

## ارائه یک روش بهینه‌سازی مقید برای تخمین پارامتر در ماژول‌های فوتولتائیک

۱ احسان مشتکار\*، ۲ تیمور قنبری، ۳ فرشید ناصری

### چکیده

در این مقاله یک روش شناسایی جدید برای تخمین پارامترهای مجهول در سیستم‌های فوتولتائیک ارائه شده است. مدل تک دیودی با پنج پارامتر مجهول به عنوان مدل سیستم فوتولتائیک در نظر گرفته شده است. با استفاده از اطلاعات سیستم در شرایط تست استاندارد، یک مدل کاهش یافته که در آن سه پارامتر مجهول به صورت تابعی از دو پارامتر دیگر در نظر گرفته شده‌اند استخراج شده است. با لحاظ کردن محدودیت‌های فیزیکی سیستم، یک تابع هدف و مجموعه‌ای از قیود نامساوی برای مدل کاهش یافته تعریف شده‌اند. نشان داده شده است که مساله بهینه‌سازی غیر محدب سیستم‌های فوتولتائیک، به یک مساله بهینه‌سازی مقید و محدب تبدیل می‌شود. قیود مساله به کمک یک تابع مانع که یک تابع هدف تکمیل شده را تولید می‌کند لحاظ شده‌اند. یک روش شناسایی تطبیقی برای یافتن مقادیر بهینه تابع هدف تکمیل شده مورد استفاده قرار گرفته است. بر خلاف غالب روش‌های شناسایی، الگوریتم پیشنهادی دارای پاسخ دقیق و منحصر به فرد و پیاده‌سازی آن بسیار آسان است. کارایی روش پیشنهادی با استفاده از نتایج شبیه‌سازی و عملی به اثبات رسیده است.

تاریخ دریافت:

۱۳۹۵/۷/۱۷

تاریخ پذیرش:

۱۳۹۵/۸/۱۸

کلمات کلیدی:

بهینه‌سازی محدب  
تخمین تطبیقی  
شناسایی پارامتر  
ماژول فوتولتائیک  
مدل پنج پارامتری.

## ۱. مقدمه

امروزه سیستم‌های فوتوولتائیک به طور گسترده در کاربردهای متنوع، از مصارف خانگی گرفته تا فناوری‌های فضایی مورد استفاده قرار می‌گیرند [۱]. علی‌رغم پیشرفت‌های چشمگیر صورت پذیرفته امروزه مطالعات سیستم‌های فوتوولتائیک با چالش‌های اساسی در زمینه توسعه فناوری‌های کارا و قابل اطمینان روبه‌رو است. داشتن یک مدل فوتوولتائیک دقیق برای انجام تحقیقات در زمینه سیستم‌های فوتوولتائیک امری ضروری است. با این حال سیستم‌های فوتوولتائیک به شدت غیرخطی هستند. همچنین، این سیستم‌ها تحت تاثیر منابع متعدد عدم قطعیت قرار دارند. یک منبع عدم قطعیت در اثر دانش محدود درباره مدل فوتوولتائیک به وجود می‌آید. بنابراین برای بهبود کارایی سیستم‌های فوتوولتائیک داشتن یک مدل دقیق ضروری است [۲].

مرسوم‌ترین مدل برای توصیف رفتار سیستم فوتوولتائیک، مدل مداری تک دیودی است [۳]. دلیل محبوبیت این مدل در مقایسه با سایر مدل‌ها داشتن کارایی رضایت‌بخش و پیچیدگی کم می‌باشد [۴]. چون مدار معادل مدل مداری تک دیودی دارای پنج پارامتر مجهول است، به آن مدل پنج پارامتری نیز گفته می‌شود. تخمین مستقیم پارامترهای مجهول در مدل پنج پارامتری در بسیاری از مقالات مورد مطالعه و بررسی قرار گرفته است [۵]. دو روش کلی برای یافتن مدل استاتیک ماژول فوتوولتائیک مدل سازی بر اساس اطلاعات دیتاشیت و مدل سازی بر اساس داده‌های آزمایشی هستند. بیشتر روش‌هایی که مبتنی بر داده‌های آزمایشی هستند به صورت یک مساله بهینه‌سازی که در آن پارامترهای مجهول با یک الگوریتم تکراری به دست می‌آیند نوشته می‌شوند [۶-۹]. اگرچه روش‌های مبتنی بر داده‌های آزمایشی مدل‌های دقیقی تولید می‌کنند، این روش‌ها دارای عیب‌هایی نظیر پیچیدگی بالا، حجم

---

۱Photovoltaic

۲Single diode circuit model

محاسبات بالا و مشکل همگرایی هستند [۱۰]. از طرف دیگر، روش‌های مبتنی بر اطلاعات دیتاشیت آسان، سریع و در دسترس هستند که آن‌ها را برای کاربردهای صنعتی جذاب می‌سازد [۱۱].

روش‌های مبتنی بر دیتاشیت از اطلاعات مندرج در دیتاشیت که توسط سازندگان ماژول‌های فوتوولتائیک در شرایط تست استاندارد<sup>۱</sup> (STC) تهیه شده است استفاده می‌کنند. دیتاشیت حاوی اطلاعاتی درباره ولتاژ و جریان ماژول در شرایط مدار باز، اتصال کوتاه و نقطه حداکثر توان<sup>۲</sup> (MPP) است. این سه ویژگی کلیدی ماژول‌های فوتوولتائیک چهار معادله صریح را فراهم می‌آورند [۱۲]. با این حال، برای یافتن پنج پارامتر مجهول در مدل مورد نظر به حداقل پنج معادله نیاز خواهد بود. طی چند سال اخیر، محققین روش‌های متعددی را برای حل این محدودیت ارائه نموده‌اند. برخی روش‌ها که به نام مدل چهار پارامتری شناخته می‌شوند اثر مقاومت موازی را در نظر نمی‌گیرند [۱۳-۱۴]. در برخی دیگر از روش‌ها فرض می‌شود که یک یا دو پارامتر مقادیر از پیش تعیین شده داشته باشند. به عنوان مثال، در [۱۵] فرض شده است که مقدار جریان نوری با جریان اتصال کوتاه برابر باشد. همچنین، ضریب ایده‌آل بودن دیود به طور دلخواه انتخاب شده است. همچنین در [۱۶] فقط سه پارامتر مجهول تخمین زده می‌شوند و سایر پارامترها به صورت از پیش تعریف شده در نظر گرفته می‌شوند. در [۱۷] برای دست یافتن به معادله پنجم، مقادیر مقاومت‌های سری و موازی به وسیله شیب معکوس مشخصه جریان-ولتاژ در شرایط مدار باز و اتصال کوتاه تقریب زده می‌شوند. برای به دست آوردن پاسخ تحلیلی به فرم بسته و تخمین پنج پارامتر مجهول، روش [۱۷] از تابع W لمبرت<sup>۳</sup> استفاده کرده است. تقریب‌های مشابهی در مقالات [۱۸] و [۱۹] مورد استفاده قرار گرفته است. برای بهبود دقت مدل سازی در [۱۹]، اطلاعات ماژول در شرایط STC از شرایط کاری واقعی به دست آمده است. در [۲۰]، برای تقریب شیب معکوس مشخصه جریان-ولتاژ از روش برازش تکه‌ای منحنی<sup>۴</sup> استفاده شده است. برای پیش‌بینی عملکرد الکتریکی ماژول‌های فوتوولتائیک بدون استفاده از مدار معادل الکتریکی، یک مدل تجربی صریح در [۲۱] ایجاد شده است.

<sup>۱</sup>Standard Test Condition (STC)

<sup>۲</sup>Maximum Power Point (MPP)

<sup>۳</sup>Lambert W-function

<sup>۴</sup>Piecewise curve-fitting

یک روش پارامتری در [۱۲] برای تعیین بهترین تخمین مقاومت موازی به طور مستقل استفاده شده است. سپس، چهار پارامتر دیگر از چهار معادله صریح به دست آمده محاسبه شده‌اند. این روش به هیچ تقریب و فرض خاصی نیاز ندارد و مقادیر تخمین زده شده برای چهار پارامتر مجهول به مقدار مقاومت موازی بستگی دارند. با این حال، همانطور که در [۲۲] نشان داده شده است، رفتار غیرخطی مشخصه جریان-ولتاژ مازول فوتولتائیک کمترین حساسیت را نسبت به تغییرات مقاومت موازی دارد. بنابراین یافتن تقریب دقیقی از پارامترهایی که تاثیر قابل ملاحظه‌ای در تولید مازول فوتولتائیک دارند امری الزامی است.

در [۲۳-۲۴] مدل پنج پارامتری سیستم فوتولتائیک به مدل دو پارامتری شامل مقاومت سری و ضریب ایده‌آل بودن دیود کاهش می‌یابد. سپس دامنه جاذبه و حدس‌های اولیه امکان‌پذیر برای سیستم کاهش یافته تعریف شده‌اند که یافتن جواب منحصر به فرد را تسهیل می‌کند. اگرچه الگوریتم طراحی شده در [۲۳-۲۴] یک جواب منحصر به فرد برای مساله شناسایی تولید می‌کند، این روش عیب‌های زیادی مانند حساسیت به حدس اولیه، تقریب معادله پنجم و نداشتن اثباتی برای همگرایی به پاسخ منحصر به فرد دارد.

علی‌رغم وجود روش‌های متعدد برای تخمین پارامترهای نامعین مازول‌های فوتولتائیک، هنوز نقص‌های زیادی در این زمینه وجود دارد. لزوم اندازه‌گیری جریان-ولتاژ، تقریب‌ها و فرضیات محدود شده، منحصر به فرد نبودن پاسخ‌ها، حساسیت به حدس اولیه، نبودن اثبات‌ها و تحلیل‌های مبتنی بر ریاضیات، حجم محاسباتی بالا و پیچیدگی برخی از این نواقص هستند که در مقالات مورد بررسی قرار گرفته‌اند [۲۵].

برای برطرف کردن محدودیت‌های گفته شده، در این مقاله یک روش جایگزین مبتنی بر الگوریتم تطبیقی ارائه شده است. در روش پیشنهادی، سه پارامتر مجهول به عنوان توابع صریحی از مقاومت سری و ضریب ایده‌آل بودن دیود نوشته شده‌اند. برای نوشتن معادله چهارم از این نکته استفاده می‌شود که در نقطه MPP داریم:  $\frac{d(P=VI)}{dV} = 0$ . این معادله به عنوان یک تابع هدف که باید نسبت به پارامترهای مقاومت سری و ضریب ایده‌آل بودن دیود حداقل گردد در نظر گرفته شده است. با لحاظ کردن محدودیت‌های فیزیکی سیستم فوتولتائیک، مجموعه‌ای از قیود نام‌ساوی تو صیف می‌شوند. نشان داده شده است که تابع هدف مقید پیشنهادی به یک مساله بهینه‌سازی محدب با جواب منحصر

به فرد منجر می‌شود. یک تابع مانع اصلاح شده برای ساختن یک تابع هدف تکمیل شده بدون حضور قیدها مورد استفاده قرار می‌گیرد. در نهایت، برای یافتن مقادیر بهینه مقاومت سری و ضریب ایده‌آل بودن دیود، دو قانون به روز رسانی تطبیقی در الگوریتم گرادیان نزولی تعریف شده‌اند. نشان داده شده است که قوانین به روز رسانی به صورت مجانبی به مقادیر بهینه خود همگرا می‌شوند که نرخ همگرایی قابل تنظیم می‌باشد.

ادامه مقاله به این صورت دسته‌بندی شده است: توصیف مدل در بخش دوم انجام شده است. در بخش سوم، مساله بهینه‌سازی پیشنهادی و الگوریتم تخمین تطبیقی پارامترهای مجهول در سیستم‌های فوتوولتائیک ارائه می‌شود. در بخش چهارم برخی نتایج و بحث‌های مرتبط با آن ارائه می‌شوند. در نهایت، در بخش ششم نتیجه‌گیری انجام خواهد شد.

## ۲. مدل تقریبی کاهش یافته

رابطه ریاضی مربوط به مشخصه جریان-ولتاژ یک ماژول فوتوولتائیک با مدل تک دیودی تو سطر (۱) نشان داده می‌شود:

$$I = I_{ph} - I_0 \left[ \exp\left(\frac{V+IR_S}{V_t}\right) - 1 \right] - \frac{V+IR_S}{R_p} \quad (1)$$

که در آن  $I$  و  $V$  به ترتیب جریان و ولتاژ خروجی،  $I_{ph}$  جریان نوری<sup>۳</sup>،  $I_0$  جریان اشباع دیود،  $R_S$  مقاومت سری و  $R_p$  مقاومت موازی هستند. ولتاژ حرارتی دیود<sup>۴</sup> به صورت (۲) نشان داده می‌شود:

$$V_t = \frac{akTN_S}{q} \quad (2)$$

در رابطه (۲)،  $a$  ضریب ایده‌آل بودن دیود،  $k$  ثابت بولتزمن ( $k = 1/38.06503 \times 10^{-23} \frac{J}{K}$ )،  $T$  دمای ماژول بر حسب درجه کلونین،  $N_S$  تعداد سلول‌های فوتوولتائیک سری، و در نهایت  $q$  بار الکتریکی یک الکترون ( $q = 1/6.02176446 \times 10^{-19} C$ ) هستند. یک ماژول فوتوولتائیک با مدل نشان داده شده در رابطه (۱) دارای پنج پارامتر مجهول به صورت زیر می‌باشد.

1 Barrier function

2 Gradient descent

3 Photocurrent

4 Diode thermal voltage

$$\theta = [\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4, \theta_5]^T = [R_s, R_p, V_t, I_0, I_{ph}]^T$$

برای تخمین پارامترهای مجهول از اطلاعات موجود در دیتاشیت در شرایط STC شامل ولتاژ مدار باز  $V_{oc}$ ، جریان اتصال کوتاه  $I_{sc}$ ، جریان  $I_{mp}$  و ولتاژ  $V_{mp}$  در نقطه MPP و  $N_s$  استفاده شده است. پارامترهای دیتاشیت مربوط به ماژول فوتوولتائیک معروف KC200GT در شرایط تست استاندارد در جدول ۱ لیست شده‌اند:

جدول ۱: اطلاعات موجود در دیتاشیت در شرایط تست استاندارد

پارامترها	KC200GT
$V_{oc}$	۳۲/۹ ولت
$I_{sc}$	۸/۲۱ آمپر
$V_{mp}$	۲۶/۳ ولت
$I_{mp}$	۷/۶۱ آمپر
$N_s$	۵۴

در شرایط مدار باز داریم:

$$f_1(\theta) = \theta_5 - \theta_4 \left[ \exp\left(\frac{V_{oc}}{\theta_3}\right) - 1 \right] - \frac{V_{oc}}{\theta_2} = 0 \quad (۳)$$

در شرایط اتصال کوتاه، می‌توان رابطه (۴) را بدست آورد:

$$f_2(\theta) = \theta_5 - \theta_4 \left[ \exp\left(\frac{\theta_1 I_{sc}}{\theta_3}\right) - 1 \right] - \frac{\theta_1 I_{sc}}{\theta_2} - I_{sc} = 0 \quad (۴)$$

برای شرایط MPP خواهیم داشت:

$$f_3(\theta) = \theta_5 - \theta_4 \left[ \exp\left(\frac{V_{mp} + \theta_1 I_{mp}}{\theta_3}\right) - 1 \right] - \frac{V_{mp} + \theta_1 I_{mp}}{\theta_2} - I_{mp} = 0 \quad (۵)$$

در MPP مشتق توان نسبت به ولتاژ برابر صفر خواهد بود:  $\frac{d(P=VI)}{dV} |_{V_{mp}, I_{mp}} = 0$ . بنابراین معادله

چهارم به صورت (۶) بدست می‌آید:

$$f_4(\theta) = (\theta_1 \theta_2 \theta_4 I_{mp} - \theta_2 \theta_4 V_{mp}) \exp\left(\frac{V_{mp} + \theta_1 I_{mp}}{\theta_3}\right) + (\theta_1 + \theta_2) \theta_3 I_{mp} - \theta_3 V_{mp} = 0 \quad (۶)$$

توابع  $f_1(\theta)$ ،  $f_2(\theta)$ ،  $f_3(\theta)$  و  $f_4(\theta)$  معادلات صریحی هستند که سه پارامتر کلیدی مشخصه جریان-ولتاژ را مشخص می‌سازند. مشابه مقالات [۷] و [۲۴]، مدل ۵ پارامتری به یک مدل با دو

پارامتر مجهول کاهش یافته است. از معادلات (۵)-(۳)، می‌توان متغیرهای مجهول  $\theta_2$ ،  $\theta_4$  و  $\theta_5$  را بر حسب توابعی از  $\theta_1$  و  $\theta_3$  به صورت (۷) نوشت:

$$\theta_2 = \frac{\phi(\theta_1, \theta_3)(\theta_1 I_{sc} - V_{oc}) - V_{mp} - \theta_1 I_{mp} + V_{oc}}{I_{mp} - \phi(\theta_1, \theta_3) I_{sc}} = h_1(\theta_1, \theta_3) \quad (7)$$

که در آن داریم:

$$\phi(\theta_1, \theta_3) = \frac{\exp\left(\frac{V_{oc}}{\theta_3}\right) - \exp\left(\frac{V_{mp} + \theta_1 I_{mp}}{\theta_3}\right)}{\exp\left(\frac{V_{oc}}{\theta_3}\right) - \exp\left(\frac{\theta_1 I_{sc}}{\theta_3}\right)} \quad (8)$$

بر اساس تحلیل ارائه شده در [۲۲]، تغییرات مقاومت موازی  $R_p$  از مقدار نامی، کمترین تاثیر را بر روی مشخصه جریان-ولتاژ در بین ۴ پارامتر مجهول دیگر دارد. بنابراین، حتی با تقریب زدن مقدار مقاومت موازی می‌توان به یک مشخصه جریان-ولتاژ مناسب رسید. علاوه بر این، بر اساس تحلیل ارائه شده در [۱۲] می‌توان نتیجه گرفت که با استفاده از مقادیر بزرگتر  $R_p$  می‌توان مدل‌های فوتوولتائیک دقیق‌تری با مقادیر ریشه متوسط مربعات خطای کمتر به دست آورد. بنابراین، به جای معادله صریح (۷) از تقریب آن به صورت (۹) استفاده می‌کنیم:

$$\theta_2 \approx \frac{\phi(\theta_1, \theta_3)(\theta_1 I_{sc} - V_{oc}) - V_{mp} - \theta_1 I_{mp}}{I_{mp} - \phi(\theta_1, \theta_3) I_{sc}} = h_2(\theta_1, \theta_3) \quad (9)$$

که در آن  $V_{oc}$  از صورت معادله (۷) حذف شده است. بنابراین، معادله تقریبی (۹) به مقادیر بزرگتری از  $\theta_2$  و مدل فوتوولتائیک دقیق‌تری نسبت به معادله (۷) خواهد انجامید.

متغیرهای مجهول  $\theta_4$  و  $\theta_5$  به صورت (۱۰) و (۱۱) بدست می‌آیند:

$$\theta_4 = \frac{I_{sc} - \frac{V_{oc}}{\theta_2} + \frac{\theta_1 I_{sc}}{\theta_2}}{\exp\left(\frac{V_{oc}}{\theta_3}\right) - \exp\left(\frac{\theta_1 I_{sc}}{\theta_3}\right)} = h_3(\theta_1, \theta_3) \quad (10)$$

$$\theta_5 = \frac{(\exp\left(\frac{V_{oc}}{\theta_3}\right) - 1)(I_{sc} - \frac{V_{oc}}{\theta_2} + \frac{\theta_1 I_{sc}}{\theta_2})}{\exp\left(\frac{V_{oc}}{\theta_3}\right) - \exp\left(\frac{\theta_1 I_{sc}}{\theta_3}\right)} + \frac{V_{oc}}{\theta_2} = h_4(\theta_1, \theta_3) \quad (11)$$

که  $\theta_2$  از معادله (۹) در معادلات بالا جایگزین می‌شود. در نتیجه، تنها پارامترهای کاهش یافته  $\theta_1$  و  $\theta_3$  باید تخمین زده شوند و ۳ پارامتر مجهول دیگر به سادگی از معادلات (۹)-(۱۱) بدست خواهند آمد.

### ۳. تخمین پارامتر

در مرجع [۲۴] نشان داده شده است که در نظر گرفتن  $f_4(\theta)$  به عنوان تابع هدف با پارامترهای مجهول  $\theta_2$ ،  $\theta_4$  و  $\theta_5$ ، معادلات (۷)، (۱۰) و (۱۱) را ارضا نموده و به جواب های نامتناهی برای پارامترهای کاهش یافته  $\theta_1$  و  $\theta_3$  منجر می شود. متأسفانه محدوده تغییرات  $\theta_1$  و  $\theta_3$  برای این جواب های نامتناهی بسیار وسیع است. در نتیجه، تغییرات ناچیز مقادیر اولیه به پاسخ های کاملاً متفاوت برای  $\theta_1$  و  $\theta_3$  منجر خواهد شد. با این حال، اگر تابع هدف را به صورت (۱۲) تعریف کنیم:

$$J = f_3^2(\theta) + f_4^2(\theta) \quad (12)$$

آنگاه اگر معادلات (۱۰)، (۱۱) و معادله تقریبی (۹)، به ترتیب در پارامترهای  $\theta_4$ ،  $\theta_5$  و  $\theta_2$  جایگزین شوند، یک تابع هدف با جواب های نامتناهی که به مجموعه محدودی از  $\theta_1$  و  $\theta_3$  وابسته است به دست می آید. تابع هدف (۱۲) را می توان به صورت (۱۳) نوشت:

$$\begin{aligned} J = l(\theta_1, \theta_3) = f_3^2(\theta_1, \theta_3) + f_4^2(\theta_1, \theta_3) = [h_4(\theta_1, \theta_3) - \\ h_3(\theta_1, \theta_3) \left( \exp\left(\frac{V_{mp} + \theta_1 I_{mp}}{\theta_3}\right) - 1 \right) - \frac{V_{mp} + \theta_1 I_{mp}}{h_2(\theta_1, \theta_3)} - I_{mp}]^2 + [(\theta_1 + \\ h_2(\theta_1, \theta_3))\theta_3 I_{mp} + (\theta_1 h_2(\theta_1, \theta_3) h_3(\theta_1, \theta_3) I_{mp} - \\ h_2(\theta_1, \theta_3) h_3(\theta_1, \theta_3) V_{mp}) \exp\left(\frac{V_{mp} + \theta_1 I_{mp}}{\theta_3}\right) - \theta_3 V_{mp}]^2 = 0 \end{aligned} \quad (13)$$

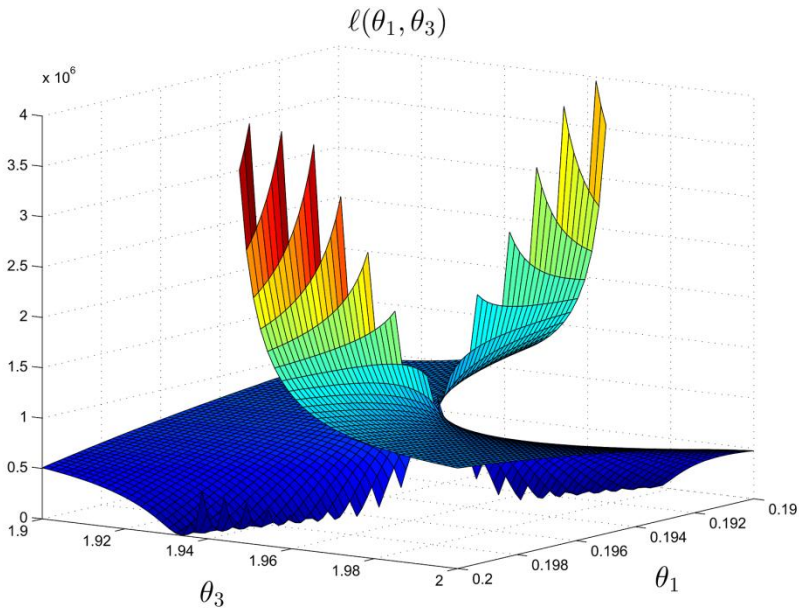
برای ماژول KC200GT تابع هدف  $J_1 = f_4(\theta)$  که در آن مقاومت موازی  $R_p$  به صورت  $\theta_2 = h_1(\theta_1, \theta_3)$  جایگزین شده است، دارای پاسخ های نامتناهی در محدوده تقریب  $0 < \theta_1 < 0.9$  و  $3 < \theta_3 < 0.3$  می باشد. با این وجود، برای همین ماژول با تابع هدف  $J = l(\theta_1, \theta_3)$  در معادله (۱۳)، پاسخ های نامتناهی متعددی وجود دارد که همگی در محدوده تقریب  $0.2 < \theta_1 < 0.19$  و  $1/98 < \theta_3 < 1/93$  قرار می گیرند. با مقایسه محدوده قابل قبول جواب های توابع هدف  $J_1$  و  $J$ ، می توان نتیجه گرفت که تابع هدف  $J$  محدوده کوچک تر و مقادیر قابل اعتمادتری از پارامترهای  $\theta_1$  و  $\theta_3$  را ایجاد می کند. نمودار  $l(\theta_1, \theta_3)$  در نزدیکی نقاط مینیمم محلی در شکل ۱ نشان داده شده است. این شکل تایید می کند که در محدوده  $0.2 < \theta_1 < 0.19$  و  $1/98 < \theta_3 < 1/93$  چندین نقطه بهینه وجود دارد. همچنین، شکل ۱ نشان می دهد که  $l(\theta_1, \theta_3)$  در مجاورت نقاط بهینه دارای تغییرات سریع است. چون در تابع هدف  $J = l(\theta_1, \theta_3)$  همه نقاط مینیمم محلی در همسایگی  $\theta_1$  و  $\theta_3$  قرار دارند و تغییرات کوچک این نقاط تاثیر کمی روی



مشخصه جریان-ولتاژ می‌گذارد، می‌توان  $J$  را به صورت یک تابع هدف با جواب منحصر به فرد تقریب زد. بنابراین، بر اساس الگوریتم گرادیان نزولی قوانین به روز رسانی دو پارامتر  $\theta_1$  و  $\theta_3$  را می‌توان به صورت (۱۴) تعریف نمود:

$$\begin{aligned}\dot{\hat{\theta}}_1 &= -k \frac{\partial l(\hat{\theta}_1, \hat{\theta}_3)}{\partial \hat{\theta}_1} \\ \dot{\hat{\theta}}_3 &= -k \frac{\partial l(\hat{\theta}_1, \hat{\theta}_3)}{\partial \hat{\theta}_3}\end{aligned}\quad (14)$$

یک پارامتر اکیدا مثبت  $K > 0$  بردار تخمین پارامترها و  $\hat{\theta}_r(t) = [\hat{\theta}_1(t), \hat{\theta}_3(t)]^T$  در معادله بالا است. اگرچه پیاده‌سازی قوانین به روز رسانی (۱۴) کار ساده‌ای است، این معادلات می‌توانند برخی مشکلات مانند عملکرد گذرای ضعیف، جواب‌های نهایی با تغییرات کم و حساسیت به انتخاب مقادیر اولیه را ایجاد کنند. برای برطرف کردن این مشکلات، یک مسئله بهینه‌سازی مقید مطرح شده است.



شکل ۱: نمودار تابع هدف  $l(\theta_1, \theta_3)$  نسبت به  $\theta_1$  و  $\theta_3$

## قیود نامساوی

حدود پارامترهای مجهول را می‌توان به کمک اطلاعات موجود و محدودیت‌های فیزیکی سیستم تعیین نمود. ضریب ایده‌آل بودن دیود  $a$  بسته به نوع فناوری فوتولتائیک در محدوده  $۵-۰/۵$  متغیر است [۵]. بر اساس معادله (۲)، فرض می‌شود که مقدار  $\theta_3$  در مجموعه کوچک زیر قرار می‌گیرد:

$$0.01285N_s \leq \theta_3 \leq 0.1285N_s \quad (۱۵)$$

که موجب ایجاد محدوده وسیعی از تغییرات برای ولتاژ حرارتی دیود می‌شود.

**قضیه ۱:** با توجه به این که برای  $i = 1.2 \dots 5$  داریم  $\theta_i > 0$ ، می‌توان نتیجه گرفت که:

$$V_{oc} > \theta_1 I_{sc} \quad (۱۶)$$

$$\theta_1 < \frac{V_{oc} - V_{mp}}{I_{mp}} \quad (۱۷)$$

$$\phi(\theta_1, \theta_3) > \frac{I_{mp}}{I_{sc}} \quad (۱۸)$$

اثبات: برای اینکه نشان دهیم  $V_{oc} > \theta_1 I_{sc}$ ، ابتدا فرض می‌کنیم:  $V_{oc} < \theta_1 I_{sc}$ . با این فرض مشاهده می‌شود که مخرج معادله (۱۰) منفی بوده و برای اینکه  $\theta_4 > 0$  باید نامساوی  $I_{sc} > \frac{V_{oc} - \theta_1 I_{sc}}{\theta_2}$  ارضا گردد. این نتیجه با فرض  $V_{oc} - \theta_1 I_{sc} < 0$  در تناقض است. در نتیجه، با توجه به برهان خلف می‌توان نتیجه گرفت که

$$\theta_1 < \frac{V_{oc}}{I_{sc}} \quad \text{و} \quad \theta_1 + \theta_2 > \frac{V_{oc}}{I_{sc}}.$$

برای اثبات نامساوی (۱۷)، فرض می‌کنیم  $\theta_1 \geq \frac{V_{oc} - V_{mp}}{I_{mp}}$ . در نتیجه طبق رابطه (۸) داریم:

$$\phi(\theta_1, \theta_3) \leq 0. \quad \text{برای حالت } \phi(\theta_1, \theta_3) = 0 \text{ از معادله (۹) نتیجه می‌شود } \theta_2 = -\frac{V_{mp} + \theta_1 I_{mp}}{I_{mp}}$$

غیر قابل قبول است. برای حالت  $\phi(\theta_1, \theta_3) \rightarrow -\infty$ ، در نقطه  $\theta_2 = \frac{V_{oc} - \theta_1 I_{sc}}{I_{sc}}$  مقدار  $\theta_2$  بیشینه

می‌شود که با رابطه اثبات شده  $\theta_1 + \theta_2 > \frac{V_{oc}}{I_{sc}}$  در تناقض است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که

$$\phi > 0 \quad \text{یا} \quad \theta_1 < \frac{V_{oc} - V_{mp}}{I_{mp}}$$

چون  $\phi > 0$ ، صورت رابطه (۹) منفی است. در نتیجه، برای برقراری  $\theta_2 > 0$ ، تابع غیرخطی (۸) باید

$$\text{رابطه } \phi(\theta_1, \theta_3) > \frac{I_{mp}}{I_{sc}} \text{ را ارضا کند.}$$

بر اساس تابع هدف (۱۳) و نامساوی‌های (۱۸)–(۱۵)، یک مسئله بهینه‌سازی مقید به صورت

(۱۹) تعریف می‌شود:

$$\min_{\theta_1, \theta_3} l(\theta_1, \theta_3)$$

subject to

(۱۹)

$$\gamma_i(\theta_1, \theta_3) \geq 0, \quad i = 1, \dots, 5$$

قیود مسئله به صورت  $\gamma_3 = \frac{V_{oc} - V_{mp}}{I_{mp} - \theta_1}$ ,  $\gamma_2 = \theta_3 - 0.01285N_s$ ,  $\gamma_1 = 0.1285N_s - \theta_3$

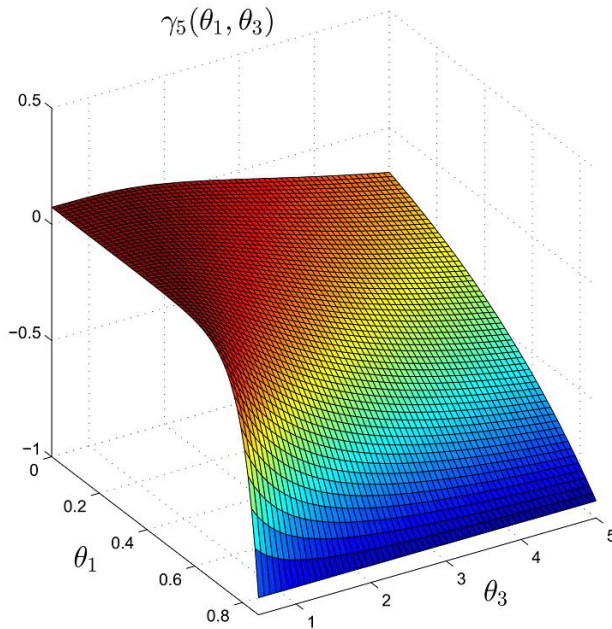
و  $\gamma_4 = \theta_1$  و  $\gamma_5 = \phi - \frac{I_{mp}}{I_{sc}}$  هستند. چهار قید اول توابع خطی از  $\theta_1$  و  $\theta_3$  می‌باشند. بنابراین، بررسی

مقعر بودن  $\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3$  و  $\gamma_4$  کار سختی نخواهد بود. با این حال، بررسی مقعر بودن  $\gamma_5$  با تحلیل

ریاضی به دلیل پیچیدگی زیاد کار دشواری است. برای حل این مشکل نمودار  $\gamma_5(\theta_1, \theta_3)$  برای ماژول

KC200GT در محدوده قابل قبول  $\theta_1$  و  $\theta_3$  در شکل ۲ رسم شده است. با مشاهده نمودار

$\gamma_5(\theta_1, \theta_3)$  به راحتی دیده می‌شود که  $\gamma_5$  یک تابع مقعر است.



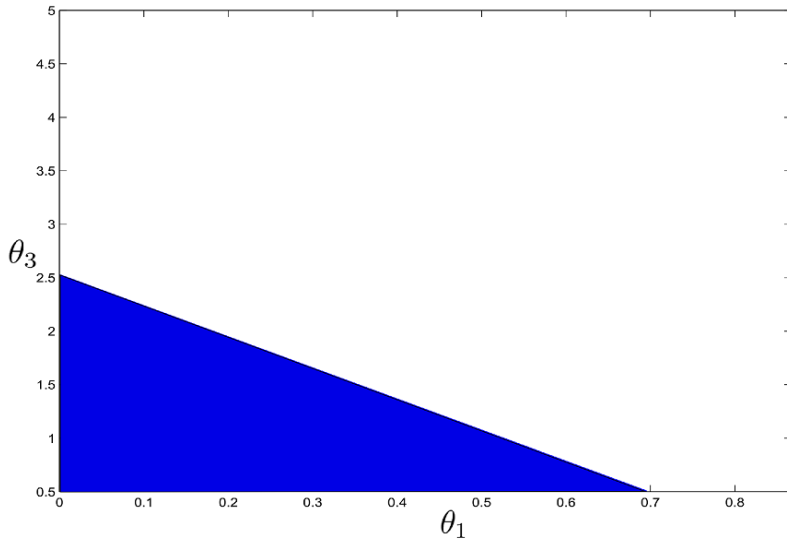
Concavity

شکل ۲: نمودار تابع مقعر  $\gamma_5(\theta_1, \theta_3)$  بر حسب  $\theta_1$  و  $\theta_3$

توابع مقعر  $\gamma_1$  تا  $\gamma_5$ ، مجموعه‌ای محدب، بسته و محدود از  $\theta_1$  و  $\theta_3$  ایجاد می‌کنند. مجموعه محدب به صورت:

$$\Theta = \{\theta_1, \theta_3 \in \mathbb{R} > 0 \mid \gamma_i(\theta_1, \theta_3) \geq 0, i = 1, 2, \dots, 5\}$$

تعریف می‌شود. نمودار مجموعه کانوکس  $\Theta$  برای ماژول KC200GT در شکل ۳ نشان داده شده است.



شکل ۳: نمودار مجموعه محدب  $\Theta$  بر حسب  $\theta_1$  و  $\theta_3$

چون تابع هدف  $l(\theta_1, \theta_3)$  تقریباً یک تابع محدب و قیود مساله توابع مقعر هستند، مساله بهینه سازی (۱۹) دارای یک جواب سراسری و یکتا می‌باشد. به عبارت دیگر مقادیری یکتا و مجهول از  $\theta_1^*$  و  $\theta_3^*$  به گونه‌ای یافت می‌شوند که:

$$l^2(\theta_1^*, \theta_3^*) \leq l^2(\theta_1, \theta_3), \forall \theta_1, \theta_3 \in \Theta \quad (20)$$

برای حل مساله بهینه سازی مقید (۱۹)، از روش نقطه داخلی که در آن تابع هدف با یک تابع مانع اصلاح شده جمع می‌شود، استفاده شده است. تابع هدف جدید به صورت (۲۱) نوشته می‌شود:

Convex

Interior-Point

$$\bar{J} = L(\theta_1, \theta_3, \mu) = l(\theta_1, \theta_3) - \mu \sum_{i=1}^5 \psi(\gamma_i(\theta_1, \theta_3)) \quad (21)$$

که در آن  $\mu$  یک عدد ثابت مثبت است که پارامتر مانع را نشان می‌دهد. همچنین،  $\psi(0)$  تابع مانع اصلاح شده را نشان می‌دهد. مینیمم کردن مساله غیر مقید (۲۱) حل تقریبی از مساله مقید را فراهم کرده و در صورتی که  $\mu \rightarrow 0$  به جواب دقیق همگرا می‌شود [۲۷]. تابع مانع اصلاح شده به صورت (۲۲) تعریف می‌شود:

$$\psi(a) = \begin{cases} \ln(a) & \text{if } a > \varepsilon_1/2 \\ q(a) & \text{if } a \leq \varepsilon_1/2 \end{cases} \quad (22)$$

که  $a$  متغیر مستقل تابع مانع بوده و  $\varepsilon_1 > 0$  یک عدد مثبت و کوچک است که فاصله متغیر مستقل  $\psi$  از قید را نشان می‌دهد. همچنین،  $q(a)$  یک تابع درجه دو بوده و به گونه‌ای انتخاب شده که عبارات  $q\left(\frac{\varepsilon_1}{2}\right) = \ln\left(\frac{\varepsilon_1}{2}\right)$  و  $q'\left(\frac{\varepsilon_1}{2}\right) = \ln'\left(\frac{\varepsilon_1}{2}\right)$ ،  $q\left(\frac{\varepsilon_1}{2}\right) = \ln\left(\frac{\varepsilon_1}{2}\right)$  مانع قیود مساله بهینه‌سازی را جریمه کرده و مشکلات مربوط به تخطی از قیود مساله را از بین می‌برد. علاوه بر این، تابع مانع انتخاب شده مشکل مقادیر اولیه امکان ناپذیر مربوط به قوانین به روز رسانی پارامترها را حل می‌کند. همچنین، چنین تابع مانعی امکان پذیری خطوط سیر را تقویت می‌نماید [۲۶].

فرض کنید  $i = 1$  تا  $i = N_c$  مجموعه‌ای از قیود فعال به صورت  $\gamma_i(\theta_1, \theta_3) \leq \frac{\varepsilon_1}{2}$  باشند. با تعریف برداری از پارامترهای مجهول کاهش یافته به صورت  $\theta_r = [\theta_1, \theta_3]^T$  و مشتق گیری از رابطه (۲۱) نسبت به  $\theta_r$  و با فرض ثابت بودن  $\mu$  رابطه (۲۳) بدست می‌آید:

---

Barrier parameter

Quadratic function

Infeasible

Trajectory

$$\frac{\partial L(\theta_r, \mu)}{\partial \theta_r} = \begin{cases} \frac{\partial l^2(\theta_r)}{\partial \theta_r} - \mu \sum_{i \notin N_c} \frac{1}{\gamma_i(\theta_r)} \frac{\partial \gamma_i(\theta_r)}{\partial \theta_r} & \text{if } i \notin N_c \\ \frac{\partial l^2(\theta_r)}{\partial \theta_r} - \mu \sum_{j \in N_c} \frac{1}{\gamma_j(\theta_r)} \frac{\partial \gamma_j(\theta_r)}{\partial \theta_r} - \mu \sum_{i \in N_c} \frac{\partial q_i(\theta_r)}{\partial \theta_r} & \text{if } i \in N_c, j \notin N_c \\ \frac{\partial l^2(\theta_r)}{\partial \theta_r} - \mu \sum_{i \in N_c} \frac{\partial q_i(\theta_r)}{\partial \theta_r} & \text{if } i \in N_c \end{cases} \quad (23)$$

بنابراین، مشابه رابطه (۱۴)، مجموعه‌ی جدیدی از قوانین به روز رسانی پارامترها به صورت (۲۴) بدست می‌آیند:

$$\begin{aligned} \dot{\hat{\theta}}_1(t) &= -k \frac{\partial L(\hat{\theta}_r, \mu)}{\partial \hat{\theta}_1} \\ \dot{\hat{\theta}}_3(t) &= -k \frac{\partial L(\hat{\theta}_r, \mu)}{\partial \hat{\theta}_3} \end{aligned} \quad (24)$$

این قوانین به روز رسانی عملکرد گذرای خوب، همگرایی سریع به جواب بهینه و یکتا و حساسیت کم به مقادیر اولیه را تضمین می‌کند.

#### ۴. نتایج و بحث‌های مرتبط

برای بررسی کارایی روش پیشنهادی تعداد زیادی شبیه سازی با توجه به مازول فوتولتائیک KC200GT انجام شده است. همچنین، تخمین پارامتر برای چند مازول فوتولتائیک دیگر نیز در شرایط STC ارائه شده است.

#### شرایط محیطی واقعی

معمولاً در دیتاشیت پنل‌های فوتولتائیک فقط اطلاعات در شرایط STC گنجانده می‌شود. این در حالی است که مقادیر پارامترهای مدل معادل الکتریکی در سایر شرایط محیطی می‌تواند متفاوت باشد.

تغییرات دما و میزان تابش<sup>۱</sup> بیشترین تاثیر را بر روی مقادیر پارامترها دارند. برای تعیین مقادیر پارامترهای مجهول در شرایط کاری واقعی فرمول‌های ریاضی متعددی ارائه شده‌اند [۲۸]. در این مقاله، جریان نوری و جریان اشباع دیود در شرایط کاری مختلف به صورت (۲۵) و (۲۶) مدل می‌شوند [۱۵]:

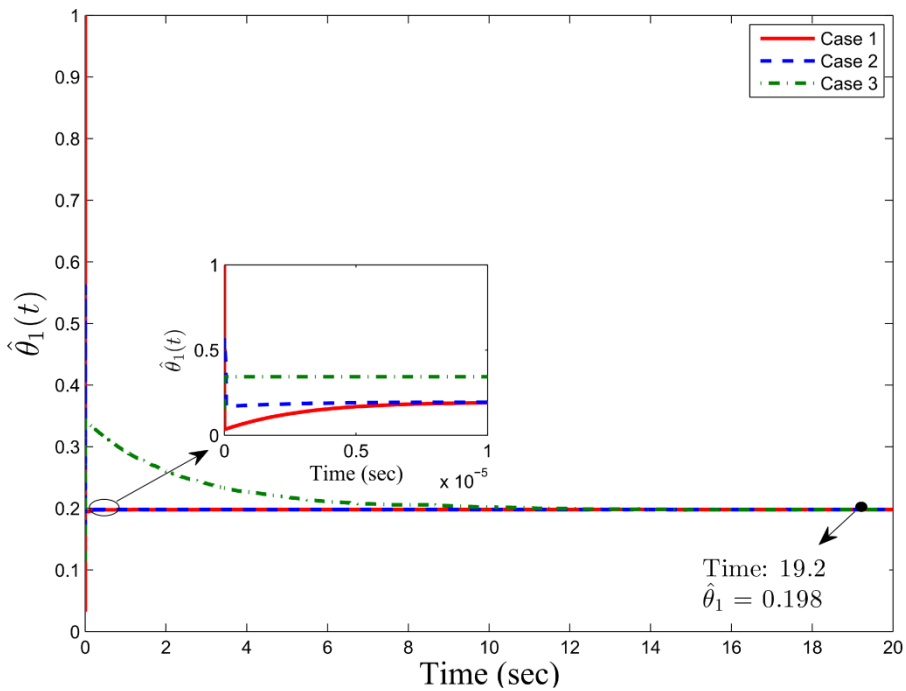
$$I_{ph}(G, T) = (I_{ph.ref} + K_I(T - T_{ref})) \frac{G}{G_{ref}} \quad (25)$$

$$I_0(T) = I_{0.ref} \left(\frac{T}{T_{ref}}\right)^3 \exp\left[\frac{qE_g}{ak} \left(\frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T}\right)\right] \quad (26)$$

در معادلات (۲۵) و (۲۶)، زیروند  $ref$  مقدار پارامترهای مختلف در شرایط STC را نشان می‌دهد که در معادلات (۲۵) و (۲۶)،  $T_{ref} = 298.15 K$  و  $G_{ref} = 1000 W/m^2$ . همچنین انرژی باندگپ نیمه‌هادی است که برای سلول‌های سیلیکونی چند بلوری برابر  $E_g = 1.12 eV$  در نظر گرفته شده است [۱۵]. ولتاژ حرارتی و مقاومت موازی که می‌توانند با تغییر دما یا تابش دستخوش تغییر شوند به صورت (۲۷) و (۲۸) در نظر گرفته می‌شوند [۲]:

$$V_t(T) = V_{t.ref} \left(\frac{T}{T_{ref}}\right) \quad (27)$$

$$R_p(G) = R_{p.ref} \left(\frac{G_{ref}}{G}\right) \quad (28)$$



شکل ۴: تخمین مقاومت سری با لحاظ کردن شرایط اولیه مختلف

مشابه [۲-۳] برای سادگی محاسبات و با فرض داشتن عملکرد قابل قبول، فرض شده است که

$$R_s(G.T) = R_{s.ref} \text{ یعنی وابسته نباشد یعنی:}$$

### نتایج شبیه سازی

برای اثبات این که مساله بهینه سازی دارای جواب یکتا و پایداری خوب در برابر حدس های اولیه

ناممکن است، نتایج شبیه سازی برای سه حدس اولیه متفاوت ارائه شده اند:

$$\text{حالت (۱) } \hat{\theta}_1(0) = 1, \hat{\theta}_3(0) = 2.7748$$

$$\text{حالت (۲) } \hat{\theta}_1(0) = 0.5, \hat{\theta}_3(0) = 1.3874$$

$$\text{حالت (۳) } \hat{\theta}_1(0) = 0.1, \hat{\theta}_3(0) = 1.3874$$

بهره تخمین برابر  $k = 10$  و سایر پارامترها به صورت  $\epsilon = 0.02$ ،  $\epsilon_1 = 1 \times 10^{-6}$  و پارامتر مانع

$\mu = 1 \times 10^{-5}$  انتخاب شده اند. لازم به ذکر است که شرط اولیه برای  $\hat{\theta}_3$  در حالت ۱ برابر

$\hat{a}(0) = 2$  و شرایط اولیه برای حالت های ۲ و ۳ برابر  $\hat{a}(0) = 1$  هستند. دو حالت اول حدس های



اولیه ناممکن و حالت سوم یک نقطه ممکن متعلق به مجموعه محدب  $\Theta$  می‌باشد. نتایج شبیه‌سازی مربوط به تخمین تطبیقی پارامترهای مجهول  $\theta_1$  و  $\theta_3$  برای ماژول فوتوولتائیک KC200GT در شرایط اولیه مختلف به ترتیب در شکل‌های ۳ و ۴ نشان داده شده‌اند.

همانطور که در شکل‌های ۳ و ۴ دیده می‌شود، مساله بهینه‌سازی مقید دارای یک جواب منحصر به فرد می‌باشد و مسیرهای تخمین پارامتر با وجود حدس‌های اولیه ناممکن به مقادیر بهینه خود همگرا می‌شوند. مقادیر بهینه به صورت  $\theta_1 = 0.198$  و  $\theta_3 = 1.942$  هستند. بنابراین، از معادلات (۲)، (۷)، (۱۰) و (۱۱) به ترتیب می‌توان نتیجه گرفت که

$$\theta_5 = 8.2101 \text{ و } \theta_4 = 3.6 \times 10^{-7}, \theta_2 = 14786, a = 1.4$$

برای بررسی اثر پارامتر مانع روی جواب بهینه مساله بهینه‌سازی، مجموعه دیگری از شبیه‌سازی‌ها برای مقادیر مختلف  $\mu$  انجام شده است. شرایط اولیه برابر  $\hat{\theta}_1(0) = 0.1$ ،  $\hat{\theta}_3(0) = 1.3874$  و سایر پارامترها بدون تغییر باقی مانده‌اند. نتایج شبیه‌سازی در شکل‌های ۶ و ۷ نشان داده شده است. این شکل‌ها نتیجه قضیه (۱) را تایید می‌کنند. در حقیقت، به ازای مقادیر کوچک  $\mu$ ، جواب بهینه تابع هدف اصلی به جواب تابع هدف تکمیل شده نزدیک است. مقادیر مربوط به پارامترهای مجهول به ازای مقادیر مختلف  $\mu$  در جدول (۲) ارائه شده است.

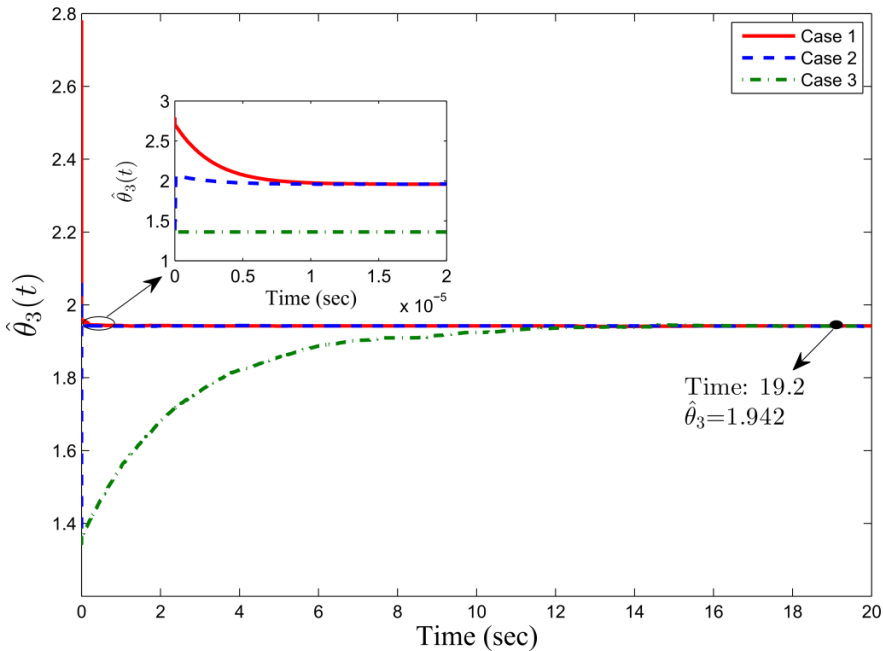
مشخصه جریان-ولتاژ ماژول فوتوولتائیک KC200GT به ازای مقادیر مختلف  $\mu$  و در شرایط تابش و دمای مختلف در شکل‌های ۸ و ۹ نشان داده شده‌اند.

م مشاهده می‌شود که به ازای مقادیر کوچک  $\mu$ ، مطابقت قابل قبولی بین مشخصه جریان-ولتاژ شبیه‌سازی شده و مشخصه واقعی در اطراف نقطه MPP بدست آمده است. به دست آوردن مشخصه جریان-ولتاژ در اطراف نقطه MPP موجب سادگی توسعه الگوریتم‌های مربوط به دنبال کردن نقطه MPP می‌شود که بسیار حائز اهمیت است [۲۵]. با این حال، به ازای مقادیر بزرگ  $\mu$ ، نتایج شبیه‌سازی و عملی مخصوصاً به ازای ولتاژهای زیاد ( $V > 20V$ ) اختلاف قابل ملاحظه‌ای نشان می‌دهند. این اختلاف در تابش‌های کمتر افزایش نیز می‌یابد. برای اثبات دقت مدل ساخته شده، شاخص عملکردی ریشه متوسط مربعات خطای نرمالیزه<sup>۱</sup> در شرایط تست استاندارد و به ازای مقادیر مختلف  $\mu$  برای

<sup>۱</sup>Normalized Root Mean Square Error (NRMSE)

روش‌های ارائه شده در [۱۵] و [۲۸] مورد بررسی قرار گرفته است. NRMSE از طریق رابطه زیر محاسبه می‌شود [۱۱]:

$$\text{NRMSE}(\%) = \frac{\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (I_{exp} - I_{sim})^2}}{\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n I_{exp}^2}} \times 100 \quad (29)$$



شکل ۵: تخمین ولتاژ حرارتی در شرایط اولیه مختلف

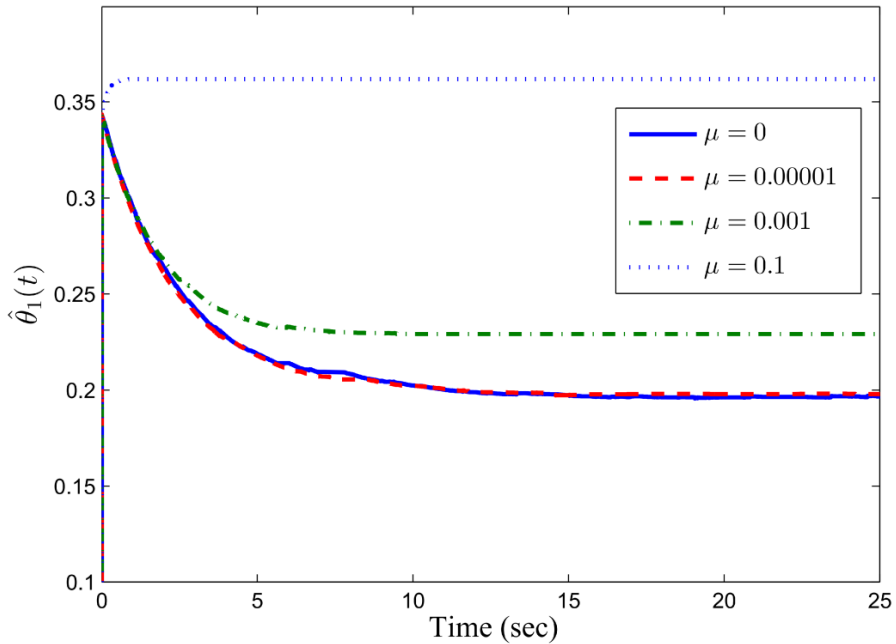
که در آن  $n$  تعداد داده‌های اندازه‌گیری شده،  $I_{exp}$  جریان اندازه‌گیری شده در آزمایش و  $I_{sim}$  جریان تخمین زده شده توسط الگوریتم پیشنهادی است. مقادیر در صد NRMSE برای همه محدوده ولتاژ (0 ≤ V ≤ 32.9) و ولتاژهای در نزدیکی شرایط کاری MPP (23 ≤ V ≤ 30) در جدول ۳ نشان داده شده‌اند.

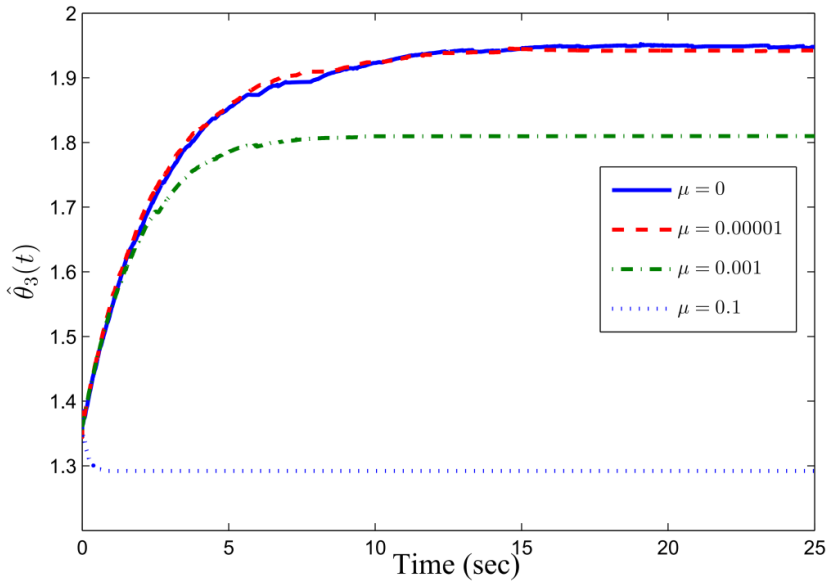
اگرچه  $\mu = 0$  نتایج نسبتاً بهتری در نزدیکی شرایط کاری MPP برای مشخصه جریان-ولتاژ ایجاد می‌کند،  $\mu = 1 \times 10^{-5}$  برای تمام محدوده شرایط کاری سیستم فوتوولتائیک توسط الگوریتم پیشنهادی بهترین عملکرد را دارد. مقادیر بزرگتر  $\mu$  عملکرد مدل سازی ضعیف‌تری را برای تمام محدوده

ولتاژ ماژول فوتوولتائیک و نزدیک شرایط MPP نتیجه می‌دهد. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که مقادیر کوچک پارامتر مانع  $\mu$  ( $\mu = 1 \times 10^{-5}$ ) به بهترین عملکرد مدل سازی منجر می‌شود. دلیل این امر آن است که مقادیر کوچک  $\mu$  می‌تواند با لحاظ کردن اثر قیود مساله و نیز شرایط اولیه ناممکن، برای تمام محدوده شرایط کاری ماژول فوتوولتائیک یک مدل فوتوولتائیک قابل قبول تولید نماید.

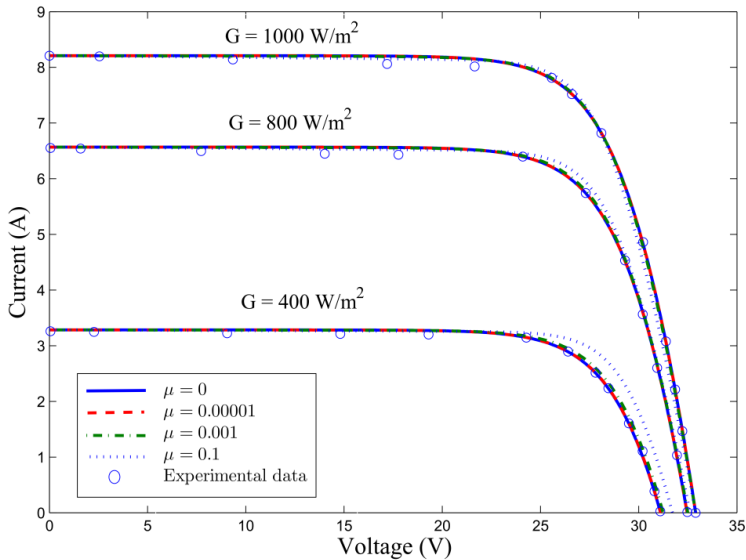
جدول ۲: پارامترهای تخمین زده شده به ازای مقادیر مختلف  $\mu$ 

$\mu = 0.1$	$\mu = 1 \times 10^{-3}$	$\mu = 1 \times 10^{-5}$	$\mu = 0$	پارامتر
۰/۳۶۱۹	۰/۲۲۹۲	۰/۱۹۸	۰/۱۹۶۶	$R_s(\Omega)$
۱/۲۹۲	۱/۸۱	۱/۹۴۲	۱/۹۴۸	$V_t(V)$
۳۱۶/۳	۱۴۷۳	۱۴۷۸۶	۲۴۴۴۰	$R_p(\Omega)$
۰/۰۷۱	۱۰۵	۳۶۰	۳۸۰	$I_0(nA)$
۸/۲۱۹۴	۸/۲۱۱۳	۸/۲۱۰۱	۸/۲۱۰۱	$I_{ph}(A)$

شکل ۶: تخمین مقاومت سری به ازای مقادیر مختلف  $\mu$

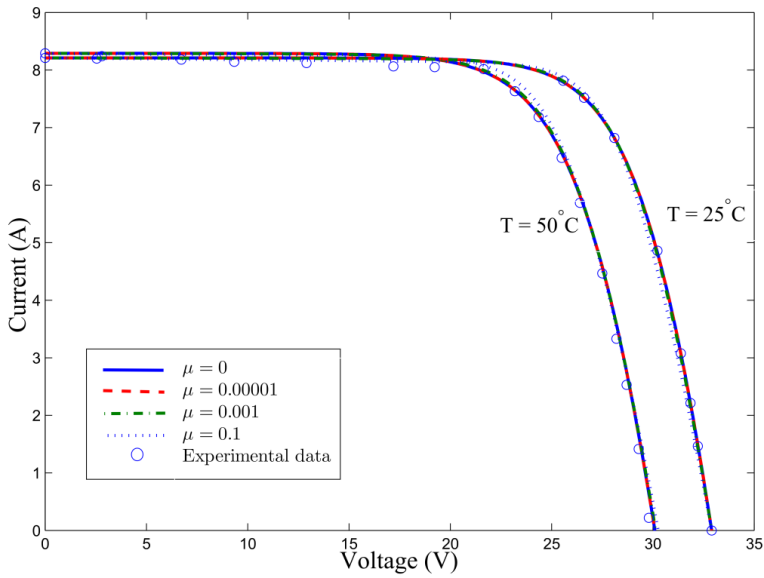


شکل ۷: تخمین ولتاژ حرارتی به ازای مقادیر مختلف  $\mu$



شکل ۸: منحنی مشخصه‌های جریان-ولتاژ و اطلاعات آزمایشگاهی ماژول فوتوولتائیک KC200GT

در شرایط تابش مختلف در  $T = 25^\circ C$



شکل ۹: منحنی مشخصه‌های جریان-ولتاژ و اطلاعات آزمایشگاهی ماژول فوتوولتائیک KC200GT در شرایط

$$G = 1000 \text{ W/m}^2 \text{ در دمای مختلف در}$$

جدول ۳: مقادیر  $NRMSE\%$  در دو محدوده متفاوت ولتاژ

$NRMSE\%$ $23 \leq V \leq 30$	$NRMSE\%$ $0 \leq V \leq 32.9$	
۱/۰.۳۲	۱/۳۴.۰۹	$\mu = 0$
۱/۰.۱۶۲	۱/۳۴.۰۰	$\mu = 1 \times 10^{-5}$
۱/۲۷۸۶	۱/۴۱۳۷	$\mu = 1 \times 10^{-3}$
۲/۹۲۸۴	۲/۹۸۶۹	$\mu = 1 \times 10^{-1}$
۱/۱۱۱۰	۱/۲۸۹۶	[۱۵]
۱/۳۴.۰۵	۱/۳۷۹۴	روش اول [۲۸]
۴/۴۵۸۹	۶/۰.۴۹۲	روش دوم [۲۸]

برای مقایسه الگوریتم پیشنهادی و سایر روش‌های مشابه، دو الگوریتم متفاوت که در [۱۵] و [۲۸] ارائه شده‌اند در نظر گرفته شده‌اند. شباهت اصلی این روش‌ها آن است که سعی می‌کنند پارامترهای مجهول را به گونه‌ای تخمین بزنند تا مقادیر MPP برای مدل‌های شبیه‌سازی شده و مدل‌های واقعی یکسان

باشد. از جدول ۳ مشاهده می‌شود که الگوریتم پیشنهادی با  $\mu \leq 1 \times 10^{-5}$  عملکرد به مراتب بهتری نسبت به هر دو روش ارائه شده در [۲۸] دارد. اگرچه عملکرد کلی در [۱۵] اندکی از عملکرد روش پیشنهادی در این مقاله بهتر است، با این حال در روش پیشنهادی مشخصه جریان-ولتاژ در نزدیکی شرایط MPP عملکرد بهتری را نسبت به [۱۵] نشان می‌دهد. علاوه بر این، در روش پیشنهادی منحصر به فرد بودن جواب و همگرایی روش تضمین شده است. همچنین روش پیشنهادی از هیچ تقریبی استفاده نمی‌کند و به انتخاب حدس اولیه حساسیت نشان نمی‌دهد.

برای اثبات کاربرد روش پیشنهادی برای همه ماژول‌های فوتوولتائیک خورشیدی سه ماژول فوتوولتائیک با فناوری و شرایط STC متفاوت مورد بررسی قرار گرفته‌اند. این سه ماژول به ترتیب ماژول چند بلوری (KD201GH-2PU)، تک بلوری (Shell SQ85) و فیلم نازک (Shell ST40) هستند [۱۶]. در شبیه‌سازی فرض شده است که

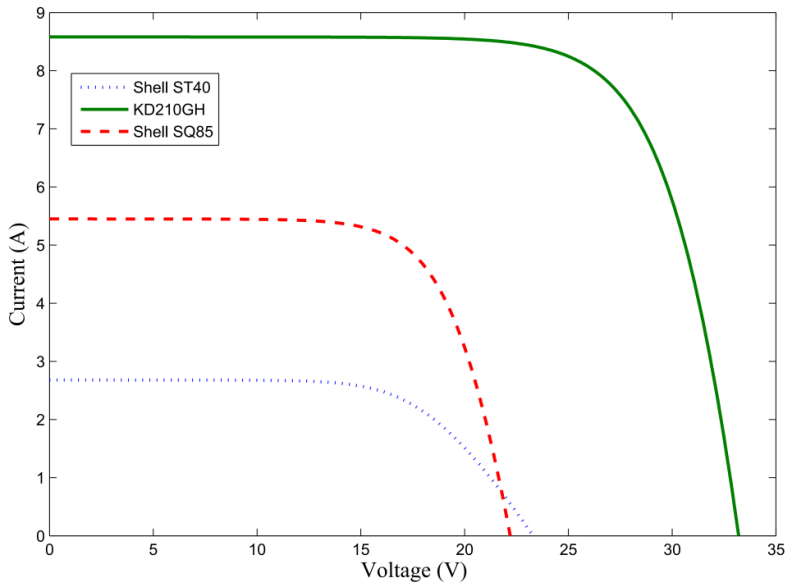
$k = 10$ ،  $\epsilon_1 = 1 \times 10^{-6}$ ،  $\epsilon = 0.02$  و پارامتر مانع  $\mu = 1 \times 10^{-5}$  باشند. شرایط اولیه  $\hat{\theta}_1(0) = 0.1$  و  $\hat{\theta}_3(0) = 1.3874$  ( $\hat{a}(0) = 1$ ) انتخاب شده‌اند. مقادیر پارامترهای تخمین زده شده برای سه ماژول فوتوولتائیک و همچنین مشخصه‌های جریان-ولتاژ و توان-ولتاژ متناظر آن‌ها به ترتیب در جدول ۴، شکل ۱۰ و شکل ۱۱ نشان داده شده‌اند. نکته قابل ذکر آن است که به ازای شرایط اولیه مختلف نتایج مشابهی به دست آمده است. از شکل ۱۰ می‌توان نتیجه گرفت که برای همه ماژول‌های فوتوولتائیک، مشخصه‌های جریان-ولتاژ قابل قبول در تمام محدوده شرایط کاری آن‌ها به دست می‌آید. برای اثبات دقت الگوریتم پیشنهادی در نزدیکی شرایط MPP، منحنی‌های توان-ولتاژ در شکل ۱۱ نشان داده شده‌اند. از این منحنی‌ها می‌توان نتیجه گرفت که برای هر ماژول فوتوولتائیک حداکثر توان در  $V_{mp}$  مربوطه آن به دست آمده است. اندازه خطای نسبی بین مقادیر توان شبیه‌سازی شده و واقعی در شرایط MPP را می‌توان به صورت (۳۰) به دست آورد:

$$Error(\%) = \left| \frac{P_{STC} - P_{sim}}{P_{STC}} \right| \times 100 \quad (30)$$

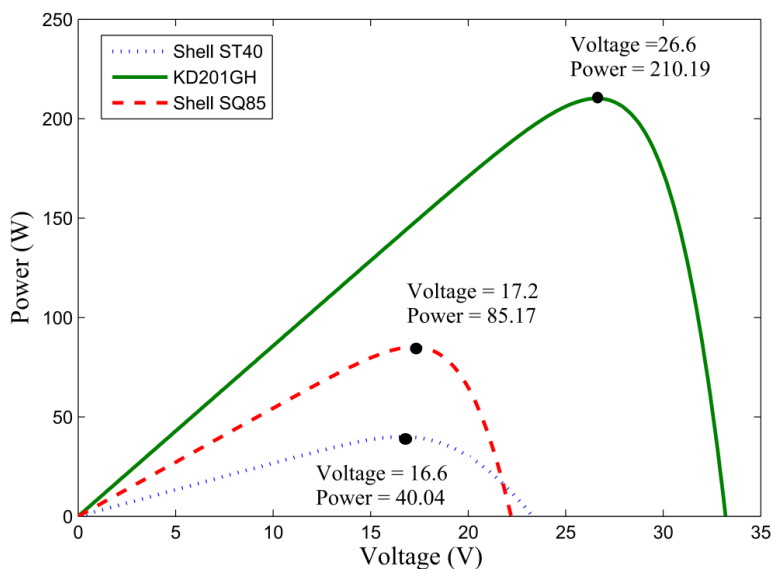
جدول ۴: پارامترهای تخمین زده شده برای ماژول‌های فوتوولتائیک مختلف

فیلم نازک Shell ST40	تک بلوری Shell SQ85	چند بلوری KD201GH-2PU	$V_{mp}(V)$
۱۶/۶	۱۷/۲	۲۶/۶	

۲/۴۱	۴/۹۵	۷/۹	$I_{mp}(A)$
۱/۳۷۴	-۰/۲۳۰۹	-۰/۱۳۲۱	$R_s(\Omega)$
۱/۴۶۸	۱/۶۱	۲/۱۸۷	$V_t(V)$
۱۰۶۰۱	۱۰۸۰۹	۱۵۱۶۰	$R_p(\Omega)$
-۰/۳۴۲۵	۵/۵۹۵۴	۲/۱۹۰۴	$I_0(\mu A)$
۲/۶۸۰۴	۵/۴۵۰۱	۸/۵۸۰۱	$I_{ph}(A)$



شکل ۱۰: منحنی مشخصه جریان-ولتاژ برای ماژول‌های فوتوولتائیک مختلف در شرایط STC



شکل ۱۱: منحنی مشخصه توان-ولتاژ برای ماژول‌های فوتوولتائیک مختلف در شرایط STC

که در آن  $P_{STC}$  حداکثر توان در شرایط STC و  $P_{sim}$  حداکثر توان تخمین زده شده از الگوریتم پیشنهادی است. مقادیر اندازه خطای نسبی برای ماژول‌های فوتوولتائیک KD201GH-2PU، Shell SQ85 و Shell ST40 در شرایط STC به ترتیب حدود ۰/۰۲۴، ۰/۰۳۵ و ۰/۰۸۵ درصد به دست آمده‌اند. نتایج ارائه شده کارایی بالایی روش پیشنهادی را برای مدل سازی دقیق فناوری‌های فوتوولتائیک مختلف به اثبات می‌رساند.

## ۵. نتیجه گیری

در این مقاله یک روش جایگزین برای تخمین پارامترهای مجهول در سیستم‌های فوتوولتائیک ارائه شده است. ابتدا یک مدل کاهش یافته از مدل پنج پارامتری به دست آمده و برای آن یک مساله بهینه‌سازی مقید نوشته شده است. به کمک تابع مانع اصلاح شده یک مساله بهینه سازی نامقید معادل استخراج می‌شود. مقادیر بهینه پارامترهای کاهش یافته و به دنبال آن تابع هدف تکمیل یافته توسط الگوریتم گرادیان نزولی به دست می‌آیند. روش پیشنهادی سریع و پیاده سازی آن آسان است و علی‌رغم حدس‌های اولیه ناممکن، جواب‌های منحصر به فرد و دقیقی را تولید می‌کند. برای اثبات کارایی،



روش پیه‌شنه‌ادی برای ماژول‌های فوتوولتائیک مختلف مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج به دست آمده پایداری روش پیشنهادی را تحت شرایط اولیه مختلف به اثبات می‌رساند.

## سپاسگزاری

نویسندگان این مقاله مایل هستند تا از بنیاد ملی نخبگان ایران برای حمایت مالی از این پروژه تشکر و قدردانی کنند.

## منابع

- [1] Pandey, A. K., Tyagi, V. V., Selvaraj, J. A., et al.: "Recent advances in solar photovoltaic systems for emerging trends and advanced applications," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 53, pp. 859–884, 2016.
- [2] Ma, T., Yang, H., Lu, L.: "Development of a model to simulate the performance characteristics of crystalline silicon photovoltaic modules/ strings/arrays," *Solar Energy*, Vol. 100, pp. 31–41, 2014.
- [3] De Soto, W., Klein, S. A., Beckman, W. A.: "Improvement and validation of a model for photovoltaic array performance," *Solar Energy*, Vol. 80, pp. 78–88, 2006.
- [4] Tian, H., Mancilla-David, F., Ellis, E., et al.: "A cell-to-module-to-array detailed model for photovoltaic panels," *Solar Energy*, Vol. 86, pp. 2965–2706, 2012.
- [5] Jena, D., Ramana, V. V.: "Modeling of photovoltaic system for uniform and non-uniform irradiance: A critical review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 52, pp. 400–417, 2015.
- [6] Caracciolo, F., Dallago, E., Finarelli, D. G., et al.: "Single-variable optimization method for evaluating solar cell and solar module parameters," *IEEE Journal of Photovoltaics*, Vol. 2, pp. 173–180, 2012.
- [7] Laudani, A., Fulginei, F. R., Salvini, A.: "High performing extraction procedure for the onediode model of a photovoltaic panel from experimental I-V curves by using reduced forms," *Solar Energy*, Vol. 103, pp. 316–326, 2014.
- [8] Muhsen, D.H., Ghazali, A.B., Khatib, T. and Abed, I.A., "Parameters extraction of double diode photovoltaic module's model based on hybrid evolutionary algorithm," *Energy Conversion and Management*, Vol. 105, pp.552-561, 2015.
- [9] Ting, T.O., Ma, J., Kim, K.S. and Huang, K., "Multicores and GPU utilization in parallel swarm algorithm for parameter estimation of photovoltaic cell model," *Applied Soft Computing*, Vol. 40, pp.58-63, 2016.
- [10] Batzelis, E.I. and Papathanassiou, S.A., "A Method for the Analytical Extraction of the Single-Diode PV Model Parameters," *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, Vol. 7, no. 2, pp.504-512, 2016.

- [11] Hejri, M., Mokhtari, H., Azizian, M.R., Ghandhari, M. and Söder, L., "On the parameter extraction of a five-parameter double-diode model of photovoltaic cells and modules," *IEEE Journal of Photovoltaics*, Vol. 4, no. 3, pp.915-923, 2014.
- [12] Mahmoud, Y.A., Xiao, W. and Zeineldin, H.H., "A parameterization approach for enhancing PV model accuracy," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 60, no. 12, pp.5708-5716, 2013.
- [13] Chakrasali, R.L., Sheelavant, V.R. and Nagaraja, H.N., "Network approach to modeling and simulation of solar photovoltaic cell," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 21, pp.84-88, 2013.
- [14] Khezzar, R., Zereg, M. and Khezzar, A., "Modeling improvement of the four parameter model for photovoltaic modules," *Solar Energy*, Vol. 110, pp.452-462, 2014.
- [15] Villalva, M.G., Gazoli, J.R. and Ruppert Filho, E., "Comprehensive approach to modeling and simulation of photovoltaic arrays," *IEEE Transactions on power electronics*, Vol. 24, no. 5, pp.1198-1208, 2009.
- [16] Soon, J.J. and Low, K.S., "Photovoltaic model identification using particle swarm optimization with inverse barrier constraint," *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 27, no. 9, pp.3975-3983, 2012.
- [17] Jain, A. and Kapoor, A., "Exact analytical solutions of the parameters of real solar cells using Lambert W-function," *Solar Energy Materials and Solar Cells*, Vol. 81, no. 2, pp.269-277, 2004.
- [18] Chatterjee, A., Keyhani, A. and Kapoor, D., "Identification of photovoltaic source models," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, Vol. 26, no. 3, pp.883-889, 2011.
- [19] Chouder, A., Silvestre, S., Sadaoui, N. and Rahmani, L., "Modeling and simulation of a grid connected PV system based on the evaluation of main PV module parameters," *Simulation Modelling Practice and Theory*, Vol. 20, no. 1, pp.46-58, 2012.
- [20] Bai, J., Liu, S., Hao, Y., Zhang, Z., Jiang, M. and Zhang, Y., "Development of a new compound method to extract the five parameters of PV modules," *Energy Conversion and Management*, Vol. 79, pp.294-303, 2014.
- [21] Pavan, A.M., Mellit, A. and Lughi, V., "Explicit empirical model for general photovoltaic devices: Experimental validation at maximum power point," *Solar Energy*, Vol. 101, pp.105-116, 2014.
- [22] Bastidas-Rodriguez, J.D., Petrone, G., Ramos-Paja, C.A. and Spagnuolo, G., "A genetic algorithm for identifying the single diode model parameters of a photovoltaic panel," *Mathematics and Computers in Simulation*, 2015.
- [23] Laudani, A., Mancilla-David, F., Riganti-Fulginei, F. and Salvini, A., "Reduced-form of the photovoltaic five-parameter model for efficient computation of parameters," *Solar Energy*, Vol. 97, pp.122-127, 2013.
- [24] Laudani, A., Fulginei, F.R. and Salvini, A., "Identification of the one-diode model for photovoltaic modules from datasheet values," *Solar Energy*, Vol. 108, pp.432-446, 2014.

- 
- [25] Silva, E.A., Bradaschia, F., Cavalcanti, M.C. and Nascimento, A.J., "Parameter Estimation Method to Improve the Accuracy of Photovoltaic Electrical Model," *IEEE Journal of Photovoltaics*, Vol. 6, no. 1, pp.278-285, 2016.
- [26] Guay, M., Moshksar, E. and Dochain, D., "A constrained extremum-seeking control approach," *International Journal of Robust and Nonlinear Control*, Vol. 25, no. 16, pp.3132-3153, 2015.
- [27] Nash, S.G., Polyak, R. and Sofer, A., "A numerical comparison of barrier and modified barrier methods for large-scale bound-constrained optimization," *In Large Scale Optimization*, pp. 319-338, 1994.
- [28] Shongwe, S. and Hanif, M., "Comparative analysis of different single-diode PV modeling methods," *IEEE Journal of Photovoltaics*, Vol. 5, no. 3, pp.938-946, 2015.