



**FOTOVOLTAİK (PV) HÜCRELER/MODÜLLER İÇİN
PARAMETRE KESTİRİM METODU GELİŞTİRİLMESİ**

YASİN AYBERK NARİN

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ
Prof. Dr. Ulaş EMİNOĞLU
Ocak - 2021
Her hakkı saklıdır**

T.C.
TOKAT GAZİOSMANPAŞA ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

FOTOVOLTAİK (PV) HÜCRELER/MODÜLLER İÇİN
PARAMETRE KESTİRİM METODU GELİŞTİRİLMESİ

YASİN AYBERK NARİN

TOKAT
Ocak - 2021

Her hakkı saklıdır

YASİN AYBERK NARİN tarafından hazırlanan “**Fotovoltaik (PV) Hücreler/Modüller İçin Parametre Kestirim Metodu Geliştirilmesi**” adlı tez çalışmasının savunma sınavı 27 OCAK 2021 tarihinde yapılmış olup aşağıda verilen Jüri tarafından Oy Birliği ile Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI 'nda Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

İmza

Danışman
Prof. Dr. Ulaş EMİNOĞLU
Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi

.....

Üye
Dr.Öğr.Üyesi Murat
KÖSEOĞLU İnönü
Üniversitesi

.....

Üye
Dr.Öğr.Üyesi Hüseyin
ALTINKAYA Karabük Üniversitesi

.....

.....

ONAY

Prof. Dr. Mehmet GÜNEŞ
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürü

TEZ BEYANI

Tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu tezin yazılmasında bilimsel ahlak kurallarına uyulduğunu, başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunulduğunu, tezin içerdiği yenilik ve sonuçların başka bir yerden alınmadığını, kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapılmadığını, tezin herhangi bir kısmının bu üniversite veya başka bir üniversitedeki başka bir tez çalışması olarak sunulmadığını beyan ederim.

YASİN AYBERK NARİN

27 Ocak 2021

ÖZET

FOTOVOLTAİK (PV) HÜCRELER/MODÜLLER İÇİN PARAMETRE KESTİRİM METODU

Narin, Yasin Ayberk

Yüksek Lisans, Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim
Dalı

Tez Danışmanı: Prof.Dr. Ulaş Eminoğlu

Ocak 2021, viii + 38 sayfa

Dünyada artan nüfus ve fosil enerji kaynaklarının tükenmesi sebebi ile yenilenebilir enerji kaynaklarına talep oldukça fazladır. Dolayısıyla güneş enerjisi fotovoltaik (PV) hücrelerin/modüllerin enerji üretiminde daha çok tercih edilen yenilenebilir enerji kaynağı haline gelmektedir. Bu nedenle, PV'lerin gerçekçi bir şekilde modellenmesi ve eşdeğer devre parametrelerinin belirlenmesi uygulama ve üretim açısından oldukça önemlidir. PV hücrelerinin/modüllerinin tek-diyotlu eşdeğer devre modellemesinde kullanılan seri direnç (R_s), diyot idealite faktörü (a), şönt direnç (R_p), diyot ters doyum akımı (I_o) ve foton akımı (I_{pv}) parametrelerinin belirlenmesi için geliştirme çalışması yapılmıştır. Modelin doğruluğunu test etmek için, farklı üreticilerin bir dizi PV modülü dikkate alınmakta ve sonuçlar literatürde verilen bu çözümsel modeller kullanılarak elde edilenlerle karşılaştırılmıştır. İncelenen PV modüllerinin akım-gerilim (I-V) karakteristikleri, üreticiler tarafından sağlanan deneysel I-V eğrileri ile karşılaştırılarak simüle edilmektedir. Sonuçlar, PV modülleri için elde edilen parametrelerin değerlerinin, diğer analitik modeller kullanılarak elde edilen değerlerle eşleştiğini göstermektedir. Ve elde edilen parametreler kullanılarak oluşturulan I-V eğrileri, deneysel veriler ile tam uyumludur. Eğriler ayrıca, literatürde verilen iki-diyotlu modellerin optimal parametreleri kullanılarak oluşturulan eğrilerle de yüksek derecede uyumluluk gösterdiği görülmüştür. Ayrıca bu model ihmal edilen parametreleri göz önünde bulundurduğunda kolaylık sağlamaktadır.

ANAHTAR KELİMELER: Fotovoltaik (PV) Hücreler/modüller,
Matematiksel Modelleme, Parametre Kestirim

ABSTRACT

PARAMETRIC ESTIMATION METHODS FOR PHOTOVOLTAIC (PV) CELLS/MODULES

Narin, Yasin Ayberk

Master's Thesis, Division of Electrical Electronics
Engineering

Advisor: Prof.Dr. Ulas Eminoglu

January 2021, viii + 38 pages

Demand in the world for renewable energy resources is increasing because of growth in population and decreasing in the fossil fuel reserves. Solar energy produced via photovoltaic cells/modules has been chosen as more popular when compared with the other renewable energy sources. Because of this reason, realistic modelling and identification of the equivalent circuit parameters of the PVs are very important for production and applications. In this study, serial resistances (R_s), diode ideality factor (a), parallel resistances (R_p), reverse saturation current of diodes (I_0) and photon current (I_{pv}) are examined in order to identify parameters of the equivalent single diode circuit models of the PV cells/modules. PV cells/modules from different manufacturers are used in order to control accuracy of equivalent modelling and results have been compared with the other analytical models in the literature. Current vs. Voltage graphs of the examined PV modules are simulated and compared with experimental results supplied by manufacturers. The results validates that, modelled parameters for PV modules are matched with the values obtained from other analytical models. Current vs Voltage (I-V) graphs obtained using calculated parameters are same as the I-V graphs resulted from experimental datas. Graphs are also perfectly matched with the other graphs obtained using optimum parameters of the models with two diodes in the literature. Moreover this model is more useful when considering ignored parameters.

KEYWORDS: Photovoltaic Cells/modules, Mathematical Modeling,
Parameter Estimation



ÖNSÖZ

Bu tez çalışmasında, yüksek lisans eğitimim boyunca bilgi ve tecrübeleriyle her zaman bana destek olan tez danışmanım Prof. Dr. Ulaş Eminoğlu'na teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca her zaman yanımda olan manevi desteklerini esirgemeyen eşime, anneme, babama ve kardeşime teşekkürlerimi sunarım.

YASİN AYBERK NARİN

27 Ocak 2021

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	ii
<u>ÖNSÖZ.....</u>	<u>iii</u>
<u>İÇİNDEKİLER.....</u>	<u>iv</u>
<u>SİMGELER ve KISALTMALAR.....</u>	<u>v</u>
<u>ŞEKİL LİSTESİ.....</u>	<u>vi</u>
<u>ÇİZELGE LİSTESİ.....</u>	<u>vii</u>
1. <u>GİRİŞ.....</u>	<u>1</u>
2. <u>PV HÜCRELERİNİN YAPISI ve ÇEŞİTLERİ.....</u>	<u>5</u>
3. <u>PARAMETRE KESTİRİM METODU GELİŞTİRİLMESİ.....</u>	<u>17</u>
4. <u>BULGULAR ve TARTIŞMA.....</u>	<u>20</u>
5. <u>SONUÇ.....</u>	<u>30</u>
6. <u>KAYNAKLAR.....</u>	<u>31</u>
7. <u>EKLER.....</u>	<u>34</u>
7.1 <u>R^2 ve Rmse Hesaplama Kodları.....</u>	<u>34</u>
7.2 Birinci Dereceden Eğri Uydurma ile a Katsayılarının Belirlenmesi Kodları.....	35
7.3 Geliştirilen Model Kullanılarak PV Hücreler/Modüller İçin Parametre Kestirim Kodları.....	36
8. <u>ÖZGEÇMİŞ.....</u>	<u>38</u>

SİMGELER ve KISALTMALAR

Simgeler	Açıklama
----------	----------

μ	mikro
Ω	ohm

Kısaltmalar	Açıklama
-------------	----------

A	Amper
a	Diyot idealite sabiti
Gwh	Gigawatt elektriksel
Id	Diyot akımı
Imp	Güç noktasında akım
Io	Ters doyum akımı
Ipv	Foton akımı
Isc	Kısa devre akımı
k	Boltzman sabiti
MW	Megawatt
MWe	Mega watt elektriksel
nA	Nanoamper
ns	Nano saniye
q	Elektron yükü
RMSE	Root mean square error (Kare ortalamalarının karekökü)
Rp	Paralel direnç (şönt direnci)
Rpo	Yaklaşık paralel direnç
Rs	Seri direnç
T	Sıcaklık
V	Gerilim
Vmp	Güç noktasında gerilim
Vt	Termal gerilim
W	Watt

°C	Santigrat
°K	Kelvin
μA	Mikroamper



ŞEKİLLER LİSTESİ

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
Şekil 2.1. PV Panel diyagramı.....	8
Şekil 2.2. Afrika'daki bir parabolik tekneli güç santrali (www.afrik21.africa).....	10
Şekil 2.3. Fresnel reflektör sistemlerinin bir örneği (www.haukedressler.com).....	11
Şekil 2.4. Mersin Güneş Güç Kulesi sistemi (www.muhendisgelisim.com).....	11
Şekil 2.5. Örnek stirling çanak enerji santrali (www.greentechmedia.com).....	12
Şekil 2.6. Hücre, modül, dizi arasındaki ilişki.....	14
Şekil 2.7. Bir PV hücresinin iç yapısı.....	15
Şekil 2.8. Fotovoltaik hücre teknoloji.....	15
Şekil 3.1. Tek-diyot beş parametrelili devre modeli.....	17
Şekil 4.1. Solarex MSX60 PV modülü için I-V eğrileri ($T = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$).....	27
Şekil 4.2. BP Solar MSX120 PV modülü için I-V eğrileri ($T = 40\text{ }^{\circ}\text{C}$).....	27
Şekil 4.3. R.T.C France güneş hücresi için I-V eğrileri ($T = 33\text{ }^{\circ}\text{C}$).....	27
Şekil 4.4. Solarex MSX60 PV modülü için P-V eğrileri ($T = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$).....	29
Şekil 4.5. BP Solar MSX120 PV modülü için P-V eğrileri ($T = 40\text{ }^{\circ}\text{C}$).....	29
Şekil 4.6. R.T.C France güneş hücresi için P-V eğrileri ($T = 33\text{ }^{\circ}\text{C}$).....	29

ÇİZELGE LİSTESİ

<u>Çizelge</u>	<u>Sayfa</u>
Çizelge 2.1. Türkiye'nin gelecekte beklenen elektrik güç kapasitesi.....	13
Çizelge 2.2. Çeşitli PV hücrelerinin verimlilik/avantaj yönünden kıyaslanması.	16
Çizelge 4.1. $T = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$ Sıcaklığında PV modüllerin üretici firma verileri.....	21
Çizelge 4.2. BP-MSX120 PV modülü için elde edilen parametre değerleri.....	21
Çizelge 4.3. BP-MSX120 Çözümlerinin denklemlere yerleştirilmesiyle bulunan sonuçlar.....	22
Çizelge 4.4. KL070 PV modülü için hesaplanan eşdeğer devre parametreleri.....	23
Çizelge 4.5. MSX60 PV modülü için hesaplanan eşdeğer devre parametreleri....	24
Çizelge 4.6. KC200GT PV'si için hesaplanan eşdeğer devre parametreleri.....	24
Çizelge 4.7. SW255 PV modülü için hesaplanan parametre değerleri.....	24
Çizelge 4.8. BP SX-150 PV'si için hesaplanan eşdeğer devre parametreleri.....	25
Çizelge 4.9. MSX120 ve R.T.C Güneş Hücresi için belirlenen eşdeğer devre parametreleri.....	26
Çizelge 4.10. Kullanılan PV Modelleri İçin Elde Edilen (I-V) ve (P-V) RMS değerleri.....	28

1. GİRİŞ

Gün geçtikçe artan enerji talebi ve güneş paneli üretim maliyetlerinin düşmesi, PV hücrelerini bağımsız enerji üretim sistemlerinde ya da enterkonnekte şebekelerde daha çok tercih edilen enerji kaynakları haline getirmiştir. Bu nedenle, PV modüllerinin doğru şekilde modellenmesi, etkin değerlendirme ve kalite kontrolünde oldukça önemlidir. Ek olarak, eşdeğer devre parametrelerine dayanan sistemin çıkış akımı ve güç (I-V ve P-V) eğrileri, tasarım ve boyutlandırma açısından büyük önem taşımaktadır (Heijri ve ark., 2016). Bu sebeple bir PV hücresinin eşdeğer devre modelinin oluşturulması ve özellikle bu modeldeki parametrelerinin belirlenmesi konusunda yapılmış birçok çalışma mevcuttur. Literatürde tek-diyot beş parametre model ve iki-diyot yedi parametre model olmak üzere iki tip eşdeğer devre modeli yaygın olarak kullanılmaktadır. Örneğin, bir PV hücresi Chan ve Phang (1987) tarafından deneysel verilere dayanan analitik teknikler kullanılarak hem tek-diyot beş parametre model hem de iki-diyot yedi parametre model ile ayrı ayrı ele alınmıştır. Her iki model için de çeşitli yöntemlerin uygulanabileceği analitik ve sayısal çözümler bulunmaktadır. İki ticari PV modülün kullanıldığı Shongwe ve Hanif (2015) tarafından yapılan çalışmada tek-diyot beş parametre eşdeğer devre modeli parametrelerinin belirlenmesi için geliştirilen farklı yöntemler karşılaştırılmıştır. Tek-diyot modeline şönt direnç ve seri direnç eklenerek bu model geliştirilmiştir. Benzer bir şekilde, Sera ve ark. (2007)'nin yaptığı çalışmada yazarlar Standart Test Koşullarını (STC) ve sıcaklığa bağlı doyma akımını dikkate alarak şönt direncini ve seri direnci modellemektedir fakat bunu gerçekleştirirken çözüm için kullanılan denklem kümesindeki bazı terimleri ihmal etmişlerdir. Kullanılan denklemlerin doğrusal olmayışı ve bilinmeyen değişkenlerin sayısının fazla oluşu bu tür sistemler için analitik çözüm üretmeyi kullanışlı kılmamaktadır ve dolayısıyla sayısal çözümler daha çok tercih edilmektedir. Buna göre Reis ve ark. (2017), tek diyotlu beş parametrelili modeli sayısal yöntemlerle çözmek için formüller türetmiştir. Bu formüllerle oluşturulan denklem kümesi bir sayısal çözüm yöntemi olan Newton-Raphson tekniği ile çözülmüş ve bilinmeyen parametrelerin bu yöntemle kolayca belirlenebileceği gösterilmiştir. Fakat çözüm için gerekli olan adım sayısındaki artışın işlem süresini uzun kılması nedeniyle Newton Raphson yöntemi yüksek doğrulukta sonuçlar vermesine rağmen dezavantajlı bir hale gelmektedir. Çalışmasına Lambert W fonksiyonunu dahil eden Patel (2016), analitik yöntemler ile sayısal yöntemleri sentezleyerek ortaya koyduğu yeni bir metot ile işlem süresini kısaltmıştır. Kareem ve Saravanan (2016),

nümerik çözüm için Gauss-Seidel yöntemini kullanmış ve deneysel verilerle karşılaştırarak elde edilen



sonuçların doğruluğunu öne sürmüştür. Yapılan çalışmada Gauss-Seidel yöntemi başlangıç koşullarından önemli ölçüde etkilendiğinden başlangıç değerleri analitik yaklaşımlarla belirlenmiştir. Bu çalışmaların dışında tek-diyot model için parametrelerden birinin sabit kabul edildiği farklı denklem setleri de oluşturulmuştur. Örneğin Chaibi ve ark. (2018) tarafından yapılan çalışmada eşdeğer devre modelinin ana parametrelerinden biri olan şönt direnci giriş parametresi olarak ele alınmıştır. Başka bir deyişle, şönt direncinin deneysel ölçümlerle belirlenebileceği ve bu nedenle şönt direnci parametresinin bilindiği varsayılmaktadır. Deneysel ölçüme dayanan bu yöntemde farklı şönt direnci değerlerine göre hesaplanan parametrelerin yaklaşık olarak aynı olduğu ve bunun sonucunda ölçüm hatalarının etkisiz olduğu belirtilmiştir. Benzer bir şekilde, eşdeğer devreyi temel alan analitik bir model Cubas ve ark. (2013) tarafından geliştirilmiştir ve sonuçları literatürde mevcut olanlarla karşılaştırarak iyi bilinen iki ticari PV modülünde test edilmiştir. Bu model kullanılarak elde edilen makul sonuçlara rağmen, denklem setindeki bir ana parametre olan diyot idealite faktörü bir giriş parametresi olarak tanımlanmış ve aralığı 1 ile 1.5 arasında tutulmuştur. Bu modellerin yanı sıra değişkenleri sıcaklığa bağlı modeller ile de belirlemek mümkündür. Ancak sıcaklığa bağlı modelde üretici firmanın vermiş olduğu I-V, P-V karakteristiği ile güneş ısısı önemli bir etken haline bürünmektedir (Farivar ve Asaei, 2010). Literatürde yaygın olarak kullanılan tek diyotlu beş parametrelili model ve iki diyotlu yedi parametrelili model arasındaki temel fark, parametre sayılarındaki farklılıklar ve parametrelerin hesaplanan değerlerinin ne derece doğruya yakın olduğuyla ilgilidir. Her iki ana modelin karşılaştırmalı bir incelemesi Shannan ve ark. (2013)'nın yapmış olduğu çalışmada verilmiştir. Bu referanstaki çalışmada modeller arasındaki farklılıklar, doğruluk ve işlem süreleri açısından analiz edilmiş ve buna göre iki-diyot yedi parametre modelinin daha iyi bir doğruluğa sahip olduğu ancak hesaplamalarda daha uzun bir işlem süresine gerek duyduğu sonucuna varılmıştır. Benzer bir şekilde Yahfdhou ve ark. (2016)'nın yaptığı çalışmada ise yazarlar her iki modeli de bir sayısal çözüm yöntemi kullanarak çözmüşler ve PV hücresini bir hibrit sistemde simüle etmişlerdir. Buna ek olarak, yazarlar tek- diyot modelinin daha az parametreye sahip olduğunu, böylece bilinmeyenlerin daha kısa sürede hesaplanabileceğini, ancak iki-diyot modelinin doğruluk açısından daha tutarlı olduğunu belirtmişlerdir. Nümerik çalışmalarda başlangıç değerlerinin saptanması zor olduğundan, Hejri ve ark. (2014) tarafından iki-diyot modelinin başlangıç değerlerini belirlemek adına yaklaşık analitik

özüm­ler öne sürölmüş­tür ve yöntem farklı ticari PV hücrelerinin deneysel verileri kullanılarak doğrulanmıştır. Yazarlar ayrıca tek diyotlu beş



parametre modelini de analiz etmişlerdir. Hejri ve ark. (2016) tarafından yapılan çalışmada bazı terimler ihmal edilmiş ve bilinmeyen parametre sayısını azaltmak için denklem setinde diyotun doyma akımı etkisiz hale getirilmiştir. Çok parametrelili karmaşık sistemlerde optimum çözüm elde etmek için meta sezgisel yöntemler yaygın olarak kullanılmaktadır. Literatürde PV modülünün parametrelerini elde etmek için bu optimizasyon tekniklerinin kullanıldığı çalışmalar bulunmaktadır (Zagrouba ve ark., 2010; Sandrolini ve ark., 2010; Muralidharan, 2017; Ishaque ve Salam, 2011). Tek-diyot modelindeki bilinmeyen parametrelerin hesaplanması için Zagrouba ve ark. (2011), Genetik Algoritma (Goldberg 1989) kullanmıştır ve çalışmada yöntemin bu sorun için çok etkili olduğunu ifade etmiştir. Parçacık Sürü Optimizasyonu (Kennedy ve Eberhart, 1995) algoritmasının kullanıldığı Sandrolini ve ark. (2010) tarafından yapılan çalışmada yazarlar ilk defa bu yöntemi iki-diyot modelinin parametrelerinin belirlenmesinde PV hücresinin üretici firma tarafından verilen değerlerini dikkate alarak kullanmıştır. Benzer bir yaklaşım Muralidharan (2017) tarafından da tek-diyot model parametrelerinin belirlenmesi için kullanılmıştır. Diferansiyel Gelişim Algoritması (Rainer ve Kenneth, 1997) olarak adlandırılan başka bir teknik ise tek-diyot modeline Ishaque ve Salam (2011) tarafından uygulanmıştır. Geliştirilen model deneysel veriler üzerinde değerlendirilmiş ve elde edilen sonuçların daha doğru olduğu düşünülerek sonuçlar tek-diyotlu modeliyle karşılaştırılmıştır. Ayrıca, çoklu optimizasyon tabanlı yöntemler kullanılarak yapılan parametre tahmini çalışmaları da literatürde bulunmaktadır. Saravanan ve Panneerselvam (2013)'ın yaptığı çalışmada tek-diyot modelinin parametrelerini çıkarmak için hibrit GA- PSO temelli bir algoritma önermiştir ve bu hibrit yaklaşımın GA temelli yöntemle göre daha avantajlı olduğunu göstermiştir. Bencherif ve Benouaz (2018), hesaplanacak parametrelerin sayısını sadece ikiye indirmiş ve arama algoritmasına dayanan grafik yöntemi kullanarak bir çözüme ulaşmışlardır. PV modülleri için iki-diyot eşdeğer devre parametrelerinin çıkarılması için Nelder-Mead ve modifiye PSO algoritmasının kombinasyonuna dayanan bir karma yöntem Hamid ve ark. (2016) tarafından geliştirilmiştir. Önerilen model ile diğer meta sezgisel metotların, ticari bir PV modül üzerinde elde ettiği sonuçlar kıyaslanarak bu modelin geçerliliği önerilmiştir. Tek- diyot eşdeğer devre modelinin parametrelerini çıkarmak için Hussein (2017), diyot idealite faktörünün (a) bağımsız bir değişken olarak tanımlandığı kısmi arama tabanlı bir algoritma geliştirmiştir. Kullanılan yöntemde, kalan parametrelerin değerleri, sadece seri direnç (R_s) indirgenmiş bir denklemin sayısal

verileri arasında tanımlanan hata değerine dayanarak sonlandırılmıştır. İki- diyot eşdeğer devre modeli için de benzer bir yaklaşım Amin ve Shakhoseini (2018) tarafından kullanılmıştır. Seri direnç bağımsız bir parametre olarak kullanılmış ve geri kalan parametreler her bir iterasyonda seçilen seri dirence göre belirlenmiştir. Bu yöntemde uygulanan prosedür, seçilen seri direncin değeri hesaplanan değerle uyum sağlayana dek tekrar edilmiştir. Mohapatra ve ark. (2017) tarafından yapılan çalışmada PV eşdeğer devresinden beş temel doğrusal olmayan denklem oluşturulmuş ve bu denklemler MATLAB platformuna ait bir çözüm tekniğiyle ticari bir PV modülü temel alınarak çözülmüştür. Modelin güvenilirliği deneysel bir sistemde onaylanmış ve modelde ulaşılan sonuçlar literatürde iki farklı yöntemle elde edilenlerle karşılaştırılmıştır. Eşdeğer devre parametrelerinin kestirimi için analitik ve/veya nümerik çözüm teknikleri baz alınarak geliştirilen modeller hakkında detaylı bilgiler Humada ve ark. (2016) tarafından verilmiştir. Bu çalışmada PV hücreleri/modülleri modellemede kullanılan tek-diyotlu eşdeğer devre için bir matematiksel model önerilmiştir. Model, standart test koşulları dahil olmak üzere farklı sıcaklık ve güneş ışınımı değerlerinde çeşitli ticari PV hücrelerinde/modüllerinde onaylanmıştır. Karşılaştırma amacıyla literatürde mevcut olan bazı analitik yöntemler de dikkate alınmaktadır. Sonuçlar göstermektedir ki hesaplamalarda kayda değer etkisi olan hiçbir terim ihmal edilmeden geliştirilen bu model eşdeğer devre parametrelerini belirlemede daha geçerli ve tutarlı bir yapıya sahiptir. Buna ek olarak, geliştirilen modelin literatürde mevcut olan yöntemlerle karşılaştırıldığında başlangıç koşullarına bağlı olmadığı görülmektedir.

2. PV HÜCRELERİNİN YAPISI ve ÇEŞİTLERİ

Güneş, her gün çok büyük miktarda enerji yayan sonsuz bir güç kaynağıdır. Ve dünyada bir yılda kullanılan enerjiden daha fazla enerjiyi bir günde yaymaktadır. Güneş enerjisi yenilenebilir enerji kaynağıdır. Güneşin enerjisi güneşin içinden gelir. Çoğu yıldız gibi, güneş de plazma halindeki çoğunlukla hidrojen ve helyum atomlarından oluşur. Güneş, nükleer füzyon adı verilen bir süreçten enerji üretir. Nükleer füzyon sırasında, güneşteki yüksek basınç ve sıcaklık çekirdek esanslarının elektronlarından ayrılmasına neden olur. Hidrojen çekirdekleri bir helyum atomu oluşturmak üzere kaynaşır. Füzyon işlemi sırasında ısıma (yayılım) enerjisi açığa çıkar. Güneşin çekirdeğindeki tüm enerjinin güneş yüzeyine ulaşması 150000 yıl alabilir ve bu güneş enerjisi ısıma yoluyla sekiz dakikadan biraz fazla bir süre ile Dünya'ya olan 93 milyon kilometreyi seyahat edebilir. Işıma enerjisi Dünya'ya saniyede yaklaşık olarak 300000 km hızla, ışık hızında gider. Güneşin uzaya yaydığı enerjinin sadece iki milyarda birlik küçük bir kısmı Dünya'ya çarpılmaktadır, ama yine de bu miktarda enerji muazzam bir boyut ifade etmektedir. Dünyaya ulaşan yayılım enerjisinin yaklaşık yüzde 30'u uzaya geri yansır. Işıma enerjisinin yaklaşık yarısı kara ve okyanuslar tarafından emilir. Geri kalanlar sera etkisindeki atmosfer ve bulutlar tarafından emilir. Doğrudan büyük miktarda enerji sağlamanın yanı sıra, güneş aynı zamanda birçok farklı enerji formunun kaynağıdır. Güneş enerjisi su döngüsüne güç vererek, hareketli suyun enerjisinden yararlanmamızı sağlar. Güneş enerjisi, rüzgâr oluşumunu yönlendirerek kinetik enerjiyi elektriğe dönüştürmek için rüzgâr türbinlerini kullanmamızı sağlar. Bitkiler fotosentez sürecinde güneş enerjisini kullanır. Biokütle, enerji kaynağını güneşe kadar götürebilir. Fosil yakıtlar bile enerjilerini güneşten almıştır. İnsanoğlu yüzyıllar boyunca güneş enerjisinden bir şekilde faydalanmıştır. M.Ö. yedinci yüzyılın başlarında insanlar ateş yapmak için güneşten gelen ışığı odaklamak için temel büyüteçleri kullandılar. Bir asır önce, Fransa'da bir bilim adamı, bir motora güç vermek için buhar yapmak amacıyla bir güneş kolektörü (toplayıcı) kullanmıştır. Güneş enerjili su ısıtıcıları Amerika Birleşik Devletleri'nin güneybatısında 1900'lerin başında popülerlik kazanmıştır. Günümüzde insanlar binaları ve suyu ısıtmak ve elektrik üretmek için güneş enerjisini kullanmaktadır. Güneş enerjisini kullanmak için çeşitli yöntemler geliştirilmiştir. Bunlardan bazıları güneş kolektörleri, solar boşluk ısıtma ve bunun ana iki tasarımı olan pasif solar tasarımı ile aktif solar tasarımı, solar su ısıtma ve bu tezin de çerçevesini etrafında şekillendirdiği konu olan fotovoltaiik sistemlerdir (PV). Güneş toplayıcısı

(kolektörü), güneş ışığını yakalamanın ve onu ısı enerjisine veya termal enerjiye dönüştürmenin bir yoludur. Bir



alanın aldığı güneş enerjisi miktarı günün saatine, yılın mevsimine, gökyüzünün bulanıklığına ve Dünya'nın Ekvator'dan ne kadar uzak olduğuna bağlıdır. Güneşli bir günde dışarıda bulunan kapalı bir araba dahi bir güneş kolektörü sıfatına sahip olmaktadır. Güneş ışığı otomobilin camlarından geçerken, koltuk kılıfları, yan paneller ve otomobilin zemini onu emer. Emilen enerji, aracın içinde sıkışan termal enerjiye dönüşür. Sera ayrıca bir güneş toplayıcısının harika bir örneğini oluşturur. Alan ısıtma, bir binanın içindeki alanı ısıtma anlamına gelir. Bugün, birçok ev alan ısıtma için güneş enerjisi kullanmaktadır. İki temel tip güneş alan ısıtma sistemi vardır: pasif ve aktif. Hibrit güneş sistemleri pasif ve aktif sistemlerin bir birleşimidir. Pasif bir güneş evi, mümkün olduğunca fazla güneş ışığına izin verecek şekilde tasarlanmıştır. Büyük bir güneş kolektörü. Güneş ışığı pencerelerden geçer ve evin içindeki duvarları ve zemini ısıtır. Işık içeri girebilir, ancak termal enerji içeride hapsolmuştur. Pasif bir güneş evi, ısıyı ev boyunca hareket ettirmek için mekanik donanıma bağlı değildir. Örneğin, tenteler, güneş ufukta daha alçak olduğunda kışın ışığa izin verecek şekilde tasarlanabilir, ancak yazın gökyüzünde güneşin daha yüksek olduğu pencereleri gölgede bırakır. Pasif güneş binaları yaşamak veya çalışmak için sessiz, huzurlu yerlerdir. Makineye güvenmezler ve içerideki hava yerine duvarları veya zeminleri ısıtırlar. Pasif evler ihtiyaç duydukları sıcaklığın yüzde 30 ila 80'ini güneşten alabilirler. Isı enerjilerini, duvar, beton, taş ve hatta su gibi ısıyı iyi tutan kalın duvarlar ve yapı malzemeleri kullanarak depolarlar. Pasif bir evde üfleyiciler veya fanlar varsa, buna hibrit güneş sistemi denir. Aktif bir güneş enerjisi evi, termal enerjiyi toplamak ve taşımak için mekanik donanım ve diğer enerji kaynaklarını kullanır. Aktif bir güneş sistemi örneği, cam üstleri olan çerçevelerin içindeki koyu renkli metal plakalardan oluşur. Bu sistemler genellikle çatıya veya iyi güneş ışığına maruz kalan bir yere monte edilir. Metal plakalar güneş ışığını emer ve toplayıcı içindeki bir sıvıyı ısıtan termal enerjiye dönüştürür. Isıtılan sıvı bir pompa ile eve taşınır ve sıvının termal enerjisi evin içindeki havaya veya suya aktarılır. Bu güneş kolektörleri, en fazla güneş ışığını toplayabilecekleri bir çatı üzerinde yüksek oranda saklanır. Ağaçlar veya diğer binalar tarafından gölgelenmeyecekleri bir alana yerleştirilmeleri gerekir. Isı, sıvı ile dolu büyük bir tankta veya hatta evin altındaki kaya kutularında saklanabilir. Hem aktif hem de pasif tasarımlar, aşırı soğuk veya bulutlu havalarda genellikle fırın veya odun sobası gibi bir çeşit yedekleme sistemi içerir. Güneş enerjisi, ev kullanımı için suyu ısıtmak için de kullanılabilir. Banyo ve yıkama için ısıtma suyu ikinci en büyük ev enerji maliyetidir.

Bir güneş enerjili su ısıtıcısı kurmak bu maliyeti yarıya indirebilir. Güneş enerjili su ısıtıcısı, güneş alan ısıtması gibi çalışır. Yarımküremizde, genellikle güneş

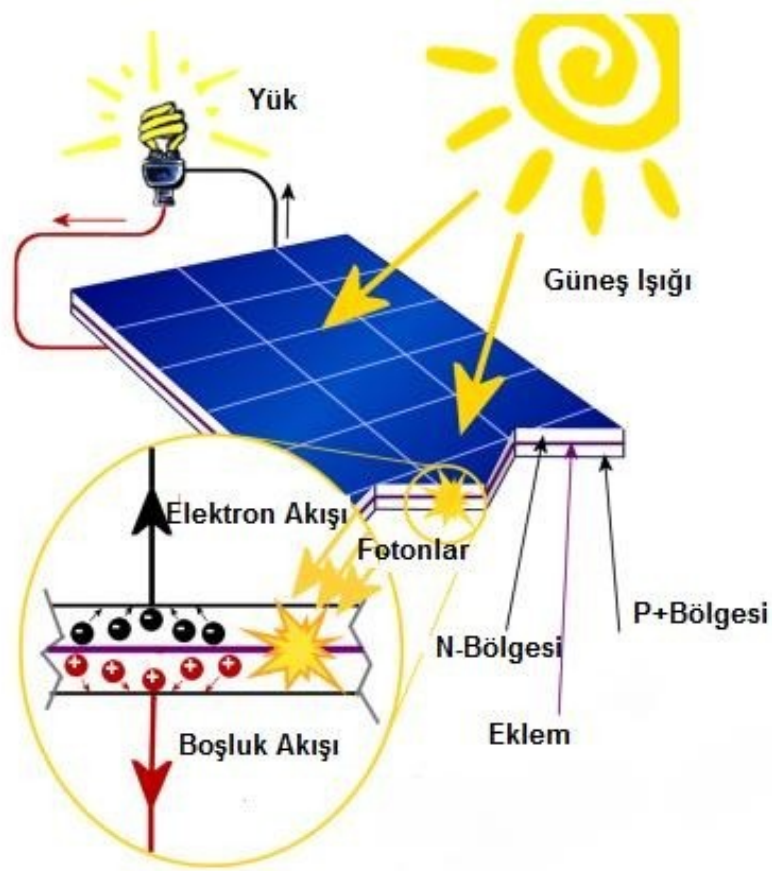


ışığını yakalayabileceği bir çatının güney tarafına bir güneş kolektörü monte edilir. Güneş ışığı suyu ısıtır ve bir depoda saklar. Sıcak su, tıpkı sıradan bir su ısıtıcısında olduğu gibi bir evin her tarafına musluklara bağlanır. Güneş enerjisi elektrik üretmek için kullanılabilir. Güneş enerjisinden elektrik üretmenin iki yolu fotovoltaiik sistemler ve termal enerji kullanan sistemlerdir. Fotovoltaiik, ışık ve volt anlamına gelen fotoğraf, elektrik ölçümü anlamına gelir. Fotovoltaiik hücrelere kısaca PV hücreleri veya güneş hücreleri de denir. Güneş enerjisini kullanmak için PV hücrelerinin kullanılması hızla genişleyen bir bilimdir. İlk pratik PV hücresi Bell Telephone araştırmacıları tarafından geliştirilmiştir. İlk başta PV hücreleri, ABD uzay uydularına güç vermek için öncelikle uzayda kullanılmıştır. Günümüzde ise PV hücreleri birçok farklı uygulamada yaygındır. Güneş enerjisiyle çalışan oyuncaklar, hesap makineleri ve birçok ışıklı yol işareti güneş ışığını elektriğe dönüştürmek için güneş pilleri kullanır. Güneş pilleri, kumda bulunan elementlerden biri ve Dünya'daki en yaygın ikinci element olan ince bir silikon devre levhasından yapılır. Silikon devre levhası tepesine çok az miktarda fosfor eklenir. Bu, silikon devre levhasının üst kısmına ekstra miktarda serbest, negatif yüklü elektron verir. Buna n-tipi silikon denir, çünkü negatif bir karaktere sahip olan n-tipi yapının elektronlarından vazgeçme eğilimi vardır. Silikon devre levhasının dibine, elektronları çekme eğilimi olan az miktarda bor eklenir. Pozitif karakteri nedeniyle p-tipi silikon denir. Bu p-tipi silikonun ise elektronlarına sahip çıkma eğilimi vardır. Dolayısıyla elektronlarının kopmasına kolayca izin vermez. Bu kimyasalların her ikisi de silikon levhaya eklendiğinde, n-tipi silikondan serbest elektronların bir kısmı p-tipi silikona akar ve p-n birleşimindeki katmanlar arasında bir elektrik alanı oluşur. P-tipi artık negatif yüke sahiptir çünkü elektron kazanmıştır. N-tipi pozitif hale gelmiştir çünkü elektronları kaybetmiştir. PV hücresi güneşe yerleştirildiğinde, ışımaya enerjisi serbest elektronları uyarır. Silikon devre levhasının kenarlarını bağlayarak bir devre yapılırsa, elektronlar enerjilerini atomdan atoma n-tipinden tel yoluyla p-tipine aktarırlar. Böylece PV hücresi elektrik üretir hale gelmektedir. Yani hareketli elektronlardan dolayı enerji transferi gerçekleşmektedir. Bir devre oluşturan tel boyunca ampul gibi bir yük yerleştirilirse, elektrik ampulü aydınlatmak için akarken devrede bulunan ampul çalışır. PV panel diyagramı basitçe Şekil 2.1.'de gösterilmiştir. Güneş ışığının elektriğe dönüşümü sessiz ve anında gerçekleşir. Aşınacak mekanik parça yoktur, bu nedenle fotovoltaiik sistemler uzun bir süre dayanır. Fotovoltaiik sistemler, bireysel evlere güç veren sistemlere, birçok eve güç veren büyük enerji santrallerine, hesap makinelerini

dolduranlar gibi küçük hücrelerden dahi oluşabilir. Yerleşik bir PV sisteminin ortalama boyutu yaklaşık 6.1



kW'dır. Fayda ölçekli bir PV'nin ortalama boyutu yaklaşık 4.3 MW'dır. Bununla birlikte, konut, ticari ve kamu ölçekli PV sistemlerinin boyutları, kullanılabilecek alana bağlı olarak büyük ölçüde değişebilir. PV hücrelerini daha ince ve daha esnek hale getirmek için sürekli olarak yeni teknolojiler geliştirilmektedir. Günümüzde PV hücrelerinden yapılmış çatı zonaları bulunmaktadır. Panelleri çatıya koymaktan ziyade, daha hoş bir görünüm için geleneksel zonalarla eşleşen güneş zonaları kullanılabilir. Bilim adamları ev pencerelerine ve evin dışına takılabilen ince, esnek bir filme yerleştirilebilen PV hücreleri geliştirmektedirler.



Şekil 2.1. PV Panel diyagramı

Bunların dışında yoğunlaştırılmış güneş güç sistemleri de büyük ölçekli elektrik üretimi amacıyla tasarlanıp kullanılmıştır. Küçük güneş sistemlerine benzer şekilde yoğunlaştırılmış güneş enerjisi sistemleri de elektrik üretmek için güneş enerjisini kullanır, ancak sadece paneller ile kalmayıp bunların yanı sıra bir türbin sistemi de kullanırlar. Dünyaya ulaşan güneş radyasyonu çok yayıldığından, bir buhar türbini kullanarak elektrik üretmek için gereken yüksek sıcaklıkları üretmek amacıyla ışıınımlar belirli bir noktada konsantre edilmelidir. Güneş enerjisini yoğunlaştırmak ve yoğunluğunu arttırmak için aynalar veya diğer yansıtıcı yüzeyler kullanan birkaç sistem türü vardır. Bu sistemlerden bazıları doğrusal yoğunlaştırılmış sistemler, parabolik oluk sistemleri, lineer fresnel reflektör sistemleri, solar güneş kulesi, çanak/motor sistemleridir. Doğrusal yoğunlaştırılmış sistemler güneş ışığını aynaların hemen üzerinde yer alan alıcılara konsantre etmek için aynalar kullanır. Alıcılar, doğrudan buhara dönüştürülen suyu veya buhar üreten bir ısı aktarıcısına enerji aktaran sıvıyı taşıyan uzun tüplerdir. Buhar, elektrik üretmek için jeneratörü döndüren bir türbini çalıştırır. Doğrusal yoğunlaştırılmış sistemler parabolik oluk sistemleri veya doğrusal fresnel reflektör sistemleri olarak farklı şekillerde kullanılabilir. Parabolik oluk sistemleri, güneş ışığını odak hattında bulunan bir boruya odaklayan oluklarda uzun, kavisli aynalar kullanır. Borunun içinde dolaşan bir sıvı enerjiyi toplar ve bunu bir ısı aktarıcısına aktarır ve geleneksel bir türbini çalıştırmak için buhar üretir. Parabolik oluk sistemlerine bir örnek Şekil 2.2.'de gösterilmiştir. Dünyanın en büyük parabolik oluk sistemi Kaliforniya'daki Mojave Çölü'nde bulunmaktadır. SEGS tesisi, birlikte toplam 354 MW'lık üretim kapasitesine sahip birkaç sahadan oluşmaktadır. Bir MW elektrik üretmek için beş ila on dönümlük parabolik oluklara ihtiyaç vardır. Arizona dünyanın bu türden en büyük tesislerinden birine daha ev sahipliği yapıyor. Phoenix yakınlarındaki Solana tesisi 280 MW üretebilir. Doğrusal Fresnel Reflektör sistemleri, güneşi üstlerindeki bir tüp alıcıya konsantre etmek için gruplar halinde birkaç düz ayna kullanır. Bu düzenleme aynaları maksimum yansıma için güneşin konumunu daha iyi izlemesini sağlar. Fresnel reflektör sistemlerinin bir örneği Şekil 2.3.'de gösterilmiştir. Parabolik ve fresnel reflektör sistemlerinin her ikisinin de birbirine göre avantajı ve dezavantajı bulunmaktadır. Parabolik oluk sistemleri performans açısından kanıtlanmıştır ve mükemmel performansa sahiptir. Bununla birlikte, parabolik aynaların üretimi pahalıdır ve enerji santralleri büyük miktarda arazi gerektirir. Lineer Fresnel reflektör sistemleri, üretimi daha kolay ve

daha ucuz aynalar kullanır. Bununla birlikte, doğrusal Fresnel reflektör sistemlerinin performansı henüz parabolik olukların



performansıyla eşleşmemektedir. Bir güneş enerjisi kulesi, güneş enerjisini merkezi bir kulenin tepesindeki bir alıcıya odaklayan heliostat adı verilen geniş bir güneş izleme aynaları alanından oluşur. Kulenin bir noktasında odaklanan güneş ışınlarındaki muazzam enerji miktarı 500 santigrat derecenin üzerinde sıcaklıklar üretebilir. Termal enerji, daha sonra kullanılmak üzere enerji tasarrufu sağlayan su veya erimiş tuzun ısıtılması için kullanılır. Bir ısı aktarıcısında, sıcak su veya erimiş tuz suyu ısıtır ve türbin jeneratörünü hareket ettirmek için kullanılan buhara dönüştürür. Şekil 2.4.'de görüldüğü gibi Türkiye'de ilk örneği olan güneş enerjisi kulesi sistemi Mersin'de bulunmaktadır. Şekil 2.5.'de bir örneği gösterilen çanak/motor sistemleri, elektrik üretmek için odak noktasında bulunan bir ısı motoru ile sinyallerden ziyade güneş ışığını yoğunlaştıran uydu çanakları gibidir. Bu jeneratörler, kentsel ve uzak yerlerde ayrı ayrı veya kümelerde çalıştırılabilen küçük, mobil üniteler olabilir.



Şekil 2.2. Afrika'daki bir parabolik tekneli güç santrali (www.afrik21.africa)



Şekil 2.3. Fresnel reflektör sistemlerinin bir örneği (www.haukedressler.com)



Şekil 2.4. Mersin güneş güç kulesi sistemi (www.muhendisgelisim.com)



Şekil 2.5. Örnek stirling çanak enerji santrali (www.greentechmedia.com)

Güneş enerjisi gelecek için büyük bir potansiyele sahiptir. Güneşten gelen parlak enerji ücretsizdir ve kaynakları sınırsızdır. Herhangi bir ulus veya endüstri tarafından kontrol edilemez. Fotovoltaik sistemlerin ürettiği elektrik çevreyi kirletmez; bununla birlikte, PV hücresi üretiminin çevresel bir etkisi vardır. Güneş elektrik sistemleri güvenli, temiz ve sessiz çalışır, çok az bakım gerektirir, uzak bölgelerde ve bazı konut ve ticari uygulamalar için uygun maliyetlidir. Bu özelliklerinin yanı sıra güneş sistemleri esnektir. Evler ve işletmeler için artan elektrik ihtiyaçlarını karşılamak üzere genişletilebilir. Güneşin sınırsız gücünden yararlanacak teknolojiyi geliştirdikçe, sürdürülebilir bir enerji geleceği için insanoğlu birlikte çalışabilecek ortamı oluşturabilir. Bunların dışında hidroelektrik güç, biyokütle enerjisi, jeotermal enerji ve okyanuslar da yenilenebilir enerji kaynaklarının bazı sınıflarını oluşturmaktadırlar. Yenilenebilir enerji kaynakları çoğunlukla yeni bir teknoloji olarak düşünülse de, doğanın gücü ısıtma, ulaşım, aydınlatma ve daha fazlası için uzun zamandır insanoğlu tarafından kullanılmaktadır. Rüzgar, denizlere yelken açmak için tekneleri ve tahıl öğütmek için yel değirmenlerini güçlendirmiştir. Güneş gün boyunca sıcaklık sağlamış ve ateşin akşama kadar sürmesine yardımcı olmuştur. Bütün bunların yanı sıra yenilenebilir enerji kaynaklarının önemi ülkemizde de giderek artmaktadır. Bu hususa örnek olarak Celik (2006)'ın yapmış olduğu çalışmada Türkiye'de 2010'da kullanılan ve 2020'de kullanılması beklenen enerji kaynaklarının gelişimi Tablo 2.1.'de verilmiştir. Bu çalışmaya göre 2020 yılında Türkiye'de hidro ve yenilenebilir bazlı kaynaklardan

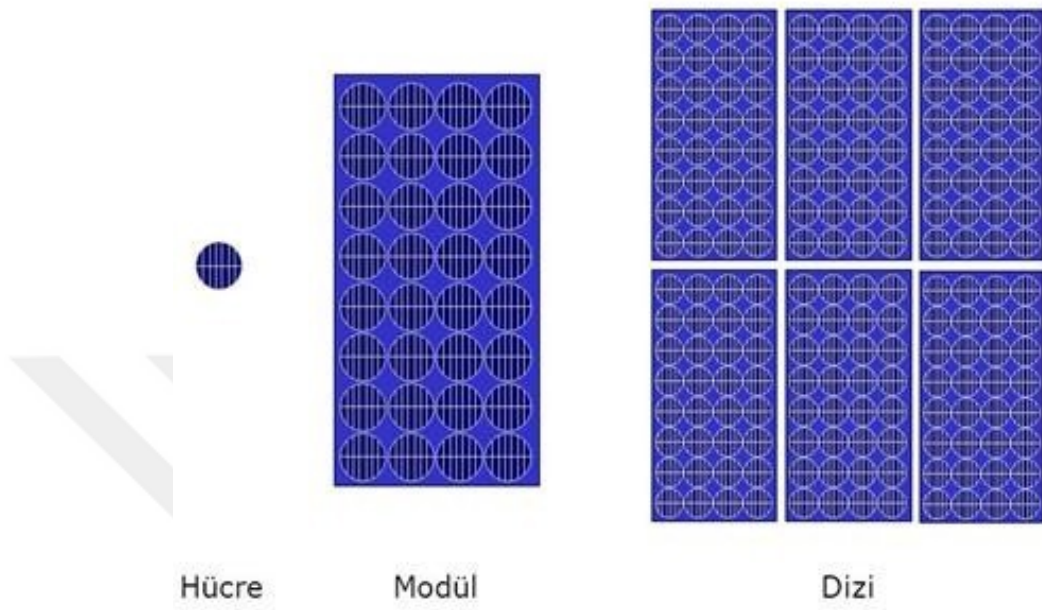
Üretilen enerji miktarının diğer kaynaklardan üretilen enerji miktarına göre oldukęa fazla olacağını söylemek



mümkündür. Bu da Türkiye'nin yenilenebilir enerji kaynaklarından ilerleyen yıllarda daha fazla kullanacağını göstermektedir. Güneş enerjisi yenilenebilir enerji kaynaklarından biridir. Güneş enerjisinden yararlanmak amacıyla güneş ışınlarının sahip olduğu foton enerjisini elektrik enerjisine dönüştürme işlemi güneş hücreleri (fotovoltaik piller) aracılığıyla yapılmaktadır. Çok sayıda fotovoltaik hücre (PV cell) bir arada kullanılarak bir güneş modülü (PV module) ve çok sayıda güneş modülü bir arada kullanılarak bir güneş paneli (dizi) oluşturulur. Güneş hücresi, güneş modülü ve güneş paneli (dizi) arasındaki yapı ilişkisi Şekil 2.6.'da gösterilmiştir. Güneş panellerindeki en temel ve en küçük yapıtaşı olan güneş hücresi, ışık enerjisini elektrik enerjisine dönüştüren sistem olarak tanımlanır. Güneş ışınları PV hücresine düştüğü zaman PV hücresi tarafından emilime uğrayabilir, yüzeyden yansiyabilir veya hücreyi doğrudan geçebilir ve bu olası durumlar içerisinde ışınların emilen kısmını PV hücresi elektrik enerjisine dönüştürülür (Koç ve ark., 2007). Şekil 2.7.'de gösterildiği gibi bir PV hücresinin içyapısı P ve N ekleminden oluşan bir diyot içyapısı şeklinde gösterilebilir. PV yüzeyine düşen güneş ışınları, fotoelektrik olay ile PV hücresinden elektronlar kopararak elektrotlar aracılığıyla devrede bir elektrik akımı oluşturur.

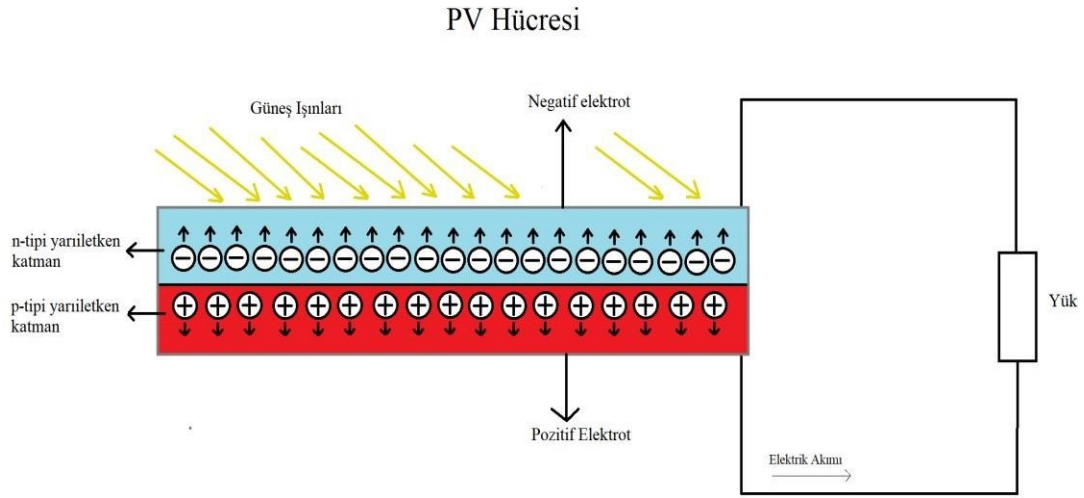
Tablo 2.1. Türkiye'nin beklenen elektrik güç kapasitesi (Celik, 2006)

Yakıt Kaynağı	2010 yılında		2020 yılında	
	Kurul u Kapas ite (MWe)	Üret im (Gw h)	Kurul u Kapas ite (MWe)	Üret im (Gw h)
Kömür	16106	104035	26906	174235
Doğal gaz	18856	125548	34256	225648
Akaryakıt ve dizel	3125	17.993	8025	49842
Nükleer	2000	14000	10000	70000
Hidro ve yenilenebilir	24982	85719	30031	104043
Toplam	65069	347294	109218	623768

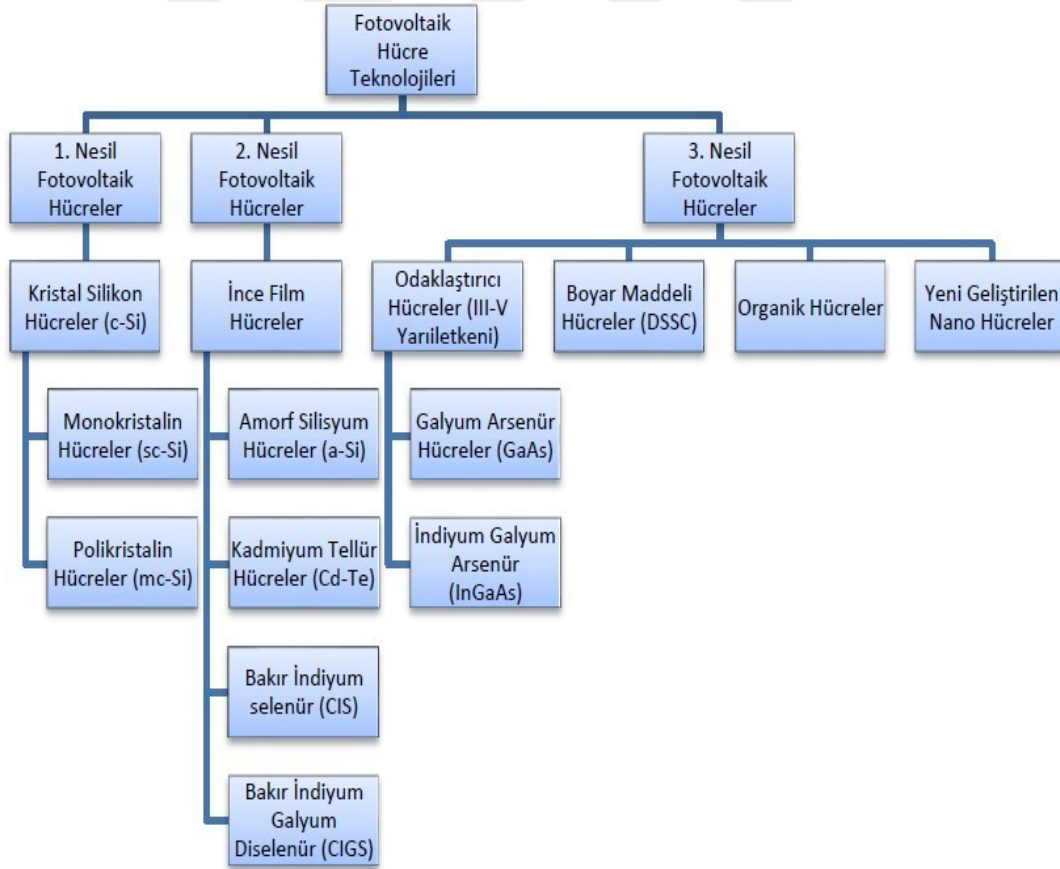


Şekil 2.6 Hücre, modül, dizi arasındaki ilişki

Güneş enerjisinden elektrik enerjisi üretme amacıyla çeşitli tiplerde PV hücreleri üretilmiştir. Şekil 2.8. Fotovoltaik hücre teknolojilerini göstermektedir. Bunlardan yaygın olarak bazıları; tek kristalli silisyum hücreler, çok kristalli silisyum hücreler, wafer temelli kristal silisyum hücreleri, ince filmlili hücreler, kadmiyum tellür hücreler, amorf silisyum hücreler, a-Si/c-Si karma yapıli hücreler, bakır indiyum hücreler, yüksek verimli ve yoğunlaştırılmış materyalli hücreler, organik hücrelerdir. PV hücre çeşitlerinin kıyaslanması Tablo 2.2.'de verilmiştir (Polman ve ark., 2016). Tablo 2.2.'den görüleceği üzere tek kristalli silisyum temelli güneş hücrelerinin verimi diğerlerine göre oldukça yüksektir. Çok kristalli silisyum bazlı güneş hücrelerinin verimi tek kristalli silisyum bazlı hücrelere göre düşük olsa da üretim maliyeti ve üretim kolaylığı açısından tek kristalli hücrelere göre daha üstündür (Koç ve ark., 2007). İnce şeritli PV'ler ise seri üretim hem daha pratik hem de daha az maliyetlidir (Kazmerski, 2005).



Şekil 2.7. Bir PV hücresinin iç yapısı



Şekil 2.8. Fotovoltaik hücre teknolojileri

Tablo 2.2. Çeşitli PV hücrelerinin verimlilik/avantaj yönünden kıyaslanması (Polman ve ark., 2016)

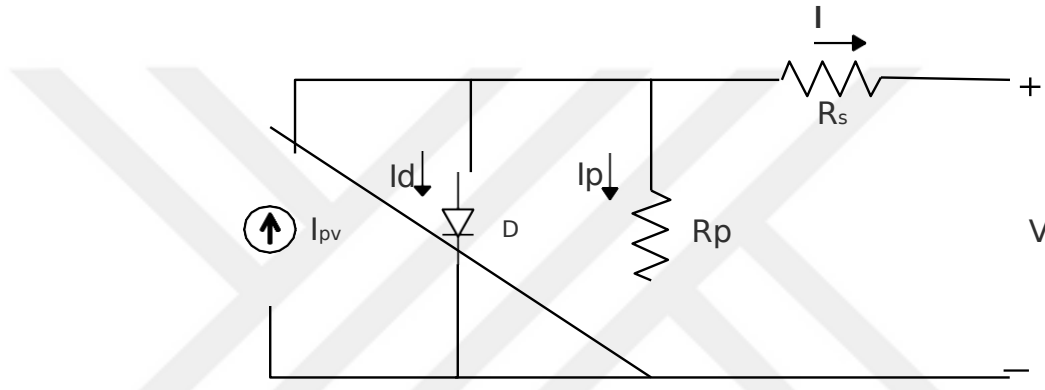
Materiyal	Hücre Verimi (%)	Modül Verimi (%)	Teknolojik Gücü ve Seçenekleri	Seçili Araştırma/Teknolojinin Olanakları	
Büyük ölçekte tedarik edilen oturmuş teknolojiler					
Tek Silisyum	Kristalli	25.6	22.4	Yeryüzünde bulunması	Rekombinasyon kayıplarını daha da azaltması,yeni metalizasyon teknikleriyle birlikte daha ince şeritlerde ışık yönetimini iyileştirmesi
Çok Silisyum	Kristalli	21.3	18.5	Yeryüzünde bulunması	Gelişmiş şerit kalitesi ile rekombinasyon kayıplarını azaltması
CIGS		21.7	17.5	Esnek katmanlar	Gelişmiş yönetimi, bantları
CdTe		21.5	18.6	Esnek katmanlar, kısa sürede enerjiyi amorti etmesi	iyi verim Rekombinasyon kayıplarının düşürülmesi, daha ince hücre tasarımları
Daha küçük ölçekte gelişen teknolojiler					
Dye-sensitized TiO ₂		11.9	10.0	Ayarlanabilir renkler	Redoks çiftini iyileştirmesi; rekombinasyon kayıplarının azalması, bant boşluğunu arttırması, sürdürülebilirliği arttırması
İnce Silisyum	Şeritli	11.4	12.2	Esnek modüller	Rekombinasyon kayıplarını azaltması, daha iyi ışık yönetimi
Organik		11.5	9.5	Esnek modüller, yarı transparan modüller	Daha iyi ışık yönetimi, bant boşluğunun artması, stabilizasyonun artması, rekombinasyon kayıplarının azalması
Üretim düzeyindeki teknolojiler					
GaAs		28.8	24.1	Yüksek verim, esnek modüller	Daha iyi ışık yönetimi, IBC geometrisinin gelişmesi
Geliismekte olan teknolojiiler					

Perovskite	21.0	n.a.	çözüm	Rekombinasyon kayıplarının azalması, hücre stabilizasyonunun artması, Pb (kurşun) kullanımından sakınılması
CZTS	12.6	n.a.	odaklı, esnek modüller	Rekombinasyon kayıplarının azalması, daha iyi ışık yönetimi
Kuantum Noktalar	9.9	n.a.	Çözüm	Rekombinasyon kayıplarının azalması
			odaklı, esnek modüller	



3. PARAMETRE KESTİRİM METODU GELİŞTİRİLMESİ

Hareketli parçalarının bulunmaması nedeniyle PV hücreleri, enerji üretimi arıza ve bakım kolaylığı açısından elverişli sistemlerden biridir. Bu nedenle PV modüllerinin yaşam ömrü diğer yenilenebilir enerji çevrim sistemlerinden daha yüksektir (Kareem ve Saravanan, 2016). PV hücrelerinin elektrik modellemelerinde yukarıda belirtildiği gibi iki basit eş değer devre kullanılmaktadır. Bunlar tek-diyot beş parametre ve iki-diyot yedi parametre eşdeğer devre modelleridir. Şekil 3.1.'de tek-diyot beş parametre eş değer devresi gösterilmektedir (Chan ve Phang, 1987; Hejri ve ark., 2016).



Şekil 3.1 Tek-diyot beş parametrelili devre modeli

Şekilde gösterildiği gibi PV hücresinde üretilen foton akımı paralel bir diyot ile I_{pv} olarak gösterilmiştir. Bu şekilde R_p ve R_s sırasıyla paralel ve seri direnci göstermektedir. V_t ifadesi diyot üzerindeki termal gerilime ($V_t = kN_s T/q$) karşılık gelmektedir. PV modülündeki seri bağlı hücre sayısı N_s ile gösterilmektedir. $1,38 \times 10^{-23}$ J/K değerindeki Boltzmann sabiti k ile, elektron yükü ($1,6 \times 10^{-19}$ C) ise q ile belirtilmiştir. Son terim olan T ise Kelvin cinsinden hücre sıcaklığıdır. Sisteme Kirchoff Akım Yasası uygulandığında çıkış akımı aşağıdaki gibi elde edilir.

$$I = I_{pv} - I_d - I_p \quad (1)$$

$$I = I_{pv} - I_0 \left(e^{\frac{V+IR_s}{aV_t}} - 1 \right) - \frac{V+IR_s}{R_p} \quad (2)$$

Kısa devre durumunda ($I_{sc}, 0$),

$$I_{sc} = I_{pv} - I_0 \left(e^{\frac{I_{sc}R_s}{aV_t}} - 1 \right) - \frac{I_{sc}R_s}{R_p} \quad (3)$$

Açık devre durumunda (0, V_{oc}),

$$0 = I_{pv} - I_0 \left(e^{\frac{V_{oc}}{aV_t}} - 1 \right) - \frac{V_{oc}}{R_p} \quad (4)$$

Maksimum güç noktasında (I_{mpp} , V_{mpp}),

$$I_{mpp} = I_{pv} - I_0 \left(e^{\frac{V_{mpp} + I_{mpp} R_s}{aV_t}} - 1 \right) - \frac{V_{mpp} + I_{mpp} R_s}{R_p} \quad (5)$$

Bu noktada gücün gerilime göre türevi,

$$\frac{dP}{dV} = I + \frac{dI}{dV} V \quad (6)$$

$$0 = I_{mpp} + \frac{dI}{dV} V_{mpp} \quad (7)$$

$$\frac{dI}{dV} = - \frac{I_{mpp}}{V_{mpp}} \quad (8)$$

Denklem 2.'de verilen eşitliğin gerilime göre türevi alındığında,

$$\frac{dI}{dV} = - \frac{I_0}{aV_t} \left(1 + R_s \frac{dI}{dV} \right) e^{\frac{V + I R_s}{aV_t}} - \frac{1}{R_p} \left(1 + \frac{dI}{dV} R_p \right) \quad (9)$$

Denklem 8.'de elde edilen son denklemde yerine konulduğunda maksimum güç noktasında çıkış akımının çıkış gerilimine oranı aşağıdaki gibidir.

$$\frac{I_{mpp}}{V_{mpp}} = \frac{1}{I_0} \left(1 - \frac{I_{mpp}}{S V_{mpp}} \right) e^{\frac{V_{mpp} + I_{mpp} R_s}{aV_t}} + \frac{1}{R_p} \left(1 - \frac{I_{mpp}}{S V_{mpp}} \right) \quad (10)$$

Denklem 4.'den faydalınarak I_0 akımı,

$$I_0 = \frac{\frac{V_{oc}}{R_p} - I_{pv}}{e^{\frac{V_{oc}}{aV_t}} - 1} \quad (11)$$

Elde edilen bu ifade denklem 3., denklem 5. ve denklem 10.'da yerine konulduğunda dört bilinmeyen içeren üç denklem(Denklem 12-14.) elde edilmektedir.

$$I_{sc} = I_{pv} - \frac{(I_{pv}R_p - V_{oc})(e^{\frac{I_{sc}R_s}{aV_t}} - 1) - \frac{I_{sc}R_s}{R_p}}{(e^{\frac{V_{oc}}{aV_t}} - 1)R_p} \quad (12)$$

$$I_{mpp} = I_{pv} - \frac{(I_{pv}R_p - V_{oc})(e^{\frac{V_{mpp} + I_{mpp}R_s}{aV_t}} - 1) - \frac{V_{mpp} + I_{mpp}R_s}{R_p}}{(e^{\frac{V_{oc}}{aV_t}} - 1)R_p} \quad (13)$$

$$I_{mpp} = \frac{I_{pv}R_p - V_{oc}}{R_p} \left(1 - \frac{I_{mpp}}{I_{sc}} \right) - \frac{V_{mpp} + I_{mpp}R_s}{aV_t} + \frac{1}{R_p} \left(1 - \frac{I_{mpp}}{I_{sc}} \right) \quad (14)$$

Eğri uydurma ile oluşturulan model kullanılarak foton akımı (I_{pv}) ifadesi elde edilen son denklemlerde yerine konulduğunda üç bilinmeyenli denklem seti denklem 15-17. aşağıdaki şekilde elde edilmiş olur.

$$\frac{(c_1 I_{sc} + c_2)(D - 1)R_p + V_{oc}}{DR_p} E - I_{sc} \left(1 + \frac{R_s}{R_p} \right) = 0 \quad (15)$$

$$\left[\frac{(c_1 I_{sc} + c_2)R_p(D - 1) + V_{oc}}{R_{mp}} F - V_{mpp} - I_{mpp} \frac{R_s}{R_p} \right] - I_{mpp} = 0 \quad (16)$$

$$\left[\frac{(c_1 I_{sc} + c_2)R_p - V_{oc}}{aV_t DR_p} (F + 1) + \frac{1}{R_p} \right] \left(1 - R_s \frac{I_{mpp}}{V_{mpp}} \right) - \frac{I_{mpp}}{V_{mpp}} = 0 \quad (17)$$

Burada $D = e^{aV_t} - 1$, $E = e^{\frac{I_{sc}R_s}{aV_t}} - 1$, and $F = e^{\frac{V_{mpp} + I_{mpp}R_s}{aV_t}} - 1$. Oluşturulan bu denklem seti bir PV modül için verilen test koşullarında R_s , R_p ve a parametrelerinin analitik olarak belirlenmesine imkan sağlamaktadır. Kalan iki parametre ise denklem 3. ve denklem 4. kullanılarak I_0 akımı,

$$I = \frac{I_{sc} - \frac{V_{oc} - I_{sc}R_s}{R_p}}{e^{\frac{V_{oc}}{aV_t}} - e^{\frac{I_{sc}R_s}{aV_t}}} \quad (18)$$

Ve denklem 4. yeniden düzenlenerek foton akımı aşağıdaki gibi hesaplanmıştır.

$$I_{pv} = I_0 \left(e^{aV_t \frac{V_{oc}}{V_t}} - 1 \right) + \frac{V}{R_p} \quad (19)$$

4. BULGULAR ve TARTIŞMA

Denklem 15-17. ile oluşturulan denklem seti bir PV hücresinin üretici tarafından verilen veya deneysel olarak elde edilen teknik verilerini dikkate alarak R_p , R_s ve a parametrelerinin hesaplanmasına olanak sağlar. Önerilen modelin geçerliliği için kullanılacak PV modüllerinin teknik verileri Tablo 4.1.'de sunulmuştur. Bu denklem kümesini çözmek için, MATLAB platformunda doğrusal olmayan denklemleri çözmek için yaygın olarak kullanılan Newton-Raphson metodu kullanılmaktadır (Chan ve Phang, 1987; Heijri ve ark., 2014; Reis ve ark., 2017; Bencherif ve Benouaz, 2018). Çeşitli başlangıç koşullarına göre uygulanan sayısal çözümlerde BP-MSX120 PV modülü için elde edilen sonuçlar Tablo 4.2.'de gösterilmiştir. Ayrıca Heijri ve ark. (2016), Sera D ve ark. (2007), Kareem ve Saravanan (2016), Chaibi ve ark. (2018), Cubas ve ark. (2013), Mohapatra ve ark. (2017) tarafından geliştirilen modellerle elde edilen sonuçlar da karşılaştırma amacıyla Tablo 4.2.'de verilmiştir. Başlangıç koşullarının tahmin edilebileceği üzere parametre değerleri üzerine bir etkisi olmamıştır. Ek olarak sayısal çözümü sonlandırmak için kullanılan bağıl hata aşağıdaki gibi tanımlanmıştır:

$$Hata = |x^i - x^{i+1}| < 10^{-6} \quad (20)$$

Burada parametrenin bir önceki adımdaki değeri x_i ile gösterilmiştir. Denklem setinin çözülmesinin ardından geriye kalan iki bilinmeyen parametre (I_0 ve I_{pv}) Denklem 11. ve Denklem 4. Kullanılarak hesaplanmıştır. Tablo 4.2.'de gösterildiği gibi, PV modülü için bu çalışmada geliştirilen model ile hesaplanan parametrelerin değerleri diğer modellerde verilen çözümler ile yakın uyum içindedir. Önerilen modelin daha gerçekçi sonuçlar ortaya koyduğu açıkça görülmektedir. Kareem ve Saravanan (2016)'da verilen model için de benzer bir durum gözlenmektedir. Sera D ve ark. (2007), Chaibi ve ark. (2018), Cubas ve ark. (2013), Mohapatra ve ark. (2017) ile verilen kaynaklarda geliştirilen modeller, tutarlı sonuçlar elde edebilmelerine rağmen bazı dezavantajları sahiptir. Örneğin Chaibi ve ark. (2018)'da geliştirilen modelde şönt direncin önceden bilindiği ve giriş parametresi olarak kullanıldığı düşünülmüştür. Benzer şekilde Cubas ve ark. (2013)'de ise diyot idealite faktörü (a) giriş parametresi olarak kullanılmıştır. Her iki model için de bu giriş parametrelerine önerilen model ile elde edilen değerler yerleştirilmiş ve bu durum tablolarda gri renkle gösterilmiştir. Ek olarak Sera ve ark. (2007)'da ve özellikle Mohapatra ve ark. (2017)'da verilen modellerin performansı

başlangıç koşullarına büyük ölçüde bağlıdır. Başka bir deyişle tutarlı sonuçlar ancak başlangıç koşulları gerçek



değerlere yakınsa elde edilebilmektedir. Ayrıca Mohapatra ve ark. (2017)'daki model doğrusal olmayan denklemlerin yinelemeli çözümü için güçlü bir araç/yazılım gerektirmektedir. Çalışmada MATLAB programında *Isqnonlin* komutuna dayalı bir çözüm tekniği kullanılmış ve objektif fonksiyonu Mohapatra ve ark. (2017)'da verildiği gibi seçilmiştir. Oluşan dezavantajlardan dolayı uygulamada bu modellerin PV'lerin parametre kestiriminde tercih edilebilir metotlara sahip olmadığı söylenebilir. Dahası, Heijri ve ark. (2016)'da verilen denklem setine Newton-Raphson metodu uygulandığında Heijri ve ark. (2016)'da verilen sonuçlar elde edilememektedir. Bu model gerçekçi olmayan sonuçlar vermektedir. Bu nedenle, Heijri ve ark. (2016)'da verilen modelde yer almaması gereken terimlerin varlığını gözlemlemek için verilen denklem setine doğrul analizi uygulanmıştır. Tablo 4.2.'de elde edilen çözümlerin her iki modelin denklem setine yerleştirilmesiyle hesaplanan denklem değerleri Tablo 4.3. ile gösterilmiştir. Bu tablodan açıkça görülmektedir ki çözümler (kökler), Heijri ve ark. (2016) tarafından formüle edilen denklemleri doğrulamamaktadır.

Tablo 4.1. T = 25 °C Sıcaklığında PV modüllerinin üretici firma verileri

PV modül\ Parametre	MSX60	KL07 0	BP-MSX120	BP-SX150	KC200G T	SW255
V _{oc} (V)	21.1	21.5	42.1	43.5	32.9	38
I _{sc} (A)	3.8	4.59	3.87	4.75	8.21	8.88
V _{mpp} (V)	17.1	17.1	33.7	34.5	26.3	30.9
I _{mpp} (A)	3.5	4.1	3.56	4.35	7.61	8.32
N _s	36	36	72	72	54	60
P _m (W)	60	70	120	150	200	255

Tablo 4.2. BP-MSX120 PV modülü için elde edilen parametre değerleri

PV modül\ Parametre	BP-MSX120 (BP Solar Global Marketing)							
	Heijri ve ark. (2016)	Önerilen Model	Model Heijri ve ark. (2016)	Model Sera ve ark. (2007)	Model Kareem ve Saravanan (2016)	Model Chaibi ve ark. (2018)	Model Cubas ve ark. (2013)	Model Mohapatra ve ark. (2017)
R _s (Ω)	0.473	0.472	Na	0.473	0.472	0.472	0.472	0.472
R _p (Ω)	1365	1365	Na	1366	1365	1365	1364	1360
a	1.396	1.3	Na	1.396	1.396	1.396	1.398	1.398

Tablo 4.3. BP-MSX120 Çözümlerinin denklemlere yerleştirilmesiyle bulunan sonuçlar

BP-MSX120 (BP Solar Global Marketing)		
PV Modül\İlgili parametre	Denklem Kümesi (Önerilen Model)	Denklem Kümesi (Heijri ve ark., 2016)
$R_s (\Omega)$	Denklem (16) = 8.8×10^{-16}	Denklem (16) = -1.02×10^{-3}
$R_p (\Omega)$	Denklem (17) = 0	Denklem (17) = 529.17
a	Denklem (15) = -2.6×10^{-16}	Denklem (15) = 2.2×10^{-4}
$I_o (\mu A)$	Denklem (18) = -2.1×10^{-17}	Denklem (18) = -8.1×10^{-9}
$I_{pv} (A)$	Denklem (19) = 2.5×10^{-10}	Denklem (19) = 9.93×10^{-2}

Büyük ölçekli çeşitli optimizasyon problemlerini çözme amacıyla meta sezgisel yöntemlerin başarıyla uygulandığı bilinmektedir. Bu doğrultuda Saravanan ve Panneerselvam (2013), GA ve hibrit GA-PSO algoritmaları gibi meta sezgisel yöntemleri uygulayarak KL070 PV modülünün eşdeğer devre parametrelerini hesaplamışlardır. Önerilen yöntemin güvenilirliği, bu uygulamalarda elde edilen değerlerle karşılaştırılarak test edilmiştir. Karşılaştırma amacıyla, diğer yöntemler de dikkate alınmış ve elde edilen parametrelerin değerleri Tablo 4.4.'de sunulmuştur. Önerilen model ve meta sezgisel yöntemlerle elde edilen sonuçların biraz farklı olduğu görülebilmektedir. Bu durum Saravanan ve Panneerselvam (2013)'da diyot doyma akımının (I_o) ihmal edilmiş olmasından kaynaklanmaktadır. Diğer bir deyişle diyot doyma akımı (I_o) eşdeğer devre parametrelerinde dikkate alınmamış ve analiz dört parametre üzerinden yapılmıştır. Öte yandan, önerilen modelin kullanılmasıyla kestirimi yapılan parametreler, Tablo 4.4.'deki mevcut yöntemler kullanılarak elde edilenlerle yakından uyumludur. Bununla birlikte; Sera ve ark. (2007) ve Mohapatra ve ark. (2017)'da verilen modeller ile elde edilen sonuçların başlangıç koşullarına dikkate değer bir şekilde bağlı olması, aynı zamanda Mohapatra ve ark. (2017)'da verilen modelin doğrusal olmayan denklem setini çözmek için fonksiyonel bir araca/yazılıma ihtiyaç duyması, Chaibi ve ark. (2018) ve Cubas ve ark. (2013)'da verilen modellerin ise paralel direnç veya diyot idealite faktörünün giriş parametresi olarak kullanması bu çalışmalarındaki modellerin dezavantajları arasındadır. Bunlara ek olarak Heijri ve ark. (2016)'da verilen denklem seti kullanılarak elde edilen sonuçlar ise gerçekçi değildir.

Tablo 4.4. KL070 PV modülü için hesaplanan eşdeğer devre parametreleri

KL070 (KL solar PV modüle)									
PV Modül\İlgili parametre	Model Saravanan		Önerilen Model	Model Heijri ve ark. (2016)	Model Sera D ve ark. (2007)	Model Kareem ve Saravanan (2016)	Model Chaibi ve ark. (2018)	Model Cubas ve ark. (2013)	Model Mohapatra ve ark. (2017)
	ve Panneerselvam, (2013)								
	Hybrid								
	GA-PSO								
	GA								
	$R_s (\Omega)$	0.10							
$R_p (\Omega)$	108.6	97.88	156.2	Na	156.2	156.2	156.2	156.1	
a	1.242	1.292	1.712	Na	1.712	1.712	1.712	1.712	
$I_o (\mu A)$	-	-	5.61	Na	5.61	5.61	5.60	5.59	
$I_{pv} (A)$	4.6	4.6	4.593	Na	4.593	4.593	4.593	4.593	

Bu bölümde, önerilen modelin uygulamasına örnek olarak dört farklı ticari PV modülünün (MSX60, KC200GT, SW255 ve BP SX-150) eşdeğer devre parametreleri Standart Test Koşullarında (25 °C hava sıcaklığı ve 1000 W/m² güneş ışınımında) kestirilmiştir. Sonuçlar, mevcut yöntemler kullanılarak elde edilen sonuçlarla birlikte Tablo 4.5.-4.8.'de verilmiştir. Önerilen model kullanılarak MSX60 PV modülü için çıkarılan parametreler ile kuantum parçacık sürüsü optimizasyon algoritması (Muralidharan, 2017) ile elde edilenler arasında tatmin edici bir anlaşma olmamasına rağmen, Tablo 4.5.'de sunulan sonuçlar birbirine yakındır. Ancak, Tablo 4.6.'da verilen KC200GT parametreleri için durum böyle değildir. Bu durum, çözümlerin Cubas ve ark. (2013)'de diyot idealite faktörünün sabit bir değeri ($a = 1,3$) için elde edilmiş olmasından kaynaklanmaktadır. Benzer bir durum Tablo 4.7.'de verilen SW255 PV modülü için elde edilen sonuçlarda da görülmektedir. Bunun nedeni, Chaibi ve ark. (2018)'de yapılan çalışmada paralel direnç (R_p) değerinin 6.3-7.7 k Ω aralığında olduğu varsayımının yapılmış olmasıdır. Bununla birlikte, önerilen model ve Heijri ve ark. (2016), Sera D ve ark. (2007), Kareem ve Saravanan (2016), Chaibi ve ark. (2018), Cubas ve ark. (2013), Mohapatra ve ark. (2017)'da verilen modellerle elde edilen sonuçlar bu değer 2,5 k Ω civarında olduğunu göstermektedir. Tablo 3.8'de BP SX-150 PV modülü için belirlenen sonuçlar Hussein (2017)'de verilenlerle birlikte sunulmaktadır. PV modülü için standart test koşullarında belirlenen deneysel veriler Hussein (2017)'den alınmıştır. Tablodaki ilk iki sütun göz önüne alındığında,

parametrelerin değerlerinin birbiriyle eşleşmediği açıkça gör÷lmektedir. Bu durumda, her şeyden önce, Hussein (2017)'de verilen sonuçların (çöz÷mlerin) kendi denklemlerini sağlamadığına dikkat edilmelidir. Bu, R_s 'ye dayanan form÷lde yer almaması gereken dikkate değer terimlerden kaynaklanmaktadır. Bu



nedenle, R_s ile ilgili denklemin yeniden düzenlenmesi ile elde edilen sonuçlar, tablodaki üçüncü sütunda verilmiştir ve önerilen yöntemle belirlenenlere büyük ölçüde yakın olduğu görülmüştür. Buradan her iki modelin de güvenilir olduğunu söylemek mümkündür ancak PV modülleri için deneysel I-V eğrilerinin gerekliliği, uygulama açısından Hussein (2017)'de verilen model için büyük bir engel oluşturmaktadır.

Tablo 4.5. MSX60 PV modülü için hesaplanan eşdeğer devre parametreleri

PV Modül\İlgili parametre	MSX60 (Solarex)		Model Heijri ve ark. (2016)	Model Sera ve ark. (2007)	Model Kareem ve Saravanan (2016)	Model Chaibi ve ark. (2018)	Model Cubas ve ark. (2013)	Model Mohapatra ve ark. (2017)
	Muralidharan (2017)	Önerilen Model						
$R_s (\Omega)$	0.146	0.169	Na	0.169	0.169	0.169	0.169	0.178
$R_p (\Omega)$	561.6	637.5	Na	637.8	637.6	637.5	637.8	649.9

Tablo 4.6. KC200GT PV'si için hesaplanan eşdeğer devre parametreleri

KC200GT (Kyocera Solar)								
PV Modül\İlgili parametre	Cubas ve ark. (2013)	Önerilen Model	Model Heijri ve ark. (2016)	Model Sera ve ark. (2007)	Model Kareem ve Saravanan (2016)	Model Chaibi ve ark. (2018)	Model Cubas ve ark. (2013)	Model Mohapatra ve ark. (2017)
$R_s (\Omega)$	0.231	0.217	Na	0.217	0.217	0.217	0.217	0.217
$R_p (\Omega)$	594.85	951.92	Na	951.93	951.93	951.93	948.93	899.90
a	1.3	1.342	Na	1.342	1.342	1.342	1.342	1.341
$I_o (\mu A)$	0.096	0.171	Na	0.171	0.171	0.171	0.170	0.168
$I_{pv} (A)$	8.213	8.211	Na	8.211	8.211	8.211	8.211	8.212

Tablo 4.7. SW255 PV modülü için hesaplanan parametre değerleri

SW255 (SolarWorld)								
PV Modül\İlgili parametre	Model Chaibi ve ark. (2018)	Önerilen Model	Model Heijri ve ark. (2016)	Model Sera ve ark. (2007)	Model Kareem ve Saravanan (2016)	Model Chaibi ve ark. (2018)	Model Cubas ve ark. (2013)	Model Mohapatra ve ark. (2017)
$R_s (\Omega)$	0.2039	0.21	Na	0.21	0.21	0.21	0.21	0.21
$R_p (\Omega)$	6300	2570.3	Na	2570.6	2570.3	2570.3	2568.5	2499.9

Tablo 4.8. BP SX-150 PV'si için hesaplanan eşdeğer devre parametreleri

BP SX-150 (ABC Solar)			
PV Modül\ İlgili parametre	Hussein (2017)	Önerilen Model	Hussein (2017) için Düzeltilmiş Model
a	1.64	1.4851	1.4851
$R_p (\Omega)$	1799.3	960.06	782.52
$R_s (\Omega)$	0.3125	0.4543	0.4415
$I_o (\mu A)$	2.8016	0.6166	0.6155
$I_{pv} (A)$	4.7508	4.7522	4.7527

Önerilen modelin güvenilirliğini daha derinden araştırmak için iki farklı PV modülün ve bir güneş hücresinin çıkış akım-gerilim (I-V) karakteristiği incelenmiş ve sonuçlar deneysel verilerle karşılaştırılmıştır. Şekil 4.1, Solarex MSX-60 PV modülü için verilen deneysel veriler ile önerilen model kullanılarak öngörülen veriler arasındaki tutarlılığı göstermektedir. Deneysel veriler Muralidharan (2017)'dan alınmış ve I-V eğrisi Tablo 4.5.'de verilen modelin sonuçları kullanılarak çizilmiştir. Ayrıca, Muralidharan (2017)'de verilen sonuçlarla öngörülen I-V karakteristiği de karşılaştırmaya katılmıştır. Şekilde açıkça görüldüğü gibi önerilen modelle hesaplanan değerler üretici tarafından sağlanan deneysel verilerle iyi bir uyum içerisindedir. Öte yandan, Muralidharan (2017)'da verilen eşdeğer devre parametrelerinin değeri kullanılarak elde edilen veriler deneysel verilerle tam olarak eşleşmemektedir. Benzer bir şekilde, Şekil 4.2.'de 40 °C hava sıcaklığı ve 300 W/m² güneş ışınlığında, önerilen model ile belirlenen eşdeğer devre parametre değerleri ve Bencherif ve Benouaz (2018)'da verilenler kullanılarak çizilen BP Solar MSX120 PV modülünün I-V eğrileri gösterilmiştir. Deneysel veriler Bencherif ve Benouaz (2018)'dan alınmıştır. Önerilen model tarafından belirlenen parametreler ve Bencherif ve Benouaz (2018)'da elde edilenler Tablo 4.9.'da verilmiştir. Sonuçlar, eşdeğer devre parametre değerlerinin birbiriyle uyum sağlamadığını göstermektedir ancak Şekil 4.2.'de görülebileceği üzere önerilen modele dayanan I-V eğrisi tüm noktalarda deneysel verilerle tam olarak örtüşmektedir. Buradan, önerilen modelin kullanılmasıyla çıkarılan parametrelerin Bencherif ve Benouaz (2018)'da verilenlerden daha gerçekçi olduğunu söylemek mümkündür. Şekil 4.3, önerilen model tarafından tanımlanan tek-diyot eşdeğer devre parametrelerinin optimal değerleri ve Hamid ve ark. (2016)'da verilen iki-diyot eşdeğer devre parametrelerinin optimal değerleri kullanılarak çizilen 57 mm çaplı ticari (R.T.C France) silikon güneş hücresinin I-V eğrilerini

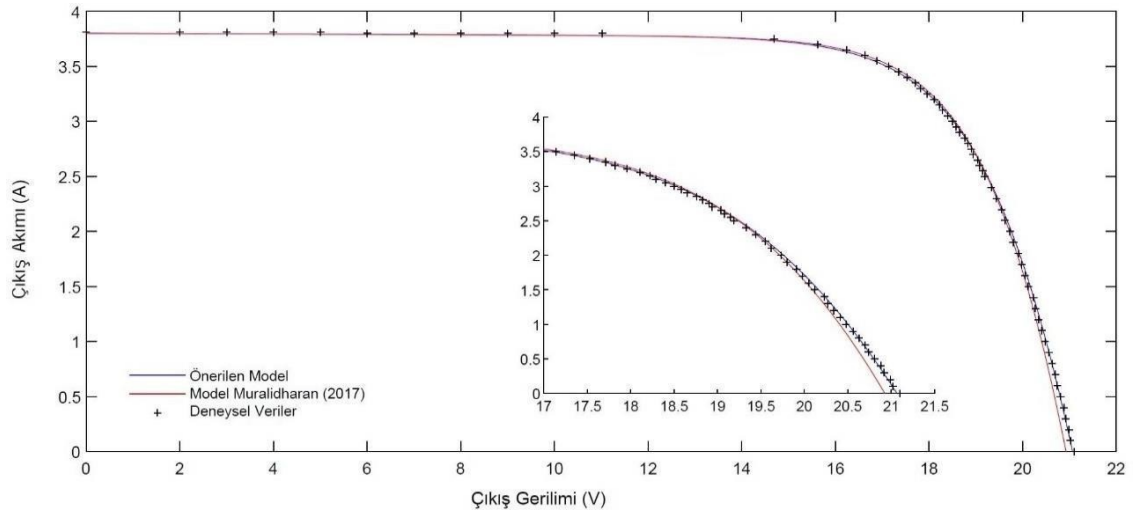
göstermektedir. Deneysel I-V karakteristikleri de bir karşılaştırma yapmak için şekilde gösterilmiştir. Güneş hücresi için



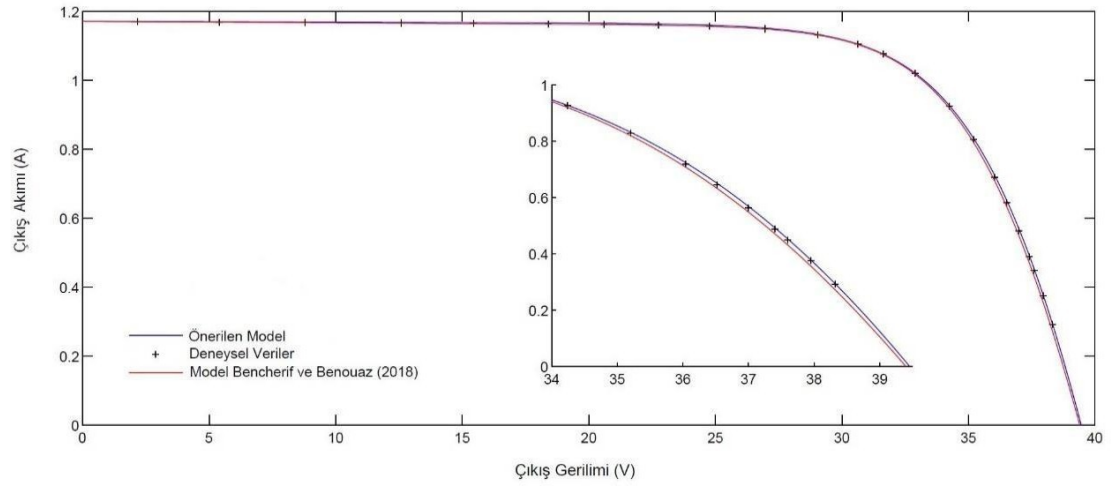
deneysel veriler Hamid ve ark. (2016)'da alınmış ve belirlenen parametreler Tablo 4.9.'da verilmiştir. Şekilde görülebileceği gibi, önerilen model tarafından belirlenen optimal parametrelerle oluşturulan I-V eğrileri ile Hamid ve ark. (2016) tarafından oluşturulan iki-diyotlu hibrit-model (model-I) birbirleriyle tam olarak örtüşmektedir. Çıkış gerilimi arttıkça küçük bir fark oluşmasına rağmen, her iki yöntemin de sonuçlarını kullanarak oluşturulan eğriler ile deneysel veriler uyum içerisindedir. Öte yandan, Hamid ve ark. (2016) tarafından örnek arama algoritması (model-II) kullanılarak belirlenen sonuçlar ile oluşturulan I-V karakteristiğinin deneysel verilerle tatmin edici ölçüde eşleşmediği Şekil 4.3.'de görülmektedir. Her üç model için de oluşturulan eğriler arasındaki gerçeğe yakınlık ilişkisi Tablo 4.10.'da verilen RMS değerleri ele alınarak değerlendirilebilir. Buradan görülmektedir ki önerilen modelin RMS değeri sıfıra daha yakındır. Sonuç olarak, üç karşılaştırmanın hepsi de önerilen modelin bir PV hücresinin tek-diyot eşdeğer devre parametrelerini daha doğru bir şekilde çıkardığını ve bununla birlikte bu modelin PV'lerin I-V eğrilerini oluşturmada başarılı olduğunu göstermektedir.

Tablo 4.9. MSX120 ve R.T.C Güneş Hücresi için belirlenen eşdeğer devre parametreleri

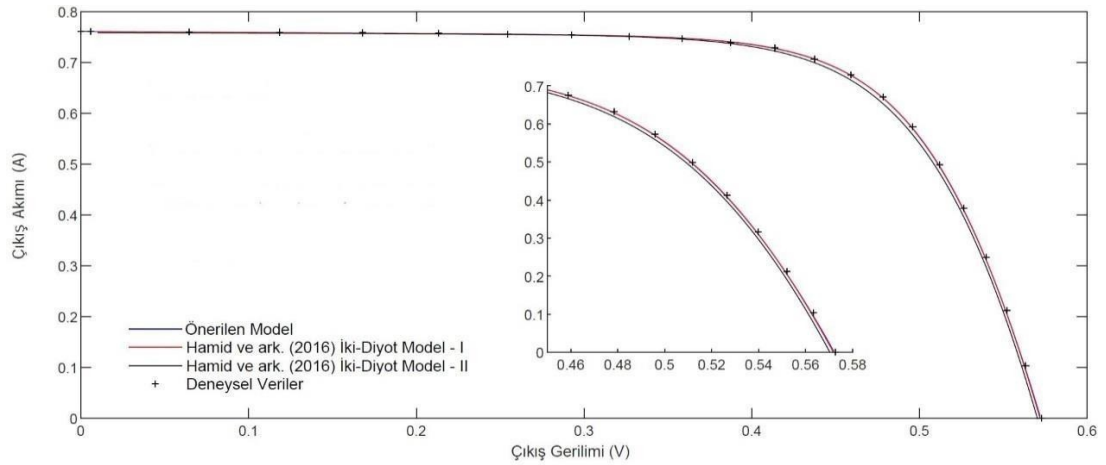
	MSX120 (BP Solar Global Marketing)		Güneş hücresi (R.T.C France)		
PV Modül\İlgili parametre	Bencheri f ve Benouaz (2018)	Önerilen Model	Model-I Hamid ve ark. (2016)	Model-II Hamid ve ark. (2016)	Önerilen Model
$R_s (\Omega)$	1.769	1.4922	0.0367	0.032	0.0389
$R_p (\Omega)$	2438.65	4288.2	55.529	81.3	52.252
a	1.1592	1.2472	1.45-1.99	1.6-1.19	1.4582
$I_o (nA)$	28.161	100.14	224.7-755.2	988.9-1	253.83
$I_{pv} (A)$	1.1713	1.1709	0.7607	0.7602	0.7611



Şekil4.1. Solarex MSX60 PV modülü için I-V eğrileri ($T = 25^{\circ}\text{C}$)



Şekil 4.2. BP Solar MSX120 PV modülü için I-V eğrileri ($T = 40^{\circ}\text{C}$)

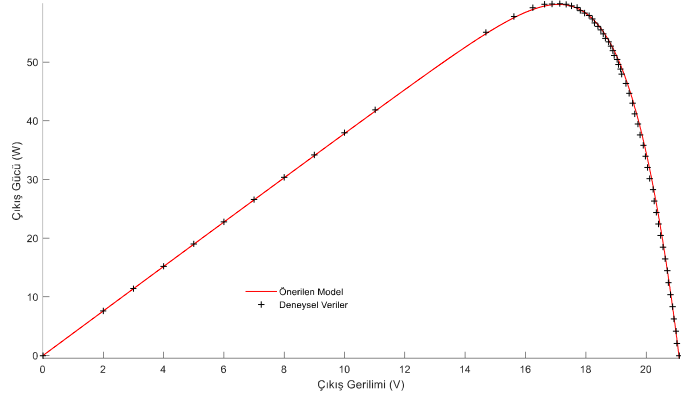


Şekil 4.3. R.T.C France güneş hücresi için I-V eğrileri ($T = 33^{\circ}\text{C}$)

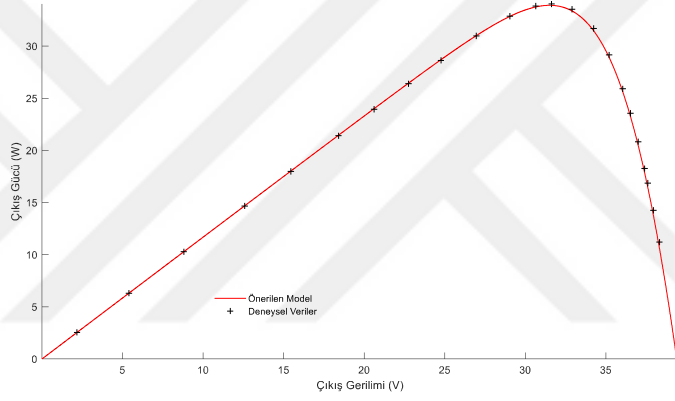
I-V eğrilerinin yanı sıra P-V eğrileri de PV hücrelerinin/modüllerinin performansını karşılaştırmak için kullanılmaktadır. Şekil 4.4.'de Solarex MSX60 PV modülü için önerilen model ve yanında deneysel veriler kullanılarak oluşturulmuş eğriler karşılaştırılmıştır. Buradan önerilen modelin P-V eğrisinin deneysel verilerle oluşturulan P-V eğrisi ile mükemmel yakın bir ölçüde uyum sağladığını görülmektedir. Bu durum önerilen modelin geçerliliğini destekler niteliktedir. Yine benzer bir şekilde Şekil 4.5.'de BP Solar MSX120 modülü için P-V eğrileri oluşturulmuştur. Burada çalışma için gerekli olan (V_{oc} , 0) noktasında deneysel veri bulunmadığı için bu değer elle girilmiştir. Elle girilen bu değer grafiğin en sağ alt köşesinde bulunan artı ile gösterilmiş noktadır. Her ne kadar deneysel veriler (V_{oc} , 0) noktasına kadar kesintisiz bir şekilde bulunmasa da mevcut deneysel veriler ile önerilen modelin eğrisinin son derece iyi bir biçimde örtüştüğü sonucu ortaya çıkmaktadır. Son olarak R.T.C. France güneş hücresi için oluşturulan P-V eğrileri Şekil 4.6.'da gösterilmiştir. Tıpkı Şekil 4.4. ve Şekil 4.5.'de olduğu gibi Şekil 4.6.'da de önerilen modelin P-V eğrisinin R.T.C. France güneş hücresine ait deneysel verilerle oluşturulan P-V eğrisi ile muazzam ölçüde örtüşmesi sonucunda modelin geçerliliğini söylemek mümkündür. Tablo 4.10.'ya göre önerilen model ile elde edilmiş olan her üç güç eğrisinin de Root Mean Square Error (RMSE) değerleri sıfıra oldukça yakındır. Ayrıca diğer modellere göre daha düşük RMSE değerine sahip olduğu görülmektedir. Bu durum önerilen modelin diğer modellere nazaran daha geçerli sonuçlar verdiğini göstermektedir.

Tablo 4.10. Kullanılan PV Modelleri İçin Elde Edilen (I-V) ve (P-V) RMS değerleri

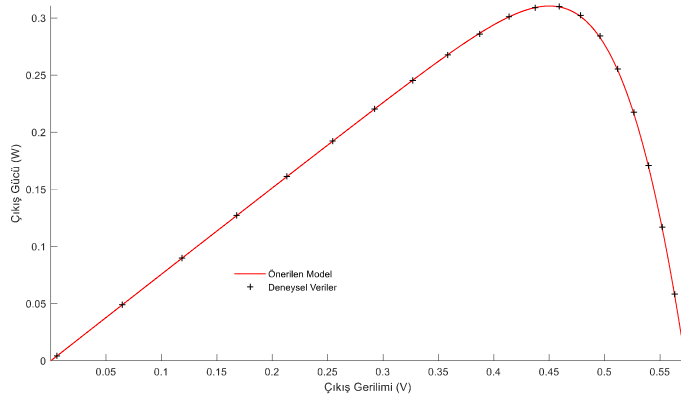
Solarex MSX60			BP Solar MSX120		R.T.C France	
RMS	Önerilen Model	Muralidharan (2017)	Önerilen Model	Benche rif ve Benoua z (2018)	Önerilen Model	Hamid ve ark. (2016) Model-I
(I-V)	0.029547	0.108361	0.008603	0.021708	0.019042	0.022355
(P-V)	0.583332	2.251392	0.785855	0.804439	0.010404	0.012124



Şekil 4.4. Solarex MSX60 PV modülü için P-V eğrileri ($T = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$)



Şekil 4.5. BP Solar MSX120 PV modülü için P-V eğrileri ($T = 40\text{ }^{\circ}\text{C}$)



Şekil 4.6. R.T.C France güneş hücresi için P-V eğrileri ($T = 33\text{ }^{\circ}\text{C}$)

5. SONUÇ

Bu çalışmada PV hücreler/modüller için tek-diyot beş parametrelili model kullanılarak parametre kestirim metodu geliştirilmiştir. Bu geliştirilen metod; Heijri ve ark. (2016), Sera ve ark. (2007), Kareem ve Saravanan (2016), Chaibi ve ark. (2018), Cubas ve ark. (2013) ve Mohapatra ve ark. (2017) çalışmalarında uygulanan analitik metotların sonucu sunulan değerlerle karşılaştırılarak altı tanınmış ticari PV modülünde test edilmiştir. Ayrıca Muralidharan (2017), Saravanan ve Panneerselvam (2013), Bencherif ve Benouaz (2018), Hamid ve ark. (2016), Hussein (2017) çalışmalarında elde edilen sonuçlar da geliştirilen bu metotta karşılaştırılarak kullanılmıştır. Ek olarak, çıkarılan parametrelerin geçerliliği deneysel I-V eğrileri ve ayrıca Hamid ve ark. (2016)'da sunulan iki-diyotlu modellerin parametreleri kullanılarak oluşturulan I-V eğrileri ile doğrulanmıştır. Tek diyotlu modellerin yanı sıra geliştirilen bu model iki diyotlu modellere ait sonuçlar kullanılarak ayrıca test edilmiştir. Yapılan analizler sonucunda geliştirilen modelin bazı durumlarda iki diyotlu modellere nazaran daha iyi sonuçlar (gerçekçi sonuçlar) verdiği görülmüştür. Dolayısıyla modelin gerçekçi ve güvenilir sonuçlar verdiği bu analizlerin sonucunda da söylemek mümkündür. Ayrıca hesaplama bakımından her ne kadar tam bir analiz yapılmamış olsa da MATLAB analizleri modellerin hesaplama sürelerini birbirine küçük ve çok yakın değerli olduğunu göstermiştir. Bu nedenle modelin diğer modellere kıyasla hesaplama süresi açısından herhangi bir dezavantajı olmadığını söylemek mümkündür.

6. KAYNAKLAR

- Amin, Y.K. ve Shahhoseini A., 2018. A fast modeling of the double-diode model for PV modules using combined analytical and numerical approach. *Solar Energy* 2018, 162, 403-409.
- Atay, B.K., 2020. Tek Diyotlu Bir Fotovoltaik (PV) Hücre/Modül Modelinin Parametre Kestirimi İçin Yeni Bir Yaklaşım. (Y.Lisans Tezi), Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Tokat.
- Bencherif, M. ve Benouaz T., 2018. Parameter extraction of solar panels using the graphical method. *International Journal of Ambient Energy*, 1-27.
- Bernhard, R., Laabs H.G., De Lalaing J., Eck M., Eickhoff M., Pottler K., Morin G., Heimsath A., Georg A. ve Häberle A., 2008. Linear Fresnel Collector Demonstration on the PSA—Part I: Design, Construction and Quality Control. 14th International SolarPACES Symposium, Las Vegas.
- Celik, A.N., 2006. Present status of photovoltaic energy in Turkey and life cycle technoeconomic analysis of a grid-connected photovoltaic-house. *Renewable and Sustainable energy reviews*, 10 (4), 370-387.
- Chaibi, Y., Salhi M., El-jouni A. ve Essadki A., 2018. A new method to extract the equivalent circuit parameters of a photovoltaic panel. *Solar Energy*, 163, 376-386.
- Chan, D.S.H. ve Phang J.C.H., 1987. Analytical methods for the extraction of solar-cell single-and double-diode model parameters from I-V characteristics. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 34 (2), 286-293.
- Cubas, J., Pindado S. ve Farrahi A., 2013. New method for analytical photovoltaic parameter extraction. *International Conference on Renewable Energy Research and Applications*, Madrid.
- Dunn, R.I., Hearps P.J. ve Wright M.N., 2011. Molten-salt power towers: newly commercial concentrating solar storage. *Proceedings of the IEEE*, 100 (2), 504-515.
- Farivar, G. ve Asaei B., 2010. Photovoltaic module single diode model parameters extraction based on manufacturer datasheet parameters. *IEEE International Conference on Power and Energy*, Kuala Lumpur.
- Goldberg, D.E., 1989. Genetic algorithms in search optimization and machine learning. Addison Wesley Publishing Company, Hollanda.
- Hamid, N.F.A., Rahim N.A. ve Selvaraj J., 2016. Solar cell parameters identification using hybrid Nelder-Mead and modified particle swarm optimization. *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, 8, 1-21.
- Müller Steinhagen, H. ve Trieb F., 2004. Concentrating solar power. A review of the technology. *Ingenia Inform QR Acad Eng*, 18, 43-50.
- Hejri, M., Mokhtari H., Azizian M.R., Ghandhari M. ve Söder L., 2014. On the parameter extraction of a five-parameter double-diode model of photovoltaic cells and modules. *IEEE Journal of Photovoltaics*, 4 (3), 915-923.
- Hejri, M., Mokhtari H., Azizian M.R. ve Söder L., 2016. An analytical-numerical approach for parameter determination of a five-parameter single-diode model of photovoltaic cells and modules. *International Journal of Sustainable Energy*, 35 (4), 396-410.
- Humada, A.M., Hojabri M., Mekhilef S. ve Hamada H.M., 2016. Solar cell parameters extraction based on single and double-diode models: a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2016, 56, 494-509.

Hussein, A., 2017. A simple approach to extract the unknown parameters of PV modules. Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences 2017, 25, 4431- 4444.



- Ishaque, K. ve Salam Z., 2011. An improved modeling method to determine the model parameters of photovoltaic (PV) modules using differential evolution (DE). *Solar Energy*, 85 (9), 2349-2359.
- Kazmerski, L. L., 2005. Solar photovoltaics R&D at the tipping point: A 2005 technology overview. *Journal of Electron Spectroscopy and Related Phenomena*, 150, 105– 135.
- Kareem, M. S. A. ve Saravanan M., 2016. A new method for accurate estimation of pv module parameters and extraction of maximum power point under varying environmental conditions. *Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences*, 24 (4), 2028-2041.
- Kennedy, J. ve Eberhart R., 1995. Particle swarm optimization. *IEEE International Conference on Neural Networks*, Perth.
- Kerzmann, T. ve Schaefer L., 2012. System simulation of a linear concentrating photovoltaic system with an active cooling system. *Renewable Energy*, 41, 254-261.
- Koç, A., Karakaya F. ve Altun H., 2007. Fotovoltaik pil teknolojileri ve yenilenebilir enerji politikaları. *Elektrik-elektronik-bilgisayar mühendisliği 12. Ulusal Kongresi ve Fuarı bildirileri*, İstanbul.
- Mohapatra, A., Nayak B. ve Mohanty K.B., 2017. Parameter extraction of PV modules using NLS algorithm with Experimental Validation. *International Journal of Electrical and Computer Engineering* 2017, 7 (5), 2392-2400.
- Muralidharan, R., 2017. Parameter extraction of solar photovoltaic cells and modules using current–voltage characteristics. *International Journal of Ambient Energy*, 38 (5), 509-513.
- Patel, S., 2016. The single diode model of I-V and P-V characteristics using the lambert w function. *International Journal of Innovative Research in Science Engineering and Technology*, 5 (5), 7034-7039.
- Polman, A., Knight M., Garnett E. C., Ehrler B. ve Sinke W. C., 2016. Photovoltaic materials: Present efficiencies and future challenges. *Science*, 352 (6283), aad4424.
- Reis, L.R.D., Camacho J.R. ve Novacki D.F., 2017. The newton raphson method in the extraction of parameters of PV modules. *International Conference on Renewable Energies and Power Quality*, Malaga.
- Sandrolini, L., Artioli M. ve Reggiani U., 2010. Numerical method for the extraction of photovoltaic module double-diode model parameters through cluster analysis. *Applied Energy*, 87 (2), 442-451.
- Saravanan, C. ve Panneerselvam M.A., 2013. A comprehensive analysis for extracting single diode PV model parameters by hybrid GA-PSO algorithm. *International Journal of Computer Applications*, 78 (8), 16-19.
- Sera, D., Teodorescu R. ve Rodriguez P., 2007. PV panel model based on datasheet values. *IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, Vigo.
- Shannan, N.M.A.A., Yahaya N.Z. ve Singh B., 2013. Single-diode model and two-diode model of PV modules: A comparison. *IEEE International Conference on Control System*, Mindeb.

- Shongwe, S. ve Hanif M., 2015. Comparative analysis of different single-diode PV modeling methods. *IEEE Journal of Photovoltaics*, (3), 938-946.
- Storn, R. ve Price K., 1997. Differential Evolution—a simple and efficient heuristic for global optimization over continuous spaces. *Journal of Global Optimization*, 11 (4), 341-359.
- Yahfdhou, A., Mahmoud A.K. ve Youmi I., 2016. Evaluation and determination of seven and five parameters of a photovoltaic generator by an iterative method. *Smart Grid and Renewable Energy*, 7, 247-260.
- Zagrouba, M., Sellami A., Bouaicha M. ve Ksouuri M., 2010. Identification of PV solar cells and modules parameters using the genetic algorithms: Application to maximum power extraction. *Solar Energy*, 84 (5), 860-866.
- Zarza, E., Valenzuela L., Leon J., Weyers H.D., Eickhoff M., Eck M. ve Hennecke K., 2002. The DISS project: direct steam generation in parabolic trough systems. Operation and maintenance experience and update on project status. *J. Sol. Energy Eng*, 124 (2), 126-133



7. EKLER

7.1 R^2 ve Rmse Hesaplama Kodları

```
clear, clc
% Referans makale değerleri [28]
%No      Iol      Imakale hata
Volc      c
D1=[ 17.6  3.83 3.8360
1     5    0.157;
2    17.4  4.29 4.2800
     1    0.233;
3    17.2  4.56 4.5541
     5    0.042;
4    17.1  4.79 4.7940
     0    0.063;
5    16.9  5.07 5.0930
     0    0.454;
6    16.7  5.27 5.2870
     6    0.323;
7    16.3  5.75 5.7940
     4    0.765;
8    16.0  6.00 6.0550
     8    0.917;
9    15.7  6.36 6.3691
     1    0.143;
10   15.3  6.5  6.58  0.12
     9    8    81    3;
11   14.9  6.8  6.83  0.05
     3    3    34    0;
12   14.5  6.9  6.97  0.06
     8    7    48    9;
13   14.1  7.1  7.10  0.02
     7    0    14    0;
14   13.5  7.2  7.22  0.04
     9    3    65    8;
15   13.1  7.2  7.28  0.00
     6    9    98    3;
16   12.7  7.3  7.33  0.07
     4    4    45    5;
17   12.3  7.3  7.36  0.07
     6    7    43    7;
18   11.8  7.3  7.39  0.19
     1    8    47    9;
19   11.1  7.4  7.41  0.10
     7    1    74    0;
20   10.3  7.4  7.43  0.06
     2    4    52    5;
21   9.74  7.4  7.44  0.30
     0    2    26    5;
22   9.06  7.4  7.44  0.01
     0    5    87    7]

format    lon
g
Vs=D1(:,2);
Is=D1(:,3);
I=D1(:,4);
N=length(Vs)

% R^2 hesaplama
A=0;
B=0;
ort=mean(Is);
for i=1:N
    A=A+(Is(i)-I(i))^2;
```

```
B=B+(Is(i)-ort)^2;  
end  
R2=1-A/B  
  
%rmse hesaplama  
C=0;  
for j=1:N  
    C=C+(Is(j)-I(j))^2;  
end  
rmse=sqrt(C/N)  
  
R2 =0.999766801539367 %(Ref 28 hata değeri)  
  
rmse = 0.017878580378868 %( Ref 28 hata değeri)
```



7.2 Birinci Dereceden Eğri Uydurma ile a Katsayılarının Belirlenmesi Kodları

```
%% 1. dereceden eğri uydurma ile a katsayılarının belirlenmesi
```

```
pn=xx';% (xx ve yy dikey vektörler)  
b=yy';%
```

```
p1=0.9999;  
p2=0.000728;
```

```
Ay=[p1; p2];  
eps=100;  
it=0;  
while eps>=1e-100  
p1=Ay(1);  
p2=Ay(2);  
Ar=Ay;  
Bxy=p1*pn+p2;  
Z(:,1)=pn;  
Z(:,2)=1;  
D=b-Bxy;  
Dx=(Z')*D';  
Zx=(Z')*Z;  
dA=inv(Zx)*Dx;  
Ay=Ay+dA;  
eps=max(abs(Ay-Ar));  
it=it+1;  
end
```

```
% p1=0.999892681699446;  
% p2=0.001789579299451;
```

```
% Yeni data (109)  
p1=0.999863198181984;  
p2=0.002168284733899;
```

```
for i=1:length(D)  
Ipp(i)=p1*D(i,5)+p2;  
Ivv(i)=D(i,11);  
end
```

```
plot(D(:,5),Ivv)  
hold on  
plot(D(:,5),Ipp)
```

```
%Rmse hesap  
tp=0;  
for i=1:length(D)  
rm=(Ipp(i)-Ivv(i))^2;  
tp=tp+rm;  
end  
rms=sqrt(tp/length(D))
```

7.3 Geliştirilen Modeli Kullanarak PV Hücreler/Modüller İçin Parametre Kestirim Kodları

```
clear all; clc;
tic
% Sabit giriş degerler
k = 1.38e-23; % Boltzman sabiti
q = 1.602e-19; % Elektronun yuku
T = 25+273; % Sicaklik (K)
Ns = 54; % Hucre sayisi
a1 = 8.21; % Isc
a2 = 32.9; % Voc
a3 = 26.3; % Vmpp
a4 = 7.61; % Impp
a5 = (Ns*k*T)/q; % Vt
C1 = 0.9998926816; % a in (Ipv = a*Isc + b)
C2 = 0.0017895792; % b in (Ipv = a*Isc + b)

% Baslangic degerleri
x3 = 1.2; % a idealite faktoru
x4 = 0.2; % Rs
x5 = 1500; % Rp

xe = [x3;x4;x5];
xy = [0;0;0];
es=1e-10;
eps=100;
iter=0;
while eps>=es
    iter=iter+1;
    x3 = xe(1); x4 = xe(2); x5 = xe(3);
    % Jacobian Matrisi
    j11 = (a2*exp(a2/(a5*x3))*(a2 - x5*(C2 + C1*a1))*(exp((a1*x4)/(a5*x3)) - 1))/(a5*x3^2*x5*(exp(a2/(a5*x3)) - 1)^2 - (a1*x4*exp((a1*x4)/(a5*x3))*(a2 - x5*(C2 + C1*a1)))/(a5*x3^2*x5*(exp(a2/(a5*x3)) - 1)));
    j12 = (a1*exp((a1*x4)/(a5*x3))*(a2 - x5*(C2 + C1*a1)))/(a5*x3*x5*(exp(a2/(a5*x3)) - 1)) - a1/x5;
    j13 = (a1*x4)/x5^2 - ((a2 - x5*(C2 + C1*a1))*(exp((a1*x4)/(a5*x3)) - 1))/(x5^2*(exp(a2/(a5*x3)) - 1)) - ((exp((a1*x4)/(a5*x3)) - 1)*(C2 + C1*a1))/(x5*(exp(a2/(a5*x3)) - 1));
    j21 = (a2*exp(a2/(a5*x3))*(a2 - x5*(C2 + C1*a1))*(exp((a3 + a4*x4)/(a5*x3)) - 1))/(a5*x3^2*x5*(exp(a2/(a5*x3)) - 1)^2) - (exp((a3 + a4*x4)/(a5*x3))*(a2 - x5*(C2 + C1*a1))*(a3 + a4*x4))/(a5*x3^2*x5*(exp(a2/(a5*x3)) - 1));
    j22 = (a4*exp((a3 + a4*x4)/(a5*x3))*(a2 - x5*(C2 + C1*a1)))/(a5*x3*x5*(exp(a2/(a5*x3)) - 1)) - a4/x5;
    j23 = (a3 + a4*x4)/x5^2 - ((C2 + C1*a1)*(exp((a3 + a4*x4)/(a5*x3)) - 1))/(x5*(exp(a2/(a5*x3)) - 1)) - ((a2 - x5*(C2 + C1*a1))*(exp((a3 + a4*x4)/(a5*x3)) - 1))/(x5^2*(exp(a2/(a5*x3)) - 1));
    j31 = (a2*exp((a3 + a4*x4)/(a5*x3))*exp(a2/(a5*x3))*(a2 - x5*(C2 + C1*a1))*((a4*x4)/a3 - 1))/(a5^2*x3^3*x5*(exp(a2/(a5*x3)) - 1)^2) - (exp((a3 + a4*x4)/(a5*x3))*(a2 - x5*(C2 + C1*a1))*((a4*x4)/a3 - 1)*(a3 + a4*x4))/(a5^2*x3^3*x5*(exp(a2/(a5*x3)) - 1)) - (exp((a3 + a4*x4)/(a5*x3))*(a2 - x5*(C2 + C1*a1))*((a4*x4)/a3 - 1))/(a5*x3^2*x5*(exp(a2/(a5*x3)) - 1));
    j32 = (a4*exp((a3 + a4*x4)/(a5*x3))*(a2 - x5*(C2 + C1*a1)))/(a3*a5*x3*x5*(exp(a2/(a5*x3)) - 1)) - a4/(a3*x5) + (a4*exp((a3 + a4*x4)/(a5*x3))*(a2 - x5*(C2 + C1*a1))*((a4*x4)/a3 - 1))/(a5^2*x3^2*x5*(exp(a2/(a5*x3)) - 1));
```

```

j33 = ((a4*x4)/a3 - 1)/x5^2 - (exp((a3 + a4*x4)/(a5*x3))*(a2 -
x5*(C2 + C1*a1))*((a4*x4)/a3 - 1))/(a5*x3*x5^2*(exp(a2/(a5*x3)) - 1)) -
(exp((a3 + a4*x4)/(a5*x3))*((a4*x4)/a3 - 1)*(C2 + C1*a1))/(
a5*x3*x5*(exp(a2/(a5*x3)) - 1));

J = [j11 j12 j13;
      j21 j22 j23;
      j31 j32 j33];

% Fonksiyon Matrisi
F1 = (C1*a1 + C2) - (((C1*a1 + C2)*x5-a2)*(exp((a1*x4)/(x3*a5))-
1))/((exp((a2)/(x3*a5))-1)*x5) - ((a1*x4)/x5) - a1;
F2 = (C1*a1 + C2) - (((C1*a1 + C2)*x5-
a2)*(exp((a3+a4*x4)/(x3*a5))-1))/((exp(a2/(x3*a5))-1)*x5) -
((a3+a4*x4)/x5) - a4;
F3 = (((C1*a1 + C2)*x5-a2)/((exp(a2/(x3*a5))-1)*(x5*x3*a5)))*(1-
x4*(a4/a3))*exp((a3+a4*x4)/(x3*a5)) + ((1/x5)*(1-x4*(a4/a3))) -
(a4/a3);
F = [F1;F2;F3];

% Newton Raphson Denklemi
xy = xe - pinv(J)*F;
eps=max(abs(xy-xe));
xe = xy;
end
toc
iter

x2 = (a1 - ((a2-a1*x4)/x5))/(exp(a2/(x3*a5))-exp((a1*x4)/(x3*a5)));
x1 = x2*(exp(a2/(x3*a5))-1)+(a2/x5);

Ipv = x1
Io = x2
a = xy(1)
Rs = xy(2)
Rp = xy(3)
fprintf('Ipv = %f\nIo = %e\na = %f\nRs = %f\nRp = %f\niter = %d\n', x1,
x2, xy(1), xy(2), xy(3), iter)
fprintf('islem sonu\n');

```

