

Parameter Estimation of PV Cells and Modules using Ant Lion Optimizer (ALO) Algorithm

Farshad Jamshidi Zavaraki¹, Ahmad Rezaei Jordehi², Ali Shahhoseini¹

1. Dept. of Electrical Engineering, Islamic Azad University, Ghazvin Branch, Iran

2. Dept. of Electrical Engineering, Islamic Azad University Lashtenesha - Zibakenar branch, Iran

Abstract:

Estimating parameters of the circuit model of photovoltaic (PV) cells and modules is one of the most important challenges in solar energy. Today, with the development and proliferation of the application of optimization algorithms, the problem of estimating the parameter of the photovoltaic module can be converted into an optimization problem. In this paper, using the Ant Lion Optimizer (ALO) algorithm, all parameters of the two-diode model of the photovoltaic system are determined. This algorithm is a population-based algorithm that has a fast convergence speed and obtains reliable results. Also, to verify the accuracy of the results, the results of the ALO algorithm were compared with the results of the Gravitational Search Algorithm (GSA), Harmony Search (HS), Pattern Search (PS) and experimental points for the RTC France photovoltaic cell and the photovoltaic module Photowatt-PWP 201. As per the simulation results, the root mean square error (RMSE) given by ALO algorithm is lower than that of other three algorithms, which signifies the more precision provided by ALO in estimating the PV cell / module parameters.

Keywords: Ant Lion Optimizer (ALO) Algorithm, Parameter Estimation, PV System, Double Diode Model.

تخمین پارامترهای سلول‌ها و ماژول‌های فتوولتائیک با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی شاه مورچه (ALO)

فرشاد جمشیدی زوارکی^۱، احمد رضائی جوردهی^۲، علی شاه حسینی^۳

۱- کارشناس ارشد، دانشکده مهندسی برق - واحد قزوین، دانشگاه آزاد اسلامی، قزوین - ایران

farshad.jamshidi.z22@gmail.com

۲- استادیار، گروه برق، واحد لشت نشا - زیباکنار، دانشگاه آزاد اسلامی، - زیباکنار - رشت - ایران

ahmadrezaeejordehi@gmail.com

۳- استادیار، دانشکده مهندسی برق - واحد قزوین، دانشگاه آزاد اسلامی، قزوین - ایران

alishahhoseini@gmail.com

چکیده: مدل‌سازی و تخمین پارامترهای مدل مداری سلول‌ها و ماژول‌های فتوولتائیک (PV) یکی از چالش‌های مهم در زمینه انرژی خورشیدی است. امروزه با توسعه و گسترش کاربرد الگوریتم‌های بهینه‌سازی، مسئله تخمین پارامتر ماژول فتوولتائیک را می‌توان به مسئله بهینه‌سازی تبدیل کرد. مدل دو دیودی پر کاربردترین مدل سلول‌ها و ماژول‌های فتوولتائیک است. در این مقاله با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی شاه مورچه (ALO) تمامی پارامترهای مدل دو دیودی سلول‌ها و ماژول‌های فتوولتائیک محاسبه شده‌اند. این الگوریتم، مبتنی بر جمعیت است که با توجه به ویژگی‌های قدرت همگرایی سریع را دارد و نتایج دقیقی را به دست می‌آورد. همچنین برای بررسی درستی نتایج به دست آمده، نتایج حاصل از الگوریتم ALO با نتایج الگوریتم‌های جستجوی گرانشی (GSA)، جستجوی هارمونیک (HS)، جستجوی الگو (PS) در سلول فتوولتائیک RTC France و ماژول فتوولتائیک Photowatt-PWP 201 مقایسه شده‌اند. با توجه به نتایج شبیه‌سازی مشاهده می‌شود مقدار خطای جذر میانگین مربعات (RMSE) مربوط به الگوریتم ALO از هر سه الگوریتم دیگر کمتر است و در نتیجه، دقت بیشتری در تخمین پارامتر سلول/ماژول PV ارائه می‌کند.

واژه‌های کلیدی: الگوریتم بهینه‌سازی شاه مورچه، تخمین پارامتر، سیستم فتوولتائیک، مدل دو دیودی

۱- مقدمه

که به آلودگی بیش از پیش محیط زیست و خسارات جبران‌ناپذیر برای منابع حیاتی منجر می‌شود، امروزه تلاش‌های علمی بسیاری برای تولید و بهبود عملکرد انرژی‌های تجدیدپذیر صورت گرفته است [۱ و ۲]. امروزه سیستم‌های فتوولتائیک (PV) یکی از محبوب‌ترین منابع انرژی تجدیدپذیر است که از جمله مزایای آن عبارتند از: دسترسی آسان، رایگان بودن، بدون سروصدا بودن، سازگاری با محیط زیست و هزینه تعمیر و نگهداری پایین آنها [۳]. با توجه به شیوع استفاده از سلول‌ها و ماژول‌های فتوولتائیک، ارائه یک مدل دقیق از آنها ضروری است؛ به

با توجه به افزایش مصرف انرژی در جهان، رو به اتمام بودن سوخت‌های فسیلی و افزایش انتشار گازهای گلخانه‌ای

^۱ تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۷/۰۲/۱۴

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۷/۰۷/۳۰

نام نویسنده مسئول: احمد رضائی جوردهی

نشانی نویسنده مسئول: ایران، لشت نشا، زیباکنار، دانشگاه آزاد اسلامی واحد لشت نشا، گروه برق.

طوری که منحنی مشخصه‌های مدل شبیه‌سازی شده با منحنی مشخصه‌های سلول یا ماژول واقعی در شرایط مختلف محیطی یکسان باشد [۴]. در گذشته خصوصیات الکتریکی سلول‌های فتولتاییک با استفاده از مدار معادل‌های مختلف، مدل‌سازی شده‌اند و برای اینکه مدل ارائه شده دقت زیادی داشته باشد، باید پارامترهای آن مدل به خوبی تخمین زده شده باشند [۵]. روش‌های مختلفی برای حل مسئله تخمین پارامترهای مدل مدار معادل الکتریکی سیستم PV ارائه شده‌اند. به‌طور کلی این روش‌ها به سه دسته اصلی تحلیلی، استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی فراابتکاری و روش ترکیبی (تحلیلی - فراابتکاری) تقسیم می‌شوند که روش استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی فراابتکاری به علت دقت زیاد در محاسبه تخمین پارامترهای سیستم PV، از روش‌های دیگر محبوب‌ترند [۶]. این روش مسئله تخمین پارامتر سلول‌های فتولتاییک را به مسئله بهینه‌سازی تبدیل می‌کند و پارامترهایی را محاسبه می‌کند که به حداقل خطا منجر شوند [۶].

در این مقاله، با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی شاه مورچه (ALO) که الگوریتم قوی و مناسب برای استخراج نتایج مسائل بهینه‌سازی است، تمامی پارامترهای مدار معادل دو دیودی برای یک سلول و یک ماژول فتولتاییک با کمک روش نیوتن - رافسون محاسبه می‌شود و مشاهده می‌شود الگوریتم ALO عملکرد بهتری نسبت به سایر الگوریتم‌های مقایسه شده دارد. در واقع نوآوری این مقاله به‌کارگیری روش فراابتکاری کارآمد برای حل مسئله تخمین پارامترهای سلول‌ها و ماژول‌های فتولتاییک است.

در گذشته مقالات متعددی با استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی مختلف ارائه شده‌اند. در [۷] با ترکیب الگوریتم بهینه‌سازی مبتنی بر آموزش و یادگیری (TLBO) و الگوریتم کلونی زنبور عسل مصنوعی (ABC)، الگوریتم جدید TLABC را معرفی کرده‌اند و پارامترهای مدار معادل الکتریکی مدل تک دیودی و دو دیودی سیستم PV را با این الگوریتم به دست آورده‌اند. نتایج به‌دست‌آمده از الگوریتم TLABC با نتایج الگوریتم‌های TLBO و ABC مقایسه شده‌اند و ملاحظه می‌شود این الگوریتم دقت بیشتری در تخمین پارامترهای مدل‌ها ارائه می‌دهد. در [۸] با

استفاده از الگوریتم باد (WDO) تمامی پارامترهای مدل تک دیودی و دو دیودی سلول و ماژول PV در شرایط دمایی و تابشی مختلف محاسبه شده‌اند. برای بررسی صحت نتایج به‌دست‌آمده از الگوریتم WDO با نتایج الگوریتم‌های PS، ژنتیک (GA)، تبرید (SA) و HS مقایسه شده است و مشاهده می‌شود الگوریتم WDO دقت و صحت بهتری را با تعداد تکرار کمتری نسبت به سایر الگوریتم‌های مقایسه شده ارائه می‌دهد. در [۹] با ترکیب الگوریتم‌های بهینه‌سازی ازدحام ذرات (PSO) و SA الگوریتم HPSOSA را معرفی کرده‌اند و پارامترهای مدل تک دیودی و دو دیودی یک سلول PV را به دست آورده‌اند و نتایج به‌دست‌آمده را با نتایج حاصل از پنج الگوریتم دیگر مقایسه کرده‌اند که مشاهده می‌شود نتایج الگوریتم HPSOSA دقت بهتری را ارائه می‌کند. در [۱۰] الگوریتم DE برای محاسبه تمامی پارامترهای مدل تک دیودی در شرایط تابشی و دمایی مختلف ارائه شده است. در [۱۱] از الگوریتم PS برای استخراج پارامترهای مدل‌های تک و دو دیودی برای ماژول و سلول PV استفاده کردند که در مقایسه با الگوریتم ژنتیک (GA) و روش نیوتن، دقت و عملکرد بهتری را نشان داده است. در [۱۲] از الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات (PSO) برای استخراج پارامترهای سلولی مدل‌های تک و دو دیودی از روی منحنی‌های جریان - ولتاژ استفاده کردند که در مقایسه با الگوریتم ژنتیک (GA)، PSO دقیق‌تر بود و سرعت محاسباتی بهتری داشته است. در [۱۳] از GA برای تعیین پارامترهای مدل تک دیودی از منحنی‌های جریان - ولتاژ چندین سلول و ماژول PV استفاده کردند. پارامترهای استخراج شده برای محاسبه نقطه حداکثر توان (MPP) متناظر برای هر منحنی استفاده شدند. در [۱۴] با استفاده از الگوریتم بهبودیافته جستجوی هارمونیک (HS) پارامترهای مدل تک دیودی و دو دیودی سلول PV محاسبه شده‌اند. نتایج نشان می‌دهند الگوریتم جستجوی هارمونیک ابداعی کلی (IGHS) عملکرد بهتری نسبت به الگوریتم‌های PS و شبیه‌سازی تبرید (SA) دارد. در [۱۵] با استفاده از الگوریتم شاه مورچه، پارامترهای مدل تک دیودی یک سلول فتولتاییک در شرایط محیطی مختلف محاسبه شده‌اند. در این مقاله، مقدار میانگین تمامی

پارامترهای سلول‌ها و ماژول‌های فتولتاییک با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی شاه مورچه (ALO) که الگوریتم قوی و مناسب برای استخراج نتایج مسائل بهینه‌سازی است، تمامی پارامترهای مدار معادل دو دیودی برای یک سلول و یک ماژول فتولتاییک با کمک روش نیوتن - رافسون محاسبه می‌شود و مشاهده می‌شود الگوریتم ALO عملکرد بهتری نسبت به سایر الگوریتم‌های مقایسه شده دارد. در واقع نوآوری این مقاله به‌کارگیری روش فراابتکاری کارآمد برای حل مسئله تخمین پارامترهای سلول‌ها و ماژول‌های فتولتاییک است.

در گذشته مقالات متعددی با استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی مختلف ارائه شده‌اند. در [۷] با ترکیب الگوریتم بهینه‌سازی مبتنی بر آموزش و یادگیری (TLBO) و الگوریتم کلونی زنبور عسل مصنوعی (ABC)، الگوریتم جدید TLABC را معرفی کرده‌اند و پارامترهای مدار معادل الکتریکی مدل تک دیودی و دو دیودی سیستم PV را با این الگوریتم به دست آورده‌اند. نتایج به‌دست‌آمده از الگوریتم TLABC با نتایج الگوریتم‌های TLBO و ABC مقایسه شده‌اند و ملاحظه می‌شود این الگوریتم دقت بیشتری در تخمین پارامترهای مدل‌ها ارائه می‌دهد. در [۸] با

که I_{D1} , I_{D2} , I_{PH} و I_{SH} به ترتیب جریان نوری منبع، دیود اول، دیود دوم و مقاومت موازی اند. همچنین جریان دیودها و مقاومت موازی به ترتیب با فرمول‌های (۲-۴) محاسبه می‌شود:

$$I_{D1} = I_{S1} \left[\exp\left(\frac{q(V + IR_S)}{a_1 kT}\right) - 1 \right] \quad (2)$$

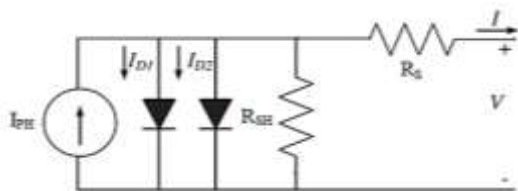
$$I_{D2} = I_{S2} \left[\exp\left(\frac{q(V + IR_S)}{a_2 kT}\right) - 1 \right] \quad (3)$$

$$I_{SH} = \frac{V + IR_S}{R_{SH}} \quad (4)$$

که q بار الکترون ($1.602 \times 10^{-19} C$), k ثابت بلتزن ($1.38 \times 10^{-23} J/K$) و T دما برحسب کلوین است. همچنین a_1 و a_2 ضرایب ایدئالی I_{S1} و I_{S2} جریان اشباع معکوس دیود اول و دوم اند. R_{SH} و R_S به ترتیب مقاومت سری و موازی مدل PV هستند. با جایگذاری معادلات ۲ تا ۴ در معادله ۱ معادله $I - V$ مدل دو دیودی PV به دست می‌آید که به صورت فرمول (۵) است:

$$I = I_{PH} - I_{S1} \left[\exp\left(\frac{q(V + IR_S)}{a_1 kT}\right) - 1 \right] - I_{S2} \left[\exp\left(\frac{q(V + IR_S)}{a_2 kT}\right) - 1 \right] - \frac{V + IR_S}{R_{SH}} \quad (5)$$

با توجه به معادله ۵ مشاهده می‌شود این مدل شامل ۷ پارامتر مجهول ($R_{SH}, R_S, a_2, I_{S2}, a_1, I_{S1}, I_{PH}$) است که برای مدل‌سازی سلول یا ماژول PV این هفت پارامتر باید تعیین شوند.



شکل (۱): مدل مداری دو دیودی سلول PV

پارامترهای مدل تک دیودی محاسبه شده با این الگوریتم با مقدار میانگین تمامی پارامترهای به دست آمده از الگوریتم‌های ALO و PSO مقایسه شده است که مشاهده می‌شود عملکرد بهتری را نسبت به دو الگوریتم مقایسه شده ارائه می‌کند. در این مقاله از تابع لامبرت برای مدل‌سازی سلول PV استفاده شده است که نسبت به روش نیوتن - رافسون که در این مقاله از آن استفاده شده است پیچیدگی‌های بیشتری دارد. همچنین، همان‌طور که قبلاً بیان شد این مقاله از مدل تک دیودی برای مدل‌سازی یک سلول فتوولتائیک استفاده کرده است که دقت کمتری را در مسئله تخمین پارامتر و شبیه‌سازی نسبت به مدل دو دیودی استفاده شده در این مقاله دارد. همچنین در این مقاله علاوه بر تخمین پارامترهای یک سلول خورشیدی، تخمین پارامترهای یک ماژول فتوولتائیک نیز بررسی شده است. جدول (۱) خلاصه ای از کارهای گذشته را ارائه می‌کند.

ساختار ادامه مقاله به صورت زیر است: در قسمت ۲، مدل دو دیودی ماژول PV معرفی می‌شود. در قسمت ۳، فرمول‌سازی مسئله برای مدل دو دیودی ارائه می‌شود. در قسمت ۴، الگوریتم مدنظر برای شبیه‌سازی معرفی می‌شود. در قسمت ۵، نتایج شبیه‌سازی برای ماژول مدنظر ارائه می‌شود. در نهایت، در قسمت ۶ نتیجه‌گیری انجام می‌شود.

۲- مدل دو دیودی PV

مدل دو دیودی محبوب‌ترین مدل استفاده شده برای مدل‌سازی سلول‌ها یا ماژول‌های PV است؛ از جمله مزایای این مدل در نظر گرفتن اثر بازترکیب در ناحیه تخلیه، دقت بیشتر نسبت به مدل تک دیودی و همچنین ارائه دقت مناسب در مقادیر تابش‌های کم است [۱۶]. ساختار این مدل در شکل ۱ نشان داده شده است. با توجه به این شکل مشاهده می‌شود معادله جریان خروجی مدل دو دیودی با فرمول (۱) محاسبه می‌شود:

$$I = I_{PH} - I_{D1} - I_{D2} - I_{SH} \quad (1)$$

جدول (۱): خلاصه ای از کارهای گذشته مربوط به تخمین پارامتر سیستم PV با استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی

مرجع	مدل استفاده شده	تابع هدف	الگوریتم استفاده شده	ملاحظات
[۷]	تک دیودی و دو دیودی	RMSE	TLABC (ترکیب الگوریتم‌های TLBO و ABC)	الگوریتم TLABC در مقایسه با الگوریتم‌های TLBO و ABC عملکرد بهتری در تخمین پارامترها ارائه می‌دهد. الگوریتم ارائه شده در شرایط تابشی و دمایی مختلف بهتر از الگوریتم‌های SA, PS, GA, BPFAPA, ABSO, FPA و GOTLBO عمل می‌کند.
[۸]	تک دیودی و دو دیودی	RMSE	WDO	الگوریتم معرفی شده در مقایسه با الگوریتم‌های CPSO, HS, JABC, SA و PS عملکرد بهتری ارائه می‌کند. پارامترهای I_{PH} و I_S با استفاده از روش تحلیلی و R_S, R_{SH} با استفاده از الگوریتم DE به دست آمده‌اند. محاسبات برای سه ماژول مختلف و از سه تکنولوژی تک کریستالی، چند کریستالی و لایه نازک انجام شده است.
[۹]	تک دیودی و دو دیودی	MAE و RMSE	HPSPSA (ترکیب الگوریتم‌های PSO و HS)	نتایج حاصل از الگوریتم PS بهتر از نتایج روش نیوتون و الگوریتم GA است. الگوریتم PSO در مقایسه با الگوریتم‌های GA سرعت و دقت بهتری ارائه می‌دهد. از پارامترهای به دست آمده برای به دست آوردن نقاط حداکثر توان در سلول و ماژول PV استفاده شده است.
[۱۰]	تک دیودی	$OF = \frac{dI}{dV}(mpp) + \frac{I_{mp}}{V_{mp}}$	DE	
[۱۱]	تک دیودی و دو دیودی	$OF = \sum_{i=1}^N abs(I_{i,exp} - I_{i,est})$	PS	
[۱۲]	تک دیودی و دو دیودی	RMSE	PSO	
[۱۳]	تک دیودی	RMSE	GA	
[۱۴]	تک دیودی و دو دیودی	RMSE	IGHS	الگوریتم IGHS در مقایسه با الگوریتم‌های SA, PS, HS عملکرد بهتری ارائه می‌دهد.
[۱۵]	تک دیودی	Lambert W	IALO	تخمین پارامتر برای شرایط محیطی مختلف بررسی شده است. الگوریتم IALO در مقایسه با الگوریتم‌های PSO و ALO عملکرد بهتری ارائه می‌دهد.

۳- فرمول‌سازی مسئله

و محاسبه شده است. به همین منظور معمولاً خطای جذر میانگین مربعات (RMSE) به عنوان تابع هدف در شبیه‌سازی استفاده می‌شود که معادله آن به صورت فرمول (۶) است [۱۷ و ۱۸]:

هدف اصلی تخمین پارامترهای مدل PV و تعیین مقادیر آنها حداقل سازی خطای بین جریان اندازه‌گیری شده

۴- الگوریتم بهینه‌ساز شاه مورچه

به‌تازگی الگوریتم ALO برای استفاده در مسائل بهینه‌سازی مهندسی معرفی شده است [۱۹]. این الگوریتم از عکس‌العمل مابین شاه مورچه‌ها و مورچه‌های به‌دام‌افتاده برای بهینه‌سازی استفاده می‌کند؛ از جمله مزایای این الگوریتم، قدرت زیاد این الگوریتم در دستیابی به بهینه کلی در مسائل بهینه‌سازی، استخراج نتایج قوی و همگرایی مناسب است. در مدل‌سازی، ابتدا مورچه به‌عنوان حرکت در فضای جستجو به‌صورت تصادفی طبق معادله (۸) در محل در نظر گرفته می‌شود و سپس شاه مورچه می‌تواند آن را شکار کند.

$$X(t) = [0, \text{cumsum}(2r(t_1) - 1), \text{cumsum}(2r(t_2) - 1), \dots, \text{cumsum}(2r(t_n) - 1)] \quad (۸)$$

که t مرحله راه‌رفتن تصادفی، n حداکثر تعداد و cumsum مجموع تجمعی را محاسبه می‌کند. همچنین تابع تصادفی است که به‌صورت معادله (۹) بیان می‌شود:

$$r(t) = \begin{cases} 1 & \text{if } \text{rand} > 0.5 \\ 0 & \text{if } \text{rand} < 0.5 \end{cases} \quad (۹)$$

که rand عدد تصادفی در بازه ۰ تا ۱ است. موقعیت مورچه‌ها در ماتریس M_{Ant} ذخیره می‌شود:

$$M_{Ant} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & \dots & A_{1d} \\ A_{21} & A_{22} & \dots & A_{2d} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ A_{n1} & A_{n2} & \dots & A_{nd} \end{bmatrix} \quad (۱۰)$$

که A_{ij} موقعیت ژامین متغیر i امین مورچه را مشخص می‌کند، n مربوط به تعداد مورچه‌ها و d تعداد متغیرها است. موقعیت هر مورچه پارامترها را برای یک راه‌حل خاص تعیین می‌کند. برای ارزیابی هر مورچه، در طول بهینه‌سازی یک تابع برازندگی استفاده می‌شود و همه توابع به‌دست‌آمده به‌صورت زیر در ماتریس M_{OA} در فرمول (۱۱) ذخیره می‌شوند:

$$M_{OA} = \begin{bmatrix} f(A_{11}, A_{12}, \dots, A_{1d}) \\ f(A_{21}, A_{22}, \dots, A_{2d}) \\ \vdots \\ f(A_{n1}, A_{n2}, \dots, A_{nd}) \end{bmatrix} \quad (۱۱)$$

شاه مورچه‌ها در ماتریس موقعیت M_{Antion} پنهان می‌شوند و ماتریس تابع هدف هر شاه مورچه M_{OAL} است.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (I_{i.exp} - I_{i.est})^2}{N}} \quad (۶)$$

که $I_{i.exp}$ مربوط به جریان تجربی نام سلول/ماژول PV و $I_{i.est}$ مربوط به جریان تخمین زده شده نام و N مربوط به تعداد نقاط منحنی $I - V$ است.

همان‌طور که در قسمت قبل گفته شد در مدل دو دیودی برای هر جفت اطلاعات تجربی (V_{mj}, I_{mj}) ، جریان سلول/ماژول PV با استفاده حل معادله (۵) محاسبه می‌شود. برای حل معادله (۵)، این معادله به معادله (۷) تبدیل می‌شود و سپس معادله به‌دست‌آمده با معادله نیوتون-رافسون حل می‌شود.

$$f(I) = I_{PH} - I_{S1} \left[\exp\left(\frac{q(V_{m,j} + IR_S)}{a_1 kT}\right) - 1 \right] - I_{S2} \left[\exp\left(\frac{q(V_{m,j} + IR_S)}{a_2 kT}\right) - 1 \right] - \frac{V_{m,j} + IR_S}{R_{SH}} - I = 0 \quad (۷)$$

در شکل (۲)، h_1 و h_2 به‌ترتیب مربوط به مقادیر تابع f و مشتق آن نسبت به جریان‌اند. $I_{catc,j}$ جریان محاسبه‌شده سلول/ماژول PV با استفاده از حل معادله (۶) است. این کار برای تمام جفت‌های $I - V$ تجربی انجام می‌شود و سپس $RMSE$ محاسبه می‌شود.

در مدل‌سازی سلول/ماژول PV باید بازه پارامترهای مدل مداری به‌صورت مناسب مشخص باشد که انتخاب نامناسب بازه پارامترها می‌تواند به واگرایی منجر شود و نتایج به‌دست‌آمده صحیح نیستند و دقت مناسبی را ارائه نمی‌دهند. در این مقاله بازه پارامترهای مدل مداری سلول PV به‌صورت زیر است [۱۷]:

$$I_{PH} \in [0, 1] A, \quad I_{S1} \in [10^{-12}, 10^{-6}] A, \quad \alpha_1 \in [1, 2], \\ I_{S2} \in [10^{-12}, 10^{-6}] A, \quad \alpha_2 \in [1, 2], \quad R_S \in [0, 0.5] \Omega, \\ R_{SH} \in [0, 100] \Omega$$

همچنین، بازه پارامترهای مدل مداری برای ماژول PV به‌صورت زیر است [۱۷]:

$$I_{PH} \in [0, 2] A, \quad I_{S1} \in [10^{-12}, 10^{-5}] A, \quad \alpha_1 \in [1, 100], \\ I_{S2} \in [10^{-12}, 10^{-5}] A, \quad \alpha_2 \in [1, 100], \quad R_S \in [0.5, 2] \Omega, \\ R_{SH} \in [5, 1000] \Omega$$

تخمین پارامترهای سلول‌ها و ماژول‌های فتولتاییک با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی شاه مورچه (ALO)

و تحلیل می‌شوند. با توجه به ماهیت تصادفی بودن الگوریتم‌های فراابتکاری، فرایند تخمین پارامتر ۳۰ مرتبه به صورت مستقل برای سلول و ماژول PV اجرا و نتایج آماری مربوط به $RMSE$ آن ارائه شده است.

۵-۱- نتایج شبیه‌سازی سلول PV

اطلاعات تجربی $I-V$ سلول خورشیدی RTC France در شرایط تابشی 1000 W/m^2 و دمای 33°C از مرجع [۱۷] استفاده شده‌اند. مقادیر منفی جریان و ولتاژ مربوط به پلاریته معکوس در شرایط اندازه‌گیری شده است. برای محاسبه جریان خروجی سلول PV در هر اجرای کد MATLAB، در ابتدا الگوریتم ALO در فضای جستجوی خود مقادیر تصادفی از پارامترهای مدل دو دیودی سلول PV را ایجاد می‌کند و سپس با استفاده از روش نیوتن-رافسون، مقادیر مختلف جریان را با توجه به ولتاژ متناظر آن محاسبه می‌کند. سپس با استفاده از رابطه (۶) مقدار $RMSE$ مربوط به آن اجرا را محاسبه می‌کند. در انتها با استفاده از روش بهینه‌سازی الگوریتم، بهترین مقادیر پارامترها و همچنین کمترین مقدار $RMSE$ را به دست می‌آورد که به بهترین تخمین منحنی $I-V$ سلول PV منجر می‌شود. نتایج آماری و زمان مورد نیاز حاصل از ۳۰ اجرای مستقل الگوریتم‌های مختلف برای مدل دو دیودی در جدول (۲) و پارامترهای مدل مداری به دست آمده (حاصل از بهترین اجرا در بین ۳۰ اجرای مختلف) در جدول (۳) ارائه شده‌اند. با توجه به جدول (۲)، الگوریتم ALO در میانگین و حداقل مقدار $RMSE$ به دست آمده عملکرد بهتری نسبت به الگوریتم‌های GSA، HS و PS در تخمین پارامترهای سلول PV ارائه کرده است. همچنین الگوریتم ALO زمان محاسباتی کمتری را نسبت به الگوریتم GSA ارائه می‌کند. الگوریتم HS محاسبات را بسیار سریع‌تر از سایر الگوریتم‌ها انجام می‌دهد؛ ولی همان‌طور که مشاهده می‌شود دقت تخمین پارامتر الگوریتم HS برای مقدار میانگین $RMSE$ نسبت به الگوریتم ALO تقریباً ۱۲ برابر کمتر است.

$$M_{Ant} = \begin{bmatrix} AL_{11} & AL_{12} & \dots & AL_{1d} \\ AL_{21} & AL_{22} & \dots & AL_{2d} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ AL_{n1} & AL_{n2} & \dots & AL_{nd} \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$M_{OA} = \begin{bmatrix} f(A_{11}, A_{12}, \dots, A_{1d}) \\ f(A_{21}, A_{22}, \dots, A_{2d}) \\ \vdots \\ f(A_{n1}, A_{n2}, \dots, A_{nd}) \end{bmatrix} \quad (13)$$

که AL_{ij} مقدار بعد j -ام شاه مورچه i -ام است. n تعداد شاه مورچه‌ها و d تعداد متغیرها است.

به دلیل اینکه هر فضای جستجو دارای محدودیتی است، رابطه (۸) به صورت مستقیم برای به‌روزرسانی موقعیت مورچه‌ها استفاده نمی‌شود. به همین منظور برای قدم‌زدن تصادفی مورچه‌ها در فضای جستجو آنها با معادله (۱۴) نرمال می‌شوند:

$$X_i^t = \frac{(X_i^t - a_i) \times (b_i - c_i^t)}{(d_i^t - a_i)} + c_i \quad (14)$$

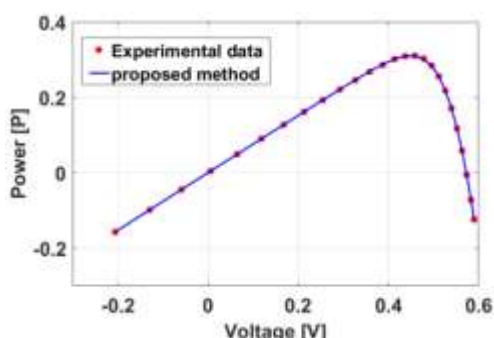
که a_i و b_i به ترتیب حداقل و حداکثر حرکت تصادفی متغیر i -ام هستند. همچنین c_i^t و d_i^t حداقل و حداکثر i -امین متغیر در t امین تکرار است. برای مدل کردن توانایی شکار شاه مورچه، از ساختار چرخ گردان استفاده می‌شود. آخرین مرحله شکار زمانی است که مورچه به پایین‌ترین قسمت دام می‌رسد و در این هنگام شاه مورچه، مورچه را به پایین می‌کشد و می‌بلعد. برای افزایش شانس شکار جدید، شاه مورچه می‌باید موقعیت خود را نسبت به موقعیت شکار قبلی تغییر دهد که برای این به‌روزرسانی موقعیت از رابطه (۱۵) استفاده می‌شود:

$$Antlion_i^t = \begin{cases} Ant_i^t & \text{if } f(Ant_i^t) \\ > f(Antlion_i^t) \end{cases} \quad (15)$$

که t تکرار اجرا را نمایش می‌دهد، Ant_i^t و $Antlion_i^t$ به ترتیب موقعیت شاه مورچه و مورچه i -ام را در تکرار t -ام نشان می‌دهد.

۵- نتایج شبیه‌سازی

در این قسمت، نتایج شبیه‌سازی برای تخمین پارامتر یک سلول خورشیدی (RTC France) و یک ماژول PV مولتی کریستالی سیلسکونی (Photowatt-PWP 201) ارائه



شکل (۳): منحنی توان-ولتاژ سلول RTC France

۵-۲- نتایج شبیه‌سازی ماژول PV

اطلاعات تجربی منحنی $I - V$ ماژول PV، Photowatt-PWP 201 در شرایط تابشی 1000 W/m^2 و دمای 45°C از مرجع [۱۷] استفاده شده‌اند. مقادیر منفی جریان و ولتاژ مربوط به پلاریته معکوس در شرایط اندازه‌گیری شده است. مشابه با روش محاسبه جریان سلول PV برای محاسبه جریان خروجی ماژول PV در هر اجرای کد MATLAB، در ابتدا الگوریتم ALO در فضای جستجوی خود مقادیر تصادفی از پارامترهای مدل دو دیودی ماژول PV را ایجاد می‌کند و سپس با استفاده از روش نیوتن - رافسون مقادیر مختلف جریان را با توجه به ولتاژ متناظر آن محاسبه می‌کند. سپس با استفاده از رابطه (۶) مقدار RMSE مربوط به آن اجرا را محاسبه می‌کند. در انتها با استفاده از روش بهینه‌سازی الگوریتم، بهترین مقادیر پارامترها و همچنین کمترین مقدار RMSE را به دست می‌آورد که به بهترین تخمین منحنی $I - V$ ماژول PV منجر می‌شود. نتایج آماری حاصل از ۳۰ اجرای مستقل الگوریتم‌های مختلف برای مدل دو دیودی در جدول (۴) و پارامترهای مدل مداری به دست آمده (ناشی از بهترین اجرا در بین ۳۰ اجرای مختلف) در جدول (۵) ارائه شده‌اند. با توجه به جدول (۴)، الگوریتم ALO در میانگین و حداقل و حداکثر مقدار RMSE به دست آمده عملکرد بهتری را نسبت به الگوریتم‌های GSA، HS و PS در تخمین پارامترهای ماژول PV ارائه کرده است.

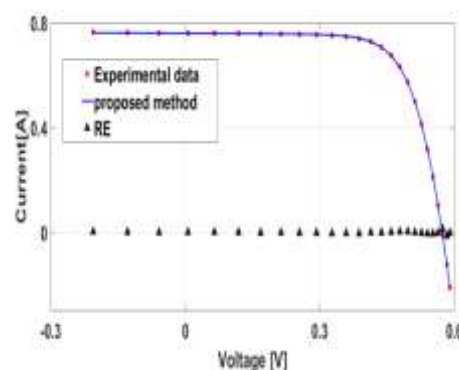
جدول (۲): اطلاعات آماری RMSE سلول PV مدل دو

	دیودی			
	ALO	GSA	HS	PS[14]
Mean	2.633e-3	1.005e-2	2.199e-2	8.164e-3
Min	1.363e-3	3.635e-3	7.782e-3	8.164e-3
Max	9.217e-3	1.683e-2	5.087e-2	8.164e-3
Std	1.666e-3	3.080e-3	1.129e-2	0
Time(s)	137.12	436.64	141.21	-

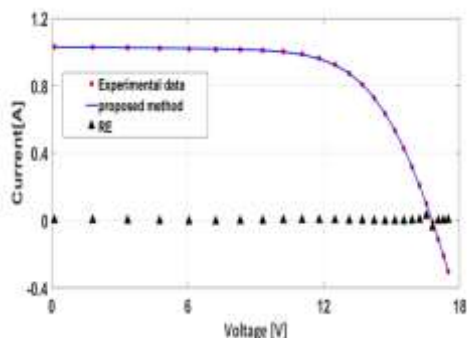
همچنین برای ارزیابی دقت جریان محاسبه‌شده با پارامترهای محاسبه‌شده و جریان اندازه‌گیری شده تجربی برای هر جفت از اطلاعات $I - V$ خطای نسبی با فرمول (۱۶) محاسبه شده است.

$$RE = \frac{(I_{i,exp} - I_{i,est})}{I_{i,exp}} \quad (16)$$

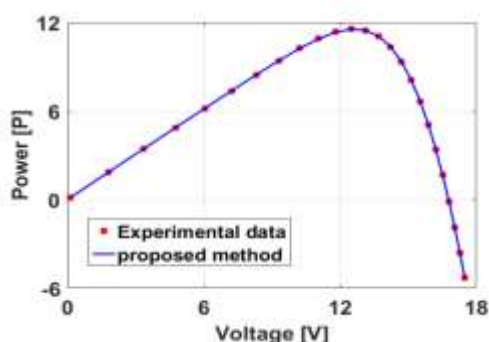
شکل‌های (۲) و (۳) به ترتیب نمودارهای $I - V$ و $P - V$ مربوط به سلول خورشیدی RTC France را نشان می‌دهند. با توجه به این دو شکل می‌توان مشاهده کرد الگوریتم ALO توانسته به خوبی نمودارهای $I - V$ و $P - V$ را به دست آورد و نقاط تجربی با دقت بسیار مناسبی روی منحنی قرار گرفته‌اند. همچنین با توجه به شکل (۲) مشاهده می‌شود جریان‌های محاسبه‌شده با الگوریتم ALO بسیار نزدیک به جریان اندازه‌گیری شده تجربی‌اند. میزان اختلاف این جریان‌ها با مثلث مشکی رنگ روی شکل (۲) مشخص شده است که بسیار نزدیک به صفر است.



شکل (۲): منحنی جریان - ولتاژ سلول RTC France



شکل (۴): منحنی جریان - ولتاژ ماژول PWP Photowatt 201



شکل (۵): منحنی توان - ولتاژ ماژول PWP Photowatt 201

۶- نتیجه گیری

در این مقاله از الگوریتم بهینه‌سازی شاه مورچه برای تخمین تمامی پارامترهای مدل دو دیودی سیستم‌های فتوولتائیک استفاده شده است. با توجه به مقایسه مقادیر جریان‌های حاصل از شبیه‌سازی با الگوریتم شاه مورچه و مقادیر جریان‌های اندازه‌گیری شده تجربی و نمودارهای $I - V$ و $P - V$ مربوط به سلول فتوولتائیک RTC France و ماژول فتوولتائیک PWP Photowatt 201، می‌توان به این نتیجه رسید که تخمین پارامتر مدل مداری سلول و ماژول PV به‌خوبی انجام شده است. همچنین نتایج الگوریتم ALO با نتایج حاصل از الگوریتم‌های GSA، HS و PS مقایسه شده‌اند که با مقایسه این نتایج مشاهده می‌شود مقدار خطای جذر میانگین مربعات (RMSE) مربوط به الگوریتم ALO از سه الگوریتم دیگر کمتر بوده است و در نتیجه، دقت بیشتری را در تخمین پارامترهای سلول‌ها/ماژول‌های PV ارائه می‌کند.

جدول (۳): پارامترهای مدل مداری سلول PV مدل دو دیودی برای الگوریتم‌های مختلف

	ALO	GSA	HS	PS[14]
I_{PH}	0.7597	0.7591	0.7624	0.7633
I_{S1}	1.345e-7	1.341e-7	1.00e-6	2.86e-10
α_1	1.6394	1.4228	1.6046	1.0001
I_{S2}	4.469e-7	8.373e-7	1.00e-12	1e-12
α_2	1.5233	1.762791	1.849449	1.0009
R_S	0.0342	0.037301	0.036544	0.0586
R_{SH}	101.5659	76.544491	88.764354	18.2106
RMSE	1.363e-3	3.635e-3	7.782e-3	8.164e-3

شکل‌های (۴) و (۵) به ترتیب نمودارهای $I - V$ و $P - V$ مربوط به ماژول PV، PWP-Photowatt 201 را نشان می‌دهند. با توجه به این دو شکل مشاهده می‌شود الگوریتم ALO توانسته است به‌خوبی نمودارهای $I - V$ و $P - V$ را به دست آورد و نقاط تجربی با دقت بسیار مناسبی روی منحنی قرار گرفته‌اند. همچنین با توجه به شکل (۴) مشاهده می‌شود جریان‌های محاسبه‌شده با الگوریتم ALO بسیار نزدیک به جریان اندازه‌گیری شده تجربی‌اند. میزان اختلاف این جریان‌ها با مثلث مشکی رنگ روی شکل (۴) مشخص شده است که بسیار نزدیک به صفر است.

جدول (۴): اطلاعات آماری RMSE ماژول PV مدل دو دیودی

	ALO	GSA	HS	PS[14]
Mean	4.924e-3	1.270e-1	1.303e-2	1.130e-2
Min	2.118e-3	4.371e-3	5.088e-3	1.130e-2
Max	8.976e-3	2.917e-1	4.017e-2	1.130e-2
Std	1.626e-3	7.548e-2	8.624e-3	0

جدول (۵): پارامترهای مدل مداری ماژول PV مدل دو دیودی برای الگوریتم‌های مختلف

	ALO	GSA	HS	PS[14]
I_{PH}	1.0304	1.0400	1.0326	1.0543
I_{S1}	2.151e-6	1.732e-6	6.556e-7	1e-9
α_1	78.0939	63.6860	91.0643	30.5847
I_{S2}	3.092e-6	4.085e-6	1.00e-5	1e-9
α_2	50.035	51.321	55.127	30.499
R_S	1.213	1.140	1.014	1.811
R_{SH}	995.156	474.833	853.284	195.556
RMSE	2.118e-3	4.371e-3	5.088e-3	1.130e-2

مراجع

- [10] K. Ishaque, Z. Salam, "An improved modeling method to determine the model parameters of photovoltaic (PV) modules using differential evolution (DE)", *Solar Energy*, Vol. 85, No. 9, pp. 2349–59, Sep 2011.
- [11] M. AlHajri, et al. "Optimal extraction of solar cell parameters using pattern search", *Renewable Energy*, vol. 44, pp. 238-245, 2012
- [12] M. Ye, et al. "Parameter extraction of solar cells using particle swarm optimization", *Journal of Applied Physics*, Vol.105, No.9, pp. 094502, 2009.
- [13] M. Zagrouba, et al. "Identification of PV solar cells and modules parameters using the genetic algorithms: Application to maximum power extraction", *Solar energy*, Vol. 84, No. 5, pp.860-866, 2010.
- [14] A Askarzadeh, A Rezazadeh, "Parameter identification for solar cell models using harmony search-based algorithms", *Solar Energy*, Vol. 86, pp. 3241–9, Nov 2012.
- [15] Wu Z, Yu D, Kang X , "Parameter identification of photovoltaic cell model based on improved ant lion optimizer", *Energy Convers Manage*, Vol. 115, pp. 107-115, November 2017.
- [16] VJ Chin, Z Salam, K Ishaque, "Cell modelling and model parameters estimation techniques for photovoltaic simulator application: A review", *Applied Energy*. Vol. 154, pp. 500-19, Sep 2015.
- [17] A. R. Jordehi, "Time varying acceleration coefficients particle swarm optimisation (tvacpso): A new optimisation algorithm for estimating parameters of PV cells and modules", *Energy Conversion and Management*, Vol. 129, pp. 262-274, 2016.
- [18] A. R. Jordehi, " Enhanced leader particle swarm optimisation (ELPSO): An efficient algorithm for parameter estimation of photovoltaic (PV) cells and modules ", *Solar Energy*, Vol. 159, pp. 78-87, 2018.
- [19] S. Mirjalili, "The ant lion optimizer", *Advances in Engineering Software*, Vol.83, pp. 80-98, 2015.
- [1] S. R. Chowdhury, S. Hiranmay , "Maximum power point tracking of partially shaded solar photovoltaic arrays", *Solar energy materials and solar cells*, vol. 94, pp. 1441-1447, Sep 2010.
- [2] A. Khotbehsara, A. Shahhoseini, "A fast and accurate five parameters double-diode model of photovoltaic modules", of the 25th Iranian Conference on Electrical Engineering, pp 265-270, 2017.
- [3] G. Liu, S. K. Nguang, and A. Partridge, "A general modeling method for I–V characteristics of geometrically and electrically configured photovoltaic arrays", *Energy Conversion and Management* Vol. 52, No. 12, pp. 3439-3445, 2011.
- [4] D. Allam, D. A. Yousri, M. B. Eteiba, "Parameters extraction of the three diode model for the multi-crystalline solar cell/module using Moth-Flame Optimization Algorithm", *Energy Conversion and Management*, Vol. 123, pp. 535-548, Sep 2016.
- [5] K. Ishaque, Z. Salam, H. Taheri, "Simple, fast and accurate two-diode model for photovoltaic modules", *Solar Energy Mater Solar Cells*, Vol. 95, No. 2, pp. 586–94, Feb 2011.
- [6] A. R. Jordehi, "Parameter estimation of solar photovoltaic (PV) cells: A review", *Renewable Sustainable Energy Rev.*, Vol. 61, pp. 354-371, August 2016.
- [7] X. Chen, et al. "Teaching–learning–based artificial bee colony for solar photovoltaic parameter estimation", *Applied Energy*, Vol. 212, pp. 1578-1588. 2018.
- [8] M. Derick, et al. "An improved optimization technique for estimation of solar photovoltaic parameters", *Solar Energy*, Vol.157, pp. 116-124, 2017.
- [9] M. A. Mughal, et al. "Photovoltaic Cell Parameter Estimation Using Hybrid Particle Swarm Optimization and Simulated Annealing." *Energies*, Vol. 10, No. 8, pp. 1213, 2017.

تخمین پارامترهای سلول‌ها و مازول‌های فتولتاییک با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی شاه مورچه (ALO)