV modelinden elde edilen akım değerleri karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Emülatörün çalıştığı bu akım değerine karşılık gelen hücrelerin gerilim değerleri ile yine MATLAB programında oluşturulan PV modelden elde edilen gerilim değerleri karşılaştırmalı bir şekilde verilmiştir (Şekil 4.24-b, c ve d). Grafikler MATLAB programı vasıtasıyla elde edilmiştir.



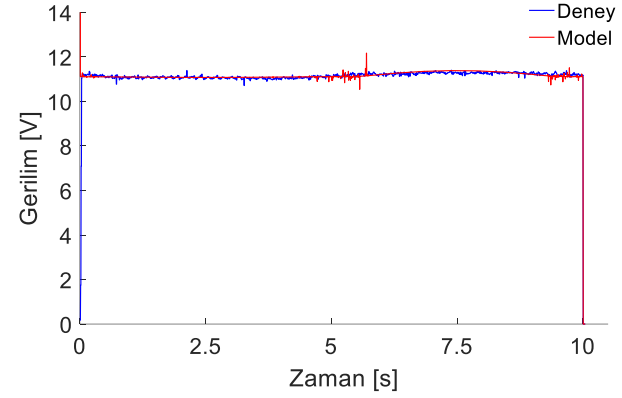
Şekil 4.22 Senaryo 5 gereği hücrelerin aldıkları ışınımların zamanla değişimi.



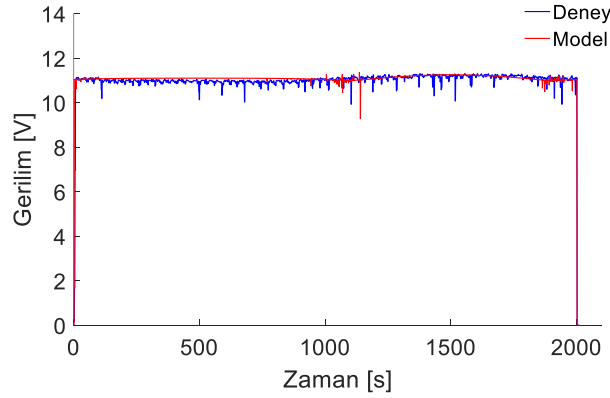
Şekil 4.23 Senaryo 5 gereği hücrelerin sıcaklıklarının zamanla değişimi.



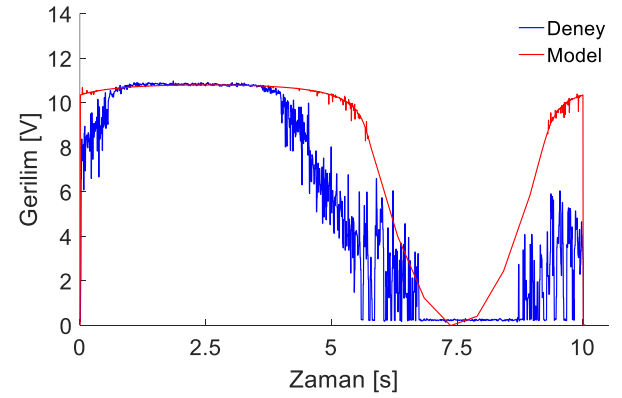
(a)



(b)



(c)

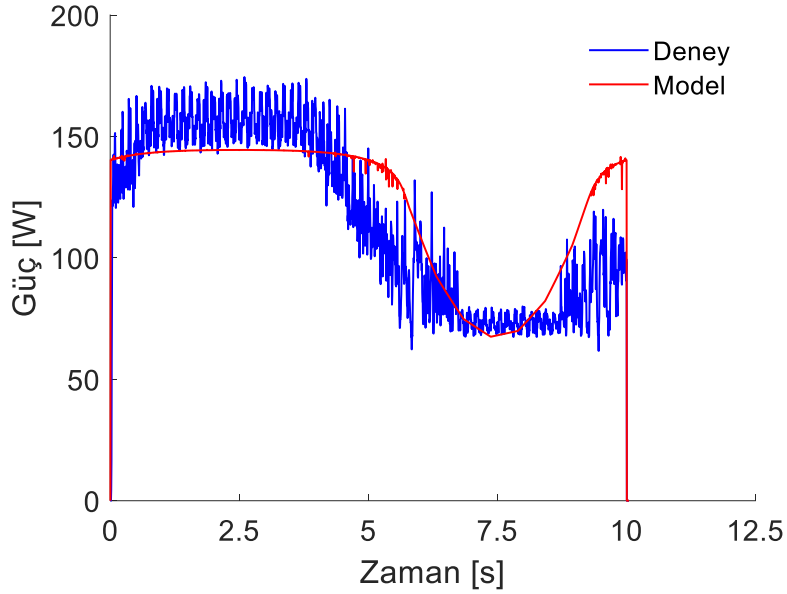


(d)

Şekil 4.24 Senaryo 5 için deney ve model sonuçlarının karşılaştırılması. (a) Akım değerleri, (b) birinci dizi gerilim değerleri, (c) ikinci dizi gerilim değerleri, (d) üçüncü dizi gerilim değerleri.

Senaryo 5' in işletilmesi sonucunda Elde edilen sonuçlar maddeler halinde şöyle özetlenebilir:

- PV modelin akımı ile PV emülatörün akımları oldukça yüksek oranda benzeşmektedir.
- Deney sonucu elde edilen verilerle modelin işletilmesi sonucunda elde edilen veriler birbirleriyle kıyaslandığında sadece ışınımın değişmesi sonucu elde edilen grafiklere nazaran bu senaryoda benzerlik oranı kısmen azalmıştır.
- Kontrolörler 40 ms gibi kısa bir sürede tepkilere cevap verebildikleri için ışınım ve sıcaklık karakteristiklerinin değiştiği noktalarda emülatör çalışma noktasını oldukça hızlı bir şekilde yakalamaktadır.
- Işınımların ve sıcaklıkların sinüsoidal biçimde arttığı ve azaldığı durumlarda PV emülatör, PV modeli oldukça yüksek oranda taklit edebilmektedir.



Şekil 4.25 Senaryo 5 için deney ve model güç sonuçlarının karşılaştırılması.

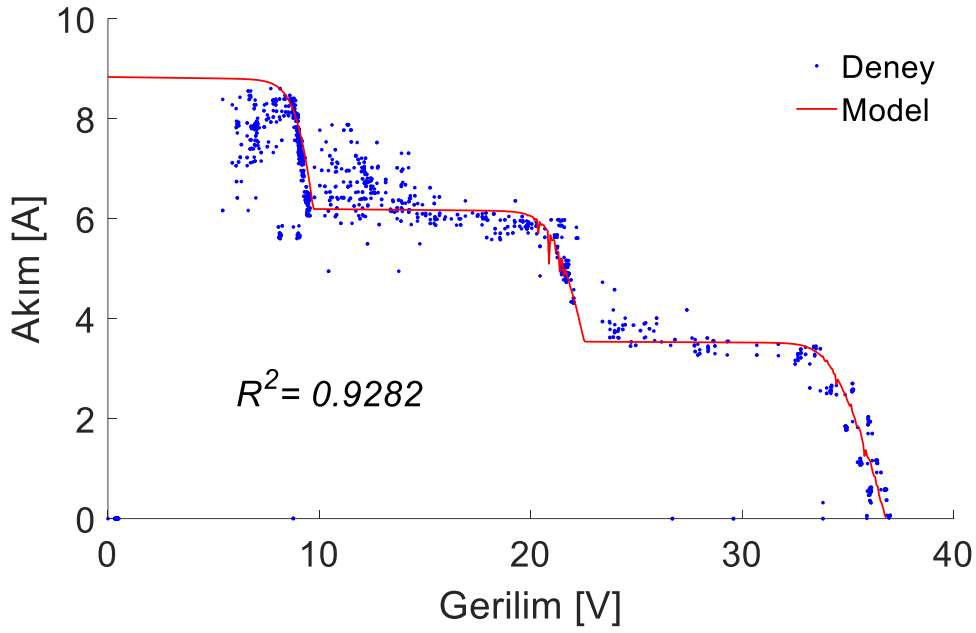
Ayrıca, Şekil 4.25' de senaryonun yürütülmesi sonucunda elde edilen deney ve model güç sonuçlarını karşılaştırır grafik verilmiştir. PV emülatörün ve modelin %60 oranında yük durumunda olmasından dolayı azami güç 140 W seviyelerine kadar çıkmıştır. Yine burada hücrelerin aldıkları ışınımlar ve hücrelerin sıcaklıkları azami gücü etkileyen faktörlerdir.

4.7 I-V Karakteristiği

PV sistemlerinin en önemli özelliklerinden birisi PV modülünün I-V karakteristik eğrisidir. Bir PV modülünün I-V eğrisi o modülün açık devre gerilimi, kısa devre akımı, azami nominal gücü, azami akımı, azami gerilimi ve modülün verimi gibi birçok hususta önemli performans bilgilerini kullanıcılara sunar. Bu parametreler PV sistemlerini kullanmak, test etmek, kalibre etmek, devreye almak, tasarlamak, bakım yapmak ve kontrol etmek açısından oldukça önemlidir.

Bir PV modülünün I-V karakteristiğini ölçme noktasında kullanılabilecek en basit yöntem değişken bir direnç kullanmaktır. Bu tez kapsamında tasarlanan PV emülatörün I-V karakteristiğini çıkarma noktasında değişken direnç yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntem gereği emülatörün yükü sonsuzdan sıfıra kadar ve hemen ardından sıfırdan sonsuza kadar sürülmüştür. Böylece akım ve gerilim değerleri direnç değerinin değişmesi ile değişiklik göstermiştir.

Kısmi gölgelenme etkilerini analiz edebilmek adına seri bağlı üç PV dizisinin de ayrı ayrı ışınlamalar aldıkları varsayılmıştır. En yüksek ışınlam alan dizinin ışınlam değerı 1000 W/m^2 , orta değerde ışınlam alan dizinin ışınlam değerı 700 W/m^2 ve en düşük ışınlam alan dizinin ışınlam değerı ise 400 W/m^2 olarak belirlenmiş ve I-V karakteristiği çıkarılmıştır. Emülatörün ve modelin I-V karakteristiklerini gösterir grafik Şekil 4.26' da verilmiştir.



Şekil 4.26 Deneysel sonuçlardan ve PV modelinden elde edilen I-V karakteristikleri.

4.8 Hata Analizleri

Tasarlanan PV emülatörle alınan deneylerin sonuçları ile MATLAB programında PV modelinin çalıştırılmasıyla elde edilen sonuçlar arasında ne oranda farklılıklar olduğunu gözlemlemek adına hata analizleri yapılmıştır. Bu bağlamda verilere mutlak hataların integrali (IAE), kök ortalama kare hatası (RMSE) ve R kare (R^2) formülleri uygulanarak Çizelge 4.3 elde edilmiştir.

IAE genellikle kontrol sistemlerinde ve tahmin uygulamalarında kullanılan bir hata analizi türüdür. IAE, zaman içindeki hatayı bütünleştirir. IAE hesaplamasında kullanılan formül Denklem 4.2' de verilmiştir. Denklem 4.2 MATLAB programında kullanılarak IAE değerleri hesaplanmıştır.

$$IAE = \sum_{j=1}^n (y_j - y'_j) \quad (4.2)$$

RMSE tahmin hatalarının standart sapmasıdır. Tahmin hataları, regresyon hattı veri noktalarının ne kadar uzakta olduğunun bir ölçüsüdür. RMSE ise bu tahmin hatalarının

nasıl dağıldığının bir ölçüsüdür. Başka bir deyişle RMSE değeri verinin en uygun çizgi etrafında ne kadar konsantre olduğunu gösterir. RMSE hesaplamasında kullanılan formül Denklem 4.3' de verilmiştir. Denklem 4.3 MATLAB programında kullanılarak RMSE değerleri hesaplanmıştır.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (y_j - y'_j)^2} \quad (4.3)$$

R^2 , bir regresyon modelinde bağımsız bir değişken veya değişkenler tarafından açıklanan bağımlı değişken için varyans oranını temsil eden istatistiksel bir ölçüdür. Korelasyon, bağımsız ve bağımlı bir değişken arasındaki ilişkinin gücünü açıklarken, R^2 bir değişkenin varyansının ne kadarının ikinci değişkenin varyansını açıkladığını gösterir (İnt. Kyn. 4). R^2 analizi yapılırken MATLAB programı bünyesinde yer alan 'corrcoef' komutu kullanılmıştır.

Çizelge 4.3 dikkatlice incelenecek olursa R^2 değerlerinin bire çok yakın olması tasarlanan PV emülatörün modeli oldukça yüksek oranda taklit ettiğini göstermektedir. Sıcaklıkların sabit tutulup sadece ışınımın değiştirildiği senaryolarda ışınımı yüksek olan hücrelerin RMSE ve IAE değerlerinin büyük olduğu ve dolayısıyla R^2 değerlerinin daha küçük olduğu görülmüştür. Yine RMSE ve IAE değerlerinin sıcaklıkların da değiştiği senaryolarda sadece ışınımın değiştiği senaryolara nazaran daha büyük olduğu ve R^2 değerlerinin daha küçük olduğu görülmüştür (Çizelge 4.3).

Çizelge 4.3. IAE, RMSE ve R² değerleri.

		Sıcaklık Sabit (25 °C)			Sıcaklık Değişken	
		Senaryo 1	Senaryo 2	Senaryo 3	Senaryo 4	Senaryo 5
IAE	V1	2005,4	806,77	985,6274	305,75	226,51
	V2	1385,1	432,57	909,9	273,37	279,7171
	V3	3339,4	1503,7	1192,3	1488	2136,5
	I	1042,1	1060	1119,3	676,9	678,4
	P	1006,3	621,25	973,38	515,21	1371,79
RMSE	V1	13,9153	1,1263	6,181	0,3127	2,6301
	V2	4,6457	2,581	5,7	0,3439	3,7975
	V3	30,2409	13,65	13,408	4,4733	40,73
	I	0,6173	3,9316	4,9063	4,0199	2,6293
	P	1,44	0,3571	1,1673	1,1751	5,8149
R²	V1	0,9519	0,8750	0,9868	0,9368	0,8823
	V2	0,9670	0,9929	0,9958	0,9867	0,8727
	V3	0,9887	0,9883	0,9914	0,9115	0,8353
	I	0,9868	0,9089	0,9901	0,9537	0,8547
	P	0,9792	0,8520	0,9895	0,9449	0,8202

5. TARTIŞMA ve SONUÇ

Tez kapsamında kısmi gölgelenme etkilerini modelleyebilen bir PV emülatörü tasarlanmıştır. Bugüne kadar yapılan çalışmalar incelendiğinde emülatör yapılarında ARM tabanlı mikroişlemcilerin kullanıldığı emülatör çalışmalarının sayısı oldukça azdır (Atoche *et al.* 2015). Bu bağlamda PV emülatörün yapısında STM32F407 türü ARM tabanlı işlemci kullanılması çalışmayı daha özgün bir hale büründürmektedir. Yine STM32F407'nin yapısında kullanılan ADC birimleri, zamanlayıcılar ve PWM sinyali üreticileri gibi donanımları kolayca yapılandırılabilen ve işlemciye gömülebilmektedir. Emülatör tasarımında yer alan kullanıcı arayüzü sayesinde kullanıcı 0-1200 W/m² değerleri arasında ışınım değerlerinin ve 0-50 °C arasında sıcaklık değerlerinin yer aldığı senaryolar belirleyerek PV modelinin ve PV emülatörünün I-V karakteristikleri elde edilebilmektedir.

Tasarlanan PV emülatörü her bir PV dizisinin ışınımları ve sıcaklıklarının ani şekilde, rampa fonksiyonu şeklinde, sinüsoidal şekilde ve kare dalga şeklinde değişimlere uğradığı beş farklı senaryo ile test edilmiştir.

Sıcaklıkların sabit kalıp ışınımların ani bir şekilde değişiklik gösterdiği (ani bir şekilde azaldığı ve/veya arttığı) noktalarda tasarlanan PV emülatörünün modele çok yakın bir noktada çalışması emülatörün ani değişimlere karşı iyi tepki verdiğini göstermektedir.

Işınım şiddetlerinin ani bir şekilde değiştiği durumlarda olduğu gibi seri bağlı PV dizilerinin sıcaklıklarının sabit kalıp aldıkları ışınımların rampa fonksiyonu ve sinüsoidal şekilde değişimlere maruz kaldığı durumlarda da yine PV emülatörünün model ile çok yakın bir çalışma noktasında çalışması, emülatörün tüm bu ışınım değişikliklerine iyi tepki verdiğini ve PV modelini yüksek oranda taklit ettiğini göstermektedir.

Yine tüm bu değişimler esnasında çalışma noktasına emülatörün oturma süresi ile modelin oturma süresi arasındaki 40 ms gibi kısa bir süre olması ve emülatörü çalışma noktasında tutması PV emülatörün yapısında bulunan PI tipi kontrolörlerin parametrelerinin başarılı bir şekilde ayarlandığını ve kontrolörlerin görevlerini başarıyla

yerine getirdiklerini göstermektedir.

Sıcaklıkların sabit kaldığı sadece ışınımların değişimler gösterdiği üç farklı senaryonun işletilmesinin ardından hem sıcaklık hem ışınım değerlerinde değişimlerin olması durumunda emülatörün nasıl tepki verdiğini gözlemlemek adına sinüsoidal ve kare dalga şeklinde değişimler gösteren iki farklı senaryo tasarlanarak emülatör test edilmiştir.

Sadece ışınımların değiştiği senaryolarda olduğu gibi hem sıcaklıkların hem de ışınımların değiştiği senaryolarda da emülatörün çalışma noktasına oturma süresinde ve çalışma noktasında tutulmasında bir olumsuz değişiklik gözlemlenmemiştir. PV emülatörünün model ile çok yakın bir çalışma noktasında çalışması emülatörün tüm bu ışınım ve sıcaklık değişikliklerine iyi tepki verdiğini göstermektedir. Fakat sadece ışınımların değişiklik gösterdiği senaryolara nazaran hem ışınım hem sıcaklığın değiştiği bu iki senaryoda emülatör ile model çalışma noktaları arasındaki fark biraz daha fazladır. Çizelge 4.3’de yer alan hata değerleri ve yine bulgular kısmındaki grafiklerin örtüşmeleri emülatörün PV modelini yüksek oranda taklit edebildiği göstermektedir.

Emülatörün I-V karakteristiği süpürme analizi yöntemi ile çıkarılmış ve sonuç olarak emülatör PV modelinin I-V karakteristiği ile çok yüksek oranda (%92,83) örtüştüğü görülmüştür. Bu da gerçek PV sistemini kullanmak yerine; test etmek, kalibre etmek, tasarlamak, bakım yapmak ve kontrol etmek noktalarında istenilen işlemlerin tasarlanan emülatör üzerinde de gerçekleştirilebileceği anlamını taşımaktadır.

Karta gömülen PV modeli bu tez kapsamında yapay sinir ağı yöntemi ile tasarlanmış ve kontrolör olarak da PI tipi kontrolör kullanılmıştır. Gelecekte PV modelinin daha farklı ve gelişmiş modelleme yöntemleri ile tasarlanması ve PI tipi kontrolörler yerine de uyarlamalı PID (adaptive PID), kendinden ayarlamalı PID (self tuning PID) ve bulanık mantık (fuzzy logic) gibi daha gelişmiş kontrolörler ile emülatör yapılandırılıp testlerin yeniden gerçekleştirilmesi gibi çalışmalar yapılabilecektir. Bir başka araştırma konusu olarak emülatörde kullanılan DC/DC azaltan tip dönüştürücülerin PWM frekansının emülatörün performansı üzerindeki etkisi incelemeye değer olarak değerlendirilmektedir.

Ayrıca, PV emülatörler üzerine çalışmalar yapmayı düşünen araştırmacılar ve üreticiler için bu tezin bir ilham kaynağı olması ve gerekli bilgileri edinebilecekleri bir başvuru kaynağı olması ümit edilmektedir.

6. KAYNAKLAR

- Abbes, D., Martinez, A., Champenois, G. and Robyns, B. (2014). Real time supervision for a hybrid renewable power system emulator. *Simulation Modelling Practice and Theory*, **42**: 53-72.
- Agrawal, J.H. and Aware, M.V. (2012). Photovoltaic system emulator. IEEE International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems, 1-6.
- Agrawal, J.H. and Aware, M.V. (2016). Photovoltaic simulator developed in LabVIEW for evaluation of MPPT techniques. International Conference on Electrical, Electronics and Optimization Techniques, 1142-1147.
- Algaddafi, A., Brown, N., Gammon, R. and Altuwayjiri, S.A. (2015). Effect of PV array emulator on power quality of PV inverter compared to a real PV array. 3rd International Renewable and Sustainable Energy Conference, 1-6.
- Arseven, B. ve Çınar, S.M. (2017). Kısmi gölgelenme etkilerini modelleyebilen bir güneş paneli emülatörü tasarımı. International Advanced Researches and Engineering Congress.
- Atoche, A.C., Castillo, J.V., Ortegon-Aguilar, J., Carrasco-Alvarez, R., Gio, J.S. and Colli-Menchi, A. (2015). A high-accuracy photovoltaic emulator system using arm processors. *Solar Energy*, **120**: 389-398.
- Attivissimo, F., Nisio, A.D., Savino, M. and Spadavecchia, M. (2012). Uncertainty analysis in photovoltaic cell parameter estimation. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, **61**: 1334-1342.
- Ayop, R. and Tan, C.W. (2017). A comprehensive review on photovoltaic emulator. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **80**: 430-452.
- Balakishan, C.H. and Sandeep, N. (2014). Development of a microcontroller based PV emulator with current controlled DC-DC buck converter. *International Journal of Renewable Energy Research*, **4**.
- Bhise, K., Pragallapati, N., Thale, S. and Agarwal, V. (2012). Labview based emulation of photovoltaic array to study maximum power point tracking algorithms. 38th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, 2961-2966.
- Chavarria, J., Biel, D., Guinjoan, F., Poveda, A., Masana, F. and Alarcon, E. (2014).

FPGA-based design of a step-up photovoltaic array emulator for the test of PV grid-connected inverters. *IEEE 23rd International Symposium on Industrial Electronics*, 485-490.

Chavarria, J., Biel, D., Guinjoan, F., Poveda, A., Masana, F. and Alarcon, E. (2014). Low cost photovoltaic array emulator design for the test of PV grid-connected inverters. *11th International Multi-Conference on Systems, Signals & Devices*, 1-6.

Chen, C.C., Chang, H.C., Kuo, C.C. and Lin, C.C. (2013). Programmable energy source emulator for photovoltaic panels considering partial shadow effect. *Energy*, **54**: 174-183.

Chowdhury, S., Chowdhury, S.P., Taylor, G.A. and Song, Y.H. (2008). Mathematical modelling and performance evaluation of a stand-alone polycrystalline PV plant with MPPT facility. *IEEE Power and Energy Society General Meeting-Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century*.

Cordeiro, A., Foito, D. and Fernão Pires, V. (2015). A PV panel simulator based on a two quadrant DC/DC power converter with a sliding mode controller. *International Conference on Renewable Energy Research and Applications*, 928-932.

Cubas, J., Pindado, S. and Victoria, M. (2014). On the analytical approach for modeling photovoltaic systems behavior. *Journal of Power Sources*, **247**: 467-474.

De Blas, M., Torres, J., Prieto, E. and Garcia, A. (2002). Selecting a suitable model for characterizing photovoltaic devices. *Renewable Energy*, **25**: 371-380.

De Soto, W., Klein, S. and Beckman, W. (2006). Improvement and validation of a model for photovoltaic array performance. *Solar Energy*, **80**: 78-88.

Di Piazza, M.C., Pucci, M., Ragusa, A. and Vitale, G. (2010). Analytic versus neural real-time simulation of a photovoltaic generator based on a DC-DC converter. *IEEE Transactions on Industry Applications*, **46**: 2501-2510.

Durago, J.G. (2011). Photovoltaic emulator adaptable to irradiance, temperature and panel specific I-V curves.

Ebrahim, A.F., Ahmed, S.M.W., Elmasry, S.E. and Mohammed, O.A. (2015). *SoutheastCon 2015*, 1-7.

- Erkaya, Y., Moses, P., Flory, I. and Marsillac S. (2015). Development of a solar photovoltaic module emulator. IEEE 42nd Photovoltaic Specialist Conference.
- Gadelovits, S., Sitbon, M. and Kuperman, A. (2014). Rapid prototyping of a low-cost solar array simulator using an off-the-shelf DC power supply. *IEEE Transactions on Power Electronics*, **29**: 5278-5284.
- Gomez-Castaneda, F., Tornez-Xavier, G.M., Flores-Nava, N.M., Arellano-Cardenas, O. and Moreno-Cadenas, J.O. (2014). Photovoltaic panel emulator in FPGA technology using ANFIS approach. 11th International Conference on Electrical Engineering, Computing Science and Automatic Control, 6.
- Gonzalez-Llorente, J., Rambal-Vecino, A., Garcia-Rodriguez, L.A., Balda, J.C. and Ortiz-Rivera, E.I. (2016). Simple and efficient low power photovoltaic emulator for evaluation of power conditioning systems. IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition, 3712-3716.
- Gow, J. and Manning, C. (1999). Development of a photovoltaic array model for use in power electronics simulation studies. *Electric Power Applications*, **146**: 193-200.
- Ishaque, K., Salam, Z. and Syafaruddin (2011). A comprehensive MATLAB Simulink PV system simulator with partial shading capability based on two-diode model. *Solar Energy*, **85**: 2217-2227.
- İçkilli, D., Can, H. ve Parlak, K.S. (2012). Development of a FPGA-based photovoltaic panel emulator based on a DC/DC converter. 38th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, 1417-1421.
- Jin, S. and Zhang, D. (2016). A simple control method of open-circuit voltage for the FPGA-based solar array simulator. IEEE International Conference on Power and Renewable Energy, 209-216.
- Khouzam, K. and Hoffman, K. (1996). Real-time simulation of photovoltaic modules. *Solar Energy*, **56**: 521-526.
- Kim, Y., Lee, W., Pedram, M. and Chang, N. (2013). Dual-mode power regulator for photovoltaic module emulation. *Applied Energy*, **101**: 730-739.
- Koran, A., Sano, K., Rae-Young, K. and Jih-Sheng, L. (2010). Design of a photovoltaic

- simulator with a novel reference signal generator and two-stage LC output filter. *IEEE Transactions on Power Electronics*, **25**: 1331-1338.
- Koutroulis, E., Kalaitzakis, K. and Tzitzilouis, V. (2009). Development of an FPGA-based system for real-time simulation of photovoltaic modules. *Microelectronics Journal*, **40**: 1094-1102.
- Lee, J.P., Min, B.D., Kim, T.J., Kim, J.H., Ryu, M.H., Baek, J.W., Yoo, D.W. and Yoo, J.Y. (2009). Development of a photovoltaic simulator with novel simulation method of photovoltaic characteristics. 31st International Telecommunications Energy Conference, 1-5.
- Lu, D.D.C. and Nguyen, Q.N. (2012). A photovoltaic panel emulator using a buck-boost DC/DC converter and a low cost micro-controller. *Solar Energy*, **86**: 1477-1484.
- Martin-Segura, G., Lopez-Mestre, J., Teixido-Casas, M. and Sudria-Andreu, A. (2007). Development of a photovoltaic array emulator system based on a full-bridge structure. 9th International Conference on Electrical Power Quality and Utilisation, 1-6.
- Masashi, S., Naoki, Y., and Muneaki, I. (2012). Development of Photovoltaic cell emulator using the small scale wind turbine. 15th International Conference on Electrical Machines and Systems, 1-4.
- Midtgard, O.M. (2007). A simple photovoltaic simulator for testing of power electronics. European Conference on Power Electronics and Applications, 1-10.
- Mohan, N., Undeland, T. M. and Robbins, W. P. (1989). *Power Electronics: Converters, Applications, and Design*. John Wiley and Sons Incorporation, New York.
- Özden, Ö., Duru, Y., Zengin, S. ve Boztepe, M. (2016). Design and implementation of programmable PV simulator. 2016 International Symposium on Fundamentals of Electrical Engineering.
- Patel, B.D. and Rana, A. (2016). A pole-placement approach for buck converter based PV array Emulator. IEEE 1st International Conference on Power Electronics, Intelligent Control and Energy Systems, 1-5.
- Piazza, M.C.D. and Vitale, G. (2012). Photovoltaic sources: modelling and emulation.

Springer, London.

- Qingrong, Z., Pinggang, S. and Liuchen, C. (2002). A photovoltaic simulator based on DC chopper. *Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering*, **1**: 257-261.
- Rana, A.V. and Patel, H.H. (2013). Current controlled buck converter based photovoltaic emulator. *Journal of Industrial and Intelligent Information*, **1**.
- Soetedjo, A., Nakhoda, Y.I., Lomi, A. and Hendryono, G.E. (2015). Development of PV simulator by integrating software and hardware for laboratory testing. *International Conference on Automation, Cognitive Science, Optics, Micro Electro-Mechanical System and Information Technology*, 96-100.
- Schofield, D.M.K., Foster, M.P. and Stone, D.A. (2011). Low-cost solar emulator for evaluation of maximum power point tracking methods. *Electronics Letters*, **47**: 208-209.
- Tafticht, T., Agbossou, K., Doumbia, M.L. and Cheriti, A. (2008). An improved maximum power point tracking method for photovoltaic systems. *Renewable Energy*, **33**: 1508-1516.
- Tang, K.H., Chao, K.H., Chao, Y.W. and Chen, J.P. (2012). Design and implementation of a simulator for photovoltaic modules. *International Journal of Photoenergy*, 1-6.
- Tuncay, N., Gökaşan, M. ve Boğosyan, S. (2003). *Güç Elektroniği: Çeviriciler, Uygulamalar ve Tasarım*. Literatür Yayınları, İstanbul.
- Ünsaçar, F. and Eşme, E. (2009). *Grafik Programlama Dili LabVIEW*.
- Vijayakumari, A., Devarajan, A.T. and Devarajan, N. (2012). Design and development of a model-based hardware simulator for photovoltaic array. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, **43**: 40-46.
- Weichao, Z. and Kimball, J.W. (2016). DC-DC converter based photovoltaic simulator with a double current mode controller. *IEEE Power and Energy Conference at Illinois*, 1-6.
- Xenophontos, A., Rarey, J., Trombetta, A. and Bazzi, A.M. (2014). A flexible low-cost

photovoltaic solar panel emulation platform. Proceedings of the Power and Energy Conference at Illinois, 1-6.

Yarıkkaya, S. ve Çınar, S.M. (2015). Bir güneş paneli emülatörü tasarımı. Otomatik Kontrol Ulusal Toplantısı.

Yuan, L., Taewon, L., Peng, F.Z. and Dichen, L. (2009). A hybrid control strategy for photovoltaic simulator. 24th Annual IEEE in Applied Power Electronics Conference and Exposition, 899-903.

Zhao, J. and Kimball, J.W. (2012). A digitally implemented photovoltaic simulator with a double current mode controller. 27th Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition.

İnternet Kaynakları

- 1) <https://whatis.techtarget.com/definition/ARM-processor>, 23.04.2019
- 2) www.st.com/en/microcontrollers-microprocessors/stm32f407-417.html, 28.04.2019
- 3)
www.st.com/content/ccc/resource/technical/document/user_manual/70/fe/4a/3f/e7/e1/4f/7d/DM00039084.pdf/files/DM00039084.pdf/jcr:content/translations/en.DM00039084.pdf, 01.05.2019
- 4) <https://www.investopedia.com/terms/r/r-squared.asp>, 15.06.2019

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Burak ARSEVEN
Doğum Yeri ve Tarihi : Merkez-AFYONKARAHİSAR 01.08.1989
Yabancı Dili : İngilizce
İletişim (Telefon/e-posta) : +905063041656

Eğitim Durumu (Kurum ve Yıl)

Lise : Afyon Anadolu Öğretmen Lisesi, (2003-2007)
Lisans : Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Elektrik-
Elektronik Mühendisliği Bölümü (İngilizce), (2007-
2012)
Yüksek Lisans : Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri
Enstitüsü, Yenilenebilir Enerji Sistemleri Anabilim
Dalı, (2015-2019)

Çalıştığı Kurum ve Yıl : Afyon Kocatepe Üniversitesi Mühendislik Fakültesi
Elektrik Mühendisliği Bölümü (2014-Devam
ediyor.)

Yayınları (SCI ve diğer) :

SCI, SSCI ve AHCI Dışında Taranan Dergilerde Yayımlanan Makaleler:

1- Uçan Rüzgar Türbinleri, 3e Electrotech, 22 Temmuz 2018 (Fatih Onur Hocaoğlu,
ile birlikte)

Uluslararası Konferans ve Sempozyumlardaki Tebliğler:

1- An Experimental Setup Design for Power Electronics Experiments, Conference
on Engineering, IT and Artificial Intelligence, Ağustos 2017(Emre Akarşlan, Rasim
Doğan, Fatih Onur Hocaoğlu, Said Mahmut Çınar, Ahmet Yönetken, Fatih Sertaş, ile

birlikte)

2- Designing a Photovoltaic Panel Emulator to Model Partial Shading Effects,
INTERNATIONAL ADVANCED RESEARCHES & ENGINEERING CONGRESS
2017, Kasım 2017(Said Mahmut Çınar, ile birlikte)