

طراحی و مقایسه بازتابنده‌های صفحه تخت، سهموی و ترکیبی بر عملکرد مازول خورشیدی

میرمصطفی اسود (کارشناسی ارشد)

مفیدگرچی* (استاد)

آرش مهدوی (کارشناسی ارشد)

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی نوشیروانی

مهندسی مکانیک شریف (پاییز ۱۴۰۲)
دوری ۳۹، شماره ۲، صص. ۱۳-۲۴، (پژوهشی)

انرژی خورشیدی را می‌توان با استفاده از مازول‌های خورشیدی به الکتریسیته تبدیل کرد. استفاده از بازتابنده سبب افزایش تابش انرژی خورشیدی بر روی سطح مازول می‌شود. در این مقاله، تأثیر انواع بازتابنده‌های صفحه تخت، سهموی و ترکیبی بر دما و بازده مازول به صورت دو بعدی شبیه‌سازی شد. نتایج حاصل نشان می‌دهد دمای مازول خورشیدی ادغام شده با بازتابنده صفحه تختی با شیب ۸۵ درجه نسبت به افق به $360/82$ درجه کلون و دمای مازول ادغام شده با بازتابنده سهموی به $371/11$ درجه کلون می‌رسد. در مقابل، دمای مازول با بازتابنده‌ی با شیب ۵۰ درجه برای هر دو حالت سهموی و صفحه تخت به $345/94$ و 346 درجه کلون می‌رسد. با افزایش زاویه در بازتابنده‌های صفحه تخت و سهموی، دمای مازول افزایش یافت و بازتابنده‌های سهموی در زاویه‌های شیب بالاتر، دمای بالاتر و توان تولیدی بالاتری نسبت به بازتابنده‌های صفحه تخت دارند. همچنین، دمای مازول با استفاده از ۶ نوع بازتابنده ترکیبی نیز ارزیابی و نتایج آن‌ها با یکدیگر مقایسه شد.

واژگان کلیدی: انرژی خورشیدی، مازول خورشیدی، بازتابنده، دمای مازول، بازده.

mostafaasvad75@gmail.com
gorji@nit.ac.ir
arashmahdavi93@gmail.com

۱. مقدمه

توان تولیدی در سیستم‌های فتوولتائیک با استفاده از بازتابنده‌های آینه‌یی در تابستان به نسبت $10-19/84$ درصد و در زمستان به نسبت $13/23-10$ درصد افزایش می‌یابد.

در مطالعه دیگری انجام شده توسط سانگانی و سولانکی،^[۶] یک سیستم متمرکز فتوولتائیک به شکل V طراحی و ساخته شد. این سیستم توان خروجی را در مقایسه با سیستم بدون بازتابنده به نسبت ۴۴ درصد افزایش داد. در تجزیه و تحلیلی که هوانگ و سان^[۷] انجام دادند، مشخص شد که استفاده از بازتابنده با نسبت تمرکز ۲x توان خروجی را $24/5$ درصد افزایش می‌دهد و با ترکیب ردیاب یک محوره با قابلیت تنظیم در سه موقعیت، تولید برق به اندازه ۵۶ درصد افزایش می‌یابد. هلنا و همکاران،^[۸] در مطالعه‌ی در زمینه بهینه‌سازی هندسه بازتابنده برای سیستم‌های فتوولتائیک مناسب نمای ساختمان، به این نتیجه رسیدند که استفاده از بازتابنده‌میزان تولید برق را تا ۷۲ درصد نسبت به یک مازول بدون بازتابنده افزایش می‌دهد. ناراسیمان و سلوارسان،^[۹] یک سیستم متمرکزکننده با بازتابنده آینه‌یی را طراحی کردند و مشاهده شد که حداکثر توان خروجی برای

با افزایش نیاز بشر به انرژی، تولید انرژی الکتریکی بسیار حائز اهمیت است. استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر مانند انرژی خورشیدی، انرژی زمین گرمایی و انرژی باد برای تولید انرژی الکتریکی می‌تواند به حل مشکل آلودگی‌های زیست محیطی کمک کند. انرژی خورشیدی به عنوان یکی از این منابع تجدیدپذیر، دارای پتانسیل بسیار بالا برای تأمین انرژی است. مازول‌های خورشیدی به عنوان وسیله‌ی برای بهره‌برداری از این انرژی، بسیار موثر هستند. این مازول‌ها بدون صدا و بدون داشتن قطعه متحرکی کار می‌کنند. به همین دلیل، استفاده از این تکنولوژی‌ها امروزه توجه بسیاری از محققان و صنعتگران را به خود جلب کرده است.^[۱]

استفاده از بازتابنده‌ها شدت تابش انرژی خورشید را افزایش می‌دهد و تعداد سلول‌های خورشیدی مورد نیاز برای تولید توان مشخص را کاهش می‌دهد.^[۲-۴] در یک مطالعه انجام شده توسط مالیک و چندل،^[۵] مشخص شد که میانگین افزایش

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۷/۳/۱۴۰۱، اصلاحیه ۱۶/۷/۱۴۰۱، پذیرش ۲۷/۷/۱۴۰۱.

استناد به این مقاله:

اسود، میرمصطفی، گرچی، مفید، و مهدوی، آرش، ۱۴۰۲. طراحی و مقایسه بازتابنده‌های صفحه تخت، سهموی و ترکیبی بر عملکرد مازول خورشیدی. مهندسی مکانیک شریف،

DOI:10.24200/J40.2022.60438.1642. ۲۴-۱۳. صص. ۳۹(۲)،

مرجع ۶۶/۸ درجه سانتی‌گراد می‌باشد. میلاد محسن زاده و رضا حسینی^[۱۸] در مطالعه خود بر روی یک سیستم PVT که مجهز به بازتابنده بود مشاهده کردند که با افزودن بازتابنده، میانگین افزایش تشعشع خورشیدی به ۲۲ درصد می‌رسد و استفاده از خنک‌کننده باعث کاهش دمای سلول و بهبود عملکرد سیستم فتوولتائیک می‌شود.

کیوو همکاران،^[۱۹] سه نوع بازتابنده چندخطی (پلی لاین)، سهموی و صفحه تخت را برای کلکتورهای صفحه تخت خورشیدی بررسی کردند. مطابق با نتایج حاصل، افزایش تابش انرژی خورشیدی بر روی کلکتورها هنگام استفاده از بازتابنده‌های چندخطی، سهموی و صفحه تخت در سردترین سه ماه سال به ترتیب ۴۰/۳، ۲۷/۷ و ۱۹/۸ درصد می‌باشد. همچنین، در سردترین سه ماه سال، بازتابنده چند خطی همیشه بیشترین تابش انرژی خورشیدی را در میان دیگر بازتابنده‌ها به خود اختصاص می‌دهد. نتایج حاصل از مطالعات نشان می‌دهد که استفاده از بازتابنده هزینه کمی داشته و شدت تشعشع خورشید را بالا می‌برد. در همین راستا، برای مکان‌هایی که امکان نصب تعداد بیشتر ماژول فتوولتائیک را ندارد و یا موقعیت‌های جغرافیایی که شدت تابش خورشید کم است، استفاده از بازتابنده‌ها می‌تواند مفید باشد. با توجه به مطالعاتی که تا کنون انجام گرفته است، پژوهشی که چند مدل بازتابنده که طول یکسان داشته باشند را با هم مقایسه کند، انجام نشده است. مطالعات صورت گرفته بر اساس تغییر طول بازتابنده و یا مواردی جزئی تر می‌باشد. در این پژوهش، سعی شده است تا با استفاده از نرم‌افزار ANSYS Fluent ۲۰۲۱R۲، یک مطالعه‌ی کامل و دو بعدی برای انواع بازتابنده ترکیبی (ترکیبی از زوایا با بازتابنده صفحه تخت)، پارابولیک و صفحه تخت صورت پذیرد.

۲. تعریف مسأله

سه مدل بازتابنده صفحه تخت، سهموی و ترکیبی برای ادغام با ماژول فتوولتائیک به صورت دویعدی در نظر گرفته شد که در شکل ۱ نشان داده شده است. ابعاد ماژول فتوولتائیک مورد استفاده در طراحی بازتابنده، ۴۸۰×۶۰۰ میلی‌متر مربع می‌باشد و دمای ماژول توسط شبیه‌سازی‌های دو بعدی توسط نرم‌افزار ANSYS Fluent ۲۰۲۱R۲ به دست آمد.

۱.۲. طراحی بازتابنده

با استفاده از تجهیزات ردیابی خورشیدی در محیط واقعی می‌توان شرایطی ایجاد کرد که بردار تابش خورشیدی همواره بر سطح پنل عمود باشد. در این مطالعه، فرض بر این است که تابش خورشید همواره عمود بر سطح ماژول می‌باشد. ابعاد بازتابنده صفحه تخت بر اساس شکل ۲ و معادله ۱ به دست می‌آید:

$$L_{\text{Reflector}} = \frac{\sin(2\alpha - 90^\circ)}{\sin(90^\circ - \alpha)} \cdot L_{\text{PV}} = \frac{-\cos(2\alpha)}{\cos(\alpha)} \cdot L_{\text{PV}} \quad (۱)$$

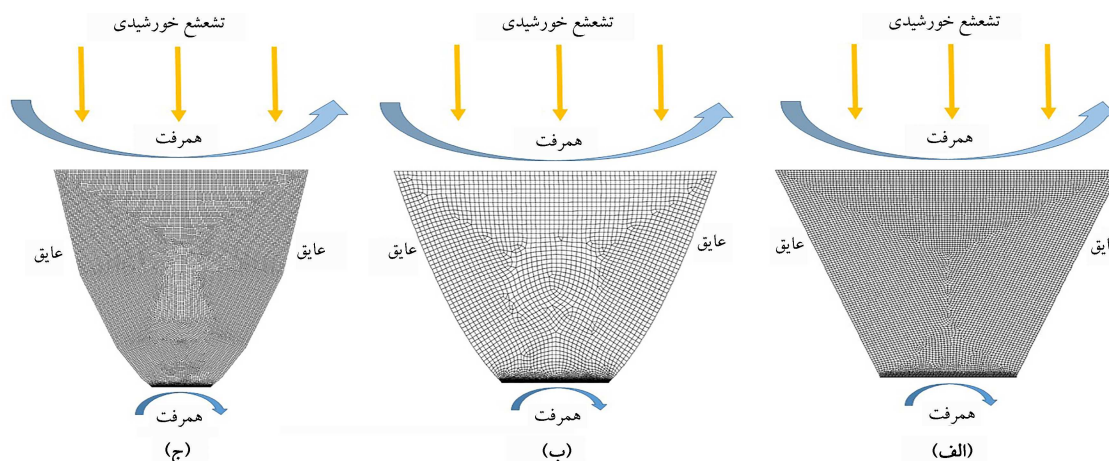
ابعاد بازتابنده سهموی بر اساس معادلات ۲ تا ۴ که طول بازتابنده با طول بازتابنده صفحه تخت با زاویه شیب مشخص برابر بود، برای مقایسه با بازتابنده صفحه تخت به دست می‌آید:

$$r(x) = x\hat{i} + y(x)\hat{j} \quad (۲)$$

$$y(x) = \frac{x^2}{\rho_{00}} - ۱۵۰ \quad (۳)$$

نسبت تمرکز $1x$ و $2x$ به ترتیب ۹ و $۱۰/۵$ وات و درصد بهبود توان برای نسبت تمرکز $1x$ و $2x$ به ترتیب $۲۲/۳$ و $۴۵/۸$ درصد نسبت به ماژول مرجع است. محمد منصور و همکاران،^[۱۹] تأثیر بازتابنده بر روی ماژول فتوولتائیک را بررسی کردند و نتایج حاصل نشان می‌دهد که استخراج انرژی حدود ۳۰ درصد بیشتر از سیستم فتوولتائیک مرجع می‌باشد. همچنین، یک نیروگاه صنعتی ۵ مگاواتی که در حال حاضر در حال فعالیت است، مورد مطالعه قرار گرفت و نتایج نشان داد که اگر این نیروگاه فتوولتائیک به سیستم بازتابنده مجهز شود، انتظار می‌رود توان تولیدی روزانه نیروگاه ۵ مگاواتی از $۳/۴۱$ به حدود $۴/۴۳$ کیلووات ساعت افزایش یابد. در پژوهشی دیگر، کریستین و همکاران^[۱۱] تأثیر طول آینه‌ها بر کارایی و عملکرد سیستم فتوولتائیک متمرکز را بررسی کردند که نتایج حاصل، افزایش سالانه تولید برق از $۸/۵$ درصد به $۲۸/۷$ درصد در هنگام تغییر طول بازتابنده از $L_R = L_{PV}/۲$ به $L_R = ۲ \times L_{PV}$ را نشان می‌دهد. نتیجه شبیه‌سازی در پژوهش صورت گرفته توسط مونیکا و همکاران^[۱۲] نشان داد که استفاده از بازتابنده، دمای ماژول فتوولتائیک را ۳۰ الی ۴۰ درجه سانتی‌گراد در شرایط جریان هوای آرام و در شرایط جریان هوای آشفته ۱۰ الی ۲۰ درجه سانتی‌گراد افزایش می‌دهد. اگرچه طول عمر ماژول فتوولتائیک با ادغام بازتابنده در شرایط جریان باد مطلوب از ۲۵ سال به ۲۱ سال کاهش یافت، با این حال افزایش توان الکتریکی تولید شده بر تلفات طول عمر غلبه می‌کند.

رانگا و همکاران،^[۱۳] سه نوع سیستم فتوولتائیک $(ACPC(1/53x))$ ، $CPC(1/46x)$ و $(V - trough(1/40x))$ را برای ساختمان‌ها بررسی کردند. نتایج حاصل نشان می‌دهد که بازتابنده سهموی ترکیبی نامتقارن $(ACPC)$ ، بالاترین توان خروجی را در مقایسه با پیکربندی‌های دیگر تولید می‌کند. بازده الکتریکی $ACPC$ ، $۴۲/۲$ درصد بالاتر از یک ماژول غیرمتمرکز در زاویه برخورد ۱۰ درجه می‌باشد و دوره بازپرداخت $ACPC$ ، $۹/۷$ سال و ماژول معمولی ۱۶ سال پیش‌بینی شد. همچنین، حفظ دمای سلول در ۲۵ درجه سانتی‌گراد از طریق خنک‌سازی فعال، توان تولید شده توسط $ACPC$ را تا ۳۱ درصد افزایش داد. اوستاگلو و همکاران^[۱۴] یک پیکربندی جدید از سیستم بازتابنده فتوولتائیک با عنوان Compound Hyperbolic Concentrator- Trumpet(CHCT) را با بازتابنده‌های CPC و V شکل مقایسه کردند. نتایج حاصل نشان می‌دهد که راندمان الکتریکی ماژول خورشیدی با استفاده از CPC ، V -trough و CHC -Trumpet به ترتیب $۱۸/۴۴$ ، $۱۸/۵۱$ و $۱۸/۵۹$ درصد بوده و توان خروجی $CHCT$ -PVT حدود $۴۲/۹$ درصد بیشتر از CPC -PVT و حدود $۵۸/۹۷$ درصد بیشتر از سیستم‌های VT -PVT در واحد سطح بازتابنده می‌باشد. کوستیک و همکاران،^[۱۵] تأثیرات بازتابنده ساخته شده از ورق آلومینیوم و فویل آلومینیوم بر کلکتور PVT را بررسی کردند و مشخص شد که در موقعیت بهینه، بازتابنده‌ها نسبت تمرکز روزانه برای بازتابنده ساخته شده از ورق آلومینیومی $۱/۴۴$ برابر و برای بازتابنده ساخته شده از فویل آلومینیومی $۱/۶۶$ برابر ارزیابی شد. کل انرژی حرارتی و الکتریکی روزانه تولید شده توسط کلکتور PVT با بازتابنده‌های ساخته شده از ورق آلومینیومی در موقعیت بهینه به ترتیب ۳۹ و $۸/۶$ درصد بیشتر از کلکتور PVT بدون بازتابنده بود. بهروز ضیاءپور و همکاران،^[۱۶] اثرات ادغام بازتابنده‌ها بر عملکرد یک سیستم PVT را مورد بررسی قرار دادند و مقادیر ۱۱۳۸ وات (با استفاده از دو بازتابنده) و ۷۸۸ وات (بدون بازتابنده) به دست آمد. در قسمتی از تحقیق میچال و همکاران،^[۱۷] بر روی کلکتورهای CPC -PVT مشخص شد که دمای کلکتور با دو بازتابنده و بدون خنک‌کاری و با پوشش شیشه $۹۸/۱۶$ درجه سانتی‌گراد، با خنک‌کاری $۵۸/۳۷$ درجه سانتی‌گراد و دمای ماژول



شکل ۱. (الف) بازتابنده صفحه تخت، (ب) بازتابنده سهموی، (ج) بازتابنده ترکیبی.

جدول ۱. وابستگی به مش.

تعداد المان‌ها	۶۰s	۳۰۰s	۶۰۰s	۱۲۰۰s	۲۴۰۰s	۳۶۰۰s
۳۵۷۱	۳۰۷/۸۵۸۹	۳۳۲/۵۶۹	۳۴۶/۰۷۶۳	۳۵۲/۷۸۶۳	۳۵۳/۷۱۸۸	۳۵۳/۷۴۸۱
۱۱۰۵۷	۳۰۷/۸۵۵۵	۳۳۲/۵۴۹۱	۳۴۶/۰۴۷	۳۵۲/۷۵۳۳	۳۵۳/۶۸۴۱	۳۵۳/۷۱۸۶
۲۰۵۹۰	۳۰۷/۸۵۱۴	۳۳۲/۵۳۷۹	۳۴۶/۰۳۴۴	۳۵۲/۷۳۸۲	۳۵۳/۶۶۹	۳۵۳/۷۰۹۴
۳۳۹۱۷	۳۰۷/۸۴۹۸	۳۳۲/۵۳۲۷	۳۴۶/۰۲۵۵	۳۵۲/۷۲۷۲	۳۵۳/۶۶۰۴	۳۵۳/۷۰۶۸
۵۲۵۹۳	۳۰۷/۸۴۲۵	۳۳۲/۵۱۵۱	۳۴۶/۰۰۸۵	۳۵۲/۷۱۲۳	۳۵۳/۶۵۲۴	۳۵۳/۷۰۴۸

۲.۲. شبیه‌سازی عددی

برای شبیه‌سازی تشنع در نرم‌افزار ANSYS Fluent ۲۰.۲.۱R2 از مدل DO استفاده شده است. از آنجا که این روش به یک محیط مادی نیاز دارد، همان‌طور که در شکل ۱ مشاهده می‌شود، مابین سطح ماژول و بازتابنده‌ها یک محیط به‌عنوان هوا تعریف شده است. شرایط مرزی برای حل این مساله به شرح زیر می‌باشند:

-- انتقال حرارت جابجایی در جلو و پشت ماژول وجود دارد؛

-- سطح پشت بازتابنده‌ها عایق می‌باشد؛

-- تشنع خورشیدی به‌صورت عمود بر روی ماژول خورشیدی وارد می‌شود؛

-- تشنع خورشیدی کاملاً به‌صورت مستقیم در نظر گرفته شد و تشنع دیفیوز صفر فرض می‌شود؛

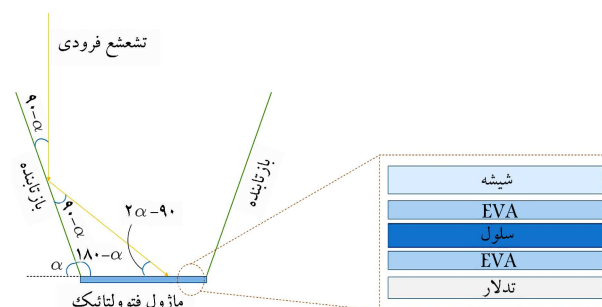
-- سطح بازتابنده‌ها کاملاً صیقلی و با بازتاب ۱۰۰ درصد در نظر گرفته می‌شود؛

-- دمای اولیه تمام اجزای ماژول ۲۹۸/۱۵ درجه کلوین فرض می‌شود.

۳.۲. استقلال از شبکه

در جدول ۱، وابستگی دمای سطح ماژول خورشیدی به تعداد مش نشان داده شده است: یکای دماهای به دست آمده در جدول ۲ بر حسب کلوین می‌باشد. در این مطالعه، به‌علت افزایش دقت و کاهش محاسبات تعداد مش برابر با ۳۳۹۱۷ انتخاب شده است.

برای انجام شبیه‌سازی، خواص فیزیکی و اپتیکی مواد باید در تنظیمات نرم‌افزار وارد شوند. جدول ۲ خواص مواد مورد استفاده در این مطالعه را نشان می‌دهد.



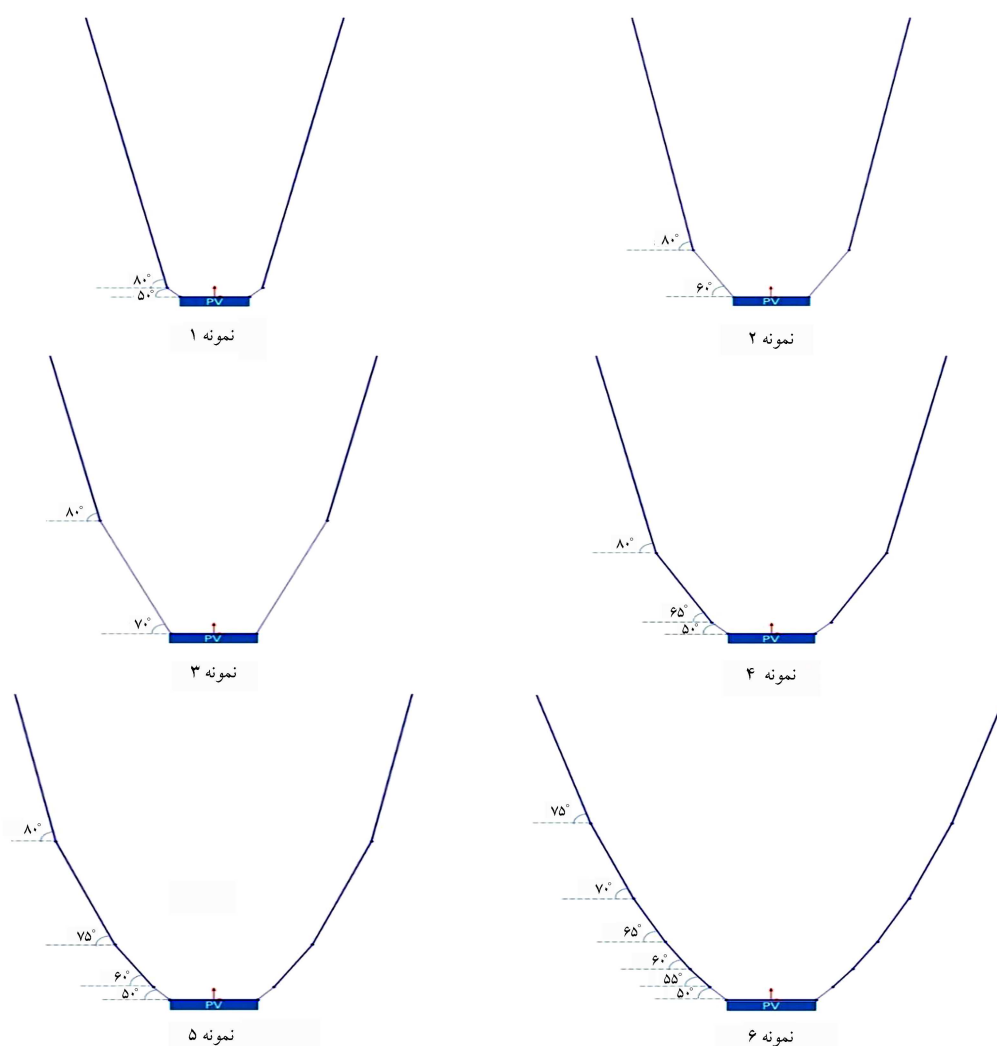
شکل ۲. شماتیک لایه‌های ماژول خورشیدی و زاویه برخورد تشنع خورشیدی بر اساس زاویه انحراف بازتابنده.

$$L_{\text{reflector}} = \int_{\Gamma_{0..}}^{\Gamma} \sqrt{\left(\frac{\partial x}{\partial t}\right)^2 + \left(\frac{\partial y}{\partial t}\right)^2} dt \quad (4)$$

ابعاد بازتابنده ترکیبی برای مقایسه با بازتابنده سهموی و صفحه تخت با استفاده از معادله ۱ طراحی شد. طول بازتابنده‌های ترکیبی با طول یک بازتابنده سهموی و بازتابنده صفحه تخت با زاویه شیب ۸۰ درجه برابر است. شکل ۳ انواع بازتابنده‌های ترکیبی در این پژوهش را نشان می‌دهد: نسبت تمرکز توسط معادله ۵^[۱۸] بیان می‌شود:

$$C = \frac{G_{\text{tot}}}{G_{\text{net}}} \quad (5)$$

در معادله بالا، G_{net} و G_{tot} به‌ترتیب میزان تشنع ورودی به سطح ماژول هنگام استفاده از بازتابنده و میزان تشنع ورودی به سطح ماژول بدون بازتابنده می‌باشد.



شکل ۳. بازتابنده‌های ترکیبی (نمونه ۱ تا ۶).

جدول ۲. خواص فیزیکی و اپتیکی مواد مورد استفاده در لایه‌های مازول خورشیدی. [۲۱، ۲۰]

ماده	خواص حرارتی	ضخامت mm	جذب	بازتاب	عبور	ضریب شکست
Glass	$\rho = 3000 [kg/m^3]$	۲/۳	۰/۴	۰/۴	۹۲/۰	۵۲۶/۱
	$C_p = 500 [J/(kgK)]$					
	$k = 2 [W/(mK)]$					
EVA	$\rho = 960 [kg/m^3]$	۵/۰	۰/۸	۰/۲	۹/۰	۴۵/۱
	$C_p = 2070 [J/(kgK)]$					
	$k = 0.35 [W/(mK)]$					
Cell	$\rho = 2330 [kg/m^3]$	۲/۰	۹/۰	۰/۸	۰/۲	۶۹/۳
	$C_p = 677 [J/(kgK)]$					
	$k = 148 [W/(mK)]$					
Tedlar	$\rho = 1200 [kg/m^3]$	۳/۰	۱۳/۰	۸۶/۰	۰/۱۲	۴۵/۱
	$C_p = 1250 [J/(kgK)]$					
	$k = 0.2 [W/(mK)]$					

۳. نتایج

۱.۳. نتایج صحت سنجی

برای صحت‌سنجی روش مورد نظر برای شبیه‌سازی، پژوهش میلاد محسن زاده و رضا حسینی^[۱۸] به‌عنوان یک مطالعه تجربی انتخاب شده است. هندسه ماژول خورشیدی مورد استفاده در مطالعه‌ی آنها همراه با بازتابنده مربوطه در محیط نرم‌افزار طراحی و مش بندی گردید. شبیه‌سازی در حالت ناپایا انجام شده و مقدار میانگین دما برای سطح شیشه ماژول در هر مرحله زمانی به‌دست آمده است.

برای حل معادلات تشعشع، از مدل DO استفاده شده که همزمان با معادلات انرژی حل شدند. خواص مواد مورد استفاده در شبیه‌سازی به‌صورت کامل در تنظیمات نرم‌افزار وارد و UDF مربوط به تولید برق برای لایه سلول خورشیدی اعمال شده است. شرایط مرزی عایق برای پشت ماژول خورشیدی، سطح پشت بازتابنده‌ها و دیواره‌های کناری لایه‌های ماژول خورشیدی اعمال و از ضریب جذب هوا صرف‌نظر گردیده است. برای حل معادلات انرژی از روش Second Order Upwind و برای معادلات DO از روش First Order Upwind استفاده شده است.

برای اعمال شرایط مرزی این مسئله، معادله تشعشع ورودی که تابعی از زمان است و در شکل ۴ نشان داده شده، از درون مقاله استخراج و این معادله در شرایط مرزی دیوار بالایی (Insolation Wall) که ترکیبی از تشعشع و انتقال حرارت جابجایی بود اعمال گردیده است.

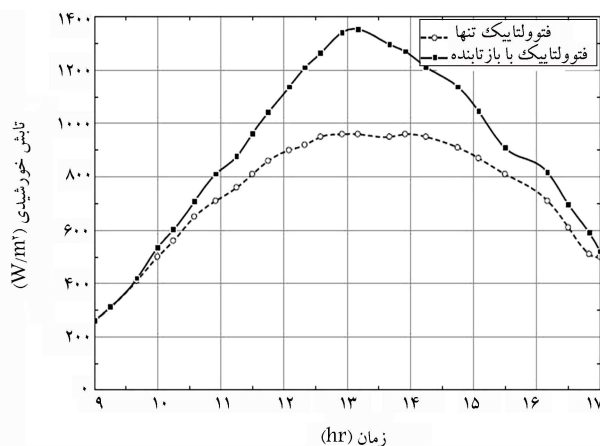
دمای آسمان برای شرط مرزی ترکیبی (mixed) دیوار بالا توسط معادله ۱۳ که تابعی از دمای محیط می‌باشد، به‌دست می‌آید:^[۲۵]

$$T_{sky} = 0.522 T_{amb}^{1/5} \quad (13)$$

به‌علاوه، ضریب انتقال حرارت جابجایی کلی که باید بر روی سطح شیشه به ماژول اعمال شود، از معادله ۱۴ به‌دست آمد.^[۲۶] همچنین، معادله ۱۵ نشان دهنده ضریب انتقال حرارتی است که بر اساس روش حلی که در آن بهره برده شده، تغییر می‌کند و به نسبت تغییر مساحت دیوار بالا نسبت به دیوار پایین تغییر می‌کند:

$$h_{convection} = 3/3 \times v_{wind} + 6/5 \quad (14)$$

$$h_{insolation_wall} = \frac{A_{PV}}{A_{insolation_wall}} \times h_{convection} \quad (15)$$



شکل ۴. نمودار شدت تشعشع خورشیدی روزانه وارده به پنل از ساعت ۹ صبح تا ۱۷ بعد از ظهر بدون بازتابنده و همراه با بازتابنده.^[۱۸]

ضریب جذب برای لایه‌های ماژول خورشیدی توسط معادله ۶ به‌دست می‌آید:^[۲۲]

$$a = \frac{1}{d} \ln \left[\frac{(1-r)^2}{2\tau} + \sqrt{r^2 + \frac{(1-r)^2}{4\tau^2}} \right] \quad (6)$$

در این معادله d ، r و τ به ترتیب ضخامت، ضریب بازتاب و ضریب عبور هر یک از لایه‌ها می‌باشند.

۴.۲. بازده ماژول فتوولتائیک

معادله انتقال حرارت در داخل لایه‌های ماژول خورشیدی به‌صورت زیر می‌باشد:

$$\frac{\partial(\rho_i C_{Pi} T_i)}{\partial t} = \nabla \cdot (k_i \nabla T_i) - \gamma \dot{e}_{elec} + S_h \quad (7)$$

اندیس i مختص لایه‌های ماژول خورشیدی است. کمیت γ برای لایه مربوط به سلول خورشیدی می‌باشد که برای لایه‌ی سلول، مقدار ۱ و برای بقیه لایه‌ها صفر قرار داده می‌شود. بازده ماژول فتوولتائیک از طریق معادله ۸ به‌دست می‌آید:^[۲۲]

$$\eta_{PV} = \eta_{ref} \left(1 - \beta_{ref} (T_{cell} - T_{ref}) + 0.85 \ln \left(\frac{I_{solar}}{I_{ref}} \right) \right) \quad (8)$$

در معادله ۸، I_{ref} ، T_{ref} ، β_{ref} ، η_{ref} ، I_{solar} ، بازده الکتریکی مرجع سلول خورشیدی در دمای ۲۹۸/۱۵ درجه کلوین، ضریب دمای مرجع (۰/۰۰۴۶)، دمای مرجع (۲۹۸/۱۵ درجه کلوین) و شدت تشعشع در حالت مرجع می‌باشند.

الکتریسیته تولیدی توسط ماژول خورشیدی از معادله ۹ به‌دست می‌آید:

$$\dot{e}_{elec} = \frac{E_{elec}}{V_{cell}} = \frac{(a_{cell} \tau_{glass} I_{solar}) \eta_{PV}}{d_{cell}} \quad (9)$$

در این معادله، d_{cell} ، τ_{glass} ، a_{cell} به‌ترتیب ضریب جذب لایه سلول خورشیدی، ضریب عبور شیشه و ضخامت لایه سلول خورشیدی می‌باشند.

برای حل معادلات تشعشع از مدل DO استفاده شده است. معادلات تشعشع با معادلات انرژی به‌طور هم‌زمان حل می‌شود که در معادله ۱۰ نشان داده شده است:^[۲۲]

$$\nabla \cdot (I(\vec{r}, \vec{s}) \vec{s}) + (a + \sigma_s) I(\vec{r}, \vec{s}) = an \frac{\sigma T^4}{\pi} + \frac{\sigma_s}{4\pi} \int_0^\pi I(\vec{r}, \vec{s}') \phi(\vec{s}, \vec{s}') d\Omega' \quad (10)$$

در رابطه بالا، $\vec{s}$ و σ_s به ترتیب بردار جهت پراکندگی و ضریب پراکندگی می‌باشند. ϕ ، n ، a و Ω' به‌ترتیب ضریب جذب، ضریب شکست، تابع حالت و زاویه فضایی (سه بعدی) می‌باشند. سورس ترم را می‌توان به‌صورت زیر تعریف کرد:

$$S_h = -\nabla \cdot q^R = \nabla \cdot \int_0^\infty q_v^R dv \quad (11)$$

که در رابطه بالا، q_v^R شار تابشی طیفی عبوری از سطح با بردار عمود واحد $\vec{n}''$ به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

$$q_v^R = \vec{q}_v^R \cdot \vec{n} = \int_{\pi} I_v \vec{n} \cdot \vec{s} d\Omega \quad (12)$$

در معادله ۱۴، سرعت باد و دمای محیط از طریق سایت هواشناسی به دست آمده و در معادله قرار داده شده است. مطابق با جدول ۳، برای اعمال ضریب انتقال حرارت جابجایی به دیوار بالا از معادله ۱۵ استفاده شده است.

تمام لایه‌های مائول خورشیدی به غیر از لایه تدلار نیمه شفاف در نظر گرفته شده است، زیرا نور خورشید باید از طریق آنها عبور کند و این لایه‌ها با یکدیگر کوپل شده و انتقال حرارت هدایت در بین آنها وجود داشته باشد. لایه تدلار غیر شفاف در نظر گرفته شده و بر سطح بیرونی آن شرط مرزی عایق اعمال شده است.

سیال هوا با ضریب انتقال حرارت رسانش بسیار بالا و ضریب شکست نور یک، فضای بین مائول خورشیدی و بازتابنده‌ها تا دیوار بالا را اشغال کرده تا دمای سطح مائول را به دیوار بالا هدایت کند، در حالی که در تابش نور خورشید نیز تأثیری نداشته باشد.

ویژگی‌های مواد تشکیل دهنده لایه‌های مائول خورشیدی در تمامی لایه‌ها به درستی انتخاب شده است و تمامی لایه‌ها در شبیه‌سازی تشعشع تأثیر گذار بوده‌اند. همچنین، UDF مورد استفاده برای تولید الکتربسیسته در لایه مربوط به سلول اعمال گردیده است.

اعتبارسنجی روش مورد استفاده در شبیه‌سازی در پژوهش تجربی^[۱۸] انجام شده و نمودار دما بر حسب زمان به دست آمده در شکل ۵ نشان داده شده است. مطابق شکل ۵، اختلاف نتیجه‌ی شبیه‌سازی دوبعدی با نتیجه‌ی تجربی حداکثر

جدول ۳. دما و سرعت باد در بازه زمانی ۹ صبح تا ۱۶ بعد از ظهر برای مطالعه محسن زاده و حسینی.^[۱۸]

ساعت	سرعت باد (km/h)	زمان شروع (s)	دمای محیط (K)
۹	۴	۰	۲۹۸/۱۵
۱۰	۴	۳۶۰۰	۳۰۱/۱۵
۱۱	۴	۷۲۰۰	۳۰۴/۱۵
۱۲	۴	۱۰۸۰۰	۳۰۷/۱۵
۱۳	۴	۱۴۴۰۰	۳۰۷/۱۵
۱۴	۴	۱۸۰۰۰	۳۰۷/۱۵
۱۵	۶	۲۱۶۰۰	۳۰۸/۱۵
۱۶	۸	۲۵۲۰۰	۳۰۹/۱۵

۲.۳. نتایج شبیه‌سازی CFD

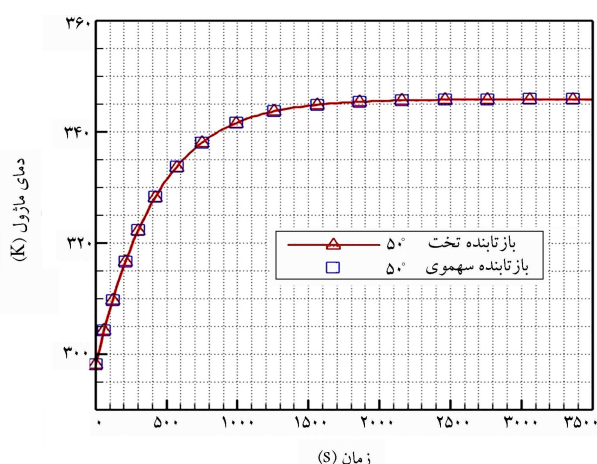
شدت تشعشع برای همه‌ی موارد شبیه‌سازی برابر با ۱۰۰۰ وات بر مترمربع در نظر گرفته شده و دمای محیط برابر با ۲۹۸/۱۵ درجه کلوین فرض شده است. همچنین، دمای آسمان با استفاده از رابطه ۱۲ به دست آمده است. ضریب انتقال حرارت جابجایی برای پشت مائول به میزان ۵ وات بر مترمربع کلوین، برای دیوار بالایی هندسه نسبت به افزایش طول دیوار بالا مطابق با رابطه ۱۵ کاهش یافته و مقدار آن در شرایط مرزی وارد شده است. همچنین، دیواره‌های کناری لایه‌های مائول خورشیدی و دیوار پشت بازتابنده‌ها عایق در نظر گرفته شده‌اند.

۱.۲.۳. تأثیر هندسه‌ی بازتابنده در عملکرد مائول خورشیدی

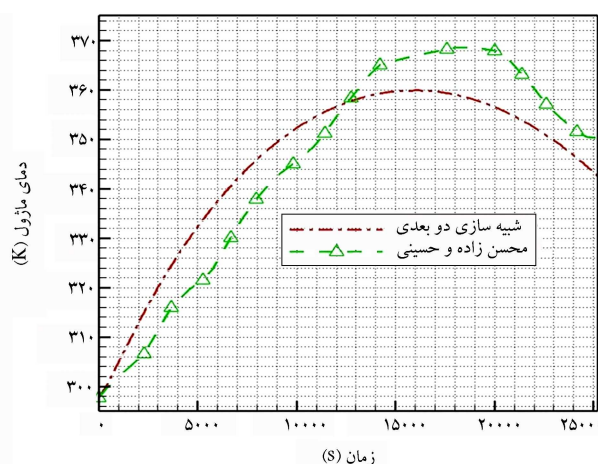
دمای مائول خورشیدی در شرایط عدم وجود بازتابنده خنک‌کننده به ۳۳۹/۶۴ درجه کلوین و بازده این مائول به ۱۱/۰۸ درصد رسید. همچنین، تأثیرات ادغام سه نوع بازتابنده صفحه تخت، سهموی و ترکیبی بر دمای کاری مائول خورشیدی بررسی شد.

در شبیه‌سازی دو بعدی که در حالت ناپایا انجام گرفت، دمای سطح مائول برای دو مدل بازتابنده با طول بازتابنده برابر بررسی شد. شکل‌های ۶ تا ۱۰ مقایسه بین بازتابنده صفحه تخت و سهموی را نشان می‌دهند:

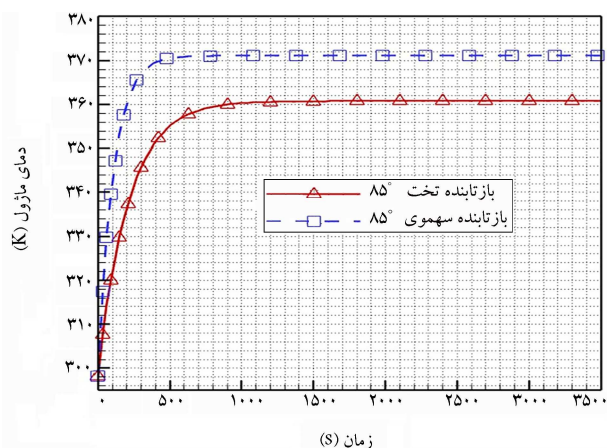
دمای سطح مائول هنگام استفاده از بازتابنده سهموی نسبت به بازتابنده صفحه تخت برای زوایای ۵۰، ۶۰، ۷۰، ۸۰ و ۸۵ درجه به ترتیب ۰/۷، ۱/۵، ۴/۰۴، ۶/۱۶ و ۱۱/۷۴ درصد ارزیابی افزایش داشته است. در نمودارهای بالا که دمای سطح مائول را نسبت به زمان نشان می‌دهند، مشاهده می‌شود که با گذشت زمان دمای مائول افزایش می‌یابد. در همین راستا، اگر فرایند خنک‌کاری در هریک از موارد فوق انجام شود و دمای کاری مائول کاهش یابد، می‌توان از حداکثر توان خروجی مائول بهره‌مند شد. مطابق با شکل‌های ۶ و ۷، در زوایای شیب پایین، بازتابنده سهموی و صفحه تخت اختلاف چندانی در دمای کارکرد ندارند. در شکل‌های ۸ تا ۱۰ مشاهده می‌شود که با افزایش زاویه شیب، دمای کاری مائول با بازتابنده سهموی بالاتر از دمای مائول با بازتابنده صفحه تخت است که این امر نشان دهنده اثر نسبت تمرکز بازتابنده سهموی به صفحه تخت می‌باشد.



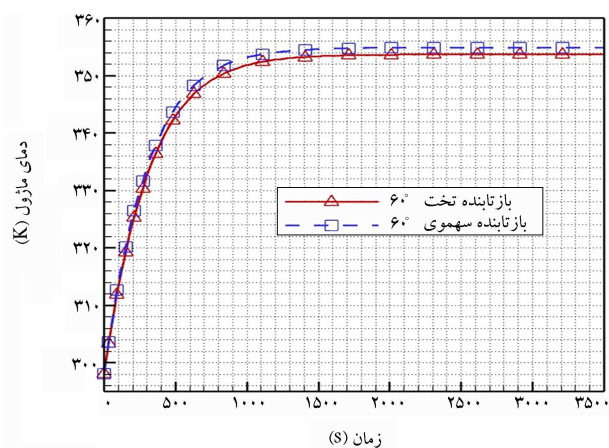
شکل ۶. دمای سطح مائول خورشیدی هنگام استفاده از بازتابنده سهموی و صفحه تخت ۵۰ درجه.



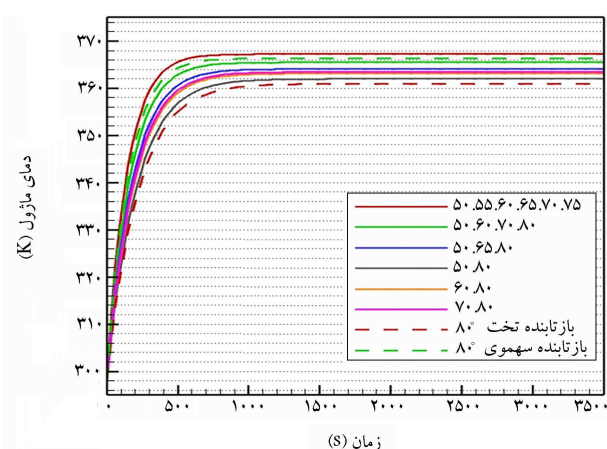
شکل ۵. مقایسه دمای سطح پنل خورشیدی در شبیه‌سازی دوبعدی با نتیجه مطالعه تجربی.



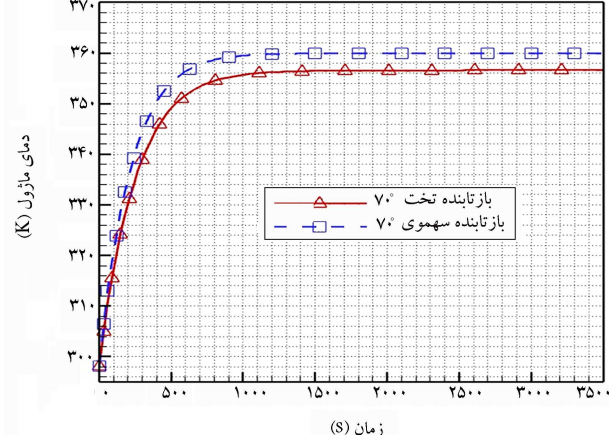
شکل ۶. دمای سطح مازول خورشیدی هنگام استفاده از بازتابنده سهمی و صفحه تخت ۸۵ درجه.



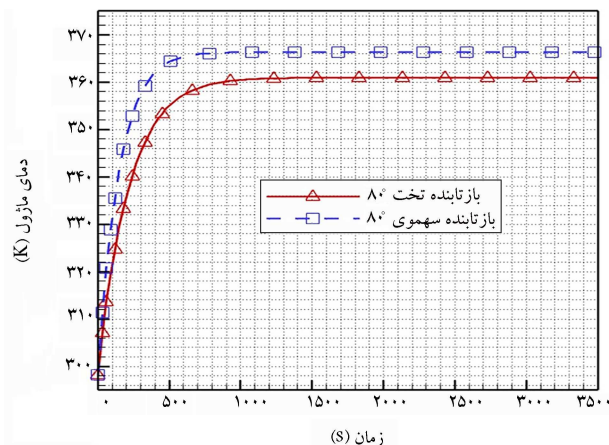
شکل ۷. دمای سطح مازول خورشیدی هنگام استفاده از بازتابنده سهمی و صفحه تخت ۶۰ درجه.



شکل ۸. دمای سطح مازول خورشیدی هنگام استفاده از بازتابنده‌های ترکیبی در مقایسه با بازتابنده سهمی و صفحه تخت ۸۰ درجه.



شکل ۹. دمای سطح مازول خورشیدی هنگام استفاده از بازتابنده سهمی و صفحه تخت ۷۰ درجه.



شکل ۱۰. دمای سطح مازول خورشیدی هنگام استفاده از بازتابنده سهمی و صفحه تخت ۸۰ درجه.

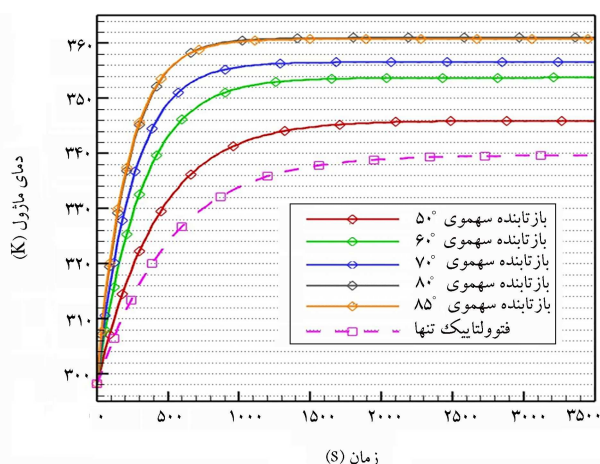
با افزایش شیب بازتابنده، اختلاف توان تولیدی نسبت به دو بازتابنده قبلی کمتر می‌شود. اما در مورد توان خروجی بازتابنده‌های سهمی، روند افزایش توان تولیدی به صورت صعودی است، یعنی با افزایش شیب، اختلاف توان تولیدی نسبت به دو بازتابنده قبلی بیشتر می‌شود. این نتیجه نیز به این دلیل است که نسبت تمرکز در بازتابنده‌های سهمی نسبت به بازتابنده‌های صفحه تخت بیشتر است. بازتابنده‌های ترکیبی نیز در حالت ناپایا شبیه‌سازی و عملکرد آنها بررسی شد. مقایسه بازتابنده‌های ترکیبی با بازتابنده صفحه تخت و سهمی ۸۰ درجه در شکل ۱۱ نشان داده شده است.

در شکل ۱۱ مشاهده می‌شود که افزایش دمای سطح مازول هنگام استفاده از بازتابنده ترکیبی نسبت به بازتابنده صفحه تخت ۸۰ درجه از نوع ۱ تا ۶ به ترتیب به ۱/۱۶، ۲/۴۸، ۲/۸۲، ۳/۵۵، ۵/۱۵ و ۷/۱۴ درصد رسیده و افزایش دمای سطح مازول برای بازتابنده ترکیبی نوع ۶ نسبت به بازتابنده سهمی ۸۰ درجه، ۰/۹۲ درصد ارزیابی شده است. نتایج حاصل نشان می‌دهد که دمای مازول خورشیدی با بازتابنده ترکیبی در هر صورت از بازتابنده صفحه تخت بهتر می‌باشد. تنها بازتابنده ترکیبی نوع ۶ می‌تواند گزینه بهتری از بازتابنده سهمی ۸۰ درجه باشد، زیرا نسبت تمرکز بالاتری دارد و در کاربردهایی که هزینه ساخت بازتابنده سهمی بیشتر باشد می‌توان از بازتابنده ترکیبی استفاده کرد.

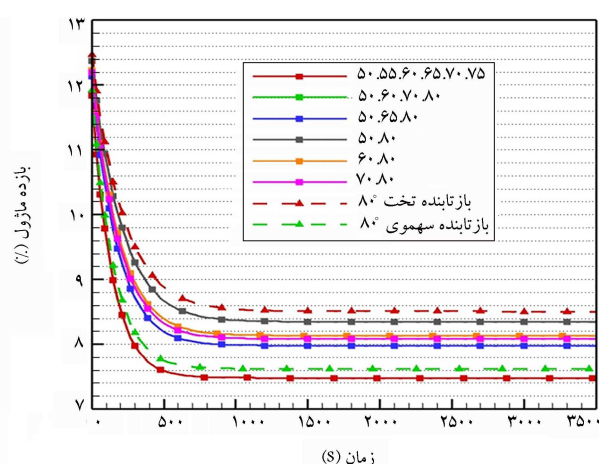
جدول ۴ توان تولیدی مازول فتوولتائیک با ادغام بازتابنده‌های صفحه تخت و سهمی را نشان می‌دهد. مطابق با جدول ۴، علیرغم کاهش بازده هنگام بالا رفتن شیب بازتابنده، توان تولیدی با افزایش شیب بازتابنده افزایش می‌یابد. همچنین، روند افزایش توان خروجی در بازتابنده‌های صفحه تخت نزولی می‌باشد. به این معنی که

جدول ۴. توان تولیدی ماژول خورشیدی هنگام استفاده از بازتابنده‌های صفحه تخت و سهموی.

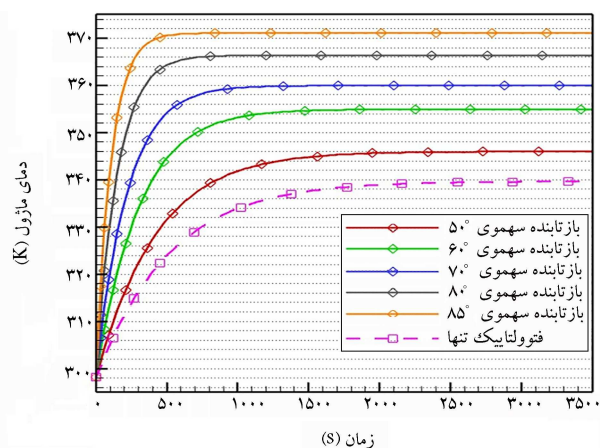
بازتابنده	طول ماژول (mm)	طول بازتابنده (mm)	توان تولیدی $S(W)$
۵° - flat	۶۰۰	۱۶۲/۰۸۹	۲۹/۹
۶° - flat	۶۰۰	۶۰۰	۴۰/۳
۷° - flat	۶۰۰	۱۳۴۳/۸۶	۴۸/۵۵
۸° - flat	۶۰۰	۳۲۴۶/۸۸	۵۲/۵۷
۸۵° - flat	۶۰۰	۶۷۷۹/۶۴	۵۴/۰۷
۵° - parabolic	۶۰۰	۱۶۲/۰۸۹	۲۹/۹۴
۶° - parabolic	۶۰۰	۶۰۰	۴۱/۴۳
۷° - parabolic	۶۰۰	۱۳۴۳/۸۶	۵۴/۷۶
۸° - parabolic	۶۰۰	۳۲۴۶/۸۸	۷۵/۳۲
۸۵° - parabolic	۶۰۰	۶۷۷۹/۶۴	۹۸/۵۷



شکل ۱۳. دمای سطح ماژول خورشیدی هنگام استفاده از بازتابنده‌های صفحه تخت از ۵° تا ۸۵° درجه.



شکل ۱۲. بازده ماژول خورشیدی هنگام استفاده از بازتابنده‌های ترکیبی در مقایسه با بازتابنده سهموی و صفحه تخت ۸° درجه.



شکل ۱۴. دمای سطح ماژول خورشیدی هنگام استفاده از بازتابنده‌های سهموی از ۵° تا ۸۵° درجه.

نشان می‌دهد. شکل ۱۴ نیز مقایسه دمای ماژول هنگام ادغام بازتابنده‌های سهموی از زاویه ۵° تا ۸۵° درجه را نشان می‌دهد.

طبق نتایج درج شده در شکل‌های ۱۳ و ۱۴، افزایش دمای سطح ماژول هنگام استفاده از بازتابنده صفحه تخت ۵°، ۶°، ۷°، ۸° و ۸۵° درجه نسبت به ماژول

بازده ماژول خورشیدی در هنگام استفاده از بازتابنده ترکیبی در شکل ۱۲ نشان داده شده است.

توان تولیدی ماژول فوتولتائیک را هنگام استفاده از بازتابنده‌های ترکیبی در جدول ۵ نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که با افزایش تعداد بازتابنده‌ها با زاویه‌های بیشتر (از نمونه ۱ تا نمونه ۶)، برخلاف بازده که روند نزولی دارد، توان تولیدی با افزایش زاویه‌های ترکیبی و افزایش نسبت تمرکز روند صعودی دارد و توان تولیدی بازتابنده نوع ۶ از تمام بازتابنده‌های ترکیبی بیشتر است.

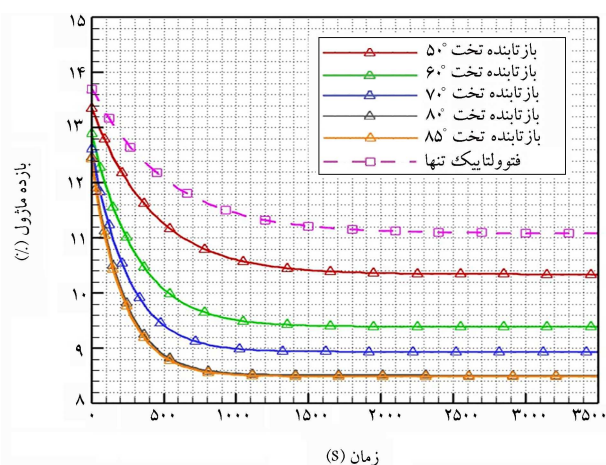
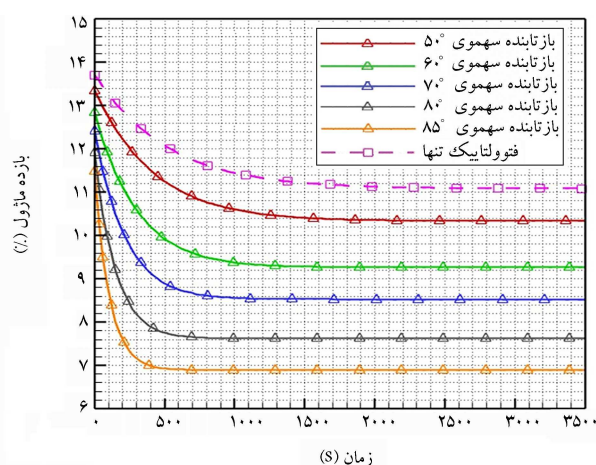
دمای ماژول خورشیدی هنگام استفاده از بازتابنده‌های ترکیبی برای نمونه‌های ۱ تا ۶ به ترتیب به ۳۶۲/۰۲، ۳۶۳/۱۷، ۳۶۳/۴۸، ۳۶۴/۱۲، ۳۶۴/۵۲ و ۳۶۷/۲۶ کلین رسید. مشخص می‌شود که بازتابنده ترکیبی نوع ۶ به دلیل داشتن بالاترین دما، کمترین بازده را دارد، اما بازده آن با بازده بازتابنده سهموی ۸° درجه تقریباً برابر شد و می‌توان از این نوع بازتابنده به جای بازتابنده سهموی با هزینه ساخت بالاتر استفاده کرد.

۲.۲.۳. تأثیر زاویه (طول بازتابنده) در عملکرد ماژول خورشیدی

با افزایش زاویه (طول) بازتابنده بر اساس معادله ۱ و افزایش شدت تابش خورشیدی بر اثر افزایش نسبت تمرکز، دمای سطح ماژول افزایش می‌یابد. شکل ۱۳ مقایسه دمای ماژول هنگام ادغام بازتابنده‌های صفحه تخت از زاویه ۵° تا ۸۵° درجه را

جدول ۵. توان تولیدی ماژول خورشیدی هنگام استفاده از بازتابنده‌های ترکیبی.

نمونه	طول ماژول (mm)	a	طول بازتابنده (mm)	طول مجموع بازتابنده‌ها (mm)	توان تولیدی (w)
۱	۶۰۰	۵۰° ۸۰°	۱۶۲/۰۸۹ ۳۰۸۴/۷۹	۸۸/۳۲۴۶	۱۱/۵۶
۲	۶۰۰	۶۰° ۸۰°	۶۰۰ ۲۶۴۶/۸۸	۸۸/۳۲۴۶	۶۵/۶۱
۳	۶۰۰	۷۰° ۸۰°	۱۳۴۳/۸۶ ۱۹۰۳/۰۲	۸۸/۳۲۴۶	۰۱/۶۳
۴	۶۰۰	۵۰° ۶۵° ۸۰°	۱۶۲/۰۸۹ ۸۴۵/۹۸ ۲۲۳۸/۸۱	۸۸/۳۲۴۶	۶۶/۶۵
۵	۶۰۰	۵۰° ۶۰° ۷۰° ۸۰°	۱۶۲/۰۸۹ ۴۸۹/۱۲ ۱۰۹۵/۵۲ ۱۵۰۰/۱۴	۸۸/۳۲۴۶	۲۸/۷۱
۶	۶۰۰	۵۰° ۵۵° ۶۰° ۶۵° ۷۰° ۷۵° ۸۰°	۱۶۲/۰۸۹ ۲۱۶/۴۸ ۳۰۶/۱۴ ۴۶۵/۶۴ ۷۸۰/۹ ۱۳۱۵/۶۳ ۰	۸۸/۳۲۴۶	۵۲/۷۹



شکل ۱۶. بازده ماژول خورشیدی هنگام استفاده از بازتابنده‌های سهموی از ۵۰ تا ۸۵ درجه.

شکل ۱۵. بازده ماژول خورشیدی هنگام استفاده از بازتابنده‌های صفحه تخت از ۵۰ تا ۸۵ درجه.

می‌شود بازده ماژول خورشیدی هنگام استفاده از بازتابنده صفحه تخت و سهموی از زاویه ۵۰ تا ۸۵ درجه کاهش می‌یابد، زیرا بازده ماژول خورشیدی برحسب دمای ماژول تغییر می‌کند. با توجه به دمای بالای ماژول، بازتابنده سهموی ۸۵ درجه کمترین بازده را دارد و نشان دهنده آن است که در مواردی که بازده ماژول مطرح باشد، بازتابنده سهموی گزینه مناسبی نمی‌باشد. بازتابنده‌های صفحه تخت به دلیل دمای پایین‌تر ماژول نسبت به بازتابنده‌های سهموی در درجات بالا، گزینه مناسبی با بازده بالاتر می‌باشند و مشکلات طراحی و هزینه ساخت پایین‌تری دارند.

خورشیدی بدون بازتابنده به ترتیب ۹/۴۷، ۲۱/۲، ۲۵/۵، ۳۲/۱۱ و ۳۱/۸۴ درصد و هنگام استفاده از بازتابنده‌های سهموی به ترتیب ۹/۵۵، ۲۳/۰۲، ۳۰/۵۷، ۴۰/۲۵ و ۴۷/۳۳ درصد ارزیابی می‌شود. نتایج حاصل نشان می‌دهد برای طول بازتابنده‌های بالا، استفاده از بازتابنده سهموی مناسب‌تر از بازتابنده صفحه تخت می‌باشد که با وجود دمای بالا توان بیشتری نیز تولید می‌کند. نتایج مربوط به بازده ماژول خورشیدی برای دو نوع بازتابنده سهموی و صفحه تخت در شکل‌های ۱۵ و ۱۶ نشان داده شده است. در شکل‌های ۱۵ و ۱۶ مشاهده

۴. نتیجه‌گیری

پس از انجام صحت‌سنجی و تأیید روش مورد استفاده در نرم‌افزار ANSYS Fluent ۲۰۲۱R۲، ماژول خورشیدی همراه با انواع بازتابنده‌های صفحه تخت، سهموی و ترکیبی طراحی و به صورت دوبعدی شبیه‌سازی شد که نتایج حاصل به شرح زیر می‌باشد:

• افزایش دمای سطح ماژول خورشیدی هنگام استفاده از بازتابنده سهموی ۸۵ درجه نسبت به بازتابنده صفحه تخت ۸۵ درجه، $۱۱/۷۴$ درصد ارزیابی شد که نشان داد در زاویه بازتابنده بالای ۷۰ درجه در طول برابر از آنجا که نسبت تمرکز بالاتری دارد و توان تولیدی آن نیز بیشتر است، استفاده از بازتابنده سهموی مناسب‌تر است، اما برای مواردی که افزایش طول بازتابنده سبب تلفات انرژی بیشتری شود، استفاده از بازتابنده صفحه تخت به دلیل هزینه ساخت پایین و نسبت تمرکز تقریباً برابر با بازتابنده سهموی در زاویه‌های پایین ۷۰ درجه گزینه مناسب‌تری است؛

• افزایش دمای سطح ماژول خورشیدی هنگام استفاده از بازتابنده ترکیبی نوع ۶ نسبت به بازتابنده صفحه تخت ۸۰ درجه و بازتابنده سهموی ۸۰ درجه به ترتیب $۷/۱۴$ و $۹۲/۰$ درصد ارزیابی شد. نتایج نشان داد هرچه قدر تعداد آینه‌ها با زاویه‌های ترکیبی بیشتر باشد، عملکرد بهتری در ماژول مشاهده می‌شود و برای مواردی که هزینه ساخت بازتابنده سهموی بالا است، بازتابنده ترکیبی گزینه مناسبی برای استفاده می‌باشد.

فهرست علائم

G_{tot} : شدت تشعشع ورودی به سطح ماژول با بازتابنده ($W m^{-2}$)؛	A : مساحت سطح (m^2)؛
G_{net} : شدت تشعشع ورودی به سطح ماژول بدون بازتابنده ($W m^{-2}$)؛	C_p : ظرفیت گرمایی ویژه ($J kg^{-1} K^{-1}$)؛
k : ضریب انتقال حرارت هدایتی ($W m^{-1} K^{-1}$)؛	d : ضخامت (mm)؛
T : دما (K)؛	h : ضریب انتقال حرارت جابجایی ($W m^{-2} K^{-1}$)؛
I_{solar} : شدت تابش خورشیدی ($W m^{-2}$)؛	I_{ref} : شدت تابش مرجع ($W m^{-2}$)؛
$\dot{e}_{elec}$: نرخ توان الکتریکی تولیدی ($W m^{-2}$)؛	E_{elec} : توان الکتریکی تولیدی (W)؛

V_{cell} : حجم سلول (m^3)؛

n : ضریب شکست -؛

C : نسبت تمرکز -؛

r : ضریب بازتاب -؛

L : طول (mm)؛

• اختصارها

PV : Photovoltaic؛

PVT : Photovoltaic Thermal؛

CPC : Compound Parabolic Concentrator؛

CPV : Concentrating Photovoltaic؛

$ACPC$: Asymmetric Compound Parabolic Concentrator؛

DO : Discrete Ordinates؛

$CHCT$: Compound Hyperbolic Concentrator-Trumpet؛

$VT - PVT$: V-trough Photovoltaic Thermal؛

UDF : User Defined Function؛

CFD : Computational Fluid Dynamics؛

EVA : Ethylene-Vinyl Acetate؛

• زیرنویس‌ها

ref : reference؛

$elec$: electricity؛

amb : ambient؛

• حروف یونانی

α : زاویه انحراف بازتابنده از ماژول خورشیدی؛

τ : ضریب عبور؛

η : بازده؛

ϕ : معادله حالت؛

Ω' : زاویه فضایی؛

σ_s : ضریب پراکندگی؛

a : ضریب جذب طیفی (m^{-1})؛

ρ : چگالی ($kg m^{-3}$)؛

β : ضریب انبساط دمایی (K^{-1})؛

منابع (References)

- Kalogirou, S.A., 2018. *Introduction to Renewable Energy Powered Desalination*. In *Renewable Energy Pow-*
- Baccoli, R., Kumar, A., Frattolillo, A., Mastino, C., Ghiani, A. and Gatto, G., 2021. Enhancing energy produc-

ered Desalination Handbook, Butterworth-Heinemann. pp.3-46.

- tion in a PV collector-reflector system supervised by an optimization model: Experimental analysis and validation. *Energy Conversion and Management*, 229, 113774. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.113774>.
3. Baccoli, R., Frattolillo, A., Mastino, C., Curreli, S. and Ghiani, E., 2018. A comprehensive optimization model for flat solar collector coupled with a flat booster bottom reflector based on an exact finite length simulation model. *Energy Conversion and Management*, 164, pp.482-507. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.02.091>.
4. Lu, W., Wu, Y. and Eames, P., 2018. Design and development of a building façade integrated asymmetric compound parabolic photovoltaic concentrator (BFI-ACP-PV). *Applied Energy*, 220, pp.325-336. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.03.071>.
5. Malik, P. and Chandel, S.S., 2020. Performance enhancement of multi-crystalline silicon photovoltaic modules using mirror reflectors under western himalayan climatic conditions. *Renewable Energy*, 154, pp.966-975. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.03.048>.
6. Sangani, C.S. and Solanki, C.S., 2007. Experimental evaluation of V-trough (2 suns) PV concentrator system using commercial PV modules. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 91(6), pp.453-459. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2006.10.012>.
7. Huang, B.J. and Sun, F.S., 2007. Feasibility study of one axis three positions tracking solar PV with low concentration ratio reflector. *Energy Conversion and Management*, 48(4), pp.1273-1280. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2006.09.020>.
8. Gajbert, H., Hall, M. and Karlsson, B., 2007. Optimisation of reflector and module geometries for stationary, low-concentrating, façade-integrated photovoltaic systems. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 91(19), pp.1788-1799. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2007.06.007>.
9. Narasimman, K. and Selvarasan, I., 2016. Design construction and analysis of solar ridge concentrator photovoltaic (PV) system to improve battery charging performance. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 127, pp.187-192. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2016.01.024>.
10. Simon, S.P., Kumar, K.A., Sundareswaran, K., Nayak, P.S.R. and Padhy, N.P., 2020. Impact and economic assessment on solar PV mirroring system-A feasibility report. *Energy Conversion and Management*, 203, 112222. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.112222>.
11. Nour, C. A., Migan-Dubois, A., Badosa, J., Bourdin, V., Marchand, C. and Akiki, T., 2020. Geometrical optimization for a photovoltaic installation equipped with flat reflectors based on plane of array estimations. *EPJ Photovoltaics*, 11(1), pp.14. DOI:10.1051/epjpv/2019010.
12. Agrawal, M., Kumar, A. and Chowdhury, A., 2021. A detailed simulation-based study on the effect of mirror integration on PV Module (s) with analysis of different wind flow scheme. *Solar Energy*, 222, pp.129-144. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2021.05.028>.
13. Parupudi, R.V., Singh, H. and Kolokotroni, M., 2020. Low concentrating photovoltaics (LCPV) for buildings and their performance analyses. *Applied Energy*, 279, 115839. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.115839>.
14. Ustaoglu, A., Ozbey, U. and Torlakli, H., 2020. Numerical investigation of concentrating photovoltaic/thermal (CPV/T) system using compound hyperbolic-trumpet, V-trough and compound parabolic concentrators. *Renewable Energy*, 152, pp.1192-1208. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.01.094>.
15. Kostic, L.T., Pavlovic, T.M. and Pavlovic, Z.T., 2010. Influence of reflectance from flat aluminum concentrators on energy efficiency of PV/Thermal collector. *Applied Energy*, 87(2), pp.410-416.
16. Ziapour, B.M., Palideh, V. and Mokhtari, F., 2016. Performance improvement of the finned passive PVT system using reflectors like removable insulation covers. *Applied Thermal Engineering*, 94, pp.341-349. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2015.10.143>.
17. Michael, J. J., Iqbal, S. M., Iniyar, S. and Goic, R., 2018. Enhanced electrical performance in a solar photovoltaic module using V-trough concentrators. *Energy*, 148, pp.605-613. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.01.101>.
18. Mohsenzadeh, M. and Hosseini, R., 2015. A photovoltaic/thermal system with a combination of a booster diffuse reflector and vacuum tube for generation of electricity and hot water production. *Renewable Energy*, 78, pp.245-252. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.01.010>.
19. Qiu, G., Ma, Y., Song, W. and Cai, W., 2021. Comparative study on solar flat-plate collectors coupled with three types of reflectors not requiring solar tracking for space heating. *Renewable Energy*, 169, pp.104-116. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.12.134>.
20. Duan, J., 2021. A novel heat sink for cooling concentrator photovoltaic system using PCM-porous system. *Applied Thermal Engineering*, 186, 116522. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2020.116522>.
21. Maadi, S.R., Khatibi, M., Ebrahimnia-Bajestan, E. and Wood, D., 2019. Coupled thermal-optical numerical modeling of PV/T module-Combining CFD approach and two-band radiation DO model. *Energy Conversion and Management*, 198, 111781. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.111781>.
22. Hassamien, A.S. and Akl, A.A., 2016. Effect of Se addition on optical and electrical properties of chalcogenide CdSSe thin films. *Superlattices and Microstructures*, 89, pp.153-169. <http://doi.org/10.1016/j.spmi.2015.10.044>.
23. Khanna, S., Newar, S., Sharma, V., Reddy, K.S. and Mallick, T.K., 2019. Optimization of fins fitted phase change material equipped solar photo-

- voltaic under various working circumstances. *Energy Conversion and Management*, 180, pp.1185-1195. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.10.105>.
24. Maadi, S.R., Khatibi, M., Ebrahimnia-Bajestan, E. and Wood, D., 2019. Coupled thermal-optical numerical modeling of PV/T module-Combining CFD approach and two-band radiation DO model. *Energy Conversion and Management*, 198, 111781. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.111781>.
 25. Emam, M. and Ahmed, M., 2018. Cooling concentrator photovoltaic systems using various configurations of phase-change material heat sinks. *Energy Conversion and Management*, 158, pp.298-314. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.12.077>.
 26. Liu, Y., Chen, Y., Wang, D., Liu, J., Luo, X., Wang, Y., Liu, H. and Liu, J., 2021. Experimental and numerical analyses of parameter optimization of photovoltaic cooling system. *Energy*, 215, 119159. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.119159>.