

طراحی و شبیه سازی آرایه فتوولتاییک تراکتور الکتریکی هیبریدی به کمک پانل های خورشیدی با استفاده از نرم افزار MATLAB

حسین موسی زاده^{*۱}

Hmousazade@ut.ac.ir

علیرضا کیهانی^۲

ارژنگ جوادی^۳

حسین مبلی^۲

کارن ابری نیا^۴

احمد شریفی^۵

تاریخ پذیرش: ۸۷/۵/۱۳

تاریخ دریافت: ۸۷/۲/۱۴

چکیده

آرایه فتوولتاییک تراکتور الکتریکی هیبریدی به کمک پانل های خورشیدی قبل از ساخت، طراحی شده و به وسیله نرم افزار MATLAB شبیه سازی گردید. این آرایه از تعداد ۱۵ عدد پانل خورشیدی تشکیل یافته که تعداد ۵ عدد از پانل ها به صورت سری به همدیگر وصل شده و ۳ گروه ۵ تایی به همدیگر موازی می شوند. روابط بین پارامترهای ورودی و خروجی و عوامل محیطی مؤثر در آن با روابط ریاضی مدل شده و نمودارهای ولتاژ-جریان، ولتاژ- توان در شرایط مختلف و به ازای پارامترهای متفاوت مورد ارزیابی قرار گرفتند. تحلیل نمودار های مختلف نشان داد که این نمودارها با دقت قابل قبولی منطبق به مقادیر عملی بوده و در اکثر موارد با اختلاف کم تر از ۹۷٪ در مقایسه با داده های مربوط به کارخانه سازنده قابل استفاده می باشد. نهایتاً الگوریتم ایجاد شده با الگوریتم لایبراتور ملی ساندا^۶ مورد مقایسه قرار گرفت و انطباق خیلی نزدیکی نتیجه گرفته شد. همچنین نشان داده شد که نمودارهای حاصل از الگوریتم ساندا علی

۱- دانشجوی مقطع دکتری گروه مکانیک ماشین های کشاورزی دانشگاه تهران^{*} (مسئول مکاتبات)

۲- دانشیار گروه مکانیک ماشین های کشاورزی دانشگاه تهران

۳- مسوول و عضو هیئت علمی موسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی کرج

۴- دانشیار گروه مکانیک ماشین های کشاورزی دانشگاه تهران

۵- عضو هیئت علمی موسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی کرج.

رغم پیچیدگی این الگوریتم کاملاً منطبق بر مقادیر مدل ارائه شده در این مقاله بوده و به خوبی می‌توان از این مدل ساده به جای آن مدل پیچیده استفاده کرد.

واژه های کلیدی: فتوولتائیک، تراکتور الکتریکی، پانل های خورشیدی، شبیه سازی

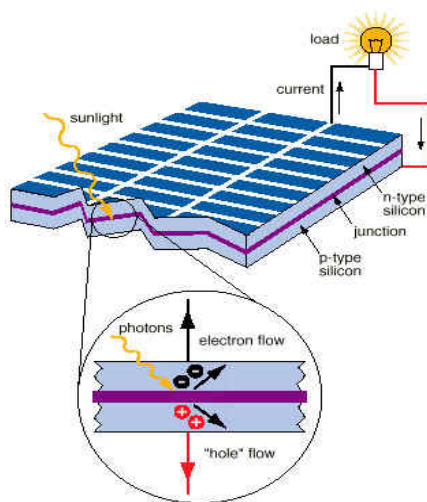
مقدمه

انرژی خورشیدی بالاخص برق خورشیدی بین انرژی های تجدیدپذیر به چندین دلیل دارای اهمیت انکارناپذیری است که از جمله آن ها عبارتند از:

- جزء پاک ترین انرژی ها محسوب می گردد
- فناوری سلول های خورشیدی به صورت فزاینده ای در حال رشد است.
- انرژی خورشیدی در همه جای دنیا قابل استحصال است.

سلول های خورشیدی¹ از نیمه هادی ها ساخته شده و با اتصال سیلیکون های نوع N و P شکل می گیرند. وقتی نور خورشید به یک سلول خورشیدی می تابد، به الکترون های آن انرژی بیشتری می بخشد. با تابش نور خورشید الکترون ها در نیمه هادی پلاریزه شده، الکترون های منفی در سیلیکون نوع N و یون های مثبت در سیلیکون نوع P به وجود می آیند. بدین ترتیب بین دو الکترو، اختلاف پتانسیل بروز کرده و این امر موجب جاری شدن جریان الکترون بین آن دو می گردد (شکل ۱).

کاربرد انرژی خورشیدی و بالاخص برق خورشیدی در زمینه های زیادی از جمله از وسایل نقلیه گرفته تا مخابرات، پزشکی و روشنایی معابر و جاده ها استفاده روز افزونی دارد(۱). استفاده از این منبع لا یزال انرژی همزمان با سایر صنایع در صنعت کشاورزی نیز شروع شده و در حال فراگیر شدن می باشد. تراکتورهای خورشیدی در مقایسه با خودروها دارای این مزیت اند که اکثراً در طول روز و همچنین در طول فصل هایی که انرژی تابشی زیادتری به زمین می رسد کار می کنند، بر عکس وسایل نقلیه دیگر که علاوه بر روزها، هم در شب ها و هم در فصول سرد مورد استفاده قرار می گیرند.



شکل ۱- اجزای تشکیل دهنده یک سلول خورشیدی و طرز کار آن

تحقیقات فراوانی در مورد با طراحی و استفاده از سیستم های فتوولتائیک انجام گرفته است که برخی از این تحقیقات به شبیه سازی سیستم های فتوولتائیک به وسیله نرم افزارهای مختلف پرداخته اند. Oi (۲۰۰۵) در پایان نامه خود اقدام به طراحی و شبیه سازی سیستم پمپاژ آب به وسیله انرژی فتوولتائیک نمود. نامبرده برای انجام این کار از نرم افزار MATLAB استفاده کرد. تمامی قسمت های این سیستم از جمله پانل ۱۵۰ وات آن تحت شرایط مختلف شبیه سازی گردید(۲). David (۲۰۰۴) عملکرد سیستمی هیبریدی را برای یک کلینیک سیار پزشکی آنالیز، مدل و شبیه سازی نمود. ایشان منبع توان فتوولتائیک را با روابط ریاضی مدل کرده و با MATLAB شبیه سازی نموده و نتیجه گرفت که با در نظر گرفتن شرایط دقیق محیطی و داده های کارخانه سازنده می توان قبل از ساخت مدل اصلی، نمودارهایی ایجاد کرد که دقیقاً شرایط واقعی را توصیف نماید. مدل ریاضی ایشان با اقتباس از روابط پیشنهادی به وسیله گروه فتوولتائیک لابراتوار

1- Solar cells

دارای دو بسته باتری ۸۰ ولت، ۱۵ کیلووات ساعت می باشد که شارژ باتری ها به دو طریق انجام می شود؛ یکی از طریق دو شاخه قابل اتصال به منبع الکتریسیته ایستگاه ثابت خورشیدی یا شبکه برق (که کشاورز می تواند شب آن را به دو شاخه وصل نماید) و دیگری از طریق پانل های موجود در بالای تراکتور. با توجه به ابعاد پانل ها که در جدول ۱ داده شده است و مساحت قابل دسترس در بالای تراکتور هیبریدی و همچنین قیمت و در دسترس بودن آن از ۱۵ عدد پانل ساخت داخل جهت تشکیل آرایه ای در بالای "تراکتور الکتریکی هیبریدی به کمک پانل های خورشیدی" استفاده شد. برای انطباق توان خروجی آرایه با سایر قسمت ها ۵ عدد از پانل ها به صورت سری به همدیگر وصل شده و ۳ گروه ۵ تایی به همدیگر موازی شدند. تراکتور مورد نظر دارای دو عدد موتور DC، ۱۰/۵ کیلوواتی می باشد، بنابراین تراکتور می تواند تا ۲۸ اسب بخار را به صورت مدام و تا ۷۴ اسب بخار را به صورت آنی اعمال کند ولی زمان عملکرد تا طول روز وابسته به انرژی مصرفی از باتری ها خواهد بود.

ملی ساندیا بود (۳). Arrouf و همکاران (۲۰۰۷) سیستم پمپاژ آب به وسیله فتوولتاییک را در محیط برنامه نویسی MATLAB شبیه سازی نموده و عنوان داشتند نتایج به دست آمده قابل قبول می باشد (۴).

در این مقاله آرایه خورشیدی نصب شده در بالای یک تراکتور الکتریکی هیبریدی به کمک پانل های خورشیدی طراحی شده و با استفاده از نرم افزار MATLAB شبیه سازی شد. این آرایه و الگوریتم آرایه شده نهایتا با نتایج برخی تحقیقات مورد مقایسه قرار گرفته تا اثر عوامل مختلف محیطی و طراحی جهت افزایش بازدهی مورد ارزیابی قرار گیرد.

روش بررسی

پانل های زیادی در دنیا تولید می شود که بازده آن ها در تبدیل توان خورشید به برق خورشیدی متفاوت است اما در ایران تنها یک کارخانه، پانل خورشیدی تولید می نماید که مشخصات فنی آن در جدول ۱ داده شده است. این پانل از نوع پلی کریستال بوده و به نام پانل ۳۶/۴۵ شناخته شده است (۵). "تراکتور الکتریکی هیبریدی به کمک پانل های خورشیدی"

جدول ۱- مشخصات فنی پانل Poly Crystal DOUBLE GLASS 36/45 استفاده شده در آرایه مورد نظر (۵)

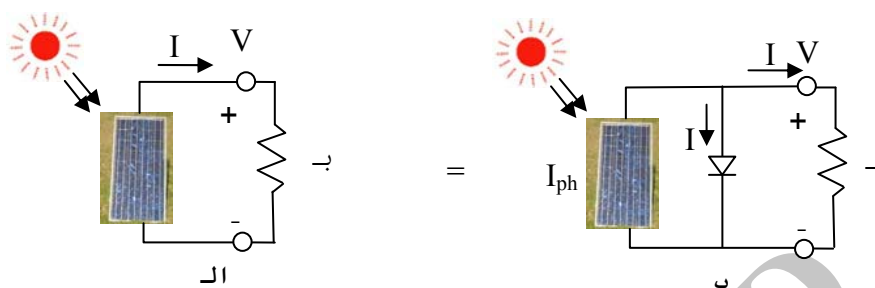
$P_{mp}(W)$	حداکثر توان در شرایط استاندارد - ۴۵ وات
$I_{sc0}(A)$	جریان اتصال کوتاه در شرایط استاندارد - ۲/۹۵ آمپر
$I_{mp0}(A)$	جریان قدرت بیشینه در شرایط استاندارد - ۲/۷۳ آمپر
$V_{oc0}(V)$	ولتاژ مدار باز در شرایط استاندارد - ۲۰/۵ ولت
$V_{mp0}(V)$	ولتاژ قدرت بیشینه در شرایط استاندارد - ۱۶/۵ ولت
N_c	تعداد سلول خورشیدی در یک پانل - ۳۶ عدد
Dimension(mm)	ابعاد پانل - ۹۷۷×۴۶۲×۱۱ میلی متر مکعب
Humidity Range	گستره رطوبتی که پانل قادر به کار است - ۰ الی ۱۰۰ درصد

مقاله آرایه شد می توان بدون نیاز به محاسبات خیلی پیچیده به دقت کافی دست یافت. در نهایت مقایسه بین این مدل و

گرچه مدل های مختلفی برای شبیه سازی پانل های خورشیدی وجود دارد (۳ و ۶) ولی با مدل ساده ای که در این

یک دیود موازی آن تشکیل شده است. منبع جریان، تولید جریان الکتریسته می کند که با I_{ph} نشان داده می شود.

مدل های خیلی پیچیده، دقت این مدل طراحی شده را نشان خواهد داد. همان طوری که در شکل ۲ دیده می شود ساده ترین شکل یک سلول فتوولتاییک از یک منبع جریان ایده آل و



شکل ۲- مدار یک سلول خورشیدی متصل به بار (الف) و مدار هم ارز آن (ب)

معادله Shockley برای جریان دیود (I_d) به صورت زیر می باشد (۷).

$$I_d = I_0 \cdot (e^{\frac{q \cdot V_d}{k \cdot T_c}} - 1) \quad (2)$$

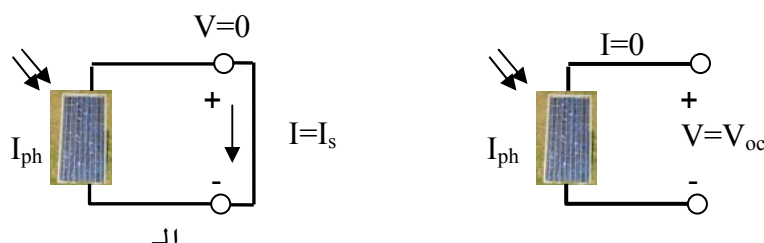
با جای گذاری در معادله (۱) داریم:

$$I = I_{sc} - I_0 \cdot (e^{\frac{q \cdot V_d}{k \cdot T_c}} - 1) \quad (3)$$

دو پارامتر مهم که جهت مشخص کردن شاخصه های یک سلول خورشیدی خیلی مورد توجه می باشند عبارتند از جریان اتصال کوتاه (I_{sc}) و ولتاژ مدار باز (V_{oc}). همان طوری که در شکل ۳- الف نشان داده شده است، اتصال کوتاه ترمینال های سلول خورشیدی منجر به ایجاد بیشینه جریان می شود که به جریان اتصال کوتاه شناخته می شود ($I_{ph} = I_{sc}$). از طرفی دیگر چنانچه هیچ اتصالی بین ترمینال های سلول خورشیدی نباشد منجر به ایجاد جریان موازی از طریق دیود داخلی می گردد که این اختلاف پتانسیل ایجاد شده، به ولتاژ مدار باز معروف است (شکل ۳- ب).

در مدار هم ارز شکل ۲ - ب با به کار گیری قانون جریان کرشهف نتیجه می شود:

$$I = I_{sc} - I_d \quad (1)$$



شکل ۳- مدار جریان اتصال کوتاه (الف) و ولتاژ مدار باز (ب)

باشند چشمگیر می باشد. علاوه بر آن یک انتقال جریان کوچکی به موازات جریان اصلی وجود دارد که مقاومت موازی را تعریف می کند. اگرچه مقدار مقاومت موازی در مقایسه با مقدار مقاومت سری خیلی کم می باشد ولی در جایی که چندین سلول به صورت موازی به همدیگر وصل شده باشند مقدار آن قابل توجه است.

با در نظر گرفتن شکل ۴ می توان رابطه (۳) را به صورت زیر بازنویسی نمود:

در حالت مدار باز داریم $I=0$ بنابراین از معادله بالا نتیجه می گیریم:

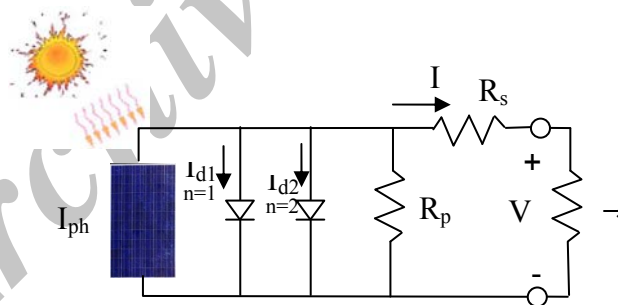
$$I_0 = \frac{I_{sc}}{e^{\frac{q \cdot V_{oc}}{k \cdot T_c}} - 1} \quad (۴)$$

با توجه به این که جریان با شدت تابش نسبت مستقیم دارد، جریان اتصال کوتاه برای شدت تابش های مختلف به صورت زیر تعریف می شود:

$$I_{sc/E} = \left(\frac{E}{E_0}\right) \cdot I_{sc/E_0} \quad (۵)$$

اما مدل واقعی یک سلول خورشیدی طبق شکل ۴، شامل یک مقاومت سری (R_s)، یک مقاومت موازی (R_p) و یک دیود ثانویه می باشد. مقاومت سری، ناشی از مقاومت مواد نیمه رسانا، شبکه فلزی، اتصالات و خطوط انتقال جریان می باشد و مقدار آن وقتی که تعداد زیادی سلول با هم دیگر سری شده

$$I = I_{sc} - I_{01} \cdot \left(e^{\frac{q(V + I \cdot R_s)}{k \cdot T_c}} - 1\right) - I_{02} \cdot \left(e^{\frac{q(V + I \cdot R_s)}{2k \cdot T_c}} - 1\right) - \left(\frac{V + I \cdot R_s}{R_p}\right) \quad (۶)$$



شکل ۴- مدار معادل یک سلول خورشیدی به صورت دقیق

همچنین با توجه به این که جریان گذرنده از مقاومت موازی خیلی کم است فرض می کنیم R_p بی نهایت باشد. پس رابطه (۷) به صورت زیر تبدیل می شود:

$$I = I_{sc} - I_0 \cdot \left(e^{\frac{q(V + I \cdot R_s)}{n \cdot k \cdot T_c}} - 1\right) \quad (۸)$$

که در آن $I_{sc|T_c}$ جریان اتصال کوتاه در هر دمای T_c از رابطه زیر به دست می آید:

جزء دوم و سوم طرف راست معادله (۶) را می توان با هم ادغام نموده و فقط با یک عدد دیود به صورت زیر نوشت که در آن n به عنوان فاکتور کیفیت دیود بوده و ثابت شده که برای سلول های خورشیدی پلی سیلیکون برابر $1-1/5$ می باشد (۳).

$$I = I_{sc} - I_0 \cdot \left(e^{\frac{q(V + I \cdot R_s)}{n \cdot k \cdot T_c}} - 1\right) - \left(\frac{V + I \cdot R_s}{R_p}\right) \quad (۷)$$

در نقطه V_{oc} بوده و از مشتق گیری از رابطه (۸) به دست می آید:

$$dI = 0 - I_0 \cdot q \cdot \left(\frac{dV + R_s \cdot dI}{n \cdot k \cdot T_c} \right) \cdot e^{q \left(\frac{V + I \cdot R_s}{n \cdot k \cdot T_c} \right)} \quad (12)$$

با مرتب کردن این رابطه بر حسب R_s برای ولتاژ مدار باز که در آن $V = V_{oc}$ و $I = 0$ است داریم:

$$R_s = \frac{-dV}{dI} - \frac{n \cdot k \cdot T_c}{I_0 \cdot q \cdot e^{q \left(\frac{V + I \cdot R_s}{n \cdot k \cdot T_c} \right)}} \quad (13)$$

$$R_s = \frac{-dV}{dI} \Big|_{V_{oc}} - \frac{n \cdot k \cdot T_c / q}{I_0 \cdot e^{q \left(\frac{V_{oc}}{n \cdot k \cdot T_c} \right)}} \quad (14)$$

نوشتن این معادله در داخل معادله نیوتن و حل در *MATLAB* نشان داد که با سه بار تکرار جواب معادله همگن می شود ولی جهت اطمینان عملیات پنج بار تکرار شد.

$$I_{n+1} = I_n - \frac{I_{sc} - I - I_0 \cdot \left(e^{q \left(\frac{V + I \cdot R_s}{n \cdot k \cdot T_c} \right)} - 1 \right)}{-1 - I_0 \cdot \left(\frac{q \cdot R_s}{n \cdot k \cdot T_c} \right) \cdot e^{q \left(\frac{V + I \cdot R_s}{n \cdot k \cdot T_c} \right)}} \quad (17)$$

در ادامه روابط فوق در محیط برنامه نویسی *MATLAB* نوشته شد و نمودارهای مربوط به آن ها ترسیم گردید (از چهار عدد *m-file* استفاده شد).

نتایج

یک سلول خورشیدی به تنهایی قادر به تولید ولتاژی برابر ۰/۶ ولت است. اما با اتصال سری چند عدد از این سلول ها ولتاژ مورد نیاز جهت شارژ باتری یا راه اندازی یک بار تامین می گردد. اکثر پانل ها از تعداد ۳۶ یا ۷۲ سلول تشکیل یافته اند که به ترتیب برای شارژ باتری های ۱۲ و ۲۴ ولت مناسب می باشند. شکل ۵ نمودار جریان-ولتاژ ($I-V$) یک پانل و یک آرایه خورشیدی را که از ۱۵ عدد پانل تشکیل یافته است

$$I_{sc|T_c} = I_{sc|T_0} \cdot (1 + a_{Isc} \cdot (T_c - T_0)) \quad (9)$$

جریان اشباع وارونه دیود ($I_0|T_c$)، نیز وابسته به تغییرات دمایی بوده و با توجه به رابطه (۴) می توان آن را به صورت زیر نوشت (۸):

$$I_0|T_c = I_0|T_0 \cdot \left(\frac{T_c}{T_0} \right)^{\frac{3}{n}} \cdot e^{-\frac{q \cdot E_g}{n \cdot k} \cdot \left(\frac{1}{T_c} - \frac{1}{T_0} \right)} \quad (10)$$

که در آن:

$$I_0|T_c = \frac{I_{sc}}{e^{\frac{q \cdot V_{oc}}{n \cdot k \cdot T_0}} - 1} \quad (11)$$

همان طوری که در شکل ۶ دیده می شود مقادیر مختلف R_s منجر به تغییر شیب منحنی $I-V$ در نقطه V_{oc} می گردد پس می توان گفت مقدار R_s بیان کننده شیب منحنی نمودار $I-V$

که در آن شیب منحنی $I-V$ در نقطه V_{oc} می باشد. با حل معادله (۸) می توان رابطه مشخصی را بین $I-V$ به دست آورد. برای حل این معادله روش های عددی مختلفی وجود دارد که در این جا از معادله نیوتن برای حل آن استفاده شده است. معادله نیوتن به صورت زیر می باشد:

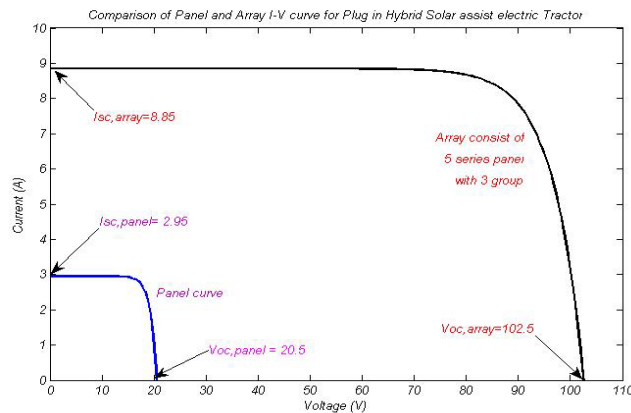
$$x_{n+1} = x_n - \frac{f(x_n)}{f'(x_n)} \quad (15)$$

که در آن x_{n+1} جواب فعلی، x_n جواب قبلی و $f(x_n) = 0$ می باشد بنابراین با بازنویسی مجدد رابطه (۸) داریم:

$$f(I) = I_{sc} - I - I_0 \cdot \left(e^{q \left(\frac{V + I \cdot R_s}{n \cdot k \cdot T_c} \right)} - 1 \right) = 0 \quad (16)$$

همدیگر اتصال می یابند. با این اتصال، ولتاژ آرایه ۵ برابر ولتاژ پانل و جریان آن ۳ برابر جریان پانل شده است.

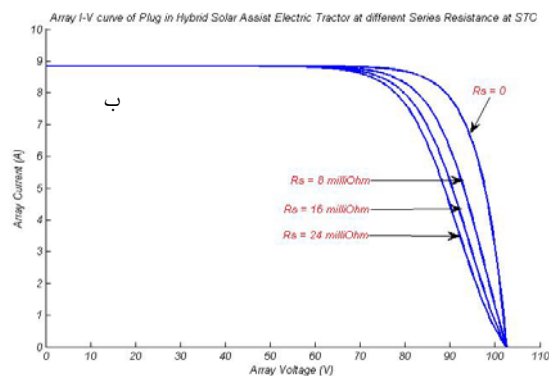
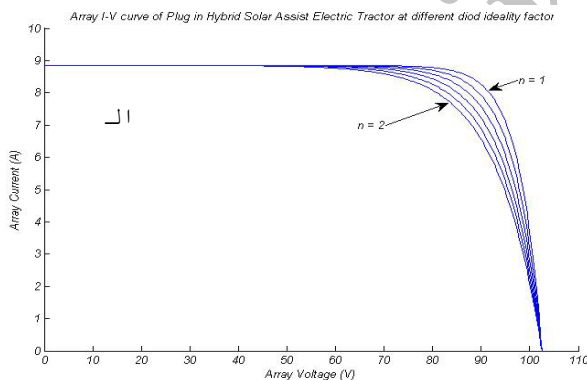
نشان می دهد. پانل ها به صورت سه دسته موازی هم که هر کدام از دسته ها از ۵ عدد پانل سری تشکیل شده است به



شکل ۵- نمودار $I-V$ یک پانل و یک آرایه که از ۱۵ عدد پانل تشکیل شده است

برای مقادیر n کوچک تر یا مساوی ۲ و n بزرگ تر یا مساوی ۱ تحت شرایط استاندارد رسم گردیده است. همان طوری که در شکل مشخص شده n انحنای منحنی را در منطقه خمش آن تحت تاثیر قرار می دهد.

فاکتور کیفیت دیود (n) عددی است که ایده آل بودن دیود را مشخص می نماید. مقدار آن بین ۱ و ۲ برای سلول های خورشیدی مختلف متفاوت است و مقدار $n=1$ برای دیود ایده آل می باشد. برای سلول خورشیدی پلی سیلیکون این عدد بین ۱ تا ۱/۵ می باشد (۳). در شکل (۶- الف) نمودار $I-V$ آرایه



شکل ۶- تاثیر مقادیر مختلف n (الف) و افزایش R_s در کاهش سطح زیر منحنی نمودار $I-V$ (ب)

$$(T_c = 25^\circ C \text{ و } E = 1000)$$

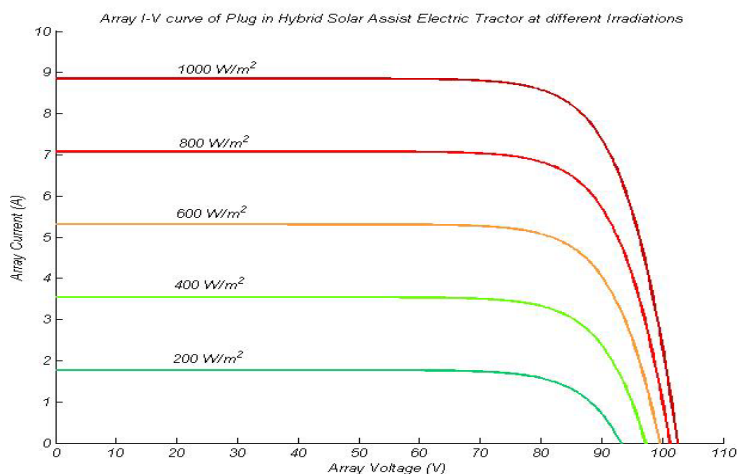
باشد، منجر به کاهش سطح زیر منحنی و در نتیجه منجر به کاهش توان تولیدی می گردد. با حل رابطه مربوط به R_s در $MATLAB$ مقدار آن برای این آرایه ۱/۹ میلی اهم به دست آمد.

طبق رابطه (۵) اشعه دریافت شده به وسیله آرایه خورشیدی رابطه خطی با جریان خروجی از آرایه دارد و طبق

مقاومت سری (R_s) در نزدیکی ولتاژ مدار باز تاثیر خیلی زیادی روی نمودار $I-V$ نشان می دهد. همان گونه که اشاره شد مقدار R_s از طریق محاسبه dV/dI در نقطه V_{oc} به دست می آید. شکل ۶- ب تاثیر تغییرات مقاومت سری را بر شیب جریان در مقابل ولتاژ، تحت شرایط استاندارد نشان می دهد. طبق شکل هر چه مقاومت سری در مدار آرایه بیشتر

وات به ازای هر متر مربع می باشد و این در حالی است که شرایط به ندرت استاندارد بوده و سطح دریافت کننده معمولا مقداری کمتر از این دریافت می کند. یعنی جریان خارج شده از آرایه معمولا کمتر از ۸/۸۵ آمپر خواهد بود.

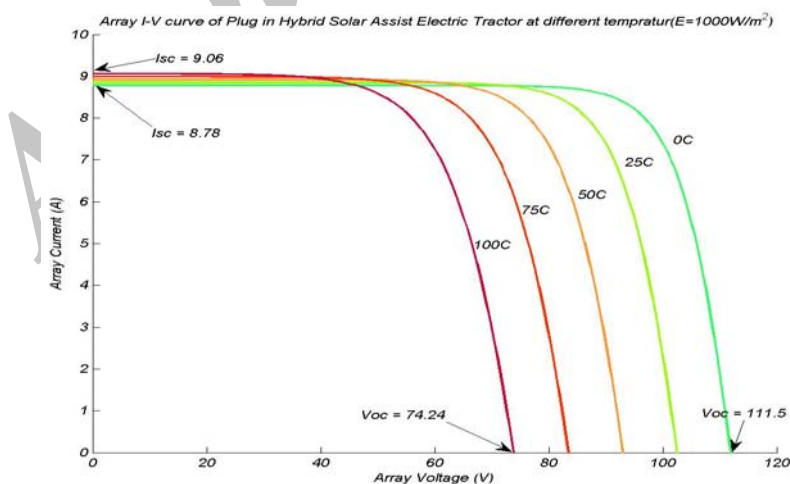
شکل ۷ نیز مشخص است که با افزایش اشعه دریافت شده به وسیله آرایه خورشیدی هم جریان و هم ولتاژ افزایش می یابد. افزایش جریان در مقایسه با افزایش ولتاژ آرایه بسیار چشمگیر می باشد. مقدار اشعه دریافتی آرایه در شرایط استاندارد ۱۰۰۰



شکل ۷- اثر مقادیر مختلف تابش بر جریان و ولتاژ خروجی آرایه در دمای 25°C

یعنی در شرایط استاندارد (دمای محیط برابر 25°C) دمای سلول های خورشیدی در حدود 55°C خواهد بود. از طرفی دمای پشت و روی سلول های خورشیدی داخل آرایه نیز متفاوت می باشد.

اثر دما نیز در تغییرات مربوط به نمودار جریان- ولتاژ قابل توجه می باشد طبق روابط مربوط به الگوریتم ساندیا مشخص شده که دمای سلول های خورشیدی داخل آرایه اکثرا حدود 30°C درجه سلسیوس بیشتر از دمای محیط می باشد.



شکل ۸- افزایش دمای سلول های خورشیدی از 0°C تا 100°C منجر به کاهش زیاد ولتاژ و

افزایش جزئی در جریان می گردد

دارد که نهایتا منجر به افت توان می شود. تحقیقات عملی نشان داده که به ازای هر یک درجه سانتی گراد افزایش دما مقدار

همان طوری که در شکل ۸ مشخص شده افزایش دما تاثیر زیادی در کاهش ولتاژ خروجی و افزایش جزئی در جریان

دیگری به نام ردیاب نقطه توان بیشینه (MPPT)^۳ می باشند. این قطعه علی‌رغم تغییر ولتاژ بار می تواند توان خروجی را همیشه در مقدار بیشینه نگه دارند. شکل ۹ - ب نمودار توان بیشینه را در دماهای مختلف سلول های خورشیدی و در تابش استاندارد نشان می دهد. مطابق شکل افزایش دما از $0^{\circ}C$ به $75^{\circ}C$ منجر به کاهش ۲۵۱ وات (۳۲٪) در توان تولیدی می گردد. شکل ۹ - ج تاثیر تغییرات توان تابشی خورشید را در توان خروجی آرایه نشان می دهد. طبق شکل نشان داده شده کاهش توان تابشی از ۱۰۰۰ به ۲۰۰ وات بر هر متر مربع منجر به کاهش ۵۷۱ وات در توان خروجی می گردد که بیش از ۸۱٪ توان خروجی را شامل می شود. بنابراین اثر کاهش توان تابشی خورشید بسیار زیادتر از اثر افزایش دما در توان خروجی سلول های خورشیدی می باشد.

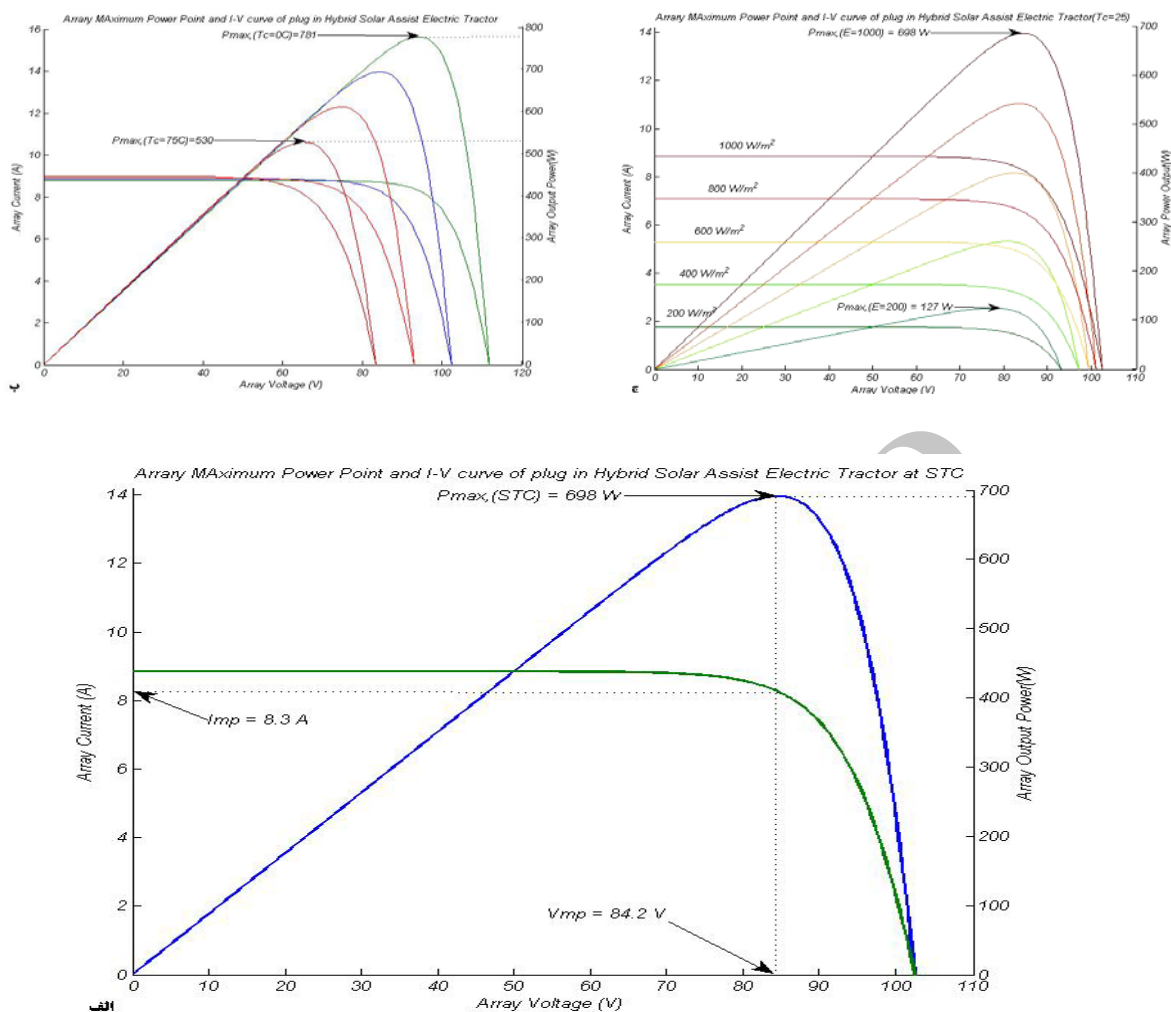
کاهش ولتاژ در هر سلول سیلیکونی تقریباً $2/3$ میلی ولت می باشد (۹). بنابراین به ازای $100^{\circ}C$ افزایش دما در این آرایه بایستی کاهش ولتاژی برابر $37/26$ ولت اتفاق بیافتد. با مراجعه به شکل ۸ مشخص می شود که افزایش دمای داخلی آرایه از $0^{\circ}C$ به $100^{\circ}C$ منجر به کاهش ولتاژ از $111/5$ ولت به $74/24$ ولت شده است. یعنی الگوریتم طراحی شده با دقت تقریباً ۹۰ درصد قادر به پیش بینی تغییرات ناشی از دما می باشد. از طرفی همین اندازه افزایش دما منجر به افزایش $0/27$ آمپر در جریان می گردد که در مقایسه با کاهش ولتاژ بسیار ناچیز است.

شکل ۹ نمودار توان و جریان را در مقابل ولتاژ برای حالت های مختلف نشان می دهد. مطابق شکل ۹-الف هر نقطه روی نمودار توان- ولتاژ فتوولتاییک به نقطه عملیاتی^۱ معروف است. مختصات این نقطه عبارت از جریان عملیاتی و ولتاژ عملیاتی می باشد. توان ایجاد شده از حاصل ضرب ولتاژ و جریان در هر نقطه محاسبه می شود. اما تنها در نقطه خاصی که در ناحیه خم نمودار $I-V$ واقع شده بیشترین توان تولید می گردد. این نقطه به نقطه توان بیشینه^۲ معروف است. توان بیشینه طبق شکل برای این آرایه برابر ۶۹۸ وات به دست می آید. مختصات مربوط به توان بیشینه عبارت از V_{mp} و I_{mp} است که به ترتیب ولتاژ توان بیشینه و جریان توان بیشینه می باشد. طبق جدول ۱ ولتاژ و جریان توان بیشینه برای پانل نمونه طبق داده های کارخانه سازنده به ترتیب ب $16/5$ ولت و $2/73$ آمپر است. با توجه به این که در این آرایه ۵ عدد از پانل ها سری و ۳ دسته موازی شده اند با ضرب این اعداد در ولتاژ و جریان توان بیشینه و مقایسه با شکل ۹-الف که ولتاژ و جریان توان بیشینه به ترتیب $84/2$ ولت و $8/3$ آمپر به دست آمده، نتیجه می شود الگوریتم طراحی شده نزدیک به ۹۷٪ دقت دارد. آرایه فتوولتاییک زمانی در توان بیشینه عمل خواهد نمود که ولتاژ بار برابر ولتاژ توان بیشینه نگه داشته شود و چون این عملاً ممکن نیست تمامی سیستم های فتوولتاییک مجهز به قطعه

3 . Maximum Power Point Tracker

1 . Operational Point

2 . Maximum Power Point



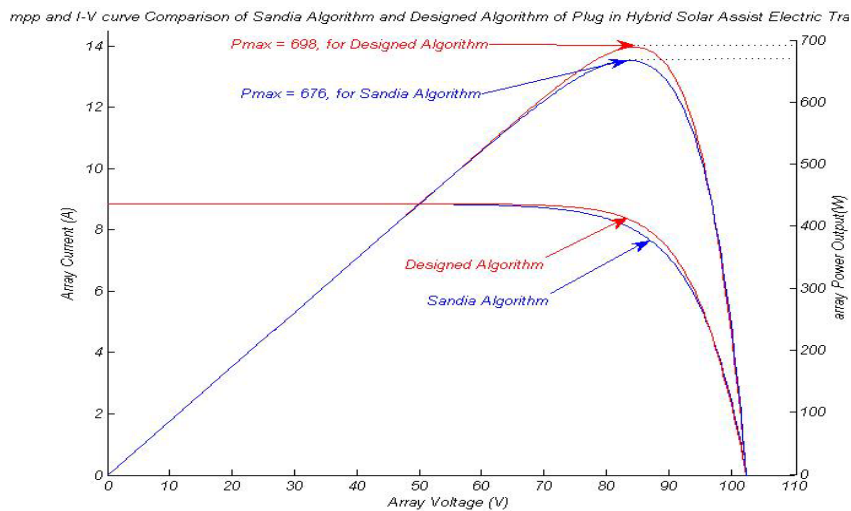
شکل ۹- نمودار توان - ولتاژ و جریان - ولتاژ (الف). تاثیر تغییرات دما (ب) و تاثیر توان تابشی خورشید

(ج) در توان خروجی آرایه

خمش منحنی است. با توجه به این که برای سلول های پلی سیلیکون مقدار β بین ۱ و ۱/۵ می باشد و در الگوریتم طراحی شده مقدار میانگین ۱/۲۵ در نظر گرفته شد، اگر بتوان مقدار دقیق β را به صورت عملی تعیین نمود، این اختلاف جزئی هم بین دو الگوریتم کاهش پیدا خواهد نمود. لازم به ذکر است که برخلاف الگوریتم طراحی شده که در آن دمای ورودی همان دمای سلول خورشیدی است، در الگوریتم ساندا ساندیا ورودی دمای محیطی بوده و در خود الگوریتم تبدیل به دمای سلول خورشیدی می گردد. از آنجایی که معمولاً خود سلول ها گرم تر از دمای محیط هستند که الگوریتم ساندا ساندیا یک تفاوت دمایی 31°C را بین محیط و دمای سلول در نظر گرفته است،

جهت اطمینان از صحت الگوریتم طراحی شده، این الگوریتم با الگوریتم ایجاد شده به وسیله گروه فتوولتائیک لابراتوار ملی ساندا (۱۰) تحت شرایط یکسان مورد مقایسه قرار گرفت. الگوریتم ساندا بسیار دقیق بوده و حتی تاثیر پارامترهایی مثل سرعت باد (W_s)، اختلاف دمای صفحه پشتی و رویی آرایه و ضرایب دیگری که در فهرست علائم لیست شده اند نیز در نظر گرفته شده است. مقایسه الگوریتم طراحی شده با الگوریتم ساندا نشان می دهد که یک اختلاف کوچکی به اندازه ۲۲ وات بین دو الگوریتم وجود دارد (۰.۳٪). با توجه به شکل ۱۰ مشخص می شود که این تفاوت مربوط به شکل منحنی I-V در نقطه

برای این که هر دو الگوریتم در دمای یکسان مقایسه شوند می بایستی این اختلاف دما مد نظر قرار می گرفت.



شکل ۱۰- مقایسه الگوریتم طراحی شده با الگوریتم لابر اتوار ملی ساندا

تفسیر نتایج

پیچیدگی محاسبات منطبق بر مقادیر عملی داده های کارخانه سازنده می باشد) در نهایت می توان گفت الگوریتم طراحی شده با دقت قابل قبولی امکان شبیه سازی سیستم های فتوولتائیک را داشته و می تواند برای شبیه سازی هر آرایه، پانل و سلول خورشیدی مورد استفاده قرار گیرد.

با توجه به نمودار ها نتیجه می شود با آن که الگوریتم طراحی شده با بیش از ۹۰٪ دقت، کاهش ولتاژ ناشی از افزایش دما را پیش بینی می کند ولی در کل در مقایسه با داده های کارخانه سازنده و همچنین در مقایسه با الگوریتم ساندا نزدیک به ۹۷٪ دقت دارد (الگوریتم ساندا علی رغم

فهرست علائم و نمادها

a, b	ضرایب تجربی برای سرعت باد که به ترتیب برابر ۳/۴۷- و ۰/۵۹- می باشد (۱۱)
$(a_{Isc}(1/^{\circ}C$	ضریب دمایی جریان اتصال کوتاه- ۰/۰۰۰۳۲ / (۱۰)۰
$(a_{Imp}(1/^{\circ}C$	ضریب دمایی جریان قدرت بیشینه- ۰/۰۰۰۳۱ / (۱۰)۰
$(b_{Vmp}(1/^{\circ}C$	ضریب دمایی ولتاژ قدرت بیشینه- ۰/۰۰۵۳ / (۱۰)۰
$(b_{Voc}(1/^{\circ}C$	ضریب دمایی ولتاژ مدار باز- ۰/۰۰۴۱ / (۱۰)۰
C_0, C_1	ضریبی متناسب با I_{mp} و تابش که به صورت تجربی تعیین می گردد
C_2, C_3	ضریبی متناسب با V_{mp} و تابش که به صورت تجربی تعیین می گردد
$E (W/m^2$	تابش موثر بر روی آرایه خورشیدی
$(E_0(W/m^2$	تابش مرجع که برابر ۱۰۰۰ وات بر هر متر مربع می باشد
E_c	بازده تابش (بدون بعد)
$(E_g(eV$	انرژی فاصله باند که برای سیلیکون برابر است با ۱/۱۲ (۱۱)
$I(A$	جریان بار
$(I_0(A$	جریان اشباع وارونه دیود
$(I_d(A$	جریان دیود
$(I_{mp}(A$	جریان قدرت بیشینه

$\langle I_{mp0} \rangle (A)$	جریان قدرت بیشینه در شرایط استاندارد
$\langle I_{ph} \rangle (A)$	جریان فتون
$\langle I_{sc0} \rangle (A)$	جریان اتصال کوتاه در شرایط استاندارد
$\langle I_{sc} \rangle (A)$	جریان اتصال کوتاه
$\langle I_{sh} \rangle (A)$	جریان موازی دیود
$\langle K \rangle (J/K.mol)$	ثابت بولتزمن - 1.381×10^{-23}
M	سری پانل هایی که موازی شده اند - ۳ سری
N	تعداد پانل هایی که به همدیگر سری شده اند - ۵ عدد
N_c	تعداد سلول خورشیدی در یک پانل - ۳۶ عدد
n	فاکتور کیفیت دیود - ۱ تا ۱/۵ برای انواع پلی سیلیکون (۱۰)
$\langle P_{mp} \rangle (W)$	حداکثر توان در شرایط استاندارد (STC) ^۱
$\langle q \rangle (c)$	شارژ الکترون - 1.602×10^{-19}
$\langle R_p \rangle (\Omega)$	مقاومت موازی
$\langle R_s \rangle (\Omega)$	مقاومت سری
$\langle T_0 \rangle (^\circ C)$	دمای صفحه پشتی پانل ها
$\langle T_a \rangle (^\circ C)$	اختلاف دمایی بین صفحه پشتی با سلول خورشیدی - $2(^\circ C)$ (۱۰)
$\langle T_c \rangle (^\circ C)$	دمای مرجع برای سلول خورشیدی داخل پانل - $25^\circ C$
$\langle T_m \rangle (^\circ C)$	دمای محیطی
$\langle T_t \rangle (^\circ C)$	دمای سلول های خورشیدی داخل پانل
$\langle V \rangle (V)$	ولتاژ بار
$\langle V_{mp0} \rangle (V)$	ولتاژ قدرت بیشینه در شرایط استاندارد
$\langle V_{mp} \rangle (V)$	ولتاژ قدرت بیشینه
$\langle V_{oc} \rangle (V)$	ولتاژ مدار باز
$\langle V_{oc0} \rangle (V)$	ولتاژ مدار باز در شرایط استاندارد
$\langle W_s \rangle (m/s)$	سرعت باد در ارتفاع استاندارد ۱۰ متری

1 . Standard Test Conditions ($T_a = 25^\circ C$ ، $E = 1000 W/m^2$ و $AM(air\ mass) = (1/^\circ)$)

منابع

- power supply. Nordic workshop on power and industrial electronics, 12-14 August.
۷. جیمی، ج، کتی، سید، آ، نسا. ۱۳۷۵. مبانی مهندسی برق. محمدی فر، م. چاپ اول، ترجمه. انتشارات سروش.
8. Walker, G, R. 2000 "Evaluating MPPT converter topologies using a MATLAB PV model" Australasian Universities Power Engineering Conference, AUPEC '00, Brisbane.
 9. Markvart, T. 1996. Solar Electricity. 2nd Ed. New York, John Wiley and sons Inc.
 10. Anonym. 2007. Sandia National Laboratories, Photovoltaic Systems Department. Post Office Box 5800. Albuquerque, NM 87185-0753. <http://photovoltaics.sandia.gov/>.
 11. David, L, K. Jay, A, K. William E, B. 1997. Temperature coefficients for PV modules and arrays- measurement methods, difficulties, and results. Presented at the 26th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, September 29-October 3, 1997, Anaheim, California.
۱. عباس پور، م. عتابی، ف. سعیدی، پ. ۱۳۸۴. بررسی امکان پذیری به کارگیری سلول های فتوولتاییک جهت روشنایی معابر در منطقه ۲۲ شهرداری تهران. علوم و تکنولوژی محیط زیست؛ (۲۵): ۱-۹.
 2. Oi, A. 2005. Design and simulation of photovoltaic water pumping system. A MSc thesis presented to the faculty of California polytechnic state university.
 3. David, A, C, C. 2004. Modeling, simulation and performance analysis of a hybrid power system for mobile medical clinic. Kassel university press. www.upress.uni-kassel.de.
 4. Arrouf, M. Ghabrour, S. 2007. Modeling and simulation of a pumping system fed by photovoltaic generator within the MATLAB/Simulink programming environment. Desalination, v (209): 23-30.
 ۵. بی نام. ۱۳۸۶. شرکت فیبر نوری و برق خورشیدی، تولید کننده پنل های فتوولتاییک. <http://WWW.offcir.com/>
 6. Fredrick, M, I. Lars, E, N. 2002. Design and implementation of a digitally controlled stand-alone photovoltaic