

نوع مقاله: پژوهشی

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۴/۲۲

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۴/۹

## مدل سازی عددی، سه بعدی و گذرای توزیع دما و توان خروجی در ماژول فتوولتائیک

نجمه دباغزاده<sup>۱</sup>، محمد اسلامی<sup>۲\*</sup>

<sup>۱</sup> دانش آموخته کارشناسی ارشد دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران

n.dabaghzade@yahoo.com

<sup>۲</sup> استادیار دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران

meslami@shirazu.ac.ir

**چکیده:** به دلیل تأثیر دمای ماژول فتوولتائیک در توان خروجی، در این پژوهش سعی بر آن است که با حل عددی معادلات بقای انرژی، توزیع دما در یک ماژول فتوولتائیک محاسبه و در نتیجه توان خروجی آن دقیق تر پیش بینی گردد. برای این منظور، به مدل سازی عددی چند ماژول فتوولتائیک با جزئیات کامل در نرم افزار کامسول پرداخته شده است. روش جدیدی برای محاسبه توان خروجی به عنوان تابعی از دمای ماژول فتوولتائیک ارائه و به حل توأمان آن با معادلات حرارتی پرداخته شده است. شبیه سازی حاضر به صورت سه بعدی و گذراست و لایه های مختلف ماژول به طور جداگانه در نظر گرفته شده اند. همچنین تأثیر استفاده از روابط متفاوت ضریب اتلاف حرارت جابه جایی اجباری در توزیع دما و توان خروجی ماژول فتوولتائیک مورد مطالعه قرار گرفته است. نتایج نشان می دهد که ویژگی های ذکر شده منجر به پیش بینی دقیق تر توزیع دما و در نتیجه، عملکرد ماژول فتوولتائیک می شود.

**واژه های کلیدی:** ماژول فتوولتائیک، توزیع دما، حل عددی، ضریب انتقال حرارت جابه جایی.

## ۱. مقدمه

با توجه به تقاضای رو به رشد مصرف‌کنندگان، نیاز به تولید برق در سطح جهانی افزایش یافته است. گرمایش جهانی، آلودگی‌ها و تأکید مقررات بر محدود کردن انتشار گازهای گلخانه‌ای، هزینه و مشکلات تولید برق با استفاده از سوخت‌های فسیلی را افزایش داده است. بنابراین، استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر، از جمله انرژی خورشیدی (به دلیل پتانسیل بیشتر در اکثر مناطق جغرافیایی) با استفاده از سیستم‌های فتوولتائیک افزایش یافته است [۱]. سیستم‌های فتوولتائیک توانایی تبدیل انرژی خورشیدی به الکتریسیته (به صورت مستقیم) را با راندمانی در حدود ۵ تا ۲۲٪ دارند؛ یعنی سلول‌های فتوولتائیک بخش کمی از تشعشع جذب شده را به انرژی الکتریکی تبدیل می‌کنند و مابقی آن به صورت حرارت تلف می‌شود. نقطه ضعف ماژول‌های فتوولتائیک راندمان الکتریکی پایین آن‌هاست، در عین حال افزایش دمای سلول موجب کاهش راندمان الکتریکی آن نیز می‌شود [۲].

برخی محققان به دنبال ارائه رابطه‌ای برای محاسبه دمای ماژول فتوولتائیک برحسب تابش خورشید، دمای محیط و سرعت باد هستند. برای نمونه، تمیژمانی و همکاران [۳] با جمع‌آوری اطلاعات اندازه‌گیری شده توسط دو پایگاه و با استفاده از مدل‌های ریاضی (شبکه عصبی)، و نیز دو و همکاران [۴] با استفاده از یک مدل تئوری و مدل حرارتی به صورت جبری و گذرا، روابطی را برای دمای ماژول فتوولتائیک ارائه کرده‌اند. تیومیرانتا و همکاران [۵] به بررسی روابط ارائه شده مربوط به دمای سیستم‌های فتوولتائیک پرداخته‌اند؛ آن‌ها ۱۶ مدل ارائه شده در مطالعات گذشته را بررسی کرده و دریافتند که روابط ارائه شده در مطالعات گذشته، در صورتی که سیستم مورد نظر دارای شرایط محیطی تقریباً یکسان باشد، قابل کاربرد است.

برخی محققان به بررسی روابط مربوط به توان تولیدی ماژول فتوولتائیک در سایر مقالات پرداخته‌اند. برای نمونه، دویی و همکاران [۶] با در نظر گرفتن پارامترهای مؤثر بر توان تولیدی از جمله مواد تشکیل دهنده سیستم‌های فتوولتائیک، تابش خورشید و دمای محیط، فرمولی را برای توان تولیدی پیشنهاد داده‌اند. همچنین اسکوپلاکی و پالیوس [۷] نشان دادند که علاوه بر شرایط محیطی، عواملی نظیر جنس، هندسه و وجود قاب در تعیین ضرایب مربوط به روابط توان تولیدی ماژول فتوولتائیک مؤثر هستند. فشارکی و همکاران [۸] ارتباط بین بازده الکتریکی، تابش خورشید و دمای سیستم فتوولتائیک را بررسی کرده و رابطه‌ای برای توان تولیدی

برحسب دمای محیط و تابش خورشید به دست آورده‌اند. گاکلیا و همکاران [۹] نیز روابطی را برای دما، توان و بازده الکتریکی سیستم‌های فتوولتائیک به صورت تابعی از تابش خورشید، دمای محیط و سرعت باد ارائه کرده‌اند؛ آن‌ها بر این باورند که ارائه این گونه روابط برای ارزیابی اولیه سیستم‌های فتوولتائیک و برای نصب در اقلیم آب‌وهوایی مشابه می‌تواند مفید باشد.

ماتئی و همکاران [۱۰] تأثیر شرایط مختلف از جمله تابش خورشید و شرایط محیطی را بر توان تولیدی بررسی کرده و در مدل حرارتی ضربی را برای کل اتلاف حرارت از ماژول در نظر گرفته و آن را با توان تولیدی ترکیب کرده‌اند. لوبرا و والکیلاهی [۱۱] با استفاده از یک بالانس انرژی گذرا به بررسی توزیع دما در ماژول‌های فتوولتائیک در طول یک روز در زمستان و تابستان پرداخته‌اند. علاوه بر این، نوتون و همکاران [۱۲] با مدل‌سازی ماژول فتوولتائیک به صورت یک‌بعدی در راستای ضخامت، دمای پانل خورشیدی را محاسبه کرده‌اند. آن‌ها به این نتیجه دست یافتند که فقط اتلاف حرارت جابه‌جایی اجباری و تابش را به عنوان اتلاف حرارت از ماژول فتوولتائیک در نظر بگیرند. رضایا و همکاران [۱۳] با اعمال بالانس انرژی مجزا برای هر لایه، توزیع دما را در سلول‌های فتوولتائیک مطالعه کرده و سرعت باد را به دلیل تأثیر زیاد روی اتلاف حرارتی جابه‌جایی به عنوان پارامتر بحرانی مطرح کرده‌اند. الارگا و همکاران [۱۴] عملکرد حرارتی و الکتریکی ماژول را با استفاده از مدل حرارتی یک‌بعدی در راستای ضخامت و با در نظر گرفتن لایه‌ای از مواد تغییر فاز دهنده برای خنک‌سازی سیستم و بدون آن مورد بررسی قرار داده‌اند؛ آن‌ها با بررسی پارامترهایی نظیر زاویه برخورد، شدت تابش خورشیدی و دمای محیط نشان داده‌اند که استفاده از این مواد منجر به کاهش دمای میانگین سطح می‌شود و علاوه بر بهبود عملکرد حرارتی، موجب کاهش بار خنک‌سازی نیز می‌شود. ژائو و همکاران [۱۵] با در نظر گرفتن سه لایه برای سیستم‌های فتوولتائیک، دمای آن را برای اقلیم مختلف آب‌وهوایی مورد مطالعه قرار داده و با بررسی شرایط ابری و آفتابی، تابش خورشید را مهم‌ترین عامل تأثیرگذار در دمای سیستم فتوولتائیک معرفی کرده‌اند.

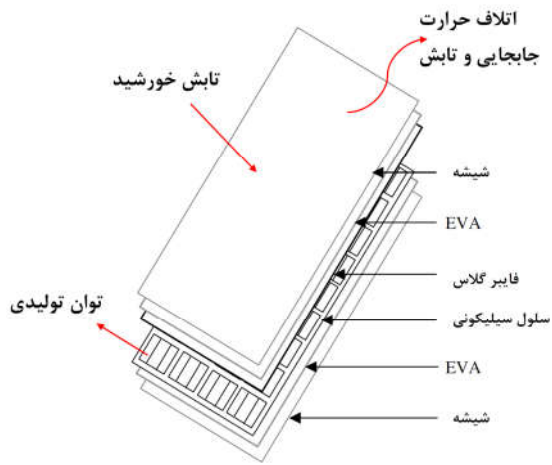
تورس - لوبرا و والکیلاتی [۱۶] با استفاده از شبیه‌سازی ماژول فتوولتائیک به صورت دوبعدی با خواص میانگین لایه‌ها به بررسی دمای آن و اتصال سری سلول‌ها پرداخته‌اند. کانت و همکاران [۱۷] با استفاده از مدل‌سازی دوبعدی و لایه‌لایه، اثر پارامترهایی نظیر شرایط اتمسفر و زاویه نصب ماژول فتوولتائیک را بررسی کرده‌اند.

آمده و با نتایج تجربی موجود به منظور اعتبارسنجی مقایسه می‌شود.

## ۲. مدل‌سازی عددی ماژول فتوولتائیک

یک ماژول فتوولتائیک در حالت کلی در شکل (۱) نشان داده شده که دارای شش لایه مجزاست. تابش خورشید به لایه اول آن (شیشه) برخورد می‌کند، سپس مقداری از انرژی برخوردی، منعکس شده و مقداری به شیشه جذب می‌شود و مابقی آن از شیشه عبور کرده و پس از عبور از لایه اتیل وینیل استات (EVA<sup>۱</sup>) جذب لایه اصلی ماژول (سیلیکون) می‌گردد؛ مقداری از این انرژی جذب شده توسط سیلیکون منجر به تولید توان می‌شود و مابقی از طریق اتلاف حرارت جابه‌جایی (اجباری و آزاد) و تابش از سطوح ماژول به محیط اطراف منتقل می‌گردد.

برای مدل‌سازی ماژول فتوولتائیک، به اطلاعاتی مانند شرایط محیطی، تابش خورشید، جنس ماژول و زاویه نصب نیاز است. ماژول انتخابی در پژوهش حاضر از جنس پلی کریستال و دارای شش لایه جداگانه است که در زاویه ۴۵° نسبت به زمین نصب شده و ابعاد آن ۱/۰۴۲×۰/۴۶۲×۰/۰۳۹ مترمکعب می‌باشد. مشخصات لایه‌های مختلف این ماژول در جدول (۱) ارائه شده است [۱۲].



شکل (۱): لایه‌های مختلف ماژول [۱۲] و تبادل انرژی آن با محیط

جدول (۱): ابعاد و خواص ترموفیزیکی هر لایه

	شیشه	EVA	سیلیکون
ضریب هدایت حرارتی	۲ W/mK	۰/۳۵ W/mK	۱۳۰ W/mK
چگالی	۲۷۰۰ kg/m <sup>3</sup>	۹۶۰ kg/m <sup>3</sup>	۲۳۳۰ kg/m <sup>3</sup>
ظرفیت گرمایی ویژه	۷۵ J/kgK	۲۰۹۰ J/kgK	۸۳۶ J/kgK
ضخامت	۱۲ mm	۱/۲ mm	۰/۶ mm
ضریب جذب	۵ m <sup>-۱</sup>	۴ m <sup>-۱</sup>	۹۰ m <sup>-۱</sup>

### 1. Ethylene-Vinyl acetate

همچنین ویس و همکاران [۱۸] با استفاده از مدل دوبعدی و لایه‌لایه، به بررسی نرخ انعکاس، جذب و عبور از سایر لایه‌های ماژول فتوولتائیک پرداخته‌اند.

سیدیگویی و همکاران [۱۹] با استفاده از یک مدل‌سازی سه‌بعدی، توزیع دما را در ماژول‌های فتوولتائیک مطالعه کرده‌اند؛ آن‌ها خروجی مدل حرارتی را به‌عنوان ورودی برای محاسبه توان تولیدی در نظر گرفته‌اند. با این روش، سیدیگویی [۲۰] توان خروجی را برای ۶ نوع سیستم فتوولتائیک مختلف پیش‌بینی کرد و به این نتیجه دست یافت که مدل ۷ پارامتری (که در ادامه معرفی خواهد شد) نسبت به سایر معادلات، توان تولیدی را بهتر پیش‌بینی می‌کند. کاپلانی و کاپلانیز [۲۱] هم با هدف یافتن زاویه نصب بهینه برای سیستم‌های فتوولتائیک، پارامترهایی نظیر سرعت باد، جهت باد و زاویه نصب را برای تعیین اتلاف حرارت جابه‌جایی اجباری مد نظر قرار داده‌اند.

الیول و همکاران [۲۲] برای مقایسه توان تولیدی و بازده ماژول‌ها، سه نوع سیستم فتوولتائیک آمورفوس سیلیکون، مونوکریستال و پلی کریستال را بررسی کرده و عملکرد آن‌ها را به‌صورت ساعتی، روزانه و ماهیانه به دست آورده‌اند. سلیمانی و همکاران [۲۳] نیز به بررسی و مقایسه توان تولیدی در ۴ نوع از سیستم‌های فتوولتائیک (سیستم فتوولتائیک، سیستم فتوولتائیک/ حرارتی همراه با کلکتور هوا، سیستم فتوولتائیک/ حرارتی همراه با کلکتور هوا و یک شیشه، سیستم فتوولتائیک/ حرارتی همراه با کلکتور هوا و دو شیشه) پرداخته‌اند؛ آن‌ها نشان دادند که سیستم فتوولتائیک/ حرارتی همراه با کلکتور هوا و دو شیشه دارای بهترین عملکرد ماهیانه و سالیانه است. همچنین اگر سرعت باد به‌گونه‌ای باشد که منجر به خنک‌سازی سیستم فتوولتائیک گردد، سیستم بدون خنک‌سازی مناسب است و خنک‌سازی در توان تولیدی تأثیر چندانی ندارد.

با مرور مطالعات گذشته روشن است که در جزئیات مدل حرارتی از جمله ضریب اتلاف حرارت جابه‌جایی آزاد، اجباری و ترکیبی و همچنین توان تولیدی در ماژول فتوولتائیک و حل توأمان آن با معادلات حرارتی ابهاماتی وجود دارد. بنابراین هدف از این پژوهش رسیدن به توزیع دمای دقیق‌تر در ماژول‌های فتوولتائیک است. برای این منظور، به بررسی کامل جزئیات مدل‌سازی حرارتی، تأثیر حل عددی ماژول فتوولتائیک به‌صورت سه‌بعدی، گذرا، با لایه‌های مجزا و حل توأمان معادلات حرارتی و توان تولیدی پرداخته می‌شود. در نهایت توزیع دما و توان تولیدی ماژول فتوولتائیک در طی یک روز با اقلیم مختلف آب‌وهوایی به دست

این سطح بیشترین جذب تابش را دارد و به‌عنوان سطح کدر تعریف می‌شود. برای حل و مدل‌سازی تغییرات شدت تشعشع در لایه‌های نیمه‌شفاف و در نهایت، محاسبه مقدار  $Q_S$  متناظر با هر لایه، از روش  $DO^1$  استفاده شده است:

$$\frac{dI(r, s)}{ds} + (a + \sigma_s)I(r, s) = an^2 \frac{\sigma T^4}{\pi} + \frac{\sigma_s}{4\pi} \int_0^{4\pi} I(r, s') \phi(s, s') d\phi' \quad (5)$$

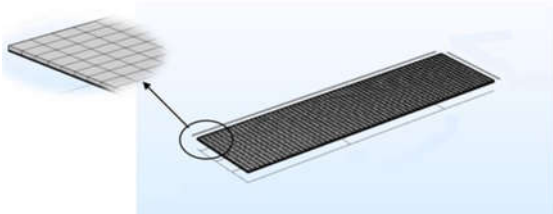
در این رابطه،  $r, s$  بردار مکان و جهت  $(m)$ ،  $s'$  بردار جهت بازتاب  $(m)$ ،  $a$  ضریب جذب  $(m^{-1})$ ،  $n$  ضریب شکست،  $\phi'$  زاویه تابش  $(sr)$ ،  $\sigma_s$  ضریب پخش  $(m^{-1})$ ،  $\sigma$  ثابت استفان بولتزمن<sup>۲</sup>  $(W/m^2.K^4)$ ،  $I$  شدت تشعشع  $(W/sr)$  و  $\phi$  تابع فاز است.

ضریب جذب برای شیشه ۵، ضریب شکست ۱/۵ و ضریب پخش ناچیز در نظر گرفته می‌شود. به‌منظور اعمال شرایط مرزی در حل معادله انرژی، اتلاف حرارت جابه‌جایی و تابش از تمامی سطوح ماژول در نظر گرفته شده است. روابط مناسب برای اتلاف حرارت جابه‌جایی در بخش بعد مورد بحث قرار می‌گیرند. برای محاسبه دمای آسمان در اتلاف حرارت تشعشعی از رابطه (۶) استفاده شده است.

$$T_{sky} = 0.0552 * T_a^{1.5} \quad (6)$$

همچنین شرط مرزی بقای انرژی در مرز بین لایه‌ها اعمال شده است. بدین صورت که شار حرارتی خروجی از هر لایه، با مکانیزم هدایت به لایه بعد وارد شده و پیوستگی دما بین لایه‌ها حفظ می‌شود.

شکل (۲) شبکه‌بندی لایه‌های مختلف ماژول را نشان می‌دهد که از سلول‌های ساختاریافته به شکل چهاروجهی استفاده شده است. برای اطمینان از کیفیت مش‌ها، سایز آن‌ها کوچک‌تر می‌شود و این کار تا زمانی ادامه می‌یابد که تغییری در دمای متوسط ماژول مشاهده نشود؛ در نتیجه تعداد المان‌ها برابر با ۱۲۶۰۰ انتخاب می‌شود.



شکل (۲): شبکه‌بندی ماژول فتوولتائیک

معادله انرژی گذرا و سه‌بعدی حاکم بر توزیع دما در لایه‌های مختلف ماژول فتوولتائیک به شرح زیر است:

$$\rho C_P \frac{\partial T}{\partial t} + \nabla \cdot (-k \nabla T) = Q + Q_S \quad (1)$$

در این رابطه،  $T$  دمای ماژول فتوولتائیک  $(K)$ ،  $\rho$  چگالی  $(kg/m^3)$ ،  $C_P$  ظرفیت گرمای ویژه در فشار ثابت  $(J/kg.K)$ ،  $k$  ضریب هدایت حرارتی  $(W/m.K)$  است. همچنین،  $Q_S$  انرژی حرارتی جذب‌شده در اثر تابش خورشید است که برای لایه‌های نیمه‌شفاف در نظر گرفته می‌شود و  $Q$  انرژی الکتریکی تولیدشده در واحد حجم لایه سیلیکون است که فقط برای همین لایه به‌صورت یک چاه حرارتی مدل‌سازی شده است. از آنجا که بازده و توان تولیدی سلول‌ها به دمای ماژول فتوولتائیک وابسته است، رابطه مربوط به توان باید به‌طور توأمان (کوپل) با معادلات انرژی حل شود. بنابراین توان تولیدی به‌عنوان یک منبع حرارتی منفی (به‌دلیل خروج انرژی) در نظر گرفته شده که به لایه اصلی ماژول (سیلیکون) اعمال می‌شود و در رابطه (۲) نشان داده شده است. روابط (۲) تا (۴) توان تولیدی ماژول فتوولتائیک و نحوه اعمال آن در معادله انرژی را نشان می‌دهد.

$$Q = -\frac{P_{out}}{V} \quad (2)$$

$$P_{out} = \eta SA \quad (3)$$

$$\eta = \eta_{ref} (1 - \beta_{ref}(T - T_{ref})) \quad (4)$$

که  $\eta_{ref}$  بازده ماژول در حالت مرجع،  $T_{ref}$  دمای ماژول در حالت مرجع  $(K)$ ،  $S$  تابش خورشید عمود بر سطح ماژول  $(W/m^2)$ ،  $A$  سطح ماژول  $(m^2)$  و  $V$  حجم لایه سیلیکون  $(m^3)$  است.

رابطه (۴) نشان‌دهنده نحوه کاهش خطی بازده ماژول با افزایش دماست که به ضریب دمای مرجع  $\beta_{ref}$  وابسته است. مقدار این پارامتر برای سلول‌های خورشیدی پلی کریستال سیلیکون معمولاً برابر با ۰/۰۰۴ در نظر گرفته می‌شود [۲۴]. به‌طور خاص، مشخصات ماژول مورد استفاده در این پژوهش در جدول (۲) آورده شده است [۱۲].

جدول (۲): مشخصات ماژول فتوولتائیک در شرایط مرجع

$\eta_{ref}$	$\beta_{ref} (C^{-1})$	$T_{ref} (K)$
۰/۱۳	۰/۰۰۴	۲۹۸/۱۵

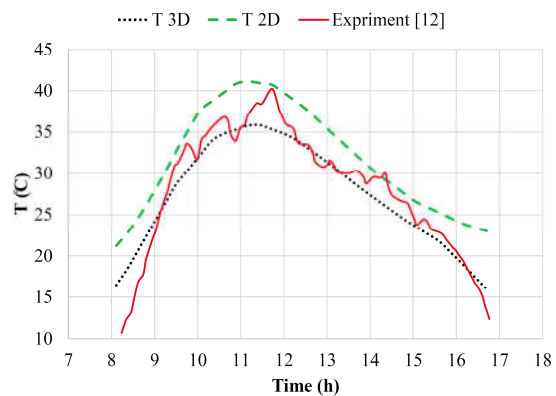
انرژی جذب‌شده خورشید در لایه‌های مختلف توسط حل معادلات انتقال تابش (رابطه ۵) به دست می‌آید. تابش خورشید از قسمت شیشه (لایه اول) وارد پانل فتوولتائیک می‌شود، مقداری از آن منعکس شده و مقداری جذب لایه شیشه می‌گردد و مابقی عبور کرده و پس از گذر از لایه EVA به سطح سیلیکون می‌رسد.

### ۳. نتایج و بحث

در این بخش، ابتدا اثر فرضیه‌های مختلف در مدل‌سازی حرارتی و در نتیجه محاسبه توان تولیدی بررسی می‌شود. برای مثال چه رابطه‌ای برای محاسبه شرایط مرزی مناسب است؟ یا اگر مسئله به صورت دوبعدی یا سه‌بعدی در نظر گرفته شود، چه مقدار تفاوت در نتایج حاصل می‌شود؟ مدل‌سازی ماژول با لایه‌های مجزا چه تفاوتی با در نظر گرفتن یک هندسه تک‌لایه با خواص متوسط دارد؟ پس از بررسی این جزئیات، یک روش جامع برای محاسبه توزیع دما و در نتیجه توان تولیدی ماژول فتوولتائیک ارائه شده است. در نهایت برای اطمینان از دقتی و کاربردی بودن مدل پیشنهادی، به مقایسه آن با برخی مدل‌های ارائه‌شده توسط دیگر محققان پرداخته شده است.

#### ۳.۱. مدل‌سازی دو یا سه‌بعدی ماژول فتوولتائیک

انتقال حرارت از لبه‌های ماژول در حالت سه‌بعدی، باعث خنک‌تر شدن لبه‌های آن در طول روز می‌شود که این پدیده را در حالت دو بعدی نمی‌توان شبیه‌سازی کرد. با توجه به شکل (۳) مشخص است که مدل دوبعدی در حدود  $6^{\circ}\text{C}$  دما را بیشتر پیش‌بینی می‌کند. به‌طور میانگین در طول روز، دمای متوسط ماژول در حالت سه‌بعدی  $7/6\%$  و در حالت دوبعدی  $10/1\%$  با اندازه‌گیری‌های تجربی اختلاف دارد. زمانی که ماژول به‌صورت سه‌بعدی مدل می‌شود، دمای متوسط به‌ویژه در اواسط روز که دما زیادتر و ماژول گرم‌تر است، به دمای متوسط اندازه‌گیری‌شده نزدیک‌تر است. در این مدل‌سازی گذرا گام زمانی برابر با ۱۰۰۰ ثانیه انتخاب شده و به همین دلیل است که نوسانات ریز در میانه روز در حل عددی دیده نمی‌شوند. در انتهای این مطالعه، با کاهش گام زمانی، توزیع دما در طول روز بهبود خواهد یافت. اما در این مرحله مهم، تفاوت نتایج در فرضیه‌های مختلف برای گام زمانی یکسان است.



شکل (۳): مقایسه دمای متوسط ماژول فتوولتائیک در طول روز در دو حالت دو و سه‌بعدی

#### ۳.۲. اثر در نظر گرفتن لایه‌های مجزا

از آنجا که مدل‌سازی جداگانه لایه‌ها، حل عددی را نسبت به یک مدل تک‌لایه دشوارتر می‌کند، در پژوهش حاضر هر دو مدل لایه‌لایه و معادل تک‌لایه آن مورد مطالعه قرار گرفته و دقت نتایج مقایسه شده‌اند. برای مدل‌سازی تک‌لایه معادل، از خواص ترموفیزیکی بر اساس حجم آن‌ها میانگین‌گیری وزنی شده که در جدول (۳) نشان داده شده است.

جدول (۳): خواص ترموفیزیکی تک‌لایه معادل		
ظرفیت گرمای ویژه	چگالی	ضریب هدایت حرارتی
$792/10 \text{ J/kg.K}$	$2553/54 \text{ kg/m}^3$	$4/02 \text{ W/m.K}$

با توجه به شکل (۴)، با لایه‌لایه مدل کردن ماژول فتوولتائیک می‌توان توزیع دمای ماژول و در نتیجه، دمای متوسط آن را بهتر پیش‌بینی کرد؛ زیرا تفاوت نسبتاً زیادی بین خواص و ضخامت لایه‌های مختلف وجود دارد. همین موضوع باعث می‌شود که در میانه روز، مدل تک‌لایه معادل  $3^{\circ}\text{C}$  دما را کمتر محاسبه کند. به‌طور دقیق‌تر، دمای متوسط در مدل‌سازی لایه‌لایه  $9/5\%$  و در حالتی که ماژول به‌صورت تک‌لایه با خواص میانگین مدل شد،  $15/1\%$  با نتایج تجربی اختلاف دارند.

#### ۳.۳. انتخاب مناسب ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی

##### ۳.۳.۱. اتلاف حرارت جابه‌جایی آزاد

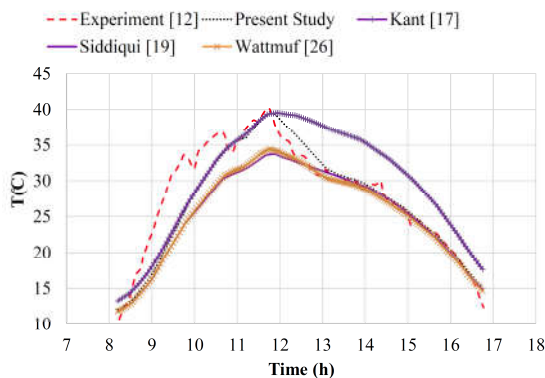
در شرایطی که سرعت باد کم باشد، اثر این نوع اتلاف حرارت بیشتر حائز اهمیت است. پس از مطالعه و مقایسه کاربرد روابط مختلف جابه‌جایی آزاد از سطوح ماژول فتوولتائیک، مشخص شد که معادلات (۷) و (۸) عدد ناسلت مربوط به دو طرف سطح ماژول فتوولتائیک را به‌خوبی پیش‌بینی می‌کنند. از این روابط می‌توان برای محاسبه ضریب انتقال حرارت به شکل جابه‌جایی آزاد روی تمام سطوح (افقی و شیب‌دار) استفاده کرد [۲۱].

$$Nu_f = \begin{cases} 0.13 \left( (Gr_c Pr)^{\frac{1}{3}} - (Gr_c Pr)^{\frac{1}{3}} \right) + \\ 0.56 (Gr_c Pr \cos \theta)^{1/4} & \beta < 60^{\circ}\text{C} \\ 0.13 Ra^{1/3} & \beta \geq 60^{\circ}\text{C} \end{cases} \quad (7)$$

$$Nu_b = \begin{cases} \left[ 0.825 + \frac{0.387 (Ra \cos \beta)^{1/6}}{\left( 1 + \left( \frac{0.492}{Pr} \right)^{9/16} \right)^{8/27}} \right]^2 & 0 < \beta \leq 60^{\circ}\text{C} \\ 0.56 (Ra \cos \beta)^{1/4} & \beta < 88^{\circ}\text{C} \\ 0.58 (Ra)^{1/5} & 88^{\circ}\text{C} \leq \beta \leq 90^{\circ}\text{C} \end{cases} \quad (8)$$

که  $Pr$  عدد پرانتل،  $Gr$  عدد گراشف،  $Gr_c$  عدد گراشف بحرانی،  $Ra$  عدد رایلی و  $\beta$  زاویه شیب پانل است.

درحالی‌که دمای تخمین‌زده‌شده توسط روش‌های کانت [۱۷]، سیدیکویی [۱۹] و واتموف [۲۶] به‌ترتیب دارای اختلاف متوسط ۱۵/۳٪، ۹/۳٪ و ۹٪ در طول روز است.



شکل (۵): مقایسه دمای متوسط ماژول فتوولتائیک با نتایج اندازه‌گیری شده در طول یک روز برای ضرایب انتقال حرارت جابه‌جایی متفاوت

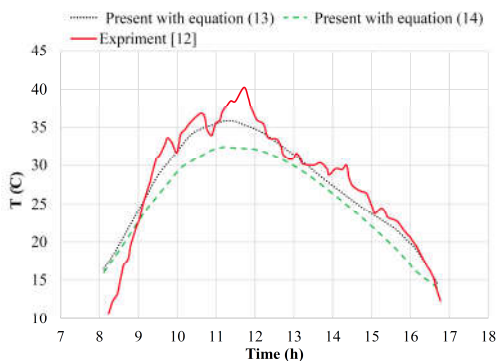
### ۳.۳.۳. اتلاف حرارت جابه‌جایی ترکیبی

برای اعمال توأمان اتلاف حرارت جابه‌جایی اجباری و آزاد، میزان ضریب اتلاف حرارت جابه‌جایی معمولاً به یکی از دو صورت جمع ساده ضرایب اتلاف حرارت جابه‌جایی آزاد و اجباری [۱۹] یا به صورت مجموع توانی ضرایب در نظر گرفته می‌شود [۲۱].

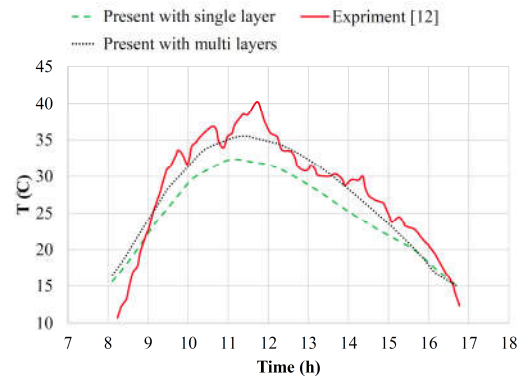
$$h_{mix}^3 = h_{free}^3 + h_{force}^3 \quad (13)$$

$$h = h_{free} + h_{force} \quad (14)$$

در پژوهش حاضر، هر دو رابطه بررسی شده است. با توجه به شکل (۶) این نتیجه به دست می‌آید که با استفاده از ضریب اتلاف حرارت جابه‌جایی ترکیبی به کمک رابطه (۱۳)، دمای متوسط ماژول فتوولتائیک در طی یک روز به نتایج اندازه‌گیری شده نزدیک‌تر می‌شود؛ به عبارتی، متوسط اختلاف دما با حالت تجربی، هنگامی که از رابطه (۱۳) استفاده شود، ۸/۹٪ و در حالتی که از رابطه (۱۴) استفاده شود، به ۱۳/۷٪ می‌رسد. شایان ذکر است که در این مقایسه، گام زمانی ۱۰۰۰ ثانیه در نظر گرفته شده است.



شکل (۶): مقایسه دمای متوسط ماژول فتوولتائیک برای دو حالت ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی ترکیبی و نتایج اندازه‌گیری شده



شکل (۴): مقایسه دمای متوسط ماژول فتوولتائیک در دو حالت مدل‌سازی لایه‌لایه و تک‌لایه

### ۳.۳.۲. اتلاف حرارت جابه‌جایی اجباری

انتخاب صحیح ضریب اتلاف حرارت جابه‌جایی اجباری، تأثیر زیادی در پیش‌بینی دقیق دمای ماژول و خنک‌سازی آن دارد. در این پژوهش با بررسی برخی از روابط ارائه شده مشخص شد که برای محاسبه ضریب اتلاف حرارت جابه‌جایی اجباری در مدل‌سازی ماژول فتوولتائیک از روابط (۹) تا (۱۱) استفاده شود [۲۵]. به کارگیری این روابط سبب پیش‌بینی دقیق‌تر دمای متوسط ماژول می‌شود. همچنین در این روابط، نوع جریان (یعنی آرام، درهم و مختلط)، سرعت باد و طول مشخص به صورت رابطه (۱۲) مد نظر قرار گرفته شده است.

جریان آرام

$$h = 3.83 * V^{0.5} * L^{-0.5} \quad (9)$$

جریانم متلاطم

$$h = 5.74 * V^{0.8} * L^{-0.2} \quad (10)$$

جریان مختلط (آرام و متلاطم)

$$h = 5.74 * V^{0.8} * L^{-0.2} - 16.64 * L^{-1} \quad (11)$$

$$L = \frac{4A}{P} \quad (12)$$

که  $V$  سرعت باد (m/s)،  $A$  مساحت یک طرف ماژول فتوولتائیک ( $m^2$ ) و  $P$  محیط ماژول فتوولتائیک (m) است.

به منظور مقایسه بهتر روابط مختلف انتقال حرارت جابه‌جایی اجباری در طول روز، از گام زمانی با اندازه ۱۸۰ ثانیه استفاده شده و به همین دلیل است که نوسانات دمایی و قلّه آن در میانه روز در شکل (۵) بهتر پیش‌بینی شده است. دقت در این شکل نشان می‌دهد که مجموعه روابط پیشنهادی در پژوهش حاضر، توزیع دما را در طول روز دقیق‌تر از سایر مدل‌سازی‌های پیشین به دست می‌دهد؛ به گونه‌ای که در کل طول روز انجام آزمایش [۱۲]، متوسط خطای ۶/۸٪ بین دمای متوسط ماژول و دمای اندازه‌گیری شده وجود دارد.



### ۳.۴. مقایسه مدل‌های توان الکتریکی تولیدی

برای محاسبه توان الکتریکی تولیدی یک ماژول در شرایط عملکردی مختلف، روش‌های متفاوتی (از جمله معادلات ۵ پارامتری، ۷ پارامتری و همچنین رابطه ۴) پیشنهاد شده است.

سیدیکویی [۲۰] با مطالعه روش‌های مختلف، مدل ۷ پارامتری جدیدی را پیشنهاد کرده است. با توجه به ساده‌تر بودن رابطه (۴) برای حل توأمان با معادله انرژی، در این بخش به مقایسه نتایج حاصل از این دو مدل پرداخته می‌شود. به‌طور خلاصه، مدل ۷ پارامتری که برای محاسبه منحنی جریان برحسب ولتاژ یک ماژول استفاده می‌شود، دارای ۷ پارامتر مجهول می‌باشد که در رابطه (۱۵) نشان داده شده است. با در دست داشتن مقدار جریان برحسب ولتاژ در هر نقطه عملکردی و مشتق‌گیری از آن، می‌توان توان ماکزیم تولیدی را طبق رابطه (۲۱) محاسبه کرد.

پارامترهای مرجع مورد نیاز برای حل روابط ۷ پارامتری برای دو ماژول متفاوت مونو کریستال (S36) و پلی کریستال (PV110) در جدول (۴) ارائه شده است [۲۰].

$$I = I_L + I_0 \left( \exp \left( \frac{V + IR_S}{a} - 1 \right) \right) - \frac{V + IR_S}{R_{sh}} \quad (15)$$

$$a = a_{ref} \left( \frac{T_c}{T_{ref}} \right)^n \quad (16)$$

$$I_L = (I_{L,ref} + \mu_{isc}(T_c - T_{ref})) \left( \frac{S}{S_{ref}} \right)^m \quad (17)$$

$$I_0 = I_{0,ref} \left( \frac{T_c}{T_{ref}} \right)^3 \quad (18)$$

$$\times \exp \left( \frac{NCS \cdot T_{ref}}{a_{ref}} \left( \frac{E_{g,ref}}{T_{ref}} - \frac{E_g}{T_c} \right) \right) \quad (19)$$

$$R_{sh} = \frac{S_{ref}}{S} R_{sh,ref} \quad (19)$$

$$R_s = R_{s,ref} \quad (20)$$

$$P_m = I_m V_m = (FF) I_{sc} V_{oc} = \eta AS \quad (21)$$

جدول (۴): پارامترهای مرجع در مدل ۷ پارامتری

	$a_{ref}$	$I_{L,ref}$	$I_{0,ref}$	$R_{sh,ref}$	$R_{s,ref}$	$m$	$n$
PV110	۱/۲۰	۷/۵۲	۲/۵e-۷	۳۳/۰۸	۰/۰۷	۱/۰۹	۱/۱۴
S36	۱/۲۰	۲/۳۰	۰/۳۳e-۷	۷۶۹/۴	۰/۵	۰/۹۸	۱/۴۱

جداول (۵) و (۶)، نتایج این روش ۷ پارامتری را برای دو نوع ماژول مذکور در شرایط استاندارد ( $W/m^2 S=1000$ ،  $T_c=25^\circ C$ ) با رابطه مرسوم (۴) و همچنین مقادیر ارائه شده توسط سازنده مقایسه می‌کنند. جالب است که درصد خطای رابطه (۴) نسبت به معادله ۷ پارامتری برای محاسبه توان تولیدی کمتر و در

عین حال ساده‌تر است. هرچند که روش ۷ پارامتری هم از دقت بسیار خوبی برخوردار است، هزینه محاسباتی رابطه (۴) کمتر و دقت آن مطلوب است. بنابراین به‌عنوان روش پیشنهادی برای محاسبه توان تولیدی در این پژوهش انتخاب می‌شود.

جدول (۵): مقایسه توان تولیدی با استفاده از دو فرمول در حالت

مرجع برای ماژول مونوکریستال S36

خطا %	توان (W)	I (A)	V (V)	اطلاعات سازنده
-	۳۶	۲/۲	۱۶/۷	اطلاعات سازنده
-۱/۰۳	۳۵/۶۳	۲/۱	۱۶/۵	روش ۷ پارامتری
۰/۰۸	۳۶/۲۹	-	-	رابطه (۴)

جدول (۶): مقایسه توان تولیدی با استفاده از دو فرمول در حالت

مرجع برای ماژول پلی کریستال PV110

خطا %	توان (W)	I (A)	V (V)	اطلاعات سازنده
-	۱۱۰	۶/۶	۱۶/۷	اطلاعات سازنده
۵/۲۴	۱۱۵/۷۶	۷/۰	۱۶/۵	روش ۷ پارامتری
۰/۲۰	۱۱۰/۲۲	-	-	رابطه (۴)

### ۳.۵. روش پیشنهادی و اعتبارسنجی

مقایسه فرضیه‌های مختلف رایج در مدل‌سازی عددی ماژول‌های فتوولتائیک، نشان داد که این جزئیات چگونه بر روی دقت توزیع دما اثرگذار است. بنابراین با انتخاب مناسب مجموعه‌ای از فرضیه‌ها و روابط، می‌توان به یک روش جامع برای مدل‌سازی مطمئن و دقیق توزیع دما در ماژول‌های فتوولتائیک دست یافت. در این خصوص، یافته‌های پژوهش حاضر جمع‌بندی شده و با عنوان روش پیشنهادی ارائه می‌شود.

این روش به‌گونه‌ای تدوین شده است که نسبت به سایر مدل‌های ارائه شده توسط محققان، توزیع دما در ماژول فتوولتائیک را دقیق‌تر پیش‌بینی می‌کند و از آن می‌توان برای مدل‌سازی هر نوع ماژول فتوولتائیک در هر اقلیم آب‌وهوایی استفاده کرد. ویژگی‌های مدل پیشنهادی عبارت‌اند از:

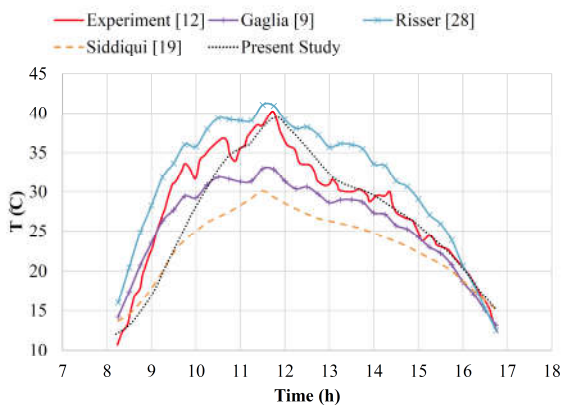
۱. مدل‌سازی سه‌بعدی و لایه‌لایه ماژول فتوولتائیک: مطابق

روش مشروح در بخش ۲، در نظر گرفتن لایه‌های مجزای سه‌بعدی با خواص ترموفیزیکی و تشعشعی مجزا، امکان محاسبه دقیق‌تر توزیع دما را در شرایط واقعی فراهم می‌کند.

۲. حل معادلات حرارتی و توان تولیدی ماژول فتوولتائیک

به‌صورت توأمان (کوپل): انرژی الکتریکی خروجی از سیستم در بسیاری از مدل‌سازی‌های حرارتی در نظر گرفته نمی‌شود. در روش پیشنهادی طبق معادله (۱)، این انرژی به‌صورت یک چاه حرارتی

می‌باشد. به‌رغم موفقیت روش پیشنهادی، مشخص است پیش‌بینی دقیق آنچه در واقعیت اندازه‌گیری می‌شود بسیار دشوار است؛ زیرا حتی در مدل‌سازی سه‌بعدی لایه‌لایه، از اثراتی مانند قاب، پایه، موانع اطراف و مانند آن صرف نظر می‌شود. نوسانات سریع شرایط محیطی مانند سرعت باد و تابش نیز از عوامل اختلاف نتایج مدل‌سازی با اندازه‌گیری‌هاست. روابط مربوط به اتلاف حرارت جابه‌جایی طبیعی نیز برای سطوح هم‌دما ارائه شده که در این مسئله کمی دور از واقعیت است. با این اوصاف، نتایج حاصل از مدل‌سازی به روش پیشنهادی به نتایج دمایی متوسط اندازه‌گیری نزدیک‌تر و موفق‌تر از سایر روش‌هاست که علت آن مدل‌سازی بهتر انتقال حرارت در یک ماژول واقعی است. برخلاف آنچه ممکن است در ابتدا تصور شود، به‌خاطر رخداد همزمان تابش، هدایت و تولید انرژی الکتریکی در لایه‌های با ضخامت کم، پدیده‌های انتقال حرارت در یک ماژول فتوولتائیک به نسبت پیچیده می‌باشد و به‌منظور افزایش دقت لازم است تا جزئیات مورد توجه قرار گیرند. انطباق بهتر نتایج پژوهش حاضر با اندازه‌گیری تجربی، گواه این موضوع و مؤید روش پیشنهادی است.



شکل (۷): مقایسه دمایی متوسط ماژول فتوولتائیک با چند روش مختلف

شکل (۸) توان تولیدی در ماژول را در طول روز مورد ارزیابی قرار می‌دهد. از آنجا که دمایی محاسبه‌شده توسط روش‌های مورد بحث متفاوت است، تفاوت حاصل بین پیش‌بینی توان تولیدی در این شکل به مقدار کمی قابل ملاحظه است؛ که بیشترین اختلاف مربوط ساعات میانی روز است. اگرچه در نگاه اول ممکن است است تفاوت چندانی به چشم نیاید، همین اختلاف اندک می‌تواند در محاسبه دقیق‌تر توان تولیدی سالیانه و در نیروگاه‌های بزرگ، مقدار چشمگیری انرژی الکتریکی را شامل شود.

یکنواخت در واحد حجم در نظر گرفته شد که منجر به محاسبه دقیق‌تر توزیع دما و توان خروجی می‌شود.

۳. انتخاب روابط مناسب برای محاسبه اتلاف حرارت جابه‌جایی: از میان تعداد زیاد روابط موجود برای در نظر گرفتن اتلاف حرارت جابه‌جایی (اجباری و آزاد)، در پژوهش حاضر مشخص شد که استفاده از معادلات (۷) تا (۱۴) می‌تواند نتایج قابل قبولی را به همراه داشته باشد.

برای اطمینان از دقیق بودن روش پیشنهادی، به مقایسه آن با برخی روابط و فرضیه‌های ارائه‌شده توسط سایر محققان پرداخته شده است. ویژگی مدل‌های ارائه‌شده عبارت‌اند از:

$$1. \text{Siddiqui [19] در سال } 2012: [19]$$

ایشان ماژول فتوولتائیک را به‌صورت سه‌بعدی، با لایه‌های مجزا مدل‌سازی کرده و برای اعمال اتلاف حرارت جابه‌جایی از روابط (۲۰) تا (۲۱) به‌صورت مجموع اتلاف حرارت جابه‌جایی اجباری و آزاد استفاده شد. همچنین از روش ۷ پارامتری برای محاسبه توان تولیدی به‌صورت غیر کوپل با معادلات حرارتی استفاده کرده است.

$$Nu_{force} = 0.86 Re^{\frac{1}{2}} Pr^{\frac{1}{3}} \quad (22)$$

$$Nu_{free} = \begin{cases} 0.76 Ra^{\frac{1}{4}} 10^4 < Ra < 1 \times 10^7 \\ 0.15 Ra^{\frac{1}{4}} 10^7 < Ra < 3 \times 10^{10} \end{cases} \quad (23)$$

علاوه بر آن، برخی از محققان پس از اندازه‌گیری دمایی ماژول فتوولتائیک در شرایط متفاوت، رابطه‌ای را برای محاسبه دمایی متوسط ماژول بر اساس تابش خورشید، دمایی هوا و سرعت باد پیشنهاد داده‌اند؛ از جمله:

$$1. \text{ رابطه ریزر و فوننت [27] در سال } 1984$$

$$T_c = 0.943 T_{amb} + 0.028 S - 1.528 V + 4.3 \quad (24)$$

$$2. \text{ رابطه گaglia [9] در سال } 2017$$

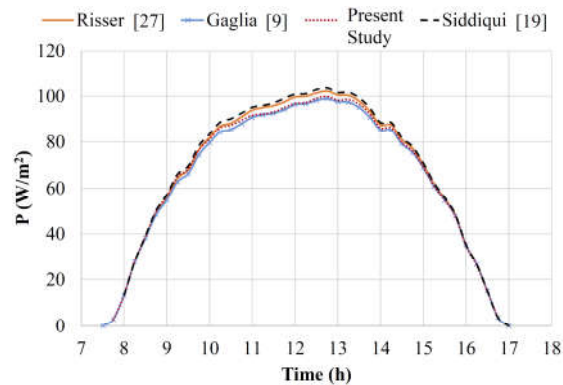
$$T_c = 1.038(\pm 0.004) T_{amb} + 0.0182 S - 1.13 V + 2.08(\pm 0.13) \quad (25)$$

در شکل (۷)، نتایج حاصل از محاسبه توزیع دمایی ماژول فتوولتائیک به روش پیشنهادی، با روش‌های مختلف پیشین و در مقابل داده‌های اندازه‌گیری‌شده مقایسه شده است. به‌طور میانگین، دمایی متوسط پیش‌بینی‌شده به روش حاضر با دمایی اندازه‌گیری‌شده در طول روز ۹/۳٪ اختلاف دارد، درحالی‌که دمایی متوسط مربوط به روابط (۲۴) و (۲۵) و همچنین روش ارائه‌شده توسط سیددیکویی [۱۹] به‌ترتیب دارای میانگین اختلاف ۱۶/۶٪، ۱۰٪، و ۱۵/۳٪



با حل معادلات انرژی و تشعشع در هر لایه و استفاده از شرایط مرزی مناسب، توزیع دما و توان تولیدی در طول یک روز برای یک ماژول نمونه محاسبه شد و با نتایج اندازه‌گیری شده مقایسه گردید.

نتایج نشان داد که فرضیه‌هایی همچون مدل‌سازی دو یا سه‌بعدی، شبیه‌سازی جداگانه لایه‌ها یا معادل‌سازی با تک‌لایه و انتخاب روابط مناسب برای محاسبه ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی تأثیر قابل توجهی در پیش‌بینی توزیع دمای ماژول دارد. مدل‌سازی سه‌بعدی به جای دویبعدی منجر به بهبود ۲/۵٪، شبیه‌سازی جداگانه لایه‌ها نسبت به معادل‌سازی با تک‌لایه منجر به بهبودی ۵/۶٪ و انتخاب روابط مناسب برای محاسبه ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی منجر به بهبود ۸/۵٪ در نتایج شده و تأثیر قابل ملاحظه‌ای در پیش‌بینی توزیع دمای ماژول دارد. بر همین اساس، مجموعه‌ای از فرضیه‌ها و انتخاب‌ها با عنوان روش پیشنهادی ارائه شد. مقایسه این روش با روابط و مدل‌های مرسوم نشان داد که می‌توان با خطای میانگین کمتر از ۹/۳٪، دمای متوسط ماژول و همچنین انرژی تولیدی را در ماژول‌های فتوولتائیک پیش‌بینی کرد.



شکل (۸): مقایسه توان تولیدی ماژول فتوولتائیک با مدل‌های موجود

#### ۴. نتیجه‌گیری و جمع‌بندی

نیاز روزافزون به انرژی‌های تجدیدپذیر و استفاده گسترده از سیستم‌های فتوولتائیک، انگیزه مهمی برای بررسی دقیق‌تر ماژول‌های فتوولتائیک است. از آنجا که توان الکتریکی تولیدی به دمای ماژول وابسته است، ارائه روش مناسبی برای تحلیل دما در پیش‌بینی عملکرد آن بسیار سودمند است. در مسیر برطرف کردن برخی ابهامات در استفاده از معادلات حرارتی و توان تولیدی و به‌منظور دستیابی به توزیع دمای دقیق‌تر در ماژول‌های فتوولتائیک، یک مدل گذرای سه‌بعدی لایه‌لایه در نرم‌افزار کامسول ایجاد شد.

#### مراجع

[۱] یحیی‌زاده، میثم، صادقی، معظمه، فاتحی مرچ، حسن، بابایی، سید میلاد، افتخاری، محمدعلی، «بهبود عملکرد و صرفه‌جویی انرژی با بهینه‌سازی از طریق الگوریتم رقابت استعماری در سیستم ردیاب خورشیدی دومیحوره جدید»، مهندسی و مدیریت انرژی، سال دهم، شماره اول، صفحه ۱۵۲-۱۳۹۹.

[۲] حسینی، سید احمد، کرمانی، علی ماشاءالله، عرب‌حسینی، اکبر، «مطالعه اثر رطوبت و دمای محیط بر عملکرد پنل‌های فتوولتائیک»، مهندسی و مدیریت انرژی، سال هشتم، شماره اول، صفحه ۶۵-۵۴، ۱۳۹۷.

[3] Tamizhmani, G., Ji, L., Tang, Y., Petacci, L. and Osterwald, C., "Photovoltaic Module Thermal/Wind Performance: Long-Term Monitoring and Model Development for Energy Rating", NCPV and Solar Program Review Meeting, Denver, Colorado, 24-26 March, 2003.

[4] Du, Y., Fell, C. J., Duck, B., Chen, D., Liffman, K., Zhang, Y., Gu, M. and Zhu, Y., "Evaluation of Photovoltaic Panel Temperature in Realistic Scenarios", Energy Conversion and Management, Vol. 108, pp. 60-67, 2016.

[5] Tuomiranta, A., Marpu, P., Munawwar, S. and Ghedira,

H., "Validation of Thermal Models for Photovoltaic Cells Under Hot Desert Climates: A Review of Efficiency/Power Correlations", Energy Procedia, Vol. 57, pp. 136-143, 2014.

[6] Dubey, S., Sarvaiya, J. N. and Seshadri, B., "Temperature Dependent Photovoltaic (PV) Efficiency and Its Effect on PV Production in The World - A Review", Energy Procedia, Vol. 33, pp. 311-321, 2013.

[7] Skoplaki, E. and Palyvos, J. A., "On the Temperature Dependence of Photovoltaic Module Electrical Performance: A Review of Efficiency/Power Correlations", Solar Energy, Vol.83, No. 5, pp. 614-624, 2009.

[8] Fesharaki, V. J., Dehghani, M., Fesharaki, J. J. and Tavasoli, H., "The Effect of Temperature on Photovoltaic Cell Efficiency", Proceedings of the 1<sup>st</sup> International Conference on Emerging Trends in Energy Conservation -ETEC Tehran, Tehran, Iran, 20-21 November, 2011.

[9] Gaglia, A. J., Lykoudis, S., Argiriou, A. A., Balaras, C. A. and Dialynas, E., "Energy Efficiency of PV Panels under Real Outdoor Conditions-An Experimental

- Assessment in Athens, Greece*", Renewable Energy, Vol. 101, pp. 236–243, 2017.
- [10] Mattei, M., Notton, G., Cristofari, C., Muselli, M. and Poggi, P., "Calculation of the Polycrystalline PV Module Temperature Using a Simple Method of Energy Balance", Renewable Energy, Vol. 31, No. 4, pp. 553–567, 2006.
- [11] Lobera, D. T. and Valkealahti, S., "Dynamic Thermal Model of Solar PV Systems under Varying Climatic Conditions", Solar Energy, Vol. 93, pp. 183–194, 2013.
- [12] Notton, G., Cristofari, C., Mattei, M. and Poggi, P., "Modelling of a Double-Glass Photovoltaic Module Using Finite Differences", Applied Thermal Engineering, Vol. 25, No. 17-18, pp. 2854–2877, 2005.
- [13] Rezania, A., Sera, D. and Rosendahl, L. A., "Coupled Thermal Model of Photovoltaic-Thermoelectric Hybrid Panel for Sample Cities In Europe", Renewable Energy, Vol. 99, pp. 127–135, 2016.
- [14] Elarga, H., Goia, F., Zarrella, A., Dal, A. and Benini, E., "Thermal and Electrical Performance Of An Integrated PV-PCM System In Double Skin Facades : A Numerical Study", Solar Energy, Vol. 136, pp. 112–124, 2016.
- [15] Zhao, B., Chen, W., Hu, J., Qiu, Z., Qu, Y. and Ge, B., "A Thermal Model for Amorphous Silicon Photovoltaic Integrated in ETFE Cushion Roofs", Energy Conversion and Management, Vol. 100, pp. 440–448, 2015.
- [16] Torres-lobera, D. and Valkealahti, S., "Inclusive Dynamic Thermal and Electric Simulation Model of Solar PV Systems Under Varying Atmospheric Conditions", Solar Energy, Vol. 105, pp. 632–647, 2014.
- [17] Kant, K., Shukla, A., Sharma, A. and Henry, P., "Thermal Response of Poly-Crystalline Silicon Photovoltaic Panels: Numerical Simulation and Experimental Study", Solar Energy, Vol. 134, pp. 147–155, 2016.
- [18] Weiss, L., Amara, M. and Ménézo, C., "Impact of Radiative-Heat Transfer on Photovoltaic Module Temperature", Progress in Photovoltaics, Vol. 24, No. 1, pp. 12–27, 2016.
- [19] Siddiqui, M. U., Arif, A. M., Kelley, L. and Dubowsky, S., "Three-Dimensional Thermal Modeling of a Photovoltaic Module Under Varying Conditions", Solar Energy, Vol. 86, No. 9, pp. 2620–2631, 2012.
- [20] Siddiqui, M. U., *Multiphysics Modeling of Photovoltaic Panels and Arrays with Auxiliary Thermal Collectors*, Master's Thesis, University of Petroleum and Mineral, Dhahran, Saudi Arabia, 2011.
- [21] Kaplani, E. and Kaplanis, S., "Thermal Modelling and Experimental Assessment of the Dependence of PV Module Temperature on Wind Velocity and Direction, Module Orientation and Inclination", Solar Energy, Vol. 107, pp. 443–460, 2014.
- [22] Elibol, E., Özmen, Ö. T., Tutkun, N. and Köysal, O., "Outdoor Performance Analysis of Different PV Panel Types", Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 67, pp. 651–661, 2017.
- [23] Slimani, M. A., Amirat, M., Kurucz, I., Bahria, S., Hamidat, A. and Chaouch, W. B., "A Detailed Thermal-Electrical Model of Three Photovoltaic/Thermal (PV/T) Hybrid Air Collectors And Photovoltaic (PV) Module: Comparative Study under Algiers Climatic Conditions", Energy Conversion and Management, Vol. 133, pp. 458–476, 2017.
- [24] Tan, D., *Handbook for Solar Photovoltaic Systems*, Energy Market Authority, 2011.
- [25] Sartori, E., "Convection Coefficient Equations for Forced Air Flow over Flat Surfaces", Solar Energy, Vol. 80, No. 9, pp. 1063–1071, 2006.
- [26] Watmuff, J. H., Charters, W. S. and Proctor, D., "Solar and Wind Induced External Coefficients for Solar Collectors", CMES, Vol. 56, pp. 56, 1977.
- [27] Risser, V. V. and Fuentes, M. K., "Linear Regression Analysis of Flat-Plate Photovoltaic System Performance Data", Proceedings of 5<sup>th</sup> Photovoltaic Solar Energy Conference, pp. 623–627, Athens, Greece, 17-21 October 1984.