

## مدلسازی دقیق سلول فتوولتائیک با تاثیرات دقیق دما و تابش

محمد یاسین دیوانی

آموزشکده فنی و حرفه ای سما، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد کازرون  
yasindivani@yahoo.com

محبوبه سعیدی مقدم

دانشگاه شیراز، واحد بین الملل، دانشکده فیزیک  
Msaeedi\_65@yahoo.com

جمشید امیرعضدی

دانشگاه آزاد اسلامی، واحد کازرون، دانشکده مهندسی برق  
J.amirazodi@gmail.com

### چکیده

در این مقاله ابتدا به استخراج معادلات مدل دقیق سلول فتوولتائیک پرداخته شده است و که شامل: معادلات اصلی، معادلات تاثیر دما و معادلات تاثیر ولتاژ می باشد. سپس این معادلات در نرم افزار سیمولینک متلب پیاده سازی شده است، مشخصه های جریان- ولتاژ و ولتاژ- توان این مدلسازی و شبیه سازی به ازای تابش ها و دماهای مختلف به صورت مجزا استخراج شده است، که رفتار سلول شبیه سازی را بیان می کند، و در پایان با مقایسه منحنی مشخصه های این مدلسازی با رفتار واقعی یک سلول فتوولتائیک، صحت مدلسازی و شبیه سازی انجام شده را تایید می نماید.

**واژگان کلیدی:** سلول های خورشیدی، مدلسازی تک دیودی، شبیه سازی

## مقدمه

سلول‌های فتوولتائیک در اصل از پیوند بین دو لایه نازک از مواد نیمه رسانای غیر متشابه تشکیل شده‌اند که به عنوان نیمه رسانای نوع P و نیمه رسانای نوع N شناخته می‌شوند. ماده اصلی مورد استفاده در سلول‌های خورشیدی همان سیلیکون تک کریستالی است که باید تا ۹۹,۹۹ درصد خالص سازی شده و به شکل کریستالی درآید و در لایه‌های نازکی بریده شود که در نتیجه این مراحل قیمت آن بالا می‌رود. نیمه رساناهای دیگری نیز وجود دارند که می‌توانند در ساختار این سلول‌ها به کار روند. این رساناها دارای اختلاف باندی بین ۱ تا ۱,۶ الکترون ولت می‌باشند و اختلاف باند بهینه برای تعادل ولتاژ و جریان ماکزیمم شدن توان در حدود ۱,۴ الکترون ولت می‌باشد. (F. Spertino and J. S. Akilimali, 2009)

مواد نیمه رسانایی که در سلول‌ها استفاده می‌شوند باید مانند سیلیکون قابلیت ناخالص شدن و تشکیل نوع N و P را داشته باشند تا بتوانند اتصال PN یا حوزه الکتریکی را که مهم‌ترین عامل برای عملکرد سلول می‌باشد به وجود آورند. این عمل بسته به نوع ماده به شکل‌های گوناگونی انجام می‌گیرد. نمونه‌ای از این مواد عبارتند از سیلیکون آمورف، فیلم‌های نازک تهیه شده از مواد چند کریستالی مانند سیلیکون چند کریستالی که ارزاتر از سیلیکون تک کریستالی است ولی راندمان پایین‌تری دارد که تحقیقات برای بهبود عملکرد آن در حال انجام است. دیگر مواد چند کریستالی عبارتند از: کادمیوم تولراید (CdTe) و وانیدیوم مس دی سلناید (CuInSe<sub>2</sub>) که امید است در آینده ای نزدیک از آن‌ها استفاده شود. نیمه رساناهای نوع N از کریستال سیلیکان ساخته می‌شود، به طوری که ذرات ریزی از ناخالصی (معمولاً فسفر) در داخل آن آکنده (Doped) شده و موجب ایجاد الکترون‌های آزاد اضافی در ماده شده است. نیمه رساناهای نوع P نیز از کریستال سیلیکان ساخته می‌شوند اما با مقدار بسیار کمی ناخالصی (معمولاً بور) آکنده می‌شوند که در نتیجه آن ماده دارای کمبود الکترون آزاد می‌شود. این جای خالی الکترون‌ها را حفره می‌نامند. ما می‌توانیم با پیوند دو نوع نیمه رسانای غیر مشابه فوق یک پیوند P-N بسازیم. این پیوند یک میدان الکتریکی در محل پیوند ایجاد می‌کند. این میدان الکتریکی مشابه میدان الکترواستاتیکی است که می‌توانید با مالش یک شانه پلاستیکی به روی لباس گرمکن خود، تولید کنید. این میدان موجب می‌شود که ذرات باردار منفی به یک سمت و ذرات باردار مثبت به سمت مخالف آن حرکت کنند. هنگامی که فوتون‌های یک نور با طول موج مناسب به یک پیوند P-N برخورد کنند، انرژی خود را به برخی الکترون‌های ماده منتقل می‌کنند و موجب ارتقای آنها به تراز انرژی بالاتر می‌شوند. اغلب این الکترون‌ها به کمک پیوند ظرفیتی به اتم مجاور کمک می‌کنند تا اتم‌های ماده در کنار هم باقی بمانند و نمی‌توانند حرکت کنند (منظور حرکت عمودی است نه دورانی دور هسته) اما در حالت تحریک شده توسط نور، الکترون‌ها آزاد شده و می‌توانند با حرکت در درون ماده، جریان الکتریکی را هدایت کنند. به علاوه وقتی که الکترون‌ها حرکت می‌کند در پشت سر خود، حفره‌هایی را به جای می‌گذارند که آن‌ها نیز به این ترتیب حرکت می‌کنند. هنگامی که پیوند P-N تشکیل شد برخی از الکترون‌ها بلافاصله در نزدیکی پیوند و در قسمت N به سمت حفره‌های نزدیک در قسمت P جذب می‌شوند. به همین ترتیب حفره‌های قسمت P و در نزدیکی پیوند، برای ترکیب با الکترون‌ها در نزدیکی پیوند و در قسمت N جذب می‌شوند. پدیده خالص این اتفاقات این است که یک لایه در قسمت N و در نزدیکی پیوند تشکیل می‌شود که بیشتر از قبل دارای بار مثبت می‌شود و به همین ترتیب در قسمت P و در نزدیکی پیوند لایه‌ای که بیشتر از قبل دارای بار منفی است تشکیل می‌شود. در نتیجه یک میدان الکتریکی معکوس در نزدیکی پیوند ایجاد می‌شود (میدان منفی در قسمت P و مثبت در قسمت N). هنگامی که یک الکترون در ناحیه پیوندی توسط فوتون فرودی تحریک شده و به باند رسانایی پرش می‌کند، یک حفره در باند ظرفیتی از خود بر جای می‌گذارد بنابراین دو حامل بار (جفت الکترون - حفره) تولید می‌شود. تحت تاثیر میدان الکتریکی معکوس در نزدیکی پیوند، الکترون‌ها تمایل به حرکت به سمت ناحیه N و حفره‌ها به سمت ناحیه P خواهند داشت. جریان الکترون‌ها به

سمت ناحیه N بنا به تعریف، یک جریان الکتریکی است. اگر یک مدار خارجی وجود داشته باشد تا الکترون‌ها در آن جریان یابند، این الکترون‌ها سرانجام از راه یکی از اتصالات فلزی در بالای سلول، از نیمه‌رسانا به خارج میدان جریان پیدا می‌کنند (M. Laranja, 2009)

در همین حالا حفره‌ها در سمت مخالف الکترون‌ها در ماده حرکت می‌کنند تا به اتصالات فلزی در زیر سلول برسند و در آنجا با الکترون‌هایی که از قسمت دیگر مدار خارجی آمده بودند، ترکیب می‌شوند. به منظور تولید توان، سلول PV باید از حرکت الکترون‌ها، ایجاد ولتاژ و جریان کند.

### پدیده فتوولتائیک

در اواخر قرن ۱۹ هانریش هرتز مشاهده نمود که هرگاه نور فرابنفش به کلاهک فلزی الکتروسکوپ باردار با بار منفی بتابد الکتروسکوپ خنثی می‌شود یعنی نور فرودی توانسته است الکترون‌های اضافی را از الکتروسکوپ جدا کند. اثر فتوالکتریک برای اولین بار در سال ۱۹۰۵ توسط آلبرت انیشتین شرح داده شد. بر اساس این پدیده وقتی که یک کوانتوم انرژی نوری یعنی یک فوتون در یک ماده نفوذ می‌کند، این احتمال وجود دارد که بوسیله الکترون جذب شود و الکترون انتقال پیدا می‌کند. در فرمول زیر می‌بینیم که انرژی فوتونهای فرودی (نور تابیده شده به صفحه) کمی صرف آزاد کردن الکترون مقید و مقداری هم صرف جنبش الکترون‌ها می‌شود. (M. G. Villalva et al, 2009) (A. S. Sedra and K. C. Smith, 2006)

$$E = H_f + k \quad (1)$$

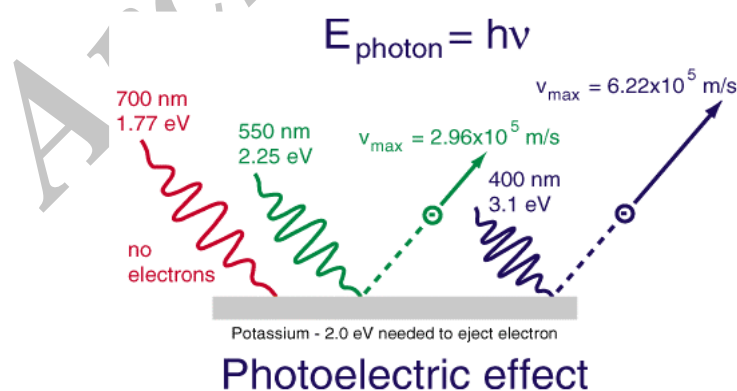
E = انرژی فوتون فرودی

Hf = انرژی مقید الکترون در فلز

K = انرژی جنبشی الکترون

بطور خلاصه نتایج حاصل از نظریه انیشتین:

۱- برای جدا کردن یک الکترون مقید به فلز باید انرژی نور فرودی بزرگتر و یا مساوی با بسامد الکترون مقید به فلز باشد.



شکل (۱): فرایند تاثیر فتوالکتریک بر فلز (M.A. Eltawil and Z. Zhao, 2010)

همانطور که در شکل می‌بینیم نور قرمز چون طول موجش بلندتر و در نتیجه بسامد و انرژی کوچکتری نسبت به نور سبز و مشکی دارد نمی‌تواند الکترون مقید فلز پتاسیم را جدا کند در مقایسه نور سبز و مشکی می‌بینیم که چون طول موج نور مشکی کمتر و بسامد آن بیشتر است و انرژی بیشتری دارد نه تنها الکترون را از سطح فلز جدا می‌کند بلکه سرعت بیشتری هم به آن می‌دهد. همان فرکانس یا بسامد فرودی نورهای قرمز و سبز و مشکی  $f$  انرژی فوتون فرودی را می‌توان به صورت

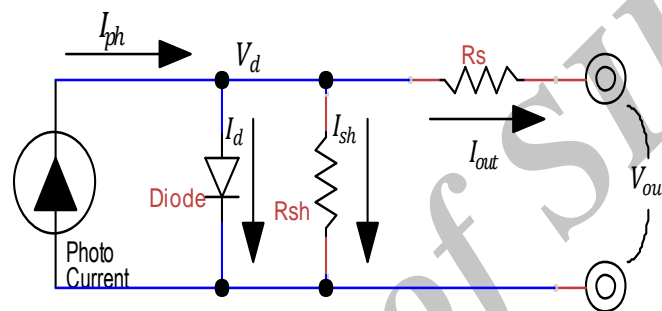
زیر هم نوشت است:

$$E_{\text{photon}} = h \times f \quad (2)$$

۲- هر چقدر شار نور فرودی مناسب بیشتر باشد تعداد الکترونهاى بیشتری از سطح فلز آزاد خواهد شد (Universitat Kassel, 2006).

### مدل مدارى سلول فتوولتائیک

در شکل (۲) مدل تک دیودی سلول فتوولتائیک نشان داده است.



شکل (۲): مدار معادل سلول های خورشیدی

مدار معادل فوق بر اساس مدار معادل یک دیود شاتکی بدست آمده است. این مدار معادل دارای یک منبع جریان که بر وابسته به نور، یک دیود معکوس، مقاومت سری و مقاومت موازی می باشد. اندازه جریان منبع جریان به نسبت مستقیم وابسته به نور تابیده به سلول فتوولتائیک است که به صورت یک ضریب خطی با نور تغییر می کند (G.R. Walker, 2001). با توجه به پیوند نیمه هادی در سلول های فتوولتائیک در این مدل نیز برای مدلسازی آن از یک دیود و دو مقاومت استفاده شده است، با توجه به مدل ارائه شده در شکل (۱)، روابط مدارى به شرح زیر برقرار است (J. Yuncong et al, 2010):  
معادله مدارى ولتاژ و جریان دیود شاکلی عبارت است از:

$$I_d = I_{rsat} \left( e^{\frac{qV_d}{nmkT}} - 1 \right) \quad (3)$$

رابطه (۴) معادله ولتاژ دیود بر حسب ولتاژ و جریان خروجی نشان می دهد:

$$V_d = V_{out} - I_{out} R_s \quad (4)$$

و جریان مقاومت موازی عبارت است از:

$$I_{sh} = \frac{V_{out} - I_{out} R_s}{R_{sh}} \quad (5)$$

جریان خروجی برابر خواهد بود با:

$$I_{out} = I_{ph} - I_d - I_{sh} \quad (6)$$

و پس از جایگزینی جریان خروجی برابر است با:

$$I_{out} = I_{ph} - I_{rsat} \left( e^{\frac{q(V_{out} - I_{out}R_s)}{nmkT}} - 1 \right) - \frac{V_{out} - I_{out}R_s}{R_{sh}} \quad (7)$$

و در روابط (۳) تا (۷) پارامترها به شرح زیر است:

$I_d$  : جریان دیود (آمپر)

$I_{rsat}$  : جریان معکوس اشباع دیود (آمپر)

$V_d$  : ولتاژ دیود (آمپر)

$q \cong 1.60218 \times 10^{-19}$  بار الکترون (کولن)

$k \cong 1.38065 \times 10^{-23}$  (Joules/°Kelvin) ثابت بولتزمن

$T$  : دمای محیط (کلوین)

$m$  : صریب ایده آلی دیود

$n$  : تعداد سلول های فتوولتائیک

$I_{ph}$  : جریان منبع جریان نوری (آمپر)

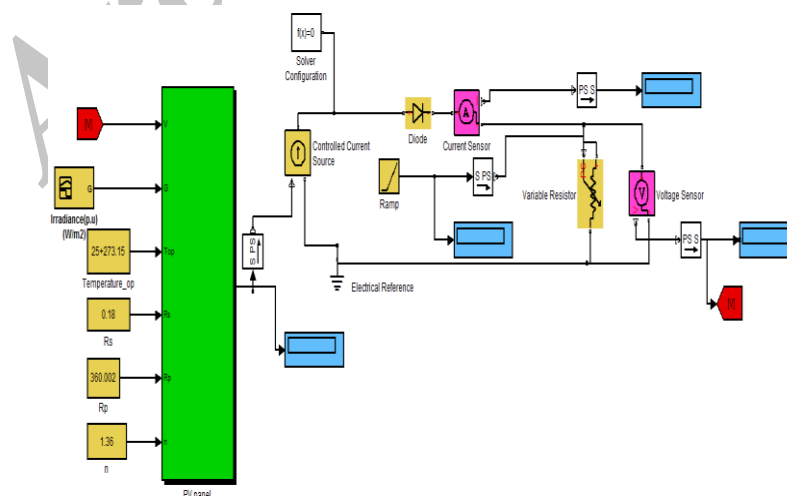
$I_{out}$  : جریان خروجی (آمپر)

$R_s$  : مقاومت سری (اهم)

$R_{sh}$  : مقاومت موازی (اهم)

### شبیه سازی

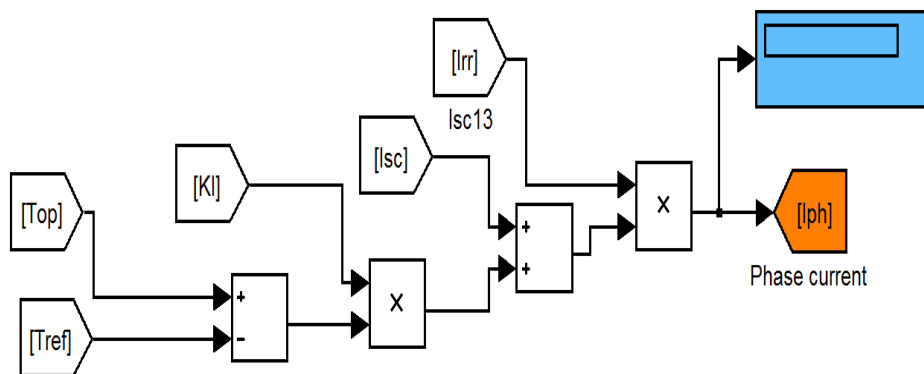
شکل (۳) بلوک دیاگرام شبیه سازی شده مدل سلول فتوولتائیک را در نرم افزار متلب نشان داده شده است.



شکل (۳) بلوک دیاگرام شبیه سازی سلول فتوولتائیک در نرم افزار متلب

همانگونه که در شکل (۳) مشاهده می شود ورودی های مدل عبارتند از: تابش، دما، مقاومت سری، مقاومت موازی و تعداد سلول ها. مشخصه ولتاژ- جریان سلول های فتوولتائیک به دو پارامتر وابسته است: دما و تابش. با کاهش دما و افزایش تابش توان خروجی، افزایش و با افزایش دما و کاهش تابش، توان خروجی، کاهش می یابد. تابش و دما با توان خروجی به ترتیب رابطه مستقیم و عکس دارند. بنابراین بایستی این وابستگی ها در مدل سازی سلول فتوولتائیک لحاظ گردد. به منظور لحاظ نمودن تاثیرات تابش و دما بر مدل، کفایت تاثیر این دو پارامتر بر جریان اتصال کوتاه ( $I_{sc}$ ) و ولتاژ مدار ( $V_{oc}$ ) باز اعمال شود. در شکل (۴) تاثیرات دما و تابش را بر جریان اتصال کوتاه نشان می دهد.  $T_{op}$  دمای ورودی است و دمای مرجع را برابر ۲۵ درجه سانتی گراد (یا همان ۲۹۸ کلوین) می باشد.  $KI$  ضریب تغییر جریان اتصال کوتاه نسبت به دما است که در کاتالوگ های سلول های فتوولتائیک ارائه می گردد.

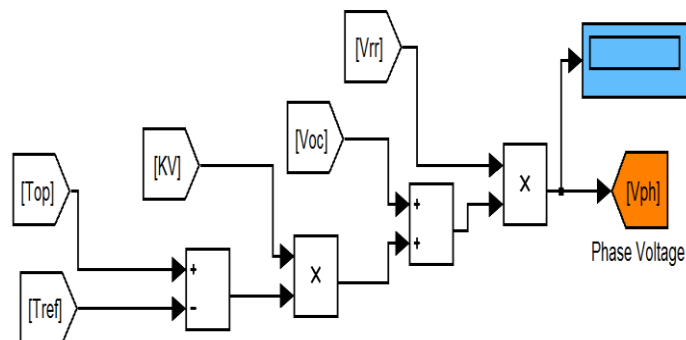
Phase Current Eqn



شکل (۴): بلوک دیاگرام شبیه سازی تاثیر تابش و دما بر جریان اتصال کوتاه

بنابراین با این تاثیر دما بدین گونه در شبیه سازی اعمال می شود. در شکل (۴) عددی با نام  $Irr$  در جریان اتصال کوتاه ضرب شده این عدد به صورت یک ضریب خطی است که میزان تابش را تعیین می کند. و در پایان  $Iph$  به عنوان جریان اتصال کوتاه اصلاح شده برای ولتاژ و تابش مشخص می باشد که در خود تاثیرات دما و تابش را دارد. در شکل (۵) تاثیرات دما و تابش را بر ولتاژ مدار باز نشان می دهد.

Phase Voltage Eqn

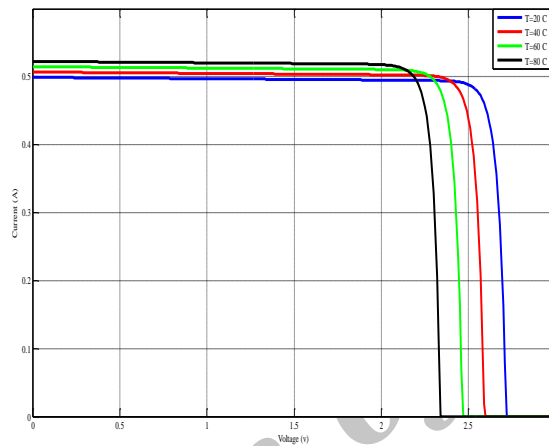


شکل (۵): بلوک دیاگرام شبیه سازی تاثیر تابش و دما بر ولتاژ مدار باز

KV ضریب تغییر ولتاژ مدار باز نسبت به دما است که با توجه به اختلاف دمای مورد نظر و دمای مرجع، مقدار افزایش یا کاهش ولتاژ مدار باز را تعیین می نماید و این مقدار به صورت منفی یا مثبت با ولتاژ مدار باز جمع می گردد. با ضریب  $V_{IT}$  که رابطه ی لگاریتمی با میزان تابش دارد، تاثیر تابش بر مقدار ولتاژ مدار باز لحاظ می گردد.

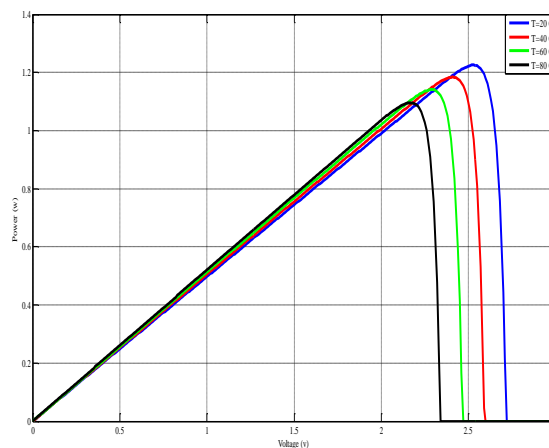
### نتایج شبیه سازی

نمودار شکل (۶) منحنی مشخصه جریان- ولتاژ سلول فتوولتائیک را در دماهای ۲۰، ۴۰، ۶۰ و ۸۰ درجه سانتی گراد نشان می دهد.



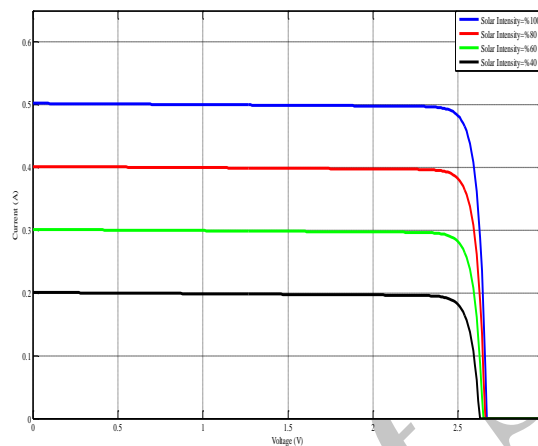
شکل (۶): منحنی جریان-ولتاژ در دماهای مختلف

همان گونه که در شکل (۶) نشان داده شده است با کاهش دما، ولتاژ به مقدار قابل توجهی افزایش می یابد و همچنین کاهش دما، موجب کاهش جزئی مقدار جریان می شود. این تاثیرات دما نیز بر روی نقطه ماکزیمم توان هم موثر است و موجب می گردد که نقطه ماکزیمم توان در ولتاژ بالاتری قرار می گیرد. کاهش دما موجب بهبود عملکرد سلول های فتوولتائیک می شود و دارای بازده بالاتری خواهد بود. نمودار شکل (۷) منحنی مشخصه ولتاژ- توان سلول فتوولتائیک نشان می دهد این منحنی مشخصه در دماهای ۲۰، ۴۰، ۶۰ و ۸۰ درجه سانتی گراد بدست آمده است.



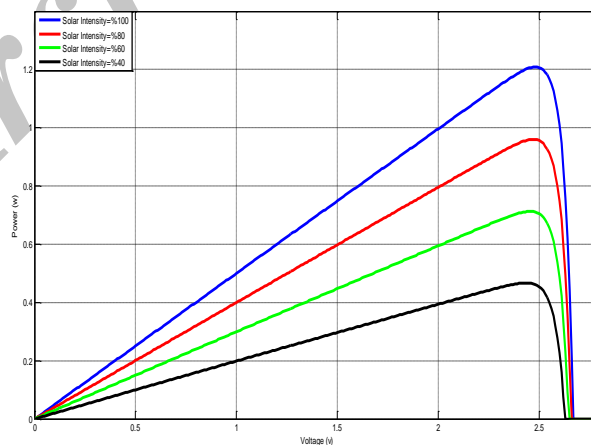
شکل (۷): منحنی جریان- توان در دماهای مختلف

در شکل (۷) تاثیر دما بر منحنی مشخصه ولتاژ-توان را نشان می‌دهد. این شکل نشان می‌دهد که با توجه به افزایش ولتاژ به دلیل کاهش دما، توان تولیدی نیز افزایش می‌یابد. با کاهش دما، افزایش ولتاژ به حدی زیاد است که مقدار کاهش جریان را به علت جزئی بودن، محسوس نیست. از این رو با کاهش دما توان خروجی افزایش می‌یابد. کاهش دما موجب می‌گردد تا نقطه ماکزیمم توان در ولتاژ بالاتر و با توان بالاتر قرار گیرد.



شکل (۸): منحنی جریان-ولتاژ در تابش‌های مختلف

نمودار شکل (۸) منحنی مشخصه جریان-ولتاژ سلول فتوولتائیک را در ازای ۱۰۰٪، ۸۰٪، ۶۰٪ و ۴۰٪ تابش نشان می‌دهد. همانطور که در شکل دیده می‌شود با افزایش تابش، جریان و ولتاژ سلول فتوولتائیک افزایش می‌یابد. افزایش تابش، مقدار جریان را به مقدار بسیار زیادی افزایش می‌دهد و می‌توان بیان کرد که جریان سلول فتوولتائیک با تابش به صورت تقریبی نسبت خطی دارد. اما ولتاژ سلول فتوولتائیک رابطه لگاریتمی با تابش دارد و با افزایش تابش، مقدار ولتاژ به میزان جزئی افزایش می‌یابد.



شکل (۹): منحنی ولتاژ-توان در تابش‌های مختلف

نمودار شکل (۹) منحنی مشخصه ولتاژ-توان سلول فتوولتائیک نشان می‌دهد این منحنی مشخصه در تابش‌های ۱۰۰٪، ۸۰٪، ۶۰٪ و ۴۰٪ بدست آمده است. با افزایش تابش، جریان و ولتاژ سلول فتوولتائیک افزایش می‌یابد و در نتیجه توان تولیدی افزایش می‌یابد. همچنین نقطه ماکزیمم توان سلول فتوولتائیک در ولتاژ نزدیک به حالت قبل اما با توان قابل ملاحظه‌ای بالاتر



قرار می گیرد.

### نتیجه گیری

در شبیه سازی انجام شده مشاهده شد که مدل سلول فتوولتائیک شبیه سازی شده به دو پارامتر دما و تابش وابسته است. همانگونه که نتایج شبیه سازی نشان داد که کاهش دما موجب، موجب افزایش قابل ملاحظه ای در ولتاژ و کاهش بسیار جزئی جریان می گردد. و در نتیجه توان تولیدی افزایش می یابد. و همچنین مشاهده گردید که افزایش تابش موجب افزایش قابل ملاحظه ای جریان و افزایش بسیار جزئی در ولتاژ می شود که در ادامه باعث افزایش توان تولیدی می گردد. از مقایسه نتایج بدست آمده از شبیه سازی و عملکرد واقعی سلول فتوولتائیک، صحت مدلسازی و شبیه سازی را تایید می نماید.

### منابع:

- F. Spertino and J. S. Akilimali, "Are manufacturing I-V mismatch and reverse currents key factors in large photovoltaic arrays?", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 56, No. 11, pp. 4520-4531, Nov. 2009.
- M. Laranja, "Portuguese National Strategy ENE". Available: <http://www.ccr-norte.pt/norte2020/loranja.pdf>
- M. G. Villalva, J. R. Gazoli, and E. R. Filho, "Comprehensive approach to modeling and simulation of photovoltaic arrays", *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 24, No. 5, pp. 1198-1208, May 2009.
- A. S. Sedra and K. C. Smith, *Microelectronic Circuits*. London, U.K.: Oxford Univ. Press, 2006.
- M.A. Eltawil, Z. Zhao, "Grid-connected photovoltaic power systems: Technical and potential problems—A review", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 14, No. 1, pp. 112–129, Jan. 2010.
- "Photovoltaic systems technology," Universitat Kassel, Kassel, Germany, 2003.
- G.R. Walker, "Evaluating MPPT topologies using a Matlab PV model", *Journal of Electrical & Electronics Engineering*, Vol. 21, No. 1, pp. 49-56, 2001.
- J. Yuncong, J.A.A. Qahouq, and I. Batarseh, "Improved solar PV cell Matlab simulation model and comparison", in: *Proc. 2010 IEEE International Symposium on Circuits and Systems — ISCAS'10*, Tuscalosa, Alabama, USA, 2010.