

## Analysis and Comparison of Advanced Maximum Power Point Tracking Techniques in Photovoltaic Systems: Challenges and Suggestions

**Mohammad Reza Najafi \***

M.Sc. Student, School of E-learning, Shiraz  
University, Shiraz, Iran.

**Ehsan Moshksar**

Assistant Professor, School of Advanced  
Technologies, Shiraz University, Shiraz, Iran.

### Abstract

Generation of electrical energy from renewable energy sources such as solar energy will be a vital part of energy supplying. In order to generate electrical energy from solar energy, the photovoltaic modules with nonlinear power-voltage characteristic are utilized. In normal operating condition, the power-voltage characteristic has a single maximum power point which is highly related to the environmental condition such as temperature and solar radiation. In addition, if some of solar cells receive different radiance in respect to the other cells (partial shading condition) multiple peaks are appeared in power-voltage curve. It is significant to recognize global maximum power point under partial shading condition and determination of maximum power for different environmental conditions. There are different methods for maximum power point tracking which can be classified as: 1- traditional methods 2- Intelligent and control-based methods 3- methods under partial shading condition. In this study, the model and characteristic of photovoltaic systems will be investigated and the challenges for maximum power point determination are evaluated. Then, different maximum power point algorithms are studied and a comprehensive comparison will be evaluated between them by considering performance, cost, complexity and hardware implementation indices. Also, the general advantages and disadvantages will be discussed. Finally, few suggestions will be provided on establishing more effective methods of maximum power point tracking for future investigations.

**Keywords:** photovoltaic system, maximum power point tracking, traditional method, meta-heuristic method, Intelligent method, hybrid method

Received: 23/October/2022

Accepted: 16/February/2023

ISSN: 2980-8936

## بررسی و مقایسه روش‌های نوین ردیابی نقطه بیشینه توان در سیستم‌های فتوولتائیک: چالش‌ها و پیشنهادات

محمدرضا نجفی \*

دانشکده آموزش‌های الکترونیکی، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران.

احسان مشکسار

استادیار، دانشکده فناوری‌های نوین، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران.

### چکیده

تولید انرژی الکتریکی از منابع تجدیدپذیر مانند انرژی خورشیدی، نقش بسیار مهمی در تأمین سبد انرژی جهان در آینده خواهد داشت. ماژول‌های فتوولتائیک مورد استفاده برای تولید انرژی الکتریکی خورشیدی دارای منحنی توان-ولتاژ غیر خطی هستند. در شرایط کاری معمولی، مشخصه توان-ولتاژ هر سیستم فتوولتائیک دارای یک نقطه بیشینه توان بوده که به شدت متأثر از شرایط محیطی دما و شدت تابش خورشید است. همچنین، در شرایطی که تعدادی از سلول‌های خورشیدی، تابشی متفاوت از سایر سلول‌های خورشیدی دریافت نمایند (شرایط سایه جزئی)، بیشتر از یک نقطه بیشینه در منحنی مشخصه توان-ولتاژ ایجاد می‌شود. تشخیص نقطه بیشینه توان مطلق در حالت سایه جزئی و همچنین، تعیین نقطه بیشینه توان به ازای شرایط محیطی مختلف از اهمیت بسزایی برخوردار است. روش‌های متفاوتی جهت ردیابی نقطه بیشینه توان وجود دارد که می‌توان آن‌ها را به سه دسته کلی روش‌های سنتی، روش‌های هوشمند و کنترلی و روش‌های تحت شرایط سایه جزئی تقسیم‌بندی نمود. در این تحقیق، ابتدا مطالعه‌ای بر روی سیستم‌های فتوولتائیک شامل مدل و رفتار این سیستم‌ها صورت گرفته و چالش‌های موجود در تعیین نقطه بیشینه توان بررسی خواهد شد. سپس، انواع روش‌های ردیابی نقطه بیشینه توان بررسی شده و یک مقایسه کلی بین این روش‌ها از نظر عملکرد، توجه‌پذیری اقتصادی، پیچیدگی الگوریتم، نیاز به سنسورها و سخت‌افزارهای مربوطه صورت گرفته و مزایا و معایب کلی هر کدام از روش‌ها شرح داده خواهد شد. در نهایت، پیشنهادهایی نیز جهت تحقیقات آینده در راستای ایجاد روش‌های مؤثرتر در ردیابی نقطه بیشینه توان ارائه خواهد شد.

**کلیدواژه‌ها:** سیستم فتوولتائیک، ردیابی نقطه بیشینه توان، شرایط سایه جزئی، روش سنتی، روش فرا-ابتکاری، روش هوشمند، روش ترکیبی

## مقدمه

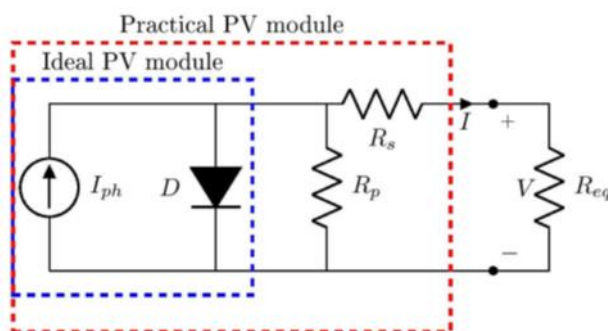
به دلیل پیشرفت‌های اقتصادی و فناوری در جهان، تقاضا برای انرژی الکتریکی با افزایش چشمگیری همراه است. همچنین، با افزایش روزافزون نگرانی‌ها در مورد گرم شدن جهانی هوای کره زمین، اثرات نامطلوب زیست‌محیطی و محدودیت‌های مرتبط با سوخت‌های فسیلی، اهداف و سیاست‌های جهانی در راستای استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر افزایش یافته است (Ahmad et al., 2020). از میان انواع انرژی‌های تجدیدپذیر مانند باد، خورشید، آب، جزر و مد، زمین گرمایی و زیست‌توده، انرژی خورشیدی به دلیل دسترسی پذیری بالا یکی از پر استفاده‌ترین منابع انرژی برای حفظ و دستیابی به پایداری محیط‌زیست است.

انواع مختلفی از سیستم‌های خورشیدی وجود دارند و همه آن‌ها با جذب انرژی خورشید از طریق وسایل مختلف عمل می‌کنند. در این میان، سیستم‌های فتوولتائیک<sup>۱</sup> (PV) پرکاربردترین هستند.

یک سلول خورشیدی، کوچک‌ترین عنصر فتوولتائیک بوده و در واقع، یک نیمه هادی سیلیکونی است که می‌تواند انرژی خورشیدی را به انرژی الکتریکی تبدیل نماید. از آنجاکه یک سلول خورشیدی، توان محدودی ایجاد می‌نماید، با سری نمودن چندین سلول خورشیدی یک ماژول خورشیدی<sup>۲</sup> ایجاد می‌شود. در نهایت، از اتصال سری/موازی ماژول‌های خورشیدی، آرایه‌های خورشیدی<sup>۳</sup> ایجاد می‌شوند. این فرآیند تحت عنوان اثر فتوولتائیک یا PV شناخته می‌شود. امروزه، سیستم‌های PV کاربردهای بسیاری داشته که یک مورد از آن، استفاده از این سیستم‌ها بر روی سقف خانه‌ها به منظور تأمین برق و حتی کمک به شبکه برق سراسری است. این فرآیند می‌تواند به هوشمندسازی خانه‌ها و به طور کلی، ایجاد یک شهر هوشمند، پاک و با توسعه پایدار کمک شایانی نماید (Bahramara, 2021).

## مدل ریاضی سیستم‌های فتوولتائیک

جهت شبیه‌سازی سیستم‌های PV و انجام پاره‌ای از محاسبات، داشتن مدل ریاضی از این سیستم‌ها بسیار سودمند خواهد بود. رایج‌ترین روش، استفاده از مدار معادل الکتریکی تک‌دیودی بوده که در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل ۱. مدار معادل سلول خورشیدی تک‌دیودی (Moshksar & Ghanberi, 2018)

در این شکل،  $R_s$  و  $R_p$  به ترتیب مقاومت سری و موازی،  $I_{ph}$  جریان نوری تولیدشده و  $V$  و  $I$ ، ولتاژ و جریان خروجی سلول هستند. مشخصه ولتاژ-جریان ( $I-V$ ) برای سلول خورشیدی به صورت غیرخطی تعریف می‌شود:

$$I = I_{ph} - I_0 \left[ \exp \left( \frac{V + I \times R_s}{a \times V_{th}} \right) - 1 \right] - \frac{V + I \times R_s}{R_p} \quad (1)$$

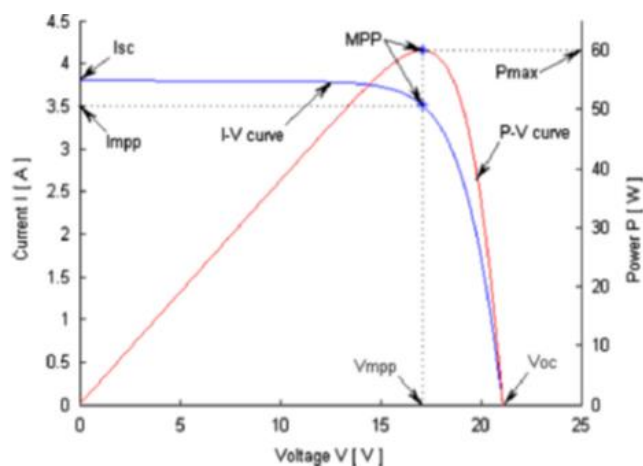
1. photovoltaic
2. Photovoltaic module
3. Photovoltaic array

در رابطه بالا،  $a$  فاکتور ایده آل دیود و  $V_{th}$  ولتاژ گرمایی سلول است. همان‌طور که ذکر شد، توان خروجی یک سلول PV کوچک بوده و برای تولید ولتاژ و توان مورد نیاز، سلول‌های PV به صورت سری و موازی متصل می‌شوند تا آرایه PV را ایجاد کنند. اتصال سلول‌ها به صورت سری، ولتاژ خروجی را افزایش داده و اتصال آن‌ها به صورت موازی، جریان خروجی را افزایش خواهد داد. برای یک آرایه فتوولتائیک با تعداد  $N_p$  سلول خورشیدی موازی و  $N_s$  سلول خورشیدی سری، مشخصه I-V به صورت زیر تعریف می‌شود (Mao et al., 2020):

$$I = N_p \times I_{ph} - N_p \times I_o \left[ \exp \left( \frac{V + I \times (N_s/N_p)}{N_s \times a \times V_{th}} \right) - 1 \right] - \frac{V + I \times (N_s/N_p) \times R_s}{(N_s/N_p) \times R_p} \quad (2)$$

از آنجا که توان الکتریکی برابر است با  $P=V \times I$ ، به راحتی می‌توان مشخصه ولتاژ-توان (P-V) را در آرایه‌های PV تعیین نمود.

مشخصه‌های غیر خطی I-V و P-V یک ماژول PV دلخواه در دمای ثابت  $T$  و در یک تابش خورشیدی یکنواخت و ثابت  $G$  توسط شکل ۲ نشان داده شده‌اند.



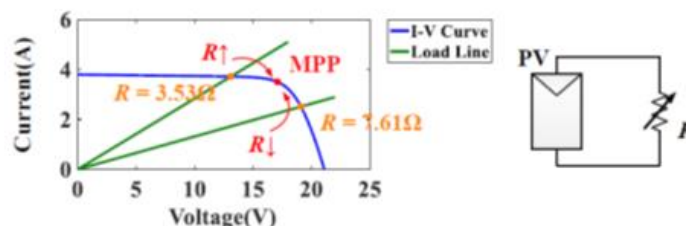
شکل ۲. مشخصه جریان-ولتاژ و توان-ولتاژ یک ماژول PV تحت دما و تابش ثابت (Boualem, Belmili & Krim, 2015)

در منحنی‌های I-V و P-V سه نقطه قابل توجه وجود دارد. نقطه اتصال کوتاه که در آن  $I_{sc}$  جریان اتصال کوتاه بوده و بزرگ‌ترین مقدار جریان تولید شده به ازای ولتاژ صفر است. نقطه مدار باز  $V_{oc}$  جایی که هیچ جریانی تولید نمی‌شود. نقطه حداکثر توان<sup>۱</sup> (MPP)  $(I_{mpp}, V_{mpp})$  در این نقطه، گفته می‌شود که ماژول PV در حداکثر بازده عمل کرده و حداکثر توان خروجی  $P_{max} = V_{mpp} \times I_{mpp}$  را تولید می‌کند.

### ردیابی نقطه بیشینه توان<sup>۲</sup> (MPPT) و چالش‌ها

بهینه‌ترین حالت کارکرد یک آرایه PV، عملکرد آن در شرایط MPP است. به عبارت دیگر، باید تدبیری در نظر گرفته شود تا آرایه همیشه در حالت MPP قرار داشته باشد و بهترین بازده از خروجی ایجاد شود. هنگامی که یک ماژول/آرایه PV به طور مستقیم به یک بار مصرفی متصل می‌شود، نقطه کار در تقاطع منحنی I-V آرایه PV و منحنی بار (قانون اهم) خواهد بود که بیشتر اوقات، این نقطه عملیاتی به MPP آرایه PV نمی‌رسد. این موضوع در شکل زیر نشان داده شده است.

1. Maximum power point  
2. Maximum power point tracking



شکل ۳. تطبیق امپدانس بار با خروجی آرایه PV (Li et al., 2019)

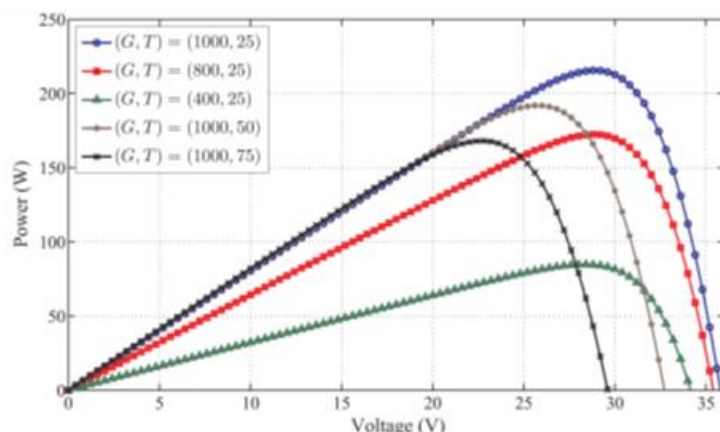
مطابق شکل ۳، اگر مقاومت بار کوچک باشد، منحنی بار در نزدیکی جریان اتصال کوتاه، منحنی I-V را قطع نموده و اگر بار بزرگ باشد، منحنی بار در نزدیکی ولتاژ اتصال باز، منحنی آرایه PV را قطع می‌نماید. در هر دو صورت، سیستم در حالت بهینه خود نبوده و بیشترین بازده حاصل نخواهد شد.

به منظور غلبه بر این مشکل، از روش‌هایی با نام ردیابی نقطه بیشینه توان (MPPT) استفاده می‌شود. این روش‌ها از دو منظر سخت‌افزاری و نرم‌افزاری قابلیت تحقیق دارند. برای پیاده‌سازی عملی و سخت‌افزاری ایده‌های MPPT از مدارهای الکترونیک قدرت و مبدل‌های الکتریکی DC-DC استفاده می‌شود. این مدارها از یک کلید الکترونیک قدرت بهره می‌برند که با یک چرخه کاری<sup>۱</sup> مشخص، قطع و وصل شده و در نهایت باعث می‌شود ولتاژ خروجی در یک مقدار مشخص مثلاً  $V_{mpp}$  قرار گیرد. در این ولتاژ، بیشینه توان خروجی  $(P_{max})$  از آرایه PV ایجاد می‌شود. قسمت نرم‌افزاری MPPT، یک الگوریتم بهینه‌سازی است که با اعمال این الگوریتم، مقدر مجهول  $V_{mpp}$  تشخیص داده شده و می‌توان به چرخه کاری بهینه برای دستیابی به این ولتاژ نامعلوم و توان بیشینه مربوطه نائل شد. در این مطالعه، تمرکز بر روی قسمت نرم‌افزاری یا همان الگوریتم‌های ریاضی بهینه‌سازی برای تعیین مقدار نامعلوم  $V_{mpp}$  تحت شرایط کاری متفاوت است.

### چالش‌های MPPT

همان‌طور که در شکل ۲ نشان داده شد، تحت دمای ثابت T و در تابش خورشیدی یکنواخت و ثابت G، منحنی غیرخطی P-V، تنها یک بیشینه محلی<sup>۲</sup> داشته و به همین جهت می‌توان با استفاده از الگوریتم‌های ساده بهینه‌سازی، ولتاژ  $V_{mpp}$  را به راحتی تعیین نمود. این امر در حالی است که مشخصه غیرخطی P-V در یک آرایه PV به شدت به میزان تابش خورشید و دمای سلول‌ها وابسته بوده و با تغییر آن‌ها، منحنی نیز می‌تواند تغییرات زیادی داشته باشد. از طرف دیگر، مقادیر G و T در طول روز بسیار متغیر بوده و مقدار نامعلوم  $V_{mpp}$  نیز در طول زمان تغییر خواهد کرد. در شکل ۴، تغییرات منحنی P-V با توجه به تغییرات شرایط محیطی شامل G و T برای یک ماژول PV دلخواه نمایش داده شده است.

1. Duty cycle  
2. Local maximum

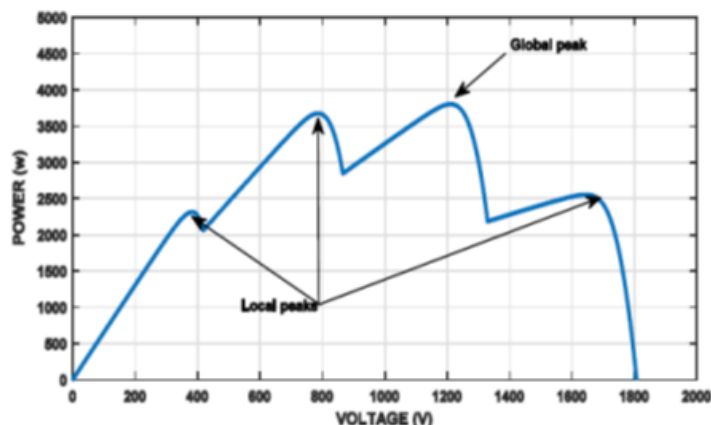


شکل ۴. مشخصه‌های P-V تحت شرایط متفاوت محیطی (Moshksar & Ghanberi, 2018)

قابل ذکر است که اعداد ذکر شده برای  $G$  و  $T$ ، به ترتیب بر حسب  $W/m^2$  و  $^\circ C$  هستند. همان‌طور که از شکل ۴ پیدا است، با تغییر  $G$  و  $T$  هم مقدار ولتاژ بهینه و هم مقدار توان بیشینه به صورت قابل ملاحظه‌ای تغییر می‌نمایند. به طور کلی، با توجه به شکل ۴ می‌توان گفت که توان خروجی ماژول PV با کاهش میزان تابش خورشید و با افزایش دمای ماژول، کاهش می‌یابد.

طبق مطالبی که تاکنون بیان شد، اگر تمامی سلول‌های خورشیدی در یک آرایه PV تحت شرایط یکسان از نظر تابش نور خورشید قرار داشته باشند، فقط یک نقطه بیشینه توان در منحنی P-V وجود خواهد داشت. حتی اگر میزان تابش خورشید، تغییرات زیادی در طول زمان داشته باشد ولی همه سلول‌ها در هر لحظه از زمان، تابش خورشید را به صورت یکسان دریافت نمایند، گفته می‌شود که سیستم تحت شرایط کاری عادی قرار دارد. در این شرایط، علی‌رغم آنکه منحنی P-V و مقدار بیشینه آن به تناسب تغییرات تابش خورشید تغییر نموده ولی همچنان تنها یک بیشینه محلی در مشخصه P-V برای هر لحظه از زمان ظاهر خواهد شد. باین حال، در بعضی از مواقع شرایطی به وجود خواهد آمد که یک یا بیشتر از سلول‌های خورشیدی، به علت عبور ابرها ساختمان‌ها، برگ درختان، فضولات پرندگان و سایر عوامل در سایه قرار گرفته و میزان تابش خورشید دریافتی آن‌ها متفاوت از سایر سلول‌های خورشیدی در آرایه شود. در این صورت، آن دسته از سلول‌هایی که دچار سایه گشته‌اند، مانند یک مصرف کننده توان عمل نموده و باعث می‌شوند که مشخصه P-V آرایه<sup>۱</sup> PV به کلی تغییر نماید. از سایه شدن یک یا تعدادی از سلول‌های خورشیدی با نام شرایط سایه جزئی<sup>۲</sup> (PSC) یاد شده و به دنبال آن، در مشخصه P-V دو یا بیشتر نقطه بیشینه محلی تشکیل می‌شود. در شکل ۵، منحنی P-V برای یک آرایه خورشیدی دلخواه در شرایط سایه جزئی نشان داده شده است.

1. Normal operating condition  
2. Partial shading condition



شکل ۵. مشخصه P-V یک آرایه خورشیدی در شرایط سایه جزئی (El-Helw, Magdy & Marei, 2017)

همان‌طور که در شکل ۵ مشخص است، چهار نقطه توان محلی وجود دارد که تنها یکی از آن‌ها نقطه توان بیشینه مطلق<sup>۱</sup> (GMPP) است؛ بنابراین، ممکن است الگوریتم‌های بهینه‌سازی معمولی به جای تشخیص GMPP در یکی از نقطه توان‌های محلی گیر کرده و در این صورت، بیشینه توان به بار مصرفی و یا شبکه منتقل نشده و بازده کاهش یابد. با توجه به چالش‌های ذکر شده، یک الگوریتم MPPT مناسب باید تعداد بیشتری از ویژگی‌های زیر را داشته باشد تا بتواند به عنوان یک تکنیک کارآمد مورد استفاده قرار گیرد:

دارای سرعت ردیابی بالایی باشد زیرا سرعت ردیابی آهسته منجر به کاهش توان استخراج شده و کارایی پایین سیستم‌های فتوولتائیک می‌شود.

- ۱) باید دقت و صحت بالایی داشته باشد و بتواند نقطه مربوط به حداکثر توان واقعی را پیدا کند.
- ۲) باید بتواند هم در شرایط عادی و هم در شرایط سایه جزئی، به طور مؤثر عمل کند. در PSC، چندین بیشینه محلی در منحنی P-V وجود دارد. در نتیجه، یافتن حداکثر توان مطلق یک عملیات چالش برانگیز است.
- ۳) باید بتواند حداکثر توان موجود را تحت تغییرات شدید ناگهانی در شرایط محیطی دما، شدت تابش و شرایط سایه جزئی ردیابی کند.
- ۴) باید مستقل از مدل سیستم بوده و برای سیستم‌های مختلف فتوولتائیک کارایی داشته باشد.
- ۵) باید کمترین میزان نوسان را در اطراف نقطه حداکثر توان داشته باشد.
- ۶) باید ساده بوده و به راحتی قابل پیاده‌سازی عملی باشد.

### الگوریتم‌های MPPT

الگوریتم‌های MPPT را از دیدگاه‌های گوناگونی می‌توان تقسیم نمود. یک تقسیم‌بندی خیلی کلی عبارت است از روش‌های وابسته به مدل و مستقل از مدل. در روش‌های وابسته به مدل، از مدل‌های ریاضی که توسط مدارهای معادل یا تطبیق منحنی به دست آمده‌اند، جهت تعیین MPP استفاده می‌شود. به طور کلی، این روش‌ها بسیار محدود بوده و عملکرد آن‌ها بسیار وابسته به دقت مدل ریاضی به دست آمده است. از دیگر محدودیت‌های اغلب روش‌های وابسته به مدل، نیاز به اندازه‌گیری‌های متغیرهای تابش و دما است که به طور نسبی، دشوار و پرهزینه است؛ بنابراین، روش‌های مستقل از مدل به دلیل عدم نیاز به یک مدل ریاضی و همچنین، عدم نیاز به سنسورهای اضافی برای اندازه‌گیری تابش و دما از محبوبیت بسیار بیشتری برخوردار هستند.



حال، تکنیک‌های مستقل از مدل را می‌توان از نقطه‌نظرهای متفاوت به دسته‌های گوناگونی تقسیم‌بندی نمود که در این مطالعه آن‌ها را به سه دسته اصلی طبقه‌بندی کرده‌ایم. دسته اول شامل تکنیک‌های سنتی<sup>۱</sup>، دسته دوم شامل تکنیک‌های مبتنی بر هوش مصنوعی<sup>۲</sup> (AI) و کنترل غیرخطی<sup>۳</sup> و درنهایت، دسته سوم شامل تکنیک‌های مناسب برای PSC هستند.

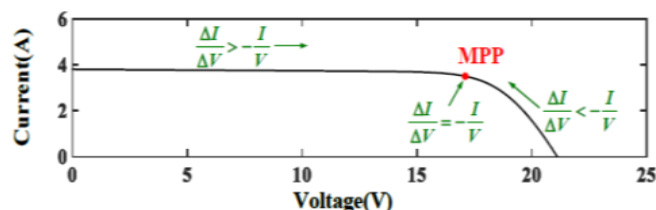
### روش‌های سنتی

در حالت کلی، روش‌های سنتی را می‌توان به روش‌های مبتنی بر انتخاب پارامتر و الگوریتم‌های مبتنی بر داده‌های نمونه‌برداری<sup>۴</sup> تقسیم‌بندی نمود. الگوریتم‌های مبتنی بر انتخاب پارامتر تلاش می‌کنند تا با استفاده از دانش پارامترهای تعینی کننده آرایه PV و پارامترهای اندازه‌گیری شده در شرایط عملیاتی به کنترل و ردیابی نقطه بیشینه توان دست یابند. به همین جهت، دقت پارامترهای مختلف در این مدل برای عملکرد این روش بسیار مهم است. همچنین، این تکنیک‌ها پیش‌بینی منحنی‌های مشخصه<sup>۵</sup> P-V و I-V آرایه را تحت شرایط عملیاتی داده‌شده ممکن ساخته و نقطه حداکثر توان را نیز تعیین می‌کنند. معروف‌ترین روش‌های ردیابی در این دسته عمدتاً شامل ردیابی ولتاژ ثابت<sup>۶</sup> (CVT) (Lasheen et al., 2017)، ردیابی ولتاژ مدار باز<sup>۷</sup> (OVT) (Veerapen et al., 2017)، ردیابی جریان اتصال کوتاه<sup>۸</sup> (SCT) (Sher et al., 2017) و روش پویش جریان<sup>۹</sup> (CS) (Noguchi et al., 2002) هستند. این روش‌ها علی‌رغم سادگی، نمی‌توانند به‌طور مؤثر کار ردیابی MPP را تحت تغییرات شدید دما و تابش انجام داده و دقت عملکردی پایینی دارند (Pilakkat & Kanthalakshmi, 2019).

در روش‌های مبتنی بر داده‌های نمونه‌برداری، با در نظر گرفتن داده‌های نمونه‌برداری شده مانند ولتاژ، جریان و توان از آرایه PV، نقطه حداکثر توان ردیابی می‌شود. حسن اصلی این روش‌ها آن است که بر هیچ مدلی از PV تکیه نداشته و پیاده‌سازی آن‌ها در عمل بسیار ساده است. از این رو، به‌طور گسترده مورد استفاده قرار می‌گیرند. روش اغتشاش و مشاهده<sup>۱۰</sup> (P&O)، یکی از معروف‌ترین این تکنیک‌ها بوده که با مقایسه متوالی تغییرات ولتاژ و تغییرات توان مقدار بهینه ولتاژ تعیین می‌شود (Ghamrawi et al., 2018). یکی دیگر از تکنیک‌های معروف در این زمینه، روش رسانایی افزایشی<sup>۱۱</sup> (IC) است (Kumar et al., 2019). اساس این تکنیک، مقایسه رسانایی لحظه‌ای<sup>۱۲</sup> I/V با رسانایی منفی شیب  $I/\Delta V$  بوده که در MPP برابر می‌شوند. این روش در مقایسه با P&O نوسان کمتری ایجاد نموده اما فرآیند کنترلی آن نسبتاً پیچیده‌تر است. در شکل ۶، نحوه رسیدن به نقطه MPP در روش IC نشان داده شده است.

- 
1. Traditional methods
  2. Artificial intelligent
  3. Nonlinear control
  4. Parameter selection
  5. Sampled data
  6. Constant voltage tracking
  7. Open-circuit voltage tracking
  8. Short-circuit current tracking
  9. Current scanning
  10. Perturb and observe
  11. Incremental conductance
  12. Parasitic capacitance



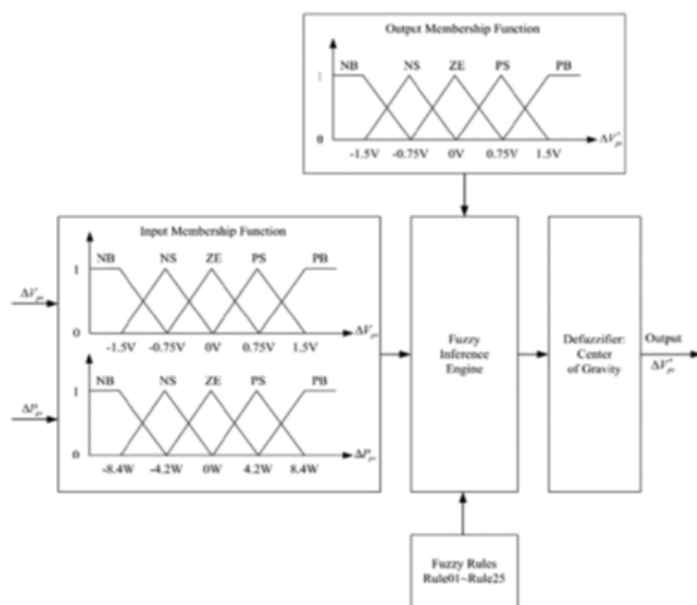


شکل ۶. نحوه رسیدن به نقطه MPP در روش رسانایی افزایشی (Li, Wang, Wen, Xiao, 2019)

از دیگر روش‌های مبتنی بر داده‌های نمونه‌برداری، می‌توان به ظرفیت خازنی پرازیتی<sup>۱</sup> (Wu et al., 2016) (PC)، کنترل همبستگی موج-دار (RCC) (Esram et al., 2006)، ترکیب آرایه فتولتائیک<sup>۲</sup> (PAC) (Nguyen & Lehman, 2008)، اندازه‌گیری واقعی<sup>۳</sup> (AM) (Hart et al., 1984) و فیدبک توان<sup>۴</sup> (PF) (Hua et al., 1998) اشاره نمود. از عمده معایب این تکنیک‌ها، نوسان توان خروجی، کند بودن نسبی در تغییرات شدید شرایط محیطی و عملکرد ضعیف در حضور PSC است.

### روش‌های هوش مصنوعی و کنترل غیرخطی

یک دسته دیگر از روش‌های MPPT، روش‌های هوشمند مانند کنترل منطق فازی<sup>۵</sup> (FLC) و شبکه عصبی مصنوعی<sup>۶</sup> (ANN) هستند. اساس FLC در MPPT، اعمال منطق فازی در سه مرحله فازی‌سازی، ارزیابی قوانین فازی و غیر فازی‌سازی برای تعیین ولتاژ بهینه است. ویژگی کلیدی FLC، ترکیب تجربه متخصص و دانش در قوانین زبانی برای کنترل سیستم است؛ بنابراین، FLC می‌تواند MPP را به سرعت ردیابی نموده و در شرایط پایدار، هیچ نوسانی بعد از رسیدن به MPP وجود ندارد؛ یعنی عملکرد سیستم هم در حالت ماندگار و هم در پاسخ گذرا قابل قبول است. شکل ۷، ساختار یک FLC را برای تعیین بیشینه نقطه توان در آرایه PV نمایش می‌دهد.

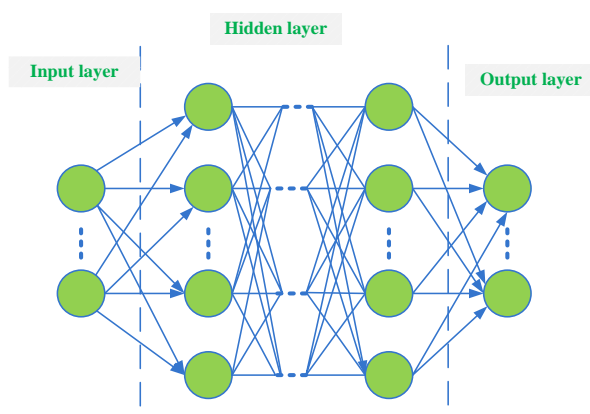


شکل ۷. ساختار FLC برای MPPT در آرایه PV (Farajdadian & Hosseini, 2019)

1. Ripple correlation control
2. Photovoltaic array combination
3. Actual measurement
4. Power feedback
5. Fuzzy logic control
6. Artificial neural network

با این حال، معایب اصلی FLC این است که تغییرات شدید تابش می‌تواند باعث انحراف الگوریتم از مقدار MPP شود. یکی دیگر از معایب این الگوریتم، پیچیدگی در پیاده‌سازی است به طوری که تعریف مجموعه‌های فازی، تعیین شکل توابع عضویت و توسعه جداول قوانین فازی نیاز به شهود و تجربه بیشتری داشته و این امر به شکل مستقیم بر سرعت ردیابی و دقت تأثیر می‌گذارد.

شبکه‌های عصبی مصنوعی از اصل کار سلول‌های عصبی مغز الگوبرداری می‌کنند تا مشکلات غیرخطی، مستقل و تصادفی سیستم را در زمان واقعی حل کنند. یک شبکه عصبی دارای سه لایه است؛ لایه ورودی، لایه پنهان و لایه خروجی. تعداد سلول‌های عصبی در هر لایه، متغیر و وابسته به مسئله است. معماری اساسی این شبکه در شکل ۸ آورده شده است.

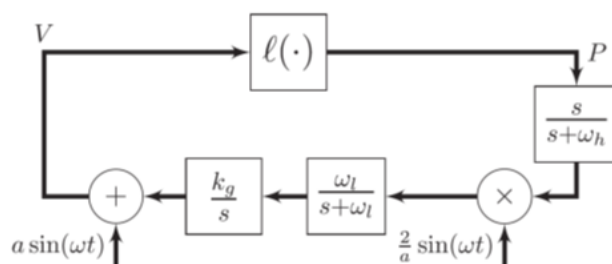


شکل ۸. معماری شبکه عصبی مصنوعی (Revathy & Kirubakaran, 2020)

جهت برپاسازی شبکه نیاز است که شبکه عصبی بر اساس دیتاهای ورودی و الگوریتم‌های مشخصی آموزش داده شود. اطلاعات از گره‌های ورودی به جلو و به سمت خروجی جریان می‌یابند. یک شبکه را می‌توان چندین بار آموزش داد تا زمانی که عملکرد مطلوب حاصل شود. از الگوریتم‌های معروف یادگیری می‌توان به Marquardt-Levenberg اشاره نمود. معمولاً متغیرهای ورودی می‌توانند پارامترهای جوی مانند دمای محیط و تابش خورشید، پارامترهای آرایه PV مانند جریان اتصال کوتاه، ولتاژ مدار باز و یا ولتاژ و جریان آرایه PV در نظر گرفته شوند. این متغیرهای ورودی توسط لایه‌های پنهان پردازش شده و خروجی الگوریتم مقدار ولتاژ بهینه با توجه به شرایط محیطی خواهد بود. عملکرد کلی ANN به عواملی مانند تعداد سلول‌های عصبی در لایه پنهان، عملکرد فعال‌سازی انتخاب شده و روند آموزش بستگی دارد. همچنین، صحت شبکه به کیفیت مجموعه داده‌های آموزش بستگی خواهد داشت. استفاده از کنترلرهای غیرخطی، روشی دیگر برای تعیین MPP در سیستم‌های PV است. یکی از تکنیک‌های معروف در این زمینه، استفاده از کنترلر مود لغزشی<sup>۱</sup> (SMC) است. این کنترلر با استفاده از تابع علامت و با تکیه بر تبدیل فرکانس بالای آن، سیستم حلقه بسته را وادار به رسیدن و باقی ماندن بر روی سطح لغزش طراحی شده می‌کند. این روش می‌تواند سرعت ردیابی سیستم PV را به طور قابل توجهی بهبود بخشد اما انتخاب اندازه گام عمق مدولاسیون دستگاه کلیدزنی بر مشخصات دینامیکی و حالت پایدار ردیابی سیستم تأثیرگذار خواهد بود. همچنین، ممکن است پدیده لرزش<sup>۲</sup> در این کنترلر به وجود آید که این امر موجب ایجاد دینامیک گذرای نامطلوب در پاسخ شده و می‌تواند موجب آسیب به سیستم سخت افزاری نیز شود.

1. Sliding mode control  
2. chattering

یکی دیگر از کنترلرهای محبوب در کاربردهای MPPT، استفاده از کنترلر جستجوگر اکستریم<sup>۱</sup> (ESC) است (Moshksar et al., 2019). این تکنیک، مستقل از مدل عمل نموده و می‌تواند به صورت بلادرنگ<sup>۲</sup> مسائل بهینه‌سازی حاوی عدم قطعیت<sup>۳</sup> را حل نماید. درواقع، فرض می‌شود که تابع هدف<sup>۴</sup> موردنظر مدل ریاضی مشخصی نداشته ولی قابل اندازه‌گیری<sup>۵</sup> باشد. سپس با تخمین تابع رادیان<sup>۶</sup> مربوط به تابع هدف و استفاده از قانون تطبیقی<sup>۷</sup> یک دینامیک به‌روزرسانی<sup>۸</sup> برای تعیین مقدار بهینه مجهول ایجاد می‌نماید. از محاسن این الگوریتم بهینه‌سازی، داشتن اثبات پایداری، دقت و مقاوم<sup>۹</sup> بودن است. ساختار کلی این الگوریتم، در شکل ۹ آورده شده است.



شکل ۹. ساختار ESC معمولی (Ghaffari et al., 2015)

به‌طور کلی، هم روش‌های هوشمند و هم روش‌های کنترلی اگرچه در مجموع عملکردی بهتر نسبت به روش‌های سنتی دارند اما همچنان در حالت PSC، عملکرد نامطلوبی از خود نشان می‌دهند. پس MPPT در این شرایط خاص، نیازمند الگوریتم‌هایی با عملکرد دقیق‌تر است.

### روش‌های مناسب برای PSC

برای غلبه بر مشکل افت توان خروجی با توجه به ویژگی چند نقطه اوج در منحنی مشخصه سیستم PV تحت PSC، برخی از محققان روش‌هایی را پیشنهاد کرده‌اند که افزایش دقت MPPT و ازاین‌رو، افزایش توان خروجی آرایه PV را به دنبال دارد. هم‌زمان با توسعه هوش مصنوعی و الگوریتم‌های هوشمند، روش‌های قابل اطمینان و عملی‌تر جهت ردیابی نقطه بیشینه توان در شرایط سایه جزئی و زمانی که چندین نقطه بیشینه محلی در منحنی توان وجود دارد، به وجود آمده است. به‌طور کلی، تمامی روش‌های MPPT تحت شرایط PSC را می‌توان به ۴ دسته خلاصه کرد:

۱- روش‌های کنترل سخت‌افزار مبتنی بر پیکربندی مجدد آرایه<sup>۱۰</sup>

۲- روش‌های فرا-ابتکاری<sup>۱۱</sup>

۳- روش‌های ترکیبی<sup>۱۲</sup>

۴- برخی از روش‌های MPPT بر اساس اصول دیگر

1. Extremum seeking control
2. real-time
3. uncertain
4. Objective function
5. measurable
6. Gradient function
7. Adaptive law
8. Update dynamics
9. robustness
10. Array reconfiguration
11. Meta-heuristic methods
12. Hybrid methods

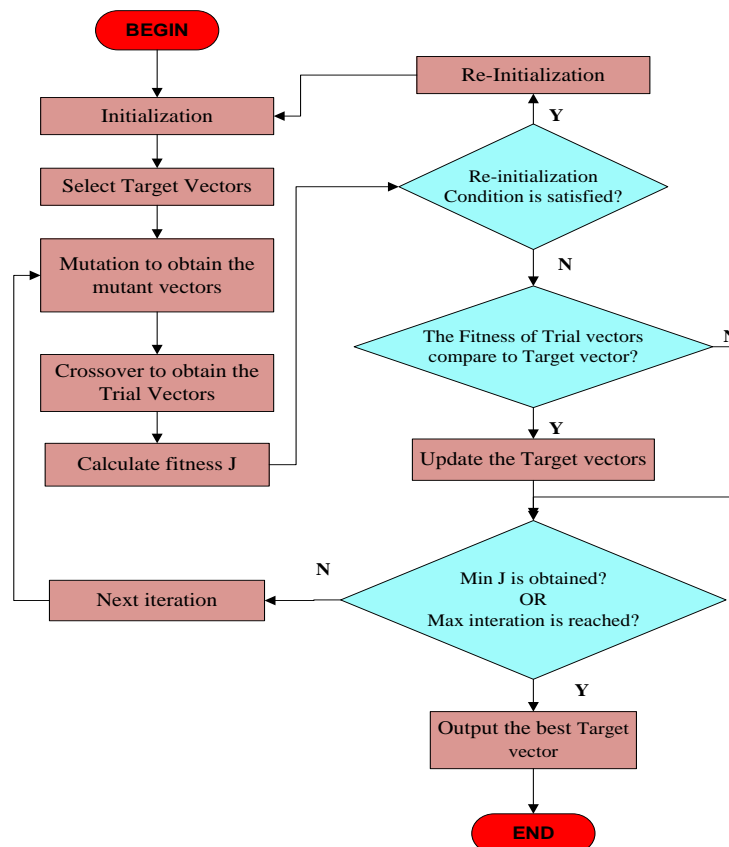
۱- روش‌های کنترل سخت‌افزار مبتنی بر پیکربندی مجدد آرایه PV به استفاده از سوئیچ‌ها، حسگرها و کنترل‌کننده‌ها برای تغییر پویای ساختار اتصال آرایه PV با هدف افزایش مصونیت سیستم به PSC اشاره دارد. ویژگی‌های این اتصالات از طریق شبیه‌سازی و آزمایش مورد تحلیل قرار گرفته است. علاوه بر این، عملکرد ساختارهای مشترک آرایه PV تحت PSC ارزیابی شده است. مشاهده شده است که تغییر ساختار مناسب اتصال آرایه می‌تواند موجب کاهش اثر سایه‌اندازی و افزایش توان خروجی شود. به عبارت دیگر، با تغییر نوع اتصالات سلول‌های خورشیدی می‌توان اثر سایه جزئی را تا حدودی از روی آرایه‌های PV حذف کرده و منحنی توان را در اطراف MPP نگه داشت (Krishna & Moger, 2019).

۲- الگوریتم‌های بهینه‌سازی مبتنی بر روش‌های فرا-ابتکاری؛ در حال حاضر در میان محبوب‌ترین روش‌های MPPT تحت شرایط PSC هستند چرا که این الگوریتم‌ها با الهام گرفتن از رفتار بهینه در حیوانات و حشرات می‌توانند GMPP را در شرایط پیچیده و غیرخطی پیدا کنند. یکی از پرکاربردترین الگوریتم‌ها در این زمینه، بهینه‌سازی ازدحام ذرات<sup>۱</sup> (PSO) است (Ishaque et al., 2012). این تکنیک یک روش بهینه‌سازی چندمنظوره است که با شبیه‌سازی رفتار جستجوی پرندگان توسعه یافته است. این ایده که چگونه پرندگان با رقابت و همکاری از حرکت فیزیکی خود برای سازگاری با محیط‌زیست استفاده می‌کنند، قابل انطباق برای راه‌حل بهینه‌سازی است. درواقع، تعدادی از ذرات برای یافتن بهترین راه‌حل در یک فضای جستجو حرکت می‌کنند. حرکات با پیروی از بهترین راه‌حل‌های یافت‌شده تنظیم شده است درحالی‌که تلاش برای یافتن راه‌حل جدید ادامه دارد. برای مواجهه با راه‌حل بهینه، باید به دنبال بهترین موقعیت ذره یا هم‌نشینی بهترین ذره بود. در کاربرد MPPT، ذره می‌تواند ولتاژ یا جریان خروجی و تابع هدف، توان خروجی باشد.

یکی دیگر از روش‌های محبوب در این زمینه، الگوریتم ژنتیک<sup>۲</sup> (GA) است. این الگوریتم دارای عملکرد جستجوی تصادفی است که انتخاب طبیعی جهان بیولوژیکی را شبیه‌سازی می‌کند و منجر به راه‌حل بهینه مسئله از طریق ژنتیک، تنوع، تقاطع و تکرار می‌شود. GA به‌خصوص برای مسائلی با تابع هدف غیرخطی و چند مودال در زمان واقعی، از کارایی بالایی برخوردار است. با این حال، GA بسیار پایدار نبوده و گاهی اوقات ممکن است سیستم در بهینه محلی باقی بماند (Shah & Singh, 2019). فلوچارت مربوط به نحوه عملکرد GA در شکل ۱۰ نشان داده شده است.

البته تکنیک‌های فرا-ابتکاری بسیاری برای MPPT ایجاد گشته که می‌توان به بهینه‌سازی کلونی مورچگان<sup>۳</sup> (ACO)، کلونی زنبور مصنوعی<sup>۴</sup> (ABC)، الگوریتم کرم شب‌تاب<sup>۵</sup> (FA)، الگوریتم ازدحام ضربه‌ای<sup>۶</sup> (SSA) و الگوریتم تکاملی تفاضلی<sup>۷</sup> (DEA) اشاره داشت (Mao et al., 2020). علی‌رغم توانایی الگوریتم‌های ذکرشده در تعیین GMPP، در این روش‌ها مشکلاتی مانند نیاز به اندازه‌گیری زمان واقعی داده‌ها، پیکربندی‌های خاص مدار و یا محاسبات طولانی وجود دارند.

- 
1. Particle swarm optimization
  2. Genetic algorithm
  3. Ant colony optimization
  4. Artificial bee colony
  5. Firefly algorithm
  6. Slap swarm algorithm
  7. Differential evolution algorithm



شکل ۱۰. فلوجارت الگوریتم ژنتیک (Mao et al., 2020)

۳- الگوریتم‌های بهینه‌سازی ذکرشده تاکنون، دارای مزایا و معایب خاص خود بوده و هیچ کدام از آنها به تنهایی نمی‌توانند تمامی چالش‌های موجود در MPPT را مرتفع سازند. یک راه‌حل مؤثر که می‌تواند منجر به الگوریتم‌های کاراتر، سریع‌تر و با دقت بالاتر تحت PSC شود، استفاده از روش‌های ترکیبی است. اساس این روش‌ها، ترکیب دو تکنیک مجزا مثلاً ترکیب یک تکنیک سنتی و یک تکنیک هوشمند، یک تکنیک سنتی و یک تکنیک فرا-ابتکاری یا ترکیب یک تکنیک هوشمند و یک تکنیک فرا-ابتکاری است. به این صورت، الگوریتم ترکیبی ضمن داشتن مزایای هر دو روش به صورت مجزا، معایب آن‌ها را نیز برطرف کرده و بازدهی کل سیستم فتوولتائیک را ارتقاء می‌بخشد. مثلاً اساس روش‌های ترکیبی سنتی و فرا-ابتکاری بدین صورت است که ابتدا جستجو را با حرکت دادن نقطه کار توسط یک الگوریتم فرا-ابتکاری منحرف کرده و سپس، نقطه بیشینه مطلق را با استفاده از یک الگوریتم سنتی در یک محدوده کوچک جستجو می‌کند. امروزه، به علت توانایی بالا و عملکرد بهینه، تمرکز زیادی بر روی الگوریتم‌های ترکیبی به منظور MPPT در سیستم‌های PV قرار گرفته است.

به عنوان مثال، از ترکیب روش سنتی P&O با الگوریتم‌های فرا-ابتکاری ABC (Pilakkat & Kanthalakshmi, 2019)، ACO (Sundareswaran et al., 2016) و PSO (Kermadi et al., 2019) برای جستجوی سریع‌تر و دقیق‌تر GMPP تحت PSC استفاده شده است. همچنین، الگوریتم حاصل از ترکیب FLC و P&O می‌تواند تحت تغییرات شدید تابش، به سرعت و با نوسانات خیلی کمتر نسبت به P&O معمولی، سیستم را به مجاورت MPP برساند. به علاوه، سیستم پیشنهادی به دلیل تعداد کمتر قوانین فازی، پیچیدگی کمتری در پیاده‌سازی و اجرا داشته و حداقل زمان پردازش را در مقایسه با FLC معمولی فراهم می‌کند (Al-Majidi et al., 2018). در مرجع (Revathy & Kirubakaran, 2020)، چهارده روش ترکیبی مختلف که همگی بر پایه روش ANN هستند،

بررسی شده و مزایا و معایب آن‌ها از لحاظ پیچیدگی الگوریتم، هزینه اجرای سخت‌افزاری، سرعت همگرایی به MPP، بازده، وابستگی به سیستم آرایه PV، قابلیت اطمینان در شرایط PSC، نیاز به تنظیمات دوره‌ای و نوسان در اطراف MPP مورد بررسی و مقایسه قرار گرفته است.

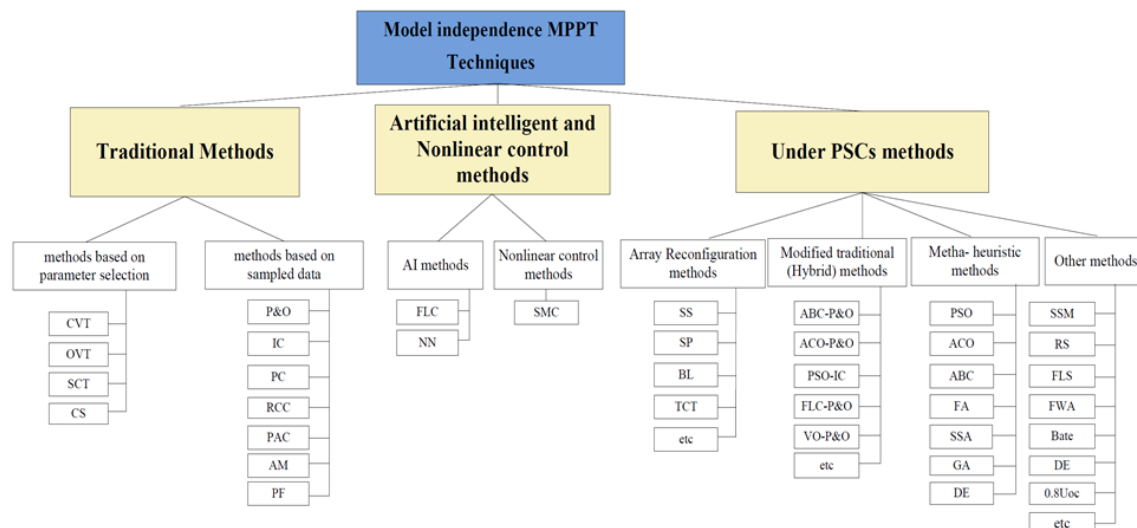
۴- دسته‌ای دیگر از روش‌های MPPT تحت PSC وجود دارند که به‌طور واضح در گروه‌های بررسی شده نیستند. مثال این مورد، روش جستجوی قطعه‌ای شده<sup>۱</sup> (SSM) است که یک روش جستجوی تصادفی با سرعت ردیابی بالا را در اختیار می‌گذارد (Liu et al., 2014). با این حال، SSM از نظر محاسباتی زمان‌بر بوده و دقت بالایی ندارد. همچنین، یک روش ابتکاری دیگر در تعیین GMPP، استفاده از ایده  $V_{oc} \cdot 0.8$  است که ادعا می‌کند پیک‌های ایجادشده تحت PSC عمدتاً در ضریب  $0.8$  از  $V_{oc}$  قرار خواهند داشت؛ هرچند در مرجع (Ahmed & Salam, 2015) نشان داده شده است که این ایده الزاماً دقیق نبوده (به‌ویژه برای آرایه‌هایی با تعداد زیادی ماژول) و یک راهکار برای افزایش دقت ارائه شده است. سایر روش‌های ابتکاری عبارت‌اند از جستجوی خطی فیبوناچی<sup>۲</sup> (FLS) (Ramaprabha et al., 2012)، الگوریتم بتا<sup>۳</sup> (BA) (Li et al., 2018) و الگوریتم آتش‌بازی<sup>۴</sup> (FWA) (Manickam et al., 2017).

### مقایسه الگوریتم‌های MPPT

به‌منظور جمع‌بندی، کل روش‌های ذکر شده و گروه‌بندی‌های مربوطه در گراف شکل ۱۱ ارائه گشته است. همچنین، عملکرد روش‌های MPPT از جنبه‌های پیچیدگی، سرعت ردیابی، هزینه، بازده، دقت، توانایی در نظرگیری PSC و سادگی در اجرای سخت‌افزاری با یکدیگر، مقایسه و نتیجه آن در جدول ۱ ارائه شده است.

طبق جدول ۱، روش‌های سنتی کمترین میزان پیچیدگی را داشته، روش‌های هوشمند و کنترلی، پیچیدگی متوسط و روش‌هایی که تحت PSC عمل می‌نمایند، بیشترین میزان پیچیدگی را دارا هستند. به لحاظ سرعت ردیابی، روش‌های سنتی کند-متوسط بوده و روش‌های هوشمند و عمل‌کننده تحت PSC سرعت ردیابی بالایی دارند. از لحاظ هزینه و اجرای سخت‌افزاری، روش‌های سنتی طیف گسترده‌ای از کم تا زیاد را دارند، روش‌های هوشمند و کنترلی پرهزینه و به لحاظ اجرا دارای پیچیدگی بوده و روش‌های تحت PSC عمدتاً پرهزینه بوده و به لحاظ اجرای سخت‌افزاری در دسته متوسط تا زیاد طبقه‌بندی می‌شوند. به لحاظ دقت و بازده، روش‌های سنتی کمترین میزان و روش‌های هوشمند دقت متوسط تا زیاد داشته و روش‌های تحت PSC عمدتاً دقت زیادی را نشان داده که از میان آن‌ها، روش‌های ترکیبی بیشترین بازده و دقت را به خود اختصاص می‌دهند.

1. Segmentation search method  
2. Fibonacci linear search  
3. Beta algorithm  
4. Firework algorithm



شکل ۱۱. دسته‌بندی تکنیک‌های MPPT

جدول ۱. مقایسه کیفی عملکرد روش‌های مختلف MPPT

Model independence MPPT Techniques		MPPT performance indicators						
		MPPT	Complexity	Tracking speed	Cost	Efficiency	Accuracy	Preference with PSC
Traditional Methods	methods based on parameter selection	CVT	Low	Medium	Low	<90%	Low	Unable
		OVT	Low	Medium	Low	<90%	Low	Unable
		SCT	Low	Medium	Low	<90%	Low	Unable
		CS	Low	Slow	Medium	<90%	Low	Unable
	methods based on sampled data	P&O	Medium-low	Medium	Medium	>95%	Medium	Unable
		IC	Medium	Medium	Medium	>97%	Medium-high	Unable
		PC	Medium-high	Medium	High	>97%	Medium-high	Unable
		RCC	Medium	Medium	Medium	>97%	Medium	Unable
		PAC	High	Slow	High	<90%	Medium-low	Unable
		AM	Medium	Slow	High	<90%	Medium	Unable
		PF	Medium-low	Slow	Medium	>90%	Medium-low	Unable
Artificial intelligent and Nonlinear control methods	AI methods	FLC	Medium-high	Fast	High	>98%	Medium-high	Able
	NN	High	Fast	High	>98%	Medium-high	Able	Difficult
Under PSCs methods	Nonlinear control methods	SMC	Medium	Fast	High	>98%	Medium-high	Able
	Array Reconfiguration methods	SS	High	Slow	High	<90%	Medium-low	Difficult
		SP						
		BL						
		TCT						
	Modified traditional (Hybrid) methods	ABC-P&O	High	Fast	High	>99%	High	Able
		ACO-P&O						
		PSO-IC						
		FLC-P&O						
	Metha- heuristic methods	VO-P&O	Medium-high	Fast	High	>98%	High	Able
		PSO						
		ACO						
		ABC						
		FA						
		SSA						
Other methods		GA	Medium-high	Fast	High	>98%	Medium-high	Able
		DE	Medium	Fast	High	>98%	Medium-high	Able
		SSM	Medium-high	Fast	High	>98%	Medium-high	Medium
		RS						
		FLS						
		FWA						
Other methods		Bate	Medium	Fast	High	>98%	High	Able
		0.8Uoc	Medium-low	Medium	Medium	<90%	Medium-low	Able

## نتیجه‌گیری و پیشنهادات

به‌عنوان یک نتیجه‌گیری کلی می‌توان ادعا نمود که روش‌های ترکیبی قادر هستند مشکلاتی را که در هر دو روش ترکیب شده، به‌صورت مجزا وجود دارد، کاهش داده و در نهایت منجر به الگوریتم‌هایی با دقت و سرعت بالا برای دستیابی به MPP تحت هرگونه شرایط محیطی و در حضور PSC شوند. به‌صورت تخصصی‌تر می‌توان گفت که با وجود پیچیدگی نرم‌افزاری، سخت‌افزاری و هزینه بالا، روش‌های ترکیبی توانایی افزایش سرعت، دقت و بازده را



تحت شرایط مختلف داشته و بسیاری از چالش‌های ذکر شده در MPPT را مرتفع می‌سازند. همچنین، با در نظر گیری اهمیت مزایای ذکر شده برای روش‌های ترکیبی، استفاده از این الگوریتم حتی با وجود معایب آن‌ها توجیه‌پذیر خواهد بود.

تحقیقات بر روی الگوریتم‌های متنوع MPPT برای سیستم‌های PV یک موضوع فعال و به‌روز بوده اما همچنان پژوهش‌های بیشتری نیز برای دستیابی به الگوریتم‌های کارا تر مورد نیاز است. بر این اساس، پیشنهادات جهت مسیرهای احتمالی تحقیقات آینده در روش‌های MPPT به شرح زیر خواهد بود:

- ۱- در نظر گیری روش‌های ترکیبی جدید تر و با عملکرد بهتر؛
- ۲- مدل‌سازی دقیق تر PSC که می‌تواند از حالت استاتیک، متغیر آهسته تا متغیر سریع متفاوت باشد؛
- ۳- استاندارد سازی شاخص‌های ارزیابی عملکرد MPPT.

## منابع

- Ahmad, L., Khordehgah, N., Malinauskaite, J., & Jouhara, H. (2020). Recent advances and applications of solar photovoltaics and thermal technologies. *Energy*, 207, 118254.
- Ahmed, J., & Salam, Z. (2015). An improved method to predict the position of maximum power point during partial shading for PV arrays. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 11(6), 1378-1387.
- Al-Majidi, S. D., Abbod, M. F., & Al-Raweshidy, H. S. (2018). A novel maximum power point tracking technique based on fuzzy logic for photovoltaic systems. *International Journal of Hydrogen Energy*, 43(31), 14158-14171.
- Bahramara, S. (2021). Robust optimization of the flexibility-constrained energy management problem for a smart home with rooftop photovoltaic and an energy storage. *Journal of Energy Storage*, 36, 102358.
- Bendib, B., Belmili, H., & Krim, F. (2015). A survey of the most used MPPT methods: Conventional and advanced algorithms applied for photovoltaic systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 45, 637-648.
- El-Helw, H. M., Magdy, A., & Marei, M. I. (2017). A hybrid maximum power point tracking technique for partially shaded photovoltaic arrays. *IEEE access*, 5, 11900-11908.
- Esram, T., Kimball, J. W., Krein, P. T., Chapman, P. L., & Midya, P. (2006). Dynamic maximum power point tracking of photovoltaic arrays using ripple correlation control. *IEEE Transactions on power electronics*, 21(5), 1282-1291.
- Farajdadian, S., & Hosseini, S. H. (2019). Optimization of fuzzy-based MPPT controller via metaheuristic techniques for stand-alone PV systems. *International journal of hydrogen energy*, 44(47), 25457-25472.
- Ghaffari, A., Seshagiri, S., & Krstić, M. (2015). Multivariable maximum power point tracking for photovoltaic micro-converters using extremum seeking. *Control Engineering Practice*, 35, 83-91.
- Ghamrawi, A., Gaubert, J. P., & Mehdi, D. (2018). A new dual-mode maximum power point tracking algorithm based on the Perturb and Observe algorithm used on solar energy system. *Solar Energy*, 174, 508-514.
- Hart, G. W., Branz, H. M., & Cox Iii, C. H. (1984). Experimental tests of open-loop maximum-power-point tracking techniques for photovoltaic arrays. *Solar cells*, 13(2), 185-195.
- Hua, C., Lin, J., & Shen, C. (1998). Implementation of a DSP-controlled photovoltaic system with peak power tracking. *IEEE transactions on industrial electronics*, 45(1), 99-107.
- Ishaque, K., Salam, Z., Shamsudin, A., & Amjad, M. (2012). A direct control based maximum power point tracking method for photovoltaic system under partial shading conditions using particle swarm optimization algorithm. *Applied Energy*, 99, 414-422.
- Kermadi, M., Salam, Z., Ahmed, J., & Berkouk, E. M. (2019). An effective hybrid maximum power point tracker of photovoltaic arrays for complex partial shading conditions. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 66(9), 6990-7000.
- Krishna, G. S., & Moger, T. (2019). Reconfiguration strategies for reducing partial shading effects in photovoltaic arrays: State of the art. *Solar Energy*, 182, 429-452.

- Kumar, R., Khandelwal, S., Upadhyay, P., & Pulipaka, S. (2019). Global maximum power point tracking using variable sampling time and pv curve region shifting technique along with incremental conductance for partially shaded photovoltaic systems. *Solar Energy*, 189, 151-178.
- Lasheen, M., Abdel Rahman, A. K., Abdel- Salam, M., & Ookawara, S. (2017). Adaptive reference voltage- based MPPT technique for PV applications. *IET Renewable Power Generation*, 11(5), 715-722.
- Li, X., Wang, Q., Wen, H., & Xiao, W. (2019). Comprehensive studies on operational principles for maximum power point tracking in photovoltaic systems. *IEEE Access*, 7, 121407-121420.
- Li, X., Wen, H., Hu, Y., Jiang, L., & Xiao, W. (2018). Modified beta algorithm for GMPPT and partial shading detection in photovoltaic systems. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 33(3), 2172-2186.
- Liu, Y. H., Chen, J. H., & Huang, J. W. (2014). Global maximum power point tracking algorithm for PV systems operating under partially shaded conditions using the segmentation search method. *Solar Energy*, 103, 350-363.
- Manickam, C., Raman, G. P., Raman, G. R., Ganesan, S. I., & Chilakapati, N. (2017). Fireworks enriched P&O algorithm for GMPPT and detection of partial shading in PV systems. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 32(6), 4432-4443.
- Mao, M., Cui, L., Zhang, Q., Guo, K., Zhou, L., & Huang, H. (2020). Classification and summarization of solar photovoltaic MPPT techniques: A review based on traditional and intelligent control strategies. *Energy Reports*, 6, 1312-1327.
- Moshksar, E., & Ghanbari, T. (2018). A model-based algorithm for maximum power point tracking of PV systems using exact analytical solution of single-diode equivalent model. *Solar Energy*, 162, 117-131.
- Moshksar, E., & Ghanbari, T. (2018). Real- time estimation of solar irradiance and module temperature from maximum power point condition. *IET Science, Measurement & Technology*, 12(6), 807-815.
- Moshksar, E., Ghanbari, T., Samet, H., & Guay, M. (2019). Estimation-based extremum-seeking control: A real-time approach for improving energy efficiency in photovoltaic systems. *IEEE systems journal*, 13(3), 3141-3152.
- Nguyen, D., & Lehman, B. (2008). An adaptive solar photovoltaic array using model-based reconfiguration algorithm. *IEEE Transactions on industrial Electronics*, 55(7), 2644-2654.
- Noguchi, T., Togashi, S., & Nakamoto, R. (2002). Short-current pulse-based maximum-power-point tracking method for multiple photovoltaic-and-converter module system. *IEEE Transactions on Industrial electronics*, 49(1), 217-223.
- Pilakkat, D. Kanthalakshmi, S. (). An improved P&O algorithm integrated with artificial bee colony for photovoltaic system 2019 under partial shading condition. *Solar Energy*, Vol. 178, pp. 37-47.
- Pilakkat, D., & Kanthalakshmi, S. (2019). An improved P&O algorithm integrated with artificial bee colony for photovoltaic systems under partial shading conditions. *Solar Energy*, 178, 37-47.
- Ramaprabha, R., Balaji, M., & Mathur, B. L. (2012). Maximum power point tracking of partially shaded solar PV system using modified Fibonacci search method with fuzzy controller. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 43(1), 754-765.
- Revathy, S. R., & Kirubakaran, V. (2020). A critical review of artificial neural network base maximum power point tracking techniques. *Journal of Critical Reviews*, 7, 400-412.
- Shah, P., & Singh, B. (2018). Robust EnKF with improved RCGA-based control for solar energy conversion systems. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 66(10), 7728-7740.
- Sher, H. A., Rizvi, A. A., Addoweesh, K. E., & Al-Haddad, K. (2016). A single-stage stand-alone photovoltaic energy system with high tracking efficiency. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 8(2), 755-762.
- Sundareswaran, K., Vigneshkumar, V., Sankar, P., Simon, S. P., Nayak, P. S. R., & Palani, S. (2016). Development of an improved P&O algorithm assisted through a colony of foraging ants for MPPT in PV system. *IEEE transactions on industrial informatics*, 12(1), 187-200.
- Veerapen, S., Wen, H., & Du, Y. (2017). Design of a novel MPPT algorithm based on the two stage searching method for PV systems under partial shading. In *2017 IEEE 3rd International Future Energy Electronics Conference and ECCE Asia (IFEEC 2017-ECCE Asia)* (pp. 1494-1498). IEEE.

Wu, T. H., Liu, W. C., Moo, C. S., Cheng, H. L., & Chang, Y. N. (2016). An electric circuit model of photovoltaic panel with power electronic converter. In *2016 IEEE 17th Workshop on Control and Modeling for Power Electronics (COMPEL)* (pp. 1-6). IEEE.

**استناد به این مقاله:** نجفی، محمدرضا و مشکسار، احسان. (۱۴۰۱). بررسی و مقایسه روش‌های نوین ردیابی نقطه بیشینه توان در سیستم‌های فتوولتائیک: چالش‌ها و پیشنهادات. فصلنامه پژوهش‌های نوین در شهر هوشمند، ۱(۲)، ۳۷-۵۴.



New Researches in The Smart City is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License.