



Technovations of Electrical Engineering in Green Energy System

Research Article

(2024) 3(3):27-42

Parameters Estimation of Photovoltaic Cell Using Cuckoo Search Algorithm

Vahdat Nazerian¹, Assistant Professor, Mehran Hosseinzadeh Dizaj², PhD Student,
Alireza Salehi³, Professor

¹ Department of Electrical Engineering, University of Mazandaran, Babolsar, Iran

² Department of Electrical Engineering, Central Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

³ Department of Electrical Engineering, K.N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran

Abstract:

In this paper, an electrical equivalent circuit model based on the photovoltaic effect has been presented with the studies done on the simulation of the solar energy system. This linear model, which consists of two diodes, shows the behavior of a solar cell to produce electricity. We have done the desired simulations using MATLAB software. Our goal in this research is to calculate the minimum error value for the unknown parameters of the circuit, which is obtained by the root-mean-square error (RMSE). In order to accurately and reliably determine the parameters of the double-diode model, an optimization method based on collective intelligence called the Cuckoo search algorithm is presented in this article. According to the desired model that we intend to study with the proposed algorithm, to obtain the minimum error value, we calculate the unknown parameters of the circuit and compare them with other methods. The results show that the RMSE value of the proposed algorithm with the initial population value of 50 and the number of iteration rounds of 1000 is equal to 3.56×10^{-2} , which provides better results than other algorithms. The average execution time of this algorithm is 15.81 milliseconds per every iteration round.

Keywords: Photovoltaic cell, Parameters estimation, Cuckoo search algorithm, Root-mean-square error.

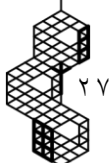
Received: 13 November 2023

Revised: 04 January 2024

Accepted: 16 March 2024

Corresponding Author: Dr. Vahdat Nazerian, v.nazerian@umz.ac.ir

DOI: 10.30486/TEEGES.2024.904838



فناوری‌های نوین مهندسی برق در سیستم انرژی سبز

تخمین پارامترهای سلول فتوولتائیک با استفاده از الگوریتم فرا-ابتکاری جستجوی فاخته

وحدت ناظریان^۱، استادیار، مهران حسین زاده دیزج^۲، دانشجوی دکتری، علیرضا صالحی^۳، استاد

۱- دانشکده مهندسی برق، دانشگاه مازندران، بابلسر، ایران

۲- دانشکده مهندسی برق، واحد تهران مرکز، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

۳- دانشکده مهندسی برق، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران

چکیده: در این مقاله یک مدار معادل الکتریکی بر اساس اثر فتوولتائیک با مطالعات انجام شده بر روی شبیه سازی سیستم انرژی خورشیدی ارائه شده است. این مدل خطی که از دو دیود تشکیل شده است، نحوه رفتار سلول خورشیدی جهت تولید برق را نشان می‌دهد. با استفاده از نرم افزار MATLAB شبیه سازی های مورد نظر را انجام داده ایم. هدف ما در این تحقیق محاسبه ی حداقل مقدار خطا برای پارامترهای مجهول مدار می‌باشد که این خطا به واسطه ی جذر میانگین مربعات خطاها (RMSE) بدست می‌آید. برای تعیین دقیق و قابل اعتماد پارامترهای مدل دو دیودی، یک روش بهینه سازی مبتنی بر هوش جمعی به نام الگوریتم جستجوی فاخته در این مقاله ارائه شده است. با توجه به مدل مورد نظر که قصد مطالعه آن را با الگوریتم پیشنهادی داریم، برای حصول حداقل مقدار خطا، پارامترهای مجهول مدار را بدست آورده و با روش های دیگر مقایسه می‌کنیم. نتایج نشان می‌دهد مقدار RMSE الگوریتم پیشنهادی با مقدار جمعیت اولیه ۵۰ و تعداد دور تکرار ۱۰۰۰، برابر با $10^{-2} \times 3/56$ است که نتیجه بهتری نسبت به سایر الگوریتم ها در اختیار ما قرار می‌دهد. متوسط زمان اجرای این الگوریتم ۱۵/۸۱ میلی ثانیه در هر بار اجرا می‌باشد.

واژه های کلیدی: سلول فتوولتائیک، تخمین پارامترها، الگوریتم جستجوی فاخته، جذر میانگین مربعات خطاها (RMSE).

تاریخ ارسال مقاله: ۱۴۰۲/۰۸/۲۲

تاریخ بازنگری مقاله: ۱۴۰۲/۱۰/۱۴

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۲/۱۲/۲۶

نویسنده ی مسئول: دکتر وحدت ناظریان، v.nazerian@umz.ac.ir

DOI: 10.30486/TEEGES.2024.904838



تغییرات آب و هوایی، آلودگی محیط زیست و تخریب زمین ناشی از سوخت های فسیلی چالش های مهمی هستند که اهمیت استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر را برجسته می کنند. انرژی خورشیدی یکی از امیدوار کننده ترین منابع جایگزین است زیرا قابل تجدید، ایمن و تمیز است. بنابراین، استفاده از انرژی خورشیدی از طریق سیستم های فتوولتائیک^۱ (PV) مانند سلول خورشیدی^۲ در سال های اخیر به سرعت در حال افزایش است [۱،۲]. برای سیستم های PV مهم است که رفتار واقعی این آرایه ها در عمل با استفاده از مدل دقیقی مبتنی بر داده های جریان-ولتاژ اندازه گیری شده مورد ارزیابی قرار گیرد. تعدادی از مدل های PV توسعه داده شده و موفق به شبیه سازی رفتار سیستم های PV شده اند. در میان آنها، دو مدل مداری پارامتری توزیع شده به طور گسترده ای در عمل استفاده می شود، یکی مدل تک دیودی و دیگری مدل دو دیودی [۳-۶]. دقت مدل های PV عمدتاً به پارامترهای مدل آنها بستگی دارد که معمولاً در دسترس نیستند. پارامترهای مدل نیز با شرایط عملیاتی (تابش و درجه حرارت) دستگاه PV تغییر می کنند. از این رو ضروری است که پارامترهای مدل PV را بر اساس داده های جریان-ولتاژ تجربی شناسایی کنیم. لذا در سال های اخیر توسعه روش های شناسایی پارامترهای مختلف اهمیت ویژه ای یافته است [۷-۱۱]. در ادامه به معرفی برخی از این تحقیقات می پردازیم.

در مرجع [۱۲] تحت عنوان بهینه سازی پارامترهای مدل تک دیودی سلول خورشیدی فتوولتائیک با استفاده از الگوریتم ممتاز Memetic، یک شیوه جدید برای تعیین مقادیر پارامترهای مدار معادل تک دیودی سلول خورشیدی پیشنهاد شده است. این الگوریتم Memetic که تکنیک های مبتنی بر گرادیان (تدریجی) و فرا ابتکاری را در هم ادغام می کند یک عملکرد نسبتاً خوبی در جستجوی محلی^۳ و سراسری^۴ از خود نشان می دهد. از این شیوه ممتاز آنها توانسته اند دقت تعیین پارامترهای سلول خورشیدی را در مقایسه با سایر الگوریتم ها ساده بهبود بخشند هر چند مدت زمان انجام محاسبات در این روش قابل ملاحظه است.

در مرجع [۱۳] تحت عنوان شبیه سازی و مدل سازی ماژول فتوولتائیک در رژیم های عملکرد مختلف، اظهار شده است تحقیقات مدرن بر روی منابع انرژی تجدید پذیر از قبیل انرژی خورشیدی تمرکز خواهد داشت. در این تحقیق یک مدل و نحوه عملکرد سلول فتوولتائیک ارائه گردیده و کد شبیه سازی در نرم افزار MATLAB نوشته شده است. نتایج نشان داده است افزایش تابش خورشید و ضریب ایده آلی دیودها منجر به افزایش توان خروجی ماژول^۵ PV گردیده است، اما افزایش دمای سلول و جریان اشباع معکوس دیودها منجر به کاهش توان شده است.

در مرجع [۱۴] تحت عنوان تخمین پارامترهای سلول های فتوولتائیک با استفاده از بهینه سازی ترکیبی ازدحام جمعیت و ترمیم حرارتی شبیه سازی شده نشان داده شده است که بهینه سازی دقیق پارامترهای سلول های خورشیدی یک امر حیاتی جهت پیش بینی و ارزیابی راندمان سیستم های فتوولتائیک می باشد. در تخمین مدل برای آنکه با دقت مناسبی مشخصه I-V^۶ اندازه گیری شده آزمایشگاهی را دنبال کند مسئله تخمین پارامتر به یک مسئله بهینه سازی و یک الگوریتم بهینه سازی فرا ابتکاری جهت حل آن تبدیل می شود. این تحقیق یک روش جدید بهینه سازی را با استفاده از ترکیب الگوریتم بهینه سازی ازدحام جمعیت و ترمیم حرارتی شبیه سازی شده پیشنهاد می دهد تا بتوان پارامترهای سلول خورشیدی را در مدل های تک دیودی و دو دیودی به کمک داده های I-V^۷ اندازه گیری شده آزمایشگاهی تخمین بزند هر چند از آنجایی که مدل های غیر خطی استفاده شده است موجب گردیده تا اجرای برنامه نسبتاً طولانی باشد. در مرجع [۱۵] تحت عنوان تخمین پارامتر مدل های فتوولتائیک با استفاده از جستجوی فاخته^۸، نشان داده شده است روشهای مرسوم جهت تخمین پارامترهای ماژول های فتوولتائیک برای آنکه دقت خوبی داشته باشند ناکارآمد هستند، لذا الگوریتم های فرا ابتکاری توجه بیشتری را در یک دهه گذشته در این زمینه به خود جلب کرده اند. در این مقاله تخمین پارامترها بر اساس جستجوی فاخته پیشنهاد شده است تا پارامترهای تجاری را PV مدل های تک دیودی برای سلول های بدست بیآوریم. نتایج شبیه سازی و داده های آزمایشگاهی نمایانگر آن است که این الگوریتم قادر است تا تمام پارامترها را با دقت بسیار خوبی بدست آورد بطوریکه خطای شبیه سازی حداقل مقدار خود را مقدار داشته باشد. در ادامه، روش پیشنهادی با سایر الگوریتم های بکار رفته مورد مقایسه قرار گرفته است و نشان داده شده است که مدل غیرخطی در این تحقیق موجب شده تا سرعت اجرای برنامه به نسبت پایین باشد. لذا با توجه به ضرورت تحقیقات انجام شده برای کاهش زمان انجام محاسبات و در عین حال داشتن حداقل خطای شبیه سازی، ما در این مقاله بر روی بهینه سازی پارامترهای مدل خطی دو دیودی سلول خورشیدی فتوولتائیک با استفاده از الگوریتم فراابتکاری جستجوی فاخته کار



کرده ایم که نشان می دهد به نسبت سایر الگوریتم ها هم از دقت نسبتاً خوبی برخوردار است و هم در عین حال سرعت تخمین پارامترهای آن بسیار بالا است که در ادامه به جزئیات آن اشاره خواهد شد.

۲- مدار معادل سلول خورشیدی فتوولتائیک

داشتن مدار معادل برای سلول های خورشیدی بسیار حیاتی بنظر می رسد تا بتوان در شرایط مختلف کاری رفتار سلول را مورد ارزیابی قرار داد. اینگونه اطلاعات معمولاً در دیتاشیت کارخانه تولیدی بصورت دقیق در اختیار کاربر قرار داده نمی شود، لذا در این پژوهش به معرفی و ارائه مدل برای یک سلول PV و بررسی تطبیق مشخصه های جریان-ولتاژ I-V و توان-ولتاژ P-V آن با مشخصه های آزمایشگاهی سلول موردنظر با استفاده از تعیین بهینه پارامترهای مدار معادل دو دیودی می پردازیم.

۲-۱- مدل دو دیودی تکه ای - پاره خطی

برای این منظور ابتدا مقادیر اندازه گیری شده جریان ها و ولتاژهای آزمایشگاهی برای یک سلول خورشیدی نمونه به شرح جدول (۱) آورده شده است [۱۶].

جدول (۱): مقادیر اندازه گیری شده آزمایشگاهی

پارامتر	مقادیر آزمایشگاهی
N_s	۱
N_p	۱
V_{arr}	[۰/۰۰۵۷ ۰/۰۶۴۶ ۰/۱۱۸۵ ۰/۱۶۷۸ ۰/۲۱۳۲ ۰/۲۵۴۵ ۰/۲۹۲۴ ۰/۳۲۶۹ ۰/۳۵۸۵ ۰/۳۸۷۳ ۰/۴۱۳۷ ۰/۴۳۷۳ ۰/۴۵۹۰ ۰/۴۷۸۴ ۰/۴۹۶۰ ۰/۵۱۱۹ ۰/۵۲۶۵ ۰/۵۳۹۸ ۰/۵۵۲۱ ۰/۵۶۳۳ ۰/۵۷۳۶ ۰/۵۸۳۳ ۰/۵۹۰۰]
I_{Lab_var}	[۰/۱۷۶۰۵ ۰/۱۷۶۰۰ ۰/۱۷۵۹۰ ۰/۱۷۵۷۰ ۰/۱۷۵۶۵ ۰/۱۷۵۵۵ ۰/۱۷۵۴۰ ۰/۱۷۴۶۵ ۰/۱۷۵۰۵ ۰/۱۷۳۸۵ ۰/۱۷۲۸۰ ۰/۱۷۰۶۵ ۰/۱۶۷۵۵ ۰/۱۶۳۲۰ ۰/۱۵۷۳۰ ۰/۱۴۹۹۰ ۰/۱۴۱۳۰ ۰/۳۱۶۵ ۰/۲۱۲۰ ۰/۱۰۳۵ -۰/۱۰۱۰ -۰/۱۲۳۰ -۰/۲۱۰۰]

که در آن:

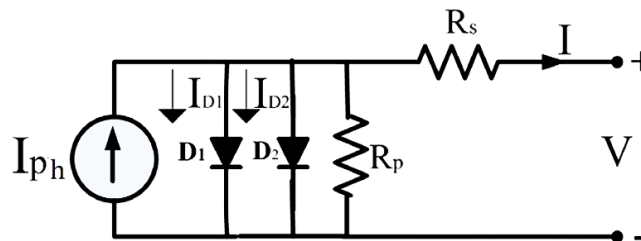
N_s : تعداد سلول های فتوولتائیک که به صورت متوالی در کنار هم قرار می گیرند.

N_p : تعداد سلول های فتوولتائیک که به صورت موازی در کنار هم قرار می گیرند.

V_{arr} : مجموعه ولتاژهای آزمایشگاهی

I_{Lab_var} : مجموعه جریان های آزمایشگاهی به ازای ولتاژهای مختلف

مدلی که در این تحقیق مورد استفاده قرار می گیرد مدل استاندارد دو دیودی تکه ای-پاره خطی است که در شکل (۱) نمایش داده شده است [۱۷].



شکل (۱): مدل دو دیودی تکه ای-پاره خطی

تحت تابش نور، یک سلول خورشیدی به عنوان یک مدل با منبع جریان تولید شده به وسیله نور (I_{ph}) به موازات دو دیود ساخته شده است. اندازه ی جریان منبع جریان به نسبت مستقیم وابسته به نور تابیده به سلول فتوولتائیک است که به صورت یک ضریب خطی با نور تغییر می کند. در عمل یک مقاومت موازی R_p ناشی از اتصال موازی برای محاسبه مسیر جریان جزئی اتصال کوتاه در نزدیکی



لبه‌های سلول تعبیه شده است. علاوه بر این، یک مقاومت سری^۱ (R_s) با عناصر موازی سلول با توجه به اتصالات فلزی سلول‌های خورشیدی و میزان مقاومت ماده نیمه هادی بسته شده است [۱۷].

۲-۲- روابط ریاضی حاکم

همان طور که در بخش قبل اشاره شد با توجه به مدل دو دیودی تکه ای-پاره خطی ارائه شده در شکل (۱)، روابط ریاضی حاکم در این مدل مطابق معادلات (۱) تا (۸) به شرح زیر خواهد بود [۱۷]:

$$I_{ph} = \left(1 + \frac{R_s}{R_p}\right) \times I_{sc} \quad (1)$$

که پارامترهای آن مطابق جدول (۲) ارائه می‌گردد.

جدول (۲): واژه نامه

نماد	توضیح
I_{sc}	جریان اتصال کوتاه خروجی
I_{ph}	جریان فتوولتائیک سلول خورشیدی
R_s	مقاومت سری سلول
R_p	مقاومت موازی سلول
V_{mp}	ولتاژ سلول در حداکثر توان انتقالی به بار خروجی
I_{mp}	جریان سلول در حداکثر توان انتقالی به بار خروجی
r_{d1}	مقاومت دینامیکی دیود اول در مدار معادل
V_{d1}	ولتاژ دیود اول در مدار معادل
V_{oc}	ولتاژ مدار باز خروجی
r_{d2}	مقاومت دینامیکی دیود اول در مدار معادل
V_{d2}	ولتاژ دیود دوم در مدار معادل
N_s	تعداد سلول‌های فتوولتائیک متوالی

به این ترتیب مقدار r_{d1} مقاومت دینامیکی دیود اول در مدار معادل شکل (۱) است که از معادله (۲) بدست می‌آید:

$$r_{d1} = \frac{R_p \times (V_{mp} - R_s \times I_{mp} \times N_s)}{R_p \times I_{mp} \times N_s - V_{mp} + R_s \times I_{mp} \times N_s} \quad (2)$$

و در آن V_{mp} و I_{mp} به ترتیب ولتاژ و جریان سلول در حداکثر توان انتقال یافته به بار خروجی هستند. V_{d1} با داشتن سایر مقادیر مطابق با معادله (۳) بدست خواهد آمد.

$$V_{d1} = r_{d1} \times \left(I_{mp} + \frac{V_{mp} + I_{mp} \times R_s}{N_s} - I_{ph} \right) + \frac{V_{mp}}{N_s} + I_{mp} \times R_s \quad (3)$$

حال با داشتن سایر پارامترها، r_{d2} مطابق با معادله (۴) بدست خواهد آمد.

$$r_{d2} = \frac{\frac{V_{oc}}{N_s} \times r_{d1} \times R_p - V_{d2} \times r_{d1} \times R_p}{I_{ph} \times r_{d1} \times R_p - \left(\frac{V_{oc}}{N_s} \times R_p + V_{d1} \times R_p \right) - \frac{V_{oc}}{N_s} \times r_{d1}} \quad (4)$$

بنابراین جریان خروجی سلول خورشیدی مطابق با معادله (۵) خواهد بود.

$$I = \frac{I_{ph} \times R_p}{R_s + R_p} \quad (5)$$

به همین ترتیب ولتاژ خروجی سلول خورشیدی مطابق با معادله (۶) خواهد بود.

$$V = \frac{N_s \times \left(I_{ph} + \frac{V_{d2} + V_{d1}}{r_{d2} + r_{d1}} \right)}{\frac{1}{r_{d1}} + \frac{1}{r_{d2}} + \frac{1}{R_p}} \quad (6)$$



از سوی دیگر مقدار V_{mp} که برای محاسبه پارامترهای مجهول مورد نیاز بود از معادله (۷) بدست می‌آید.

$$V_{mp} = N_s \frac{(I_{ph} \times r_{d1} \times R_p + V_{d1} \times R_p)}{2 \times (r_{d1} + R_p)} \quad (7)$$

و به همین ترتیب I_{mp} نیز از معادله (۸) محاسبه خواهد شد.

$$I_{mp} = \frac{I_{ph} \times r_{d1} \times R_p + V_{d1} \times R_p - N_s \times (I_{ph} \times r_{d1} \times R_p + V_{d1} \times R_p)}{\frac{2 \times \frac{r_{d1} + R_p}{N_s} \times (r_{d1} + R_p)}{R_p \times r_{d1} + R_p \times R_s + R_s \times r_{d1}}} \quad (8)$$

با توجه به معادلات بالا در این مدل ما ۳ پارامتر مجهول داریم که شامل R_s , R_p , V_{d2} می‌شود. ۴ پارامتر دیگر با تعیین مقدار این پارامترها مطابق با معادلات (۱) تا (۴) بدست می‌آیند. مرزهای بالایی و پایینی این ۳ پارامتر از یک سو با توجه به مقادیر جریان-ولتاژ آزمایشگاهی مطابق با جدول (۱) که شبیه سازیها بر اساس آن صورت گرفته است مشخص می‌گردد و از سوی دیگر با توجه به اینکه در اجزای متعدد برنامه که انجام شده است مقادیر پارامترهای مجهول R_s و R_p و V_{d2} در محدوده ای مشخصی تغییر می‌کنند لذا آنها را به صورت زیر تعریف می‌کنیم تا جستجوهای بهینه در این محدوده از پارامترهای موردنظر صورت گیرد [۱۸]:

$$R_s = [0.0000001, 1]$$

$$R_p = [1, 1000]$$

$$V_{d2} = [0.49, 0.605]$$

به این ترتیب مقادیر مجهول به شرح زیر می‌باشند:

$$R_s, R_p, I_{ph}, r_{d1}, V_{d1}, r_{d2}, V_{d2}$$

۲-۳- معرفی تابع هدف

جهت بهینه سازی با الگوریتم‌های فرا ابتکاری ابتدا باید تابع هدف را تعریف کنیم. تابع هدف برای ۷ پارامتر مدار سلول خورشیدی دو دیودی را به صورت تابعی از I و V تعریف کرده ایم. در اینجا تابع هزینه به صورت جذر میانگین مربعات خطاها (RMSE) در معادله (۹) آورده شده است [۱۸].

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (I_i - I(V_i))^2} \quad (9)$$

$$= \sqrt{\frac{1}{n} [(I_1 - I'(V_1))^2 + (I_2 - I'(V_2))^2 + \dots + (I_{m+1} - I'(V_{m+1}))^2 + \dots + (I_n - I'(V_n))^2]}$$

که در آن N تعداد جریان‌های اندازه گیری شده، I_i جریان آزمایشگاهی و $I(V_i)$ جریان بدست آمده توسط الگوریتم می‌باشد. در حالت کلی به ازای هر سری از مقادیر پارامترهای سلول خورشیدی که RMSE کمتری داشته باشد می‌توان گفت مقدار ولتاژ و جریان بدست آمده از الگوریتم به مقدار ولتاژ و جریان ترمینال سلول خورشیدی که از آزمایش بدست آمده نزدیکتر است [۱۸]. پس معادله (۹) می‌تواند یک تابع هدف مورد قبول باشد و هدف الگوریتم کمینه کردن این تابع است. در واقع تابع RMSE مقدار خطای محاسباتی بین نتایج عملی و نتایج بدست آمده از الگوریتم را نشان می‌دهد و مقادیر بهینه برای پارامترهای فوق در مدل سازی سلول خورشیدی وقتی اتفاق می‌افتد که مقدار RMSE مینیمم باشد.

بنابراین در حالت ایده آل ۷ پارامتر مجهول را با استفاده از معادلات فوق و تابع RMSE بدست آورده و تلاش می‌کنیم تا بهینه ترین حالت برای این پژوهش بدست آید. RMSE را به عنوان تابع fitness برای الگوریتم بهینه سازی^{۱۱} در نظر می‌گیریم و با استفاده از الگوریتم موردنظر سعی در کمینه کردن مقدار RMSE داریم [۱۷، ۱۸]. برای این منظور در نرم افزار MATLAB معادلات بالا و RMSE را در یک تابع^{۱۲} می‌نویسیم. پس از آن کد مربوط به هر الگوریتم را در یک script جدا می‌نویسیم و در این scriptها تابع را به عنوان تابع fitness فراخوانی می‌کنیم. پارامترهای تابع همان R_s, R_p, V_{d2} است. همه الگوریتم‌ها مقدار اولیه تصادفی که در مرز پایین و بالای هر پارامتر صدق کند برای این ۳ پارامتر در نظر می‌گیرند. پس از اجرا مقادیر هر ۷ پارامتر سلول PV را نمایش داده نمودار I-V, P-V مدار را نیز رسم می‌کنیم.



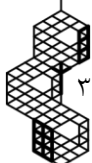
۳- الگوریتم پیشنهادی Cuckoo

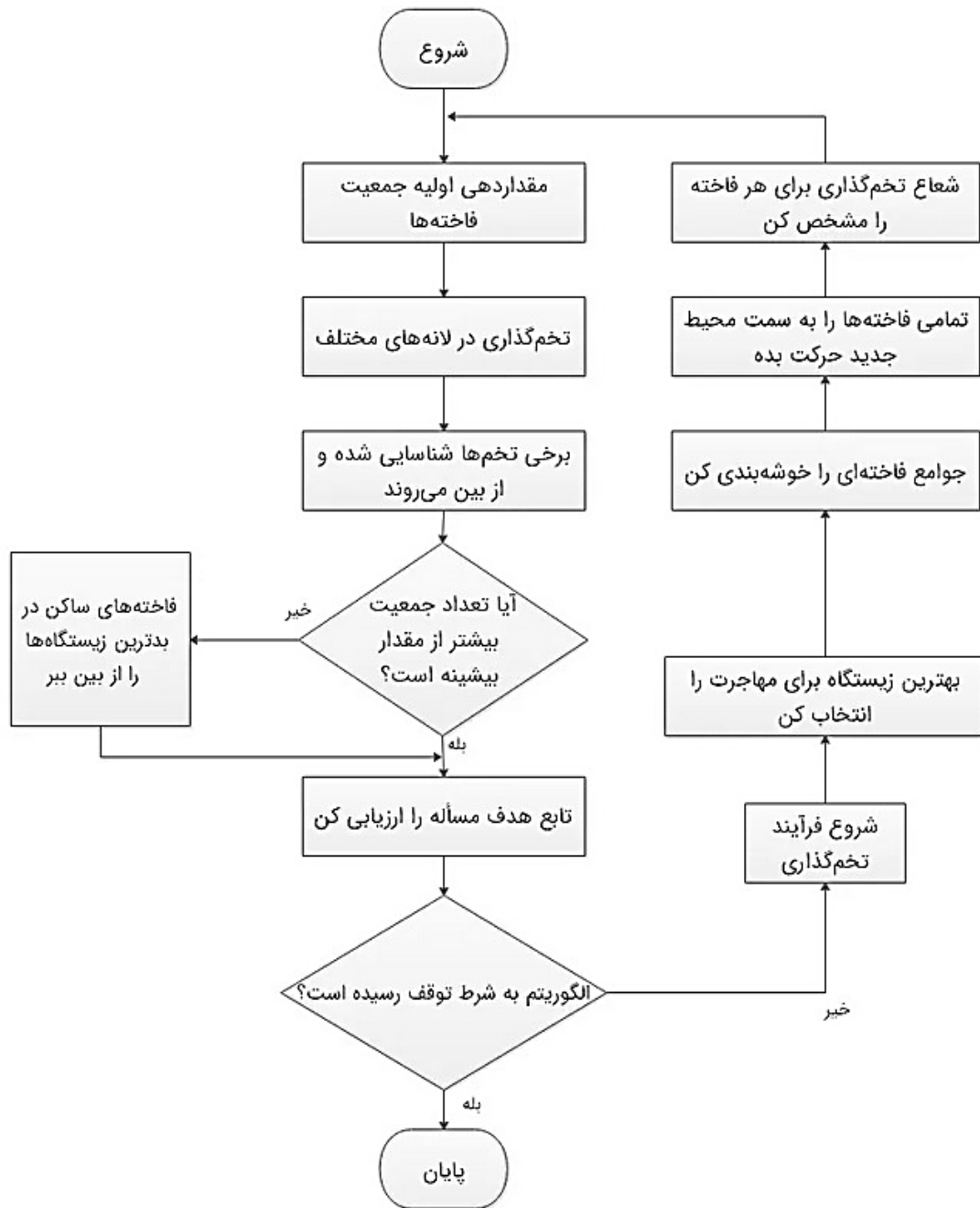
این الگوریتم یکی از جدیدترین و قوی ترین روش های بهینه سازی تکاملی می باشد که تاکنون معرفی شده است. الگوریتم فاخته الهام گرفته از روش زندگی پرنده ای به نام فاخته است که در سال ۲۰۰۹ توسعه یافته است [۱۹]. الگوریتم فاخته بر اساس زندگی گونه ای از فاخته است. این الگوریتم توسط پرواز Levy به جای پیاده روی ایزوتروپیک^{۱۳} ساده توسعه یافته است. مرجع [۲۰] در سال ۲۰۱۱ الگوریتم فاخته را به طور کامل با جزئیات بیشتر مورد بررسی قرار داده است. همانند سایر الگوریتم های تکاملی، الگوریتم بهینه سازی فاخته هم با یک جمعیت اولیه کار خود را شروع می کند. جمعیتی که متشکل از فاخته هاست. این جمعیت از فاخته ها تعدادی تخم دارند که آنها را در لانه تعدادی پرنده ی میزبان خواهند گذاشت. تعدادی از این تخم ها که شباهت بیشتری به تخم های پرنده میزبان دارند شانس بیشتری برای رشد و تبدیل شدن به فاخته بالغ خواهند داشت. سایر تخم ها توسط پرنده میزبان شناسایی شده و از بین می روند. میزان تخم های رشد کرده، مناسب بودن لانه های آن منطقه را نشان می دهند. هرچه تخم های بیشتری در یک ناحیه قادر به زیست باشند و نجات یابند به همان اندازه سود (تمایل) بیشتری به آن منطقه اختصاص می یابد. بنابراین موقعیتی که در آن بیشترین تعداد تخم ها نجات یابند پارامتری خواهد بود که الگوریتم فاخته قصد بهینه سازی آن را دارد.

فاخته ها برای بیشینه کردن نجات تخم های خود به دنبال بهترین منطقه می گردند. پس از آنکه جوجه ها از تخم درآمدند و به فاخته بالغ تبدیل شدند، جوامع و گروه هایی تشکیل می دهند. هر گروه منطقه سکونت خود را برای زیست دارد. بهترین منطقه سکونت تمام گروه ها مقصد بعدی فاخته ها در سایر گروه ها خواهد بود. تمام گروه ها به سمت بهترین منطقه موجود فعلی مهاجرت می کنند. هر گروه در منطقه ای نزدیک بهترین موقعیت فعلی ساکن می شود. با در نظر گرفتن تعداد تخمی که هر فاخته خواهد گذاشت و همچنین فاصله فاخته ها از منطقه بهینه فعلی برای سکونت تعدادی شعاع تخم گذاری محاسبه شده و شکل می گیرد. سپس فاخته ها شروع به تخم گذاری تصادفی در لانه هایی داخل شعاع تخم گذاری خود می کنند. این فرآیند تا رسیدن به بهترین محل برای تخم گذاری (منطقه با بیشترین سود) ادامه می یابد. این محل بهینه جایی است که بیشترین تعداد فاخته ها در آن گرد می آیند [۲۰]. جهت یافتن بهترین مقادیر برای پارامترهای مجهول در حل مسئله بهینه سازی، شبه کد الگوریتم فاخته در ادامه آمده است:

- زیستگاه های فاخته را با چند نقطه تصادفی در تابع سود، راه اندازی کنید
- به هر فاخته مقداری تخم مرغ اختصاص دهید
- برای هر فاخته حداکثر دامنه تخم گذاری تعریف کنید
- اجازه دهید فاخته در داخل دامنه تخم گذاری مربوطه خود تخم بگذارد
- آن تخم هایی را که توسط پرندگان میزبان شناسایی می شوند، بکشید
- اجازه دهید تخم ها از تخم بیرون بیایند و جوجه ها رشد کنند
- زیستگاه هر فاخته تازه رشد کرده را ارزیابی کنید
- حداکثر تعداد فاخته ها را در محیط محدود کنید و کسانی که در بدترین زیستگاه ها زندگی می کنند را بکشید
- فاخته را خوشه بندی کنید و بهترین گروه را بیابید و زیستگاه هدف را انتخاب کنید
- اجازه دهید جمعیت فاخته جدید به سمت زیستگاه هدف مهاجرت کنند
- اگر شرط توقف برآورده شد توقف کنید، اگر نه به ۲ بروید

در شکل (۲) فلوچارت الگوریتم بهینه سازی جستجوی فاخته نشان داده شده است.





شکل (۲): فلوجارت الگوریتم Cuckoo [۲۰].

روند یافتن پارامترهای مجهول مدار معادل به این صورت است که ابتدا منحنی‌های جریان-ولتاژ و توان-ولتاژ سلول مورد نظر را تحت شرایط آزمایشگاهی مشخص (اعم از تابش، دما و ...) استخراج می‌کنیم، سپس به سراغ الگوریتم بهینه‌سازی مورد نظر رفته و برای پارامترهای مدار معادل دو دیودی خطی محدوده‌ای را تعریف می‌نماییم. الگوریتم مورد نظر جریان‌ها را با استفاده از روابط تعریف شده بدست می‌آورد و در تابع هدف قرار می‌دهد. تابع هدف یک عملیات ریاضی مشخصی را بین داده‌های آزمایشگاهی و داده‌های الگوریتمی اعمال کرده و یک مقدار عددی حاصل می‌شود. این فرآیند آن قدر ادامه می‌یابد تا عدد بدست آمده از تابع هدف، کوچکترین مقدار را داشته باشد. این مقدار پاسخ نهایی ما خواهد بود و پارامترهایی که این عدد را تولید کرده‌اند، مشخصه‌های مدار معادل دو دیودی خطی ما هستند. در اینجا به بیان روندنمای الگوریتم Cuckoo جهت استخراج بهینه پارامترهای مدار معادل دو دیودی خطی سلول خورشیدی فتوولتائیک با استفاده از تابع هدف می‌پردازیم:

۱. مرحله شروع

- تعداد مشخصی از فاخته‌های مجاز (Cuckoos) تولید می‌شوند که هر کدام برابر با یک پارامتر مدار است
- مقادیر اولیه برای پارامترهای مدار به صورت تصادفی انتخاب می‌شوند.

۲. محاسبه تابع هدف

- برای هر پارامتر مدار، مقدار تابع هدف (مانند کارایی سلول خورشیدی یا تولید برق) محاسبه می‌شود
- این تابع هدف بر اساس معیارهای مشخصی تعریف می‌شود که بهینه‌سازی مسئله را تعیین می‌کند

۳. جستجوی فاخته‌ها

- هر فاخته (Cuckoo) بر اساس یک روند جستجوی تصادفی به یکی از پارامترهای مجاز مهاجرت می‌کند
- میزان مهاجرت فاخته‌ها به پارامترها معمولاً بر اساس قوانین جستجوی تصادفی مشخصی انجام می‌شود (مانند حرکت به صورت تصادفی با استفاده از تابع توزیع گاوسی)

۴. ارتقاء پارامترها

- بعد از مهاجرت فاخته‌ها، پارامترهای مدار با استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی (مانند روش گرادیانی) به‌روزرسانی می‌شوند
- این به‌روزرسانی براساس مقادیر به‌دست آمده از جستجوهای فاخته‌ها و تابع هدف انجام می‌شود

۵. ادامه فرآیند

- مراحل ۳ و ۴ تا زمانی که شرایط خاتمه‌یابی مشخصی (مانند تعداد تکرارها یا دستیابی به پاسخ بهینه) برآورده شود، تکرار می‌شوند
- در هر تکرار، فاخته‌ها بهترین پارامترها را به‌خاطر می‌سپارند و مقادیر بهتری برای پارامترهای مدار تولید می‌کنند

۶. پایان الگوریتم

- پس از خاتمه الگوریتم، بهترین پارامترهای مدار که موجب حاصل بهینه تابع هدف شده‌اند، به عنوان پاسخ الگوریتم انتخاب می‌شوند

در این روند، الگوریتم Cuckoo Search با استفاده از جستجوی فاخته‌ها و بهره‌گیری از تابع هدف مشخص، پارامترهای مدار معادل دو دیودی خطی سلول خورشیدی فتوولتائیک را بهینه می‌کند. با تکرار مراحل جستجو و ارتقاء پارامترها، الگوریتم بهبودهای پیوسته‌ای در بهینه‌سازی تابع هدف ایجاد خواهد کرد تا پاسخ بهینه را بیابد.

۴- نتایج و بحث

بعد از چندین بار اجرای الگوریتم Cuckoo نتایج حاصل از این الگوریتم با مقدار جمعیت اولیه $n_{pop} = 50$ و تغییر دور تکرار $iteration$ به مقادیر ۱۰، ۱۰۰، ۵۰۰، ۷۵۰ و ۱۰۰۰ در جدول (۳) نمایش داده شده است.

جدول (۳): نتایج مقادیر مجهول با $n_{pop} = 50$ الگوریتم Cuckoo

Time(ms)	RMSE	$V_{d2}(V)$	$r_{d2}(\Omega)$	$V_{d1}(V)$	$r_{d1}(\Omega)$	$I_{ph}(A)$	$R_p(\Omega)$	$R_s(\Omega)$	Iteration
۰/۵۶	۰/۱۹۷۳	۰/۴۳۱	۰/۲۵۶	۰/۲۶۱	۰/۶۴۷	۰/۶۵۴	۴۲۱/۵۲	۰/۰۵۸	۱۰
۵/۶۱	۰/۰۳۹۷	۰/۵۷۴	۰/۰۷۵	۰/۳۰۳	۰/۱۲۵	۰/۷۵۹	۶۱۳/۵۲	۰/۰۲۲	۱۰۰
۱۱/۲۶	۰/۰۳۸۴	۰/۶۰۲	۰/۰۱۹	۰/۴۷۱	۰/۰۶۹	۰/۷۹۸	۱۱/۱۳	۰/۱۰۲	۵۰۰
۱۳/۹۲	۰/۰۳۷۵	۰/۵۸۳	۰/۶۸۱	۰/۳۲۹	۰/۵۷۲	۰/۷۴۶	۷۴/۲۳	۰/۶۱۱	۷۵۰
۱۶/۴۲	۰/۰۳۵۹	۰/۵۹۴	۰/۰۸۹	۰/۳۹۵	۰/۱۷۸	۰/۷۸۲	۳۲/۴۱	۰/۰۲۷	۱۰۰۰



نتایج حاصل از این الگوریتم با مقدار دور تکرار $iteration = 1000$ و تغییر جمعیت^{۱۵} اولیه n_{pop} به مقادیر ۱۰، ۲۰، ۵۰ و ۱۰۰ در جدول (۴) نمایش داده شده است.

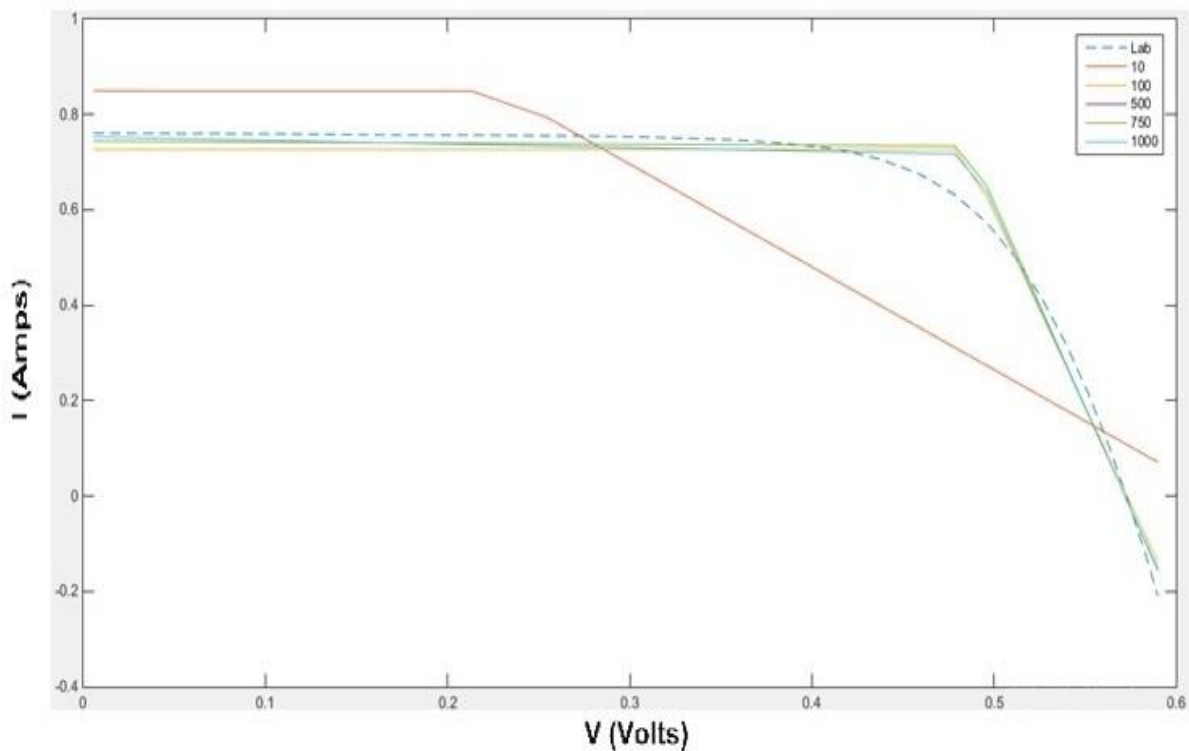
جدول (۴): نتایج مقادیر مجهول با $iteration = 1000$ الگوریتم Cuckoo

Time(ms)	RMSE	$V_{d2}(V)$	$r_{d2}(\Omega)$	$V_{d1}(V)$	$r_{d1}(\Omega)$	$I_{ph}(A)$	$R_p(\Omega)$	$R_s(\Omega)$	n_{pop}
۱/۴۶	۰/۲۰۳۱	۰/۲۳۷	۰/۶۲۹	۰/۲۱۲	۰/۸۳۴	۰/۷۰۴	۳۹۶/۵۱	۰/۰۳۵	۱۰
۵/۲۲	۰/۰۳۷۱	۰/۴۸۵	۰/۳۹۸	۰/۴۳۴	۰/۵۸۹	۰/۶۸۱	۲۴۵/۸۲	۰/۵۷۸	۲۰
۱۵/۸۱	۰/۰۳۵۶	۰/۴۷۱	۰/۰۷۵	۰/۴۵۲	۰/۱۲۷	۰/۷۵۲	۲۳/۵۸	۰/۲۰۳	۵۰
۳۶/۷۳	۰/۰۳۲۱	۰/۵۳۷	۰/۲۴۷	۰/۴۹۲	۰/۳۵۶	۰/۷۱۹	۱۵۲/۷۲	۰/۳۴۱	۱۰۰

زمان انجام محاسبات برای هر دور اجرا در این الگوریتم در مدل دو دیودی خطی با توجه به تغییرات جمعیت اولیه و تعداد دور تکرار مطابق با جدول های (۳) و (۴) نشان داده شده است. با توجه به اینکه لازم است تا پارامترهای مجهول با مقادیر جمعیت و تکرار بالاتر نیز مورد آزمایش قرار گیرند تا نتیجه ی بهتری حاصل شود، جمعیت اولیه به ۱۰۰ و تعداد دفعات تکرار به ۱۰۰۰ افزایش یافت و زمان انجام برنامه در هر دور تکرار تا حداکثر ۳۶/۷۳ میلی ثانیه به طول انجامید. مقدار RMSE این الگوریتم در این حالت برابر با $10^{-2} \times 3/21$ می باشد. در نهایت با توجه به زمان انجام الگوریتم و خطای کمتر مقادیر مجهول، این الگوریتم مقادیر بهینه تری را برای مدل پیشنهادی ارائه می دهد. پس از اجرای برنامه و نمایش مقادیر هر ۷ پارامتر سلول خورشیدی فتوولتائیک، در ادامه نمودارهای I-V و P-V مدار را نیز رسم می کنیم.

۱-۴- منحنی مشخصه I-V سلول خورشیدی

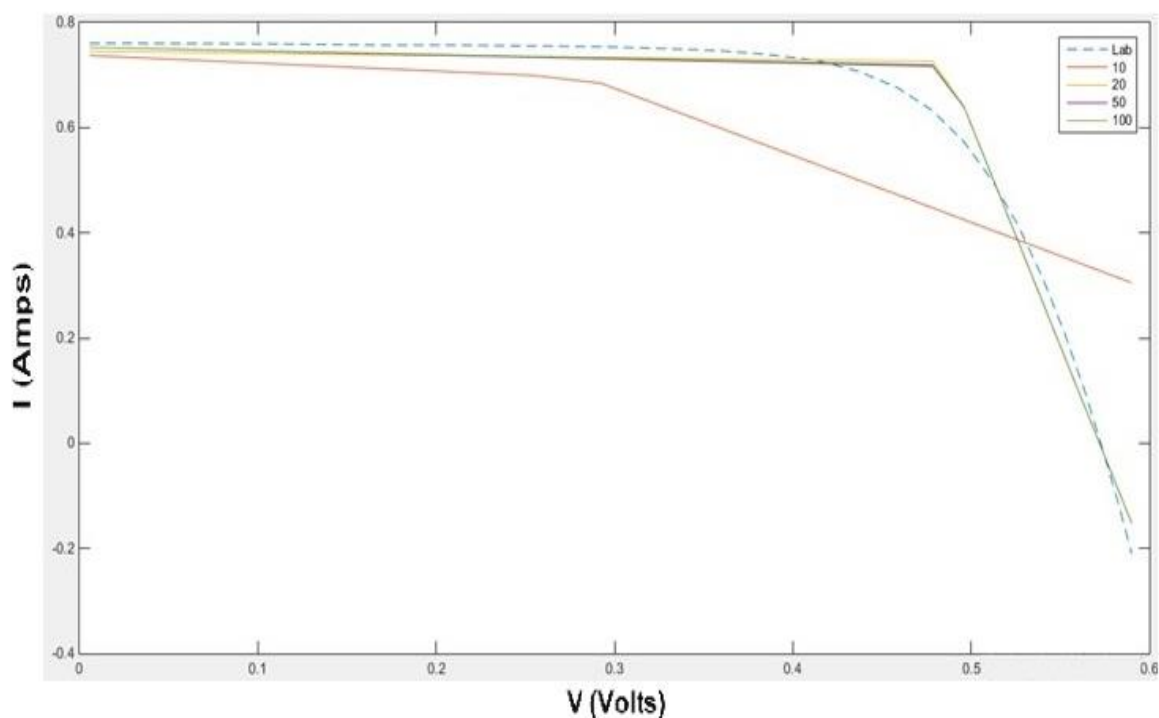
نمودار I-V حاصل از این الگوریتم با مقدار $n_{pop} = 50$ و تغییر $iteration$ به مقادیر ۱۰، ۱۰۰، ۵۰۰، ۷۵۰، ۱۰۰۰ در مدل دو دیودی پاره خطی در شکل (۳) نمایش داده شده است.



شکل (۳): نمودار I-V با $n_{pop} = 50$ الگوریتم Cuckoo



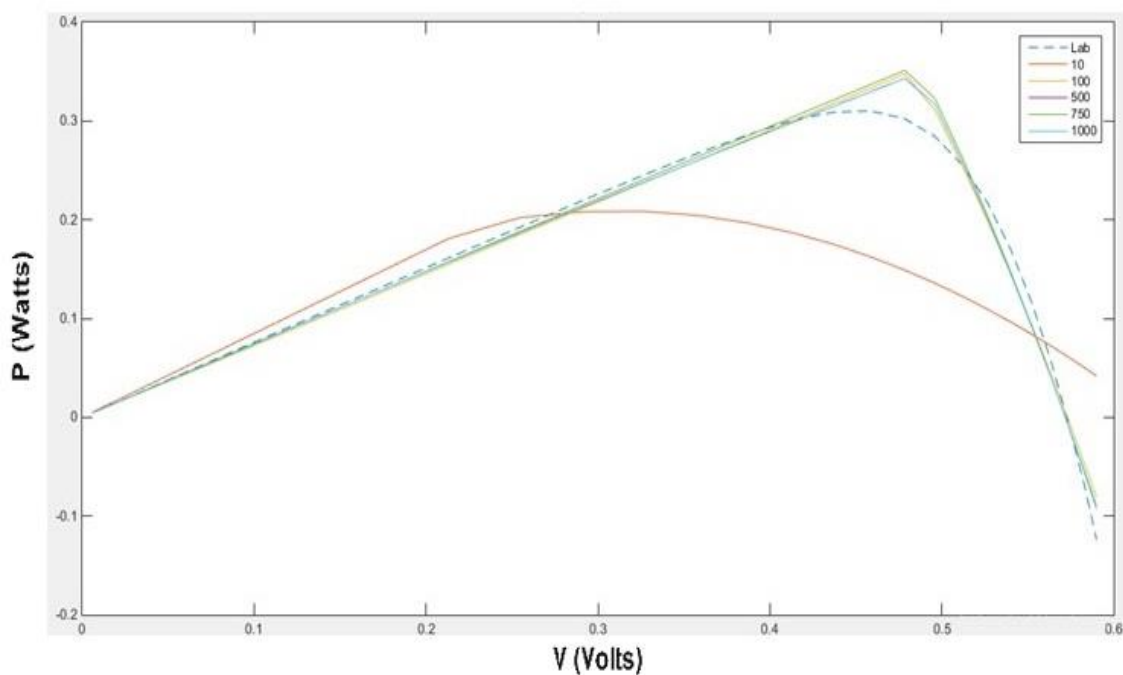
نمودار I-V حاصل از اين الگوريتم با مقدار $iteration = 1000$ و تغيير n_{pop} به مقادير 10، 20، 50، 100 در مدل دو ديودي پاره خطی در شكل (4) نمايش داده شده است.



شكل (4): نمودار I-V با $iteration = 1000$ الگوريتم Cuckoo

4-2- منحنی مشخصه P-V سلول خورشیدی

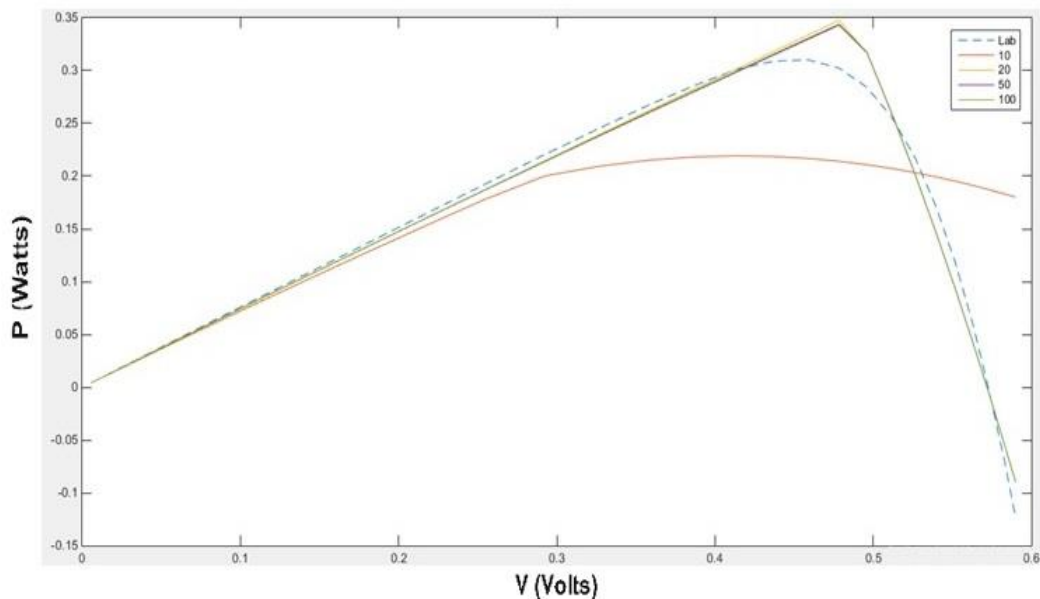
نمودار P-V حاصل از اين الگوريتم با مقدار $n_{pop} = 50$ و تغيير $iteration$ به مقادير 10، 100، 500، 750، 1000 در شكل (5) نمايش داده شده است.



شكل (5): نمودار P-V با $n_{pop} = 50$ الگوريتم Cuckoo



نمودار P-V حاصل از این الگوریتم با مقدار $\text{iteration} = 1000$ و تغییر n_{pop} به مقادیر 10، 20، 50، 100 در شکل (۶) نمایش داده شده است.



شکل (۶): نمودار P-V با $\text{iteration} = 1000$ الگوریتم Cuckoo

با توجه به جمعیت اولیه ۵۰ و تعداد تکرار ۱۰۰۰ زمان انجام برنامه در هر دور مدت ۱۵/۸۱ میلی ثانیه به طول انجامید. مقدار RMSE این الگوریتم با افزایش تعداد تکرار بهتر می‌شود. همچنین در تعداد تکرار بالا (حدود ۱۰۰۰ بار)، با افزایش جمعیت اولیه نتیجه مطلوب تری به دست می‌آید به طوری که با ۱۰۰۰ بار تکرار و جمعیت ۵۰، مقدار RMSE برابر با $10^{-2} \times 3/21$ می‌باشد. در نهایت با توجه به زمان انجام الگوریتم و خطای کمتر مقادیر مجهول، این الگوریتم مقادیر بهینه تری را نسبت به سایر الگوریتمها برای مدل پیشنهادی ارائه می‌دهد. الگوریتم Cuckoo از دقت نسبتاً خوبی برخوردار است. مقدار توان بیشینه در این الگوریتم ۰/۳۴۶ وات در ولتاژ V_{mp} برابر ۰/۴۸۲ ولت بدست آمده است. مقدار جریان I_{mp} برابر ۰/۷۱۸ آمپر در ولتاژ ماکزیمم توان محاسبه گردید. کمترین زمان اجرای این الگوریتم مطابق جدول ۲ برابر ۰/۵۶ میلی ثانیه در یک دور تکرار بوده است.

۴-۳- مقایسه نتایج با سایر الگوریتمها

در ادامه جهت ارزیابی عملکرد الگوریتم پیشنهادی، نتایج حاصل از الگوریتم Cuckoo را با تعدادی دیگر از الگوریتمهای قوی و کارآمد در تخمین پارامترهای مدار معادل سلول های خورشیدی مقایسه نمودیم تا ببینیم الگوریتم پیشنهادی چه نتیجه ی بهینه‌ای را در اختیار ما قرار می‌دهد. در جدول (۵) مقایسه RMSE الگوریتم پیشنهادی Cuckoo با این الگوریتمها به ازای n_{pop} و iteration های مختلف نشان داده شده است.

جدول (۵): مقایسه RMSE الگوریتم Cuckoo با برخی از الگوریتمهای کارآمد به ازای n_{pop} و iteration های مختلف

RMSE	n_{pop}	iteration	Algorithm
۰/۰۳۵۶	۵۰	۱۰۰۰	Cuckoo
۰/۸۹۵۲	۵۰	۱۰۰۰	HS [۲۱]
۰/۷۴۹۰	۱۰	۱۰۰۰	LCROA [۲۲]
۰/۰۹۸۶	۳۰	۲۰۰۰	EHHO [۲۳]
۰/۰۹۹۱	۳۰	۵۰۰۰	ABS0 [۲۴]
۰/۰۶۸۶	۵۰	۵۰۰۰	HFAPS [۲۵]

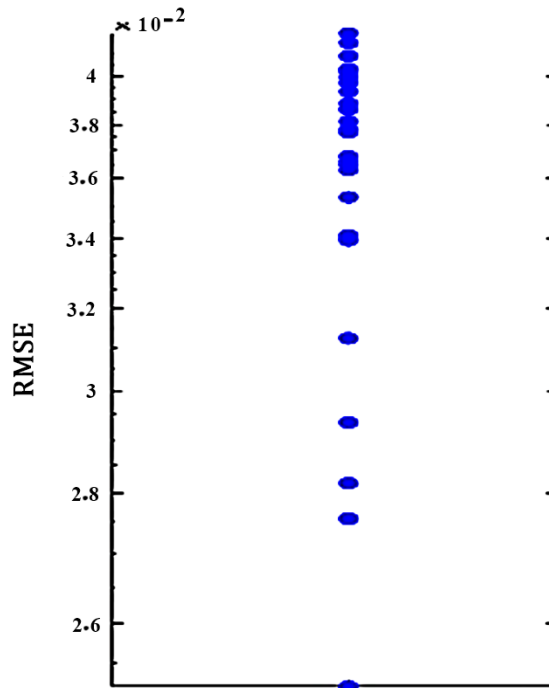




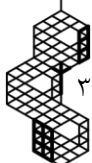
همانطور که در جدول (۵) مشاهده می‌شود RMSE الگوریتم Cuckoo مقدار $3/56 \times 10^{-2}$ بوده است که در مقایسه با الگوریتم‌های دیگر به مراتب کمتر است. این نشان می‌دهد الگوریتم Cuckoo نتیجه کاملاً بهتری را نسبت به سایر الگوریتم‌ها در اختیار ما قرار داده است و می‌تواند به عنوان الگوریتمی دقیق و کارآمد در تخمین پارامترهای مدار معادل خطی سلول‌های خورشیدی مورد استفاده قرار گیرد.

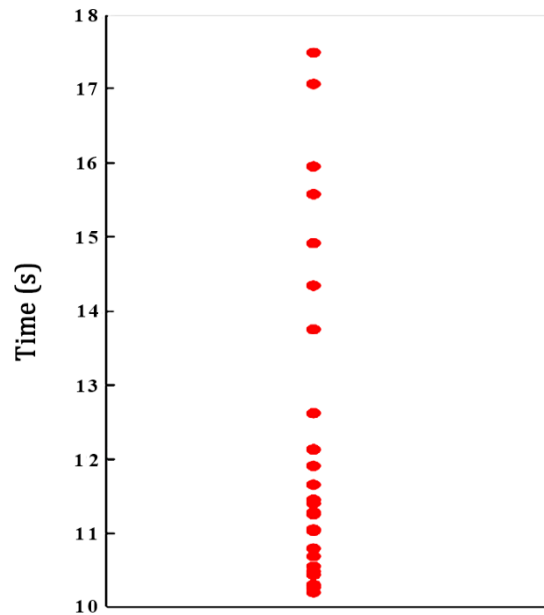
۴-۴- اعتبارسنجی الگوریتم پیشنهادی

برای اعتبارسنجی الگوریتم پیشنهادی، میزان پراکندگی RMSE و مدت زمان کل اجرای برنامه (Time) را در ۲۲ بار اجرای برنامه بدست آوردیم. شکل‌های (۷) و (۸) به ترتیب میزان پراکندگی RMSE و میزان پراکندگی Time را به ازای $\text{iteration} = 1000$ و $n_{\text{pop}} = 50$ نشان می‌دهند. با توجه به شکل (۷) مشاهده می‌شود اکثر مقادیر RMSE در ۲۲ بار اجرای برنامه در محدوده $3/6 \times 10^{-2}$ تا 4×10^{-2} قرار دارد. این مقادیر در مقایسه با نتایج سایر الگوریتم‌ها از برتری قابل ملاحظه‌ای برخوردار است. همچنین با مشاهده شکل (۸) می‌توان دریافت مدت زمان کل اجرای برنامه با الگوریتم پیشنهادی بیشتر در محدوده ۱۰ تا ۱۲ ثانیه است که نشان می‌دهد استفاده از مدل خطی دو دیودی در الگوریتم Cuckoo به نسبت سایر الگوریتم‌ها، موجب کاهش Time و افزایش سرعت محاسبات شده است.



شکل (۷): نمودار میزان پراکندگی RMSE الگوریتم Cuckoo به ازای $\text{iteration} = 1000$ و $n_{\text{pop}} = 50$





شکل (۸): نمودار میزان پراکندگی Time الگوریتم Cuckoo به ازای $iteration = 1000$ و $n_{pop} = 50$

۵- نتیجه گیری

در این مقاله به بهینه سازی پارامترهای سلول خورشیدی فتوولتائیک با استفاده از تکنیک فراابتکاری مبتنی بر هوش جمعی به نام جستجوی فاخته پرداخته ایم. برای پیاده سازی این سلول ها در محیط MATLAB از یک مدار معادل الکتریکی که اصولاً بر مبنای مدل دو دیودی خطی بوده استفاده کرده ایم. یک تابع هدف به نام RMSE تعریف کردیم که تقریباً در تمام حالات موجب بهینه سازی دقیق پارامترهای سلول خورشیدی گردید. شبیه سازی ها نشان می دهد بطور کلی با افزایش تعداد دور تکرار نتایج بهتری بدست می آید. همچنین در دور تکرار بالا با افزایش جمعیت اولیه نیز خروجی مطلوب تری بدست آمده است و منحنی مشخصه های I-V و P-V حاصل از الگوریتم به حالت آزمایشگاهی نزدیکتر شده است. مقدار توان بیشینه نیز در این الگوریتم 0.346 وات در ولتاژ V_{mp} برابر 0.482 ولت بدست آمده است. مقدار جریان I_{mp} برابر 0.718 آمپر در ولتاژ ماکزیمم توان محاسبه گردید. کمترین زمان اجرای این الگوریتم مطابق جدول ۲ برابر 0.56 میلی ثانیه در یک دور تکرار بوده است. سپس جهت ارزیابی عملکرد الگوریتم پیشنهادی، نتایج حاصل از الگوریتم Cuckoo را با تعدادی دیگر از الگوریتم های قوی و کارآمد در تخمین پارامترهای مدار معادل سلول های خورشیدی مقایسه نمودیم. نتایج نشان داده است الگوریتم Cuckoo نتیجه کاملاً بهتری را به نسبت سایر الگوریتم ها در اختیار ما قرار داده است. همچنین برای اعتبارسنجی الگوریتم پیشنهادی، میزان پراکندگی RMSE و مدت زمان کل اجرای برنامه را در ۲۲ بار اجرای برنامه بدست آوردیم. نتایج حاکی از آن بوده است بهره گیری از مدل خطی دو دیودی در الگوریتم Cuckoo به نسبت سایر الگوریتم ها، موجب بهبود RMSE و افزایش سرعت محاسبات شده است. این نشان می دهد الگوریتم Cuckoo با لحاظ کردن مدل خطی دو دیودی در مقایسه با سایر الگوریتم ها از برتری قابل ملاحظه ای برخوردار است و می تواند به عنوان یک الگوریتم قدرتمند، دقیق و سریع در زمینه بهینه سازی پارامترهای مدل های مداری سلول های خورشیدی فتوولتائیک مورد استفاده قرار گیرد.

مراجع

- [1] L. E. Chaar, L. A. Lamont, and N. E. Zein, "Review of photovoltaic technologies", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 15, no. 5, pp. 2165-2175, June 2011, doi: 10.1016/j.rser.2011.01.004.

- [2] A. Bahrami, S. Mohammadnejad and S. Soleimaninezhad, "Photovoltaic cells technology: principles and recent developments", *Optical and Quantum Electronics*, vol. 45, no. 2, pp. 161-197, February 2013, doi: 10.1007/S11082-012-9613-9.
- [3] J. Ma, K. L. Man, T. O. Ting, N. Zhang, S. U. Guan, and P. W. H. Wong, "Approximate Single-Diode Photovoltaic Model for Efficient I-V Characteristics Estimation", *The Scientific World Journal*, vol. 2013, November 2013, doi: 10.1155/2013/230471.
- [4] C. Emeksiz, A. Akbulut, Z. Dogan and M. Akar, "Optimization Of PV Module with Single-Diode model for Tokat region", *International journal of research science & Management*, vol. 4, no. 6, pp. 78-85, June 2017, doi: 10.5281/zenodo.802328.
- [5] V. Nazerian, and S. Babaei, "Optimization of Exponential Double-Diode Model for Photovoltaic Solar Cells Using GA-PSO Algorithm", *Lecture Notes in Electrical Engineering*, vol. 480, pp. 697-703, 2019, doi: 10.1007/978-981-10-8672-4_52.
- [6] D. Yousri, S. B. Thanikanti, D. Allam, V. K. Ramachandaramurthy and M. B. Eteiba, "Fractional chaotic ensemble particle swarm optimizer for identifying the single, double, and three diode photovoltaic models' parameters", *Energy*, vol. 195(C), 2020, doi: 10.1016/j.energy.2020.116979.
- [7] D. S. H. Chan, J. R. Phillips, and J. C. H. Phang, "A comparative study of extraction methods for solar cell model parameters", *Solid-State Electronics*, vol. 29, no. 3, pp. 329-337, March 1986, doi: 10.1016/0038-1101(86)90212-1.
- [8] K. M. El-Naggar, M. R. AlRashidi, M. F. AlHajri and A. K. AlOthman, "Simulated Annealing algorithm for photovoltaic parameters identification", *Solar Energy*, vol. 86, pp. 266-274, 2012, doi: 10.1016/j.solener.2011.09.032.
- [9] T. Ikegami, T. Maezono, F. Nakanishi, Y. Yamagata, and K. Ebihara, "Estimation of equivalent circuit parameters of PV module and its application to optimal operation of PV system", *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 67, no. 3, pp. 389-395, 2001, doi: 10.1016/S0927-0248(00)00307-X.
- [10] M. Haouari-Merbah, M. Belhamel, I. Tobias, and J. M. Ruiz, "Extraction and analysis of solar cell parameters from the illuminated current-voltage curve," *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 87, pp. 225-233, 2005, doi: 10.1016/j.solmat.2004.07.019.
- [11] J. Bai, S. Liu, Y. Hao, Z. Zhang, M. Jiang, and Y. Zhang, "Development of a new compound method to extract the five parameters of PV modules", *Energy Conversion and Management*, vol. 79, pp. 294-303, March 2014, doi: 10.1016/j.enconman.2013.12.041.
- [12] Y. Yoon, and Z. W. Geem, "Parameter Optimization of Single-Diode Model of Photovoltaic Cell Using Memetic Algorithm", *International Journal of Photoenergy*, vol. 2015, November 2015, doi: 10.1155/2015/963562.
- [13] A.A. Jadallah and D.Y. Mahmood, "Modeling and Simulation of a Photovoltaic Module in Different Operating Regimes", *ICCESEN 2014*, vol. 128, pp. 461-464, 2015.
- [14] M.A. Mughal, Q. Ma and C. Xiao, "Photovoltaic Cell Parameter Estimation Using Hybrid Particle Swarm Optimization and Simulated Annealing", *Energies*, vol. 10, no. 8, pp. 1213, 2017, doi: 10.3390/en10081213.
- [15] J. Ma, T. O. Ting, K. L. Man, N. Zhang, S. U. Guan, and P. W. H. Wong, "Parameter Estimation of Photovoltaic Models via Cuckoo Search", *Journal of Applied Mathematics*, vol. 2013, no. 2, January 2013, doi: 10.1155/2013/362619.
- [16] Y. Lu, S. Liang, H. Ouyang, S. Li and G. Wang, "Hybrid multi-group stochastic cooperative particle swarm optimization algorithm and its application to the photovoltaic parameter identification problem", *Energy Reports*, vol. 9, pp. 4654-4681, December 2023, doi: 10.1016/j.egy.2023.03.105.
- [17] V. Nazerian and M. Nasiri, "Optimal determination of the parameters of double-diode model of photovoltaic solar cells using the bee colony algorithm," in *2017 2nd international conference on knowledge-based research in computer engineering and information technology*, 2017, pp. 1-9, <https://civilica.com/doc/695948>.
- [18] V. Nazerian, H. Asadollahi, and T. Sutikno, "Improving the efficiency of photovoltaic cells embedded in floating buoys", *International Journal of Electrical and Computer Engineering*, vol. 13, no. 6, pp. 5986-5999, December 2023, doi: 10.11591/ijece.v13i6.pp5986-5999.
- [19] X. S. Yang and S. Deb, "Cuckoo search via Lévy flights", in *Proc. of World Congress on Nature & Biologically Inspired Computing (NaBIC 2009)*, December 2009, India. IEEE Publications, USA, pp. 210-214, doi: 10.48550/arXiv.1003.1594.



- [20] R. Rajabioun, "Cuckoo Optimization Algorithm", *Applied Soft Computing*, vol. 11, no. 8, pp. 5508-5518, December 2011, doi: 10.1016/j.asoc.2011.05.008.
- [21] V. Nazerian and A. Shadkam, "Optimum determination of the parameters of double-diode model of photovoltaic solar cells using the harmony search algorithm," in *2017 5th international conference on Electrical and Computer Engineering with Emphasis on Indigenous Knowledge*, 2017, pp. 1-9, <https://civilica.com/doc/725311>.
- [22] B. Lekouaghet, A. Boukabou and C. Boubakir, "Estimation of the photovoltaic cells/modules parameters using an improved Rao-based chaotic optimization technique", *Energy Conversion and Management*, vol. 229, 2021, 113722, doi: 10.1016/j.enconman.2020.113722.
- [23] S. Jiao, G. Chong, C. Huang, H. Hu, M. Wang, A. Heidari, H. Chen and X. Zhao, "Orthogonally adapted Harris hawks optimization for parameter estimation of photovoltaic models," *Energy*, vol. 203, July 2020, 117804, doi: 10.1016/j.energy.2020.117804.
- [24] A. Askarzadeh and A. Rezazadeh, "Artificial bee swarm optimization algorithm for parameters identification of solar cell models", *Applied Energy*, vol. 102, pp. 943-949, 2013, doi: 10.1016/j.apenergy.2012.09.052.
- [25] A. M. Beigi and A. Maroosi, "Parameter identification for solar cells and module using a Hybrid Firefly and Pattern Search Algorithms", *Solar Energy*, vol. 171, pp. 435-446, 2018, doi: 10.1016/j.solener.2018.06.092.

زیر نویس ها

-
- ¹ Photovoltaic
 - ² Solar cell
 - ³ Local
 - ⁴ Global
 - ⁵ Module
 - ⁶ I-V characteristic
 - ⁷ Cuckoo search
 - ⁸ Parallel resistance
 - ⁹ Series resistance
 - ¹⁰ Root-mean-square error
 - ¹¹ Optimization algorithm
 - ¹² Function
 - ¹³ Isotropic
 - ¹⁴ Iteration
 - ¹⁵ Population

