



بررسی استفاده از فیلتر طیفی ترکیبی نانوسیال-ماده تغییر فازدهنده در سیستم فتوولتائیک / حرارتی

فریده یزدانی فرد^۱، مهرا ن عامری*^{۱،۲}، رابرت تیلور^۲

^۱گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران
^۲دانشکده مهندسی مکانیک و ساخت، دانشگاه نیو سوت ولز، سیدنی، استرالیا

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۹/۰۲/۰۸

بازنگری: ۱۳۹۹/۰۴/۱۱

پذیرش: ۱۳۹۹/۰۵/۲۸

ارائه آنلاین: ۱۳۹۹/۰۶/۰۳

کلمات کلیدی:

ماده تغییر فازدهنده

نانوسیال

سیستم فتوولتائیک/حرارتی

انرژی

انرژی

خلاصه: سیستم فتوولتائیک/حرارتی با ترکیب تکنولوژی‌های فتوولتائیک و کلکتور حرارتی خورشیدی قادر به تولید هم‌زمان حرارت و الکتریسیته است. فیلترهای طیفی به منظور استفاده کامل از طیف تابش خورشیدی و جداسازی حرارتی سلول‌های فتوولتائیک و سیال انتقال حرارت در سیستم فتوولتائیک/حرارتی به کار گرفته می‌شوند. هدف از این مقاله بررسی فیلتر طیفی ترکیبی جدیدی متشکل از ماده تغییر فازدهنده و نانوسیال به منظور دستیابی به فیلتری نزدیک به فیلتر طیفی ایده‌آل است. در این راستا، سیستم فتوولتائیک/حرارتی دارای فیلتر طیفی ترکیبی نانوسیال-ماده تغییر فازدهنده با استفاده از معادلات موازنه انرژی در نرم‌افزار متلب شبیه‌سازی شد و عملکرد آن از دیدگاه انرژی و انرژی با دو سیستم فتوولتائیک/حرارتی معمولی و سیستم فتوولتائیک/حرارتی دارای فیلتر طیفی نانوسیالی مقایسه گردید. همچنین، خواص نوری نانوسیالات و ماده تغییر فازدهنده مدل‌سازی شدند و مدل‌های ارائه شده با داده‌های تجربی موجود در پژوهش‌های گذشته اعتبار سنجی شدند. نتایج حاصل از این بررسی نشان داد که با استفاده از فیلتر طیفی ترکیبی می‌توان دمای فتوولتائیک را تا ۵۰٪ کاهش داد و دمای سیال خروجی را تا بیش از دو برابر افزایش داد. بازده انرژی سیستم دارای فیلتر طیفی ترکیبی در نسبت تمرکز ۳۰ به ترتیب ۱۴ و ۲۲ درصد بیشتر و انرژی تلف شده آن به ترتیب به میزان ۵ و ۷ درصد کمتر از سیستم فتوولتائیک/حرارتی معمولی و سیستم دارای فیلتر طیفی نانوسیالی بدست آمد. همچنین از دیدگاه انرژی پیشنهاد شد که از فیلتر طیفی ترکیبی در نسبت‌های تمرکز بیشتر از ۱۵ استفاده شود.

۱- مقدمه

و سیال است، به این معنی که به دست آوردن حرارت با دمای بالا از جزء حرارتی عملکرد سلول را به خطر می‌اندازد. به عبارت دیگر، به دست آوردن سیال خروجی با دمای بالا به قیمت افزایش دمای فتوولتائیک و کاهش بازده آن تمام می‌شود. برای رفع این مشکل، تقسیم طیفی نور خورشید پیشنهاد شده است تا دو جزء سلول‌های فتوولتائیک و سیال انتقال حرارت را به صورت حرارتی از هم جدا کند. با استفاده از تقسیم طیفی می‌توان نور خورشید را به نوارهای طیفی مختلف تجزیه کرد. سپس هر نوار تابش را به بهترین گیرنده برای آن نوار طیفی هدایت کرد که می‌تواند سلول فتوولتائیک یا جذب کننده حرارتی باشد. با استفاده از این روش، فتوولتائیک و

سیستم فتوولتائیک/حرارتی که ترکیبی از فتوولتائیک و دریافت کننده‌های حرارتی است می‌تواند مشکل پایین بودن بازده این دو سیستم به صورت مجزا را برطرف کند. در سیستم‌های فتوولتائیک/حرارتی معمولی، نور خورشید به سلول‌های فتوولتائیک برخورد می‌کند، بخشی به الکتریسیته و بخشی به حرارت تبدیل می‌شود. حرارت تولید شده با استفاده از سیال انتقال حرارت که در مجاورت سلول‌های فتوولتائیک جریان دارد به عنوان انرژی مفید حمل می‌شود. عیب اصلی این روش اتصال حرارتی بین سلول فتوولتائیک

* نویسنده عهده دار مکاتبات: ameri_mm@uk.ac.ir



جاذب حرارتی از یکدیگر جدا می‌شوند و دمای عملیاتی دریافت‌کننده حرارتی می‌تواند به میزان قابل‌توجهی به بالاتر از دمای سلول‌های فتوولتاییک افزایش یابد. انواع مختلفی از فیلترهای طیفی شامل فیلترهای تداخلی، فیلترهای جذبی مایع، فیلتر هولوگرافیک، فیلتر پخشی، فیلتر فلورسنت و فیلتر فتوولتاییک در سیستم فتوولتاییک/حرارتی به‌صورت عددی یا آزمایشگاهی مورد مطالعه قرار گرفته‌اند. از بین این فیلترها، فیلترهای جذبی مایع معمولاً مقرون‌به‌صرفه هستند و می‌توانند به‌طور هم‌زمان به‌عنوان فیلتر جداکننده طیفی و مایع انتقال حرارت استفاده شوند. یکی از انواع فیلترهای طیفی مایع نانوسیالات هستند که می‌توان با تغییر ضخامت، غلظت، نوع، اندازه و شکل نانوذرات و نوع سیال پایه خواص نوری آن‌ها را تنظیم کرد.

جو و همکاران [۱] مروری جامع در زمینه سیستم‌های فتوولتاییک/حرارتی با متمرکزکننده را که از تکنولوژی تقسیم طیفی استفاده می‌کردند ارائه داده‌اند. آن‌ها مزایا و معایب فیلترهای طیفی مختلف را مقایسه کردند و راه‌های بهبود عملکرد این سیستم‌ها را بررسی نمودند. کریستومو و همکاران [۲] به‌کارگیری فیلترهای جذبی نانوسیالی را در سیستم فتوولتاییک/حرارتی با متمرکزکننده به‌صورت عددی و آزمایشگاهی بررسی کردند. آن‌ها از نانوسیال حاصل از پراکندن نانوذرات نقره با پوشش سیلیکون در آب به‌عنوان فیلتر طیفی استفاده کردند. میزان عبور نور از نانوسیال مورد مطالعه آن‌ها بسیار نزدیک به حالت ایده‌آل بود، اما برخی نورهای با طول‌موج کوتاه که مطلوب نبود را نیز عبور می‌داد. هجریلد و همکاران [۳] از نانودیسک‌های نقره با پوشش سیلیکون (برای جذب نور مرئی) و نانوذرات طلا (برای جذب نور فروسرخ) در آب به‌عنوان فیلتر طیفی در یک سیستم فتوولتاییک/حرارتی با متمرکزکننده استفاده کردند. آن‌ها نشان دادند که استفاده از فیلتر طیفی برای سلول‌های خورشیدی سیلیکونی و گالیوم آرسنیدی به دلیل باریک‌بودن قله طیفی بازده تبدیل آن‌ها مناسب است. هجریلد و همکاران در تحقیق دیگری [۴] پایداری نانوسیال نقره با پوشش سیلیکون در گلیسرول را به‌عنوان فیلتر طیفی در دمای بالا و اشعه ماوراءبنفش مورد آزمایش قرار دادند. آن‌ها نشان دادند که این نانوسیال در دمای بالا پایداری قابل‌قبولی دارد، اما با قرارگیری در معرض اشعه ماوراءبنفش، پایداری به‌شدت تنزل پیدا می‌کند. جین و جینگ [۵] نانوسیال حاصل از تعلیق نانوذرات اکسید آهن در سیال پایه آب-اتیلن گلیکول را ساخته

و به‌عنوان فیلتر طیفی مورد آزمایش قرار دادند. آن‌ها نشان دادند که این فیلتر در تابش اشعه ماوراءبنفش ثابت دارد، اما پایداری در دمای بالاتر از ۸۰ درجه سانتی‌گراد کاهش می‌یابد. برک [۶] و همکاران دو پیکربندی جدا شده (کانال‌های مجزا با نانوسیال به‌عنوان فیلتر و گلیسرول به‌عنوان خنک‌کننده) و متصل (کانال دوطرفه با نانوسیال به‌عنوان فیلتر و خنک‌کننده) از سیستم فتوولتاییک/حرارتی با متمرکزکننده را مدل‌سازی کردند. آن‌ها نشان دادند که سیستم جدا شده و سلول‌های خورشیدی گالیوم آرسنیدی منجر به بازده انرژی بیشتری در مقایسه با سیستم متصل و سلول‌های خورشیدی سیلیکونی می‌شوند. اتانیکار و همکاران [۷] یک سیستم فتوولتاییک/حرارتی با متمرکزکننده سهموی خطی را که از سلول‌های سیلیکونی ساخته شده بود و از نانوذرات طلا و اکسید ایندیوم قلع در دوراترم اس^۱ (سیال انتقال حرارت بر پایه سیلیکون) به‌عنوان فیلتر نوری استفاده می‌کرد آزمایش کردند. سیستم آزمایشی آن‌ها عملکرد پایین‌تری نسبت به نتایج عددی داشت که علت آن اتلافات نوری و حرارتی غیرمنتظره بیان شد. هازو و همکاران [۸] خواص نوری نانوسیال اکسید روی/آب و اکسید روی/گلیکول را به‌عنوان فیلتر طیفی در سیستم فتوولتاییک/حرارتی با استفاده از نظریه پراکندگی می^۲ همراه با روش ردیابی پرتو مونت کارلو^۳ مورد مطالعه قرار دادند. نتایج آن‌ها نشان داد که تغییر قطر و غلظت نانوذرات بر ضریب عبور طیفی نانوسیال در طول‌موج‌های فرابنفش-مرئی مؤثر است. دیو و همکاران [۹] استفاده از نانوسیال حاصل از تعلیق نانوذرات هسته-پوسته تیتانیوم اکسید-نقره در آب به‌عنوان فیلتر طیفی و پوشش شیشه‌ای آئروژل را در یک سیستم فتوولتاییک/حرارتی دارای متمرکزکننده به‌صورت عددی بررسی کردند و با سیستم فتوولتاییک/حرارتی معمولی مقایسه نمودند. سیستم مورد مطالعه آن‌ها به راندمان انرژی بالاتری با مقدار ۱۲/۴۶ درصد در مقایسه با سیستم فتوولتاییک/حرارتی معمولی و سیستم فتوولتاییک دست یافت. هی و همکاران [۱۰] با تعلیق نانوذرات هسته-پوسته نقره-تیتانیوم اکسید در محلول اتیلن گلیکول-آب و بررسی این نانوسیال به‌عنوان فیلتر طیفی نشان دادند که با افزایش غلظت نانوذرات در فیلتر طیفی، راندمان الکتریکی دچار کاهش می‌شود، درحالی‌که بازده حرارتی افزایش می‌یابد. هان و

1 Duratherm S

2 Mie scattering theory

3 Monte Carlo ray tracing (MCRT) method

به علت تمرکز تابش از اهمیت بیشتری برخوردار است. مهم‌تر از آن، شواهدی وجود دارد که توانایی مواد تغییرفازدهنده را در انتقال تابش خورشیدی نشان می‌دهد. مانز و همکاران [۱۴] با اندازه‌گیری میزان انتقال تابش ماده تغییرفازدهنده کلسیم کلرید هگزا هیدرات نشان دادند که این ماده بخش قابل توجهی از تشعشع در طیف مرئی و نزدیک مادون قرمز با طول موج کوتاه‌تر از ۱۴۰۰ نانومتر را در حالت مایع انتقال می‌دهد. بودی و شارما [۱۵] با انجام آزمایش‌هایی دریافتند که میزان انتقال تابش توسط ماده تغییرفازدهنده اسید استئاریک نسبت به یک نمونه شیشه‌ای با ضخامت یکسان بیشتر است. همچنین آن‌ها مشاهده کردند که با تغییر فاز اسید استئاریک از مایع به جامد، انتقال تابش کاهش می‌یابد و وقتی کاملاً جامد می‌شود به حداقل مقدار خود می‌رسد. گویا و همکاران [۱۶] خصوصیات نوری یک واحد دوجداره شیشه‌ای پر شده با ماده تغییرفازدهنده پارافین را برای استفاده در ساختمان اندازه‌گیری کردند. آن‌ها نشان دادند که مواد تغییرفازدهنده آلی به دلیل ساختار شیمیایی خود، انتقال تقریباً ثابتی در طیف تابش مرئی دارند و در طیف مادون قرمز رفتار انتخابی^۴ نشان می‌دهند. بر اساس مطالعات بیان شده و مطالعات مشابهی که وجود دارد می‌توان نتیجه گرفت که مواد تغییرفازدهنده قادرند به عنوان فیلتر طیفی در سیستم‌های فتوولتائیک/حرارتی به کار برده شوند. بنابراین، هدف از این پژوهش استفاده از ماده تغییرفازدهنده به عنوان بخشی از فیلتر طیفی در سیستم فتوولتائیک/حرارتی است که بر اساس مراجع موجود تاکنون مورد بررسی قرار نگرفته است. در مطالعه حاضر، مدل عددی جامعی برای یک سیستم فتوولتائیک/حرارتی با تمرکز تابش که دارای فیلتر طیفی متشکل از ماده تغییرفازدهنده و نانوسیال است، ارائه گردیده و عملکرد این سیستم از دیدگاه انرژی و انرژی با سیستم فتوولتائیک/حرارتی دارای فیلتر طیفی نانوسیالی و سیستم فتوولتائیک/حرارتی معمولی مقایسه شده است. در فیلتر طیفی ترکیبی پیشنهادی، نانوسیال برای جذب اشعه ماوراءبنفش و مرئی تابش خورشیدی و ماده تغییرفازدهنده برای جذب بخشی از تابش مادون قرمز استفاده می‌شود. فیلتر طیفی ترکیبی پیشنهادی قادر است که ما را هر چه بیشتر به فیلتر طیفی ایده‌آل نزدیک کند و در نتیجه باعث کاهش درجه حرارت فتوولتائیک، بهبود بیشتر در راندمان الکتریکی و افزایش طول عمر سلول‌های فتوولتائیک شود.

همکاران [۱۱] از نانوسیال حاصل از پراکندگی نقره در محلول کبالت سولفات به عنوان فیلتر طیفی در سیستم فتوولتائیک/حرارتی دارای تمرکز تابش استفاده کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که نانوسیال نقره/کبالت سولفات در طول موج‌های اشعه ماوراءبنفش و مرئی جذب بیشتری در مقایسه با نانوسیال نقره/آب دارد و به راندمان الکتریکی پایین‌تر و راندمان حرارتی بالاتری دست پیدا می‌کند.

در کنار استفاده از نانوسیالات چه به عنوان خنک‌کننده سلول‌های فتوولتائیک و چه به عنوان فیلتر طیفی، تحقیقات متعددی برای به کارگیری روش‌های خنک‌کننده منفعل^۱ صورت گرفته است. یکی از این روش‌ها استفاده از مواد تغییرفازدهنده^۲ است. مواد تغییر فازدهنده ترکیبات آلی یا معدنی هستند که قابلیت جذب و ذخیره مقادیر زیادی از انرژی را به صورت گرمای نهان در طی فرآیند تغییر فاز دارند. هدف از استفاده از مواد تغییرفازدهنده کاهش نوسانات حرارتی مایعات انتقال حرارت و ذخیره انرژی گرمایی برای تعادل بین عرضه و تقاضای انرژی است. در سیستم‌های انرژی خورشیدی، همیشه عدم تطابق بین عرضه و تقاضای انرژی وجود دارد، بنابراین ذخیره مؤثر انرژی می‌تواند به تأمین انرژی مداوم کمک کند. تحقیقات نشان داده است که سیستم‌های فتوولتائیک/حرارتی بر پایه مواد تغییرفازدهنده ۳۳ درصد (حداکثر ۵۰ درصد) پتانسیل ذخیره حرارت بیشتری نسبت به سیستم فتوولتائیک/حرارتی معمولی دارند و مدت زمان در دسترس بودن حرارت را حدود ۷۵ تا ۱۰۰ درصد افزایش می‌دهند. همچنین کاهش دمای فتوولتائیک در سیستم فتوولتائیک/حرارتی بر پایه مواد تغییرفازدهنده بیشتر از سیستم فتوولتائیک/حرارتی معمولی است [۱۲].

مطالعاتی که تاکنون در زمینه استفاده از مواد تغییرفازدهنده در سیستم‌های فتوولتائیک/حرارتی صورت گرفته بر ادغام یک لایه ماده تغییرفازدهنده یا استفاده از دوغاب^۳ ماده تغییرفازدهنده برای خنک کردن سلول‌های فتوولتائیک و ذخیره انرژی متمرکز شده‌اند [۱۳]. استفاده از ماده تغییرفازدهنده در سیستم‌های فتوولتائیک/حرارتی با متمرکزکننده دارای فیلتر طیفی چه به عنوان بخشی از واحد خنک‌کننده و چه به عنوان بخشی از واحد تقسیم طیفی، مورد بررسی قرار نگرفته است. اما به نظر می‌رسد ذخیره انرژی در این سیستم‌ها

1 Passive cooling

2 Phase Change Material (PCM)

3 Slurry

4 Selective behavior

به‌علاوه، انرژی حرارتی می‌تواند با استفاده از مواد تغییرفازدهنده به‌طور مؤثر ذخیره شود و در زمان‌هایی که تابش خورشید در دسترس نیست مورد استفاده قرار بگیرد.

۲- مدل‌سازی

۲-۱- معادلات حاکم

سه پیکربندی مختلف از سیستم فتوولتائیک/حرارتی تحت تابش متمرکز شامل الف) سیستم فتوولتائیک/حرارتی متداول، ب) سیستم دارای فیلتر طیفی نانوسیالی و ج) سیستم دارای فیلتر طیفی مرکب از نانوسیال و ماده تغییرفازدهنده در شکل ۱ نشان داده شده‌اند. برای مدل‌سازی، معادلات موازنه انرژی برای اجزای مختلف سیستم به‌جز ماده تغییرفازدهنده نوشته شده‌است. برای ماده تغییرفازدهنده از معادله هدایت حرارتی استفاده می‌شود.

فرضیات مورد استفاده برای مدل‌سازی عبارت‌اند از:

- انتقال حرارت یک‌بعدی و ناپایا است.

- ماده تغییرفازدهنده همگن و ایزوتروپیک است.

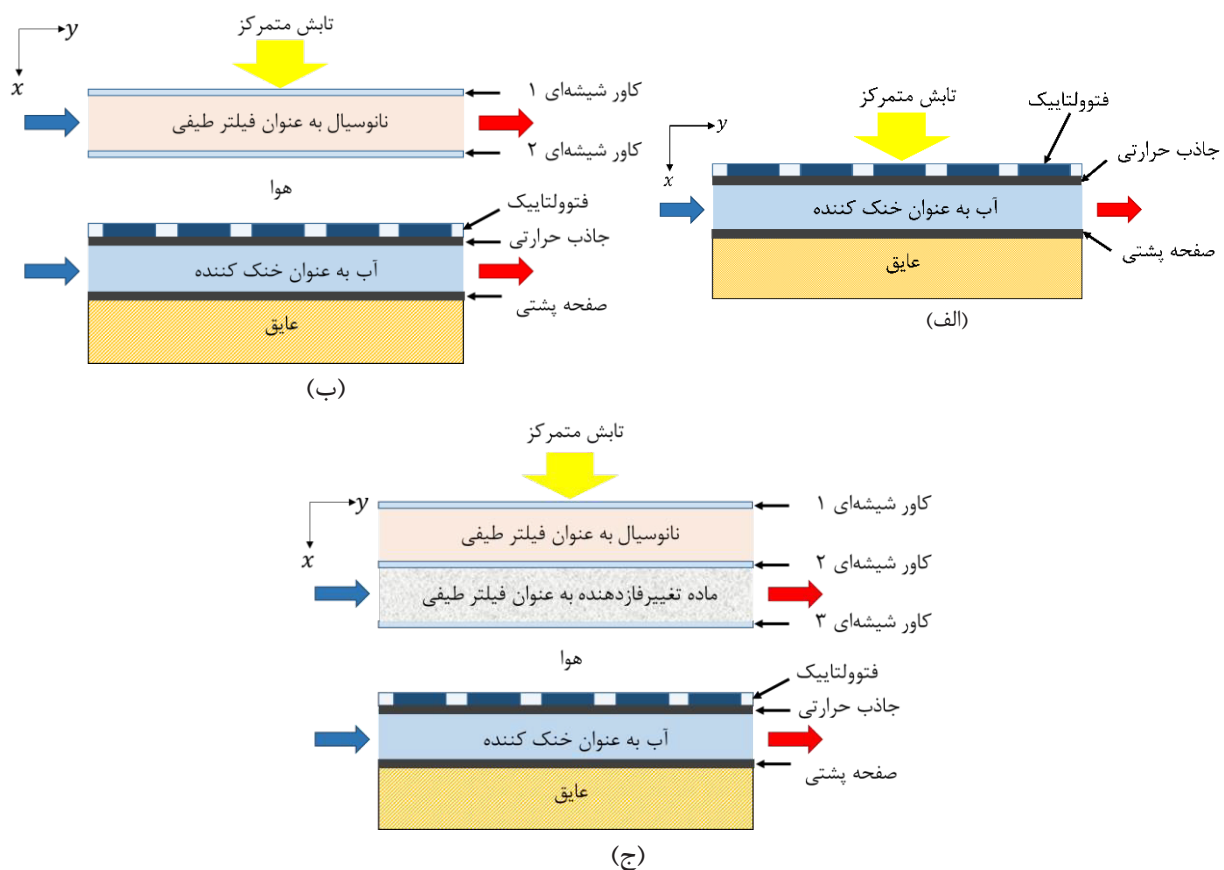
- از انتقال حرارت جابجایی درون لایه ماده تغییرفازدهنده صرف‌نظر شده‌است.

- از تبادل تابش بین سطوح شیشه‌ای کانال حاوی ماده تغییرفازدهنده و نانوسیال صرف‌نظر شده‌است.

- خواص ترموفیزیکی همه اجزا به‌جز نانوسیال و ماده تغییرفازدهنده مستقل از دما در نظر گرفته شده‌است.

- خواص حرارتی و نوری ماده تغییرفازدهنده با تغییر حالت آن، تغییر می‌کنند.

معادلات حاکم با توجه به فرضیات ذکر شده به‌صورت زیر نوشته می‌شوند.



شکل ۱. پیکربندی های الف) سیستم فتوولتائیک/حرارتی متداول، ب) سیستم فتوولتائیک/حرارتی دارای فیلتر طیفی نانوسیالی و ج) سیستم فتوولتائیک/حرارتی دارای فیلتر طیفی مرکب از نانوسیال و ماده تغییرفازدهنده

Fig. 1. (a) Conventional photovoltaic/thermal, (b) nanofluid based spectral splitting photovoltaic/thermal and (c) nanofluid/phase change material based spectral splitting photovoltaic/thermal configurations

فتوولتاییک، λ_g طول موج تابش خورشیدی متناظر با گاف انرژی سلول فتوولتاییک، e بار الکترون، QE_λ بازده کوانتومی طیفی، A' فاکتور دیود، C نسبت تمرکز و F_λ چگالی شار فوتون هستند. جاذب حرارتی:

$$\rho_{abs} c_{p,abs} \delta_{abs} \frac{\partial T_{abs}}{\partial t} = h_{cond,pv-abs} (T_{pv} - T_{abs}) + h_{c,cf-abs} (T_{cf} - T_{abs}) \quad (2)$$

که در آن زیرنویس cf نشان‌دهنده سیال خنک‌کن است. سیال خنک‌کننده:

$$\rho_{cf} c_{p,cf} \delta_{cf} \frac{\partial T_{cf}}{\partial t} = h_{c,cf-abs} (T_{abs} - T_{cf}) + h_{c,cf-bp} (T_{bp} - T_{cf}) - \frac{\dot{m}_{cf} c_{p,cf}}{w} \frac{dT_{cf}}{dy} \quad (3)$$

که در آن \dot{m} دبی جرمی، w عرض، h_c ضریب انتقال حرارت ترکیبی (هدایت و جابجایی حرارتی) و زیرنویس bp نشان‌دهنده صفحه فلزی پشتی است. صفحه فلزی

الف) سیستم فتوولتاییک/حرارتی معمولی
سلول‌های فتوولتاییک:

$$\rho_{pv} c_{p,pv} \delta_{pv} \frac{\partial T_{pv}}{\partial t} = C \alpha_{pv} (1 - \eta_{pv}^*) I_0 + (h_{rad,pv-s} + h_{conv,pv-a}) (T_a - T_{pv}) + h_{cond,pv-abs} (T_{abs} - T_{pv}) \quad (1)$$

در رابطه فوق، ρ چگالی، c_p ظرفیت گرمایی، δ ضخامت، T دما برحسب کلوین، t زمان، C نسبت تمرکز، α ضریب جذب تابش، η_{pv}^* بازده فتوولتاییک تنظیم‌شده، I_0 تابش خورشیدی دریافتی، h_{rad} ضریب انتقال حرارت تابشی، h_{conv} ضریب انتقال حرارت جابجایی، h_{cond} ضریب انتقال حرارت هدایتی و زیرنویس‌های abs و a به ترتیب نشان‌دهنده فتوولتاییک، آسمان، هوای اطراف و جاذب هستند. نحوه محاسبه بازده فتوولتاییک تنظیم‌شده (η_{pv}^*) در جدول ۱ به اختصار ارائه شده است.

در روابط ارائه‌شده در جدول ۱، K' ، m و n پارامترهای تجربی هستند و به ترتیب ۰/۰۳، ۱/۱۵ و ۰/۹۶ در نظر گرفته شده‌اند. پارامترهای T دمای سلول، k_B ثابت بولتزمن، E_g گاف انرژی سلول

جدول ۱. معادلات حاکم برای مدل‌سازی الکتریکی [۱۷، ۱۸]

Table 1. Governing equations for electrical modeling [18, 17]

گام	پارامتر محاسبه‌شده	رابطه
۱	چگالی جریان اشباع تاریک (J_{00})	$J_{00} = K' T^{3/n} \exp\left(\frac{-E_g}{m k_B T}\right)$
۲	چگالی جریان اتصال کوتاه (J_{sc})	$J_{sc} = \int_{280}^{\lambda_g} e Q E_\lambda \tau_\lambda F_\lambda d\lambda$
۳	ولتاژ مدار باز (V_{oc})	$V_{oc} = \frac{A' k_B T}{e} \ln\left(\frac{C J_{sc}}{J_{00}} + 1\right)$
۴	ولتاژ نقطه حداکثر توان (V_m)	$\exp\left(\frac{e V_m}{k_B T}\right) \left(1 + \frac{e V_m}{k_B T}\right) = \frac{C J_{sc}}{J_{00}} + 1$
۵	ضریب پری (FF)	$FF = \frac{V_m}{V_{oc}} \left[1 - \frac{\exp\left(\frac{e V_m}{k_B T}\right) - 1}{\exp\left(\frac{e V_{oc}}{k_B T}\right) - 1} \right]$
۶	بازده فتوولتاییک (η_{pv})	$\eta_{pv} = \frac{V_{oc} J_{sc} FF}{I}$
۷	بازده فتوولتاییک تنظیم‌شده (η_{pv}^*)	$\eta_{pv}^* = \frac{V_{oc} J_{sc} FF}{I \tau_{g1} \tau_{of} \tau_{g2} \tau_{pcm} \tau_{g3}}$

معادلات حاکم بر کاور شیشه‌ای (۱) و نانوسیال به ترتیب مشابه با روابط (۶) تا (۷) هستند.
 • کاور شیشه‌ای ۲:

$$\rho_{g2} c_{p,g2} \delta_{g2} \frac{\partial T_{g2}}{\partial t} = C \tau_{g,1} \tau_{of} \alpha_{g,2} I_0 + h_{c,of-g2} (T_{of} - T_{g2}) + h_{cond,pcm-g2} (T_{pcm} - T_{g2}) \quad (10)$$

در رابطه فوق، زیرنویس pcm نشان دهنده ماده تغییر فاز دهنده است.

• ماده تغییر فاز دهنده (فیلتر طیفی)

$$\rho_{pcm} c_{p,pcm} \frac{\partial T_{pcm}}{\partial t} = k_{pcm} \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} - \frac{\partial I}{\partial x} \quad (11)$$

در رابطه (۱۱)، k هدایت حرارتی و I تابش خورشید است.
 • کاور شیشه‌ای ۳:

$$\rho_{g3} c_{p,g3} \delta_{g3} \frac{\partial T_{g3}}{\partial t} = C \tau_{g,1} \tau_{of} \tau_{g,2} \tau_{pcm} \alpha_{g,3} I_0 + h_{cond,pcm-g3} (T_{pcm} - T_{g3}) + (h_{rad,pv-g3} + h_{conv,pv-g3}) (T_{pv} - T_{g3}) \quad (12)$$

که در آن، $g3$ نشان دهنده کاور شیشه‌ای ۳ است.
 • سلول‌های فتوولتائیک:

$$\rho_{pv} c_{p,pv} \delta_{pv} \frac{\partial T_{pv}}{\partial t} = C \tau_{g,1} \tau_{of} \tau_{g,2} \tau_{pcm} \tau_{g,3} \alpha_{pv} (1 - \eta_{pv}^*) I_0 + (h_{rad,pv-g3} + h_{conv,pv-g3}) (T_{g3} - T_{pv}) + h_{cond,pv-abs} (T_{abs} - T_{pv}) \quad (13)$$

معادلات حاکم بر جاذب حرارتی، سیال خنک‌کننده، صفحه فلزی پشتی و عایق در این پیکربندی نیز به ترتیب مشابه با روابط (۲) تا (۵) هستند. نحوه محاسبه ضرایب انتقال حرارت مورد استفاده در روابط (۱) تا (۱۳) در جدول ۲ ارائه شده است.

برای حل معادلات دیفرانسیل حاکم بر اجزای هر یک از پیکربندی‌های مورد مطالعه در این مقاله، از روش تفاضل محدود استفاده شده است و شبیه‌سازی با استفاده از نرم‌افزار MATLAB صورت گرفته است. الگوریتم حل مساله در شکل ۲ نشان داده شده است. پارامترهای مورد استفاده برای مدل‌سازی در جدول ۳ ارائه شده است.

در روابط ارائه شده در جدول ۲، عدد ناسلت (Nu) برای جریان سیال و لایه هوا به ترتیب به صورت زیر محاسبه می‌شوند [۲۱-۲۳]:

$$\rho_{bp} c_{p,bp} \delta_{bp} \frac{\partial T_{bp}}{\partial t} = h_{c,cf-bp} (T_{cf} - T_{bp}) + h_{cond,bp-i} (T_i - T_{bp}) \quad (4)$$

در رابطه (۴)، زیرنویس i نشان دهنده عایق است.
 • عایق:

$$\rho_i c_{p,i} \delta_i \frac{\partial T_i}{\partial t} = h_{cond,bp-i} (T_{bp} - T_i) + h_{c,i-a} (T_i - T_a) \quad (5)$$

ب) سیستم فتوولتائیک/حرارتی با فیلتر طیفی نانوسیالی
 • کاور شیشه‌ای ۱:

$$\rho_{g1} c_{p,g1} \delta_{g1} \frac{\partial T_{g1}}{\partial t} = C \alpha_{g,1} I_0 + (h_{conv,g1-a} + h_{rad,g1-s}) (T_a - T_{g1}) + h_{c,of-g1} (T_{of} - T_{g1}) \quad (6)$$

در رابطه فوق، زیرنویس $g1$ نشان دهنده کاور شیشه‌ای ۱ و of نشان دهنده فیلتر طیفی مایع (نانوسیال) است.
 • نانوسیال (فیلتر طیفی)

$$\rho_{of} c_{p,of} \delta_{of} \frac{\partial T_{of}}{\partial t} = C \tau_{g,1} \alpha_{of} I_0 + h_{c,of-g1} (T_{g1} - T_{of}) + h_{c,of-g2} (T_{g2} - T_{of}) - \frac{\dot{m} c_{p,of}}{w} \frac{dT_{of}}{dy} \quad (7)$$

که در آن، τ ضریب عبور تابش و زیرنویس $g2$ نشان دهنده کاور شیشه‌ای ۲ است.
 • کاور شیشه‌ای ۲:

$$\rho_{g2} c_{p,g2} \delta_{g2} \frac{\partial T_{g2}}{\partial t} = C \tau_{g,1} \tau_{of} \alpha_{g,2} I_0 + h_{c,of-g2} (T_{of} - T_{g2}) + (h_{rad,pv-g2} + h_{conv,pv-g2}) (T_{pv} - T_{g2}) \quad (8)$$

• سلول‌های فتوولتائیک:

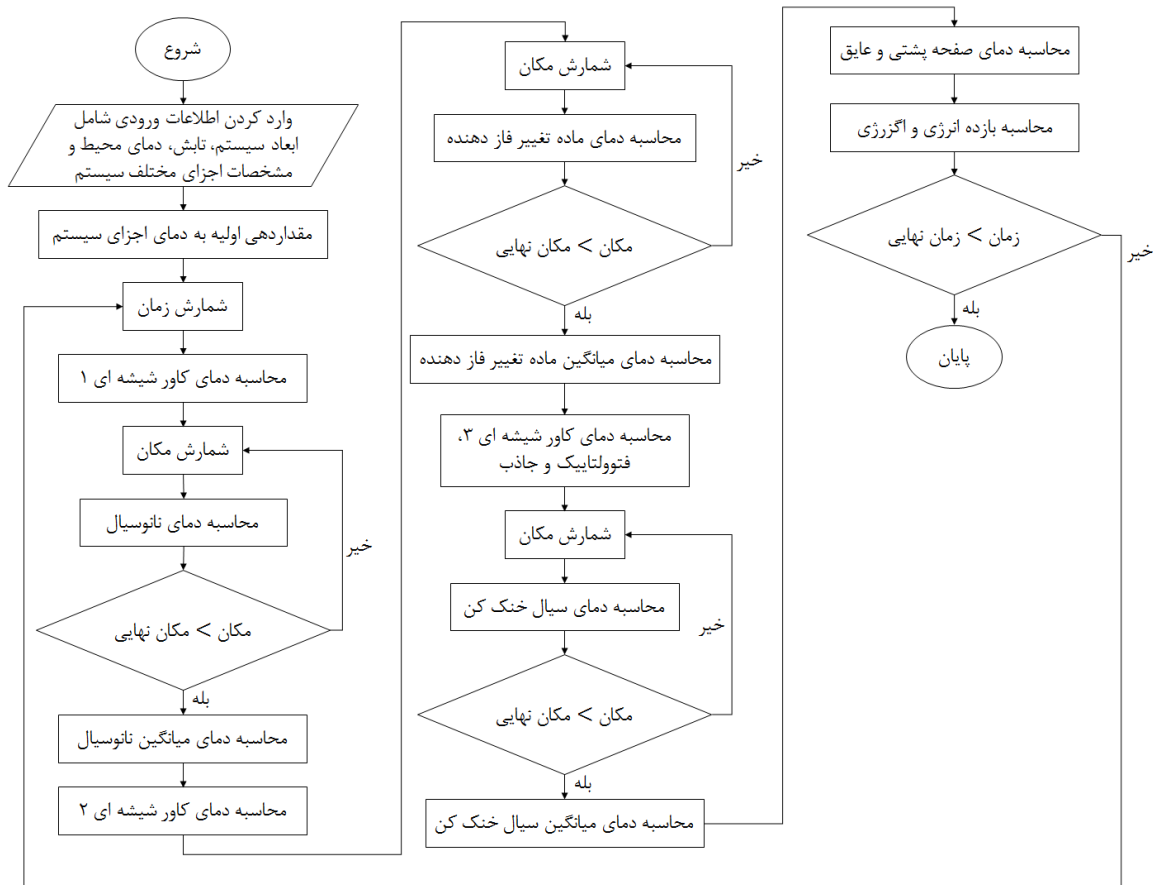
$$\rho_{pv} c_{p,pv} \delta_{pv} \frac{\partial T_{pv}}{\partial t} = C \tau_{g,1} \tau_{of} \tau_{g,2} \alpha_{pv} (1 - \eta_{pv}^*) I_0 + (h_{rad,pv-g2} + h_{conv,pv-g2}) (T_{g2} - T_{pv}) + h_{cond,pv-abs} (T_{abs} - T_{pv}) \quad (9)$$

معادلات حاکم بر جاذب حرارتی، سیال خنک‌کننده، صفحه فلزی پشتی و عایق به ترتیب مشابه با روابط (۲) تا (۵) یعنی معادلات بیان شده برای اجزای نظیر در سیستم فتوولتائیک/حرارتی معمولی هستند.

ج) سیستم فتوولتائیک/حرارتی با فیلتر طیفی ترکیبی

جدول ۲. روابط مورد استفاده برای محاسبه ضرایب انتقال حرارت [۲۰، ۱۹]
 Table 2. Relations used for evaluating heat transfer coefficients [20, 19]

رابطه	ضریب انتقال حرارت
$h_{c,g(i)-a} = \frac{1}{\frac{\delta_{g(i)}}{2k_{g(i)}} + \frac{1}{h_{wind}}}$	انتقال حرارت ترکیبی جابجایی و هدایت بین کاور شیشه‌ای (یا عایق) و هوا
$h_{wind} = 3v_w + 2.8$	انتقال حرارت جابجایی در اثر وزش باد
$h_{rad,g-s} = \frac{\epsilon_g \sigma (T_g^4 - T_s^4)}{(T_g - T_a)}$	انتقال حرارت تابشی بین کاور شیشه‌ای ۱ و آسمان
$h_{conv,of(cf)-g(abs,bp)} = \frac{Nu_f k_f}{\delta_f}$	انتقال حرارت جابجایی فیلتر طیفی (نانوسیال) یا سیال خنک‌کن با جدار شیشه‌ای یا جدار فلزی
$h_{r,g-pv} = \frac{\sigma (T_g^2 + T_{pv}^2)(T_g + T_{pv})}{\left(\frac{1}{\epsilon_g} + \frac{1}{\epsilon_{pv}} - 1\right)}$	انتقال حرارت تابشی بین فتوولتائیک و کاور شیشه‌ای
$h_{conv,pv-g} = \frac{Nu_a k_a}{\delta_a}$	انتقال حرارت جابجایی در لایه هوا میان فتوولتائیک و کاور شیشه‌ای
$h_{cond} = \frac{2k}{\delta}$	انتقال حرارت هدایتی در هر یک از اجزا



شکل ۲. الگوریتم حل مساله
 Fig. 2. Problem-solving algorithm

جدول ۳. پارامترهای مورد استفاده برای مدل‌سازی
Table 3. Parameters used in the simulation

واحد	مقدار	پارامتر	جزء
mm	۳	ضخامت	کاور شیشه‌ای
kg/m ³	۲۵۰۰	چگالی	
J/kg.K	۸۴۰	ظرفیت گرمایی ویژه	
W/m.K	۰/۹۶	رسانایی حرارتی	
-	۰/۹	ضریب گسیل	
-	۰/۹۵	ضریب عبور	
mm	۱۰	ضخامت	ماده تغییر فاز دهنده
kg/m ³	جامد: ۱۷۰۰، مایع: ۱۵۳۰	چگالی	
J/kg.K	جامد: ۱۵۰۰، مایع: ۲۲۲۰	ظرفیت گرمایی ویژه	
W/m.K	جامد: ۰/۷۹، مایع: ۰/۴۸	رسانایی حرارتی	
kJ/kg	۱۹۰	گرمای ویژه	
°C	۲۷	دمای ذوب	
mm	۱۰	ضخامت	نانوسیال به عنوان فیلتر طیفی
vol%	۰/۰۰۵	غلظت	
kg/s	۰/۰۰۳	دبی جرمی	
µm	۵۰۰	ضخامت	فتوولتاییک
kg/m ³	۲۳۲۰	چگالی	
J/kg.K	۶۷۸	ظرفیت گرمایی ویژه	
W/m.K	۱۰۰	رسانایی حرارتی	
-	۰/۹	ضریب گسیل	
-	۰/۹۵	ضریب جذب	
mm	۲	ضخامت	جاذب و صفحه پشتی
kg/m ³	۲۶۹۸	چگالی	
J/kg.K	۹۲۱	ظرفیت گرمایی ویژه	
W/m.K	۲۲۶	رسانایی حرارتی	
mm	۱۰	ضخامت	آب به عنوان خنک‌کن
kg/s	۰/۰۱	دبی جرمی	
mm	۳۰	ضخامت	عایق
kg/m ³	۳۰	چگالی	
J/kg.K	۸۰۰	ظرفیت گرمایی ویژه	
W/m.K	۰/۰۳	رسانایی حرارتی	
W/m ²	۸۰۰	تابش خورشید	سایر
°C	۲۳	دمای محیط	
-	۰/۸	بازده پمپ	
m	۱	طول سیستم	
m	۰/۱	عرض سیستم	
mm	۲۵	فاصله فیلتر طیفی و فتوولتاییک	

در رابطه (۱۷)، $c_{p,m}$ ماکزیمم ظرفیت حرارتی است که در دمای $T_{pcm,m}$ رخ می‌دهد و از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$c_{p,m} = c_{p,s} \frac{T_{pcm,l} - T_{pcm,m}}{T_{pcm,l} - T_{pcm,s}} + c_{p,l} \frac{T_{pcm,m} - T_{pcm,s}}{T_{pcm,l} - T_{pcm,s}} + \frac{2h_{pcm}}{T_{pcm,l} - T_{pcm,s}} \quad (18)$$

در رابطه (۱۸)، h_{pcm} گرمای نهان ماده تغییرازدهنده است.

۳-۲- خواص نوری ماده تغییرازدهنده

با داشتن تغییرات شاخص انکساری (ضریب شکست) و شاخص خاموشی ماده تغییرازدهنده در طول موج‌های مختلف می‌توان میزان جذب و عبور ماده تغییرازدهنده را در حالت جامد و مایع به‌دست آورد. زمانی که ماده تغییرازدهنده در حالت مایع قرار دارد ضریب جذب و عبور تابش توسط روابط (۱۹) و (۲۰) به‌دست می‌آید [۲۶، ۲۷]:

$$\tau_{\lambda, pcm} = \frac{(1-r_{g-pcm})(1-r_{pcm-g})t_{pcm}}{1-r_{g-pcm}r_{pcm-g}t_{pcm}^2} \quad (19)$$

$$\alpha_{\lambda, pcm} = \frac{(1-r_{g-pcm})(1+r_{pcm-g}t_{pcm})(1-t_{pcm})}{1-r_{g-pcm}r_{pcm-g}t_{pcm}^2} \quad (20)$$

که در آن بازتاب در سطح اتصال ماده i و j و t_i میزان عبور از ماده i هستند [۲۶، ۲۷]:

$$r_{i-j} = r_{j-i} = \frac{(n_i - n_j)^2 + (\kappa_i - \kappa_j)^2}{(n_i + n_j)^2 + (\kappa_i + \kappa_j)^2} \quad (21)$$

$$t_i = \exp\left(-\frac{4\pi\kappa_i\delta_i}{\lambda}\right) \quad (22)$$

در روابط فوق، n شاخص انکساری، κ شاخص خاموشی و λ طول موج است. محاسبه ضریب جذب و عبور در حالت جامد کمی پیچیده‌تر است. وینلدر [۲۸] ضریب پراکندگی سه نوع ماده تغییرازدهنده را با انجام آزمایش‌هایی به‌دست آورد و با حل معادله انتقال حرارت تابشی روابط زیر را برای ماده تغییرازدهنده در حالت جامد ارائه کرد:

$$\tau_{\lambda, pcm} = \frac{(1-r_{g-pcm})(1-r_{pcm-g})e^{-\chi\delta_{pcm}}}{1-r_{g-pcm}r_{pcm-g}e^{-2\chi\delta_{pcm}}} + \frac{1-r_d^{g-pcm}}{1-t_d^2 r_d^{g-pcm} r_d^{g-a}} I_d(\chi, +1) \quad (23)$$

$$Nu_f = \begin{cases} Nu_{of} = 7.55 + \frac{0.024 \left(\frac{L}{RePrD_h}\right)^{-1.14}}{1 + 0.0358 \left(\frac{L}{RePrD_h}\right)^{-0.64} Pr^{0.17}} & Re \leq 2300 \\ Nu_{of} = \frac{(f/8)(Re-1000)Pr}{1 + 12.7(f/8)^{1/2}(Pr^{2/3}-1)} & Re > 2300 \end{cases} \quad (14)$$

$$Nu_a = 1 + 1.44 \left[1 - \frac{1708}{Ra \cos\theta}\right]^+ \left[1 - \frac{1708(\sin 1.8\theta)^{1.6}}{Ra \cos\theta}\right]^+ \left[\left(\frac{Ra \cos\theta}{5830}\right)^{1/3} - 1\right]^+ \quad (15)$$

در روابط (۱۴) و (۱۵)، Re عدد رینولدز، Pr عدد پرانتل، D_h قطر هیدرولیکی کانال جریان، L طول کانال، Ra عدد رایلی و θ شیب هستند.

۲-۲- خواص ترموفیزیکی ماده تغییرازدهنده

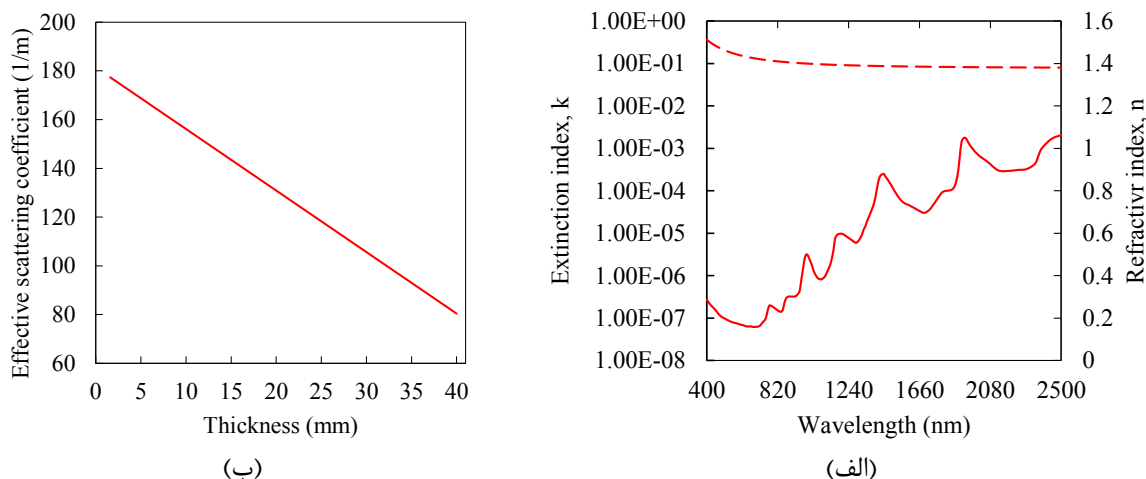
خواص فیزیکی و ترموفیزیکی مواد تغییرازدهنده با تغییر فاز دچار تغییر می‌شوند. بنابراین نیاز به روابطی برای مدل کردن خواص قبل و بعد از تغییر فاز داریم.
چگالی و رسانایی حرارتی [۲۴]

$$k = \begin{cases} k_s & \text{if } T_{pcm} \leq T_{pcm,s} \\ k_s + (k_l - k_s) \frac{(T_{pcm} - T_{pcm,s})}{(T_{pcm,l} - T_{pcm,s})} & \text{if } T_{pcm,s} < T_{pcm} < T_{pcm,l} \\ k_l & \text{if } T_{pcm} \geq T_{pcm,l} \end{cases} \quad (16)$$

رابطه چگالی نیز دقیقاً همانند رابطه (۱۶) است با این تفاوت که رسانایی حرارتی با چگالی جایگزین می‌شود.

• ظرفیت حرارتی ویژه [۲۵]

$$c_p = \begin{cases} c_{p,s} & \text{if } T_{pcm} \leq T_{pcm,s} \\ c_{p,s} + \frac{(c_{p,m} - c_{p,s})}{(T_{pcm,m} - T_{pcm,s})} (T_{pcm} - T_{pcm,s}) & \text{if } T_{pcm,s} < T_{pcm} \leq T_{pcm,m} \\ c_{p,l} + \frac{(c_{p,m} - c_{p,l})}{(T_{pcm,l} - T_{pcm,m})} (T_{pcm,l} - T_{pcm,m}) & \text{if } T_{pcm,m} < T_{pcm} < T_{pcm,l} \\ c_{p,l} & \text{if } T_{pcm} \geq T_{pcm,l} \end{cases} \quad (17)$$



شکل ۳. ثوابت نوری ماده تغییرفازدهنده کلسیم کلریدهگزاهیدرات. (الف) شاخص‌های انکساری و خاموشی و (ب) ضریب پراکندگی [۲۸]
Fig. 3. Optical constants of Calcium Chloride Hexahydrate. (a) refractive and extinction indices and (b) scattering coefficient [28]

می‌شود [۲۸]:

$$K = \frac{3}{2} \sqrt{\frac{1-\omega}{1-\omega/4}} \quad (28)$$

$$\alpha_{\lambda, pcm} = \frac{(1-r_{g-pcm})(1+r_{pcm-g}e^{-\chi\delta_{pcm}})(1-e^{-\chi\delta_{pcm}})}{1-r_{g-pcm}r_{pcm-g}e^{-2\chi\delta_{pcm}}} + (1-e^{-\chi\delta_{pcm}})(I_d(0,+1) + I_{d,-1}(\chi,-1)) \quad (24)$$

در این پژوهش، ماده تغییرفازدهنده غیرآلی کلسیم کلریدهگزاهیدرات ($\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) مورد بررسی قرار گرفته‌است و شاخص انکساری، شاخص خاموشی و ضریب پراکندگی آن در شکل ۳ نشان داده شده‌اند.

که در آن χ عمق نوری^۱ ماده تغییرفازدهنده، r_d^{i-j} بازتاب تابش پراکنده^۲ در سطح اتصال ماده i و j و I_d تابش پراکنده است، که به ترتیب با استفاده از روابط (۲۵) تا (۲۷) به دست می‌آیند [۲۸-۳۰]:

$$\chi = \left(\sigma_s + \frac{4\pi\kappa_{pcm}}{\lambda} \right) \delta_{pcm} \quad (25)$$

$$r_d^{i-j} = \frac{1}{2} + \frac{(m-1)(3m+1)}{6(m+1)^2} + \frac{m^2(m^2-1)^2}{(m^2+1)^3} \ln\left(\frac{m-1}{m+1}\right) - \frac{2m^3(m^2+2m-1)}{(m^2+1)(m^4-1)} + \frac{8m^4(m^4+1)}{(m^2+1)(m^4-1)^2} \ln(m) \quad (26)$$

$$I_d(\chi, \mu_i) = \frac{5\omega\tau_g I_0(1-\rho_{g-pcm})}{32-8\omega} \left[\frac{\alpha}{1-\mu_i K} e^{-K\chi} + \frac{\beta}{1+\mu_i K} e^{K\chi} + \frac{e^{-\chi}}{1-\mu_i} \right] \quad (27)$$

۲-۴- خواص نوری نانوسیال

در این پژوهش از نانوسیال نقره/آب به‌عنوان فیلتر طیفی نانوسیالی استفاده شده‌است. نانوسیال با غلظت ۰/۰۵ درصد وزنی شامل نانوذرات نقره با قطر ۱۰ نانومتر در نظر گرفته شده‌است. برای محاسبه خواص نوری این نانوسیال از تخمین پراکندگی رایلی^۴ استفاده شده‌است. این روش زمانی قابل استفاده است که ذرات بسیار کوچک (کوچک‌تر از ۱۰۰ نانومتر) هستند. بر این اساس ضریب انقراض نانوذرات از رابطه زیر محاسبه می‌شود [۳۱، ۳۲]:

پارامتر σ_s در رابطه (۲۵) ضریب پراکندگی است. پارامتر m در رابطه (۲۶) نسبت شاخص انکساری بزرگ‌تر به شاخص انکساری کوچک‌تر دو لایه مجاور i و j است. در رابطه (۲۷)، ω تک پراکندگی آلبودو^۳ و μ_i کسینوس‌های جهتی هستند. ثوابت α و β با استفاده از شرایط مرزی به دست می‌آیند و پارامتر K به‌صورت زیر محاسبه

$$\beta_{np} = \frac{6\pi\phi}{\lambda} \text{Im} \left\{ \frac{m^2-1}{m^2+2} \left[1 + \frac{\pi^2 d_{np}^2}{15\lambda^2} \left(\frac{m^2-1}{m^2+2} \right) \times \right] \right\} + \frac{4\pi^4 d_{np}^3 \phi}{\lambda^4} \left| \frac{m^2-1}{m^2+2} \right|^2 \quad (29)$$

- 1 Optical depth
- 2 Diffuse
- 3 Single-scattering albedo

4 Rayleigh scattering approximation

$$\dot{E}_{th} = \frac{\dot{E}x_{th}}{\dot{E}x_{sun}} = \frac{\dot{m}c_p \left[(T_{f,out} - T_{f,in}) - T_a \ln\left(\frac{T_{f,out}}{T_{f,in}}\right) \right]}{\left[1 + \frac{1}{3} \left(\frac{T_a}{T_{sun}} \right)^4 - \frac{4T_a}{3T_{sun}} \right] CAI} \quad (37)$$

$$\dot{E}_{ele} = \frac{\dot{E}x_{ele}}{\dot{E}x_{sun}} = \frac{CAI\eta_{pv} - P_{pump}}{\left[1 + \frac{1}{3} \left(\frac{T_a}{T_{sun}} \right)^4 - \frac{4T_a}{3T_{sun}} \right] CAI} \quad (38)$$

$$\dot{E}_{tot} = \dot{E}_{th} + \dot{E}_{ele} \quad (39)$$

در سیستم‌های دارای فیلتر طیفی بازده حرارتی از مجموع بازده حرارتی واحد فیلتر طیفی و واحد خنک‌کن به‌دست می‌آید. اگزرژی تلف‌شده مجموع اگزرژی تلف‌شده حرارتی و اگزرژی تلف‌شده ناشی از اصطکاک در کانال‌های جریان است که از روابط زیر به‌دست می‌آیند [۳۷]:

$$\dot{E}x_{loss,th} = \dot{E}x_{sun} - \dot{E}x_{th} - \dot{E}x_{ele} \quad (40)$$

$$\dot{E}x_{loss,fr} = \frac{\dot{m} T_a \ln\left(\frac{T_{f,out}}{T_{f,in}}\right)}{\rho(T_{f,out} - T_{f,in})} \Delta P \quad (41)$$

$$\dot{E}x_{loss,tot} = \dot{E}x_{loss,th} + \dot{E}x_{loss,fr} \quad (42)$$

در رابطه (۴۱)، ΔP افت هد فشاری است. اگزرژی حرارتی در سیستم‌های دارای فیلتر طیفی نیز از مجموع اگزرژی حرارتی واحد فیلتر طیفی و واحد خنک‌کن به‌دست می‌آید.

۳- اعتبارسنجی

۳-۱- اعتبارسنجی مدل ارائه‌شده برای خواص نوری ماده تغییرافزنده و نانوسیال

ضریب عبور ماده تغییرافزنده کلسیم کلرید هگزاهیدرات با ضخامت یک سانتی‌متر در طول موج‌های مختلف با استفاده از مدل ارائه‌شده در بخش ۳-۲ مدل‌سازی شد و با نتایج تجربی وینلدر [۲۸] برای حالت جامد و مانز و همکاران [۱۴] برای حالت مایع ماده تغییرافزنده مقایسه گردید (شکل ۴). همان‌طور که در شکل

که در آن ϕ کسر حجمی نانوذرات، d_{np} قطر میانگین نانوذرات و m نسبت شاخص انکساری مختلط نانوذرات به شاخص انکساری مختلط سیال پایه است. در ضریب خاموشی سیالات پایه خالص مانند آب بخش مربوط به پراکندگی قابل صرف‌نظر است و می‌توان نوشت [۳۳]:

$$\beta_{bf} = \frac{4\pi\kappa_{bf}}{\lambda} \quad (30)$$

ضریب خاموشی کل نانوسیال از جمع ضرایب خاموشی نانوذرات و سیال پایه حاصل می‌شود [۳۴]:

$$\beta_{nf} = \beta_{np} + \beta_{bf} \quad (31)$$

ضریب عبور طیفی نانوسیال با استفاده از قانون بیر-لامبرت از رابطه (۳۲) قابل محاسبه است [۳۲]:

$$\tau_{\lambda,nf} = e^{-\beta_{nf}\delta_{nf}} \quad (32)$$

در نهایت ضریب عبور کل نانوسیال و یا ماده تغییرافزنده می‌توان به شکل زیر به دست آورد [۳۱]:

$$\tau = \frac{\int_{250nm}^{2500nm} \tau_{\lambda} I_{\lambda} d\lambda}{\int_{250nm}^{2500nm} I_{\lambda} d\lambda} \quad (33)$$

۵-۲- محاسبه عملکرد سیستم از دیدگاه انرژی و اگزرژی

برای بررسی و مقایسه عملکرد سیستم‌های مورد بررسی از بازده انرژی و اگزرژی استفاده شده است. بازده انرژی حرارتی، الکتریکی و کلی از روابط زیر به‌دست می‌آیند [۳۵]:

$$\eta_{th} = \frac{\dot{m}c_p(T_{f,out} - T_{f,in})}{CAI} \quad (34)$$

$$\eta_{ele} = \eta_{pv} - \frac{P_{pump}}{CAI} \quad (35)$$

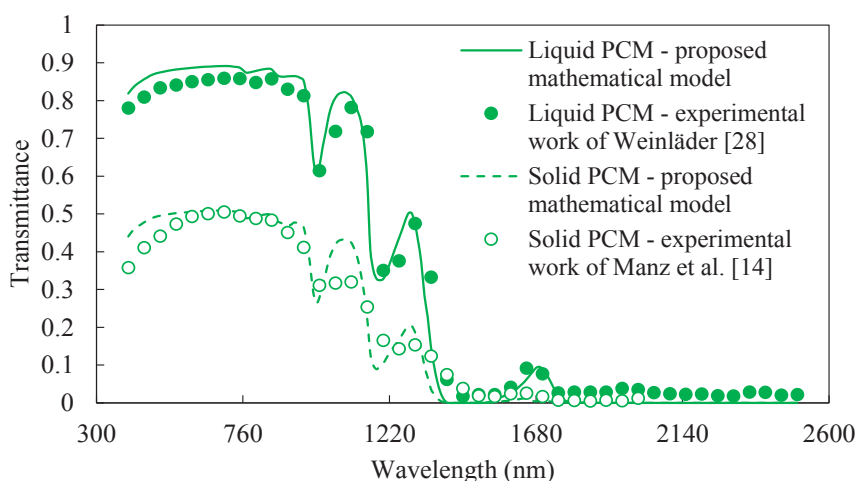
$$\eta_{tot} = \eta_{th} + \eta_{ele} \quad (36)$$

و بازده اگزرژی حرارتی، الکتریکی و کلی به ترتیب از روابط (۳۷) تا (۳۹) محاسبه می‌گردند [۳۵، ۳۶].

طول موج‌های مختلف با استفاده از مدل ارائه شده در بخش ۴-۲ محاسبه شد و با نتایج تجربی هان و همکاران [۱۱] در شکل ۵ مقایسه گردید. با توجه به شکل ۵، نتایج عددی پژوهش حاضر در طول موج‌های بزرگتر از ۴۰۰ نانومتر تطابق بسیار مناسبی با نتایج تجربی هان و همکاران [۱۱] دارد، اما شاهد خطای نسبتاً زیادی در طول موج‌های کمتر از ۴۰۰ نانومتر هستیم. این مسئله می‌تواند ناشی از به‌کارگیری تخمین پراکندگی رایلی باشد. در این تخمین باید اندازه نانوذره بسیار کوچکتر از طول موج برخوردی باشد و در نتیجه هر چه طول موج بزرگتر باشد، خطای تخمین پراکندگی رایلی کمتر خواهد بود. با این حال، به دلیل چگالی کم تابش خورشیدی در طول موج‌های کمتر از ۴۰۰ نانومتر این میزان خطا قابل صرف نظر است.

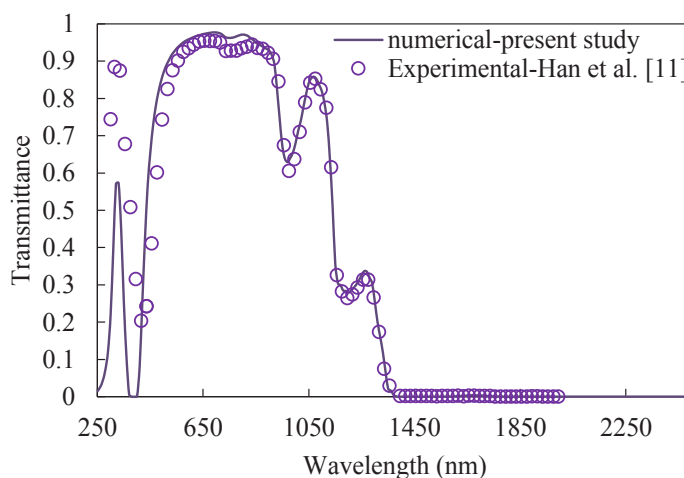
۴ مشخص است، تطابق خوبی بین نتایج تجربی و نتایج حاصل از مدل‌سازی حاضر برای حالت مایع ماده تغییرفازدهنده وجود دارد که صحت مدل ارائه شده را در این حالت نشان می‌دهد. برای ماده تغییرفازدهنده جامد در برخی از طول موج‌ها خطای بیشتری مشاهده می‌شود. این خطا می‌تواند به دلیل صرف نظر کردن از تغییرات ضریب پراکندگی با طول موج و یا همگن و ایزوتروپیک فرض کردن ماده تغییرفازدهنده باشد. البته میزان خطای موجود با در نظر گرفتن گستره طول موجی قابل صرف نظر است و میانگین خطا در حدود ۵ درصد می‌باشد.

همچنین تغییرات ضریب عبور نانوسیال نقره/آب با غلظت ۰/۰۵ درصد وزنی، قطر نانوذرات ۱۰ نانومتر و ضخامت یک سانتی‌متر در



شکل ۴. ضریب عبور ماده تغییرفازدهنده کلسیم کلراید هگزاآهیدرات با ضخامت یک سانتی‌متر در حالت جامد و مایع.

Fig. 4. The transmittance of 1cm thickness of Calcium Chloride Hexahydrate in liquid and solid states



شکل ۵. ضریب عبور نانوسیال نقره/آب با ضخامت یک سانتی متر

Fig. 5. The transmittance of the Ag/Water nanofluid with 1 cm thickness

می‌دهد. با توجه به جدول ۵، حداکثر خطا ۴ درصد است که می‌تواند ناشی از فرضیاتی همچون انتقال حرارت یک‌بعدی، صرف‌نظر کردن از تبادل تابش بین سطوح شیشه‌ای و مستقل از دما در نظر گرفتن خصوصیات ترموفیزیکی برخی از اجزای سیستم باشد. همچنین، از آنجایی که تاکنون استفاده از مواد تغییرفازدهنده به‌عنوان فیلتر طیفی در سیستم‌های فتوولتائیک/حرارتی چه به‌صورت عددی و چه به‌صورت تجربی مورد بررسی قرار نگرفته‌است، امکان اعتبارسنجی سیستم فتوولتائیک/حرارتی با پیکربندی شامل فیلتر طیفی ماده تغییرفازدهنده وجود ندارد. باین‌حال برای نشان‌دادن صحت مدل ارائه‌شده برای ماده تغییرفازدهنده، سیستم دوجداره شیشه‌ای حاوی ماده تغییرفازدهنده بررسی شد که در مراجع موجود برای استفاده در ساختمان مورد مطالعه قرار گرفته‌است و روابط حاکم آن مشابه با روابط (۱۰) تا (۱۲) است؛ با این تفاوت که جداره‌های شیشه‌ای به‌جای تبادل حرارت با فتوولتائیک و نانوسیال با هوای محیط داخل و خارج ساختمان تبادل حرارت دارند. برای اعتبارسنجی این سیستم از نتایج تجربی گویا و همکاران [۲۵] استفاده شده‌است. تغییرات ساعتی تابش و دمای هوای بیرون و همچنین مقایسه بین دمای جدار شیشه‌ای داخلی به‌دست‌آمده از مطالعه حاضر

۳-۲- اعتبارسنجی مدل ارائه‌شده برای سیستم فتوولتائیک/حرارتی دارای فیلتر طیفی

سیستم فتوولتائیک/حرارتی دارای فیلتر نانوسیالی با استفاده از نتایج تجربی کوی و زو [۳۸] اعتبارسنجی شد. در سیستم مورد مطالعه کوی و زو [۳۸] نانوسیال منیزیم اکسید/آب (قطر ۱۰ نانومتر، غلظت ۰/۰۲ درصد وزنی و دبی ۶ لیتر در ساعت) با ضخامت یک سانتی‌متر بر روی سلول‌های فتوولتائیک جریان می‌یابد و جریان خنک‌کن از زیر فتوولتائیک وجود ندارد. چون کار عددی مناسبی با پیکربندی کاملاً مشابه با پیکربندی مورد بررسی در این پژوهش (پیکربندی ب) پیدا نشد، ناگزیر به اعتبارسنجی بر اساس پیکربندی کوی و زو [۳۸] هستیم. در نتیجه، معادلات مربوط به پیکربندی (ب) برای تطابق با این پیکربندی باید کمی اصلاح شوند. روابط اصلاح‌شده و مورد استفاده برای اعتبارسنجی در جدول ۴ ارائه شده‌اند. در آزمایش کوی و زو [۳۸] مقادیر تابش، دمای محیط و سرعت باد به ترتیب ۸۷۰ وات بر مترمربع، ۱۵/۵ درجه سانتی‌گراد و ۰/۵ متر بر ثانیه بود. مقایسه بین دمای فتوولتائیک، راندمان الکتریکی و راندمان حرارتی محاسبه‌شده توسط مدل عددی حاضر و کار آزمایشی کوی و زو [۳۸] در جدول ۵ ارائه شده‌است که صحت شبیه‌سازی حاضر را نشان

جدول ۴. روابط مورد استفاده برای اعتبارسنجی بر اساس پیکربندی مورد بررسی کوی و زو [۳۸]

Table 4. Relationships used for validation based on the configuration investigated by Cui and Zhu [38]

معادله	جزء
$\rho_g c_{p,g} \delta_g \frac{\partial T_g}{\partial t} = C \alpha_g I_0 + (h_{c,g-a} + h_{r,g-s})(T_a - T_g) + h_{nf-g}(T_{nf} - T_g)$	جدار شیشه‌ای
$\rho_{of} c_{p,of} \delta_{of} \frac{\partial T_{of}}{\partial t} = \tau_g \alpha_{nf} I_0 + h_{nf-g}(T_g - T_{nf}) + h_{nf-pv}(T_{pv} - T_{nf}) - \frac{\dot{m}_{nf} c_{nf}}{w} \frac{dT_{nf}}{dy}$	نانوسیال
$\rho_{pv} c_{p,pv} \delta_{pv} \frac{\partial T_{pv}}{\partial t} = C \tau_g \alpha_{pv} (1 - \eta_{pv}^*) I_0 + h_{nf-pv}(T_{nf} - T_{pv}) + h_{pv-i}(T_i - T_{pv})$	فتوولتائیک
$\rho_i c_{p,i} \delta_i \frac{\partial T_i}{\partial t} = h_{pv-i}(T_{pv} - T_i) + h_{i-a}(T_a - T_i)$	عایق

جدول ۵. مقایسه بین نتایج شبیه‌سازی پژوهش حاضر و نتایج تجربی کوی و زو [۳۸]

Table 5. Comparison between results of present simulation and Cui and Zhu [38] experimental work

پارامتر	پژوهش حاضر	کوی و زو [۳۸]	درصد خطا (%)
دمای فتوولتائیک (°C)	۲۷	۲۷/۳	۱/۱
افزایش دمای نانوسیال (%)	۷/۲	۷/۵	۴
بازده الکتریکی (%)	۱۴/۵	۱۴/۷	۱/۴
بازده حرارتی (%)	۴۶/۵	۴۷/۲	۱/۵

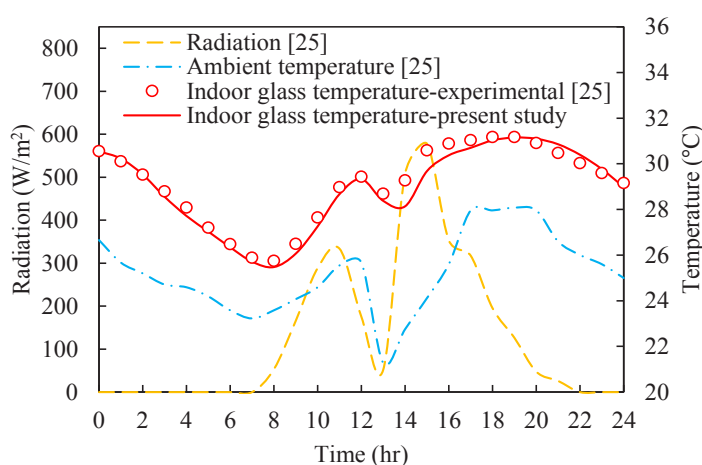
۴-۱- ضریب عبور کلی فیلتر طیفی ترکیبی نانوسیال و ماده تغییرفازدهنده

شکل ۷ ضریب عبور کلی فیلتر طیفی ترکیبی نانوسیال و ماده تغییرفازدهنده را برای حالت جامد و مایع ماده تغییرفازدهنده نشان می‌دهد. محدوده طیفی ایده‌آل فتوولتائیک که مطلوب است توسط فیلتر طیفی به‌خوبی عبور داده شود با رنگ آبی مشخص شده‌است. هر چه فیلتر، تابشی که خارج از این محدوده طیفی قرار دارد را بیشتر جذب کند به حالت ایده‌آل نزدیک‌تر می‌شود. همان‌طور که در شکل ۷ مشخص است، زمانی که ماده تغییرفازدهنده در حالت مایع قرار

و اندازه‌گیری شده توسط گویا و همکاران [۲۵] در شکل ۶ نشان داده شده‌است. با توجه به شکل ۶، توافق خوبی بین نتایج شبیه‌سازی حاضر و نتایج آزمایشی گویا و همکاران [۲۵] مشاهده می‌شود که صحت مدل حاضر را تأیید می‌کند.

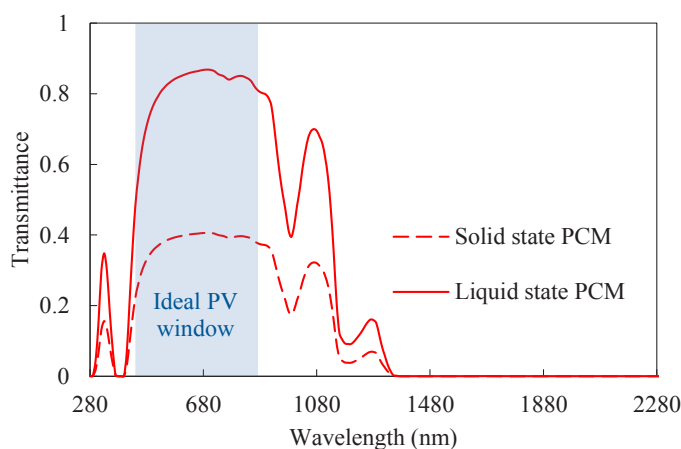
۴- نتایج و بحث

در ادامه پس از اطمینان از صحت مدل ارائه شده، نتایج مدل‌سازی ارائه شده‌است. برای بررسی اثر هر پارامتر، پارامتر موردنظر تغییر داده شده‌است و بقیه پارامترها ثابت در نظر گرفته شده‌اند.



شکل ۶. تغییرات ساعتی تابش، دمای محیط و مقایسه تغییرات ساعتی دمای شیشه در محیط داخلی بدست آمده از مدل حاضر و داده‌های اندازه‌گیری شده توسط گویا و همکاران [۲۵]

Fig. 6. The hourly variation of irradiance, ambient temperature and comparison of hourly variations of indoor glass temperature obtained from the present model and measured data [25]



شکل ۷. ضریب عبور کلی فیلتر طیفی ترکیبی نانوسیال و ماده تغییرفازدهنده در حالت جامد و مایع

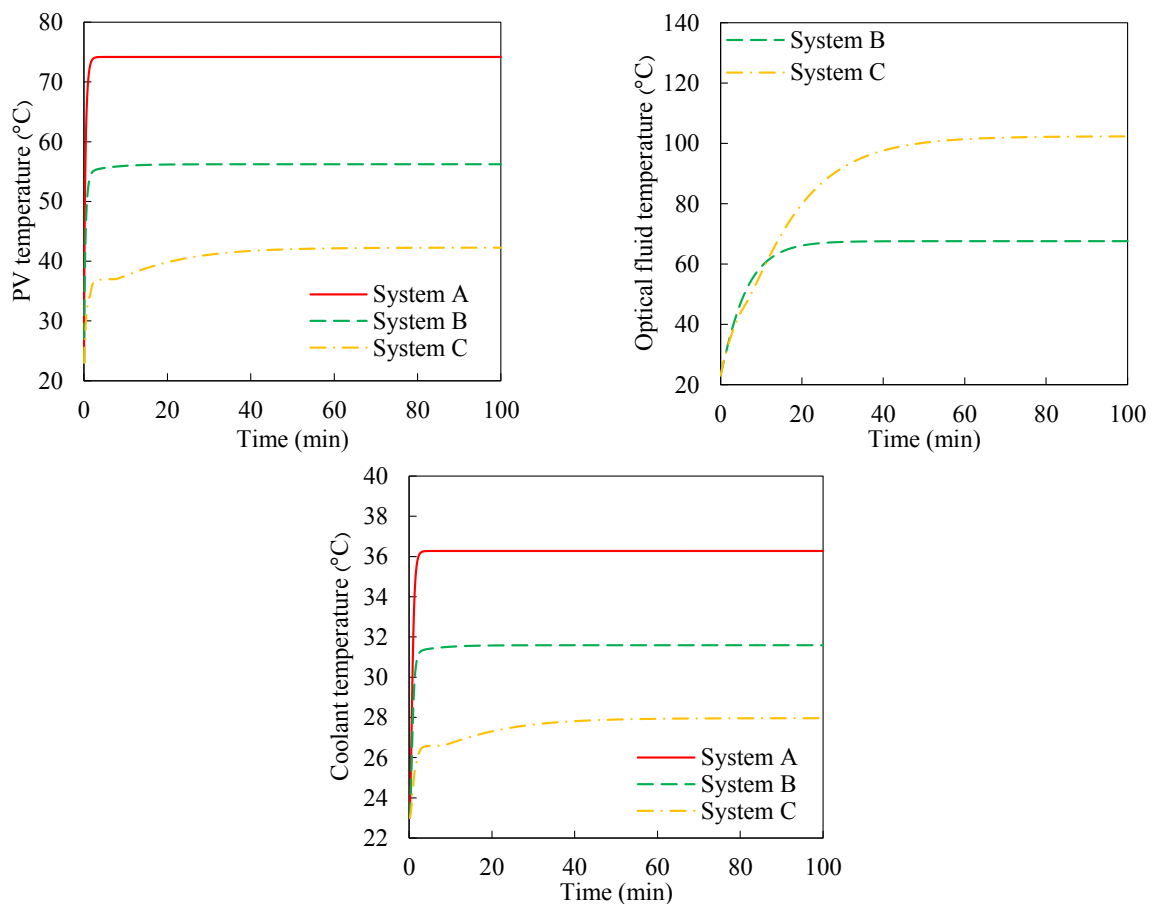
Fig. 7. The transmittance of nanofluid/phase change material spectral splitting unit at solid and liquid states

پیکربندی (ج) ماده تغییرفازدهنده به‌عنوان جزئی از فیلتر طیفی وجود دارد که می‌تواند با توجه به شرایط محیطی در طول زمان تغییر فاز بدهد، در نتیجه میزان عبور از فیلتر طیفی و عملکرد سیستم دچار تغییر قابل‌توجهی می‌شود. برای بررسی این تغییرات بسیار مهم بود تا فاکتور زمان در مدل‌سازی لحاظ شود. شکل ۸ تغییرات دمای فتوولتائیک، دمای فیلتر طیفی مایع (نانوسیال) و دمای سیال خنک‌کن (آب) با زمان را در طی ۱۰۰ دقیقه برای سه پیکربندی مورد مطالعه در این بررسی شامل سیستم فتوولتائیک/حرارتی معمولی (سیستم الف)، سیستم فتوولتائیک/حرارتی با فیلتر طیفی نانوسیال (سیستم ب) و سیستم فتوولتائیک/حرارتی با فیلتر طیفی ترکیبی نانوسیال-ماده تغییرفازدهنده (سیستم ج) نشان می‌دهد. همان‌طور که از شکل ۸ مشخص است با قرارگرفتن سیستم‌ها در معرض تابش ابتدا دمای اجزای سیستم افزایش می‌یابد و در نهایت چون عوامل

دارد، فیلتر پیشنهادی در محدوده طیفی فتوولتائیک ضریب عبور بالای ۰/۸ را دارد و خارج از این محدوده میزان عبور تابش بسیار کمتر است. اما زمانی که ماده تغییرفازدهنده در حالت جامد قرار دارد میزان عبور در کل طیف تابش کاهش پیدا می‌کند، به طوری که در محدوده طیفی فتوولتائیک ضریب عبور به حدود ۰/۴ می‌رسد. البته زمانی که تابش خورشید در دسترس است به دلیل تمرکز تابش ماده تغییرفازدهنده در مدت زمان کوتاهی مایع می‌شود. هر چه نسبت تمرکز تابش بیشتر باشد این زمان کاهش پیدا می‌کند.

۲-۴- عملکرد دینامیک

مدلی که در این پژوهش ارائه شده، یک مدل دینامیک است تا تأثیر زمان و تغییر پارامترهای مختلف با زمان را بر عملکرد سیستم فتوولتائیک/حرارتی نشان بدهد. در سیستم فتوولتائیک/حرارتی با



شکل ۸. تغییرات دمای فتوولتائیک، دمای نانوسیال (فیلتر طیفی) و سیال خنک‌کن با زمان در سیستم فتوولتائیک/حرارتی با پیکربندی‌های الف، ب و ج (A یا B، C و)

Fig. 8. Variation of photovoltaic temperature, nanofluid (optical filter fluid) temperature and coolant temperature with time for configurations A, B and C of photovoltaic/thermal system.

کم است و چون در تماس حرارتی با فتوولتاییک است افزایش آن به قیمت افزایش دمای فتوولتاییک تمام می‌شود. در سیستم‌های فتوولتاییک/حرارتی هر دو جنبه حرارت و الکتریسیته مهم هستند. هر چه دمای سیال خروجی از سیستم فتوولتاییک/حرارتی بیشتر باشد، انرژی حرارتی باکیفیت بالاتری در اختیار خواهیم داشت که می‌تواند علاوه بر مصارف خانگی نیاز برخی از صنایع را نیز برطرف کند. با استفاده از فیلتر طیفی قادر خواهیم بود که به دمای خروجی بالاتر از ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد دست پیدا کنیم که به دلیل عدم تماس حرارتی با فتوولتاییک منجر به افزایش دمای آن نمی‌شود. در نتیجه سیستم دارای فیلتر طیفی ترکیبی از نظر دستیابی به سیال انتقال حرارت با دمای بالا عملکرد بهتری در مقایسه با سایرین دارد. شکل ۹ تغییرات بازده انرژی الکتریکی، حرارتی و کلی را طی ۱۰۰ دقیقه نشان می‌دهند. بازده انرژی الکتریکی در سیستم الف و ب به دلیل افزایش دمای فتوولتاییک ابتدا کاهش می‌یابد و پس از مدت کوتاهی که سیستم پایا شد ثابت باقی می‌ماند. در سیستم ج به دلیل افزایش ضریب عبور ماده تغییرفازدهنده در طول تغییر حالت از جامد به مایع، میزان تابشی که به سلول‌های فتوولتاییک می‌رسد افزایش می‌یابد، در نتیجه بازده انرژی الکتریکی نیز زیاد می‌شود تا جایی که ماده تغییرفازدهنده کاملاً مایع می‌شود. پس از آن که ماده تغییرفازدهنده کاملاً مایع شد ضریب عبور ثابت می‌ماند و به دلیل افزایش دمای فتوولتاییک بازده انرژی الکتریکی کم می‌شود تا به حالت پایا برسد. سیستم الف بیشترین بازده انرژی الکتریکی را دارد چون فیلتر طیفی ندارد و در نتیجه میزان تابش دریافتی توسط فتوولتاییک برخلاف سیستم‌های دارای فیلتر طیفی کاهش نمی‌یابد. به دلیل عبور بسیار بالای تابش توسط ماده تغییرفازدهنده در حالت مایع، اختلاف بازده انرژی الکتریکی سیستم ب و ج کم و حدود یک درصد است. بازده انرژی حرارتی به دو عامل دمای سیال و دبی جرمی وابسته است. بازده حرارتی کل در سیستم‌های دارای فیلتر طیفی از مجموع بازده حرارتی بخش فیلتر طیفی و بخش خنک‌کننده محاسبه می‌شود. در اینجا دبی جرمی سیال خنک‌کننده برابر نانوسیال در فیلتر طیفی در نظر گرفته شده تا دمای خروجی بالایی از نانوسیال در کنار دمای پایینی از فتوولتاییک به دست آید. در نتیجه این دبی زیاد سیال خنک‌کننده و دمای بالاتر سیال خنک‌کننده در سیستم الف در مقایسه با دبی بسیار کم نانوسیال در سیستم ب و ج، بازده حرارتی در

محیطی شامل تابش، دمای محیط، دمای ورودی سیال و غیره ثابت در نظر گرفته شده‌اند، سیستم‌ها به حالت پایا^۱ می‌رسند. سیستم الف به سرعت در کمتر از ۳ دقیقه پایا می‌شود، در نتیجه برای سیستم فتوولتاییک/حرارتی معمولی می‌توان از مدل‌های پایا به جای دینامیک استفاده کرد. تمامی اجزای سیستم ب در کمتر از ۲۰ دقیقه به حالت پایا می‌رسند اما زمان رسیدن به پایایی در سیستم ج به علت تغییر حالت ماده تغییرفازدهنده از جامد به مایع حدود یک ساعت به طول می‌انجامد. دمای ماده تغییرفازدهنده با جذب تابش افزایش می‌یابد تا به دمای تغییر فاز خود برسد، سپس شروع به مایع شدن می‌کند و پس از اینکه کاملاً مایع شد دمای آن تا زمانی که به حالت پایا برسد زیاد می‌شود. چون که در طول پروسه تغییر فاز میزان عبور تابش از ماده تغییرفازدهنده نیز تغییر می‌کند، دمای اجزای دیگر شامل نانوسیال، فتوولتاییک و سیال خنک‌کننده هم متأثر از این تغییرات می‌شوند.

در سیستم‌های ب و ج که دارای فیلتر طیفی هستند دمای فتوولتاییک بسیار کمتر از سیستم الف است. علت این امر جذب بخشی از طیف تابش به‌ویژه در خارج از محدوده طیفی ایده‌آل فتوولتاییک توسط فیلتر طیفی است. میزان تابش جذب شده توسط فیلتر ترکیبی نانوسیال-ماده تغییرفازدهنده بیشتر از فیلتر نانوسیالی است، در نتیجه دمای فتوولتاییک در سیستم ج بسیار کمتر است. هر چه دمای فتوولتاییک در طول عملکرد کمتر باشد برای تابش دریافتی یکسان توسط سلول‌های فتوولتاییک بازده الکتریکی بیشتر خواهد بود و عمر مفید سلول‌ها نیز افزایش خواهد یافت. این مسئله به‌ویژه در سیستم‌های دارای تمرکز تابش که دمای فتوولتاییک بسیار بالا می‌رود اهمیت زیادی دارد. پس از حیث دمای فتوولتاییک، سیستم دارای فیلتر طیفی ترکیبی عملکرد بسیار خوبی دارد. همچنین با توجه به شکل ۸ دمای فیلتر طیفی مایع یا همان نانوسیال در سیستم ج پس از رسیدن به پایایی حدود ۳۵ درجه سانتی‌گراد بیشتر از سیستم ب است و به بیش از ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد می‌رسد. دمای سیال خنک‌کننده آب که برای استخراج حرارت از فتوولتاییک و کاهش دمای آن در زیر فتوولتاییک جریان دارد نیز متناسب با دمای فتوولتاییک در سیستم الف بیشترین مقدار (۳۶ درجه سانتی‌گراد) و در سیستم ج کمترین مقدار را دارد. دمای قابل استحصال از سیال خنک‌کننده

1 Steady state

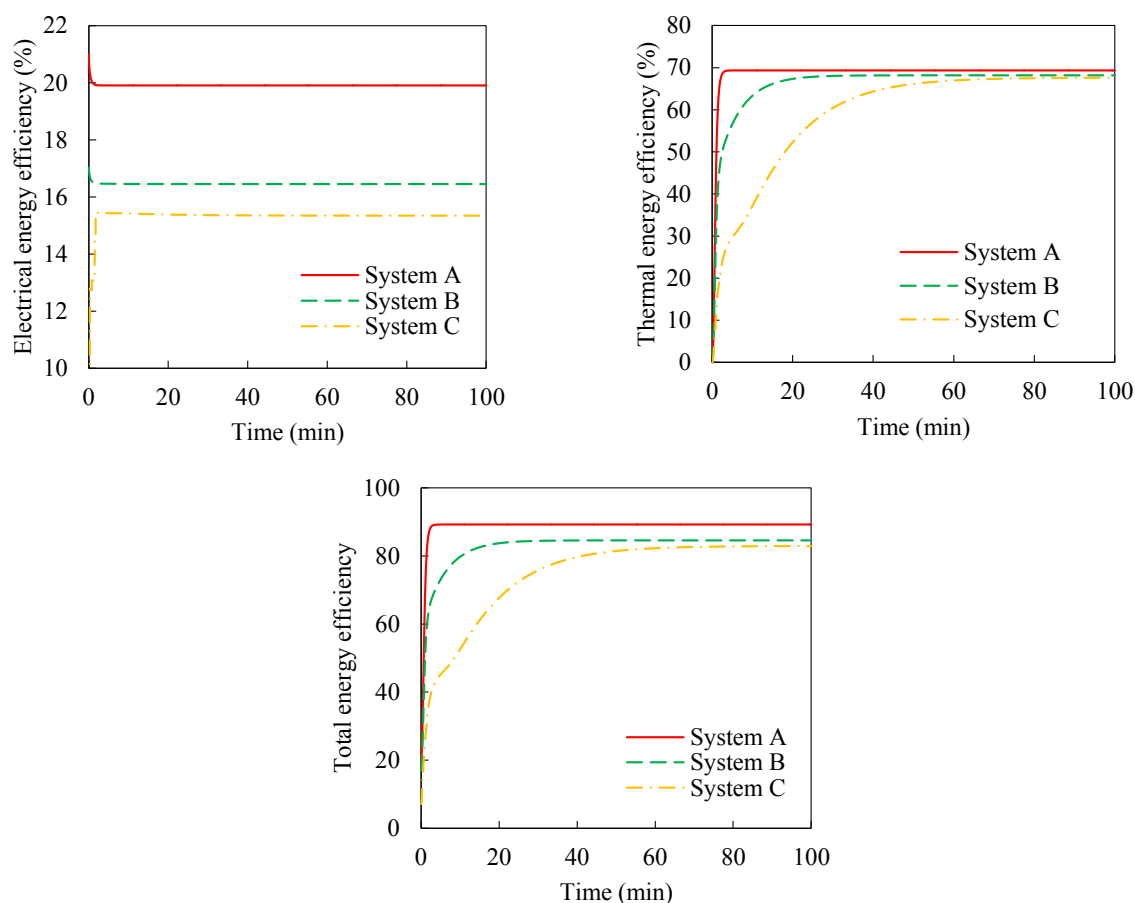
علت بازده انرژی حرارتی سیستم ج به دلیل افزایش قابل ملاحظه دمای خروجی نانوسیال در فیلتر طیفی ترکیبی پس از حدود ۲۰ دقیقه بیشتر از سایرین می‌شود. بازده انرژی کل سیستم دارای فیلتر طیفی ترکیبی که از مجموع بازده انرژی الکتریکی و حرارتی آن به دست می‌آید پس از حدود ۴۰ دقیقه از بازده انرژی سیستم‌های الف و ب پیشی می‌گیرد. تغییرات انرژی تلف شده کاملاً برعکس بازده انرژی است و در نتیجه انرژی تلف شده سیستم دارای فیلتر ترکیبی پس از ۴۰ دقیقه به دلیل انرژی حرارتی مفید بالای این سیستم کمتر از دو سیستم دیگر می‌شود. پس می‌توان گفت که عملکرد سیستم فتوولتائیک/حرارتی دارای فیلتر طیفی ترکیبی از دیدگاه انرژی مناسب‌تر است.

۴-۳- تأثیر نسبت تمرکز

شکل ۱۱ تأثیر نسبت تمرکز بر دمای فتوولتائیک، دمای نانوسیال

سیستم الف بیشتر از بازده حرارتی کل در سیستم ب و ج است ولی این اختلاف بعد از پایایی سیستم‌ها بسیار کاهش می‌یابد و به حدود ۲٪ می‌رسد. بازده انرژی کلی مجموع بازده انرژی الکتریکی و حرارتی است. در نتیجه برای هر سه پیکربندی الف، ب و ج تا رسیدن به حالت پایا افزایش می‌یابد. سیستم الف به دلیل بازده انرژی الکتریکی و حرارتی بیشتر، بالاترین بازده انرژی را به خود اختصاص می‌دهد. در نتیجه از دیدگاه انرژی سیستم الف یا همان سیستم فتوولتائیک/حرارتی معمولی عملکرد بهتری دارد.

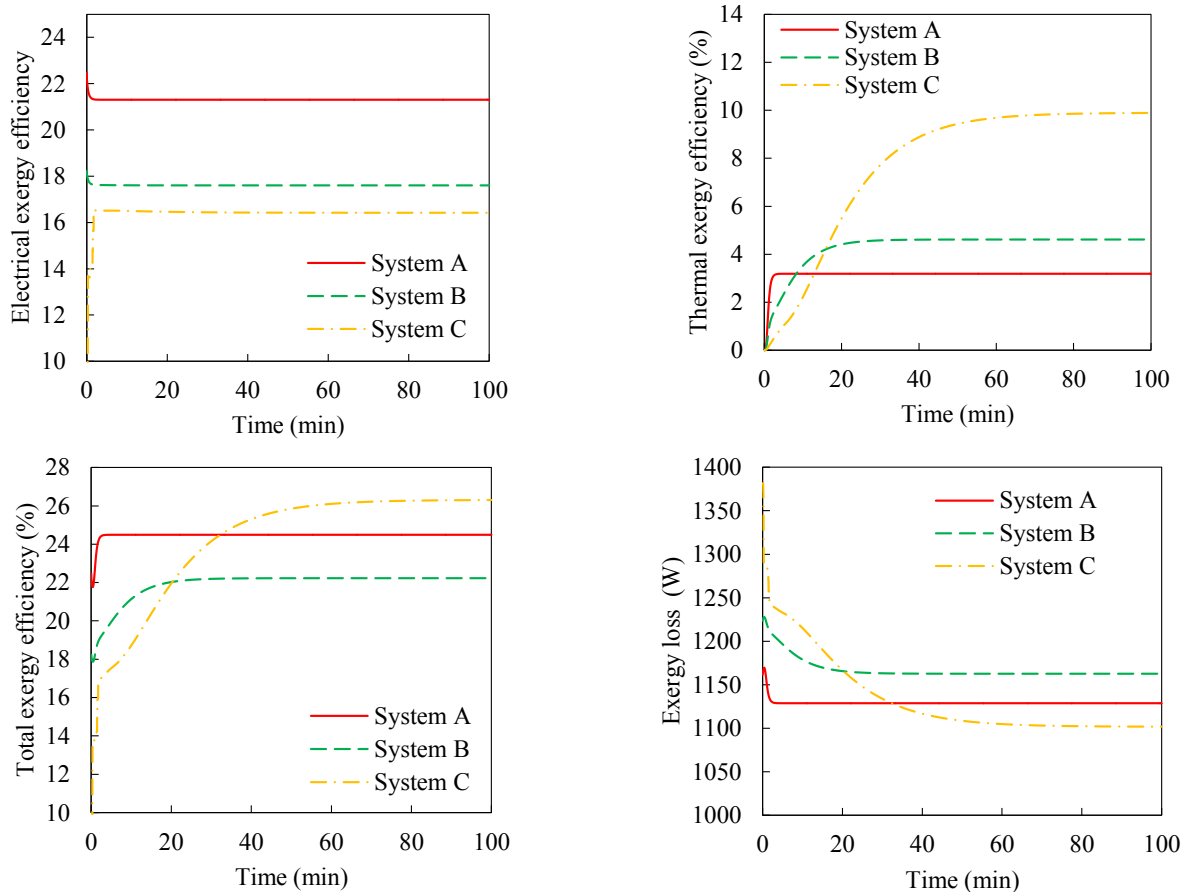
تغییرات بازده انرژی الکتریکی، حرارتی و کلی و انرژی تلف شده با گذشت زمان در شکل ۱۰ ترسیم شده است. تغییرات بازده انرژی الکتریکی مشابه با بازده انرژی الکتریکی است. بازده انرژی حرارتی به دلیل افزایش دمای سیال خروجی تا حالت پایایی افزایش می‌یابد و پس از آن بدون تغییر می‌ماند. بازده انرژی حرارتی برخلاف بازده انرژی حرارتی بیشتر متأثر از دمای سیال خروجی است. به همین



شکل ۹. تغییرات بازده انرژی الکتریکی، حرارتی و کلی با زمان در سیستم فتوولتائیک/حرارتی با پیکربندی‌های الف، ب و ج (A، B و C)
 Fig. 9. Variation of electrical, thermal and total energy efficiencies with time for configurations A, B and C of photovoltaic/thermal system

خروجی بیش از دو برابر در مقایسه با سیستم فتوولتائیک/حرارتی معمولی دست پیدا کند. البته باید توجه داشت که با توجه به دمای جوش آب، سیال پایه آب مورد استفاده در نانوسیال برای دماهای بالاتر از ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد مناسب نیست و باید با سیالات پایه‌ای با دمای جوش بالاتر که خواص نوری مناسبی دارند، جایگزین شود. شکل‌های ۱۲ و ۱۳ به ترتیب اثر نسبت تمرکز بر بازده انرژی و انرژی الکتریکی، حرارتی و کلی را پس از گذشت ۱۰۰ دقیقه نشان می‌دهند. با افزایش نسبت تمرکز در تمامی سیستم‌ها، بازده الکتریکی ابتدا به علت افزایش تابش دریافتی توسط سلول‌های فتوولتائیک افزایش می‌یابد ولی از نسبت تمرکز معینی به بعد اثر افزایش دمای فتوولتائیک بر اثر افزایش تابش دریافتی غلبه می‌کند و منجر به کاهش بازده انرژی و انرژی الکتریکی می‌شود. بازده انرژی حرارتی با دما نسبت مستقیم و با نسبت تمرکز نسبت عکس دارد. تأثیر این

(فیلتر طیفی مایع) و دمای سیال خنک را پس از گذشت ۱۰۰ دقیقه (در حالت پایا) نشان می‌دهد. با افزایش نسبت تمرکز به دلیل افزایش تابش دریافتی توسط اجزای سیستم، دمای آن‌ها افزایش می‌یابد. شیب منحنی دمای فتوولتائیک و سیال خنک‌کن در سیستم فتوولتائیک/حرارتی معمولی (سیستم الف) و شیب منحنی دمای نانوسیال در سیستم دارای فیلتر ترکیبی (سیستم ج) بیشتر از بقیه است؛ زیرا در سیستم الف تابش مستقیماً به فتوولتائیک برخورد می‌کند اما در سیستم ج ابتدا از فیلتر طیفی عبور می‌نماید. در نسبت‌های تمرکز بالا دمای قابل استحصال از سیستم‌های دارای فیلتر طیفی افزایش قابل‌ملاحظه‌ای می‌یابد. برای نمونه در نسبت تمرکز ۵۰ می‌توان به دمایی در حدود ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد دست پیدا کرد. همچنین با توجه به شکل ۱۱ مشخص است که سیستم دارای فیلتر طیفی ترکیبی می‌تواند به دمای فتوولتائیک تا ۵۰٪ کمتر و دمای سیال

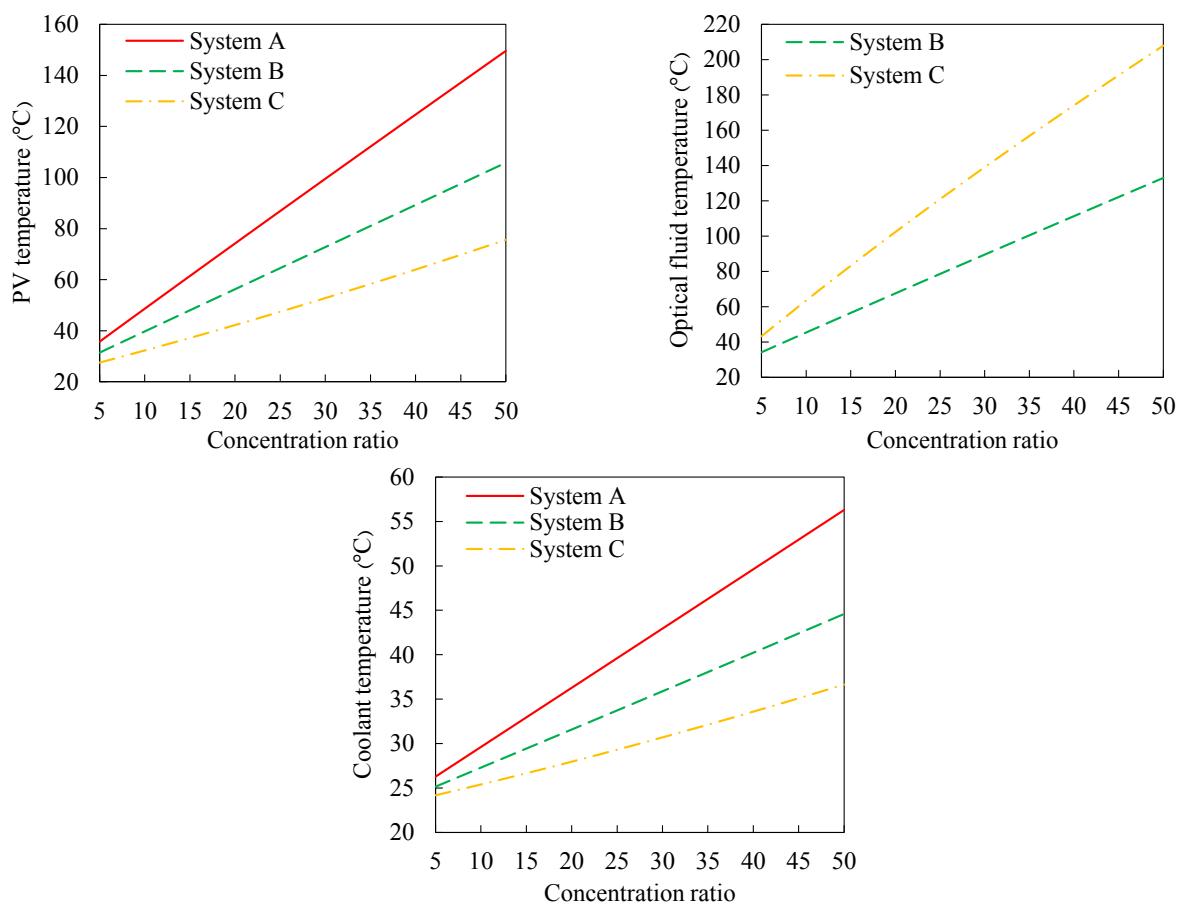


شکل ۱۰. تغییرات بازده انرژی الکتریکی، حرارتی و کلی و انرژی تلف‌شده با زمان در سیستم فتوولتائیک/حرارتی با پیکربندی‌های الف، ب و ج (یا A، B و C)

Fig. 10. Variation of electrical, thermal and total exergy efficiencies and destroyed exergy with time for configurations A, B and C of photovoltaic/thermal system

فتوولتاییک/حرارتی معمولی تا نسبت تمرکز ۱۸ افزایش می‌یابد و سپس به علت کاهش بازده الکتریکی، دچار افت می‌شود. بازده کل سیستم دارای فیلتر طیفی نانوسیال تقریباً ثابت می‌ماند و بازده کل سیستم دارای فیلتر طیفی ترکیبی نانوسیال-ماده تغییرافزنده دچار افزایش اندکی می‌شود. اما بازده انرژی کل هر سه سیستم به علت افزایش قابل توجه بازده انرژی حرارتی افزایش می‌یابد. بازده انرژی کل سیستم دارای فیلتر طیفی ترکیبی در نسبت‌های تمرکز بالا بسیار بیشتر از سیستم‌های دیگر است. تغییرات انرژی تلف‌شده با نسبت تمرکز نیز در شکل ۱۳ ترسیم شده‌است. با افزایش نسبت تمرکز انرژی تلف‌شده به دلیل افزایش اتلافات حرارتی و الکتریکی افزایش می‌یابد. سیستم فتوولتاییک/حرارتی دارای فیلتر طیفی ترکیبی نانوسیال-ماده تغییرافزنده در نسبت‌های تمرکز بیشتر از ۱۵ کمترین انرژی تلف شده را در مقایسه با دو سیستم دیگر دارد.

دو عامل سبب شده که بازده انرژی حرارتی تغییرات کمی با افزایش نسبت تمرکز داشته باشد. در سیستم الف بازده انرژی حرارتی به دلیل دمای بالای سیال خنک‌کن خروجی دچار افزایش اندکی با نسبت تمرکز می‌شود که این میزان افزایش در نسبت‌های تمرکز بالاتر از ۲۰ قابل صرف‌نظر است. در سیستم ب نیز تغییرات بازده حرارتی کمتر از ۰/۵ درصد است. در سیستم ج به دلیل افزایش قابل‌ملاحظه دما با نسبت تمرکز بازده انرژی حرارتی افزایش می‌یابد و در نسبت‌های تمرکز بالا شاهد افزایش شیب منحنی بازده انرژی حرارتی هستیم. در بازده انرژی حرارتی که توسط معادله (۳۷) محاسبه می‌شود اثر دما بیشتر از نسبت تمرکز است. بنابراین افزایش دماها سبب افزایش بازده انرژی حرارتی با افزایش نسبت تمرکز می‌شود. اختلاف بین بازده انرژی حرارتی سیستم ج و سیستم‌های الف و ب با افزایش نسبت تمرکز به شدت افزایش می‌یابد. بازده انرژی کل در سیستم



شکل ۱۱. تغییرات دمای فتوولتاییک، دمای نانوسیال (فیلتر طیفی) و سیال خنک‌کن با نسبت تمرکز در سیستم فتوولتاییک/حرارتی با پیکربندی الف، ب و ج (یا A، B و C)

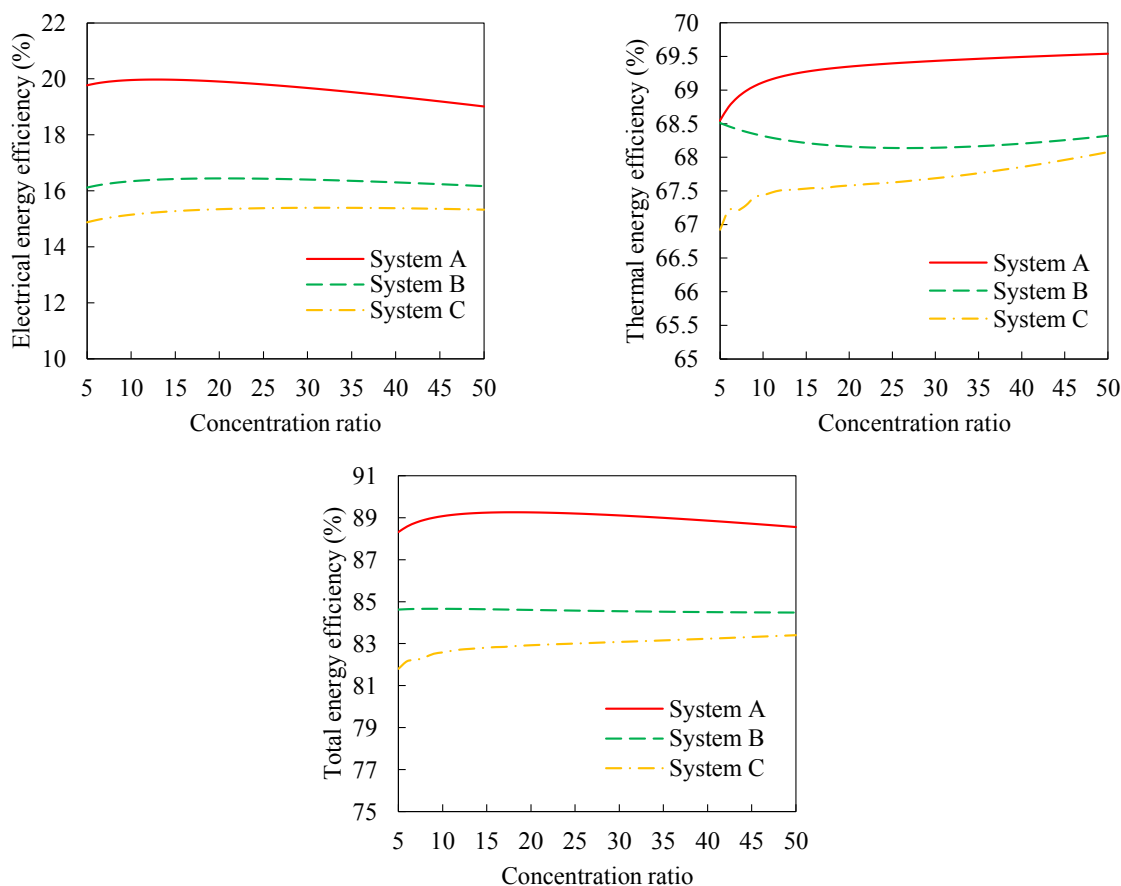
Fig. 11. Variation of photovoltaic temperature, nanofluid (optical filter fluid) temperature and coolant temperature with concentration ratio for configurations A, B and C of photovoltaic/thermal system

درصد کمتر از سیستم الف و سیستم ب می‌باشد و بازده انرژی آن به ترتیب حدود ۱۴ و ۲۲ درصد بیشتر از سیستم الف و سیستم ب است. با استفاده از سیستم ج انرژی تلف شده به ترتیب به میزان ۵ و ۷ درصد در مقایسه با سیستم الف و سیستم ب در نسبت تمرکز ۳۰ کاهش می‌یابد.

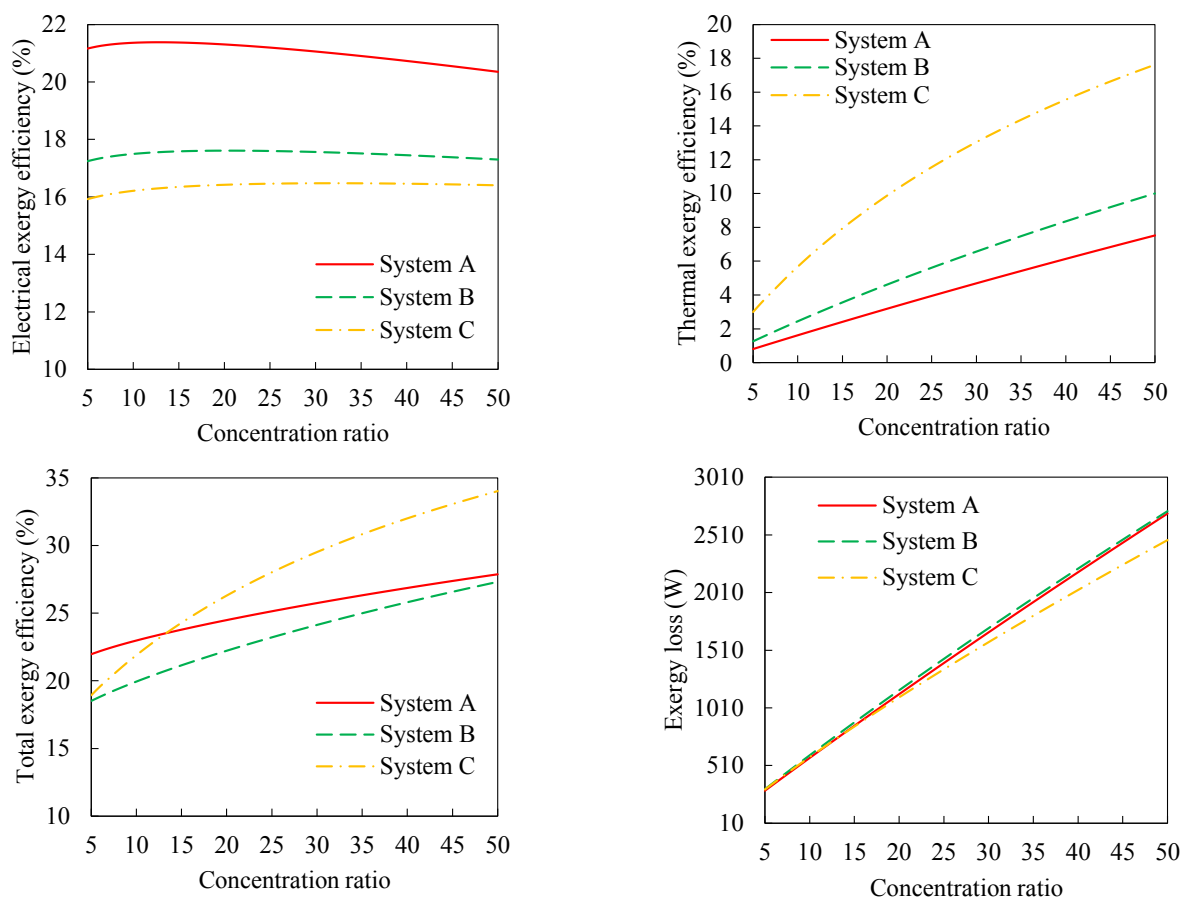
۵- نتیجه‌گیری

در این پژوهش سیستم فتوولتائیک/حرارتی دارای فیلتر طیفی ترکیبی نانوسیال-ماده تغییرفازدهنده به همراه سیستم فتوولتائیک/حرارتی معمولی و سیستم فتوولتائیک/حرارتی با فیلتر طیفی نانوسیال تحت تابش متمرکز مدل‌سازی شدند و عملکرد آن‌ها از دیدگاه انرژی و انرژی با یکدیگر مقایسه گردید. ماده تغییرفازدهنده کلسیم کلرید هگزا هیدرات و نانوسیال نقره/آب در فیلتر طیفی و آب به‌عنوان خنک‌کن مورد استفاده قرار گرفتند. خواص نوری ماده تغییرفازدهنده

مشابه با بازده انرژی با افزایش نسبت تمرکز اختلاف انرژی تلف شده سیستم دارای فیلتر طیفی ترکیبی با دو سیستم دیگر افزایش می‌یابد. در نتیجه می‌توان از دیدگاه انرژی استدلالت کرد که سیستم فتوولتائیک/حرارتی دارای فیلتر طیفی ترکیبی گزینه مناسبی برای نسبت‌های تمرکز زیاد (بیشتر از ۱۵) است. برای مقایسه بهتر نتایج حاصل از مدل‌سازی، مقادیر دمای فتوولتائیک و دمای سیال خروجی به همراه بازده‌های انرژی در جدول ۶ و نتایج حاصل از تحلیل انرژی در جدول ۷ برای نسبت تمرکز ۳۰ ارائه شده‌اند. با استفاده از فیلتر طیفی ترکیبی (پیکربندی ج) در نسبت تمرکز ۳۰ دمای فتوولتائیک حدود ۴۷ درصد در مقایسه با سیستم فتوولتائیک/حرارتی معمولی (پیکربندی الف) و حدود ۲۵ درصد در مقایسه با سیستم فتوولتائیک/حرارتی دارای فیلتر نانوسیالی (پیکربندی ب) کاهش می‌یابد. دمای خروجی نانوسیال (فیلتر طیفی) در سیستم ج حدود ۷۵ درصد بیشتر از سیستم ب است. بازده انرژی کل سیستم ج به ترتیب حدود ۷ و ۲



شکل ۱۲. تغییرات بازده انرژی الکتریکی، حرارتی و کلی با نسبت تمرکز در سیستم فتوولتائیک/حرارتی با پیکربندی‌های الف، ب و ج (یا A, B و C) Fig. ۱۲. Variation of electrical, thermal and total energy efficiencies with concentration ratio for configurations A, B and C of photovoltaic/thermal system



شکل ۱۳. تغییرات بازده انرژی الکتریکی، حرارتی و کلی و انرژی تلف شده با نسبت تمرکز در سیستم فتوولتائیک/حرارتی با پیکربندی‌های الف، ب و ج (یا A, B و C)

Fig. 13. Variation of electrical, thermal and total exergy efficiencies and destroyed exergy with concentration ratio for configurations A, B and C of photovoltaic/thermal system

جدول ۶. دمای فتوولتائیک، دمای سیال خروجی و بازده انرژی الکتریکی، حرارتی و کلی سیستم فتوولتائیک/حرارتی با پیکربندی‌های الف، ب و ج در نسبت تمرکز ۳۰

Table 6. Photovoltaic temperature, outlet fluid temperature and electrical, thermal and total energy efficiencies of configurations A, B and C at a concentration ratio of 30

η_{tot} (%)	η_{th} (%)	η_{ele} (%)	T_{cf} (°C)	T_{of} (°C)	T_{pv} (°C)	پیکربندی
۸۹/۱	۶۹/۴	۱۹/۷	۴۲/۹	-	۹۹/۵	الف
۸۴/۵	۶۸/۱	۱۶/۴	۳۵/۹	۸۹/۵	۷۲/۷	ب
۸۳/۱	۶۷/۷	۱۵/۴	۳۰/۷	۱۳۹	۵۲/۸	ج

جدول ۷. انرژی، راندمان انرژی و انرژی تلف شده سیستم فتوولتائیک/حرارتی با پیکربندی‌های الف، ب و ج در نسبت تمرکز ۳۰

Table 7. Exergy, exergy efficiency and destroyed exergy of configurations A, B and C of photovoltaic/thermal system at a concentration ratio of 30

$\dot{E}x_{loss,tot}$ (W)	$\dot{E}x_{loss,fr}$ (W)	$\dot{E}x_{loss,th}$ (W)	$\dot{E}x_{th}$ (W)	$\dot{E}x_{ele}$ (W)	$\dot{E}x_{in}$ (W)	$\dot{\epsilon}_{tot}$ (%)	$\dot{\epsilon}_{th}$ (%)	$\dot{\epsilon}_{ele}$ (%)	پیکربندی
۱۶۶۴/۹	۰/۱	۱۶۶۴/۸	۱۰۵/۱	۴۷۲/۲	۲۲۴۲/۱	۲۵/۷	۴/۷	۲۱	الف
۱۷۰۱/۲	۰/۱	۱۷۰۱/۱	۱۴۷/۵	۳۹۳/۷	۲۲۴۲/۱	۲۴/۲	۶/۶	۱۷/۶	ب
۱۵۸۰/۳	۰/۱	۱۵۸۰/۲	۲۹۲/۶	۳۶۹/۳	۲۲۴۲/۱	۲۹/۵	۱۳	۱۶/۵	ج

قطر هیدرولیکی، m	D_h	در دو حالت جامد و مایع و خواص نوری نانوسیال شبیه‌سازی شدند.
گاف انرژی، J	E_g	نتایج زیر از مطالعه حاضر به دست آمد:
ضریب اصطکاک	f	• فیلتر طیفی ترکیبی نانوسیال-ماده تغییرفازدهنده به دلیل نشان
ضریب پری	FF	دادن عبور تابش مناسب در محدوده طیفی ایده‌آل فتوولتاییک و
چگالی شار تابش، $s^{-1}m^{-2}nm^{-1}$	F_λ	جذب مناسب تابش در خارج از این محدوده، می‌تواند به‌عنوان گامی
گرمای نهان ماده تغییرفازدهنده، $kJ\ kg^{-1}$	h_{pcm}	مؤثر برای نزدیک‌شدن به فیلتر طیفی ایده‌آل قلمداد شود.
ضریب انتقال حرارت ترکیبی جابجایی و هدایت حرارتی، $Wm^{-2}K^{-1}$	h_c	• سیستم فتوولتاییک/حرارتی دارای فیلتر طیفی ترکیبی
ضریب انتقال حرارت هدایتی، $Wm^{-2}K^{-1}$	h_{cond}	نانوسیال-ماده تغییرفازدهنده کمترین دمای فتوولتاییک و بیشترین
ضریب انتقال حرارت جابجایی، $Wm^{-2}K^{-1}$	h_{conv}	دمای سیال خروجی را در مقایسه با دو سیستم بررسی شده دیگر به
ضریب انتقال حرارت تابشی، $Wm^{-2}K^{-1}$	h_{rad}	خود اختصاص داد.
چگالی تابش، Wm^{-2}	I	• سیستم فتوولتاییک/حرارتی با فیلتر طیفی ترکیبی قادر
چگالی تابش طیفی، $Wm^{-2}nm^{-1}$	I_λ	است به دمای سیال خروجی بالاتر از ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد
چگالی تابش پراکنده، Wm^{-2}	I_d	دست یابد درحالی‌که دمای فتوولتاییک زیر ۵۰ درجه سانتی‌گراد
چگالی جریان، Am^{-2}	j	نگه‌داشته‌می‌شود.
هدایت حرارتی، $Wm^{-1}K^{-1}$	K	• از دیدگاه انرژی سیستم فتوولتاییک/حرارتی معمولی بهترین
ثابت بولتزمن، $J\ K^{-1}$	k_B	عملکرد را داشت، درحالی‌که از دیدگاه انرژی سیستم فتوولتاییک/
طول، m	L	حرارتی با فیلتر طیفی ترکیبی نانوسیال-ماده تغییرفازدهنده بهترین
شاخص انکسار	n	عملکرد را از خود نشان داد.
عدد ناسلت	Nu	• استفاده از فیلتر طیفی ترکیبی نانوسیال-ماده تغییرفازدهنده در
دبی جرمی، kgs^{-1}	\dot{m}	نسبت‌های تمرکز بیشتر از ۱۵ پیشنهاد می‌شود چون بازده انرژی
فشار، Pa	P	با افزایش نسبت تمرکز افزایش قابل‌ملاحظه‌ای در مقایسه دو سیستم
عدد پراکتل	Pr	دیگر دارد.
بازده کوانتومی طیفی	QE_λ	• استفاده از فیلتر طیفی ترکیبی به جای فیلتر نانوسیالی در
بازتاب سطح تماس تابش مستقیم	r	نسبت تمرکز ۳۰، دمای فتوولتاییک را حدود ۲۵ درصد کاهش، دمای
بازتاب سطح تماس تابش پراکنده	r_d	فیلتر طیفی را حدود ۷۵ درصد افزایش، بازده انرژی را حدود ۲۲
عدد رایلی	Ra	درصد افزایش و انرژی تلف شده را حدود ۷ درصد کاهش می‌دهد.
عدد رینولدز	Re	
دما، K	T	
دمای آسمان، K	T_s	
دمای خورشید، $K6000$	T_{sun}	
ضریب عبور، زمان، s	t	
ولتاژ، V	V	
عرض، m	w	
علائم یونانی		
ضریب جذب	α	
ضریب انقراض	β	
ضخامت، m	δ	
افت هد فشاری، Pa	ΔP	
فهرست علائم		
علائم انگلیسی		
A	مساحت، m^2	
A'	فاکتور دیود	
C	نسبت تمرکز	
c_p	ظرفیت حرارتی، $J\ kg^{-1}K^{-1}$	
d	قطر، m	
e	بار الکترون، C	

* شرایط تنظیم شده

مراجع

- [1] X. Ju, C. Xu, X. Han, X. Du, G. Wei, Y. Yang, A review of the concentrated photovoltaic/thermal (CPVT) hybrid solar systems based on the spectral beam splitting technology, *Applied energy*, 563-534 (2017) 187.
- [2] F. Crisostomo, N. Hjerrild, S. Mesgari, Q. Li, R.A. Taylor, A hybrid PV/T collector using spectrally selective absorbing nanofluids, *Applied energy*, 14-1 (2017) 193.
- [3] N.E. Hjerrild, S. Mesgari, F. Crisostomo, J.A. Scott, R. Amal, R.A. Taylor, Spectrum splitting using gold and silver nanofluids for photovoltaic/thermal collectors, in: 2016 IEEE 43rd Photovoltaic Specialists Conference (PVSC), IEEE, 2016, pp. 3523-3518.
- [4] N.E. Hjerrild, J.A. Scott, R. Amal, R.A. Taylor, Exploring the effects of heat and UV exposure on glycerol-based Ag-SiO₂ nanofluids for PV/T applications, *Renewable Energy*, 274-266 (2018) 120.
- [5] J. Jin, D. Jing, A novel liquid optical filter based on magnetic electrolyte nanofluids for hybrid photovoltaic/thermal solar collector application, *Solar Energy*, 155 61-51 (2017).
- [6] N. Brekke, J. Dale, D. DeJarnette, P. Hari, M. Orosz, K. Roberts, E. Tunkara, T. Otanicar, Detailed performance model of a hybrid photovoltaic/thermal system utilizing selective spectral nanofluid absorption, *Renewable Energy*, 693-683 (2018) 123.
- [7] T. Otanicar, J. Dale, M. Orosz, N. Brekke, D. DeJarnette, E. Tunkara, K. Roberts, P. Harikumar, Experimental evaluation of a prototype hybrid CPV/T system utilizing a nanoparticle fluid absorber at elevated temperatures, *Applied energy*, 1539-1531 (2018) 228.
- [8] L. Huaxu, W. Fuqiang, L. Dong, Z. Jie, T. Jianyu, Optical properties and transmittances of ZnO-containing nanofluids in spectral splitting photovoltaic/thermal systems, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 678-668 (2019) 128.
- [9] M. Du, G. Tang, T. Wang, Exergy analysis of a hybrid PV/T system based on plasmonic nanofluids and silica

ε	ضریب گسیل
$\dot{\varepsilon}$	بازده انرژی
η	بازده انرژی
η_{pv}^*	بازده فتوولتائیک تنظیم شده
κ	شاخص خاموشی
λ	طول موج، m
λ_g	طول موج تابش خورشیدی متناظر با گاف انرژی سلول فتوولتائیک، m
μ	کسینوس جهتی
ρ	چگالی، kgm ⁻³
σ_s	ضریب پراکندگی
τ	ضریب عبور
θ	شیب کلکتور
ϕ	کسر حجمی نانوذرات
χ	ضخامت نوری
ω	تک پراکندگی آبدو

زیرنویس

a	هوا
abs	جاذب حرارتی
bf	سیال پایه
bp	صفحه پشتی
cf	سیال خنک‌کن
d	پراکنده
ele	الکتریکی
f	سیال
g	شیشه
i	عایق
l	مایع
nf	نانوسیال
np	نانوذره
oc	مدار باز
of	فیلتر طیفی مایع
pcm	ماده تغییر فاز دهنده
pv	فتوولتائیک
s	جامد، آسمان
sc	اتصال کوتاه
th	حرارتی
t	کلی

بالانویس

- processes, fourth editio, in, John Wiley & Sons, 2013.
- [21] T.L. Bergman, F.P. Incropera, D.P. DeWitt, A.S. Lavine, Fundamentals of heat and mass transfer, John Wiley & Sons, 2011.
- [22] K. Hollands, T. Unny, G. Raithby, L. Konicek, Free convective heat transfer across inclined air layers, Journal of Heat Transfer, (193-189 (1976).
- [23] R.K. Shah, A.L. London, Laminar flow forced convection in ducts: a source book for compact heat exchanger analytical data, Academic press, 2014.
- [24] M. Muhieddine, E. Canot, R. March, Various approaches for solving problems in heat conduction with phase change, (2009).
- [25] F. Goia, M. Perino, M. Haase, A numerical model to evaluate the thermal behaviour of PCM glazing system configurations, Energy and Buildings, 153-141 (2012) 54.
- [26] J.R. Howell, M.P. Menguc, R. Siegel, Thermal radiation heat transfer, CRC press, 2015.
- [27] M.F. Modest, Radiative heat transfer, Academic press, 2013.
- [28] H. Weindlader, Optische Charakterisierung von Latentwärmespeichermaterialien zur Tageslichtnutzung, (2003).
- [29] A.K. González-Alcalde, E.R. Méndez, E. Terán, F.L. Cuppo, J. Olivares, A. García-Valenzuela, Reflection of diffuse light from dielectric one-dimensional rough surfaces, JOSA A, 382-373 (2016) (3)33.
- [30] G. Kortüm, Reflectance spectroscopy: principles, methods, applications, Springer Science & Business Media, 2012.
- [31] A. Abdelrazik, F. Al-Sulaiman, R. Saidur, Optical behavior of a water/silver nanofluid and their influence on the performance of a photovoltaic-thermal collector, Solar Energy Materials and Solar Cells, (2019) 201 110054.
- [32] C.F. Bohren, D.R. Huffman, Absorption and scattering of light by small particles, John Wiley & Sons, 2008.
- [33] T. Mittal, S. Saroha, V. Bhalla, V. Khullar, H. Tyagi, R.A. Taylor, T.P. Otonicar, Numerical study of solar photovoltaic/thermal (PV/T) hybrid collector using aerogel glazing, Solar Energy, 511-501 (2019) 183.
- [10] Y. He, Y. Hu, H. Li, An Ag@ TiO₂/ethylene glycol/water solution as a nanofluid-based beam splitter for photovoltaic/thermal applications in cold regions, Energy Conversion and Management, 111838 (2019) 198.
- [11] X. Han, X. Chen, Q. Wang, S.M. Alelyani, J. Qu, Investigation of CoSO₄-based Ag nanofluids as spectral beam splitters for hybrid PV/T applications, Solar Energy, 394-387 (2019) 177.
- [12] M. Islam, A. Pandey, M. Hasanuzzaman, N. Rahim, Recent progresses and achievements in photovoltaic-phase change material technology: A review with special treatment on photovoltaic thermal-phase change material systems, Energy Conversion and Management, 204-177 (2016) 126.
- [13] S. Chandel, T. Agarwal, Review of cooling techniques using phase change materials for enhancing efficiency of photovoltaic power systems, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 1351-1342 (2017) 73.
- [14] H. Manz, P. Egolf, P. Suter, A. Goetzberger, TIM-PCM external wall system for solar space heating and daylighting, Solar energy, 379-369 (1997) (6)61.
- [15] D. Buddhi, S. Sharma, Measurements of transmittance of solar radiation through stearic acid: a latent heat storage material, Energy conversion and management, (18)40 1984-1979 (1999).
- [16] F. Goia, M. Zinzi, E. Carnielo, V. Serra, Spectral and angular solar properties of a PCM-filled double glazing unit, Energy and Buildings, 312-302 (2015) 87.
- [17] J.C. Fan, Theoretical temperature dependence of solar cell parameters, Solar cells, 315-309 (1986) (3-2)17.
- [18] T. Otonicar, R. Taylor, C. Telang, Photovoltaic/thermal system performance utilizing thin film and nanoparticle dispersion based optical filters, Journal of Renewable and Sustainable Energy, 033124 (2013) (3)5.
- [19] T. Chow, Performance analysis of photovoltaic-thermal collector by explicit dynamic model, Solar Energy, (2)75 152-143 (2003).
- [20] J.A. Duffie, W.A. Beckman, Solar engineering of thermal

- Transfer, 192-187 (1964) (2)86.
- [37] A. Farzanehnia, M. Sardarabadi, Exergy in Photovoltaic/Thermal Nanofluid-Based Collector Systems, in: Exergy and Its Application-Toward Green Energy Production and Sustainable Environment, IntechOpen, 2019.
- [38] Y. Cui, Q. Zhu, Study of photovoltaic/thermal systems with MgO-water nanofluids flowing over silicon solar cells, in: 2012 Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference, IEEE, 2012, pp. 4-1.
- nanofluids, in: ASME 4 2013th international conference on micro/nanoscale heat and mass transfer, American Society of Mechanical Engineers Digital Collection, 2013.
- [34] R.A. Taylor, T. Otanicar, G. Rosengarten, Nanofluid-based optical filter optimization for PV/T systems, Light: Science & Applications, (2012) (10)1 e-34e34.
- [35] N. Aste, C. del Pero, F. Leonforte, Water flat plate PV-thermal collectors: a review, Solar Energy, -98 (2014) 102-115.
- [36] R. Petela, Exergy of heat radiation, Journal of Heat

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

F. Yazdanifard, M. Ameri, R. Taylor, Investigation of using hybrid nanofluid-phase change material spectral splitter in photovoltaic/thermal system, Amirkabir J. Mech Eng., 53(7) (2021) 4429-4454.

DOI: [10.22060/mej.2020.18326.6800](https://doi.org/10.22060/mej.2020.18326.6800)



