



## ارائه مدل عملکرد سیستم خورشیدی دارای کنترلر MPPT در شرایط مختلف دما و تابش

سید محمد صادق غیاثی، محسن کلانتر

جهت تولید انرژی الکتریکی [2] که بر اساس اصول فتو-الکترونیک انرژی حاصل از تابش خورشید را به صورت مستقیم به برق DC تبدیل می‌کند. در این مقاله بحث به صورت اخص به شیوه اخیر مربوط خواهد بود.

امروزه استفاده از سیستم‌های خورشیدی به علت مزایایی از جمله عدم آلودگی، عدم نیاز به تعمیر و نگهداری و نیز هزینه بهره‌برداری ناچیز بسیار رونق یافته است؛ هر چند کاهش تدریجی قیمت سیستم‌های خورشیدی روز به روز باعث افزایش کاربرد آن‌ها می‌گردد، اما همچنان هزینه نصب و سرمایه‌گذاری اولیه بسیار بالا تنها دلیل بازدارنده در رشد سریع استفاده از آن‌هاست [3]. همین مسئله باعث اهمیت بهره‌برداری مؤثر و توجه به استخراج حداکثر توان قابل تولید در آن‌ها می‌گردد. موضوع بهره‌برداری مؤثر از آرایه‌های خورشیدی با چند مسئله مواجه است:

- به علت حرکت وضعی و چرخشی زمین، به منظور دریافت تابش عمودی و مستقیم در طول زمان همواره یک وضعیت خاص برای آرایه‌های خورشیدی مناسب نیست. به همین منظور پانل‌های خورشیدی برای آن که همواره رو به خورشید قرار بگیرند باید به موتور پله‌ای یا تمهیدات دیگری برای استفاده از حداکثر تابش مجهز گردند. چنین آرایش ساختاری متغیری که ردیابی مکانیکی نامیده می‌شود، باعث افزایش تولید توان الکتریکی خواهد بود [4].
- به علت خاصیت غیرخطی جریان-ولتاژی آرایه خورشیدی، توان استحصال از آن به نقطه کار و خط بار وابسته خواهد بود. با توجه به مشخصه توان-جریانی آرایه خورشیدی، به ازای هر تابش و دمای خاص، یک نقطه حداکثر توان<sup>1</sup> خاص وجود دارد؛ بنابراین لازم است به ازای هر تغییر در تابش و دما، اقداماتی جهت دست

چکیده - همزمان با افزایش چشمگیر تقاضای جهانی برای انرژی الکتریکی، استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر در سال‌های اخیر به علت مزایای بارز آن جایگاه ویژه‌ای را در تأمین این تقاضا به خود اختصاص داده است. در میان این منابع تجدیدپذیر، انرژی خورشیدی سهم مهمی را به خود اختصاص داده و همین مسئله نیاز به تحقیقات بیشتر در این زمینه را باعث گشته است. در این مقاله، ابتدا یک مدل ریاضی کامل از ماژول و آرایه فتوولتائیک ارائه خواهد شد. در گام بعدی با ارائه مدل محاسبه‌کننده MPP و بررسی صحت آن برای یک نمونه واقعی و سپس به دست آوردن منحنی‌های مختلف ماژول تحت شرایط استاندارد، به مقایسه آن‌ها با اطلاعات کارخانه سازنده پرداخته می‌شود. همچنین اثر تغییر پارامترهای تابش و دما بر کارکرد سیستم فتوولتائیک نیز بررسی شده و به منظور اطلاع از صحت عملکرد مدل، نتایج به دست آمده با تئوری‌های موجود مقایسه خواهد شد.

واژه‌های کلیدی - شرایط استاندارد، مدل ماژول فتوولتائیک، مشخصه توان-جریان، مشخصه ولتاژ-جریان، نقطه ماکزیمم توان.

### 1- مقدمه

تشعشعات خورشید دارای توان بسیار بالایی است که تنها حدود  $1,8 \times 10^{11}$  مگاوات از آن توسط زمین دریافت می‌شود که این مقدار انرژی چندین هزار برابر مصرف جهانی است. همین مسئله توجه محققان برای بهره‌برداری از این حجم بالای انرژی به منظور برطرف کردن نیاز روزافزون مصرف جهانی را به خود معطوف کرده است. به منظور بهره‌برداری از انرژی خورشیدی دو روش کلی وجود دارد؛ یکی استفاده از کلکتورهای خورشیدی جهت استفاده به صورت انرژی گرمایی [1] و دیگر استفاده از سلول‌های خورشیدی

سید محمد صادق غیاثی، قطب علمی اتوماسیون و بهره‌برداری سیستم‌های قدرت، دانشکده مهندسی برق - دانشگاه علم و صنعت ایران ([mghiasi@ee.iust.ac.ir](mailto:mghiasi@ee.iust.ac.ir))  
دکتر محسن کلانتر، قطب علمی اتوماسیون و بهره‌برداری سیستم‌های قدرت، دانشکده مهندسی برق - دانشگاه علم و صنعت ایران ([kalantar@iust.ac.ir](mailto:kalantar@iust.ac.ir))

<sup>1</sup> Maximum Power Point.

## 2- مدل ماژول و آرایه فتوولتائیک

به دو روش می توان ماژول فتوولتائیک را مدل کرد که این دو روش عبارتند از:

- روش الکتریکی: که به وسیله قرار دادن مدل الکتریکی سلول فتوولتائیک به جای هر سلول به دست می آید. این روش چون جواب دقیقی به دست نمی دهد و شبیه سازی آن نیز مشکل است، معمولاً به ندرت مورد استفاده قرار می گیرد.
- روش مدل ریاضی: این مدل در سال 1994 میلادی توسط شخصی به نام *Lorenzo* ابداع شد [9]. مزیت این مدل در آن است که می توان تنها با استفاده از اطلاعات و داده های ارائه شده توسط سازنده آن را ایجاد کرد. جریان ماژول فتوولتائیک  $I^M$  در شرایط عملکرد اختیاری را می توان از (1) به دست آورد. لازم به ذکر است که تمامی روابط ارائه شده در این بخش از مراجع [9] و [10] استخراج شده است.

$$I^M = I_{SC}^M \left[ 1 - \exp \left( \frac{V^M - V_{OC}^M + I^M R_S^M}{V_t^M} \right) \right] \quad (1)$$

معادله (1) برای محاسبه  $I^M$  یک معادله مستقیم نیست و خود به پارامترهایی بستگی دارد:

- جریان اتصال کوتاه ماژول:

$$I_{SC}^M = N_{PM} I_{SC}^C \quad (2)$$

- ولتاژ مدار باز ماژول:

$$V_{OC}^M = N_{SM} V_{OC}^C \quad (3)$$

- مقاومت موازی معادل ماژول:

$$R_S^M = \frac{N_{SM}}{N_{PM}} R_S^C \quad (4)$$

- ولتاژ حرارتی در نیمه هادی یک سلول خورشیدی:

$$V_t^C = \frac{mkT^C}{e} \quad (5)$$

عملکرد یک ماژول یا هر ابزار فتوولتائیک در شرایط مشخصی ارزیابی می شود. به این معنی که خصوصیات ماژولی که توسط سازنده ارائه می شود، معمولاً در شرایط مشخص و از پیش تعیین شده ای محاسبه می شوند. این شرایط، شرایط نامی یا شرایط استاندارد نام دارد که در جدول (1) بیان شده اند:

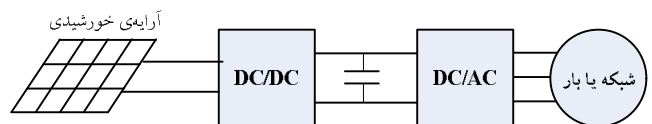
جدول 1 - شرایط استاندارد و نامی برای تست ماژول فتوولتائیک [9 و 11].

| شرایط نامی                                 | شرایط استاندارد                                   |
|--|---|
| تابش محیطی: $G_{a,ref}=800 \text{ W/m}^2$  | تابش محیطی: $G_{a,0}=1000 \text{ W/m}^2$          |
| دمای محیط: $T_{a,ref} = 20^\circ \text{C}$ | دمای سلول فتوولتائیک: $T_0^C = 25^\circ \text{C}$ |

در شرایط استاندارد یعنی تابش محیطی و دمای استاندارد، پارامترهای زیر اندازه گیری می شود [9 و 12]:

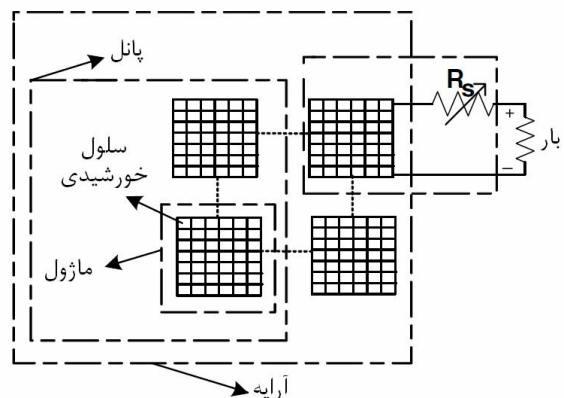
یافتن به نقطه کار ماکزیمم انجام گیرد. این مورد تعقیب الکتریکی نقطه حداکثر توان یا اختصاراً  $MPPT^2$  نامیده می شود. در این مقاله بحث بر روی مورد اخیر متمرکز خواهد بود.

همانطور که ذکر شد، به علت خواص غیرخطی مشخصه جریان-ولتاژی آرایه خورشیدی، ناگزیر به استفاده از  $MPPT$  خواهیم بود. انرژی تولیدی یک سیستم خورشیدی به عوامل محیطی زیادی همچون دما، میزان تابش و حتی سرعت باد بستگی دارد. ردیابی الکتریکی  $MPP$  توسط مبدل های قدرت که مطابق شکل (1) به صورت یک رابط بین بار و آرایه خورشیدی قرار می گیرند انجام می شود. این مبدل ها جهت تطابق امپدانس بار با امپدانس متغیر سیستم کنترل می شوند. الگوریتم های بسیاری برای این منظور وجود دارد که از میان آنها می توان به روش هایی از جمله *hill climbing* [5]، *کندوکنانس افزایشی* [6]، روش *ripple based* [7] و ولتاژ ثابت [8] اشاره کرد.



شکل 1- پیکربندی سیستم فتوولتائیک و  $MPPT$  در اتصال به شبکه.

مجموعه ای از سلول های خورشیدی که به صورت سری برای تولید ولتاژی قابل توجه (معمولاً بالای 20 ولت) به یکدیگر متصل شوند، یک ماژول خورشیدی را تشکیل می دهند. اتصال سری ماژول های خورشیدی نیز تشکیل یک پانل و مجموعه پانل ها نیز یک آرایه خورشیدی را ایجاد خواهند کرد. در شکل (1) نمایی از یک آرایه خورشیدی مشاهده می شود. در این مقاله مدل سازی ماژول و آرایه فتوولتائیک مدنظر قرار می گیرد. شکل (2) یک آرایه خورشیدی و اجزای تشکیل دهنده آن را نشان می دهد. در این مقاله، هدف به دست آوردن مدلی برای ماژول خورشیدی می باشد.



شکل 2- اجزای تشکیل دهنده یک آرایه خورشیدی.

<sup>2</sup> Maximum Power Point Tracking.

دست آوریم:

$$r_s = 1 - FF/FF_0 \quad (12)$$

$$R_s^C = r_s \cdot (V_{OC,0}^C / I_{SC,0}^C) \quad (13)$$

قدم بعدی تعیین خصوصیت پارامترهای سلول در شرایط کاری می‌شوند:

تابش محیطی:  $G_{a,0}$   
دمای محیط:  $T_{a,0}$   
دمای سلول:  $T_{ref}^C$

$$I_{SC}^C = C_1 \cdot G_a \quad (14)$$

که در آن  $C_1$  برابر است با:

$$C_1 = I_{SC,0}^C / G_{a,0} \quad (15)$$

دمای کاری سلولها  $T^C$ ، منحصرأً به تابش محیطی  $G_a$  و دمای محیط  $T_a$  بستگی دارد. بر طبق تجربیات عملی، این مقدار از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$T^C = T_a + C_2 \cdot G_a \quad (16)$$

که ثابت  $C_2$  از رابطه زیر محاسبه می‌گردد:

$$C_2 = (T_{ref}^C - T_{a,ref}) / G_{a,ref} \quad (17)$$

که در آن  $T_{ref}^C$ ،  $T_{a,ref}$  و  $G_{a,ref}$  به ترتیب دمای سلول، دمای محیط و تابش محیطی در شرایط نامی هستند. اگر مقدار  $T_{ref}^C$  معلوم نباشد، می‌توان مقدار آن را برابر مقدار زیر در نظر گرفت:

$$C_2 = 0.03 \text{ } ^\circ\text{C} \cdot \text{m}^2 / \text{W} \quad (18)$$

جریان اتصال کوتاه ماژول به دمای سلول نیز به صورت زیر بستگی دارد:

$$I_{SC}^M = C_1 \cdot G_a \cdot N_{PM} + I_t \cdot (T^C - 25) \quad (19)$$

که در آن  $I_t$  ضریب تاثیر دمای سلول در جریان اتصال کوتاه ماژول است که مقدار آن از کاتالوگ سازنده به دست می‌آید.

ولتاژ مدار باز سلول، به شرایط کاری آن یعنی دمای سلول خورشیدی و میزان تابش خورشید به صورت زیر بستگی دارد. ولتاژ مدار باز با دمای سلول به صورت مستقیم و با میزان تابش محیطی به صورت لگاریتمی مرتبط است.

$$V_{OC}^C = \frac{1}{N_{SM}} \times \left( V_{oc,0}^M + C_t (T^C - T_0^C) + C_r (\log(G_a + 1) - \log(G_{a,0})) \right) \quad (20)$$

مقدار ثابت‌های  $C_r$  و  $C_t$  معمولاً در کاتالوگ اطلاعات سازنده موجود می‌باشد. در صورت موجود نبودن این اطلاعات در کاتالوگ، می‌توان مقدار آن‌ها را با استفاده از مشخصات  $I-V$  ماژول که معمولاً در همه کاتالوگ‌ها موجود است به دست آورد. دلیل اینکه در داخل لگاریتم عبارت  $G_a + 1$  قرار گرفته، آن است که مواقعی

• جریان اتصال کوتاه ماژول:  $I_{SC,0}^M$ .

• ولتاژ مدار باز ماژول:  $V_{OC,0}^M$ .

• ماکزیمم توان ماژول:  $P_{max,0}^M$ .

همچنین در شرایط نامی (مرجع) نیز پارامترهای زیر اندازه‌گیری می‌شوند:

• تابش محیطی:  $G_{a,0}$

• دمای محیط:  $T_{a,0}$

• دمای سلول:  $T_{ref}^C$

الگوریتم کلی محاسبه جریان ماژول فتوولتائیک در یک نقطه کار مشخص  $(V^M, T_a, G_a)$  به این صورت است که ابتدا از کاتالوگ سازنده ماژول فتوولتائیک که حاوی اطلاعاتی درباره ماژول در شرایط استاندارد است، موارد زیر به عنوان داده‌های اولیه استخراج می‌شود:

• تعداد سلول‌های سری در ماژول:  $N_{SM}$ .

• تعداد سلول‌های موازی در ماژول:  $N_{PM}$ .

• توان ماکزیمم:  $P_{max,0}^M$ .

• جریان اتصال کوتاه:  $I_{SC,0}^M$ .

• ولتاژ مدار باز:  $V_{OC,0}^M$ .

• ضریب دمایی جریان اتصال کوتاه:  $I_t$ .

• ضریب دمایی افزایش دمای سلول:  $C_2$ .

• ضریب تابشی ولتاژ مدار باز:  $C_r$ .

• ضریب دمایی ولتاژ مدار باز:  $C_t$ .

• ولتاژ و جریان  $MPP$  در شرایط استاندارد:  $I_{MPP}, V_{MPP}$ .

هنگامی که اطلاعات ماژول فتوولتائیک در شرایط استاندارد مشخص شد، قدم بعدی محاسبه اطلاعات سلول در شرایط استاندارد است که به صورت زیر محاسبه می‌گردند:

$$P_{max,0}^C = P_{max,0}^M / (N_{SM} \cdot N_{PM}) \quad (6)$$

$$V_{OC,0}^C = V_{OC,0}^M / N_{SM} \quad (7)$$

$$I_{SC,0}^C = I_{SC,0}^M / N_{PM} \quad (8)$$

برای محاسبه  $R_C^S$  ابتدا باید  $V_{OC,0}$  را به دست آوریم که به صورت زیر محاسبه می‌گردد:

$$V_{oc,0} = V_{OC,0}^C / V_t^C \quad (9)$$

سپس با استفاده از آن می‌توانیم مقدار پارامتر  $FF$  را برای شرایط فعلی به صورت زیر به دست آوریم:

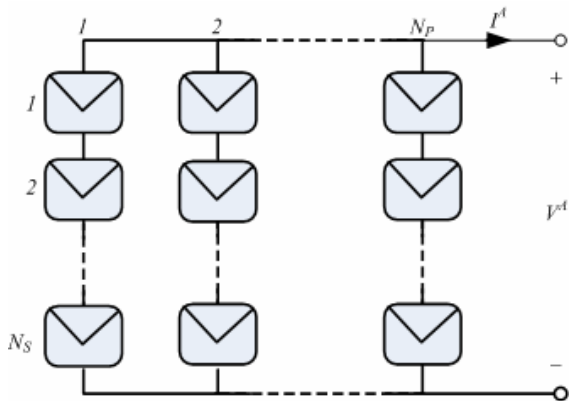
$$FF = (V_{OC,0} - \ln(V_{OC,0} + 0.72)) / (V_{OC,0} + 1) \quad (10)$$

محاسبه  $FF_0$  نیز بدین صورت خواهد بود:

$$FF_0 = P_{max,0}^C / (V_{OC,0}^C \cdot I_{OC,0}^C) \quad (11)$$

و در نهایت می‌توانیم مقدار  $R_C^S$  را با استفاده از (12) و (13) به

جریان، ولتاژ و سایر اطلاعات آرایه فتوولتائیک را به دست آورد. در اینجا پارامترهای مربوط به ماژول را با اندیس  $M$  و پارامترهایی را که به سلول مربوط می شود با اندیس  $C$  نشان می دهیم. به عنوان مثال، ولتاژ ماژول و ولتاژ سلول می باشد.



شکل 3- نحوه اتصال ماژول ها در یک آرایه فتوولتائیک.

اگر بخواهیم آرایه فتوولتائیک را در شرایط حالت دائم شبیه سازی نمائیم، می توانیم مفروضات زیر را در مدل سازی آرایه فتوولتائیک در نظر بگیریم [9]:

- همه ماژول های استفاده شده در آرایه کاملاً شبیه به هم و از یک سازنده باشند. زیرا ماژول های متفاوت مسلماً دارای مشخصه  $I-V$  متفاوت هستند و بنابراین حتی با وجود تابش یکسان، ولتاژ و جریان متفاوتی خواهند داشت که باعث عدم توازن و برگشت جریان در آرایه فتوولتائیک می گردد. پس حتی المقدور در یک آرایه فتوولتائیک سعی می گردد که تمام ماژول ها از یک نوع و از یک سازنده باشند.

- فرض می گردد که تابش خورشید به طور یکسان بر روی همه ماژول ها وجود دارد. در شرایط غیر حالت دائم ممکن است به دلیلی از قبیل سایه شدن یکی یا چند عدد از ماژول ها، خراب شدن یکی یا چند تا از ماژول ها، نشستن پرندگان بر روی ماژول و غیره، عدم تعادل در جریان ماژول ها به وجود آید و ماژول جریان برعکس بکشد و به عنوان بار کار کند. اگرچه معمولاً با قرار دادن یک دیود هرزگرد از بروز این حالت جلوگیری می شود. در شرایطی که هوا ابری می شود یا تکه ابری جلوی خورشید را می گیرد، معمولاً تمام ماژول ها در سایه قرار می گیرند. پس معمولاً در هوای ابری در آرایه فتوولتائیک عدم تعادل جریان وجود ندارد.

با در نظر گرفتن دو فرض فوق در مدل سازی، نتیجه می گیریم که در حالت دائم معمولاً جریان و ولتاژ همه شاخه های آرایه فتوولتائیک با هم برابرند و ولتاژ آرایه از جمع ولتاژ ماژول های موجود در یک شاخه به دست می آید. پس می توان آرایه فتوولتائیک را در شرایط حالت دائم با روابط زیر شبیه سازی کرد:

که  $G_a$  صفر باشد مقدار لگاریتم بی نهایت نگردد. بدیهی است که عدد 1 اثر ناچیزی در جواب دارد.

مقدار ولتاژ حرارتی را می توان از رابطه زیر به دست آورد:

$$V_t^C = mk \left( 273 + T^C \right) / e \quad (21)$$

که در آن  $m$  ضریب ایده آلی پیوند  $p-n$  است که در شکل مشخصه  $I-V$  ماژول بسیار تأثیرگذار است. ضریب  $m$  به مواد به کار رفته در پیوند  $p-n$  و ساختار فیزیکی آن بستگی دارد. برای پیوندهای با ماده ژرمانیم این ضریب برابر 1 در نظر گرفته می شود [9]. برای پیوندهای  $p-n$  سیلیکونی مقدار  $m$  معمولاً در محدوده 1,1 تا 1,8 قرار می گیرد. با تغییر این ضریب در شبیه سازی، شیب نمودار و نقطه ماکزیمم توان تغییر می کند. مقدار دقیق این ضریب با توجه به نمودار مشخصه  $I-V$  که توسط سازنده داده شده است، تعیین می گردد؛ بدین صورت که در شبیه سازی مقدار  $m$  را آنقدر تغییر می دهیم تا نقطه ماکزیمم توانی که در شبیه سازی به دست می آید با نقطه ماکزیمم توان که توسط سازنده در کاتالوگ داده شده، برابر شود.

مقادیر  $k$  و  $e$  که به ترتیب ثابت بولتزمن و بار یک الکترون هستند نیز به صورت زیر است:

$$k = 1.3806 \times 10^{-23} \text{ J / K} \quad (22)$$

$$e = 1.6022 \times 10^{-19} \text{ C} \quad (23)$$

اگر بخواهیم مراحل تعیین پارامترها را به صورت خلاصه بیان کنیم، این مراحل به صورت زیر خواهد بود:

- $C_1 = I_{SC,0}^C / G_{a,0}$
- $I_{SC}^C = C_1 \cdot G_a$
- $T^C = T_a + C_2 \cdot G_a$
- $V_{OC}^C = \frac{1}{N_{SM}} \times \left( V_{oc,0}^M + C_t (T^C - T_0^C) + C_r (\log(G_a + 1) - \log(G_{a,0})) \right)$
- $V_t^C = mk \left( 273 + T^C \right) / e$

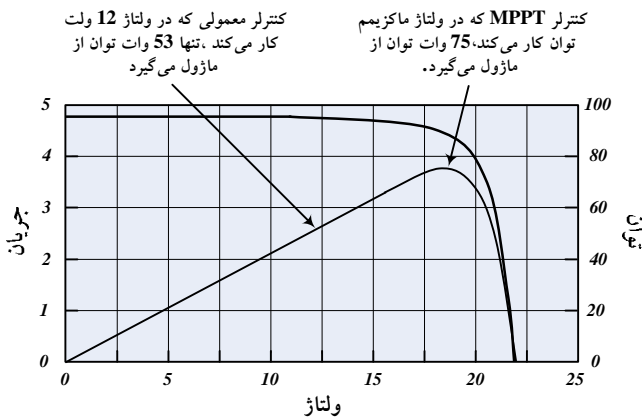
هنگامی که مراحل بالا طی شد، قدم نهائی محاسبه جریان ماژول فتوولتائیک برای شرایط کاری موجود به صورت زیر به است:

$$I^M = N_{PM} I_{sc}^C \left[ 1 - \exp \left( \left( V^M - N_{SM} V_{oc}^C + I^M R_S^M \right) / V_t^M \right) \right] \quad (24)$$

همانطور که قبلاً نیز ذکر شد، یک آرایه فتوولتائیک از اتصال چند ماژول فتوولتائیک به صورت سری و موازی تشکیل می شود. در شکل (3) نحوه قرار گرفتن ماژول ها در یک آرایه نشان داده شده است. با داشتن روابط ماژول فتوولتائیک، می توان روابط

<sup>3</sup> Emission Coefficient or Ideality Factor

برای درک این که MPPT چگونه کار می کند، عملکرد یک سیستم کنترل کننده شارژ معمولی بدون MPPT واقعی که در حال شارژ یک باتری دشارژ شده است، بررسی شده است [13]. ماژول به طور اجباری در ولتاژ باتری به طور متداول ولتاژ ایده آلی برای تولید ماکزیمم توان ممکن نیست، کار می کند. نمودار جریان-ولتاژ و توان-ولتاژ شکل (5)، برای این ماژول 75 وات در شرایط تست استاندارد با دمای سلول 25 درجه سانتی گراد و تابش  $1000 W / m^2$  است.



شکل 5- مقایسه توان دریافتی از ماژول با MPPT و بدون آن.

در این مورد ماژول توسط یک شارژر معمولی به باتری 12 ولتی متصل شده و با وادار کردن ماژول 75 وات به کار در ولتاژ 12 ولت، کنترلر معمولی توان تولیدی ماژول را عملاً به 53 وات محدود می کند. اما در سیستم کنترلر شارژ با MPPT، کنترل کننده ولتاژی را که در آن ماژول قادر به تولید ماکزیمم توان است (در این مورد ولتاژ 17 ولت) محاسبه و سپس توسط سیستم MPPT ماژول را (بدون توجه به ولتاژ باتری) در آن ولتاژ و با توان 75 وات اداره کرده است. این تغییر ولتاژ (12 ولت باتری در ورودی کنترلر به 17 ولت در خروجی آن) توسط یک مبدل قدرت DC/DC با بازدهی بالا صورت می گیرد. اگر از افت سیم های رابط صرف نظر گردد، جریان شارژر باتری در این مورد به صورت زیر خواهد بود:

$$I_{charging} = V_{Module} \div V_{Battery} \times I_{Module} \quad (27)$$

که در اینجا جریان برابر 6,3 آمپر خواهد بود؛ به عبارتی با تبدیل کنترلر معمولی به کنترلر MPPT، جریان شارژر به میزان 1,82 آمپر یا 42 درصد افزایش یافته است.

#### 4- مدل محاسبه کننده MPP

در این بخش به مدل سازی ریاضی MPPT خواهیم پرداخت [12]. برای یافتن نقطه توان ماکزیمم، از مشتق توان نسبت به ولتاژ کمک استفاده می کنیم؛ به این صورت که مقدار  $dP/dV$  را محاسبه کرده و مقدار به دست آمده را مساوی صفر قرار می دهیم

$$I^A = M_P \cdot I^M \quad (25)$$

$$V^A = M_S \cdot V^M \quad (26)$$

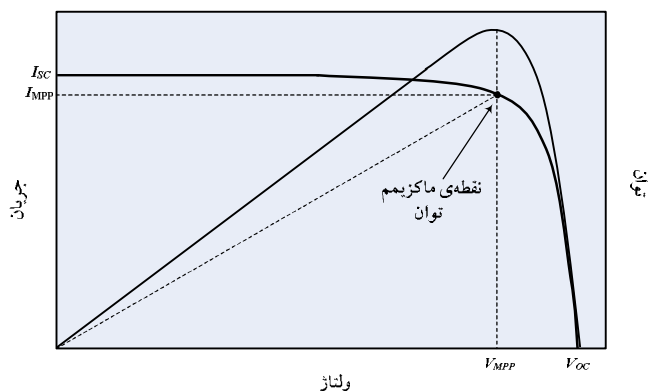
که در آن  $V^A$  و  $I^A$  به ترتیب ولتاژ و جریان کلی آرایه، و  $M_P$  و  $M_S$  به ترتیب تعداد شاخه های موازی ماژول های فتوولتائیک و تعداد ماژول های فتوولتائیک سری در یک شاخه است.

### 3- اصول کارکرد MPPT

یک سیستم کنترلی برای سیستم فتوولتائیک، دنبال کننده نقطه ماکزیمم توان است که باعث می شود بیشترین توان ممکن از انرژی خورشیدی در شرایط مختلف جوی توسط ماژول استحصال شود. از آنجا که یک سیستم فتوولتائیک چندین برابر هزینه اولیه برای ساخت نیروگاه های معمولی لازم دارد، بنابراین باید قادر باشد که حداکثر انرژی را از خورشید دریافت کند؛ در غیر این صورت مقدار زیادی از سرمایه گذاری به هدر می رود.

دنبال کننده نقطه ماکزیمم توان یا MPPT، سیستمی الکترونیکی است که ماژول فتوولتائیک را به گونه ای اداره می کند که به ماژول اجازه می دهد ماکزیمم توانی را که قادر به تولید آن است، تولید کند [13]. همان طور که قبلاً ذکر شد، MPPT یک سیستم مکانیکی نیست که به صورت فیزیکی ماژول را حرکت دهد تا به طرف خورشید باشد؛ بلکه یک سیستم کاملاً الکترونیکی است که نقطه کار الکتریکی ماژول ها را طوری تغییر می دهد که ماژول ها قادر به تولید ماکزیمم توان باشند.

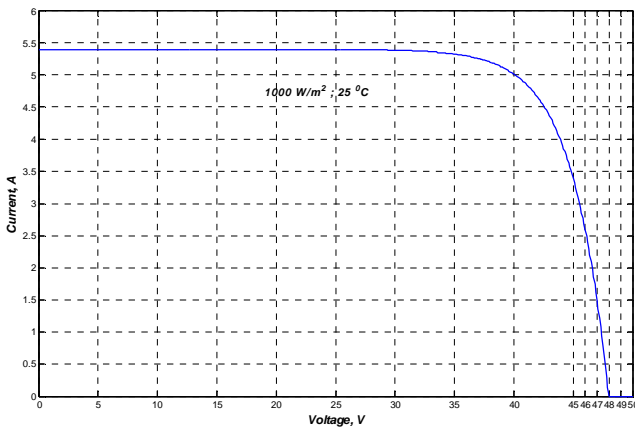
شکل (4) نشانگر مشخصه های جریان-ولتاژی و توان-ولتاژی آرایه خورشیدی در شرایط مختلف است. با استفاده از نمودار توان-ولتاژ می توان نقطه MPP را یافت و به کمک نمودار جریان-ولتاژ، ولتاژ و جریان نقطه MPP مطابق شکل (4) به دست می آید. توان اضافی که به این طریق از ماژول به دست می آید باعث افزایش جریان شارژر باتری یا جریان تزریقی به شبکه می گردد. سیستم MPPT می تواند به همراه یک سیستم دنبال کننده مکانیکی نیز به کار رود؛ اما این دو سیستم کاملاً از هم متفاوتند.



شکل 4- نمودار جریان-ولتاژ و توان-ولتاژ و نقطه MPP یک ماژول فتوولتائیک.

### 6- منحنی مشخصه جریان-ولتاژ

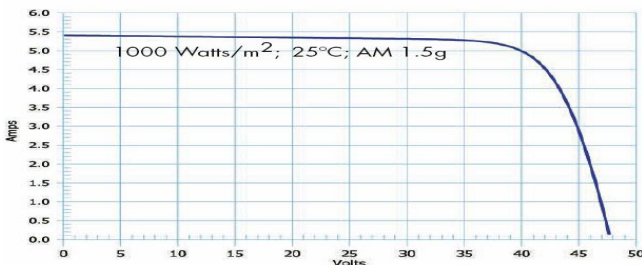
منحنی مشخصه جریان-ولتاژ، جزء اطلاعاتی است که در کاتالوگ سازنده موجود می‌باشد. شکل (۶)، منحنی مذکور را که از شبیه‌سازی به دست آمده، نشان می‌دهد.



شکل 6- منحنی مشخصه جریان-ولتاژ شبیه‌سازی شده

**Error! Reference source not found.** دربرگیرنده منحنی

مشخصه ارائه شده در کاتالوگ سازنده ماژول می‌باشد. همانطور که از اشکال (۶) و (۷) پیداست، این دو شکل بسیار به یکدیگر شبیه بوده و تقریباً مقادیر و خصوصیات مشابهی را از خود نشان می‌دهند. مقادیر جریان اتصال کوتاه و ولتاژ مدار باز در هر دو به مقدار قابل توجهی به یکدیگر نزدیک می‌باشند.



شکل 7- منحنی مشخصه جریان-ولتاژ ارائه شده توسط شرکت SunPower برای ماژول SPR-200-BLK.

### 7- اثر تغییر تابش خورشید بر کارایی سلول

در این قسمت، منحنی مشخصه جریان-ولتاژ و توان-ولتاژ برای مقادیر مختلف تابش خورشید به دست آمده است؛ شکل (8) نشانگر منحنی مشخصه جریان-ولتاژ و شکل (9) نیز نمایانگر منحنی مشخصه توان-ولتاژ برای مقادیر مختلف تابش خورشید هستند. تمامی منحنی‌ها در دمای محیطی 25 درجه سلسیوس رسم شده‌اند. همانطور که از اشکال (۸) و (۹) پیداست، تابش خورشیدی بالاتر، جریان اتصال کوتاه بالاتر و ولتاژ مدار باز بیشتر را به همراه دارد. لذا توان در حالت کلی و توان ماکزیمم هم با افزایش تابش خورشید افزایش می‌یابند.

(طبق قضیه اکسترمم). بدین صورت ولتاژ نقطه‌ای به دست می‌آید که می‌توان در آن ولتاژ، ماکزیمم توان را از ماژول فتوولتائیک دریافت کرد. مقدار توان برابر  $V^M \times I^M$  است. برای توان ماژول و با کمک (1) برای جریان ماژول داریم:

$$P^M = V^M \times I^M = V^M \times I_{sc}^M \times \left[ 1 - \exp\left(\frac{V^M - V_{oc}^M + R_S^M I^M}{V_t^M}\right) \right] \quad (28)$$

با مشتق‌گیری از (28) برحسب ولتاژ ماژول، خواهیم داشت:

$$\frac{dP^M}{dV^M} = I_{sc}^M \times \left[ 1 - \exp\left(\frac{V^M - V_{oc}^M + R_S^M I^M}{V_t^M}\right) \right] - I_{sc}^M \times V^M \times \left[ 1 - \exp\left(\frac{V^M - V_{oc}^M + R_S^M I^M}{V_t^M}\right) \right] / V_t^M = 0 \quad (29)$$

با حل (29)، ولتاژ ماژول متناظر با نقطه توان ماکزیمم به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$V^M = \frac{V_t^M \times I_{sc}^M \times \left[ 1 - \exp\left(\frac{V^M - V_{oc}^M + R_S^M I^M}{V_t^M}\right) \right]}{I_{sc}^M \times \exp\left(\frac{V^M - V_{oc}^M + R_S^M I^M}{V_t^M}\right)} = \frac{V_t^M}{\exp\left(\frac{V^M - V_{oc}^M + R_S^M I^M}{V_t^M}\right)} - V_t^M \quad (30)$$

لذا برای ولتاژ ماژول در نقطه ماکزیمم، رابطه زیر را خواهیم داشت:

$$V_{MPP} = \frac{V_t^M}{\exp\left(\frac{V^M - V_{oc}^M + R_S^M I^M}{V_t^M}\right)} - V_t^M \quad (31)$$

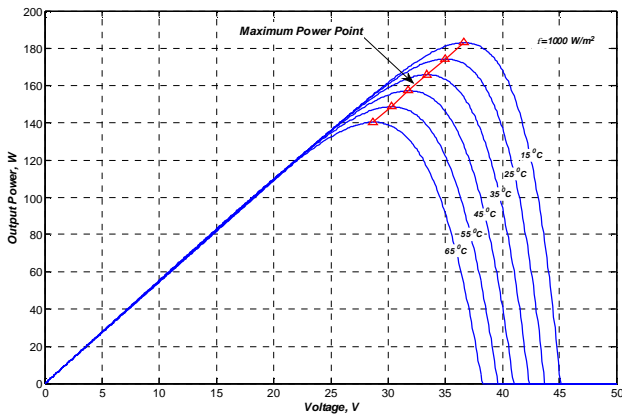
طبق (31)، می‌توان ولتاژ مورد نظر را به دست آورد و ماژول را در آن ولتاژ به کار گرفت تا ماکزیمم توان حاصل گردد.

### 5- بررسی صحت مدل

در این بخش، مدل دینامیکی یک ماژول فتوولتائیک شامل 153 سلول سری در محیط نرم‌افزار MATLAB/Simulink و بر اساس روابط ارائه شده پیاده‌سازی می‌شود. ماژول فتوولتائیک SPR-200-BLK ساخت شرکت SUNPower به عنوان مرجع اطلاعات اولیه مورد نیاز و مقایسه نتایج مورد استفاده قرار می‌گیرد. مشخصات این ماژول مطابق اعلام سازنده آن، در جدول (2) دیده می‌شود:

جدول 2- خصوصیات فنی ماژول SPR-200-BLK در شرایط استاندارد (STC).

|  |                                |
|--|--------------------------------|
| توان ماکزیمم ماژول، Pmax                       | 200 وات                        |
| ولتاژ متناظر با توان ماکزیمم، V <sub>MPP</sub> | 40,0 ولت                       |
| جریان متناظر با توان ماکزیمم، I <sub>MPP</sub> | 5,0 آمپر                       |
| ولتاژ مدار باز، V <sub>oc</sub>                | 47,8 ولت                       |
| جریان اتصال کوتاه، I <sub>sc</sub>             | 5,4 آمپر                       |
| ضریب تابشی ولتاژ مدار باز، C <sub>v</sub>      | 6,38 درصد بر درجه سلسیوس       |
| ضریب دمایی ولتاژ مدار باز، C <sub>t</sub>      | -136,8 میلی ولت بر درجه سلسیوس |
| ضریب دمایی جریان اتصال کوتاه، I <sub>t</sub>   | 2,2 میلی آمپر بر درجه سلسیوس   |
| بازدهی ماژول                                   | 16,1 درصد                      |
| ابعاد ماژول                                    | 798 میلی‌متر × 1559 میلی‌متر   |



شکل 11- منحنی مشخصه توان-ولتاژ برای مقادیر مختلف دمای کاری سلول و تابش ثابت.

### 9- مقایسه پارامترهای خروجی مدل با مقادیر واقعی در شرایط استاندارد

شبیه سازی برای دمای 25 درجه سلسیوس و تابش خورشید 1000 وات بر مترمربع انجام گرفته است (شرایط استاندارد سازنده). جدول (2) مقادیر استاندارد کاتالوگ و جدول (3)، نتایج حاصل از شبیه سازی را نشان می دهد. نتایج دو جدول بسیار به هم نزدیک هستند.

جدول 3- نتایج حاصل از شبیه سازی برای ماژول SPR-200-BLK در شرایط استاندارد (STC).

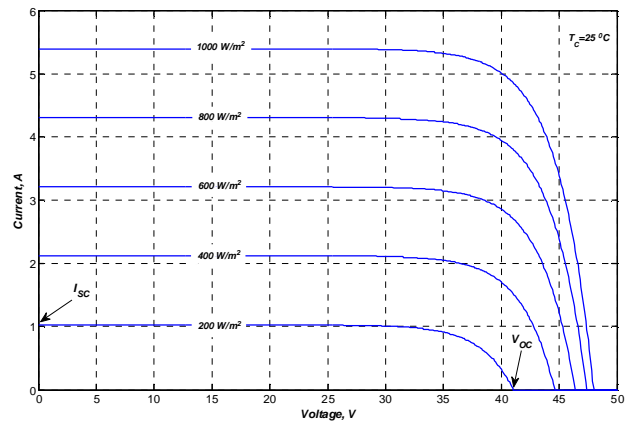
|   |              |
|---|--------------|
| توان ماکزیمم ماژول، $P_{max}$           | 199,59 وات   |
| ولتاژ متناظر با توان ماکزیمم، $V_{MPP}$ | 39,78 ولت    |
| جریان متناظر با توان ماکزیمم، $I_{MPP}$ | 5,02 آمپر    |
| ولتاژ مدار باز، $V_{OC}$                | 47,81 ولت    |
| جریان اتصال کوتاه، $I_{SC}$             | 5,4 آمپر     |
| راندمان ماژول                           | 16,0038 درصد |

### 10- نتیجه گیری

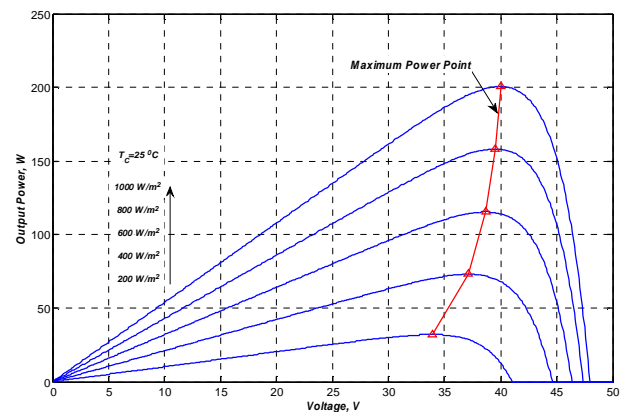
در این بخش، نتایج حاصل از مدل کنترل کننده MPPT ارائه شده است. این قسمت از شبیه سازی در واقع وظیفه محاسبه ولتاژ نقطه MPP را برعهده دارد تا به کمک آن مبدل های الکترونیک قدرت DC/DC و اینورتر، پالس های مناسب را تولید کرده و ولتاژ مناسب را به دو سر ماژول اعمال کند.

در جدول (3)، مقادیر ولتاژ و جریان متناظر با نقطه توان ماکزیمم محاسبه شده و سپس از روی منحنی توان-ولتاژ، نقطه توان ماکزیمم محاسبه می شود. مقدار به دست آمده از منحنی توان-ولتاژ برابر 39,69 ولت در شرایط استاندارد می باشد. به وضوح مشاهده می شود که در قیاس با مقدار ارائه شده در جدول (3) اختلاف چندانی وجود ندارد.

جهت کسب اطمینان لازم از درستی مدل محاسبه کننده نقطه



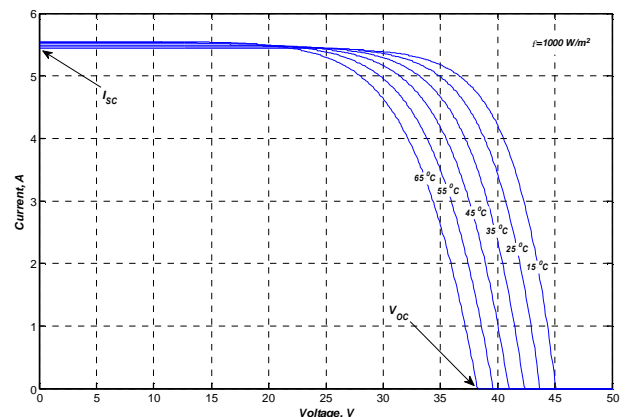
شکل 8- منحنی مشخصه جریان-ولتاژ برای مقادیر مختلف تابش خورشید.



شکل 9- منحنی مشخصه توان-ولتاژ برای مقادیر مختلف تابش خورشید.

### 8- اثر تغییر دمای کاری سلول بر کارایی آن

اثر دما بر روی کارایی مدل ماژول فتوولتائیک در اشکال (10) و (11) نشان داده شده است. از این شکل ها پیداست که در دمای کاری پایین تر سلول، توان ماکزیمم مقدار بیشتری است و ولتاژ مدار باز هم افزایش می یابد. از طرف دیگر، دمای کاری پایین تر، به مقدار کمی جریان اتصال کوتاه را کاهش می دهد. نتایج تغییرات کاملاً با تئوری ها سازگار بوده و می توان نتیجه گرفت که مدل صحیح بوده و دارای برآورد و پاسخ های مناسب است.



شکل 10- منحنی مشخصه جریان-ولتاژ برای مقادیر مختلف دمای کاری سلول و تابش ثابت.

- [3] C. Hua, "A modified tracking algorithm for maximum power tracking of solar array," *Energy Convers Manage*, Vol. 45, No. 6, pp.911-925, April 2004.
- [4] Kh. S. Karimov, "A simple photo-voltaic tracking system," *Solar Energy Mater Solar Cells*, Vol. 87, pp. 49-59, May 2005.
- [5] BK. Bose, "Microcontroller control of residential photovoltaic power conditioning system," *IEEE Trans Industry Appl.*, Vol. 21, No. 5, pp. 1182-1191, 1985.
- [6] K. Hussein, "Maximum photovoltaic power tracking: an algorithm for rapidly changing atmosphere conditions," *IEE Proc - G*, Vol. 142, pp. 59-64, 1995.
- [7] M. Calais, "A ripple-based maximum power point tracking algorithm for a single-phase, grid-connected photovoltaic system," *Solar Energy*, Vol. 63, No. 5, pp. 277-282, 1998.
- [8] Z.M. Salameh, "Step-down maximum power point tracker for photovoltaic systems," *Solar Energy*, Vol. 46, No. 5, pp. 279-282, 1991.
- [9] E. Lorenzo, "Solar Electricity Engineering of Photovoltaic Systems", *Artes Graficas Gala*, S.L., Spain, 1994.
- [10] Caisheng Wang, "Modeling and control of a hybrid Wind/Photovoltaic/Fuel cell distributed generation systems", Doctor of Philosophy Dissertation, Dept. Elect. Eng., Montana State University, Bozeman, Montana, USA, 2006.
- [11] PV Power website, "PV standards", [www.pvpower.com/pvstds.html](http://www.pvpower.com/pvstds.html)
- [12] S. Jain, V. Agarwal, "New current control based MPPT technique for single stage grid connected PV systems", *Energy Conversion and Management*, Volume 48, Issue 2, February 2007, pp. 625-644.
- [13] FSEC website, "Photovoltaic Fundamentals", [www.fsec.ucf.edu/pvt/pvbasics/index.htm](http://www.fsec.ucf.edu/pvt/pvbasics/index.htm)

توان ماکزیمم، محاسبات برای چند حالت دیگر نیز انجام گرفته که نتایج آن در جدول (4) مشاهده می شود. نتایج جدول (4) نشان دهنده دقت بالای روش به کار گرفته شده جهت تعیین نقطه توان ماکزیمم است.

جدول 4- مقایسه مقدار MPP به دست آمده از بلوک محاسبه کننده و مقدار به دست آمده از منحنی توان-ولتاژ.

| مقدار MPP از بلوک محاسبه کننده | مقدار MPP از منحنی توان-ولتاژ | وضعیت تابش و دما              |
|--------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| 39,6873 ولت                    | 39,6876 ولت                   | 1000 W/m <sup>2</sup> , 25 oC |
| 34,616 ولت                     | 34,629 ولت                    | 1000 W/m <sup>2</sup> , 55 oC |
| 36,0044 ولت                    | 36,03 ولت                     | 800 W/m <sup>2</sup> , 44 oC  |
| 36,3367 ولت                    | 36,345 ولت                    | 600 W/m <sup>2</sup> , 38 oC  |
| 35,4769 ولت                    | 35,476 ولت                    | 200 W/m <sup>2</sup> , 26 oC  |

## 11- مراجع

- [1] M. Schmitz, "Assessment of the potential improvement due to multiple apertures in central receiver systems with secondary concentrators," *Solar Energy*, Vol. 80, No. 1, pp. 111-120, 2006.
- [2] D.P. Gruber, "Spatial distribution of light absorption in organic photovoltaic devices," *Solar Energy*, Vol. 79, No. 6, pp. 697-704, 2005.