

نوع مقاله: پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۱۲/۱۰ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۲/۷

بررسی آزمایشگاهی عملکرد گرمایی و الکتریکی یک سیستم فتولتائیک/گرمایی با خنک کاری نانوسیال و مجهز به کلکتور صفحه-لوله ماریپیچی شیاردار

امین شهبسوار

استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه صنعتی کرمانشاه، کرمانشاه، ایران

a.shahsavara@kut.ac.ir

چکیده: در این مقاله، عملکرد گرمایی و الکتریکی سیستم‌های فتولتائیک/گرمایی مجهز به کلکتور صفحه-لوله ماریپیچی شیاردار به صورت آزمایشگاهی بررسی شده است. از نانوسیال آب-مگنتیت به عنوان سیال انتقال گرما استفاده شده است. تأثیر غلظت نانوذرات (۰-۱ درصد)، دبی جرمی نانوسیال (۱۰-۴۰ کیلوگرم بر ساعت) و گام شیاردار (۰، ۵/۴ و ۸ میلی‌متر) بر روی پارامترهای عملکردی سیستم شامل دمای پنل فتولتائیک، راندمان گرمایی، راندمان الکتریکی و راندمان کل بررسی شده است. همه آزمایش‌ها در شرایط محیطی (شدت تابش خورشیدی و دمای محیط) مشابه و با استفاده از شبیه‌ساز خورشیدی انجام شده است. نتایج نشان داد که شیاردار کردن لوله ماریپیچی منجر به بهبود عملکرد گرمایی، الکتریکی و کلی سیستم فتولتائیک گرمایی می‌شود. همچنین مشاهده شد که سیستم با گام شیاردار ۵/۴ میلی‌متر دارای عملکرد گرمایی، الکتریکی و کلی بهتری از سیستم با گام شیاردار ۸ میلی‌متر است. طبق نتایج، راندمان‌های گرمایی، الکتریکی و کل سیستم با صفحه-لوله ماریپیچی شیاردار با گام ۵/۴ میلی‌متر، به ترتیب در محدوده ۳۷/۰۳-۵۰/۸۹، ۱۲/۲۹-۱۲/۳۸ و ۶۹/۳۷-۸۳/۴۷ درصد است. همچنین نتایج نشان داد که افزایش غلظت نانوذرات و دبی جرمی نانوسیال منجر به بهبود عملکردهای گرمایی، الکتریکی و کلی هر سه سیستم مورد بررسی در تحقیق حاضر می‌شود.

واژه‌های کلیدی: سیستم فتولتائیک/گرمایی، نانوسیال، لوله ماریپیچی شیاردار، راندمان گرمایی، راندمان الکتریکی، انرژی خورشیدی.

۱. مقدمه

سیستم‌های انرژی خورشیدی را می‌توان به دو دسته کلی تقسیم کرد: کلکتورهای خورشیدی و پنل‌های فتوولتائیک. از پنل‌های فتوولتائیک برای تبدیل مستقیم انرژی خورشیدی به برق استفاده می‌شود، درحالی‌که کلکتورهای خورشیدی می‌توانند انرژی خورشیدی را به انرژی گرمایی تبدیل کنند. پنل‌های فتوولتائیک مورد توجه گسترده قرار گرفته‌اند به‌نحوی که ظرفیت نصب‌شده آن‌ها در پایان سال ۲۰۱۸، نسبت به سال ۲۰۱۷، ۲۷٪ افزایش یافته است [۱]. دلایل این استقبال چشمگیر، رشد مداوم در بهره‌وری الکتریکی و کاهش مداوم قیمت آن‌هاست [۱]. با این حال، این پنل‌ها معایبی نیز دارند که یکی از آن‌ها، کاهش راندمان الکتریکی آن‌ها با افزایش دماست. در ساعت‌هایی که شدت تابش خورشید زیاد است، دمای پنل‌ها نیز زیاد است که باعث می‌شود تا پنل‌ها نسبت به ساعات با شدت تابش کم کارایی کمتری داشته باشند. در واقع می‌توان گفت در زمان‌هایی که بیشتر به پنل نیاز داریم، بازده پنل کمترین است. بنابراین مشکل ذکرشده بسیار حاد است و روش‌های مختلفی برای حل آن توسط محققان پیشنهاد شده است. یکی از جالب‌ترین ایده‌ها استفاده از یک سیال برای دریافت گرمای اضافی از پنل‌ها و در نتیجه، خنک شدن آن‌هاست. سیال گرم‌شده که در کاربردهایی مانند تهویه مطبوع قابل استفاده است، نیز محصول جانبی این سیستم‌هاست. عملکرد این سیستم‌ها که سیستم‌های فتوولتائیک/گرمایی (PVT^۱) نامیده می‌شوند، به‌طور گسترده توسط محققان مختلف در سراسر جهان مورد مطالعه قرار گرفته است. وایشاک و باله [۲] تأثیر جنس کلکتور بر روی عملکرد یک سیستم PVT را به‌صورت آزمایشگاهی بررسی کردند. آن‌ها از سه کلکتور شیشه‌ای، مسی و تدار-پلی‌استر-تدار استفاده کردند؛ نتایج نشان داد که استفاده از کلکتور تدار-پلی‌استر-تدار منجر به کمترین دمای پنل فتوولتائیک می‌شود، درحالی‌که بهترین عملکرد سیستم متعلق به سیستم با کلکتور مسی است. سلطانی و همکاران [۳] عملکرد یک سیستم ترکیبی PVT-ترموالکتریک را به‌صورت آزمایشگاهی بررسی کردند. آن‌ها از نانوسیال‌های آب-مگنتیت و آب-سیلیکا به‌عنوان خنک‌کن در سیستم PVT استفاده کردند؛ نتایج نشان داد که نانوسیال آب-سیلیکا دارای عملکرد گرمایی بهتری از نانوسیال آب-مگنتیت است. همچنین دیده شد که استفاده از نانوسیال به‌جای آب، منجر به افزایش راندمان انرژی سیستم می‌شود. فواس و همکاران [۴] یک مدل عددی برای بررسی عملکرد الکتریکی و گرمایی نیروگاه PVT واقع در کاتانیا در ایتالیا ارائه کردند. آن‌ها از داده‌های آزمایشگاهی برای اعتبارسنجی مدل عددی استفاده کردند. سیستم مورد بررسی آن‌ها قادر به تولید ۰/۸۳ کیلووات ساعت/متر

مربع انرژی الکتریکی و ۰/۵۳ کیلووات بر ساعت انرژی گرمایی بود. هیسوف و همکاران [۵] عملکرد یک سیستم PVT جدید را که در آن به‌طور هم‌زمان از دو سیال آب و مخلوط آب-تیلن گلیکول برای خنک‌کاری پنل فتوولتائیک استفاده می‌شد، به‌صورت نظری بررسی کردند. آن‌ها از کانال‌های با سطح مقطع دایره‌ای، نیم‌دایره‌ای و مستطیلی در سیستم PVT استفاده کردند؛ نتایج نشان داد که بهترین عملکرد سیستم از دیدگاه قانون اول متعلق به سیستم با کانال نیم‌دایره‌ای است. لو و همکاران [۶] به‌صورت آزمایشگاهی، امکان استفاده از چرخه تزریق بخار برای بهبود عملکرد سیستم پمپ گرمایی PVT در زمستان را مورد تجزیه و تحلیل قرار دادند. عملکرد سیستم برای دمای محیط ۱/۱۳- درجه سانتی‌گراد و شدت تابش ۱۶۴/۰۳ وات بر متر مربع بررسی شد. نتایج نشان داد که توان الکتریکی، توان گرمایی و توان مصرفی سیستم، به‌ترتیب ۰/۵۱ کیلووات ساعت، ۲۳/۶۸ کیلووات ساعت و ۷/۲۴ کیلووات ساعت است. حسین و همکاران [۷] عملکرد گرمایی یک سیستم PVT با کلکتور مارپیچی را به‌صورت آزمایشگاهی بررسی کردند. مشاهده شد که خنک‌کاری پنل منجر به بهبود راندمان‌های الکتریکی و انرژی سیستم به میزان ۰/۵۷ و ۵/۸۲ درصد می‌شود. سلامی و همکاران [۸] عملکرد یک سیستم PVT مجهز به سیستم گردش هوا را به‌صورت تجربی عددی بررسی کردند. در این سیستم، توان موردنیاز فن به‌طور مستقیم توسط پنل فتوولتائیک تامین می‌شود. نتایج نشان داد که برای مقادیر کم دبی جرمی، سیستم PVT یک گزینه جذاب برای به‌کارگیری در ساختمان‌ها در فصل سرد است. بوماراف و همکاران [۹] به‌طور آزمایشی عملکرد یک سیستم PVT را تحت شرایط آب و هوایی منطقه نیمه خشک بررسی کردند. طبق نتایج، راندمان‌های الکتریکی، گرمایی و کلی سیستم برای پنل فتوولتائیک بدون خنک‌کاری، به‌ترتیب برابر با ۶/۷۸ و ۱۷/۴۳٪ بود، درحالی‌که این مقادیر برای سیستم PVT، به‌ترتیب برابر با ۷، ۶۱ و ۷۹/۴۳٪ بود. سلیمانی و همکاران [۱۰] به‌طور عددی ویژگی‌های عملکرد یک سیستم PVT مجهز به صفحات فلزی پره‌دار را مطالعه کردند؛ نتایج نشان داد که افزایش تعداد پره‌ها منجر به بهبود چشمگیر دمای خروجی سیال و عملکرد گرمایی سیستم و بهبود ناچیز عملکرد الکتریکی سیستم می‌شود. خنک‌کننده‌های رایج مورد استفاده در سیستم‌های PVT شامل هوا و آب هستند. آب به‌دلیل ظرفیت گرمایی ویژه بالاتر، از هوا کارآمدتر است، اما سیستم‌های PVT مبتنی بر هوا نیز به‌دلیل هزینه کمتر در مقایسه با سیستم‌های PVT مبتنی بر آب، بسیار مورد استفاده قرار می‌گیرند. یک مشکل مشترک هوا و آب، هدایت گرمایی پایین آن‌هاست که ممکن است عملکرد خنک‌کاری آن‌ها را تضعیف کند. استفاده از نانوسیال‌ها می‌تواند راه‌حل خوبی برای حل این مشکل باشد. نانوسیال‌ها سوسپانسیون

سیال انتقال گرما استفاده شده است. تأثیر غلظت حجمی نانوذرات و دبی جرمی نانوسیال بر روی دمای پنل فتولتائیک، راندمان گرمایی، راندمان الکتریکی و راندمان کل بررسی شده است. بررسی ادبیات تحقیق نشان می‌دهد که تحقیق حاضر اولین مطالعه آزمایشگاهی بر روی عملکرد سیستم‌های PVT با کلکتور صفحه-لوله ماریپیچی شیاردار است.

۲. سیستم آزمایشگاهی

به منظور ارزیابی و مقایسه عملکرد سیستم‌های PVT مورد بررسی در تحقیق حاضر، شرایط آب‌وهوایی مانند دمای محیط و شدت تابش خورشید باید در آزمایش‌های مختلف مشابه باشند. بنابراین، آزمایش‌ها با استفاده از یک شبیه‌ساز خورشیدی با قابلیت تولید شار گرمایی یکنواخت (۱۰۰۰ وات بر متر مربع) در دمای ثابت محیط (۲۲ درجه سانتی‌گراد) انجام شد (شکل (۱-الف)). این شبیه‌ساز شامل چهار لامپ LED ۱۰ وات، چهار لامپ متال هالید ۴۰۰ وات (Reflector Sunlight Dysprosium Lamp, RSDL)، یک جعبه آلومینیومی، چهار فن DC و یک دیمر AC است. شدت تابش درون شبیه‌ساز با استفاده از یک دستگاه لوکس متر Trotec BF06 اندازه‌گیری شد. هر سه سیستم PVT مورد بررسی در تحقیق حاضر شامل یک پنل فتولتائیک ۱۰ وات ساخت شرکت Eco-Worthy آمریکا می‌باشند که مشخصات آن در جدول (۱) ارائه شده است. برای ارزیابی تأثیر خنک‌سازی بر روی دما و توان خروجی صفحه فتولتائیک، از ۲۰ ترموکوپل نوع K برای اندازه‌گیری دمای پنل فتولتائیک در ۲۰ نقطه و از یک مولتی متر LUTRUN برای به دست آوردن ولتاژ و جریان خروجی پنل استفاده شد. شکل (۱-ب) موقعیت ترموکوپل‌ها را بر روی پنل فتولتائیک نشان می‌دهد. ترموکوپل‌ها به یک دیتالاگر JUMO متصل شدند. از دو ترموکوپل نوع K نیز برای اندازه‌گیری دمای ورودی و خروجی نانوسیال استفاده شد.

شکل (۲) طرح‌واره سه کلکتور صفحه-لوله به کار گرفته شده در سیستم PVT مورد بررسی در تحقیق حاضر را نشان می‌دهد. کلکتورها که از جنس مس ساخته شدند، با استفاده از گریس گرمایی به پایین صفحه فتولتائیک متصل شدند و لوله ماریپیچی نیز به پایین کلکتور جوش زده شد. بدین شکل، گرمای پنل فتولتائیک به کلکتور و از کلکتور به لوله ماریپیچی منتقل شد و در نهایت، نانوسیال جاری در لوله، گرما را از جداره لوله اخذ کرده و گرم می‌شد. شایان ذکر است که لوله ماریپیچی نیز از جنس مس ساخته شد. برای جلوگیری از اتلاف گرما به محیط اطراف، از پشم سنگ برای عایق کردن لوله استفاده شد. همان طور که در شکل (۲-الف) دیده می‌شود، در طرح ۱، از لوله ماریپیچی صاف با سطح مقطع

نانوذرات فلزی/غیرفلزی در خنک‌کننده‌های معمولی هستند [۱۱]. از زمان ظهور نانوسیال‌ها در سال ۱۹۹۵، تحقیقات زیادی بر روی خصوصیات ترموفیزیکی و کاربردهای نانوسیال انجام شده و عمدتاً گزارش شده است که نانوسیال‌ها از هدایت گرمایی و عملکرد خنک‌کاری بهتری نسبت به خنک‌کننده‌های رایج برخوردارند [۱۲]. عملکرد نانوسیال‌های مختلف در سیستم‌های PVT نیز توسط برخی محققان بررسی شده است. آباده و همکاران [۱۳] تجزیه و تحلیل اقتصادی و زیست‌محیطی استفاده از نانوسیال‌های آب-ZnO، آب-Al₂O₃ و آب-TiO₂ را در سیستم‌های PVT انجام دادند. آن‌ها همچنین دوره بازپرداخت سیستم‌های PVT را با پنل فتولتائیک بدون خنک‌سازی مقایسه کردند. لاری و شاهین [۱۴] به‌طور عددی عملکرد سیستم PVT مبتنی بر نانوسیال مجهز به مواد تغییر فاز دهنده را ارزیابی کردند. نتایج نشان داد که خروجی الکتریکی سیستم ۱۱/۷٪ بیشتر از یک صفحه فتولتائیک خنک نشده است. مرادقلی و همکاران [۱۵] به‌طور آزمایشگاهی، استفاده از نانوسیال متانول-Al₂O₃ در یک آرایه دو فازی بسته ترموسیفون به‌عنوان یک سیستم PVT ابتکاری را مورد مطالعه قرار دادند. اثرات نسبت پر شدن و غلظت نانوذرات بر روی عملکرد انرژی سیستم PVT مورد بررسی قرار گرفت. آن‌ها دریافتند که استفاده از سیستم PVT منجر به کاهش ۱۴/۵۲ درجه‌ای دمای پنل فتولتائیک می‌شود. سالاری و همکاران [۱۶] به‌طور عددی عملکرد یک سیستم PVT مبتنی بر نانوسیال و مجهز به مواد تغییر فاز دهنده بررسی کردند. آن‌ها نتایج مدل‌های مخلوط تک فاز و دو فاز را با یکدیگر مقایسه کردند. تأثیر نوع خنک‌کننده، دبی جرمی و ضخامت لایه ماده تغییر فاز دهنده بر روی معیارهای عملکردی سیستم PVT به‌صورت عددی بررسی شد. کیز و همکاران [۱۷] بهینه‌سازی چندهدفه یک سیستم PVT مبتنی بر نانوسیال را با استفاده از روش یکپارچه فازی انجام داد. آن‌ها تأثیر شدت تابش خورشید، دمای محیط، دبی جرمی و غلظت نانوذرات را بر روی ویژگی‌های عملکردی سیستم PVT بررسی کردند. جیا و همکاران [۱۸] شبیه‌سازی‌هایی را برای تجزیه و تحلیل عملکرد گرمایی و الکتریکی یک سیستم PVT مبتنی بر نانوسیال انجام دادند. خنک‌کننده‌های در نظر گرفته شده، نانوسیال‌های آب-Al₂O₃ و آب-TiO₂ بود. آن‌ها گزارش دادند که عملکردهای گرمایی و الکتریکی سیستم با افزایش دبی جرمی افزایش می‌یابد.

در تحقیق آزمایشگاهی حاضر، عملکرد گرمایی و الکتریکی سه سیستم PVT مجهز به کلکتور صفحه-لوله ماریپیچی با یکدیگر مقایسه شده است. در طرح ۱، از لوله ماریپیچی صاف استفاده شده درحالی‌که در طرح‌های ۲ و ۳ از لوله ماریپیچی شیاردار استفاده شده است. تعداد شیارها در طرح ۳ بیشتر از طرح ۲ است. در هر سه طرح، از نانوسیال آب-مگنتیت به‌عنوان

فشار نانوسیال در داخل لوله مارپیچی با استفاده از یک فشارسنج دیفرانسیل مدل Rosemount 3051CD اندازه‌گیری می‌شود. شکل (۳) طرح‌واره‌ای از دستگاه آزمایشی مورد استفاده در تحقیق حاضر را نشان می‌دهد. علاوه بر این، مشخصات تجهیزات مورد استفاده در دستگاه آزمایشی نیز در جدول (۲) ارائه شده است.

۳. سنتز نانوسیال و تعیین خواص ترموفیزیکی آن

در این تحقیق تجربی، از سوسپانسیون آبی نانوذرات مگنتیت به‌عنوان سیال انتقال گرما استفاده شده است. برای سنتز این نانوسیال، از روش هم‌رسوبی استفاده شده که شامل مراحل زیر است [۱۹]:

- ۶۷/۵۸ گرم $FeCl_3 \cdot 6H_2O$ با ۱۰۰ میلی‌لیتر اسید هیدروکلریک دو مولار مخلوط می‌شود.

- ۳۹/۷۶ گرم $FeCl_2 \cdot 4H_2O$ با ۱۰۰ میلی‌لیتر اسید هیدروکلریک دو مولار مخلوط می‌شود.

- محلول‌های به‌دست‌آمده در مراحل قبلی با نسبت ۴ به ۱ با کمک همزن مغناطیسی برای مدت ۲ دقیقه با سرعت ۱۰۰ دور در دقیقه هم‌زده می‌شوند.

جدول (۱): مشخصات فنی پنل فتوولتائیک به‌کار گرفته‌شده در تحقیق

حاضر در شرایط استاندارد

نوع	سیلیکون تک‌کریستالی
توان اسمی (وات)	۱۰
راندمان ماکزیمم (%)	۱۶
تعداد سلول‌ها	۷۲
Fill factor	۰/۷۲۶
ابعاد (سانتی‌متر)	۲×۱۸×۳۳
وزن (کیلوگرم)	۰/۸۲
جریان اتصال کوتاه (آمپر)	۰/۶۹
ولتاژ مدار باز (ولت)	۲۰/۶
ضریب دمایی توان (% بر درجه سانتی‌گراد)	-۰/۴۷
محدوده دمای کاری (درجه سانتی‌گراد)	۸۰- تا ۴۰-
ضخامت شیشه (میلی‌متر)	۳/۲

جدول (۲): مشخصات تجهیزات مورد استفاده در دستگاه آزمایشگاهی

دستگاه	مدل	دقت
لوکس متر	TROTEC-BF06	±/۵
ترمومتر	K-type	±۰/۷۵
ترموکوپل	TES-1327 K	±/۱
مولتی‌متر	LUTURON-DW6060	±۰/۷۸
مولتی‌متر	LUTURON-DW6060	±/۱
دبی‌سنج	Malema-M10000	±/۲
فشارسنج	Rosemount 3051CD	±/۱

مربعی با طول ضلع ۸ میلی‌متر و ضخامت ۱ میلی‌متر استفاده شده است. در شکل‌های (۲-ب و ۲-ج) نیز دیده می‌شود که لوله‌های مارپیچی مورد استفاده در طرح‌های ۲ و ۳ شیاردار هستند و تعداد شیارها در طرح ۳ بیشتر از طرح ۲ است. گام شیار در طرح ۲ برابر با ۸ میلی‌متر و در طرح ۳ برابر با ۵/۴ میلی‌متر است. همچنین، سطح مقطع شیارها مربعی با طول ضلع ۱۰ میلی‌متر است. شیارها باعث تشکیل جریان‌های ثانویه در جریان نانوسیال می‌شود که لایه مرزی گرمایی را به هم ریخته و منجر به افزایش انتقال گرما می‌شود. البته از طرف دیگر، شیارها منجر به افزایش افت فشار نانوسیال، و بنابراین افزایش توان پمپاژ مورد نیاز برای جاری ساختن نانوسیال در لوله مارپیچی می‌شود که به هیچ وجه مطلوب نیست.



(الف)

T ₁	T ₆	T ₁₁	T ₁₆
T ₂	T ₇	T ₁₂	T ₁₇
T ₃	T ₈	T ₁₃	T ₁₈
T ₄	T ₉	T ₁₄	T ₁₉
T ₅	T ₁₀	T ₁₅	T ₂₀

(ب)

شکل (۱): (الف) تصویر شبیه‌ساز خوردشیدی مورد استفاده در تحقیق حاضر و (ب) موقعیت ترموکوپل‌های متصل‌شده بر روی صفحه فتوولتائیک

به‌منظور مقایسه دقیق عملکرد خنک‌کاری نانوسیال در آزمایش‌های مختلف، دمای ورودی نانوسیال به کلکتور در تمام آزمایش‌ها ثابت (۲۰ درجه سانتی‌گراد) در نظر گرفته شده است. بنابراین باید دمای نانوسیال گرم‌شده خروجی از لوله مارپیچی کاهش یابد تا دوباره بتوان از آن استفاده کرد. برای این منظور، نانوسیال وارد یک مبدل گرمایی صفحه‌ای شده و گرمای خود را به محلول آب‌خس از یک حمام دما ثابت ۱۸۰۰ وات منتقل می‌کند. نانوسیال خروجی از مبدل گرمایی وارد یک مخزن ذخیره‌سازی ۲ لیتری می‌شود و سپس با استفاده از پمپ ۲۰ ولت DC با هد ۳/۵ متر و سرعت پمپ قابل تنظیم در داخل سیستم گردش می‌کند. میزان دبی مایع خنک‌کننده با استفاده از دبی‌سنج روتاری Malema-M10000 قرار گرفته پس از پمپ، اندازه‌گیری می‌شود. افت

- محلول تولیدشده در مرحله قبل، حاوی نانو ذرات مگنتیت است که با قرار دادن ظرف حاوی محلول روی یک آهن ربا، در پایین ظرف جمع می شوند و محلول جمع شده در بالای ظرف تخلیه می شود. رسوب موجود در ته ظرف برای مدت یک دقیقه با سرعت ۵۰۰۰ دور بر دقیقه سانتریفیوژ می شود تا نانوذرات مگنتیت از آمونیاک و آب جدا شده و در ظروف سانتریفیوژ رسوب کنند. در انتها، آمونیاک و آب موجود در ظروف سانتریفیوژ تخلیه شده و سپس، ۸ میلی لیتر محلول ۰.۲۵٪ تترامیل آمونیوم هیدروکسید به طور مساوی بین ظروف سانتریفیوژ تقسیم شده و هم زده می شود و محتوای ظروف در داخل یک بشر ریخته شده و با استفاده از همزن مغناطیسی برای مدت ۳۰ دقیقه هم زده می شود. برای ارزیابی پایداری نمونه های نانوسیال تهیه شده با این روش، چگالی مقدار مشخصی از نانوسیال ها در طول آزمایش های مختلف با استفاده از یک چگالی سنج (KEN, DA-130N, ژاپن) اندازه گیری شد. نتایج نشان داد که تغییرات چگالی ناچیز است و در نتیجه، نانوسیال های تهیه شده پایدار هستند. خواص ترموفیزیکی نمونه های نانوسیال سنتز شده در جدول (۳) ارائه شده اند. هدایت گرمایی نانوسیال با استفاده از دستگاه KD2-Pro (شرکت Decagon, ایالات متحده آمریکا) اندازه گیری شد. این دستگاه دارای سنسور KS-1 است که باید به مدت ۹۰ ثانیه در داخل محلول قرار گیرد. برای دقت بیشتر، هدایت گرمایی هر نمونه ۵ بار در فواصل ۲۰ دقیقه ای تکرار شد و مقدار گزارش شده در جدول (۳) در واقع میانگین مقادیر به دست آمده از ۵ آزمایش است. برای کالیبراسیون دستگاه، هدایت گرمایی گلیسرول و آب در دمای ۲۰ درجه سانتی گراد اندازه گیری شد و مقادیر به دست آمده (۰/۲۷۴ W/mK برای گلیسرول و ۰/۵۸۶ W/mK برای آب) با مقادیر موجود در یک منبع معتبر مقایسه شد (۰/۲۸۵ W/mK برای گلیسرول و ۰/۵۹۸ W/mK برای آب) [۲۰]. تفاوت بین نتایج آزمایش و مقادیر گزارش شده در مرجع [۲۰] کمتر از ۳/۹٪ بود. علاوه بر این، چگالی (ρ_{nf}) و گرمای ویژه ($c_{p,nf}$) نانوسیال با استفاده از معادلات زیر محاسبه می شود [۱۹]:

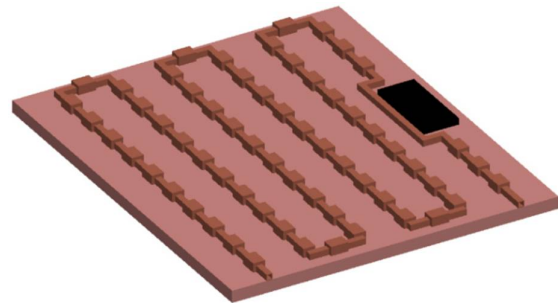
$$\rho_{nf} = (1 - \varphi)\rho_w + \varphi\rho_p \quad (1)$$

$$c_{p,nf} = \frac{(1 - \varphi)\rho_w c_{p,w} + \varphi\rho_p c_{p,p}}{\rho_{nf}} \quad (2)$$

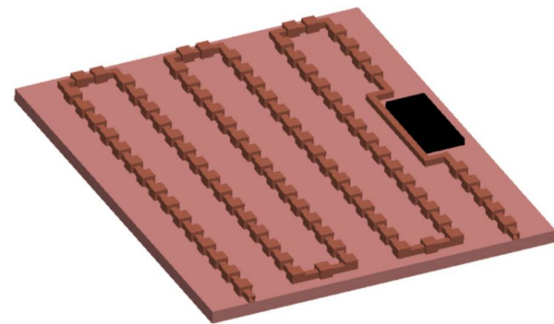
که φ غلظت حجمی نانوذرات است و اندیس های w و nf به ترتیب نشان دهنده نانوسیال، آب و نانوذرات است. چگالی و ظرفیت گرمایی نانوذرات مگنتیت به ترتیب ۵۲۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب و ۶۷۰ ژول بر کیلوگرم-کلوین است و این مقادیر برای آب به ترتیب ۹۹۷ کیلوگرم بر مترمکعب و ۴۱۷۹ ژول بر کیلوگرم-کلوین است.



(الف)

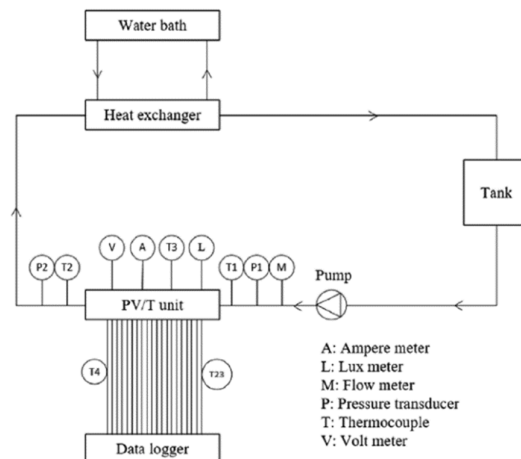


(ب)



(ج)

شکل (۲): کلکتورهای صفحه-لوله مورد استفاده در سیستم PVT مورد بررسی در تحقیق حاضر؛ (الف) طرح ۱، (ب) طرح ۲ و (ج) طرح ۳



شکل (۳): طرح واره دستگاه آزمایشگاهی

$$\eta_{ov} = \eta_{th} + \frac{\eta_{el}}{0.36} \quad (۶)$$

۵. آنالیز عدم قطعیت

دقت نتایج یکی از مهم‌ترین مشکلاتی است که در هر تحقیق تجربی مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. در این مطالعه، از روش معروف و پرکاربرد موفات [۲۱] برای بررسی عدم قطعیت نتایج استفاده شده است. طبق این روش، عدم قطعیت متغیر وابسته (R) تابعی از عدم قطعیت متغیرهای مستقل (v_1, v_2, \dots, v_n) است و با استفاده از معادله زیر محاسبه می‌شود:

$$\delta R = \sqrt{\left(\frac{\partial R}{\partial v_1} \delta v_1\right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial R}{\partial v_n} \delta v_n\right)^2} \quad (۱۰)$$

که δ نشان دهنده عدم قطعیت یک پارامتر است. نتایج نشان داد که عدم قطعیت راندمان انرژی الکتریکی و راندمان انرژی گرمایی سیستم‌های PVT مورد بررسی در تحقیق حاضر، به ترتیب کمتر از ۵/۱۶ و ۴/۴ است. جزئیات روابط مورد استفاده برای محاسبه عدم قطعیت این پارامترها، در مرجع [۲۲] ارائه شده است.

۶. نتایج

در این بخش، نتایج آزمایش‌های انجام‌شده بر روی سیستم‌های PVT مورد بررسی در تحقیق حاضر ارائه می‌شود. تأثیر غلظت حجمی نانوذرات (۱۰-۴۰ کیلوگرم بر ساعت) و گام شیار (۰، ۵/۴ و ۸ میلی‌متر) بر روی پارامترهای عملکردی سیستم بررسی می‌شود.

تغییرات راندمان گرمایی سیستم‌های PVT مورد بررسی در تحقیق حاضر برحسب غلظت نانوذرات و دبی جرمی نانوسیال در شکل (۴) نمایش داده شده است. طبق نتایج، راندمان گرمایی طرح‌های ۱، ۲ و ۳، به ترتیب در محدوده ۳۰/۸۹-۴۱/۰۹، ۳۴/۵۷-۴۶/۸۱ و ۳۷/۰۳-۵۰/۸۹ درصد است. کمترین و بیشترین راندمان گرمایی، به ترتیب متعلق به طرح ۱ و طرح ۳ است. شیارها منجر به بهبود اختلاط نانوسیال و در نتیجه، افزایش نرخ انتقال گرما از جداره لوله به نانوسیال می‌شود. همچنین، نتایج نشان می‌دهد که افزایش غلظت نانوذرات و دبی جرمی نانوسیال منجر به افزایش راندمان گرمایی سیستم‌های PVT مورد بررسی می‌شود که به ترتیب ناشی از افزایش ضریب هدایت گرمایی و سرعت نانوسیال است. برای مثال، در غلظت نانوذرات ۱/۱، افزایش دبی جرمی نانوسیال از ۱۰ کیلوگرم بر ساعت به ۴۰ کیلوگرم به ساعت منجر به افزایش راندمان گرمایی طرح‌های ۱، ۲ و ۳ به میزان ۱۹/۹۴، ۲۲/۳۵ و ۲۴/۴۶ می‌شود. همچنین، در دبی جرمی ۴۰ کیلوگرم بر ساعت، افزایش غلظت نانوذرات از ۰ به ۱ منجر به افزایش راندمان گرمایی طرح‌های ۱، ۲ و ۳ به میزان ۵/۳۷، ۸/۸۱ و ۱۰/۳۷ می‌شود.

جدول (۳): خواص ترموفیزیکی نمونه‌های نانوسیال

k (W/m.K)	ρ (kg/m ³)	c_p (J/kg.K)	ϕ (%)
۰/۶۱۰	۹۹۷	۴۱۸۰	۰
۰/۶۵۱	۱۰۰۶/۸۸	۴۱۳۶/۴۹	۰/۲۵
۰/۶۹۵	۱۰۱۶/۷۷	۴۰۹۳/۸۳	۰/۵
۰/۸۷۳	۱۰۳۶/۵۳	۴۰۱۰/۹۵	۱

۴. آنالیز انرژی

سیستم‌های PVT قادر به تولید همزمان برق و گرما هستند و در نتیجه، عملکرد آن‌ها را می‌توان از دیدگاه الکتریکی و گرمایی بررسی کرد. برای بررسی عملکرد الکتریکی که عبارت است از نسبت توان الکتریکی خروجی سیستم به میزان انرژی خورشیدی ورودی، از راندمان الکتریکی استفاده می‌شود [۲۰]:

$$\eta_{el} = \frac{VI - \dot{E}_p}{I_r A_{pv}} \times 100 \quad (۳)$$

که I_r شدت تابش خورشیدی، A_{pv} مساحت پنل فتوولتائیک، V ولتاژ خروجی پنل فتوولتائیک، I جریان خروجی پنل فتوولتائیک و \dot{E}_p توان الکتریکی مورد نیاز برای پمپ کردن سیال به داخل لوله است که با استفاده از رابطه زیر محاسبه می‌شود [۲۰]:

$$\dot{E}_p = \frac{\dot{m} \Delta p}{\rho n_f \eta_p} \quad (۴)$$

که \dot{m} دبی جرمی نانوسیال، Δp افت فشار نانوسیال و η_p راندمان پمپ است که برابر با ۷۵٪ در نظر گرفته شده است.

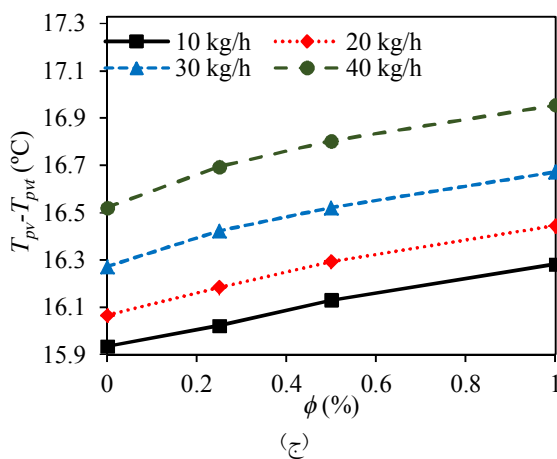
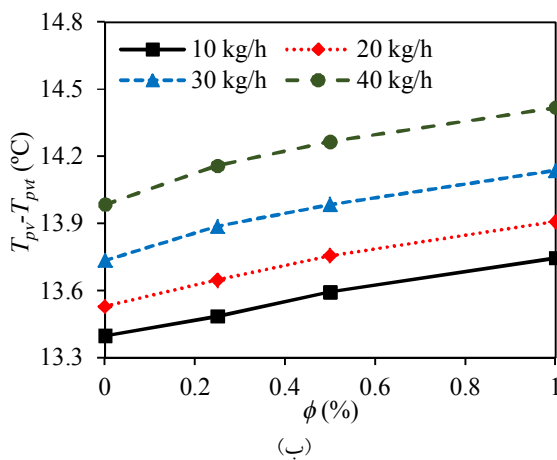
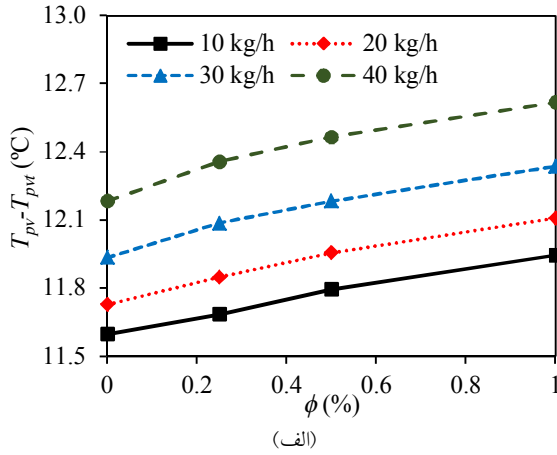
عملکرد گرمایی سیستم با استفاده از راندمان گرمایی که عبارت است از نسبت گرمای منتقل شده به سیال جاری در سیستم به میزان انرژی خورشیدی ورودی بررسی می‌شود [۲۰]:

$$\eta_{th} = \frac{\dot{m} c_p (T_{out} - T_{in})}{I_r A_{pv}} \times 100 \quad (۵)$$

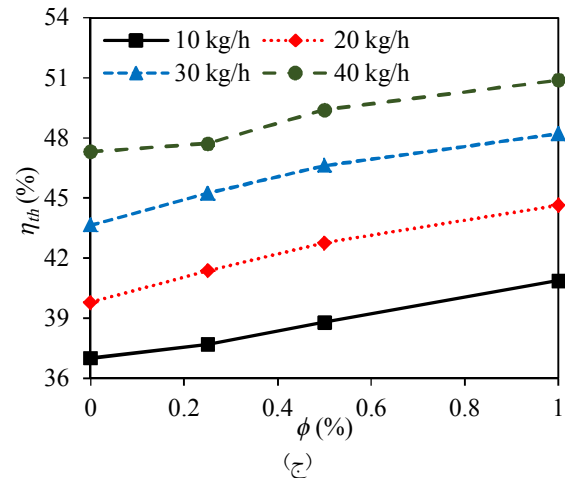
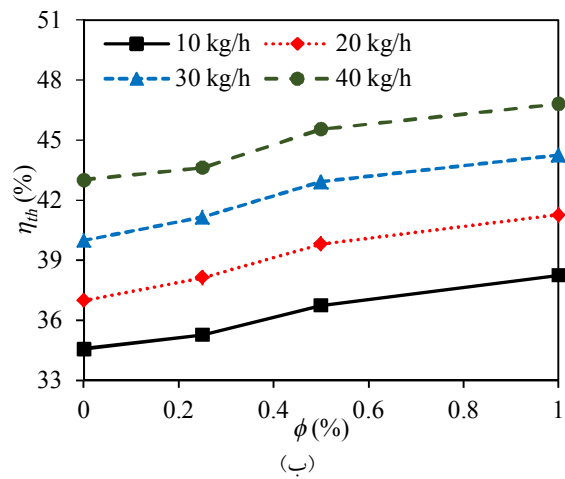
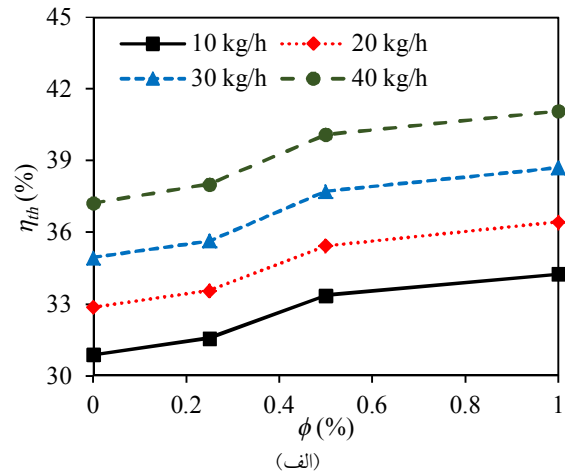
که T_{in} دمای ورودی نانوسیال به سیستم و T_{out} دمای خروجی نانوسیال از سیستم است.

انرژی الکتریکی را به راحتی می‌توان با راندمان ۱۰۰٪ به انرژی گرمایی تبدیل کرد درحالی‌که عکس آن امکان‌پذیر نیست. بنابراین انرژی الکتریکی در مقایسه با انرژی گرمایی، انرژی سطح بالاتری است. گروهی از محققان اعتقاد دارند که برای محاسبه انرژی کل تولیدی سیستم PVT صحیح نیست که انرژی الکتریکی را با انرژی گرمایی جمع کرد [۲۰]. پیشنهاد آن‌ها این است که انرژی الکتریکی را با تقسیم بر راندمان نیروگاه‌های گرمایی رایج (۳۶٪)، به انرژی گرمایی تبدیل کرد و سپس آن را با انرژی گرمایی جمع کرد [۲۰]. بر این اساس، راندمان انرژی کل سیستم PVT را می‌توان با استفاده از رابطه زیر محاسبه کرد [۲۰]:

محدوده ۱۱/۶۰-۱۲/۶۲، ۱۳/۴۰-۱۴/۴۲ و ۱۵/۹۴-۱۶/۹۵ درجه سانتی‌گراد است. این نتایج، منطبق بر داده‌های ارائه‌شده در شکل (۴) است و نشان می‌دهد که بهترین عملکرد گرمایی سیستم متعلق به طرح ۳ است. درحالی‌که طرح ۱ دارای بدترین عملکرد گرمایی است.



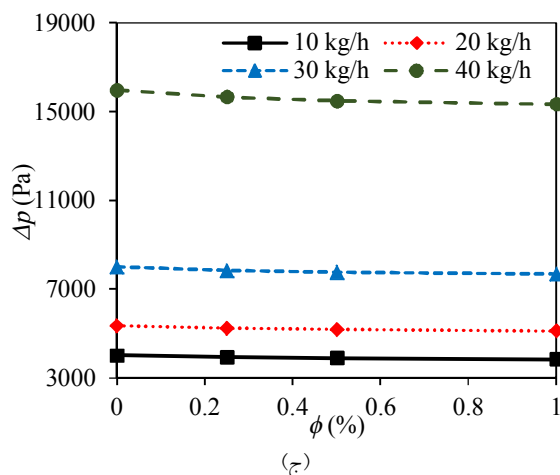
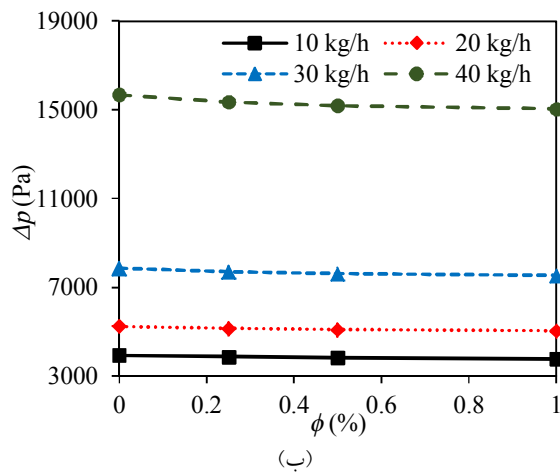
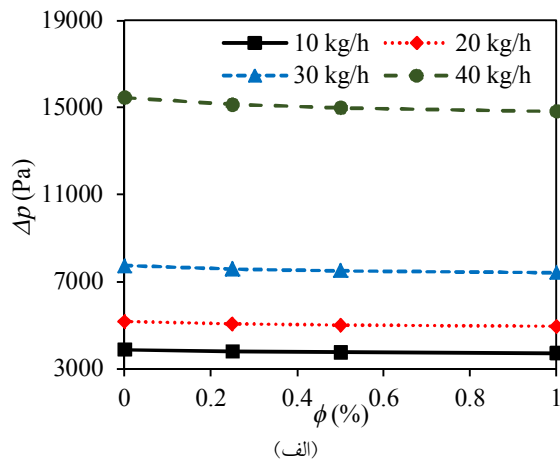
شکل (۵): تأثیر غلظت نانوذرات و دبی جرمی نانوسیال بر روی اختلاف دمای متوسط پنل فتوولتائیک در (الف) طرح ۱، (ب) طرح ۲ و (ج) طرح ۳ با دمای متوسط پنل در حالت بدون خنک‌کاری



شکل (۴): تأثیر غلظت نانوذرات و دبی جرمی نانوسیال بر روی راندمان گرمایی (الف) طرح ۱، (ب) طرح ۲ و (ج) طرح ۳

میزان کاهش دمای متوسط پنل فتوولتائیک در سیستم‌های PVT مورد بررسی در تحقیق حاضر در مقایسه با حالت بدون خنک‌کاری برای مقادیر مختلف غلظت نانوذرات و دبی جرمی نانوسیال در شکل (۵) نمایش داده شده است. میزان اختلاف دما برای طرح‌های ۱، ۲ و ۳، به ترتیب در

به افزایش راندمان گرمایی طرح‌های ۱، ۲ و ۳ به میزان ۰/۳، ۰/۳۲ و ۰/۳۴٪ می‌شود.

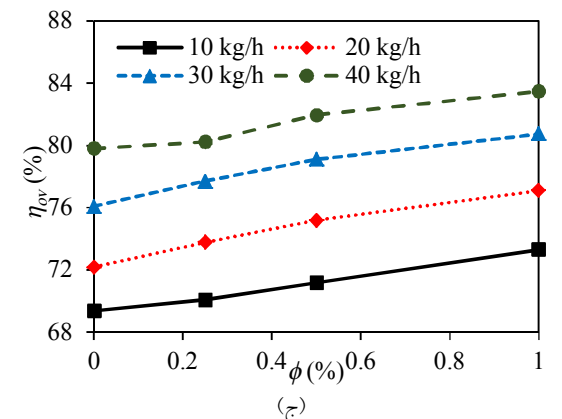
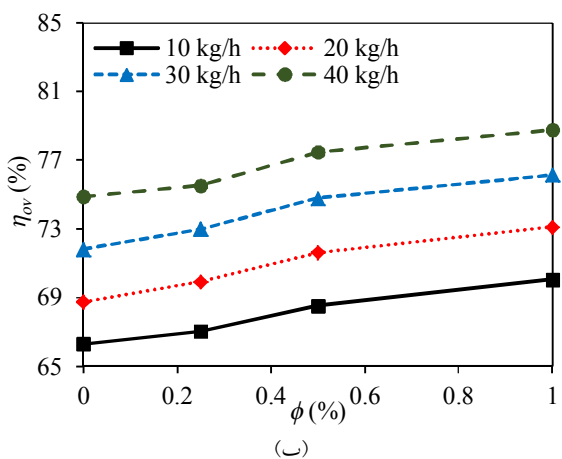
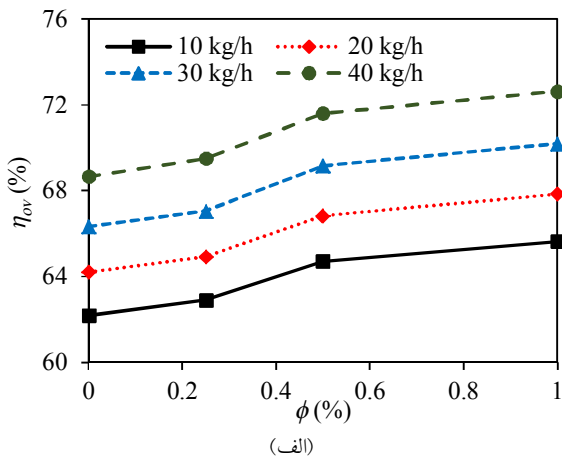


شکل (۶): تأثیر غلظت نانوذرات و دبی جرمی نانوسیال بر روی افت فشار نانوسیال برای (الف) طرح ۱، (ب) طرح ۲ و (ج) طرح ۳

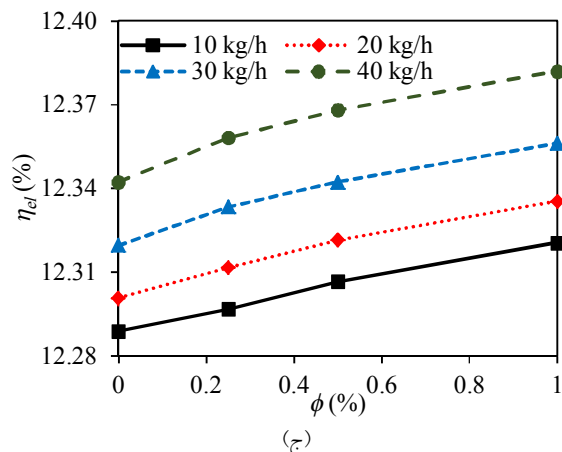
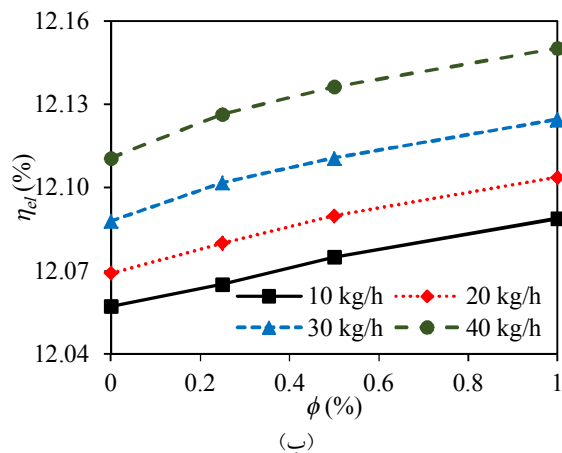
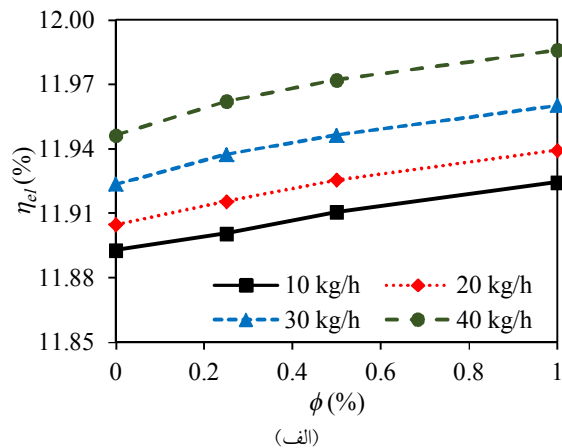
افت فشار نانوسیال جاری در سیستم‌های PVT مورد بررسی در تحقیق حاضر برای مقادیر مختلف غلظت نانوذرات و دبی جرمی نانوسیال در شکل (۶) نمایش داده شده است. طبق نتایج، افت فشار نانوسیال جاری در طرح‌های ۱، ۲ و ۳، به ترتیب در محدوده ۱۵۴۶۱/۴۳-۳۷۲۴/۷۴ پاسکال، ۱۵۶۷۴/۵۱-۳۷۷۵/۹۸ پاسکال و ۱۵۹۷۴/۸۸-۳۸۴۸/۲۰ پاسکال است. نتایج نشان می‌دهند که شیردار کردن لوله مارپیچی منجر به افزایش افت فشار می‌شود و هرچه تعداد شیرها بیشتر باشد، میزان افت فشار نانوسیال نیز بیشتر می‌شود. همچنین دیده می‌شود که افت فشار نانوسیال با افزایش دبی جرمی نانوسیال و غلظت نانوذرات، به ترتیب افزایش و کاهش می‌یابد. افزایش دبی جرمی نانوسیال در یک غلظت معین نانوذرات، منجر به افزایش سرعت نانوسیال می‌شود که افزایش افت فشار را در پی دارد. همچنین افزایش غلظت نانوذرات در یک دبی جرمی ثابت نانوسیال، منجر به افزایش چگالی نانوسیال می‌شود که کاهش سرعت نانوسیال و در نتیجه کاهش افت فشار را در پی دارد.

تأثیر غلظت نانوذرات و دبی جرمی نانوسیال بر روی راندمان الکتریکی سیستم‌های PVT مورد بررسی در تحقیق حاضر در شکل (۷) نمایش داده شده است. طبق نتایج، راندمان الکتریکی طرح‌های ۱، ۲ و ۳، به ترتیب در محدوده ۱۱/۸۹-۱۱/۹۹، ۱۲/۰۶-۱۲/۱۵ و ۱۲/۲۹-۱۲/۳۸ درصد است. با توجه به این نتایج می‌توان گفت که عملکرد الکتریکی طرح ۳ بهتر از طرح ۲ و عملکرد الکتریکی طرح ۲ بهتر از طرح ۱ است. هندسه طرح ۳ در مقایسه با طرح‌های ۱ و ۲ دارای تأثیر مثبت و منفی بر روی توان الکتریکی تولیدی سیستم است. از طرفی، اغتشاش لایه مرزی گرمایی در طرح ۳ بیشتر از دو طرح دیگر است که منجر به خنک‌تر شدن پنل فتوولتائیک در طرح ۳ در مقایسه با طرح‌های دیگر می‌شود که افزایش توان تولیدی آن‌ها را در پی دارد. از طرف دیگر، بیشتر بودن تعداد شیرها در طرح ۳ منجر به بیشتر شدن افت فشار و در نتیجه، بیشتر شدن توان پمپاژ نانوسیال در طرح ۳ در مقایسه با طرح‌های دیگر می‌شود. البته با توجه به اینکه سهم توان پمپاژ در توان الکتریکی تولیدی سیستم در حدود ۱٪ است، تأثیر مثبت هندسه طرح ۳ بسیار بیشتر از تأثیر منفی آن است. علاوه بر این، شکل (۷) نشان می‌دهد که افزایش غلظت نانوذرات و دبی جرمی نانوسیال منجر به افزایش راندمان الکتریکی تمام سیستم‌های مورد بررسی می‌شود. این امر ناشی از بهبود خنک‌کاری پنل‌های فتوولتائیک است که افزایش توان الکتریکی تولیدی آن‌ها را در پی دارد. برای مثال، در غلظت نانوذرات ۰/۱٪، افزایش دبی جرمی نانوسیال از ۱۰ کیلوگرم بر ساعت به ۴۰ کیلوگرم به ساعت منجر به افزایش راندمان الکتریکی طرح‌های ۱، ۲ و ۳ به میزان ۰/۵، ۰/۵۲ و ۰/۵۵٪ می‌شود. همچنین در دبی جرمی ۴۰ کیلوگرم بر ساعت، افزایش غلظت نانوذرات از ۰ به ۰/۱٪ منجر

حاضر، بهترین عملکرد از دیدگاه قانون اول ترمودینامیک متعلق به طرح ۳ و بدترین عملکرد متعلق به طرح ۱ است. همچنین نتایج نشان می‌دهند که افزایش غلظت نانوذرات و دبی جرمی عملکرد سیستم‌های PVT مورد بررسی را ارتقا می‌دهد. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که عملکرد خنک‌کاری نانوسیال بهتر از آب است و استفاده از نانوسیال در غلظت‌های بالاتر منجر به بهتر شدن عملکرد آن می‌شود.



شکل (۸): تأثیر غلظت نانوذرات و دبی جرمی نانوسیال بر روی راندمان کل (الف) طرح ۱، (ب) طرح ۲ و (ج) طرح ۳



شکل (۷): تأثیر غلظت نانوذرات و دبی جرمی نانوسیال بر روی راندمان الکتریکی (الف) طرح ۱، (ب) طرح ۲ و (ج) طرح ۳

تأثیر غلظت نانوذرات و دبی جرمی نانوسیال بر روی راندمان کل سیستم‌های PVT مورد بررسی در تحقیق حاضر در شکل (۸) نمایش داده شده است. راندمان کل طرح‌های ۱، ۲ و ۳ به ترتیب در محدوده ۷۲/۶۲-۶۳/۱۹، ۷۸/۷۸-۶۶/۳۰ و ۸۳/۴۷-۶۹/۳۷ درصد است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که در میان سیستم‌های PVT بررسی شده در مطالعه

۷. نتیجه‌گیری

در تحقیق حاضر، تأثیر استفاده از لوله مارپیچی شیاردار و نانوسیال به‌جای لوله مارپیچی صاف و آب بر روی عملکرد یک سیستم فتوولتائیک/گرمایی به‌صورت آزمایشگاهی بررسی شد. تأثیر غلظت نانوذرات، دبی جرمی نانوسیال و گام شیار بر روی عملکرد سیستم بررسی شد. نتایج نشان داد که کاهش گام شیار و افزایش غلظت نانوذرات و دبی جرمی نانوسیال منجر به بهبود عملکرد سیستم فتوولتائیک/گرمایی می‌شود. طبق نتایج،

مراجع

- [1] <https://www.iea.org/fuels-and-technologies/solar>
- [2] Vaishak, S. and Bhale, P. V., "Investigation on the effect of different backsheet materials on performance characteristics of a photovoltaic/thermal (PV/T) system", Renewable Energy, Vol. 168, pp. 160-169, 2021.
- [3] Soltani, S., Kasaeian, A., Lavajoo, A., Loni, R., Najafi, G. and Mahian, O., "Exergetic and environmental assessment of a photovoltaic thermal-thermoelectric system using nanofluids: Indoor experimental tests", Energy Conversion and Management, Vol. 218, pp. 112907, 2020.
- [4] Fouas, C. E., Hajji, B., Gagliano, A., Tina, G. M. and Aneli, S., "Numerical model and experimental validation of the electrical and thermal performances of photovoltaic/thermal plant", Energy Conversion and Management, Vol. 220, pp. 112939, 2020.
- [5] Hissouf, M., Feddaoui, M., Najim, M. and Charef, A., "Performance of a photovoltaic-thermal solar collector using two types of working fluids at different fluid channels geometry", Renewable Energy, Vol. 162, pp. 1723-1734, 2020.
- [6] Lu, S., Liang, R., Zhang, J. and Zhou, C., "Performance improvement of solar photovoltaic/thermal heat pump system in winter by employing vapor injection cycle", Applied Thermal Engineering, Vol. 155, pp. 135-146, 2019.
- [7] Hossain, M. S., Pandey, A. K., Selvaraj, J., Rahim, N. A., Rivai, A. and Tyagi, V. V., "Thermal performance analysis of parallel serpentine flow based photovoltaic/thermal (PV/T) system under composite climate of Malaysia", Applied Thermal Engineering, Vol. 153, pp. 861-871, 2019.
- [8] Sellami, R., Amirat, M., Mahrane, A., Slimani, M. E., Arbane, A. and Chekrouni, R., "Experimental and numerical study of a PV/Thermal collector equipped with a PV-assisted air circulation system: Configuration suitable for building integration", Energy and Buildings, Vol. 190, pp. 216-234, 2019.
- [9] Boumaaraf, B., Boumaaraf, H., Slimani, M.E., Kabir, T. S., Ait-cheikh, M.S. and Touafek, K., "Performance evaluation of a locally modified PV module to a PV/T solar collector under climatic conditions of semi-arid region", Mathematics and Computers in Simulation, Vol. 167, pp. 135-154, 2020.
- [10] Slimani, M.E., Sellami, R., Mahrane, A. and Amirat, M., "Study of Hybrid Photovoltaic/Thermal Collector Provided With Finned Metal Plates: A Numerical Investigation under Real Operating Conditions", in: 2019 International Conference on Advanced Electrical Engineering, IEEE, pp. 1-6, 2019.
- [11] Zahmatkesh, I., Sheremet, M., Yang, L., Heris, S. Z., Sharifpur, M., Meyer, J. P., Ghalambaz, M., Wongwises, S., Jing, D. and Mahian, O., "Effect of nanoparticle shape on the performance of thermal systems utilizing nanofluids: A critical review", Journal of Molecular Liquids, Vol. 321, pp. 114430, 2021.
- [12] Sidik, N. A. C., Adamu, I. M., Jamil, M. M., Kefayati, G. H. R., Mamat, R. and Najafi, G., "Recent progress on hybrid nanofluids in heat transfer applications: A comprehensive review", International Communications in Heat and Mass Transfer, Vol. 78, pp. 68-79, 2016.
- [13] Abadeh, A., Rejeb, O., Sardarabadi, M., Menezes, C., Pasandideh-Fard, M. and Jemni, A., "Economic and environmental analysis of using metal-oxides/water nanofluid in photovoltaic thermal systems (PVTs)", Energy, Vol. 159, pp. 1234-1243, 2018.
- [14] Lari, M. O. and Sahin, A. Z., "Effect of retrofitting a silver/water nanofluid-based photovoltaic/thermal (PV/T) system with a PCM-thermal battery for residential applications", Renewable Energy, Vol. 122, pp. 98-107, 2018.
- [15] Moradgholi, M., Nowee, S. M. and Farzaneh, A., "Experimental study of using Al₂O₃/methanol nanofluid in a two phase closed thermosyphon (TPCT) array as a novel photovoltaic/thermal system", Renewable Energy, Vol. 122, pp. 243-250, 2018.
- [16] Salari, A., Kazemian, A., Ma, T., Hakkaki-Fard, A., Peng, J., "Nanofluid based photovoltaic thermal systems integrated with phase change materials: Numerical simulation and thermodynamic analysis", Energy Conversion and Management, Vol. 205, pp. 112384, 2020.
- [17] Qeays, I. A., Yahya, S. M., Asjad, M. and Khan, Z.A., "Multi-performance optimization of nanofluid cooled hybrid photovoltaic thermal system using fuzzy integrated methodology", Journal of Cleaner Production, Vol. 256, pp. 120451, 2020.
- [18] Jia, Y., Ran, F., Zhu, C. and Fang, G., "Numerical analysis of photovoltaic-thermal collector using nanofluid as a coolant", Solar Energy, Vol. 196, pp. 625-636, 2020.
- [19] Shahsavari, A., Salimpour, M. R., Saghafian, M. and Shafii, M. B., "Experimental investigation on laminar forced convective heat transfer of ferrofluid loaded with carbon nanotubes under constant and alternating magnetic field", Experimental thermal and fluid science, Vol. 76, pp. 1-11, 2016.
- [20] Shahsavari, A., "Experimental evaluation of energy and exergy performance of a nanofluid-based photovoltaic/thermal system equipped with a sheet-and-sinusoidal serpentine tube collector", Journal of Cleaner Production, Vol. 287, pp. 125064, 2021.
- [21] Moffat, R., "Describing the uncertainties in experimental results", Experimental Thermal and Fluid Science, Vol. 1, pp. 3-17, 1988.
- [22] Shahsavari, A., Eisapour, M. and Talebizadehsardari, P., "Experimental evaluation of novel photovoltaic/thermal systems using serpentine cooling tubes with different cross-sections of circular, triangular and rectangular", Energy, Vol. 208, pp. 118409, 2020.