

# جدول تنظیم مجهولات سلول خورشیدی

سودابه سلیمانی  
گروه مهندسی برق قدرت، دانشکده فنی و مهندسی  
دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات  
تهران، ایران  
S.Soleymani@srbiau.ac.ir

مهرداد جرجانی  
گروه مهندسی انرژی، دانشکده محیط زیست و انرژی  
دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات  
تهران، ایران  
Mehrdad.Jorjani@gmail.com

آبتین عطایی

گروه مهندسی انرژی، دانشکده محیط زیست و انرژی  
دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات  
تهران، ایران  
a.ataei@srbiau.ac.ir

واژه‌های کلیدی — مدل سلول خورشیدی؛ جدول تنظیم مجهولات؛  
معادلات حدس اولیه؛ مدل تک دیودی سلول خورشیدی

## ۱. مقدمه

معادله سلول خورشیدی یک معادله به شدت غیر خطی بر حسب جریان سلول است. محدوده متغیرهای آن بسیار گسترده اند و این برای جریان اشباع معکوس در محدوده نانو و برای مقاومت موازی در محدوده هکتو است. همچنین متغیرهای آن به غیر از مقاومت سری با دما و تابش تغییر می کنند. بنابراین مدلسازی دقیق سلول خورشیدی برای محاسبه دقیق ماکزیمم توان در شرایط مختلف یک الزام است. تا به حال مدلها و روشهای حل متفاوتی ارائه شده است که در [1] بررسی شده اند. در [1] روشها به سه دسته غیر تکرار شونده، تکرار شونده و هوش مصنوعی تقسیم می شوند. و از مدلهای تک دیودی و دو دیودی بهره برده اند. در [2] نیز روشهای مختلف شبیه سازی شده اند. در روشهای غیر تکرار شونده یا روشهایی که روش حل مستقیم هستند از تقریب و تعریف ضرایبی استفاده می شود تا بتوان معادله را حل کرد. از طرفی بدلیل اینکه معادله جریان بر

چکیده — در این مقاله روشی به عنوان جدول تنظیم مجهولات سلول خورشیدی ارائه شده است. این جدول بر اساس مدل پنج متغیره سلول خورشیدی طراحی شده است. با توجه به اینکه در سالهای مختلف و به روشهای مختلف مستقیم ریاضی، عددی و هوش مصنوعی مدل سلول خورشیدی حل می شود نیاز به یک محک برای دقیق بودن دسته جواب پنج متغیر می باشد. معادلات نوشته شده برای هر سطر از این جدول به گونه ای است که اگر دسته جواب پنج متغیری کاملاً دقیق باشند همه سطرهای این جدول یکسان خواهند شد و اگر هم دقیق نباشند یکسان نخواهند شد و با کمک سطرهای جدول می توان مقادیر دقیق را پیدا کرد. می توان از این جدول برای سه کاربرد مهم استفاده کرد: ۱- محک دسته جواب پنج متغیری سلول خورشیدی و بدست آوردن دسته جواب دقیقتر ۲- بهبود دسته جواب حاصل از معادلات حدس اولیه برای روشهای حل عددی با توجه اینکه معادلات حدس اولیه قادر به محاسبه مقاومت موازی نیستند ۳- محاسبه پاسخ دقیق دسته جواب بطور مستقیم بدون استفاده از الگوریتمهای دیگر.

محاسباتی کمتر نسبت به مدل دو دیودی است و در عین حال نیازی به تقریبهای دیود دوم نخواهد بود. در این مقاله از این مدل استفاده خواهد شد. مدل تک دیودی بصورت زیر است و دارای پنج مجهول جریان فوتون، جریان اشباع معکوس، ضریب ایده آل دیود، مقاومت سری و موازی است:

$$I = I_{ph} - I_s \left[ \exp\left(\frac{V + IR_s}{N_s a V_T}\right) - 1 \right] - \frac{V + IR_s}{R_{sh}} \quad (1)$$

## ۲.۲. معادلات و تشکیل جدول تنظیم مجهولات

برای تشکیل جدول تنظیم مجهولات ابتدا جریان اشباع معکوس را بدست می آوریم:

$$I_s = \frac{I_{ph} - I - \frac{V + IR_s}{R_{sh}}}{\exp\left(\frac{V + IR_s}{N_s a V_T}\right) - 1} \quad (2)$$

معادله دیگر معادله مشتق توان بر حسب جریان است:

$$\frac{dP}{dI} = \frac{d(VI)}{dI} = V + I \frac{dV}{dI} \quad (3)$$

$$V - I \left[ \frac{1 + \frac{R_s}{R_{sh}} + \frac{I_s R_s}{N_s a V_T} \left[ \exp\left(\frac{V + IR_s}{N_s a V_T}\right) \right]}{\frac{I_s}{N_s a V_T} \left[ \exp\left(\frac{V + IR_s}{N_s a V_T}\right) \right] + \frac{1}{R_{sh}}} \right] - \frac{dP}{dI} \quad (4)$$

با توجه به حساسیتی که در جریان اشباع معکوس وجود دارد آن را در (۴) جاگذاری می کنیم و این پارامتر را حذف می کنیم. در نقطه ماکزیمم توان مشتق توان بر حسب جریان صفر است و مقادیر جریان و ولتاژ این نقطه در دیتاشیت موجود است بنابراین می توانیم با استفاده از تابع fzero برنامه MATLAB معادله را بر حسب ضریب ایده آل حل کنیم. سپس این مقدار در معادلات چهار پارامتر دیگر قرار می دهیم و آنها را محاسبه می کنیم و پاسخ ها را در یک سطر قرار می دهیم تا سطر اول جدول بر اساس پنج پارامتر محاسبه شده با مبنای ضریب ایده آل بدست آید. در ادامه نحوه تشکیل پنج پارامتر هر سطر را توضیح می دهیم:

سطر دوم: برای بدست آوردن یک دسته دیتا با توجه با a بدست آمده، به ترتیب I0, Rsh و Iph از معادلات مستقیم دقیق و با استفاده از تابع fzero از معادله مشتق توان نسبت به جریان (که فقط دو پارامتر a و Rsh نیاز دارد) بدست می آید.

سطر سوم: Iph از مقادیر ورودی محاسبه می شود و این سطر تمام ورودی ها و Iph را نشان می دهد (مقادیر دیگر محاسبه نمی شوند)

حسب خود جریان است از روشهای تکرار شونده مانند نیوتن رافسون استفاده می شود. این روشهای عددی برای همگرایی بهتر کاملا وابسته به مقادیر حدس اولیه هستند و زمانی برای رسیدن به جواب مورد نیاز است. پس نیاز به تعیین مقادیر حدس اولیه دقیق است ولی در [3] برای بدست آوردن این مقادیر برای مقاومت موازی فقط از حدس استفاده کرده است. پس نیاز به روشی است که این مقادیر را دقیق محاسبه کند. علاوه بر این نکته اصلی اینجاست که بین روشهای متعددی که وجود دارد خروجی کدام معادله دقیق تر است. و اگر دقیق نبود راه حل چیست؟ پاسخ این پرسشها در روش جدول حل مجهولات است که بر اساس مدل تک دیودی پنج متغیره طراحی شده است.

## ۲.۲. مدل جدول تنظیم مجهولات سلول خورشیدی

### ۲.۱. مدل تک دیودی پنج متغیره سلول خورشیدی

در مقاله [4] انواع مدار معادل سلول خورشیدی بصورت مدل ایده آل، مدل تک دیودی فقط با مقاومت سری، مدل تک دیودی با مقاومت سری و موازی، مدل دو دیودی و مدلهای دیگر مانند: مدل سه دیودی، مدل تجربی و ... اشاره شده است. ابتدا برای انتخاب مدل، مدل دو دیودی را بررسی می کنیم تا اگر مدل مناسبی بود از آن بهره ببریم. در مقاله [5] برای حل مدل دو دیودی جریانهای اشباع معکوس یکسان در نظر گرفته شده اند و ضریب ایده آل دیود اول برابر با یک و دوم بزرگتر از ۱.۲ در نظر گرفته شده است. در مقاله [6] جریان اشباع معکوس دیود دوم بصورت ضریبی از دیود اول است و ضرایب ایده آل دیود ها برابر یا یک تقریب خورده اند. در مقاله [7] از مقادیر اندازه گیری شده جریان و ولتاژ استفاده شده و برداری از هفت مجهول تشکیل شده تا در الگوریتم DEIM برای بدست آوردن هفت متغیر استفاده شود. در مقاله ای دیگر [8] بعد از بررسی پیچیدگی معادله دو دیودی برای دقت بیشتر از مدل کسری استفاده کرده است. با توجه به تقریبهایی که برای بدست آوردن جریان اشباع معکوس و ضریب ایده آل دیود دوم بدست می آید و در مورد غیر دقیق بودن مدلهای ارائه شده در [5] و [6] در مقاله [8] تایید شده است الزاما مدل دو دیودی دقیقترین مدل نیست و باید به تقریبها توجه کرد.

در مقابل مدل تک دیودی وجود دارد که فقط پنج پارامتر مجهول دارد در [1] بین روشهای مختلف حل اکثر روشها از مدل پنج متغیره تک دیودی بهره برده اند. دلیل پرکاربرد بودن این مدل دقت قابل قبول در مقابل حجم

### ۳. پیاده سازی مدل

معادلات مدل ارائه شده را در MATLAB پیاده می کنیم تا نتایج را برای سه حالت بدست آوریم:

۱- محک دسته جواب پنج متغیری سلول خورشیدی و بدست آوردن دسته جواب دقیقتر ۲- بهبود دسته جواب حاصل از معادلات حدس اولیه برای روشهای حل عددی با توجه اینکه معادلات حدس اولیه قادر به محاسبه مقاومت موازی نیستند ۳- محاسبه پاسخ دقیق دسته جواب بطور مستقیم بدون استفاده از الگوریتمهای دیگر.

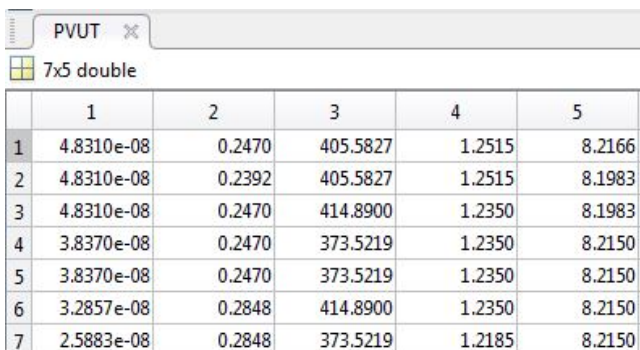
#### ۳.۱. محک دسته جواب پنج متغیری سلول خورشیدی

برای مثال از مجهولات بدست آمده در [9] که از روش پنج معادله پنج مجهول برای بدست آوردن پارامترهای پنل KC200GT در سال ۲۰۱۱ استفاده کرده، بهره می بریم تا روش را ارزیابی کنیم.

جدول ۱: مقادیر پنج متغیر در [9]

$I_o$	$I_{ph}$	$a$	$R_s$	$R_{sh}$
$4.812 \times 10^{-8}$	۸.۲۱۵	۱.۲۳۵	۰.۲۴۷	۴۱۴.۸۹

جدول تنظیم مجهولات بصورت شکل ۲ خواهد شد.



	1	2	3	4	5
1	4.8310e-08	0.2470	405.5827	1.2515	8.2166
2	4.8310e-08	0.2392	405.5827	1.2515	8.1983
3	4.8310e-08	0.2470	414.8900	1.2350	8.1983
4	3.8370e-08	0.2470	373.5219	1.2350	8.2150
5	3.8370e-08	0.2470	373.5219	1.2350	8.2150
6	3.2857e-08	0.2848	414.8900	1.2350	8.2150
7	2.5883e-08	0.2848	373.5219	1.2185	8.2150

شکل ۲: سطرهای جدول بعد از ورود اطلاعات

پس روش کاملاً دقیق نبوده است البته نویسنده مقاله در سال ۲۰۱۵ جوابهای دقیقتری را در [10] بدست می آورد که این موضوع را تصدیق می کند.

جدول ۲: مقایسه کار ۲۰۱۱ و ۲۰۱۵ نویسنده مقاله های [9] و [10]

	$I_o$	$R_s$	$R_{sh}$	$a$	$I_{ph}$
[9] مرجع	$4.812 \times 10^{-8}$	۰.۲۴۷	۴۱۴.۸۹	۱.۲۳۵	۸.۲۱۵
[10] مرجع	$6.912 \times 10^{-8}$	۰.۲۳۹	۴۹۰.۲۱۸	۱.۲۷۷	۸.۲۱۴

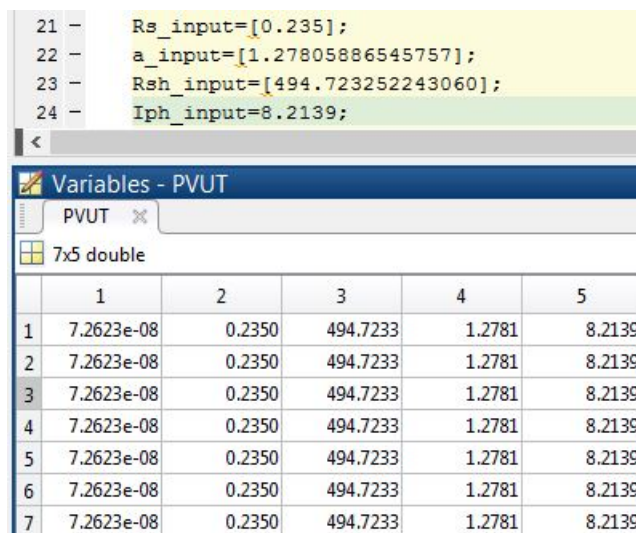
سطر چهارم: که بعد از سطر اول مهمترین سطر است مقدار دقیق  $R_{sh}$  را با استفاده از  $fzero$  از حل معادله مشتق توان بر حسب جریان بدست می آورد. در واقع موفق شدیم  $R_{sh}$  ای را بدست آوریم که فقط بوسیله  $a$  و  $R_s$  محاسبه می شود. از مقدار  $R_{sh}$  این سطر برای مقدار دهی در ورودی استفاده می شود. این سطر  $I_o$  و  $I_{ph}$  را نیز براساس  $R_{sh}$  جدید محاسبه می کند و مابقی مقادیر ورودی را نمایش می دهد.

سطر پنجم: براساس  $R_{sh}$ ,  $I_o$ ,  $I_{ph}$  محاسبه شده با کمک  $fzero$   $R_s$  را از معادله مشتق توان بر حسب جریان بدست می آورد و  $I_{ph}$  را دوباره محاسبه می کند.

سطر ششم: مقدار دقیق  $R_s$  را بر اساس ورودی ها بوسیله  $fzero$  از معادله مشتقی بدست می آورد،  $R_s$  این سطر برای تنظیم در ورودی اعمال می شود.

سطر هفتم: این جدول مقدار  $a$  را از سطر اول، مقدار  $R_{sh}$  را از سطر چهارم و مقدار  $R_s$  را از سطر ششم به عنوان ورودی می گیرد و براساس این ورودی ها مقدار جدید  $a$  را محاسبه می کند و با این مقدار  $a$ ,  $I_o$  و  $I_{ph}$  هم بدست می آیند.

بدین شکل معادلات برای هفت سطر جدول تنظیم مجهولات تشکیل می شوند. حال اگر ۴ متغیر ورودی یعنی ضریب ایده آل دیود، مقاومت سری، مقاومت موازی و جریان فوتون دقیق باشند همه سطرهای این جدول به ترتیب یکسان خواهند شد. و از این طریق می توان دقت محاسبات را محک زد.



```

21 - Rs_input=[0.235];
22 - a_input=[1.27805886545757];
23 - Rsh_input=[494.723252243060];
24 - Iph_input=8.2139;

```

	1	2	3	4	5
1	7.2623e-08	0.2350	494.7233	1.2781	8.2139
2	7.2623e-08	0.2350	494.7233	1.2781	8.2139
3	7.2623e-08	0.2350	494.7233	1.2781	8.2139
4	7.2623e-08	0.2350	494.7233	1.2781	8.2139
5	7.2623e-08	0.2350	494.7233	1.2781	8.2139
6	7.2623e-08	0.2350	494.7233	1.2781	8.2139
7	7.2623e-08	0.2350	494.7233	1.2781	8.2139

شکل ۱: سطرهای جدول به ازای داده های ورودی دقیق

### ۳.۲. بهبود دسته جواب حاصل از معادلات حدس

اولیه

```

34 - Rs_input= [0.294716328000992];
35 - a_input=1.2;
36 - Rsh_input=[367.387105060854];
37 - Iph_input=[8.2166];

```

Variables - PVUT					
F PVUT					
7x5 double					
	1	2	3	4	5
1	2.3626e-08	0.2947	366.6134	1.2152	8.2168
2	2.3626e-08	0.2939	366.6134	1.2152	8.2148
3	2.3626e-08	0.2947	367.3871	1.2152	8.2148
4	1.8825e-08	0.2947	336.9857	1.2000	8.2166
5	1.8825e-08	0.2947	336.9857	1.2000	8.2166
6	1.6245e-08	0.3296	367.3871	1.2000	8.2166
7	1.2846e-08	0.3296	336.9857	1.1848	8.2166

کاربرد دیگر جدول مجهولات تنظیم مقادیر اولیه است، در اینجا اطلاعات دیتا شیت را به معادلات حدس اولیه داده ایم و نتیجه را به عنوان ورودی وارد می کنیم، برای پنل ۲۰۰ kc اطلاعات را وارد می کنیم که در ادامه آمده است:

جدول ۳: مقادیر پنج متغیر از معادلات حدس اولیه

$I_s$	$R_s$	$R_{sh}$	$a$	$I_{ph}$
۲.۱۶۴۲ $\times 10^{-8}$	۰.۲۹۴۷	۲۹۴.۷	۱.۲	۸.۲۱

شکل ۴: بعد از تنظیم جریان فوتون و مقاومت موازی

۴- بعد از اجرای مرحله قبل بر اساس  $R_{sh}$ ,  $I_{ph}$  و  $a$  بدست آمده،  $I_{ph}$  محاسبه شده بر اساس این مقادیر را از سطر سوم وارد می کنیم:  
 $I_{ph}=8.2148$

```

34 - Rs_input= [0.294716328000992];
35 - a_input=[1.22261927472129];
36 - Rsh_input=[367.387105060854];
37 - Iph_input=[8.21480758612218];

```

Variables - PVUT					
F PVUT					
7x5 double					
	1	2	3	4	5
1	2.2230e-08	0.2947	503.2998	1.2110	8.1938
2	2.2230e-08	0.3992	503.2998	1.2110	8.5141
3	2.2230e-08	0.2947	367.3871	1.2110	8.5141
4	2.6372e-08	0.2947	394.5901	1.2226	8.2148
5	2.6372e-08	0.2947	394.5901	1.2226	8.2148
6	2.9450e-08	0.2681	367.3871	1.2226	8.2148
7	3.4792e-08	0.2681	394.5901	1.2342	8.2148

شکل ۵: مقادیر براساس ضریب ایده آل تنظیم شده

۵- دوباره با توجه به تغییر  $I_{ph}$ ، مقدار  $R_{sh}$  باید بر این اساس تنظیم شود، بنابر این  $R_{sh}$  محاسبه شده بر اساس این  $I_{ph}$  را از سطر اول وارد می کنیم:  
 $R_{sh}=503.2998$

۶-  $a$  را هم بر اساس  $I_{ph}$  و  $R_{sh}$  بدست آمده از سطر اول وارد می کنیم:  
 $a=1.2563$   
بعد از طی کردن ۶ مرحله تمام سطرها مانند شکل ۶ یکسان می شود و به جواب نهایی می رسیم. این ۶ مرحله برای دقیق تر کردن پاسخ قسمت قبل نیز قابل استفاده است.

مقادیر را وارد برنامه می کنیم شکل ۳.

```

34 - Rs_input= [0.294716328000992];
35 - a_input=1.2;
36 - Rsh_input=[294.716328000992];
37 - Iph input=[8.21];

```

Variables - PVUT					
F PVUT					
7x5 double					
	1	2	3	4	5
1	9.8174e-09	0.2947	-7.0345e+07	1.1585	8.1132
2	9.8174e-09	0.7762	-7.0345e+07	1.1585	12.5248
3	9.8174e-09	0.2947	294.7163	1.1585	12.5248
4	1.8839e-08	0.2947	367.3871	1.2000	8.2100
5	1.8839e-08	0.2947	367.3871	1.2000	8.2100
6	2.8303e-08	0.1985	294.7163	1.2000	8.2100
7	5.1322e-08	0.1985	367.3871	1.2416	8.2100

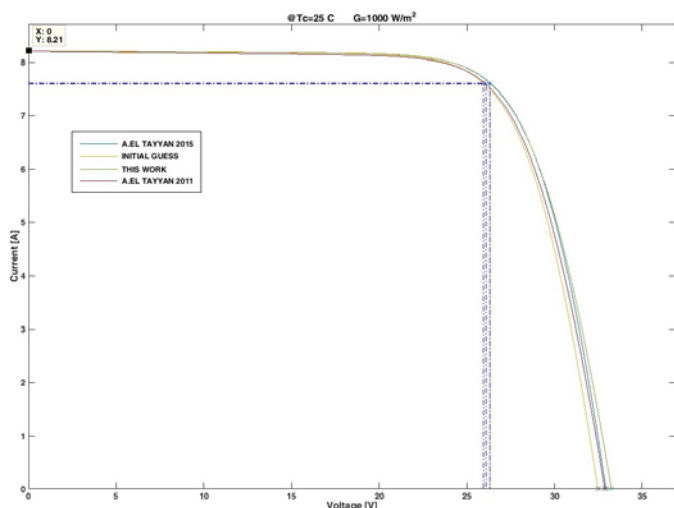
شکل ۳

برای تنظیم مقادیر مراحل زیر را طی می کنیم:

- ۱- برای تنظیم  $R_{sh}$ ، مقدار  $R_{sh}$  محاسبه شده را بر اساس مقادیر ورودی وارد می کنیم از سطر چهارم.  $R_{sh}=367.38$
- ۲- با توجه به اینکه رقم سوم اعشار  $I_{ph}$ ، وابسته به  $R_{sh}$  است، پس از تعیین مقدار  $R_{sh}$  که در مرحله قبل انجام شد،  $I_{ph}$  را از خروجی برنامه وارد می کنیم تا دوسطر اول هم تصحیح شوند.
- ۳- با توجه به تعیین محدوده دقیقتری از  $R_{sh}$  و  $I_{ph}$ ، در سطر اول  $a$  که بر اساس این مقادیر بدست آمده را در ورودی قرار می دهیم:  
 $a=1.2152$

سنجیده شده اند. علاوه بر این جدول تنظیم مجهولات هم با استفاده از الگوریتم تعریف شده ۶ مرحله ای موفق به محاسبه پاسخی برای پنج متغیر پنل kc200GT شد که در شکل ۶ مشاهده می شود. الگوریتم ۶ مرحله ای در واقع از معادلات حدس اولیه که مقادیر خروجی برای پنج متغیر مدل تک دیودی بطور تقریبی بدست می آورند استفاده کرده بود و آنها را دقیق تر کرده بود که به آن پاسخ دقیق، پاسخ جدول تنظیم مجهولات گفته شد. حال که از روشهای کاملا مختلفی پنج متغیر مدل تک دیودی برای پنل kc200GT محاسبه شده است نیاز به مقایسه نتایج با یکدیگر است تا بر اساس حجم محاسبات و پیچیدگی روش و دقت جوابها ارزش پاسخ هر روش با دیگری و با دیتاشیت مقایسه شود.

برای مقایسه ۴ پاسخ روش [9] روش [10]، حدس اولیه و جدول تنظیم مجهولات نمودارهای آنها را در شکل ۷ ترسیم کرده ایم تا نقاط اساسی قابل مقایسه باشند.



شکل ۷: مقایسه چهار پاسخ بصورت نمودار I-V

برای بهتر مشخص شدن اختلاف مخصوصا در نقطه ماکزیمم توان که نقطه کار پنل خورشیدی است، شکل بزرگتری از منحنی I-V در نقطه ماکزیمم توان در شکل ۸ ترسیم شده است. در این شکل اگر دقیق ترین نمودار را متعلق به روش پیچیده ای که در [10] استفاده شده بدانیم، مشاهده می کنیم که نمودار حاصل از پاسخ جدول تنظیم مجهولات نیز بسیار نزدیک به این نمودار است مخصوصا در نقطه ماکزیمم توان. در همین راستا جدول ۴ نیز مقادیر محاسبه شده را از نمودار خارج کرده و در جدولی برای مقایسه بهتر دقت روشها آورده است.

```

34 - Rs_input= [0.294716328000992];
35 - a_input=[1.25630231814709];
36 - Rsh_input=[503.299785752528];
37 - Iph_input=[8.21480758612218];

```

Variables - PVUT					
PVUT					
7x5 double					
	1	2	3	4	5
1	4.2614e-08	0.2947	503.3057	1.2563	8.2148
2	4.2614e-08	0.2947	503.3057	1.2563	8.2148
3	4.2614e-08	0.2947	503.2998	1.2563	8.2148
4	4.2614e-08	0.2947	503.2998	1.2563	8.2148
5	4.2614e-08	0.2947	503.2998	1.2563	8.2148
6	4.2614e-08	0.2947	503.2998	1.2563	8.2148
7	4.2614e-08	0.2947	503.2998	1.2563	8.2148

شکل ۶: تنظیم دوباره جریان فوتون و مقاومت موازی براساس ضریب ایده آل تنظیم شده

در واقع هم می توان دسته جواب حاصل را به عنوان پاسخ در نظر گرفت و هم اینکه به عنوان حدس اولیه به روشهای عددی داد.

#### ۴. مقایسه نتیجه با کارهای گذشته

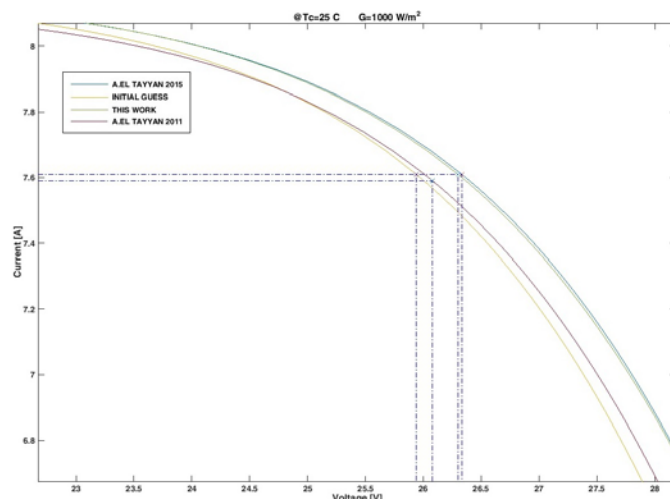
همانطور که اشاره شد در [9] در سال ۲۰۱۱ پنج متغیر مدل تک دیودی برای پنل kc200GT، با استفاده از روش پنج معادله غیر خطی، پنج مجهول حل شده است. پنج معادله آن معادله جریان در نقطه اتصال کوتاه، معادله جریان در نقطه ماکزیمم توان، معادله جریان در نقطه مدار باز، مشتق توان نسبت به جریان و مشتق توان نسبت به ولتاژ است. این پنج معادله باید توسط برنامه کامپیوتری بطور همزمان حل شوند و همچنین مقادیر اولیه دقیقی برای همگرایی جواب نیاز است. پاسخ بدست آمده توسط این روش در بخش ۳.۱ توسط جدول تنظیم مجهولات سنجیده شده است. همانطور که مشاهده شد جواب کاملا دقیق نبود. سپس نویسنده همین مقاله در سال ۲۰۱۵ در [10] برای حل مدل تک دیودی از تابع Lambert W بهره برده است. خاصیت این تابع در بدست آوردن معادله بر حسب ولتاژ است. در مقاله اشاره شده چهار متغیر جریان اشباع معکوس، ضریب ایده آل دیود، مقاومت سری و مقاومت موازی بوسیله حل چهار معادله بطور همزمان محاسبه می شوند در حالیکه جریان فوتون با فواصل کمی افزایش می یابد. نتیجه این کار مطابقت با نتایجی است که بوسیله آزمایش بدست آمده و در مقالات و کتب اشاره شده است. این مقاله نیز نتایجی را برای پنل kc200GT ارائه کرده است. پاسخ های بدست آمده کاملا نزدیک به جوابهای دقیقی هستند که در شکل ۱ توسط جدول تنظیم مجهولات

## ۵. نتیجه گیری

تا به حال برای حل مدل پنج متغیره سلول خورشیدی از روشهای پیچیده هوش مصنوعی، روشهای عددی که کاملا وابسته به مقادیر حدس اولیه هستند و روشهای مستقیم ریاضی که از تقریبهای زیاد و ثابتها برای ساده سازی معادله جهت حل استفاده می کردند استفاده می شد. همچنین روشی برای محک زدن و بالا بردن دقت خروجی ها در دسترس نبود. با تعریف جدول تنظیم مجهولات سلول خورشیدی بر اساس معادلات مختلف نشان داده شد که در صورتی که جواب بدست آمده برای پنج متغیر سلول خورشیدی دقیق باشد تمام سطرهای این جدول و در واقع تمامی معادلات یک جواب را نمایش خواهند داد و در غیر اینصورت پاسخ محاسبه شده از دقت کافی برخوردار نیست، همچنین یک روش ۶ مرحله ای برای دقیق کردن پاسخ ها برای این جدول ارائه شد که بر خلاف الگوریتمهای دیگر که با حجم محاسبات بالا و تعداد تکرار زیاد به جواب می رسند فقط در ۶ مرحله جدول تنظیم مجهولات توانست پاسخ دقیق را محاسبه کند.

## منابع

- [1] D.Jena , v.v.Ramana, "Modeling of photovoltaic system for uniform and non-uniform irradiance : A critical review," elsevier renewable and sustainable energy reviews, vol. 52, pp. 400-417, July 2015.
- [2] D.Rekioua , E.Matagne, "optimization of photovoltaic power systems modelization, simulation and control," springer, 2012.
- [3] J.A.Duffie,W.A.Beckman," solar energy of thermal processes ," JOHN WILEY & SONS, INC , ed. 3rd, pp. 747-775, 2006.
- [4] T.Ma,H.Yang,L.Lu,"Solar photovoltaic system modeling and performance prediction," elsevier renewable and sustainable energy reviews, vol. 36, pp. 304-315, May 2014.
- [5] K.Ishaque,Z.Salam,H.Taheri," Simple, fast and accurate two-diode model for photovoltaic modules," elsevier Solar Energy Materials & Solar Cells, vol. 95, pp. 586-594, May 2011.
- [6] S. Gupta,H.Tieari,M.Fozder,V.Chandna," Development of a Two Diode Model for Photovoltaic Modules Suitable for Use in Simulation Studies," Power and Energy Engineering Conference (APPEEC), 2012 Asia-Pacific, pp. 1-4, March 2012.
- [7] D.Muhsen,A.Ghazali,T.khatib,I.Abed," Parameters extraction of double diode photovoltaic module's model based on hybrid evolutionary algorithm," elsevier Energy Conversion and Management, vol. 105, pp. 552-561, May 2015.
- [8] R.Miceli,A.Orioli,A.Gangi," A procedure to calculate the I-V characteristics of thin-film photovoltaic modules using an explicit rational form," elsevier Applied Energy, vol. 155, pp. 613-628, Jun 2015.
- [9] A.A.El Tayyan," PV system behavior based on datasheet ," Journal of Electron Devices , vol. 9, pp. 335-341, 2011.
- [10] A.A.El Tayyan," An approach to extract the parameters of solar cells from their illuminated I-V curves using the Lambert W function ," Turkish Journal of Physics , vol. 39, pp. 1-15, 2015.
- [11] KYOCERA,KC200GT  
<http://www.kyocerasolar.com/assets/001/5195.pdf>



شکل ۸: بزرگنمایی نقطه ماکزیمم توان در نمودار I-V برای مقایسه پاسخ پنج متغیر روشهای مختلف.

همانطور که در جدول ۴ دیده می شود، مقادیر بدست آمده با مقادیر دیتاشیت که توسط سازنده منتشر می شود مقایسه شده است. نتیجه قابل توجه این است که الگوریتم ۶ مرحله ای جدول تنظیم مجهولات توانسته در کنار الگوریتمهای پیچیده دیگر در [9] و [10] نقطه ماکزیمم توان را بخوبی محاسبه کند و مقادیر تقریبی حدس اولیه را به مقادیر دقیق تری محاسبه کند. و به این ترتیب مدل جدول تنظیم مجهولات برای پنل kc200GT و روشهای مختلفی که پنج متغیر را برای این پنل بدست آورده بودند ارزیابی شد.

جدول ۴: مقایسه نقاط بین روشهای مختلف و دیتاشیت

دیتاشیت	این مقاله	مرجع [۹]	مرجع [۱۰]	حدس اولیه	
$I_{sc}$	۸,۲۱	۸,۲۲	۸,۲۱	۸,۲۱	
$I_{mp}$	۷,۶۱	۷,۵۹	۷,۶۱	۷,۶۱	
$V_{mp}$	۲۶,۳	۲۶,۰۸	۲۶,۳۳	۲۵,۹۴	
$P_{mp}$	۲۰۰	۱۹۷,۹	۲۰۰,۴	۱۹۷,۴	
$V_{oc}$	۳۲,۹	۳۲,۸۸	۳۲,۹۴	۳۲,۴۷	

