

An analytical model for single-diode equivalent circuit parameter extraction of PV Modules/Cells

Ulaş EMİNOĞLU^{1*}  Bilge Kaan ATAY² 

¹Samsun University, Faculty of Engineering, Department of Electrical & Electronics Engineering, Samsun, Turkey

²Tokat Gaziosmanpaşa University, Faculty of Engineering, Department of Electrical & Electronics Engineering, Tokat, Turkey

Article Info:

Research article

Received: 18/01/2023

Revision: 16/04/2023

Accepted: 27/04/2023

Keywords

Curve fitting

Mathematical model

PV Modul/Cell

Parameter extraction

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi

Başvuru: 18/01/2023

Düzeltilme: 16/04/2023

Kabul: 27/04/2023

Anahtar Kelimeler

Eğri uydurma

Matematiksel model

PV Modülü/Hücre,si

Parametre kestirimi

Graphical/Tabular Abstract (Grafik Özet)

Bu çalışmada PV modüller için tek-diyot eşdeğer devre parametrelerinin belirlenmesine ilişkin analitik bir model önerilmektedir. / This study propose an analytical model for determining single-diode circuit parameters for PV modules.

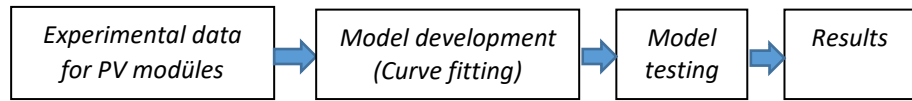


Figure A: Graphic summary of the model development. / Şekil A: model geliştirmeye ilişkin grafiksel özet

Highlights (Önemli noktalar)

- Yapılan analizler, model ile elde edilen eşdeğer devre parametrelerinin ve sonucunda oluşturulan I-V ve P-V karakteristiklerinin deneysel veriler ile çok büyük oranda örtüştüğünü göstermektedir. / The analyzes show that the equivalent circuit parameters obtained with the model and the I-V and P-V characteristics formed as a result of the model overlap to a great extent with the experimental data.
- Model diğer yöntemlere göre parametre kestiriminde kullanım kolaylığı, daha az deneysel verilere ihtiyaç duyma özelliğine sahiptir. / The model has the feature of being easy to use in parameter estimation and less need for experimental data compared to other methods.
- Ayrıca model tüm parametreleri belirleyebilme gibi avantaja sahiptir. / In addition, the model has the advantage of being able to determine all parameters.

Aim (Amaç): The aim of this study is to develop a new analytical method for the determination of single-diode equivalent circuit parameters for PV Modules, which is easy to apply and requires few experimental data. / Bu çalışmanın amacı PV Modüller için tek-diyot eşdeğer devre parametrelerinin belirlenmesine ilişkin kolay uygulanabilir, az sayıda deneysel veri gerektiren yeni bir analitik yöntem geliştirmektir.

Originality (Özgünlük): In model development, mathematical relationships developed between short-circuit current (I_{sc}) and photon current (I_{pv}) values for many PV modules available in the literature. / Model geliştirmede literatürde mevcut çok sayıda PV modüller için kısa devre akımı (I_{sc}) ve foton akımı (I_{pv}) değerleri kullanılarak akımlar arasında bir matematiksel bağıntı kullanılmaktadır.

Results (Bulgular): Equivalent circuit parameters were determined for PV Modules, and it was seen that the results matched exactly with the results of similar analytical methods given in the literature, so the model was reliable. / PV Modüller için sonuçların literatürde verilen benzer analitik yöntemlerin sonuçları ile birebir örtüştüğü dolayısıyla modelin güvenilir olduğu görülmüştür.

Conclusion (Sonuç): It is possible to say that the model has advantages such as ease of use in parameter estimation, less need for experimental data and being able to determine all parameters compared to other methods. / Modelin diğer yöntemlere göre parametre kestiriminde kullanım kolaylığı, deneysel verilere daha az ihtiyaç duyma ve tüm parametreleri belirleyebilme gibi avantajları olduğunu söylemek mümkündür.



An analytical model for single-diode equivalent circuit parameter extraction of PV Modules/Cells

Ulaş EMİNOĞLU^{1*} Bilge Kaan ATAY²

¹Samsun University, Faculty of Engineering, Department of Electrical & Electronics Engineering, Samsun, Turkey

²Tokat Gaziosmanpaşa University, Faculty of Engineering, Department of Electrical & Electronics Engineering, Tokat, Turkey

Article Info

Research article
Received: 18/01/2023
Revision: 16/04/2023
Accepted: 27/04/2023

Keywords

Curve fitting
Mathematical model
PV Modul/Cell
Parameter extraction

Abstract

This study proposes an analytical model for determining single-diode circuit parameters for PV modules. In the study, firstly, a mathematical relation is established using the curve fitting method between the photon current (I_{pv}) and short-circuit current (I_{sc}) for several PV modules available in the literature. Then, an analytical model consisting of a set of equations with three unknowns (R_p , R_s and a) is developed using this developed relation between the currents. Analysis showed that the parameters extracted by using proposed model and resulting I-V and P-V curves largely overlap with the real data. Therefore, Root Mean Square Error (RMSE) and Coefficient of Determination (R^2) values between calculated and real data are found to be negligible. In addition, compared to other methods, it can be stated that the model has advantages such as ease of use in parameter estimation, less need for experimental data, and ability to determine all the parameters.

PV Modüller/Hücrelerin Tek-Diyot Eşdeğer Devre Parametrelerinin Kestirimi İçin Yeni Bir Analitik Model

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 18/01/2023
Düzelme: 16/04/2023
Kabul: 27/04/2023

Anahtar Kelimeler

Eğri uydurma
Matematiksel model
PV Modülü/Hücre,si,
Parametre kestirimi

Öz

Bu çalışmada PV modüller için tek-diyot eşdeğer devre parametrelerinin belirlenmesine ilişkin analitik bir model önerilmektedir. Çalışmada ilk olarak literatürde mevcut çok sayıda PV modüller için kısa devre akımı (I_{sc}) ve foton akımı (I_{pv}) değerleri kullanılarak eğri uydurma yöntemi ile akımlar arasında bir matematiksel bağıntı oluşturulmuştur. Daha sonra, akımlar arasında geliştirilen bu bağıntı eşdeğer devre denklemlerinde kullanılarak 3 bilinmeyenli (R_p , R_s ve a) denklem sisteminden oluşan analitik model geliştirilmiştir. Yapılan analizler, model ile elde edilen eşdeğer devre parametrelerinin ve sonucunda oluşturulan I-V ve P-V karakteristiklerinin deneysel veriler ile çok büyük oranda örtüşüğünü göstermektedir. Bu nedenle hesaplanan ve gerçek veriler arasındaki Hatanın Ortalama Karekökü (RMSE) ve Belirleme Katsayısı (R^2) değerleri ihmal edilebilir düzeyde bulunmuştur. Ayrıca modelin diğer yöntemlere göre parametre kestiriminde kullanım kolaylığı, deneysel verilere daha az ihtiyaç duyma ve tüm parametreleri belirleyebilme gibi avantajları olduğunu söylemek mümkündür.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Günümüzde teknolojinin gelişimi sonucunda PV hücrelerin üretim maliyetlerinin düşmesi, PV modüllerin bağımsız enerji üretim sistemlerinde ya da şebekelerde daha çok tercih edilen enerji kaynakları haline gelmiş olup PV modüllerinin doğru şekilde modellenmesi, etkin değerlendirme açısından önemli bir rol oynamaktadır [1]. Bunun

yanı sıra, eşdeğer devre parametrelerine dayanan sistemin çıkış akımı ve güç eğrileri, tasarım ve boyutlandırma açısından büyük önem taşımaktadır [2]. Eşdeğer parametrenin belirlenmesinde tek-diyot beş parametre model ve iki-diyot yedi parametre model üzere iki tip eşdeğer devre modeli literatürde yaygın olarak kullanılmaktadır. Örneğin referans [3]'de bir PV hücresi deneysel veriler kullanılarak hem tek-diyot beş parametre

model hem de iki-diyot yedi parametre model ile ayrı ayrı incelenmiştir. Her iki model için de çeşitli yöntemlerin uygulanabileceği analitik ve sayısal çözümler bulunmaktadır [4]. İki ticari PV modülün kullanıldığı çalışmada tek-diyot beş parametre eşdeğer devre modeli parametrelerinin belirlenmesi için geliştirilen farklı yöntemler karşılaştırılmıştır. Standart Test Koşullarını (STC) ve sıcaklığa bağlı doyma akımı dikkate alınarak eşdeğer devreye ait paralel ve seri direnç modeli [5]'de verilmiştir. Fakat kullanılan denklemlerin doğrusal olmayışı ve bilinmeyen değişkenlerin sayısının fazla oluşu bu tür sistemler için analitik çözüm üretmeyi kullanışlı kılmamaktadır. Bu nedenle tek-diyot beş parametrelili modele ait parametreleri analitik olarak belirlemek için yeni bir yaklaşım [6]'da verilmiştir. Oluşturulan modele ilişkin denklem seti Newton-Raphson yöntemi kullanılarak bilinmeyen parametrelerin bu yöntemle kolayca belirlenebileceği gösterilmiştir. Çalışmasına Lambert W fonksiyonunu dahil eden Patel ve arkadaşları [7], analitik yöntemler ile sayısal yöntemleri sentezleyerek ortaya koyduğu yeni bir metod ile işlem süresini kısaltmıştır. Referans [8]'de, eşdeğer devre parametresinin belirlenmesinde çözüm için Gauss-Seidel yöntemi kullanılmış ve Gauss-Seidel yöntemi başlangıç koşullarından önemli ölçüde etkilendiğinden başlangıç değerleri analitik yaklaşımlarla belirlenmiştir. Benzer şekilde eşdeğer devre kullanılarak üç denklemden oluşan analitik bir yöntem referans [9]'da geliştirilmiş olup bir çok PV modül için literatürde verilen analitik yöntemler ile sonuçlar kıyaslanarak modelin geçerliliği test edilmiştir. Bu çalışmaların dışında tek-diyot model için parametrelerden birinin sabit kabul edildiği farklı denklem setleri de oluşturulmuştur. Örneğin eşdeğer devre modelinin ana parametrelerinden biri olan paralel direnç giriş parametresi alınarak diğer parametreler bu değere bağlı olarak belirlenmiştir [10]. Benzer şekilde, eşdeğer devreyi temel alan analitik bir model [11]'de verilmiş ve bilinen iki ticari PV modül için elde edilen sonuçlar literatürde mevcut sonuçlar ile karşılaştırarak test edilmiştir. Fakat bu modelde diyot idealite faktörü (α) giriş parametresi olarak alınmakta ve değeri 1-1,5 arasında tutulmuştur.

Bu modellerin yanı sıra değişkenlerin ortam sıcaklığına bağlı olarak modellenmesi de mümkündür. Ancak sıcaklığa bağlı modelde üretici firmanın vermiş olduğu ölçüm sonuçları ile güneş ısı önemli bir etken haline gelmekte ve analizleri zorlaştırmaktadır [12]. 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 olduğuyula ilgilidir. Her iki ana modelin karşılaştırmalı bir incelemesi referans [13]'de gerçekleştirilmiştir. 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 arkadaşları [14], yaptıkları çalışmada her iki modeli de bir sayısal çözüm yöntemi ile çözerek bir PV hüresini bir hibrit sistemde benzetim çalışması yapmışlardır. Analizler sonucunda tek-diyot modelinin daha az parametreye sahip olması nedeniyle bilinmeyenlerin daha kısa sürede hesaplanabileceğini, ancak iki-diyot modelinin doğruluk açısından daha tutarlı olduğu sonucuna varılmıştır. Nümerik çalışmalarda başlangıç değerlerinin saptanması zor olduğundan, iki-diyot modelinin başlangıç değerlerini belirlemek amacıyla yaklaşık analitik çözümler [15]'de verilerek farklı ticari PV hücrelerinin deneysel verileri ile geçerlilikleri test edilmiştir. Oluşturulan matematiksel modelde bazı küçük değerli terimler ve bilinmeyen parametre sayısını azaltmak için denklem setinde diyot doyma akımı ihmal edilmiştir. Referans [16]'da PV eşdeğer devresinden doğrusal olmayan beş temel denklem oluşturulmuş ve bu denklemler MATLAB platformuna ait bir çözüm tekniğiyle ticari bir PV modülü için çözülmüştür. Modelin güvenilirliği deneysel bir sistem için onaylanmış ve elde edilen sonuçlar literatürde iki farklı yöntem sonuçları ile karşılaştırılmıştır.

Çok parametrelili karmaşık sistemlerde optimum çözüm elde etmek için meta-sezgisel yöntemler yaygın olarak kullanılmaktadır. Literatürde PV modüllerin eşdeğer devre parametrelerini elde etmek için bu tip optimizasyon tekniklerinin kullanıldığı çalışmalar bulunmaktadır [17-23, 27-29]. Genetik Algoritma [24] kullanılarak tek-diyot devre modeline ait bilinmeyen parametreler referans [17]'de hesaplanmış ve bu meta-sezgisel yöntemin problem için çok elverişli olduğu sonucuna varılmıştır. Parçacık Sürüsü Optimizasyonu (Particle Swarm Optimization) [25] yönteminin ilk olarak bu problem için uygulandığı çalışmada [18] PV modül için deneysel ölçüm verileri kullanılarak çift-diyot eşdeğer devre modeli parametreleri belirlenmiştir. Aynı optimizasyon metodu benzer bir yaklaşım ile tek-diyot devre modeli [19], tek-diyot ve çift-diyot devre modelleri [20] için parametrelerin belirlenmesinde kullanılmıştır. Her iki çalışmada da elde edilen sonuçlar deneysel veriler ve

literatürde yer alan sonuçlar ile kıyaslanarak geçerlilikleri test edilmiştir. Diferansiyel Gelişim Algoritması [26] olarak adlandırılan başka bir optimizasyon tekniği ise tek-diyot model parametrelerinin kestirimi için uygulanmıştır [21]. Geliştirilen model deneysel sonuçlar ile kıyaslanarak sonuçların geçerliliği test edilmiştir. Meta-sezgisel optimizasyon tekniklerinin geliştirilmiş versiyonları kullanılarak PV modüllerin parametre kestirimi için Ref. [22]'de Memetik Uyarlanabilir Diferansiyel Gelişim (Memetic Adaptive Differential Evolution) tekniği kullanılmıştır. Çalışmada literatürde yaygın olarak kullanılan PV modüller için çift-diyot devre modeline ait eşdeğer devre parametreleri belirlenmiş ve sonuçlar ile elde edilen V-I karakteristik eğrisi deneysel ölçüm sonuçlar ile karşılaştırılarak modelin geçerliliği gösterilmiştir. Bunların yanısıra, Referans [23]'de tek-diyot ve çift-diyot eşdeğer devre modeli yerine üç-diyot devre modeli kullanılmıştır. PV Modüller için eşdeğer devre parametreleri ve sonucunda V-I karakteristikleri belirlenerek modelin geçerliliği deneysel veriler kullanılarak test edilmiştir. Eşdeğer devre modeline ait parametrelerin belirlenmesinde Çekirge Optimizasyon Algoritması (Grasshopper Optimization Algorithm) kullanılmış ve deneysel veriler ile devre parametrelerine göre hesaplanan V-I karakteristiği değerleri kullanılarak belirlenen Kök Ortalama Karekök Hatası (Root Mean-Square Error; RMSE) değeri hedef fonksiyon olarak kullanılmıştır. Tekli optimizasyon temelli algoritmaların yanı sıra çoklu optimizasyon tabanlı yöntemler kullanılarak parametre tahmini çalışmaları da literatürde mevcuttur. Referans [27]'de yapılan çalışmada tek-diyot devre modeli parametrelerini belirlemek için hibrit GA-PSO temelli bir algoritma kullanılmıştır. Analiz sonucunda hibrid yaklaşımın GA temelli yöntemle göre daha avantajlı olduğu sonucuna varılmıştır. Referans [28]'de PV modül parametre kestirimi için Yapay Sinir Ağı (Artificial Neural Network) kullanılmış ve performansı bir analitik yöntem ile karşılaştırılmıştır. Parametre ve sonucunda maksimum güç kestirimi için YSA temelli modelin daha uygun sonuçlar verdiği görülmesine rağmen YSA temelli modelin hesaplama süresi ve uygulanabilirlik açısından daha elverişsiz olduğu sonucuna varılmıştır. PV modüller için iki-diyot eşdeğer devre parametrelerinin çıkarılması için Nelder-Mead ve modifiye PSO algoritmasının kombinasyonuna dayanan bir karma yöntem referans [29]'da uygulanmıştır. Geliştirilen algoritma bilinen ticari PV modül için uygulanarak sonuçlar meta-sezgisel metotlar ile elde edilen

sonuçlar ile kıyaslanmış ve modelin geçerliliği test edilmiştir.

Meta-sezgisel metotların kullanımının yanı sıra arama-temelli algoritmalar kullanılarak PV Modüller için parametre kestiriminin yapıldığı çalışmalarda literatürde mevcuttur [30-34]. Tek-diyot eşdeğer devre modelinde seri dirence indirgenmiş (R_s) denklemini diyot idealite faktörünün 1-2 değer aralığı için araştırılarak eşitliğin sağlandığı parametre değerleri ve bunlara bağlı olarak diğer eşdeğer devre parametrelerinin belirlendiği algoritma [30]'da verilmiştir. Denklemlerin eşdeğer devre paralel direnç (R_p) parametresine indirgenerek benzer bir parametre kestiriminin yapıldığı çalışma [31]'de verilmiştir. Yapılan çalışmada alınan her bir diyot idealite faktörü (a) değeri için belirlenen maksimum güç değeri ile gerçek güç değeri arasında tanımlanan hata dikkate alınarak algoritma sonlandırılmaktadır. Referans [32]'de verilen çalışmada, hesaplanacak parametrelerin sayısı ikiye indirgenerek arama algoritmasına dayanan grafik yöntemi ile parametre kestirimi gerçekleştirilmiştir. Referans [33]'de tek-diyot eşdeğer devre modelinin parametrelerinin belirlenmesi için diyot idealite faktörünün (a) bağımsız bir değişken olarak tanımlandığı kısmi-arama temelli bir algoritma geliştirilmiştir. Kullanılan yöntemde, kalan parametrelerin değerleri, sadece seri dirence (R_s) indirgenmiş bir denklemin sayısal çözümü kullanılarak her adımda analitik olarak elde edilmektedir. Algoritma, hesaplanan çıkış akımı ve I-V eğrisinin deneysel verileri arasında tanımlanan hata değerine dayanarak sonlandırılmaktadır. İki-diyot eşdeğer devre modeli için de benzer bir yaklaşım referans [34]'de verilmiştir. Önerilen algoritmada seri direnç (R_s) bağımsız bir parametre olarak kullanılmış ve geri kalan parametreler her bir iterasyonda seçilen seri dirence göre hesaplanmaktadır. Algoritmada seçilen seri direncin değeri ile hesaplanan değeri örtüşünceye kadar işlemler tekrarlanmaktadır. Benzer şekilde Referans [35]'de eşdeğer devre seri direncine (R_s) göre gerçek çözümün arandığı arama temelli algoritma verilmiştir. Algoritmada tek-diyot eşdeğer devre parametrelerinin değeri maksimum güç noktası baz alınarak aranmaktadır. Çalışmada bir çok PV modül için deneysel çıkış akımı ve çıkış gücü verileri kullanılarak modelin geçerlilik analiz yapılmıştır. Referans [36]'de ise PV hücresinin seri direnci doğrusal olmayan direnç olarak iki çift kutuplu transistör ile modellenerek çıkış gerilimi çıkış akımının bir fonksiyonu şeklinde tanımlanmıştır. Oluşturulan model kullanılarak STC koşullarında sistem

parametrelerinin spesifik değerleri için PV hücresi ve modülünün akım-gerilim ve güç-gerilim değişimi analiz edilmiştir.

Bu çalışmada PV Modüller için tek-diyot eşdeğer devre parametrelerinin belirlenmesine ilişkin yeni bir analitik yöntem önerilmektedir. Modelin matematiksel olarak geliştirilmesi ve çözüm denklemleri Bölüm 2’de verilmektedir. Bölüm 3’de modelin geçerlilik analizi verilmektedir. Analizler iki bölümden oluşmaktadır. İlk olarak elde edilen sonuçların benzer diğer analitik yöntemler ile elde edilen sonuçlar ile karşılaştırılması yapılarak modelin avantajları sunulmaktadır. İkinci olarak değişik sıcaklıklarda farklı tip PV Modüller için arama-temelli ve meta-sezgisel metotlar uygulanarak elde edilmiş parametreler kullanılarak oluşturulan akım-gerilim ve güç-gerilim karakteristikleri dikkate alınarak modelin geçerlilik analizi yapılmaktadır. Deneysel veriler ve etiket değerleri kullanılarak hesaplanan RMSE ve R² indisleri karşılaştırma amacıyla kullanılmaktadır. Son olarak Bölüm 4’de sonuçlar verilmektedir.

2. MATERIALS AND METHODS (MATERIAL VE METOD)

2.1 Pv Modüller/Hücreler İçin Parametre Kestirim Modeli (Parameter Estimation Model For PV Cells/Modules)

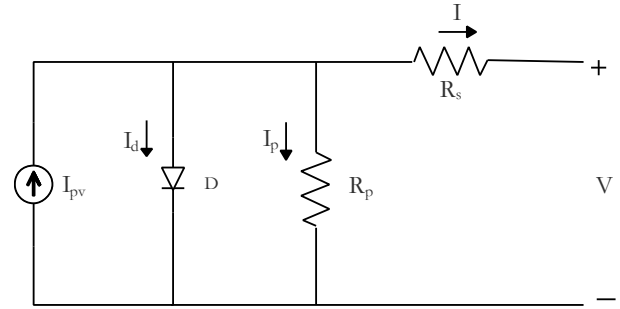
Şekil 1’de bir PV hücresi için yaygın olarak kullanılan tek-diyot eşdeğer devre modeli verilmiştir [2]. Burada I_{pv}; hücrenin ürettiği foton akımı, R_s ve R_p sırasıyla seri ve paralel direnci göstermektedir. Eşdeğer devrede diyot akımı (I_d);

$$I_d = I_o \left(e^{\frac{V_d}{aV_t}} - 1 \right) \quad (1)$$

ifadesi ile tanımlanmaktadır. Burada I_o; diyot sızıntı akımı, a; diyot idealite faktörü ve V_d; diyot uç gerilimini göstermektedir. V_t; diyot üzerindeki termal gerilimi ifade etmektedir (V_t = kN_sT/q). PV modül için seri bağlı hücre sayısı N_s ile gösterilmektedir. 1,38x10⁻²³ J/K değerindeki Boltzmann sabiti k ile, elektron yükü (1,6x10⁻¹⁹ C) ise q ile gösterilmektedir. Son terim olan T ise Kelvin cinsinden hücre sıcaklığıdır [2]

Eşdeğer devrede paralel direnç (R_p) değerinin çok büyük ve diyot akımı (I_d) değerinin çok küçük olması nedeniyle kısa devre durumunda çıkış akımı (I=I_{sc}) değeri foton akımı (I_{pv}) değerine çok yakındır. Çalışmada bu durum matematiksel olarak ilişkilendirilmiştir. İlk olarak çok sayıda PV Modül için literatürde elde edilen foton akımı ve bu PV modüller için kısa devre akımı değerleri saptanmış

ve Şekil 2’de “literatür verisi” olarak verilmiştir. Şekilden görüleceği üzere bu iki akım değerleri arasında I_{pv}=c₁I_{sc}+c₂ şeklinde lineer bir bağıntı tanımlamak mümkündür. Model katsayıları eğri uydurma metodu olan ve literatürde geniş olarak kullanılan Gauss-Newton [37] metodu ile c₁=0.9998926816 ve c₂=0.0017895792 olarak belirlenmiştir. Oluşturulan model kullanılarak PV’ler için hesaplanan foton akımı Şekil 2’de ayrıca verilmiştir. Şekilden görüleceği üzere oluşturulan model sonuçları literatür sonuçları ile tamamen örtüşmektedir. Matematiksel olarak, mevcut 141 adet örnek data ve model ile hesaplanan akımlar arasında tanımlanan Kök Ortalama Karekök Hatası [37] değeri RMSE=0.0018 olarak belirlenmiş olup bu değer ihmal edilecek kadar küçüktür. Dolayısıyla oluşturulan modelin herhangi bir PV Modül için verilen kısa devre akımı kullanılarak üretilen PV akımının analitik olarak kolaylıkla belirlenmesine olanak sağladığını söylemek mümkündür.



Şekil 1. PV Modül/Hücre için tek-diyot eşdeğer devre şeması (Single-diode equivalent circuit diagram for PV Module/Cell)

Diğer taraftan, Şekil 1’de verilen eşdeğer devrede çıkış akımının ifadesi Kirchoff Akım Yasası kullanılarak aşağıdaki gibi elde edilir.

$$I = I_{pv} - I_d - I_p \quad (2)$$

$$I = I_{pv} - I_o \left(e^{\frac{V+IR_s}{aV_t}} - 1 \right) - \frac{V+IR_s}{R_p} \quad (3)$$

Kısa devre durumunda (I_{sc}, 0);

$$I_{sc} = I_{pv} - I_o \left(e^{\frac{I_{sc}R_s}{aV_t}} - 1 \right) - \frac{I_{sc}R_s}{R_p} \quad (4)$$

Açık devre durumunda (0, V_{oc});

$$0 = I_{pv} - I_o \left(e^{\frac{V_{oc}}{aV_t}} - 1 \right) - \frac{V_{oc}}{R_p} \quad (5)$$

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

$$I_{mpp} = I_{pv} - I_o \left(e^{\frac{V_{mpp}+I_{mpp}R_s}{aV_t}} - 1 \right) - \frac{V_{mpp}+I_{mpp}R_s}{R_p} \quad (6)$$

Bu noktada gücün gerilime göre türevi;

$$\frac{dP}{dV} = I + \frac{dI}{dV} V \quad (7)$$

$$0 = I_{mpp} + \frac{dI}{dV} V_{mpp} \quad (8)$$

$$\frac{dI}{dV} = -\frac{I_{mpp}}{V_{mpp}} \quad (9)$$

Denklem 3’de verilen eşitliğin gerilime göre türevi alındığında;

$$\frac{dI}{dV} = -\frac{I_0}{aV_t} \left(1 + R_S \frac{dI}{dV}\right) e^{\frac{V+I R_S}{aV_t}} - \frac{1}{R_p} \left(1 + R_S \frac{dI}{dV}\right) \quad (10)$$

Denklem 9, elde edilen son denklemde yerine konulduğunda maksimum güç noktasında çıkış akımının çıkış gerilimine oranı aşağıdaki şekilde elde edilir.

$$\frac{I_{mpp}}{V_{mpp}} = \frac{I_0}{aV_t} \left(1 - R_S \frac{I_{mpp}}{V_{mpp}}\right) e^{\frac{V_{mpp}+I_{mpp}R_S}{aV_t}} + \frac{1}{R_p} \left(1 - R_S \frac{I_{mpp}}{V_{mpp}}\right) \quad (11)$$

Denklem 5’den faydalanılarak I_0 akımı;

$$I_0 = \frac{\frac{V_{oc}}{R_p} - I_{pv}}{\frac{V_{oc}}{e^{aV_t-1}}} \quad (12)$$

Elde edilen bu ifade Denklem 4, 6 ve 11’de yerine konulduğunda dört bilinmeyen içeren üç denklem (Denklem 13-15) elde edilmektedir.

$$I_{sc} = I_{pv} - \frac{(I_{pv}R_p - V_{oc}) \left(e^{\frac{I_{sc}R_S}{aV_t} - 1} \right)}{\left(\frac{V_{oc}}{e^{aV_t-1}} \right) R_p} - \frac{I_{sc}R_S}{R_p} \quad (13)$$

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

$$\frac{I_{mpp}}{V_{mpp}} = \frac{I_{pv}R_p - V_{oc}}{\left(\frac{V_{oc}}{e^{aV_t-1}} \right) R_p aV_t} \left(1 - R_S \frac{I_{mpp}}{V_{mpp}}\right) e^{\frac{V_{mpp}+I_{mpp}R_S}{aV_t}} + \frac{1}{R_p} \left(1 - R_S \frac{I_{mpp}}{V_{mpp}}\right) \quad (15)$$

Eğri uydurma ile oluşturulan model kullanılarak foton akımı (I_{pv}) ifadesi elde edilen son denklemlerde yerine konulduğunda üç bilinmeyenli denklem seti (Denklem 16-18) aşağıdaki şekilde elde edilmiş olur.

$$\frac{(c_1 I_{sc} + c_2)(D-1)R_p + V_{oc}}{DR_p} E - I_{sc} \left(1 + \frac{R_S}{R_p}\right) = 0 \quad (16)$$

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

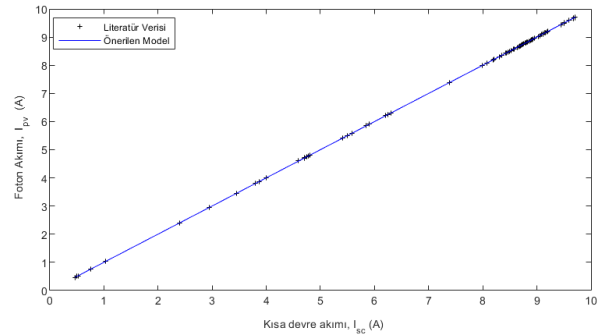
$$\left[\frac{(c_1 I_{sc} + c_2)R_p - V_{oc}}{aV_t DR_p} (F + 1) + \frac{1}{R_p} \right] \left(1 - R_S \frac{I_{mpp}}{V_{mpp}}\right) - \frac{I_{mpp}}{V_{mpp}} = 0 \quad (18)$$

Burada, $D = e^{\frac{V_{oc}}{aV_t}} - 1$, $E = e^{\frac{I_{sc}R_S}{aV_t}} - 1$ and $F = \frac{V_{mpp}+I_{mpp}R_S}{aV_t} - 1$. Oluşturulan bu denklem seti bir PV Modül için verilen test koşullarında R_s , R_p ve a parametrelerinin analitik olarak belirlenmesine imkân sağlamaktadır. Kalan iki parametre ise Denklem 4 ve Denklem 5 kullanılarak I_0 akımı;

$$I_0 = \frac{I_{sc} - \frac{V_{oc} - I_{sc}R_S}{R_p}}{\frac{V_{oc}}{e^{aV_t-1}} - \frac{I_{sc}R_S}{aV_t}} \quad (19)$$

ve Denklem 5 yeniden düzenlenerek photon akımı aşağıdaki şekilde hesaplanabilir.

$$I_{pv} = I_0 \left(e^{\frac{V_{oc}}{aV_t}} - 1 \right) + \frac{V_{oc}}{R_p} \quad (20)$$



Şekil 2. Farklı tip/boyuttaki PV Modüller için foton akımının kısa devre akımı ile değişimi (Variation of photon current with short-circuit current for different type/size PV Modules)

2.2 Model Doğrulama (Model Verification)

Geliştirilen modele ilişkin denklemlerin çözümünde Newton-Raphson metodu [37] kullanılmış olup hesaplamalar Matlab ortamında [38] yapılmıştır. Tablo 1-3’de önerilen model kullanılarak sırasıyla SW255, KC200GT ve MSX120 PV modüller için standart test koşullarında ($T=25$ oC ve $g=1000$ W/m²) elde edilen tek-diyot eşdeğer devre parametreleri verilmektedir. Literatürde yer alan bazı analitik metotlar ile elde edilen sonuçlar karşılaştırma amacıyla ayrıca verilmektedir. Tablo 1’den görüleceği üzere SW255 PV modül için belirlenen eşdeğer devre parametreleri Referans [10]’da verilen parametreler ile tam olarak uyuşmamaktadır. Bu, paralel direncin (R_p) deneysel ölçümler ile belirlenerek Referans [10]’da giriş parametresi olarak kullanılmasından kaynaklanmaktadır. Geliştirilen model ile elde

edilen $R_p=2245 \Omega$ değeri ref. [10]'da verilen modelde giriş parametresi olarak kullanılması sonucunda elde edilen parametre değerleri Tablo 1'de son satırda verilmiş olup geliştirilen model sonuçları ile tamamen örtüştüğü görülmektedir. Tablo 2'de KC200GT PV Modül için elde edilen eşdeğer devre parametreleri Referans [11]'de belirlenen parametre değerleri ile birlikte verilmiştir. Her iki analitik yöntem ile elde edilen sonuçların farklılık göstermesi nedeninin referans [11]'de diyot idealite faktörünün (a) bilinen bir parametre olarak kabul edilmesi ve giriş verisi olarak kullanılmasından kaynaklandığı söylenebilir. Geliştirilen model ile elde edilen sonuçlardan $a=1.376$ değeri Referans [11]'de verilen modelde giriş parametresi olarak kullanılması sonucunda belirlenen parametre değerleri Tablo 2'de son sütunda verilmiştir. Bu durumda her iki metot ile elde edilen sonuçların bire bir örtüştüğü açıkça görülmektedir. Tablo 3'de BP-MSX120 PV modül için elde edilen eşdeğer devre parametreleri verilmektedir. Bu PV modül için Referans [2]'de hesaplanan parametre değerleri ve Referans [8-9, 16]'da önerilen analitik yöntemler uygulanarak elde edilen parametre

değerleri karşılaştırma amacıyla ayrıca verilmiştir. Tablo 3'den görüleceği üzere belirlenen parametre değerleri ile diğer modeller [8-9, 16] kullanılarak elde edilen parametre değerleri ve Ref. [2]'de verilen sonuçlar tamamen uyusmaktadır. Fakat bu modeller geliştirilen model ile uygulama açısından kıyaslandığında bazı dezavantajlara sahip olduğu gözlemlenmiştir. Örneğin referans [2]'de verilen sonuçlar kendi modeline ait denklemlerde yerine konduğunda eşitliklerin sağlanmadığı görülmüştür. Dolayısıyla modele ilişkin denklemlerin hatalı verildiğini söylemek mümkündür. Referans [16]'da verilen modelin parametrelerin başlangıç değerlerine çok bağımlı olduğu görülmüş olup çözüme çok yakın olmayan başlangıç koşullarında gerçekçi sonuç elde etmek için fonksiyonel yazılım programı gerektirmektedir. Her ne kadar Referans [8, 9]'da verilen modeller kullanılarak aynı sonuçlar elde ediliyor olsa da bu metotlar eşdeğer devreye ait beş temel denklemin indirgenmesi esasına dayanmaktadır. Dolayısıyla önerilen model ile kıyaslandığında daha kompleks denklem sisteminin çözümünü gerektirmektedirler.

Tablo 1. SW255 için hesaplanan parametre değerleri (Parameter values calculated for SW255)

PV Modül	SW255 PV Modül [10]										
	V_{oc} (V)	I_{sc} (A)	V_{mpp} (V)	I_{mpp} (A)	N_s	P_m (W)	R_s (Ω)	R_p (Ω)	a	I_o (nA)	I_{pv} (A)
Ref. [10]	38	8.88	30.9	8.32	60	255	0.203	6300	1.264	0.304	8.8800
Önerilen Model	38	8.88	30.9	8.32	60	255	0.211	2245	1.244	21.66	8.8808
Model [10]	38	8.88	30.9	8.32	60	255	0.211	2245	1.244	21.66	8.8808

Tablo 2. KC200GT için hesaplanan parametre değerleri (Calculated parameter values for the KC200GT)

PV Modül	KC200GT PV Modül [11]										
	V_{oc} (V)	I_{sc} (A)	V_{mpp} (V)	I_{mpp} (A)	N_s	P_m (W)	R_s (Ω)	R_p (Ω)	a	I_o (μ A)	I_{pv} (A)
Ref. [11]	32.9	8.21	26.3	7.61	54	200	0.231	594.8	1.300	0.096	8.213
Önerilen Model	32.9	8.21	26.3	7.61	54	200	0.206	1862	1.376	0.265	8.2110
Model [11]	32.9	8.21	26.3	7.61	54	200	0.206	1855	1.376	0.264	8.2109

Tablo 3. BP-MSX120 için hesaplanan parametre değerleri (Parameter values calculated for BP-MSX120)

PV Modül	BP-MSX120 PV Modül [2]										
	V_{oc} (V)	I_{sc} (A)	V_{mpp} (V)	I_{mpp} (A)	N_s	P_m (W)	R_s (Ω)	R_p (Ω)	a	I_o (μ A)	I_{pv} (A)
Ref. [2]	42.1	3.87	33.7	3.56	72	120	0.473	1365	1.396	0.323	3.871
Önerilen Model	42.1	3.87	33.7	3.56	72	120	0.475	1339	1.395	0.322	3.871

Tablo 3 Devamı

Model [8]	42.1	3.87	33.7	3.56	72	120	0.472	1365	1.396	0.322	3.871
Model [9]	42.1	3.87	33.7	3.56	72	120	0.472	1365	1.398	0.322	3.871
Model [16]	42.1	3.87	33.7	3.56	72	120	0.472	1360	1.398	0.325	3.871

3. BULGULAR (RESULTS)

I-V karakteristikleri deneysel olarak elde edilmiş MSX60, STP6-120/36 ve PWP201 PV modüller için geliştirilen modelin geçerliliği analiz edilmiştir. Analizlerde iki farklı hata indisi; RMSE ve R^2 [37] kullanılmıştır. Tablo 4’de MSX60 PV Modül için $T=25$ °C geliştirilen model kullanılarak elde edilen parametre değerleri Referans [19]’da meta-sezgisel metotlardan PSO algoritması uygulanarak hesaplanan parametre değerleriyle birlikte verilmektedir. Tablodan görüleceği üzere her iki metot ile elde edilen sonuçlar birbirlerine yakın değerlidir. Belirlenen bu parametre değerleri kullanılarak oluşturulan I-V karakteristikleri deneysel veriler ile birlikte Şekil 3’te verilmiştir. Şekilden görüleceği üzere önerilen model sonuçları ile oluşturulan akım-gerilim karakteristiği meta-sezgisel metot sonuçlarıyla oluşturulan eğriye nazaran deneysel veriler ile daha yüksek oranda örtüşmektedir. Bu durum Tablo 7’de verilen hata indisleri değerlerinden daha açık görülmektedir. Tablo 7’de birinci sütunda MSX60 PV modül çıkış akımı değerleri için hata oranları verilmiştir. Önerilen model sonuçları kullanılarak oluşturulan çıkış akımları için RMSE ve R^2 değerleri sırasıyla 0.0384 ve 0.9989 olup bu değerler ideal (sırasıyla 0 ve 1) değerlerine çok yakındır. Dolayısıyla PSO temelli algoritma sonuçları [19] ile belirlenen çıkış akımı değerlerine nazaran deneysel veriler ile daha çok uyduğunu söylemek mümkündür.

STP6-120/36 PV modül için eşdeğer devre parametreleri belirlenerek Ref. [30]’da verilen sonuçlar ile birlikte Tablo 5’te verilmiştir. Bu sonuçlar kullanılarak oluşturulan I-V karakteristiği deneysel sonuçlar ve referans [30]’da verilen çıkış akımı değerleriyle birlikte Şekil 4’de verilmiştir. Tablo 5’ten görüleceği üzere belirlenen parametre değerleri referans [30]’da diyot idealite faktörüne bağlı olarak oluşturulan arama-temelli algoritma

ile elde edilen sonuçlar ile farklılık göstermektedir. Diğer taraftan Şekil 4’den faydalanarak önerilen model sonuçları ile oluşturulan akım-gerilim karakteristiğinin deneysel veriler ve ayrıca ref. [30]’da verilen akım değerleri ile büyük oranda uyduğu görülmektedir. Bu aynı zamanda Tablo 7’de ilgili PV modül için hesaplanan ve ikinci satırda verilen RMSE, R^2 hata değerlerinden de görülmektedir. Her ne kadar referans [30]’da verilen çıkış akımlarına ilişkin hata değerleri çok küçük oranda daha elverişli olsa da verilen eşdeğer devre parametre değerleri kullanıldığında aynı akım değerlerinin elde edilemediği görülmüştür. Bu durum, belirlenen $R_p=9.745$ Ω değerinin $V_{oc}=19.21$ V gerilim seviyesi için ısı kayıplar açısından elverişli bir değer olmamasından da görülebilmektedir. Tablo 6’da geliştirilen model kullanılarak PWP201 PV Modül için 45 °C de elde edilen eşdeğer devre parametreleri verilmiştir. Karşılaştırma amacıyla Referans [20]’de PSO metodu kullanılarak belirlenen çift-diyot eşdeğer devre parametreleri ayrıca verilmektedir. Her iki metot ile elde edilen parametre değerlerinin yakın değerli olduğu görülmektedir. Belirlenen parametre değerleri kullanılarak oluşturulan I-V karakteristikleri deneysel ölçüm sonuçları ile birlikte Şekil 5’de verilmiştir. Önerilen yöntem sonuçlarıyla elde edilen akım-gerilim karakteristiği deneysel veriler ve çift-diyot eşdeğer devre sonuçlarına ilişkin akım değerleriyle örtüşmektedir. Bu durum deneysel veriler kullanılarak hesaplanan ve Tablo 7’de üçüncü satırda verilen RMSE ve R^2 hata değerlerinden de açıkça görülmektedir. Her iki model sonuçlarına ilişkin hata değerleri çıkış eğrisi uyumunun yüksek oranda olduğunu göstermektedir. Ayrıca, geliştirilen model sonuçlarına ilişkin çıkış akımı değerlerinin çift-diyot eşdeğer devre akım değerlerine nazaran küçük oranda da olsa daha avantajlı olduğunu söylemek mümkündür.

Tablo 4. MSX60 için hesaplanan parametre değerleri (Parameter values calculated for MSX60)

PV Modül	MSX60 PV Modül [19]										
	V_{oc} (V)	I_{sc} (A)	V_{mpp} (V)	I_{mpp} (A)	N_s	P_m (W)	R_s (Ω)	R_p (Ω)	a	I_o (μA)	I_{pv} (A)
Ref. [19]	21.1	3.8	17.1	3.5	36	60	0.146	561.6	1.331	0.15	3.802
Önerilen Model	21.1	3.8	17.1	3.5	36	60	0.186	512.7	1.369	0.214	3.801

Tablo 5. STP6-120/36 için hesaplanan parametre değerleri (Calculated parameter values for STP6-120/36)

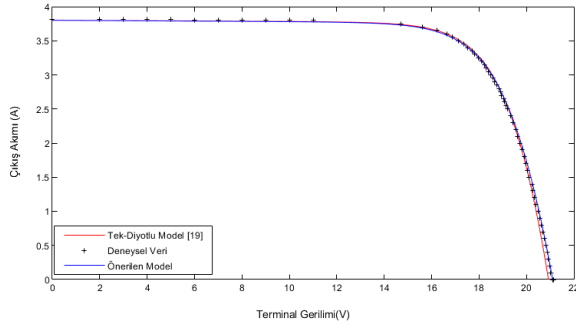
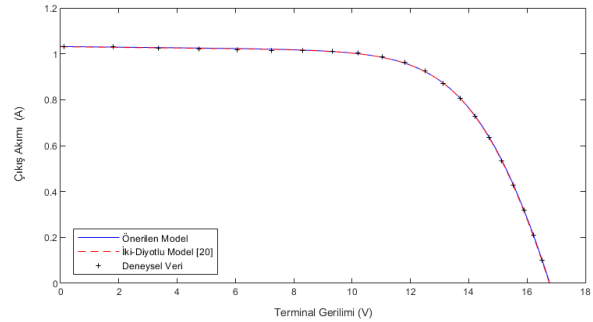
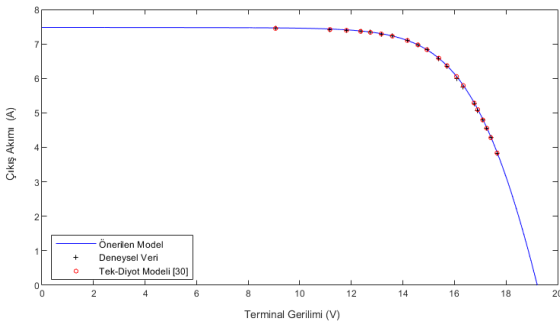
PV Modül	STP6-120/36 PV Modül [30]											
	Parametreler	V_{oc} (V)	I_{sc} (A)	V_{mpp} (V)	I_{mpp} (A)	N_s	P_m (W)	R_s (Ω)	R_p (Ω)	a	I_o (μA)	I_{pv} (A)
Ref. [30]		19.21	7.48	14.93	6.83	36	120	0.0049	9.745	1.207	1.20	7.483
Önerilen Model		19.21	7.48	14.93	6.83	36	120	0.1605	1222	1.272	2.66	7.481

Tablo 6. PWP201 için 45 °C de hesaplanan parametre değerleri (Parameter values calculated for PWP201 at 45 °C)

PV Modül	Photowat-PWP201 PV Modül [20]										
	Parametre	V_{oc} (V)	I_{sc} (A)	V_{mpp} (V)	I_{mpp} (A)	N_s	R_s (Ω)	R_p (Ω)	a	I_o (μA)	I_{pv} (A)
Ref. [20]		16.7785	1.0317	12.649	0.912	36	1.2392	744.71	1.3173/ 1.3169	2.5129/ 1×10^{-6}	1.0323
Önerilen Model		16.7785	1.0317	12.649	0.912	36	1.2072	744.07	1.3441	3.2171	1.0333

Tablo 7. Farklı PV Modüller için gerçek çıkış akımı ile hesaplanan akımlar arasındaki RMSE ve R^2 hata indisleri değeri (RMSE and R^2 error indices value between actual output current and calculated currents for different PV Modules)

Model/ PV Modül	Önerilen Model		Model Ref [19]		Model Ref [30]		Model Ref [20]	
	RMSE	R^2	RMSE	R^2	RMSE	R^2	RMSE	R^2
MSX60	0.0384	0.9989	0.0913	0.9941	-	-	-	-
STP6-120/36	0.0241	0.9995	-	-	0.0178	0.9997	-	-
PWP201	0.0024	0.9999	-	-	-	-	0.0033	0.9998

**Şekil 3.** Solarex MSX60 için elde edilen I-V karakteristiği (Obtained I-V characteristic for Solarex MSX60)**Şekil 5.** PWP201 için 45 °C de I-V karakteristiği (I-V characteristic for PWP201 at 45 °C)**Şekil 4.** STP6-120/36 için 55 °C de I-V karakteristiği (I-V characteristic at 55 °C for STP6-120/36)

4. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu çalışmada PV Modüller için tek-diyot eşdeğer devre parametrelerini belirlemek amacıyla analitik bir yöntem önerilmiştir. Model, literatürde mevcut çok sayıda PV modüller için kısa devre akımı (I_{sc}) ve foton akımı (I_{pv}) değerleri eğri uydurma yöntemi ile matematiksel bir bağıntıya dönüştürülerek geliştirilmiştir. Açık-devre, kısa-devre ve maksimum güç testlerine ilişkin akım ve gerilim verilerini kullanarak eşdeğer devreye ait tüm parametrelerin kolaylıkla belirlenmesine imkân sağlamaktadır. Modelin geçerliliği farklı güç ve ayrıca farklı sıcaklık değerlerinde PV Modüller için test edilmiştir. İlk olarak farklı tip

(SW255, KC200GT and MSX120) PV Modüller için standart test koşullarında eşdeğer devre parametreleri belirlenmiş, sonuçların literatürde verilen benzer analitik yöntemlerin sonuçları ile birebir örtüştüğü dolayısıyla modelin güvenilir olduğu görülmüştür. Her ne kadar uygulama/kullanım açısından analitik yöntemler ile kıyaslandığında daha elverişsiz olsa da arama ve meta-sezgisel algoritma temelli metotların güvenilirliğinin yüksek olduğu bilinmektedir. Bu nedenle önerilen metot ile elde edilen sonuçlar ve literatürde bu tip yöntemler ile elde edilen sonuçlar kullanılarak oluşturulan I-V ve P-V eğrileri için geçerlilik analizi ayrıca yapılmıştır. Deneysel veriler kullanılarak hesaplanan RMSE ve R² hata değerleri karşılaştırma amacıyla kullanılmıştır. Geliştirilen model sonuçlarına ilişkin eğrilerin deneysel veriler ile çok yüksek oranda örtüştüğü ve çıkış akımı hata değerlerinin ihmal edilebilir seviyede olduğu görülmüştür. Buna ilaveten, modelin arama-temelli metotlara nazaran genelde daha geçerli veya çok yakın değerli sonuçlar verdiği görülmüştür. Diğer taraftan bu tip metotlar ile kıyaslandığında modelin kullanım/uygulama açısından daha avantajlı olduğunu söylemek mümkündür.

ETİK STANDARTLARIN BEYANI (DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS)

Bu makalenin yazarı çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler.

The author of this article declares that the materials and methods they use in their work do not require ethical committee approval and/or legal-specific permission.

ÇIKAR ÇATIŞMASI (CONFLICT OF INTEREST)

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

There is no conflict of interest in this study.

REFERENCES (KAYNAKLAR)

- [1] Keskin V, Khalejan SHPR, Çıkla R. Investigation of the Shading Effect on the Performance of a grid-connected PV Plant in Samsun/Turkey. *Politeknik Dergisi*. 2021; 24(2): 553-563.
- [2] Hejri M, Mokhtari H, Azizian MR, Söder L. An analytical-numerical approach for parameter determination of a five-parameter single-diode model of photovoltaic cells and modules. *International Journal of Sustainable Energy*. 2016; 35(4): 396-410.
- [3] Chan DSH, Phang JCH. Analytical methods for the extraction of solar-cell single-and

- double-diode model parameters from IV characteristics. *IEEE Trans. on Electron Devices*. 1987; 34(2): 286-293.
- [4] Shongwe S, Hanif M. Comparative analysis of different single-diode PV modeling methods. *IEEE Journal of Photovoltaics*. 2015; 5(3): 938-946.
- [5] Sera D, Teodorescu R, Rodriguez P. PV panel model based on datasheet values. *IEEE international symposium on industrial electronics*. 2007; 2392-2396.
- [6] Reis LRD, Camacho JR, Novacki DF. The Newton Raphson method in the extraction of parameters of PV modules. *International Conference on Renewable Energies and Power Quality*. 2017; 1(15): 634-639.
- [7] Patel S. The single diode model of IV and PV characteristics using the lambert w function. *International Journal of Innovative Research in Science Engineering and Technology*. 2016; 5(5): 7034-7039.
- [8] Kareem MSA, Saravanan M. 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 and Computer Sciences*. 2016; 24(4): 2028-2041.
- [9] Atay BK, Eminoğlu U. A new approach for parameter estimation of the single-diode model for photovoltaic cells/modules. *Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences*. 2019; 27(4): 3026-3039.
- [10] Chaibi Y, Salhi M, El-Jouni A, Essadki A. A new method to extract the equivalent circuit parameters of a photovoltaic panel. *Solar Energy*. 2018; 163: 376-386.
- [11] Cubas J, Pindado S, Farrahi A. New method for analytical photovoltaic parameter extraction. *International Conference on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA)*. 2013; 873-877.
- [12] Farivar G, Asaei B. Photovoltaic module single diode model parameters extraction based on manufacturer datasheet parameters. *IEEE International Conference on Power and Energy*. 2010; 929-934.
- [13] Shannan NMAA, Yahaya NZ, Singh B. Single-diode model and two-diode model of PV modules: A comparison. *IEEE International Conference on Control System, Computing and Eng*. 2013; 210-214.
- [14] Yahfdhou A, Mahmoud AK, Youm I. Evaluation and determination of seven and five parameters of a photovoltaic generator by an iterative method. *Smart Grid and Renewable Energy*. 2016; 7: 247-260.

- [15] Hejri M, Mokhtari H, Azizian MR, Ghandhari M, Söder L. On the parameter extraction of a five-parameter double-diode model of photovoltaic cells and modules. *IEEE Journal of Photovoltaics*. 2014; 4(3): 915–923.
- [16] Mohapatra A, Nayak B, Mohanty KB. Parameter Extraction of PV Module using NLS Algorithm with Experimental Validation. *International Journal of Electrical and Computer Engineering*. 2017; 7(5): 2392.
- [17] Zagrouba M, Sellami A, Bouaïcha M, Ksouri M. Identification of PV solar cells and modules parameters using the genetic algorithms: Application to maximum power extraction. *Solar Energy*. 2010; 84(5): 860–866.
- [18] Sandrolini L, Artioli M, Reggiani U. Numerical method for the extraction of photovoltaic module double-diode model parameters through cluster analysis. *Applied Energy*. 2010; 87(2): 442–451.
- [19] Muralidharan R. Parameter extraction of solar photovoltaic cells and modules using current–voltage characteristics. *International Journal of Ambient Energy*. 2017; 38(5): 509–513.
- [20] Nunes HGG, Pompo JAN, Mariano SJPS and Calado MRA. A new high performance method for determining the parameters of PV cells and modules based on guaranteed convergence particle swarm optimization. *Applied Energy*. 2018; 211:774-791.
- [21] Ishaque K, Salam Z. An improved modeling method to determine the model parameters of photovoltaic (PV) modules using differential evolution (DE). *Solar Energy*. 2011; 85 (9): 2349-2359.
- [22] Li S, Gong W, Yan X, Hu C, Bai D, Wang L. Parameter estimation of photovoltaic models with memetic adaptive differential evolution. *Solar Energy*. 2019; 190: 465–474.
- [23] Elazab OS, Hasanien HM, Alsaidan I, Abdelaziz AY, Muyeen SM. Parameter estimation of three diode photovoltaic model using grasshopper optimization algorithm. *Energies*. 2020; 13(2): 497.
- [24] Goldberg, D.E. (1989). *Genetic algorithms in search optimization and machine learning*. Boston: Addison Wesley Publishing Company MA, USA.
- [25] Kennedy J, Eberhart RC. Particle swarm optimization. *IEEE International Conference on Evolutionary Computation (ICNN'95)* Perth, WA, Australia. 1995; 1942-1948.
- [26] Storn R, Price K. Differential Evolution—a simple and efficient heuristic for global optimization over continuous spaces. *Journal of Global Optimization*. 1997; 11(4): 341-35.
- [27] Saravanan C, Panneerselvam MA. A comprehensive analysis for extracting single diode PV model parameters by hybrid GA-PSO algorithm. *International Journal of Computer Applications*. 2013; 78: 16-19.
- [28] Castro R. Data-driven PV modules modelling: Comparison between equivalent electric circuit and artificial intelligence based models. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*. 2018; 30: 230-238.
- [29] Hamid NFA, Rahim NA, Selvaraj J. Solar cell parameters identification using hybrid Nelder-Mead and modified particle swarm optimization. *Journal of Renewable and Sustainable Energy*. 2016; 8: 1-21.
- [30] Tong NT, Pora W. A parameter extraction technique exploiting intrinsic properties of solar cells. *Applied Energy*. 2016; 176: 104-115.
- [31] Rasool F, Drieberg M, Badruddin N, Singh BSM. PV panel modeling with improved parameter extraction technique. *Solar Energy*. 2017; 152: 519-530.
- [32] Bencherif M, Benouaz T. Parameter extraction of solar panels using the graphical method. *International Journal of Ambient Energy*. 2018; 1-18.
- [33] Hussein A. A simple approach to extract the unknown parameters of PV modules. *Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences*. 2017; 25: 4431-4444.
- [34] Amin YK, Shahhoseini A. A fast modeling of the double-diode model for PV modules using combined analytical and numerical approach. *Solar Energy*. 2018; 162: 403-409.
- [35] Villalva MG, Gazoli JR, and Filho ER. *Comprehensive Approach to Modeling and Simulation of Photovoltaic Arrays*. 2009; 24(5): 1198-1208.
- [36] Pelap PB, Dongo PD, Kapim AD, Optimization of the characteristics of the PV cells using nonlinear electronic components. *Energy Technologies and Assessments*. 2016; 16: 84-92.
- [37] Chapra, S.C. and Canale, R.P. (1988). *Numerical Methods for Engineers*. New York: McGraw-Hill.
- [38] Matlab R2010b Enterprise.