



Designing and performance testing of programmable power supply and DC/DC converter based PV emulators

Süleyman Yarıkkaya¹ , Said Mahmut Çınar^{2*}

¹Computer Programing Department, Afyon Kocatepe University, Afyonkarahisar, 03400, Turkey

²Electrical Engineering Department, Afyon Kocatepe University, Afyonkarahisar, 03200, Turkey

Highlights:

- Two types of photovoltaic panel emulator design based on the programmable power supply and DC/DC converter.
- Performance comparison with the actual data set for the designed PV emulators.
- Realizing the PV emulators by using readily available cheap materials and devices.

Keywords:

- PV panel
- PV emulator
- LabVIEW
- DC/DC buck converter
- Microcontroller

Article Info:

Received: 02.04.2020

Accepted: 27.01.2021

DOI:

10.17341/gazimmfd.713432

Acknowledgement:

This work was supported by Afyon Kocatepe University Scientific Research Projects Council under the 13.FEN.BIL.50 project

Correspondence:

Author: Said Mahmut Çınar
e-mail: smcinar@aku.edu.tr
phone: +90 272 218 2300

Graphical/Tabular Abstract

In this study, programmable power supply (PPS) and DC/DC converter based photovoltaic (PV) emulators are designed, and their performance tests are carried out. In the designed the PV emulator system, PV panel data are firstly inputted to the interface, then, in the interface, the PV model is produced, and an operating point is found according to the data set and load condition; finally, the PV emulators run in this operating point. Results of the PPS or DC/DC converter based emulators are acquired and showed on the interface.

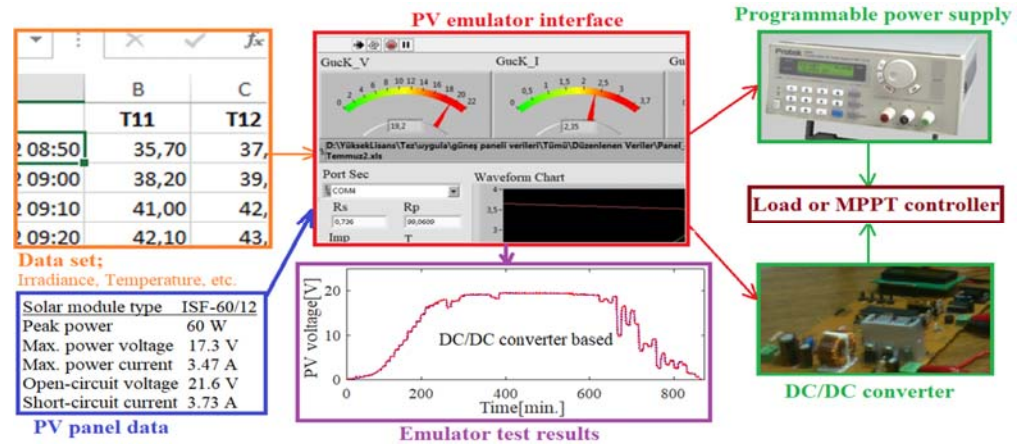


Figure A. The designed PPS and DC/DC converter based emulator system

Purpose:

Since the environmental conditions stochastically vary and are not repeatable, the PV panel emulators are needed to test PV systems in actual conditions and repeat them. It aims to design and realise the PV emulators that can be used in a laboratory environment by using readily available materials and devices.

Theory and Methods:

An interface is designed on the LabVIEW environment to manage the jobs such as; PV modelling, communicating with PPS or DC/DC converter board, data acquisition, and data representation. An evaluation board is designed for the DC/DC converter and controller. Three methods used frequently in the literature to measure the performance of the designed PV emulators; integral absolute error total (IAE), square root of the mean square errors (RMSE) and correlation coefficient (r^2) are selected.

Results:

The designed PV emulators were operated with the data set, which was presented as a clear sunny and partially cloudy two days. Since DC/DC converter based emulator can be operated faster than PPS based emulator, PV model and emulator voltage and power graphics have been observed to be almost identical for DC/DC converter based emulator.

Conclusion:

In this study, PPS and DC/DC converter based PV emulators are designed and tested with actual data set taken from a PV test platform, and their performances were examined according to IAE, RMSE, and r^2 criteria. The DC/DC converter based PV emulator shows higher performance than PPS based PV emulator for all criteria. Also, the correlation coefficient (r^2) shows very high values (> 0.99) for both emulators. This study showed that low-cost PV emulators could be realized using PPS or DC/DC converter.



Programlanabilir güç kaynağı ve DC/DC Dönüştürücü tabanlı PV emülatörlerinin tasarımı ve performans testi

Süleyman Yarıkaya¹ , Said Mahmut Çınar^{2*}

¹Afyon Kocatepe Üniversitesi, Dinar Meslek Yüksekokulu, Bilgisayar Programcılığı Bölümü, 03400 Dinar Afyonkarahisar, Türkiye

²Afyon Kocatepe Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik Mühendisliği Bölümü, 03200, Merkez Afyonkarahisar, Türkiye

Ö N E Ç İ K A N L A R

- Programlanabilir güç kaynağı ve DC/DC dönüştürücü tabanlı iki tip PV emülatörü tasarımı
- Gerçek veri setiyle PV emülatörlerinin performanslarının karşılaştırılması
- PV emülatörlerinin kolay temin edilebilir malzeme ve cihazlarla gerçekleştirilmesi

Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi
Geliş: 02.04.2020
Kabul: 27.01.2021

DOI:

10.17341/gazimmfd.713432

Anahtar Kelimeler:

PV paneli,
PV emülatörü,
LabVIEW,
DC/DC düşüren
dönüştürücü,
mikro-denetleyici

ÖZ

Güneş (photovoltaic-PV) panelleri güneş ışınımından elektrik enerjisi üretiminde yaygın olarak kullanılmaktadır. PV panellerinin elektrik enerjisi üretimi; güneş ışınımı, sıcaklık, yarı iletken karakteristiği, yüzey temizliği ve gölgelenme gibi pek çok parametreye bağlıdır. Bu parametreler rastsal değişim gösterdiğinden ve tekrarlanabilir olmadıklarından dolayı PV sistemlerini gerçek koşullarda test edebilmek ve bu testleri tekrarlayabilmek için PV paneli emülatörlerine ihtiyaç duyulmaktadır. Bu çalışmada programlanabilir güç kaynağı (PGK) ve düşüren tip DC/DC dönüştürücü kullanarak iki PV emülatörü tasarlanmıştır. Ayrıca LabVIEW (Laboratory Virtual Instrument Electronic Workbench) yazılımını kullanarak emülatörlerin kontrolü ve veri toplama işlemlerini yerine getiren bir arayüz geliştirilmiştir. Bu arayüzde; ilk olarak PV panelinin katalog bilgilerine göre modeli üretilmekte, ardından bu model ışınım ve sıcaklık verileriyle çalıştırılmakta ve son olarak PGK veya DC/DC dönüştürücü tabanlı emülatör çıkışına bağlı yükün akımına göre kontrol edilmektedir. Tasarlanan emülatörler açık güneşli ve parçalı bulutlu iki günlük veri setiyle test edilmiş ve performansları incelenmiştir. DC/DC dönüştürücü tabanlı PV paneli emülatörü PGK tabanlı PV emülatörden daha iyi performans gösterdiği görülmüştür.

Designing and performance testing of programmable power supply and DC/DC converter based PV emulators

H I G H L I G H T S

- Two types of PV emulator design based on the programmable power supply and DC/DC converter
- Performance comparison with the actual data set for the designed PV emulators
- Realizing the PV emulators by using readily available cheap materials and devices

Article Info

Research Article
Received: 02.04.2020
Accepted: 27.01.2021

DOI:

10.17341/gazimmfd.713432

Keywords:

PV panel,
PV emulator,
LabVIEW,
DC/DC buck converter,
microcontroller

ABSTRACT

Photovoltaic (PV) panels are widely used to generate electricity from solar irradiance. Electricity generation of the PV panels depends on many parameters such as; solar irradiance, temperature, semiconductor characteristic, surface cleanliness, and shading. Since these parameters stochastically vary and are not repeatable, the PV panel emulators are needed to test PV systems in actual conditions and to repeat them. In this study, two PV emulators are designed using a programmable power supply (PPS) and a DC/DC buck converter. In addition, a graphic user interface (GUI) has been developed using Laboratory Virtual Instrument Electronic Workbench (LabVIEW) software. The interface executes the controlling and data acquisition of PV emulators. In this interface, the model of the PV panel is first produced depending on the parameters given in the PV panel datasheet, then this model is operated with the solar irradiance and temperature data, and finally, it is controlled according to the load current connected to the output of the PPS or DC/DC converter based PV emulator. The designed PV emulators were tested with the data set that represents a clear sunny and partly cloudy two days, and their performances were examined. The DC/DC converter based PV emulator has been shown to perform better than the PPS based PV emulator.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Fosil enerji kaynakları rezervlerinin azalması ve bu kaynakların çevresel zararlarından dolayı enerji üretiminde yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelim her geçen gün artmaktadır. Yenilenebilir enerji kaynakları arasında güneş enerjisi, oldukça fazla kullanılabilir kapasitenin bulunması ve çevreci temiz enerji gibi özellikleriyle ön plana çıkmaktadır. Küresel yenilenebilir enerji topluluğu REN21'in 2019 yılı küresel durum raporuna [1] göre; dünya genelinde güneş enerji santralleri (GES) kurulu gücü bir önceki yıla göre 100GW (yaklaşık %25) artışla 505 GW olarak gerçekleşmiştir. Türkiye'de de dünya ile benzer bir artış gösteren GES kurulu gücü, 2019 için bir önceki yıla göre 1GW (%20) artışla 6 GW değerine ulaşmıştır [2, 3]. Dünya genelinde GES kurulu gücündeki bu artış ise araştırmacıları güneş enerjisi sistemleri üzerinde çalışmalar yapmaya motive etmektedir [4].

Güneş enerji sistemleri güneş (photovoltaic-PV) panelleri ve güç dönüştürücüleri olmak üzere iki temel bileşenden oluşmaktadır. PV panelleri, güneş ışınımını doğrudan elektrik enerjisine dönüştüren ve doğrusal olmayan çıkış karakteristiğine sahip yarı iletken devre elemanlarıdır. Güç dönüştürücüleri ise PV panelleriyle yük/şebeke arasında empedans dengelemesi yapan ve maksimum güç noktası takibi (maximum power point tracking-MPPT) tabanlı kontrolörleriyle PV panellerinden maksimum güç transferini sağlayan cihazlardır [5].

PV panellerinin çıkış karakteristiği; ışınım, sıcaklık, bulutlanma, gölgelenme gibi çevresel koşullara göre değişim göstermektedir. Ancak ne yazık ki söz konusu çevresel koşullar rastsal değişimler sergilemekte ve PV panelleriyle ilgili çalışmalarda gerçekleştirilecek MPPT gibi testlerde bu şartların tekrarlanabilmesi mümkün olamamaktadır. Laboratuvar ortamında kontrollü ışık kaynakları kullanılarak PV panellerinin ışınım şartlarının oluşturulması sağlanabilse de bu hem maliyetli hem de büyük güçler için fazla yer kaplayan bir çözüm olmaktadır. PV emülatörleri ise laboratuvar ortamında MPPT testleri için oldukça pratik ve verimli bir yöntem olarak karşımıza çıkmaktadır.

PV emülatörleri, çevresel koşullar ve PV panel parametrelerine bağlı olarak gerçek bir PV paneliyle aynı çıkış özelliklerini üreten doğrusal olmayan güç kaynaklarıdır. Piyasada ticari olarak üretilmiş profesyonel PV emülatörleri bulunmakla birlikte bu ürünler oldukça pahalı (10.000 \$ ve üzeri) olduğundan dolayı araştırmacılar PV emülatör maliyetlerini düşürme ve performansını arttırma üzerine çalışmalara odaklanmıştır.

PV emülatörleri, PV panel modeli ve güç dönüştürücü olmak üzere iki temel birimden oluşmaktadır. PV panel modeli; ışınım, sıcaklık, gölgelenme ve panel parametrelerine göre PV panel karakteristiğini üretmektedir. Güç dönüştürücü ise panel modeliyle üretilen karakteristiğe uygun olarak PV emülatör çıkışına bağlanan yüke güç transferi sağlamaktadır.

PV emülatör tasarımında diyot tabanlı panel modeli yaygın kullanılmakta ve bu model; tek ve çift diyot yaklaşımı olarak ikiye ayrılmaktadır [6]. Tek diyotlu modelleme yöntemi basit yapısı sebebiyle çok tercih edilmekle birlikte yöntemin doğruluğu çevre koşullarına bağlı olarak azalabilmektedir. Ancak tek diyot modellemenin bu dezavantajı çift diyot yöntemi kullanılarak aşılabilmektedir. Emülatörlerde güç dönüştürücü olarak programlanabilir güç kaynağı (PGK) veya DC/DC dönüştürücüler tercih edilebilmektedir. Düşüren (buck), yükselten (boost) ve tek uçlu birincil indüktör (single-ended primary-inductor converter-SEPIC) dönüştürücüler PV paneli emülatörlerinde yaygın kullanılan DC/DC dönüştürücü çeşitleridir.

PV emülatörlerinde, PV panelinin modellenmesi ve güç dönüştürücüsünün kontrolü için mikro-denetleyiciler, sayısal sinyal işlemciler (digital signal processor-DSP) ve sahada programlanabilir kapı dizileri (field programmable gate arrays-FPGA) gibi gerçek zamanlı kontrolörler kullanılmaktadır. PV panellerinin değişen çevresel ve kısmi gölgeleme koşulları altında emülasyonu, gerçek zamanlı kontrolörlerin yaygınlaşması sayesinde mümkün olabilmektedir [7]. Bir PV emülatörünün tasarım ölçütleri arasında düşük uygulama maliyeti, yüksek doğruluk, düşük karmaşıklık ve değişen çevre koşullarına uyum, verimlilik ve denetleyici platformu türü (mikro-denetleyici, DSP veya FPGA) yer almaktadır [8]. Aşağıda PV emülatörlerin tasarımı ve geliştirilmesine yönelik olarak gerçekleştirilmiş olan çalışmaların literatür özeti sunulmaktadır.

Park vd. [9] PV panelinin katalog bilgilerine dayanan bir benzetim modeli önermiştir. Çalışmalarında öncelikle panelin model parametreleri kapalı-çevrim olarak türetilmiş, ardından yüksek hassasiyet için söz konusu parametrelerin çevrim içi olarak güncellenmesi yöntemi kullanılmıştır. Mai vd. [10] PGK tabanlı yeniden yapılandırılabilir bir PV emülatörü tasarımı gerçekleştirmiştir. PGK tabanlı PV emülatörü kısmi gölgelenme koşulları ve çıkış kısırlama gerilimiyle modellenmiştir. Zhou vd. [11] ışınım almayan bir PV paneli ve kontrollü akım kaynağı kullanarak bir PV emülatörünün kolayca gerçekleştirilebileceğini göstermiştir. Rachid vd. [12] düşüren tip DC/DC dönüştürücü tabanlı pratik bir PV emülatörü tasarımı önermiştir. Bu çalışmada dSPACE firmasının gerçek zamanlı bir kartı kullanılmış ve PV emülatör sonuçları PV paneli benzetim sonuçlarıyla karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Xenophontos vd. [13] sundukları PV emülatörü tasarımında bir PGK'nin LabVIEW (Laboratory Virtual Instrument Electronic Workbench) ortamında hazırlanmış bir arayüz üzerinden kontrolünü önermiştir. Bhise vd. [14] LabVIEW tabanlı seri veya paralel bağlı PV panel dizilerini emule edebilecek bir PV emülatörü tasarımı sunmuştur. Çalışmada LabVIEW ortamında hazırlanmış bir arayüz ve iki PGK kullanılmış ve önerilen emülatörün MPPT ve dağıtılmış MPPT algoritmalarının laboratuvar ortamında testi için kullanılabilmesi gösterilmiştir. Moussa vd. [15] düşük maliyetli ve FPGA tabanlı bir PV emülatörü tasarımı önermiştir. MATLAB yazılımında tasarladıkları döngüde

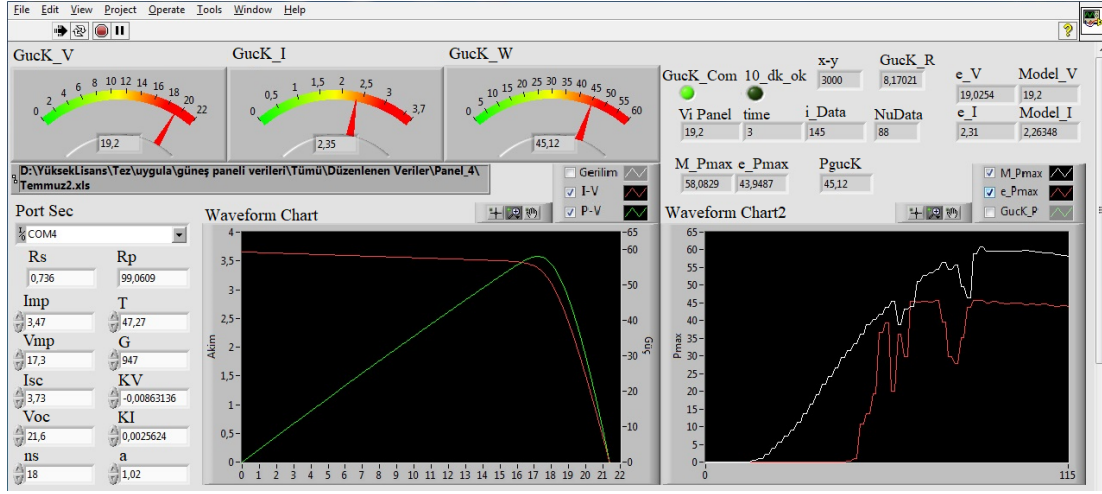
donanım (hardware in loop-HIL) tabanlı emülatör kontrol sisteminden elde ettikleri gerçek zamanlı deneysel ve benzetim sonuçlarını karşılaştırmıştır. Bressan vd. [16] kısmi gölgelenme etkilerini modelleyebilen bir PV emülatörü kullanarak panel üzerinde gölgede kalan sıcak hücrenin önlenmesi için FPGA tabanlı bir kontrolör geliştirmiştir. Önerilen PV emülatörüyle gölgede kalan sıcak hücrenin önlenemediği gerçekleştirilen iki deneysel testle doğrulanmıştır. Kadri vd. [17] iki bölümden oluşan çalışmalarının ilk bölümünde, en iyi bağlantı modeli için PV hücresi devre parametreleri modellemiştir. İkinci bölümde ise dSPACE firmasının kartıyla kontrol edilen bir PGK kullanarak MATLAB/Simulink ortamında gerçek zamanlı bir PV emülatör tasarlamıştır. Kısmi gölgelenme durumu için tasarlanan PV emülatörün $I-V$ (akım-gerilim) ve $P-V$ (güç-gerilim) grafiklerinin, PV modelinin $I-V$ ve $P-V$ grafikleriyle örtüştüğü gösterilmiştir. Razman vd. [18] önerdikleri emülatörde, geleneksel kontrol stratejisi olan $I-V$ PV modeli yerine ikili arama yöntemiyle birleştirilerek iyileştirilmiş $I-R$ (akım-direnç) PV modeline dayanan bir kontrol stratejisi kullanmıştır. Çalışmada emülatörün kalıcı durum ve geçici rejim analizleri sonucunda, önerilen $I-R$ PV modeli kontrol stratejisinin geleneksel $I-V$ PV modeli kontrol stratejisine göre daha yüksek performans gösterdiği görülmüştür. Atoche vd. [19] Cortex-A9 ARM işlemcili bir geliştirme platformu kullanarak PV emülatörü tasarımı gerçekleştirmiştir. Geliştirme platformu Python ile programlanmış ve platform üzerinde bulunan sıvı kristal ekran (liquid-crystal display-LCD) panel kullanıcı arayüzü olarak kullanılmıştır. Poli-kristal, mono-kristal ve ince film PV panelleri için gerçekleştirilen PV emülatörü deneylerinde farklı ışınım ve sıcaklık değerleri için $I-V$ karakteristikleri elde edilmiştir. Emülatör sonuçları MATLAB referans modeli ve deneysel sonuçlarla karşılaştırılmış ve emülatörün yüksek doğrulukla çalıştığı ortaya konulmuştur. Lu vd. [20] düşüren-yükselten DC/DC dönüştürücü ve PICAXE firmasının ucuz bir mikro-denetleyicisiyle bir PV emülatörü tasarımı gerçekleştirmiştir. Tasarlanan emülatörde PV modeli için yüksek mertebeden polinom fonksiyonlar yerine parçalı doğrusal yaklaşım kullanılmış ve bu sayede hesap yükü azaltılmıştır. Gerçekleştirilen testlerde PV emülatörünün etkili ve kullanışlı olduğu rapor edilmiştir. Balato vd. [21] sahada programlanabilir analog dizi (field programmable analog array-FPAA) tipi bir platform kullanarak bir PV emülatörü tasarımı gerçekleştirmiştir. Tasarımda kullanılan FPAA işlemci sayesinde işlem yükü, bellek gereksinimleri, tasarım süresi ve programlama süresi azaltılmıştır. FPAA ile kontrol edilen PGK ve DC/DC dönüştürücü kullanarak gerçekleştirilen iki PV emülatörü hem düzenli hem de kısmi gölgeli ışınım durumları için test edilmiş ve sonuçların tatmin edici olduğu görülmüştür.

Bu çalışmada, birincisi PGK tabanlı, ikincisi gerçek zamanlı mikro-denetleyicisiyle kontrol edilen düşüren tip DC/DC dönüştürücü tabanlı iki PV emülatörü tasarımı gerçekleştirilmiştir. Ayrıca PV emülatörlerini yönetmek ve veri toplama amacıyla LabVIEW ortamında bir arayüz tasarlanmıştır. Tasarlanan emülatörler, gerçek bir PV paneli test platformundan açık güneşli ve parçalı bulutlu iki farklı

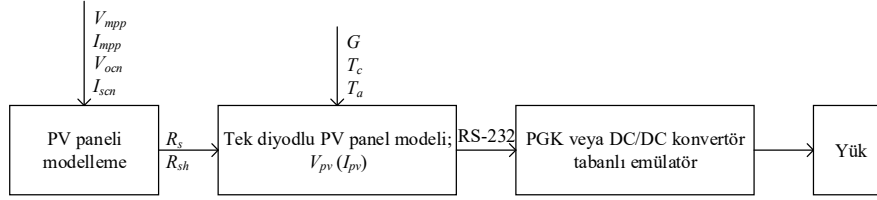
gün için elde edilmiş; ışınım, sıcaklık, PV akım, gerilim ve güç değerlerini içeren veri setleriyle test edilmiştir. Bu sayede tasarlanan iki emülatörün gerçek PV panelini emüle etme performansları karşılaştırmalı olarak incelenebilmiştir. Literatürde gerçekleştirilen çalışmalar incelendiğinde emülatörün günlük gerçek PV paneli verileriyle test edilmediği bunun yerine PV paneli $I-V$ karakteristiği üzerinden performans analizleri göze çarpmaktadır. Makalenin PV sistemleri literatürüne önemli bir katkısı da ucuz ve kolay temin edilebilir cihaz ve malzemeler kullanılarak araştırmacıların kendi PV emülatörlerini yapabileceklerini ortaya koymasındır. Makale üç bölüm şeklinde düzenlenmiştir; ilk olarak Bölüm 2’de PGK ve DC/DC dönüştürücü tabanlı emülatörlerin tasarım ve gerçekleştirme bilgileri ayrıntılı olarak sunulmuştur. Ardından Bölüm 3’de tasarlanan emülatörlerin test aşamaları ve gerçekleştirilen testlerde elde edilen sonuçlar sunulmuştur. Son olarak Bölüm 4’de sonuçlar üzerine tartışılmıştır.

2. GÜNEŞ PANELİ EMÜLATÖRLERİNİN TASARIMI (DESIGN OF THE PV PANEL EMULATORS)

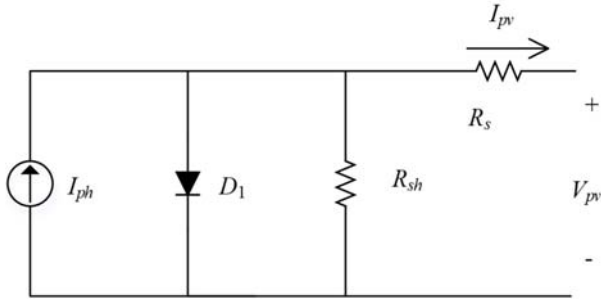
Bu çalışmada PGK ve düşüren tip DC/DC dönüştürücü tabanlı iki PV emülatörü tasarlanmıştır. DC/DC dönüştürücü tabanlı emülatörde kullanılan düşüren tip dönüştürücü ve kontrol kartı prototipi bu çalışmaya özel olarak tasarlanıp üretilmiştir. Tasarlanan emülatörler, LabVIEW platformunda bu çalışmaya özel olarak hazırlanmış bir arayüzle kontrol edilmiş ve yapılan testlerden elde edilen veriler de bu arayüzle toplanmıştır (Şekil 1). Emülatörlerde PV paneli modeli olarak tek diyotlu model tercih edilmiştir. Emülatörlerin arayüzle iletişimi RS232 seri haberleşme terminali üzerinden gerçekleştirilmiştir. Şekil 2’de verilen blok şemada görülen RS-232 hattının sol tarafı emülatörün bilgisayar yazılım kısmını, sağ taraf ise donanımsal bileşenleri temsil etmektedir. Emülatörün yazılım tarafında ilk olarak panelinin tek diyotlu modelinde kullanılan seri direnç (R_s) ve paralel/şönt direnç (R_{sh}) parametreleri, emüle edilecek olan PV panelinin katalogunda yer alan; maksimum güç noktası gerilimi (V_{mpp}), maksimum güç noktası akımı (I_{mpp}), açık devre gerilimi (V_{oc}) ve kısa devre akımı (I_{sc}) bilgilerine bağlı olarak türetilmektedir. Ardından tek diyot modeli, veri setinde yer alan ışınım şiddeti (G), hücre sıcaklığı (T_c) ve ortam sıcaklığı (T_a) değerlerine göre işletilmektedir. Donanım tarafında ise PGK veya DC/DC dönüştürücü tabanlı emülatör, arayüzden gelen panel akımı (I_{pv}) ve panel gerilimi (V_{pv}) çalışma noktası parametrelerine göre işletilmektedir. PV panellerini modellemek için literatürde çeşitli yöntemler bulunmakla birlikte bu çalışmada basit yapısından dolayı tek diyot modeli tercih edilmiştir (Şekil 3). PV paneli tek diyot modeli eşdeğer devresi üzerinde; akım kaynağı, hücre üzerine düşen ışınım ile üretilen akımı (I_{ph}) diyot ise hücrenin yarı iletken yapısını modellemek üzere kullanılan ideal diyotu (D_1) temsil etmektedir. Eşdeğer devre üzerinde verilen dirençler ise panelin seri (R_s) ve paralel/şönt (R_{sh}) dirençlerini göstermektedir.



Şekil 1. PV emülatörü kontrol arayüzü (Interface of PV emulator)



Şekil 2. Tasarlanan PV emülatörlerinin blok şeması. (Block diagram of the designed PV emulators)



Şekil 3. PV panelinin tek diyot modeli. (One diode model of the PV panel)

PV panelinde bulunan bir hücrenin akımı ($I_{pv,hücre}$); hücrenin ışınım akımı ($I_{ph,hücre}$) ile diyot akımının (I_{D1}) farkına eşittir (Eş. 1).

$$I_{pv,hücre} = I_{ph,hücre} - \underbrace{I_{s,hücre}}_{I_{D1}} \left(e^{\frac{q \cdot V_{pv,hücre}}{a \cdot k \cdot T}} - 1 \right) \quad (1)$$

- $I_{s,hücre}$ = Diyot ters yön doyma akımı, [A]
- $V_{pv,hücre}$ = Hücre gerilimi, [V]
- q = Bir elektron yükü ($1.60217646 \cdot 10^{-19}$), [C]
- k = Boltzman sabiti ($1.3806503 \cdot 10^{-23}$), [J/K]
- T = Hücre sıcaklığı, [K]

a = Diyot idealite faktörü

Farklı güçlerde PV panelleri, PV hücrelerin uygun biçimde seri ve/veya paralel olarak birleştirilmesinden oluşmaktadır. Bir hücrenin akımını veren Eş. 1'deki ifade seri bağlı hücrelerden oluşturulmuş PV paneli için yeniden düzenlenirse Eş. 2 elde edilebilir.

$$I_{pv} = I_{ph} - I_s \left(e^{\frac{V_{pv} + R_s \cdot I_{pv}}{a \cdot V_t}} - 1 \right) - \frac{V_{pv} + R_s \cdot I_{pv}}{R_{sh}} \quad (2)$$

V_t termal gerilim olarak isimlendirilmektedir ve Eş. 3 ile bulunabilir.

$$V_t = \frac{N_s \cdot k \cdot T}{q} \quad (3)$$

N_s paneldeki seri bağlı hücrelerin sayısını göstermektedir.

Eğer panelin çıkış akımı arttırılmak istenirse PV panelinde hücrelerin paralel bağlanması gerekecektir ve bu durumda Eş. 2'de verilen ışınım akımı (I_{ph}) ve ters yön doyma akımı (I_s) değerleri, paralel bağlı hücre sayısı (N_p) ile çarpılarak denklem yeniden düzenlenebilir. Bu çalışmada, PV modelinde yer alan seri direnç (R_s) ve paralel direnç (R_{sh}) parametreleri belirlemek için Villalva vd. [6] tarafından önerilen yöntem kullanılmıştır. Bu yöntemde PV paneli, I - V karakteristiğindeki üç noktanın ($0, I_{sc}$), (V_{mpp}, I_{mpp}) ve

$(V_{oc}, 0)$ parametreleri olan maksimum güç noktası gerilimi (V_{mpp}), maksimum güç noktası akımı (I_{mpp}), açık devre gerilimi (V_{oc}) ve kısa devre akımı (I_{sc}) değerleriyle hesaplanmıştır.

Bu çalışmada oluşturulan PV panelinin tek diyot modeli, gerçek PV sisteminden elde edilmiş olan veri setleri kullanılarak test edilmiştir. Söz konusu veri seti, güneş ışınımı (G), ortam sıcaklığı (T_a), güneş paneli yüzey (ya da güneş hücresi eklem) sıcaklığı (T_c), PV panel akımı (I_{pv}) ve PV panel geriliminin (V_{pv}) verilerinden oluşmaktadır.

Tasarlanan emülatörlerde, PV paneli modeli oluşturulduktan sonra arayüz tarafından PGK veya DC/DC dönüştürücüye RS-232 seri haberleşme terminali üzerinden kontrol komutları gönderilmektedir. Bu kontrol sürecinde arayüz yazılımı, PGK veya DC/DC dönüştürücü tabanlı emülatörden çalışma noktası akımını talep eden bir istek göndermekte ve emülatörlerden gelecek cevabı beklemektedir. Ardından emülatörden gelen cevaptaki panel akımı (I_{pv}) değerine göre panelin çalışma noktası gerilimi (V_{pv}) arayüzde işletilen panel modeli üzerinden türetilmektedir. Son olarak türetilen çalışma noktası gerilimi (V_{pv}) emülatöre gönderilip emülatör çıkış geriliminin bu noktada tutulması temin edilmekte ve böylelikle emülasyon süreci tamamlanmaktadır. Tasarımı gerçekleştirilen PGK ve DC/DC dönüştürücü tabanlı emülatörlerle ilgili ayrıntılı bilgiler aşağıda Bölüm 2.1 ve 2.2’de verilmiştir.

2.1. PGK Tabanlı Emülatör Tasarımı

(Designing the Programmable Power Supply (PPS)-Based Emulator)

Bu emülatör tasarımının merkezinde emülatör kontrol arayüzü ile bilgisayarın seri portu üzerinden iletişim kuran bir PGK yer almaktadır. Bu çalışmada Protek firmasının üretimi olan, çıkış gerilimi ve akımı sırasıyla 0-36 V ve 0-3 A ayar aralıklarına sahip, üzerinde kullanıcı tuş takımı ve seri haberleşme terminali bulunan bir PGK kullanılmıştır (Şekil 4). Bu PGK’de çıkış akımı 0,1 mA çözünürlükle ayarlanabilirken çıkış gerilimi, 0-3,999 V ve 4-36 V aralıklarında sırasıyla 1 mV ve 10 mV çözünürlükte ayarlanabilmektedir. Üretici firma çıkış geriliminin 0-3,999 V aralığında ayar çözünürlüğünü daha yüksek (1 mV) olmasını tercih ederken çıkış geriliminin 4 V ve üzerindeki değerleri için çözünürlüğü daha düşük değerde (10 mV) tutmayı tercih etmiştir. Ayrıca tasarımda kullanılan PGK; sabit akım, sabit gerilim ve sabit güç modlarından birinde çalıştırılabilmekte olup bu çalışmada sabit gerilim modunda işletilmiştir. Tuş takımı veya seri haberleşme terminali üzerinden kontrol edilebilen PGK bu çalışmada RS-232 seri haberleşme terminali üzerinden kontrol edilmiş ve seri haberleşme hızı 9600 bit/s (baud) olarak yapılandırılmıştır. Son olarak PGK’nin arayüzden gelen isteklere cevap verebilmesi için bir haberleşme çevrim süresi, PGK kullanım kılavuzundaki bilgilere bakılarak, bir saniye olarak belirlenmiştir.

Yukarıda özellikleri ve tasarıma özel yapılandırma ayarları özetlenen PGK, arayüz yazılımının işletildiği bilgisayara seri port üzerinden bağlanmış ve belirlenen haberleşme çevrimi

aralığında emülatör çalışma noktası parametrelerini oluşturacak biçimde işletilmiştir.



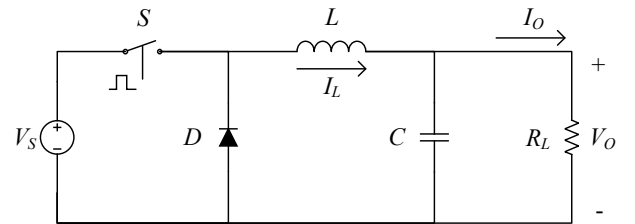
Şekil 4. Protek üretimi PGK (PPS produced by Protek)

2.2. DC/DC Dönüştürücü Tabanlı Emülatörün Tasarımı (Designing the DC/DC Converter-Based Emulator)

DC/DC dönüştürücü tabanlı emülatörde bu çalışma için özel olarak tasarlanmış düşüren tip DC/DC dönüştürücü ve gerçek zamanlı kontrol birimi kullanılmıştır. Gerçek zamanlı kontrolör ünitesinde 8-bit bir mikro-denetleyici kullanılmıştır. DC/DC dönüştürücü ve gerçek zamanlı kontrolör ünitesi prototipi tek bir baskı devre kartında (printed circuit board-PCB) tasarlanmış ve imal edilmiştir. DC/DC dönüştürücü, kontrolör ünitesi ve PCB tasarımına ilişkin bilgiler sırasıyla 2.2.1, 2.2.2 ve 2.2.3 alt bölümlerinde ayrıntılarıyla verilmiştir.

2.2.1. Düşüren tip DC/DC dönüştürücü (DC/DC buck converter)

Düşüren DC/DC dönüştürücü, 30V giriş voltajı, 4A çıkış akımı ve 0-28 V çıkış gerilimi aralığına sahip olup yalıtımsız topolojidedir (Şekil 5). Şekil 5’te; V_s : DC güç kaynağını, S : güç anahtarını, D : serbest geçiş diyotunu, L : bobini, I_L : bobin akımını, R_L : yük direncini, C : filtre kapasitörünü, I_O : yük/çıkış akımını ve V_O : yük/çıkış gerilimini temsil etmektedir.



Şekil 5. Düşüren Tip DC/DC Dönüştürücü Devre Yapısı.
(Circuit Topology of the DC/DC Buck Converter)

Dönüştürücüde güç anahtarı olarak bir MOSFET (metal oxide field effect transistor) kullanılmıştır ve MOSFET 10 kHz temel frekansa sahip bir PWM (pulse width modulation) sinyaliyle kontrol edilmiştir. Çıkış gerilimindeki dalgalanmaları (ripple) önleyebilmek için dönüştürücü sürekli akım modunda (continuous current mode-CCM)

işletilmiştir. Dönüştürücünün çıkış gerilimi Eş. 4'te verilmiştir.

$$V_o = \alpha \cdot V_s \quad (4)$$

α = PWM sinyalinin doluluk oranı, [%]

Dönüştürücüde kullanılan bobin ve filtre kapasitörünün seçimi, dalgasız düzgün bir çıkış geriliminin elde edilebilmesi açısından oldukça önemlidir. Söz konusu bobin ve filtre kapasitörünün boyutlandırılması için kullanılan formüller sırasıyla Eş. 5 ve Eş. 6'da verilmiştir.

$$L \geq \frac{V_o}{\Delta I_L \cdot f_{PWM}} (1 - \alpha) \quad (5)$$

ΔI_L = bobin akımının dalgalanma genliği ($I_{L_{max}} - I_{L_{min}}$), [A]

$$C \geq \frac{V_o \cdot (1 - \alpha)}{\Delta V_o \cdot 8 \cdot L \cdot f_{PWM}} \quad (6)$$

ΔV_o = yük/çıkış geriliminin dalgalanma genliği ($V_{o_{max}} - V_{o_{min}}$), [V]

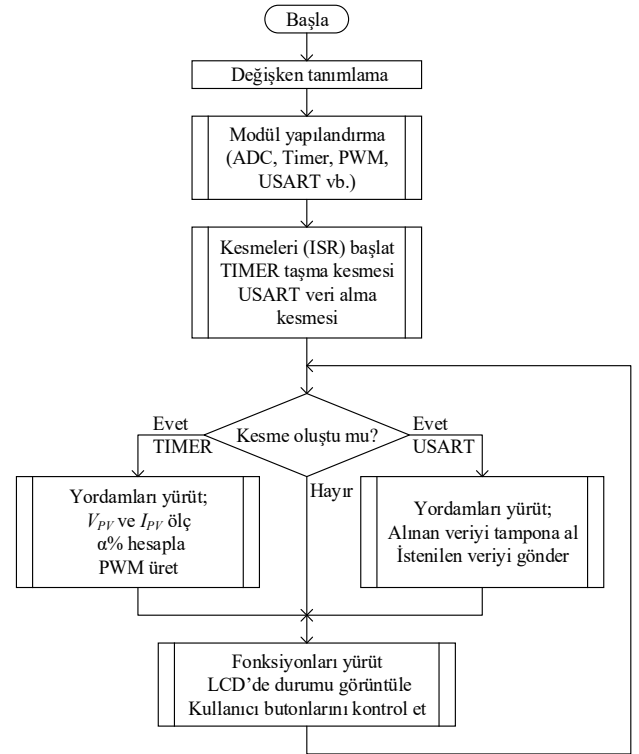
2.2.2. Gerçek zamanlı kontrolör birimi (Real-time controller unit)

Gerçek zamanlı kontrolör ünitesi bir mikro-denetleyici, ölçme devreleri, güç anahtarları kontrol devresi ve haberleşme terminalinden oluşmaktadır. Kontrol ünitesi için PIC16F877 mikro-denetleyicisi seçilmiş ve mikro-denetleyicinin; analog-sayısal dönüştürücü (analog to digital converter-ADC), PWM ve çok amaçlı senkron/asenkron alıcı/verici (universal synchronous/asynchronous receiver/transmitter-USART) seri haberleşme terminali kullanılmıştır. Kontrol ünitesinin ölçme devresinden elektriksel yalıtımını sağlayan akım (ACS712) ve gerilim (ACPL807) sensörleri kullanılmıştır. Bu sensörler sayesinde emülatörün güç dönüştürücü devresiyle kontrol ünitesi arasında elektriksel yalıtım sağlanabilmiş ve mikro-denetleyicinin ADC girişleri koruma altına alınabilmiştir. Mikro-denetleyicinin ADC girişlerine bağlanan sensörler için; ADC birimi, 10 bit çözünürlük ve 10 ms örnekleme zamanıyla çalışacak biçimde yapılandırılmıştır. ADC örnekleme zamanı mikro-denetleyicinin bir zamanlayıcı (TIMER) birimiyle tetiklenerek belirlenmiştir.

DC/DC dönüştürücünün güç anahtarını kontrol etmek amacıyla mikro-denetleyicinin PWM modülü çıkışı kullanılmıştır. PWM modülü; 10 kHz frekansta ve doluluk oranını 10-bit çözünürlükle değiştirilebilecek bir sinyal üretecek biçimde yapılandırılmıştır. Mikro-denetleyicinin PWM çıkış piniyle MOSFET'in kontrol pinini (gate) elektriksel olarak yalıtım amacıyla 4N25 optik bağlantı (opto coupler) devresi kullanılmıştır. Arayüz ve mikro-denetleyici arasındaki veri transferini sağlamak için 9600 bit/s (baud) hıza ayarlanmış olan USART modülü

kullanılmış ve arayüzden gelen verileri sorunsuz transfer edebilmek amacıyla mikro-denetleyicinin USART modülüyle bağlantılı çalışan veri alma kesmesi (interrupt) aktifleştirilmiştir.

Gerçek zamanlı kontrol ünitesi ve yukarıda özetlenen modüllerin kontrolünü sağlayan aygıt yazılımı, C++ tabanlı bir derleyicide yazılmıştır. Analog sinyallerin ölçümü, güç anahtarının kontrolü ve arayüzle veri iletişiminin sağlanmasını yerine getiren algoritma aygıt yazılımının akış şemasında özetlenmiştir (Şekil 6). Aygıt yazılımında ilk olarak değişkenler tanımlanmakta, kullanılan mikro-denetleyici çevresel birimleri (ADC, PWM ve USART) yapılandırılmakta ve kesme hizmeti yordamları (interrupt service routine-ISR) başlatılmaktadır.



Şekil 6. Aygıt yazılımı için akış şeması
(Flowchart for the firmware)

Akış şemasında görülen zamanlayıcı kesmesi her 10 ms'de bir gerçekleşmekte olup bu kesme yordamında; ADC ölçme, PWM doluluk oranı hesaplama ve PWM sinyali doluluk oranı güncelleme işlemleri yerine getirilmektedir. Akış şemasındaki USART kesmesi arayüzden bir veri geldiğinde işletilmektedir. USART kesmesi yordamı içinde ilk olarak gelen veri, tampon (buffer) belleğe alınmakta ve arayüzden gelen istek çözümlenip arayüze cevap gönderilmektedir. Eğer herhangi bir kesme meydana gelmemişse çalışma noktası kontrolörü, LCD ve butonlara ilişkin kontrol fonksiyonları yürütülmektedir.

Bu makalede kullanılan gerçek zamanlı kontrol birimi, kolay temin edilebilir, ucuz malzeme ve devre elemanları

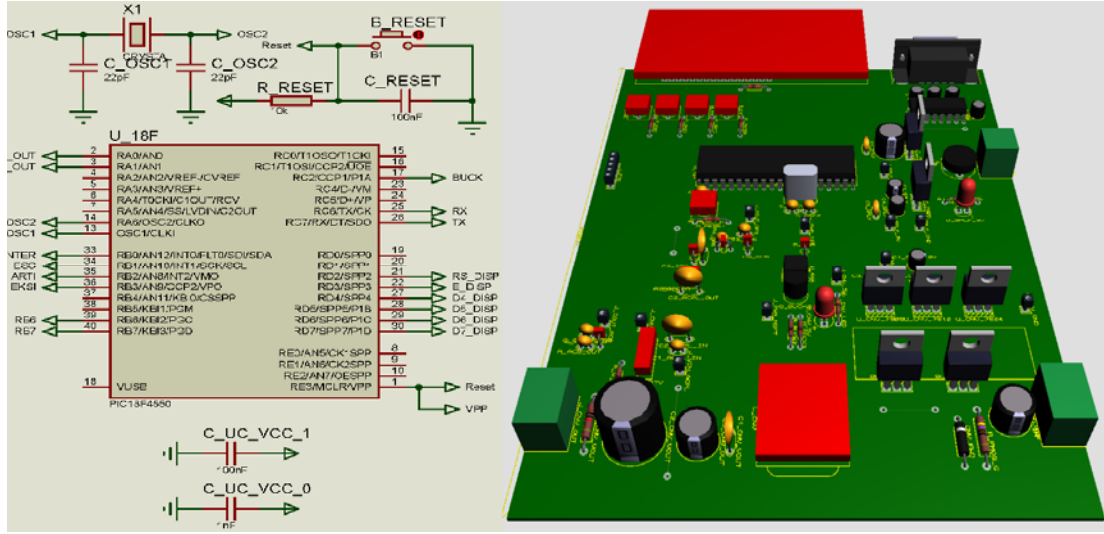
kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Ancak ileride gerçekleştirilecek çalışmada birim fiyatları giderek makul seviyelere gerileyen DSP tabanlı mikro-denetleyiciler [22] kullanılarak MATLAB ortamında aygıt yazılımı hazırlama gibi tasarımda ve prototiplemede önemli avantajlar elde edilebilecektir.

2.2.3. Baskı devre kartı tasarımı (Design of the PCB card)

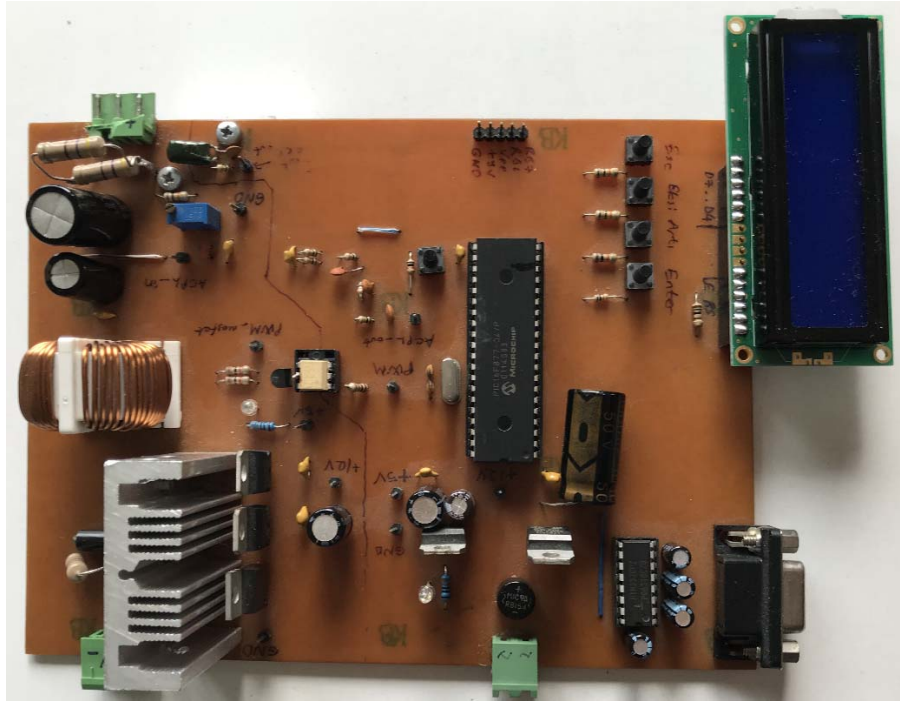
Baskı devre kartı üzerinde; DC/DC dönüştürücü, mikro-denetleyici, akım ve gerilim sensör devreleri, MOSFET kontrol devresi, güç besleme devreleri, LCD, butonlar ve RS-232 haberleşme terminali devresi bulunmaktadır. Söz

konusu kart tasarımı Proteus yazılımında gerçekleştirilmiştir (Şekil 7). Baskı devre kartında güç (DC/DC dönüştürücü) ve kontrol birimleri; bağımsız besleme kaynakları, optik bağlantılı MOSFET sürme devresi, akım ve gerilim sensörüyle birbirinden elektriksel olarak yalıtılmıştır. Tasarım işlemleri tamamlanan baskı devre kartı prototipi imal edilerek Şekil 8’de görüldüğü gibi kullanıma hazır hale getirilmiştir.

Bu çalışma sunulan PV emülatörlerinin tüm tasarım dosyalarına github açık kaynak erişim platformundan ulaşılabilmektedir (https://github.com/smcinar/PV_emulator.git).



Şekil 7. Proteus'ta kartın şematik ve baskı devre tasarımı. (Schematic and PCB design of the card in Proteus)



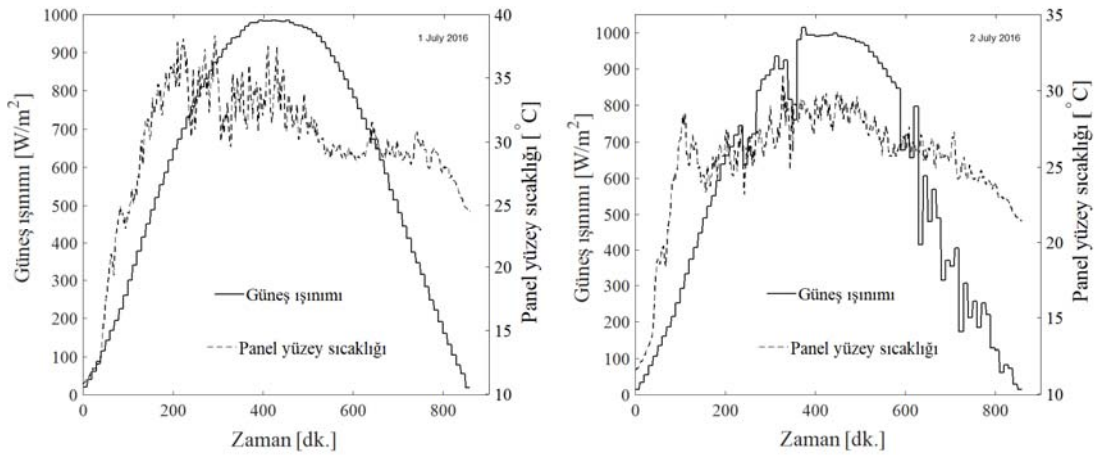
Şekil 8. Malzemeleri montajlanmış baskı devre kartı. (PCB card with mounted components)

3. SONUÇLAR VE TARTIŞMALAR (RESULTS AND DISCUSSIONS)

PGK ve DC/DC dönüştürücü tabanlı PV emülatörleri bir PV paneli platformundan elde edilen günlük veri setleriyle test edilmiştir. Bu veri setleri; güneş ışınımı (G), ortam sıcaklığı (T_a), eklem/hücre sıcaklığı (T_c), panel akımı (I_{pv}) ve panel gerilimi (V_{pv}) verilerinden oluşmaktadır. Veri setlerinin alındığı PV paneli platformunda, ISOFOTON firmasının üretim olan ISF-60/12 model 60 W gücünde ve mono-kristal teknolojiyle üretilmiş PV paneli kullanılmıştır. Emülatörleri test etmek için 1 ve 2 Temmuz 2016 tarihlerine ait iki günlük veri seti seçilmiştir. Söz konusu veri setinde 10 dk. zaman aralıklarında kaydedilmiş toplam 144 veri bulunmaktadır (Şekil 9). Veri setindeki 10 dk. zaman aralığı literatürde güneş enerjisi sistemleriyle ilgili gerçekleştirilmiş çalışmalarda oldukça fazla kullanıldığından dolayı tercih edilmiştir [23-26].

Tasarlanan emülatörlerle bir emülasyon deneyinde öncelikle söz konusu veri setleri elektronik tablo (spreadsheet) formatında arayüze yüklenmektedir. Ardından arayüz üzerinde bulunan PV panel parametreleri girişi alanlarına PV panelinin katalog bilgileri (V_{mpp} , I_{mpp} , V_{oc} ve I_{sc}) girilmekte ve güneş panelinin tek diyot modeli üretilmektedir. Son olarak üretilen modelle emülatörler veri tablosundaki her bir veri seti için işletilmektedir.

Örneğin veri setinde ışınım $G = 900 \text{ W/m}^2$ ve panel sıcaklığı $T_c = 37 \text{ }^\circ\text{C}$ iken tek diyot modeli bu değerlere göre oluşturulmakta ve emülatör çıkışına bağlı yükün çektiği akıma (I_{pv}) göre model üzerinde bir çalışma noktası gerilimi (V_{pv}) bulunmaktadır. Ardından 10 dk. sonraki yeni veri setine kadar emülatör çıkışı bu çalışma noktasında sabit tutulmaktadır. Bu çalışma noktasında sabit tutma işlemi, PGK tabanlı emülatörde PGK içindeki kendi kontrol sistemiyle sağlanırken DC/DC dönüştürücü tabanlı emülatörde mikro-denetleyici aygıt yazılımında işletilen çalışma noktası kontrolörüyle sağlanmaktadır.



Şekil 9. Açık güneşli ve parçalı bulutlu iki gün için emülatör test verileri.
(Emulator testing data for clear sunny and partly cloudy two day)

3.1. PGK ve DC/DC Dönüştürücü Tabanlı Emülatörler için Test Sonuçları (Test Results for the PPS and DC/DC converter Based Emulators)

Tasarımı gerçekleştirilen PV paneli emülatörleriyle bu çalışma için özel tasarlanan arayüzü kullanarak bir takım deneyler gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen bu deneylerde 10 dk. zaman aralığıyla elde edilmiş olan veri setleri kullanılmış ve emülatörler gün doğumundan batımına kadar bir gün boyunca çalıştırılmıştır. Emülatör çıkışları değeri 20 Ω olan 60 W bir dirençle yüklenmiştir. Emülatör çıkış akım (I_{pv}) ve gerilim (V_{pv}) sinyalleri gerçek zamanlı kontrol ünitesiyle seri haberleşme terminali üzerinden arayüzde toplanmıştır. Bu veri toplama sürecinde, veri toplama zaman aralığı PGK ve DC/DC dönüştürücü tabanlı emülatörler için sırasıyla 1 s ve 100 ms olarak seçilmiştir.

Tasarlanan PV emülatörleri öncelikle bulutsuz açık güneşli bir gün olarak sunulan 1 Temmuz 2016 veri setiyle işletilmiştir. Emülatörler bu veri seti için yaklaşık olarak benzer çıkış karakteristiği göstermiştir (Şekil 10a). Hem PGK hem de DC/DC dönüştürücü tabanlı emülatörler için model ve emülatör güç eğrileri arasında fark göze çarpmakta ve bu farkın PGK tabanlı emülatörde daha belirgin olduğu görülmektedir. Aynı zamanda grafiklerin yükselen (0-300 dk.) ve düşen (700-900 dk.) kısımlarında iki emülatör çıkışının da neredeyse aynı olduğu görülmektedir. DC/DC dönüştürücü tabanlı emülatör PGK tabanlı emülatörden daha hızlı işletildiğinden dolayı, DC/DC dönüştürücü tabanlı emülatör sonuçlarında model ve emülatör grafikleri neredeyse özdeş olduğu gözlemlenebilmektedir. Ayrıca PGK tabanlı emülatörde veri toplama zaman aralığı 1 s olarak seçildiği için PGK tabanlı emülatör sonuçlarında model ve emülatör grafikleri arasında bir zaman gecikmesi göze çarpmaktadır. Emülatör gerilim çıkışları ise güç grafiklerine benzer değişimler göstermiştir (Şekil 10b).

Tasarlanan PV emülatörleri ikinci olarak parçalı bulutlu bir gün olarak sunulan 2 Temmuz 2016 veri setiyle işletilmiştir.

Bu veri setinde bulutlanmanın meydana geldiği anlarda emülatörler ani değişimler gösteren karakteristikler sergilemiştir (Şekil 11a ve Şekil 11b). PGK tabanlı emülatör için elde edilen güç ve gerilim sonuçlarında, model ve emülatör çıkış grafikleri arasındaki zaman gecikmesi çok net biçimde görülebilmektedir (Şekil 11a ve Şekil 11b). PGK tabanlı emülatör için tepki süresi DC/DC dönüştürücü tabanlı emülatörden daha uzun olduğu için, güneş ışınının aniden değiştiği anlarda model ve emülatör grafikleri arasındaki zaman gecikmesi de artmıştır.

3.2. Emülatör Performanslarının Karşılaştırılması (Comparing the Performance of the Emulators)

Tasarlanan PV emülatörlerinin performanslarını ölçmek için literatürde çok sık kullanılan üç yöntem; mutlak hatalar

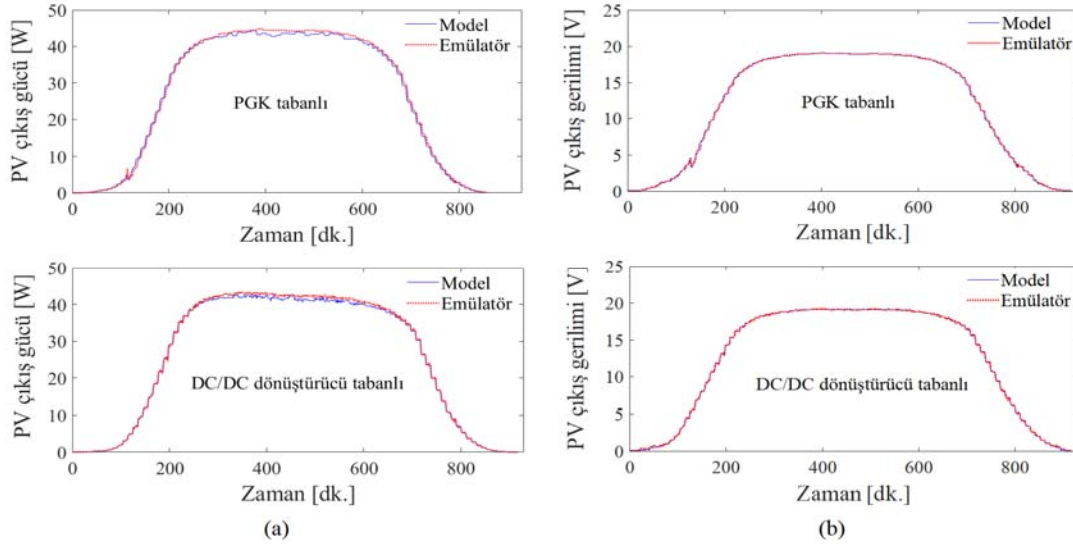
toplamı (integral absolute error-IAE), karesel hataların ortalamasının karekökü (root mean square error-RMSE) ve korelasyon katsayısı (r^2) seçilmiştir. IAE değerlerini hesaplamakta Eş. 7 kullanılmaktadır.

$$IAE = \int |e_i| dt \quad (7)$$

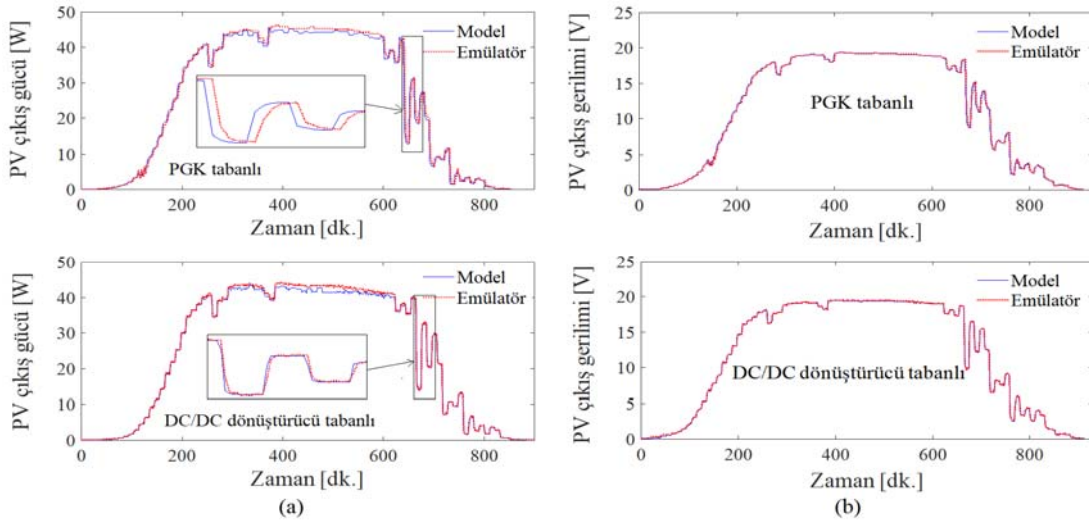
Eş. 7'de verilen e_i emülatör ve model çıktıları arasındaki fark/hata olup (W) birimindedir.

Eş. 8, RMSE değerini elde etmek için kullanılmaktadır.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{i=n} (\bar{y}_i - y_i)^2}{n}} \quad (8)$$



Şekil 10. 1 Temmuz günü için emülatörlerin çıkış gücü (a) ve gerilimi (b).
(Output power (a) and voltage (b) of emulators for 1st July 2016)



Şekil 11. 2 Temmuz günü için emülatörlerin çıkış gücü (a) ve gerilimi (b).
(Output power (a) and voltage (b) of emulators for 2nd July 2016)

Eş. 8'de verilen parametreler birimleriyle birlikte aşağıda verilmiştir.

\bar{y}_i	= model çıkış gücü, (W)
y_i	= emülatör çıkış gücü, (W)
n	= hata dizisi son indisi
i	= indis

IAE ve RMSE değerlerinin büyük olması kötü performansı gösterirken, bu değerler ne kadar küçükse o kadar yüksek performansı göstermektedir. Korelasyon katsayısı değeri Eş. 9 ile hesaplanabilir:

$$r^2 = \frac{\sum (x - \bar{x})(y - \bar{y})}{\sqrt{\sum (x - \bar{x})^2 \sum (y - \bar{y})^2}} \quad (9)$$

Eş. 9'da verilen parametreler aşağıda birimleriyle birlikte aşağıda verilmiştir.

\bar{x}	= model çıkış gücünün ortalaması, (W)
x	= model çıkış gücü, (W)
\bar{y}	= emülatör çıkış gücünün ortalaması, (W)
y	= emülatör çıkış gücü, (W)

Korelasyon katsayısı (r^2) bire ne kadar yakınsa performansın o kadar iyi olduğunu göstermektedir. Aşağıda Tablo 1 ve 2'de 1 ve 2 Temmuz 2016 günleri için gerçekleştirilmiş emülatör deney sonuçlarından elde edile performans değerleri verilmektedir.

Tablo 1. Emülatörlerin 1 Temmuz 2016 için değerlendirilmesi
(Evaluation of emulators for 1st July 2016)

Emülatör	IAE	RMSE	r^2
PGK tabanlı	2896	0,88	0,999068
DC/DC dönüştürücü tabanlı	2571	0,75	0,999480

Tablo 2. Emülatörlerin 2 Temmuz 2016 için değerlendirilmesi
(Evaluation of emulators for 2st July 2016)

Emülatör	IAE	RMSE	r^2
PGK tabanlı	4580	2,16	0,993571
DC/DC dönüştürücü tabanlı	2874	1,12	0,998552

Seçilen tüm performans kriterleri DC/DC dönüştürücü tabanlı emülatörün PGK tabanlı emülatörden daha iyi performans gösterdiğini ortaya koymaktadır. IAE ve RMSE değerlerine göre, 1 Temmuz veri seti için emülatörler neredeyse benzer performanslar göstermesine rağmen, 2 Temmuz için DC/DC dönüştürücü tabanlı emülatör PGK tabanlı emülatörden iki kat daha iyi performans göstermektedir. Korelasyon katsayısı değerlerine bakıldığında ise her iki emülatöründe 0,99'un üzerinde oldukça yüksek performans gösterdikleri görülmektedir.

4. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Günümüzde, güneş ışınımından elektrik üretiminde güneş panelleri oldukça yaygın kullanılmaktadır. Gerek akademik gerekse endüstriyel topluluklarda PV sistemleri üzerine çok sayıda araştırma ve geliştirme çalışmaları yürütülmektedir. Bu çalışmalarda, sistemi gerçek koşullar altında test etmek ve bu testleri tekrar edebilmek için PV paneli emülatörlerinin kullanımı gerekmektedir. Bu çalışmada PGK tabanlı ve DC/DC dönüştürücü tabanlı iki PV paneli emülatörü tasarımı gerçekleştirilmiş, bir PV test platformundan alınan gerçek veri testiyle test edilmiş ve performansları IAE, RMSE, ve r^2 kriterlerine göre incelenmiştir. DC/DC dönüştürücü tabanlı emülatör tüm kriterler için PGK tabanlı emülatörden daha yüksek performans göstermiştir. Ayrıca korelasyon katsayısı (r^2) her iki emülatör için oldukça yüksek değerler ($>0,99$) göstermiştir. Bu çalışmada PGK veya DC/DC dönüştürücü kullanılarak düşük maliyetli bir PV emülatörü gerçekleştirilebileceği ortaya konulmuştur. Bu çalışmanın kapsamı dışında tutulmakla birlikte ileride kısmi gölgelenme etkilerinin de modellenebileceği PV emülatörü tasarımları gerçekleştirilebilir. Ayrıca DC/DC dönüştürücünün gerçek zamanlı kontrol ünitesi 32-bit ARM mimarisine sahip yüksek performanslı bir mikro-denetleyiciyle gerçekleştirilerek emülatör tasarımı yapılabilir.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENT)

Bu çalışma Afyon Kocatepe Üniversitesi, Bilimsel Araştırma Projeleri biriminin 13.FEN.BİL.50 numaralı projesiyle desteklenmiştir.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- Ren21, Renewables 2019 Global Status Report, https://www.ren21.net/wp-content/uploads/2019/05/gsr_2019_full_report_en.pdf. Erişim tarihi Mart 23, 2020.
- T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı. Türkiye elektrik yatırımları 2019 yılı aralık ayı özet raporu. <https://www.enerji.gov.tr/File/?path=ROOT/1/Documents/E%C4%B0GM%20Periyodik%20Rapor/Elektrik%20Yat%C4%B1r%C4%B1mlar%C4%B1%202019%20Aral%C4%B1k%20Ayl%C4%B1k%20%20C3%96zet%20Raporu.pdf>. Erişim tarihi Mart 25, 2020.
- T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı. Türkiye elektrik yatırımları 2018 yılı aralık ayı özet raporu. <https://www.enerji.gov.tr/File/?path=ROOT/1/Documents/E%C4%B0GM%20Periyodik%20Rapor/Elektrik%20Yat%C4%B1r%C4%B1mlar%C4%B1%202018%20Aral%C4%B1k%20Ayl%C4%B1k%20%20C3%96zet%20Raporu.pdf>. Erişim tarihi Mart 25, 2020.
- Yıldırım E., Aktacir M., Investigation of azimuth and tilt angle effects on building integrated photovoltaic systems, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 34 (2), 609–620, 2019.
- Demirtaş M., Sefa İ., Irmak E., Çolak İ., Microcontroller based DC/DC boost converter for solar energy systems, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 23 (3), 719–728, 2008.

6. Villalva M., Gazoli J., Filho E. Comprehensive approach to modeling and simulation of photovoltaic arrays, *IEEE Transactions on Power Electronics*, 24 (5), 1198–1208, 2009.
7. Azharuddin S.M., Vysakh M., Thakur H.V., Nishant B., SudhakarBabu T., Muralidhar K., Paul D., Jacob B., Balasubramanian K., Rajasekar N., A near accurate solar PV emulator using dSPACE controller for real-time control, *Energy Procedia*, 61, 2640–2648. 2014.
8. Ram J.P., Manghani H., Pillai D.S., Babua T.S., Miyatakeb M., Rajasekara N., Analysis on solar PV emulators: A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 81 (1), 149–160, 2018.
9. Park J.Y., Choi S.J., A novel simulation model for PV panels based on datasheet parameter tuning, *Solar Energy* 145, 90–98. 2017.
10. Mai T.D., De Breucker S., Baert K., Driesen J., Reconfigurable emulator for photovoltaic modules under static partial shading conditions, *Solar Energy*, 141, 256–265, 2017.
11. Zhou Z., Holland P.M., Iqic P., MPPT algorithm test on a photovoltaic emulating system constructed by a DC power supply and an indoor solar panel, *Energy Conversion and Management* 85, 460–469, 2014.
12. Rachid A., Kerrou F., Chenni R., Djeghloud H., PV emulator based buck converter using dSPACE controller, *EEEIC 2016-International Conference on Environment and Electrical Engineering*, Florence, Italy, 4–9, 7-10 Haziran, 2016.
13. Xenophontos A., Rarey J., Trombetta A., Bazzi A.M., A flexible low-cost photovoltaic solar panel emulation platform, *2014 Power and Energy Conference at Illinois (PECI)*, Champaign, IL, USA, 1-6, 28 Şubat-1 Mart, 2014.
14. Bhise, K., Pragallapati, N., Thale S., Agarwal V., Labview based emulation of photovoltaic array to study maximum power point tracking algorithms, *2012 38th IEEE Photovoltaic Specialists Conference*, Austin, TX, USA, 002961-002966, 3-8 Haziran 2012.
15. Moussa I., Bouallegue A., Khedher A., Development of a low cost PV simulator based on FPGA technology, *IEEE 2017 International Conference on Green Energy Conversion Systems (GECS)*, Hammamet, Tunisia, 1–6, Mart 2017.
16. Bressan M., Gutierrez A., Gutierrez L. G., Alonso, C., Development of a real-time hot-spot prevention using an emulator of partially shaded PV systems, *Renewable Energy*, 127, 334-343, 2018.
17. Kadri R., Andrei H., Gaubert J.P., Ivanovici T., Champenois G., Andrei P., Modeling of the photovoltaic cell circuit parameters for optimum connection model and real-time emulator with partial shadow conditions, *Energy*, 42 (1), 57-67, 2012.
18. Ayop R., Tan C.W., A novel photovoltaic emulator based on current-resistor model using binary search computation, *Solar Energy*, 160, 186-199, 2018.
19. Atoche A.C., Castillo J.V., Ortegon-Aguilar J., Carrasco-Alvarez R., Gio J.S., Colli-Menchi A., A high-accuracy photovoltaic emulator system using ARM processors, *Solar Energy*, 120, 389-398, 2015.
20. Lu D.D., Nguyen Q.N., A photovoltaic panel emulator using a buck-boost DC/DC converter and a low cost micro-controller, *Solar Energy*, 86 (5), 1477-1484, 2012.
21. Balato M., Costanzo L., Gallo D., Landi C., Luiso M., Vitelli M., Design and implementation of a dynamic FPAA based photovoltaic emulator, *Solar Energy*, 123, 102-115, 2016.
22. Açıkgöz H., Şekkeli M., Experimental setup of a DSP based electronic power transformer using type-2 neurofuzzy controller, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 35 (4), 2147–2160, 2020.
23. Akarslan E., Hocaoglu F.O., Edizkan R., Novel short term solar irradiance forecasting models, *Renewable Energy*, 123, 58–66, 2018.
24. Frank C.W., Wahl S., Keller J.D., Pospichal B., Hense A., Crewell S., Bias correction of a novel European reanalysis data set for solar energy applications, *Solar Energy* 164, 12–24, 2018.
25. Inácio C.O., Borges C.L.T., Stochastic model for generation of high-resolution irradiance data and estimation of power output of photovoltaic plants, *IEEE Transactions on Sustainable Energy* 9 (2), 952–960. 2018.
26. Kaplanis S., Kaplani E., Stochastic prediction of hourly global solar radiation for Patra, Greece, *Applied Energy* 87 (12), 3748–3758, 2010.