

مقایسه تجربی عملکرد سیستم‌های فتوولتایی/گرمایی حاوی نانوسیال‌های هیبریدی دوتایی و سه تایی - بخش اول: آنالیز انرژی

امین شهسوار* استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی کرمانشاه، کرمانشاه، ایران، a.shahsavat@kut.ac.ir

چکیده

این مقاله به مقایسه آزمایشگاهی قابلیت خنک‌کاری نانوسیال‌های هیبریدی دوتایی و سه‌تایی در یک سیستم فتوولتایی/گرمایی مجهز به گردآور صفحه-لوله مارپیچی اختصاص داده شده است. سوسپانسیون‌های پایدار آب-اکسید گرافن/اکسید تیتانیوم، آب-اکسید گرافن/اکسید آهن و آب-اکسید تیتانیوم/اکسید آهن به عنوان نانوسیال هیبریدی دوتایی و نانوسیال آب-اکسید گرافن/اکسید تیتانیوم/اکسید آهن به عنوان نانوسیال هیبریدی سه‌تایی به کار گرفته شده‌اند. آزمایش‌های متعددی به منظور بررسی اثر دبی جرمی نانوسیال (۲۰-۸۰ کیلوگرم بر ساعت) بر روی عملکرد سیستم با استفاده از یک شبیه‌ساز خورشیدی انجام شده است. نتایج نشان داد که در میان سیستم‌های مورد بررسی، بهترین عملکرد گرمایی، الکتریکی و کلی همواره متعلق به سیستم فتوولتایی/گرمایی حاوی نانوسیال هیبریدی سه‌تایی است، در حالی که بدترین عملکرد نیز همواره به سیستم حاوی نانوسیال آب-اکسید تیتانیوم/اکسید آهن تعلق دارد. علاوه بر این، نتایج نشان داد که بازده گرمایی، بازده الکتریکی و بازده کلی سیستم حاوی نانوسیال هیبریدی سه‌تایی، به ترتیب در بازده‌های ۴۲/۱۴-۵۳/۸۰ درصد، ۱۳/۰۱-۱۳/۰۲ درصد و ۷۸/۲۹-۸۹/۹۵ درصد است. همچنین، مشخص شد که عملکرد گرمایی، الکتریکی و کلی سیستم‌های مورد بررسی با رشد دبی جرمی نانوسیال‌ها ارتقا می‌یابد.

واژه‌های کلیدی: سیستم فتوولتایی/گرمایی، نانوسیال هیبریدی، بازده گرمایی، بازده الکتریکی، انرژی خورشیدی، مطالعه آزمایشگاهی.

Experimental performance comparison of photovoltaic/thermal systems containing binary and ternary hybrid nanofluids - Part I: Energy analysis

A. Shahsavat

Department of Mechanical Engineering, Kermanshah University of Technology, Kermanshah, Iran

Abstract

In this contribution, a laboratory comparison of the cooling capability of two-hybrid and three-hybrid nanofluids in a photovoltaic/thermal system equipped with a spiral plate-tube collector is devoted. Stable suspensions of water-graphene oxide/titanium oxide, water-graphene oxide/iron oxide and water-titanium oxide/iron oxide as binary hybrid nanofluid and water-graphene oxide/titanium oxide/iron oxide nanofluid as ternary hybrid nanofluid have been used. Several experiments have been conducted to investigate the effect of nanofluid mass flow rate (20-80 kg/h) on system performance using a solar simulator. It was revealed that among the examined systems, the best thermal, electrical and overall performance always belongs to the photovoltaic/thermal system containing ternary hybrid nanofluid, while the worst performance always belongs to the system containing water-titanium oxide/iron oxide nanofluid. The results showed that the thermal efficiency, electrical efficiency and overall efficiency of the system containing ternary hybrid nanofluid were in the ranges of 53.14-80.14, 13.01-13.02 and 89.78-95.29, respectively. Also, it was found that the thermal, electrical and overall performance of the investigated systems improves with the growth of mass flow rate of nanofluids.

Keywords: Photovoltaic thermal system, Hybrid Nanofluid, Thermal efficiency, Electrical efficiency, Solar energy, Experimental study.

در زمان عملکرد خود تولید گرما می‌کنند و اگر این گرما به‌طور کافی از بین نرود، باعث کاهش بهره‌وری و افت تولید برق می‌شود [۳]. در شرایط افزایش دما، بهره‌وری سلول‌های فتوولتایی کاهش می‌یابد و دما می‌تواند باعث افت نرخ تبدیل انرژی به برق شود [۴]. بنابراین، استفاده از سیستم‌های خنک‌کاری برای حفظ دما در محدوده‌های بهینه، می‌تواند عملکرد بهتر و پایدارتری از پنل‌های فتوولتایی فراهم کند [۵]. این روش‌ها از اهمیت ویژه‌ای در مناطق با دماهای بالا یا در شرایط آب و هوایی گرم و خشک برخوردارند و به عنوان یک راهکار مؤثر برای بهینه‌سازی عملکرد و طول عمر سلول‌های فتوولتایی در تأمین انرژی نقش دارند [۶].

سیستم‌های فتوولتایی/گرمایی یک نوع از فناوری‌های تجدیدپذیر هستند که هم‌زمان از انرژی خورشیدی به عنوان منبع تولید برق و گرما بهره می‌برند [۷]. این سیستم‌ها دارای دو قسمت مهم هستند:

۱- مقدمه

انرژی خورشیدی به عنوان یک منبع انرژی پاک و بی‌پایان، اهمیت بسیاری در تأمین نیازهای انرژی جامعه امروزی دارد. یکی از روش‌های مؤثر بهره‌برداری از این انرژی، استفاده از سیستم‌های فتوولتایی است. این سیستم‌ها، نور خورشید را به انرژی الکتریکی تبدیل می‌کنند و در تأمین برق برای خانه‌ها، صنعت، و سایر امکانات استفاده می‌شوند [۱]. با توجه به اینکه نیاز به انرژی در حال افزایش است و منابع سوخت فسیلی غیرقابل تجدید هر روزه کاهش می‌یابند، اهمیت سیستم‌های فتوولتایی به عنوان یک راهکار پایدار و مستقل از منابع غیرتجدیدپذیر، بیشتر شده است.

خنک‌کاری پنل‌های فتوولتایی یک جنبه حیاتی در بهره‌وری و عملکرد بهینه این سیستم‌ها محسوب می‌شود [۲]. پنل‌های فتوولتایی

* نویسنده مکاتبه کننده، آدرس پست الکترونیکی: a.shahsavat@kut.ac.ir

تاریخ دریافت: ۲۰۲۳/۱۱/۰۳

تاریخ پذیرش: ۲۰۲۴/۰۲/۲۴

قسمت فتولتایی برای تبدیل نور خورشید به برق و قسمت گرمایی برای بهره‌گیری از گرما خورشید به منظور تأمین گرما. این ترکیب مناسب از انرژی الکتریکی و گرما خورشیدی در مواقعی که نیاز به هر دو این انواع انرژی وجود دارد، اقتصادی و کارآمد می‌باشد. به عنوان مثال، در ساختمان‌ها می‌توان از این سیستم‌ها برای تأمین برق مصرفی و همچنین گرمای مورد نیاز در یک سیستم گرمایشی استفاده کرد. این روش موجب افزایش بهره‌وری و کارایی انرژی شده و در تحقق اهداف پایداری مانند کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای و بهبود بهره‌وری انرژی ساختمان‌ها تأثیرگذار است [۸].

خنک‌کن‌های متداول مورد استفاده در سیستم‌های فتولتایی/گرمایی شامل هوا، آب، مخلوط آب-اتیلن گلیکول و روغن موتور می‌باشند [۹]. با ظهور نانوسیال‌ها و شناسایی خواص گرمایی فوق‌العاده آن‌ها، محققان فعال در زمینه سیستم‌های فتولتایی/گرمایی شروع به بررسی کارایی نانوسیال‌های مختلف در این سیستم‌ها کردند [۱۰]. با توسعه تحقیقات بر روی نانوسیال‌ها و معرفی نانوسیال‌های هیبریدی، که سوسپانسیون پایدار دو نانوذره مختلف در یک سیال پایه هستند، عملکرد آن‌ها در سیستم‌های فتولتایی/گرمایی نیز مورد بررسی قرار گرفت. موردها [۱۱] آزمایش‌هایی را برای مقایسه قابلیت خنک‌کنندگی نانوسیال هیبریدی آب-اکسید آلومینیوم/اکسید تیتانیوم با نانوسیال‌های معمولی آب-اکسید آلومینیوم و آب-اکسید تیتانیوم در یک سیستم فتولتایی/گرمایی انجام داد. در نهایت، عملکرد بهتر نانوسیال هیبریدی در مقایسه با نانوسیال‌های معمولی گزارش شد. مومن و همکاران [۱۲] از نانوسیال هیبریدی آب-اکسید آلومینیوم/مس در یک سیستم فتولتایی/گرمایی دو بعدی همراه با انبساط ناگهانی یکطرفه جریان گام به عقب استفاده کرده و تأثیر پارامترهای مختلف تأثیرگذار بر عملکرد سیستم را ارزیابی کردند. پارامترهای مورد بررسی شامل دمای ورودی نانوسیال به سیستم، عدد رینولدز، غلظت نانوسیال و ویژگی‌های هندسی کانال بودند. گزارش شد که با افزایش غلظت نانوسیال، بازده سیستم رشد می‌کند. خلیلی و شیخ‌الاسلامی [۱۳] از جت نانوسیال آب-نئودیم/اکسید کبالت برای خنک‌کاری یک سیستم فتولتایی/گرمایی مجهز به ژنراتور ترموالکتریک استفاده کردند. شبیه‌سازی‌های متعددی برای تعیین اثر غلظت نانوسیال، سرعت ورودی نانوسیال به نازل جت، تعداد لوله‌های متصل به زیر پنل فتولتایی که حاوی نانوسیال هستند و شدت تابش خورشیدی انجام شدند. در میان موارد بررسی شده، بیشترین بازده گرمایی و بازده الکتریکی سیستم، به ترتیب، ۸۴٪ و ۱۵،۴۴٪ گزارش شد. عزیزی و همکاران [۱۴] قابلیت خنک‌کاری نانوسیال‌های معمولی آب-اکسید آلومینیوم و آب-اکسید روی و نانوسیال هیبریدی آب-اکسید آلومینیوم/اکسید روی در یک سیستم فتولتایی/گرمایی مجهز به متمرکز کننده سهموی را به طور تجربی بررسی کردند. تأثیر غلظت نانوسیال و نسبت جرم نانوذرات بر روی نتایج بررسی شد. مشخص شد که خروجی سیستم حاوی نانوسیال هیبریدی، به ترتیب، ۴/۲۴ درصد، ۲/۱۹ درصد و ۱/۶۱ درصد بیشتر از سیستم حاوی آب خالص، نانوسیال آب-اکسید آلومینیوم و نانوسیال آب-اکسید روی است. هوشمندزاده و همکاران [۱۵] عملکرد سیستم‌های فتولتایی/گرمایی متصل به ریزشبه‌حای نانوسیال‌های معمولی آب-اکسید سیلیسیوم و آب-اکسید آلومینیوم را با نانوسیال هیبریدی آب-اکسید

سیلیسیوم/اکسید آلومینیوم مقایسه کردند. عملکرد برتر نانوسیال هیبریدی در مقایسه با نانوسیال‌های معمولی گزارش شد.

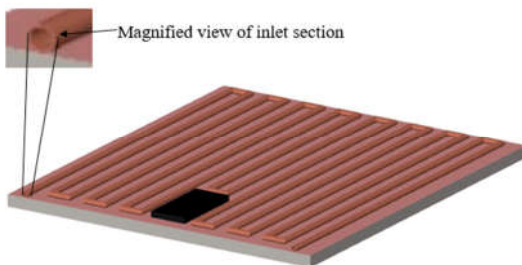
اخیراً گروه جدیدی از نانوسیال‌ها به نام نانوسیال‌های هیبریدی سه‌تایی سنتز شده [۱۶]، خواص ترموفیزیکی آن‌ها اندازه‌گیری شده [۱۷] و کارایی آن‌ها در سیستم‌های مختلف بررسی شده است [۱۸]. همانطوری که از نام آن‌ها پیداست، نانوسیال‌های هیبریدی سه‌تایی با تلفیق سه نانوذره مختلف در یک سیال پایه تهیه می‌شوند. محققان متعددی قابلیت خنک‌کاری این نانوسیال‌ها را در سیستم‌های فتولتایی/گرمایی بررسی کرده‌اند. بررسی جامع تحقیقات قبلی نشان می‌دهد که تا به امروز فقط شش مطالعه در مورد عملکرد سیستم‌های فتولتایی/گرمایی حاوی نانوسیال‌های هیبریدی سه‌تایی انجام شده است [۱۹-۲۴]. در مجموعه‌ای از مطالعات عددی، آدون و همکاران قابلیت خنک‌کاری نانوسیال‌های هیبریدی سه‌تایی آب-اکسید مس/اکسید مینیزیم/اکسید تیتانیوم [۱۹]، و آب-اکسید آلومینیوم/اکسید روی/اکسید آهن [۲۰،۲۱] را بر روی عملکرد یک سیستم فتولتایی/گرمایی از دیدگاه انرژی [۱۹-۲۱]، آگزروی [۱۹-۲۱] و اقتصادی [۲۱] بررسی کردند. عملکرد بهتر نانوسیال هیبریدی سه‌تایی در همه مطالعات گزارش شد. در یک مطالعه عددی دیگر، بات و قیوم [۲۲] اثر استفاده همزمان از نانوسیال آب-مس/اکسید آلومینیوم/نانولوله کربنی چند لایه، محلول آب-نانو پی سی ام و یک پیکربندی جدید بر روی عملکرد یک سیستم فتولتایی/گرمایی را بررسی کردند. استفاده از ترکیب این تکنیک‌ها با افزایش ۶/۳ درصد، ۱/۱ درصد و ۲۰ درصدی بازده‌های قانون اول، قانون دوم و ترموهیدرولیک همراه بود. عبدالله و شهسوار [۲۳] اولین ارزیابی تجربی را بر روی بازده انرژی و آگزروی یک سیستم فتولتایی/گرمایی حاوی نانوسیال هیبریدی سه‌تایی را از دیدگاه غلظت نانوسیال، نسبت اختلاط نانوذرات و دبی جرمی نانوسیال انجام دادند. نانوسیال به کار گرفته شده شامل سوسپانسیون آبی نانوذرات اکسید گرافن، اکسید تیتانیوم و اکسید آهن بود. بیش‌ترین بازده کلی انرژی و آگزروی متعلق به سیستم حاوی نانوسیال با نسبت اختلاط نانوذرات ۱:۱:۱، غلظت نانوسیال ۱ درصد و دبی جرمی ۸۰ کیلوگرم بر ساعت بود. در یک مطالعه عددی، کنفک و همکاران [۲۴] عملکرد یک سیستم فتولتایی/گرمایی حاوی نانوسیال هیبریدی سه‌تایی آب-اکسید مس/اکسید مینیزیم/اکسید تیتانیوم را بررسی کردند. تأثیر شیب گردآور، مساحت گردآور، فاصله مرکز تا مرکز لوله‌های گردآور، قطرهای داخلی و بیرونی لوله‌های گردآور و ضخامت لایه‌های فتولتایی، شیشه و عایق بر روی نتایج بررسی شد. مشخص شد که بازده آگزروی سیستم در بازه ۲۳/۴۱-۳۶/۶ درصد است. بررسی نتایج ارائه شده در مراجع [۱۹-۲۴] آشکار می‌کند که اولاً، تاکنون فقط یک مطالعه آزمایشگاهی بر روی عملکرد سیستم‌های فتولتایی/گرمایی حاوی نانوسیال هیبریدی سه‌تایی انجام شده است و ثانیاً، تا کنون هیچ مطالعه آزمایشگاهی بر روی مقایسه عملکرد خنک‌کاری نانوسیال‌های هیبریدی دوتایی و سه‌تایی انجام نشده است. به همین دلیل، عملکرد گرمایی و الکتریکی سیستم‌های فتولتایی/گرمایی حاوی نانوسیال‌های هیبریدی دوتایی و سه‌تایی در تحقیق حاضر بررسی شده است. نانوسیال‌های هیبریدی دوتایی در نظر گرفته شده عبارتند از نانوسیال‌های آب-اکسید گرافن/اکسید تیتانیوم، آب-اکسید

فتوولتایی اخذ شده است به طور کامل به نانوسیال جاری در لوله منتقل می‌شود و به محیط اطراف تلف نمی‌شود، لوله مارپیچ با استفاده از پشم شیشه عایق شده است.

جدول ۱- مشخصات فنی پنل فتوولتایی مورد استفاده.

نوع	سیلیکون تک کریستالی
توان اسمی (وات)	۱۰
بازده بیشینه (%)	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 سلسیوس)	-۰/۴۷

نحوه انجام آزمایش‌ها بدین صورت است که نانوسیال موجود در مخزن پلاستیکی با حجم ۲ لیتر با استفاده از یک پمپ ۲۰ ولت DC با هد ۳/۵ متر وارد گردآور شده و پس از اخذ گرما از گردآور، که با افزایش دمای نانوسیال همراه است، از گردآور خارج شده و وارد یک مبادله‌کن گرمایی صفحه‌ای می‌شود تا گرمای اخذ شده را به محلول آب-اتیلن گلیکول خنک منتقل کند. پس از رسیدن به دمای اولیه، نانوسیال وارد مخزن می‌شود. دمای سیال خنک‌کن ورودی به گردآور در کلیه آزمایش‌ها برابر با ۲۰ درجه سلسیوس در نظر گرفته شده است. دمای محلول آب-اتیلن گلیکول با استفاده از یک حمام دما ثابت ۱۸۰۰ وات و با به کارگیری روش سعی و خطا به گونه‌ای تنظیم می‌شود که دمای نانوسیال خروجی از مبدل گرمایی همواره ۲۰ درجه سلسیوس باشد. برای سنجش دبی نانوسیال ورودی به گردآور و افت فشار جریان نانوسیال در داخل گردآور، به ترتیب، از یک دبی‌سنج روتاری Malema-M10000 و یک فشارسنج دیفرانسیل مدل Rosemount 3051CD استفاده شده است. فهرست مشخصات کلیه تجهیزات به کار گرفته شده در مطالعه حاضر در جدول ۲ ارائه شده است.



شکل ۲- گردآور صفحه-لوله استفاده شده در مطالعه حاضر.

گرافن/اکسید آهن و آب-اکسید تیتانیوم/اکسید آهن، در حالی که نانوسیال هیبریدی سه‌تایی در نظر گرفته شده نیز سوسپانسیون آبی پایدار حاوی نانوذرات اکسید گرافن/اکسید تیتانیوم/اکسید آهن می‌باشد. غلظت حجمی کلیه نانوسیال‌ها برابر با ۱ درصد است. تاثیر دبی جرمی نانوسیال (۲۰، ۴۰، ۶۰ و ۸۰ کیلوگرم بر ساعت) بر روی بازده‌های گرمایی، الکتریکی و کل سیستم بررسی شده است.

۲- سیستم آزمایشگاهی

در مطالعات انجام شده بر روی سیستم‌های انرژی خورشیدی، نتایج آزمایش‌های مختلف فقط در صورتی قابل مقایسه می‌باشند که آزمایش‌ها در شرایط آب و هوایی مشابه انجام شده باشند. با به کارگیری شبیه‌سازی خورشیدی به راحتی می‌توان به این هدف نائل شد. در تحقیق حاضر نیز کلیه آزمایش‌ها در یک شبیه‌ساز خورشیدی، که قادر به تامین شدت تابش خورشیدی ۱۰۰۰ وات بر متر مربع و دمای محیط ۲۲ درجه سلسیوس است، انجام شده‌اند (شکل ۱). در این دستگاه، برای تامین تابش معادل نور خورشید از چهار لامپ LED با توان ده وات، چهار لامپ متال هالید با توان ۴۰۰ وات، یک جعبه آلومینیومی، چهار فن DC و یک دیمر AC استفاده شده است. برای بررسی میزان و یکنواخت بودن شدت نور تابیده شده بر روی پنل فتوولتایی قرار گرفته در دستگاه از یک دستگاه لوکس‌متر Trotec BF06 استفاده شده است. پنل فتوولتایی به کار گرفته شده در مطالعه حاضر، یک پنل ۱۰ وات ساخت شرکت Eco-Worthy آمریکا است که ویژگی‌های عملکردی آن در جدول ۱ نمایش داده شده‌اند. برای تعیین دمای متوسط پنل فتوولتایی، ۶ عدد ترموکوپل نوع K بر روی کاور شیشه‌ای پنل چسبانده شده و مقدار اندازه‌گیری شده توسط آن‌ها با کمک یک دیتالاگر ثبت شده است. دمای متوسط خنک‌کن در ورود و خروج از سیستم با کمک دو ترموکوپل نوع K ثبت شده است. یک مولتی‌متر ساخت شرکت LUTRUN نیز برای ثبت ولتاژ و جریان تولیدی پنل فتوولتایی به کار گرفته شده است.



شکل ۱- شبیه‌ساز خورشیدی به کار گرفته شده در مطالعه حاضر.

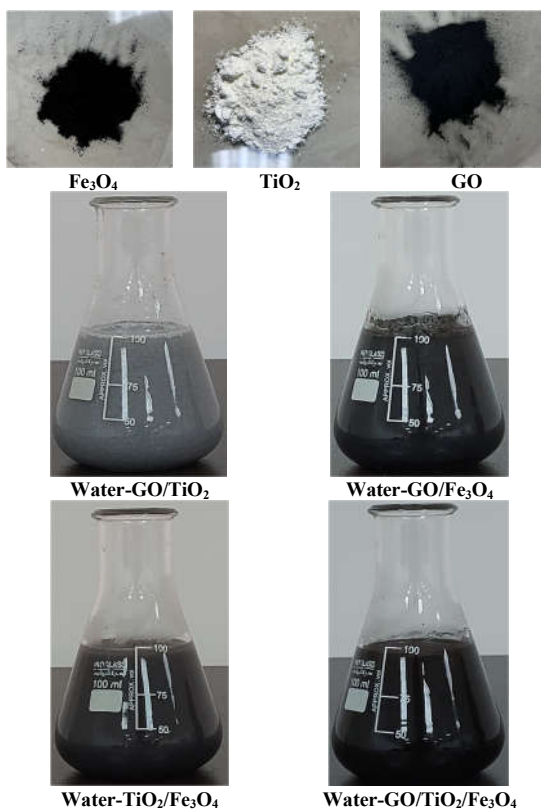
برای انتقال گرمای تولید شده در پنل فتوولتایی به سیال خنک‌کن، یک صفحه مسی با استفاده از چسب گرمایی به زیر پنل چسبانده شده و یک لوله مارپیچ مسی با قطر داخلی ۴ میلی‌متر و ضخامت ۱ میلی‌متر به زیر پنل جوش زده شده است (شکل ۲). برای حصول اطمینان از این که گرمایی که توسط کلتور صفحه-لوله از پنل

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
مولتی متر	LUTURON-DW6060	±۰/۸
مولتی متر	LUTURON-DW6060	±/۱
دبی سنج	Malema-M10000	±/۲
فشارسنج	Rosemount 3051CD	±/۱

ترتیب، نشان دهنده نانوسیال، آب و نانوذرات است. همچنین، A برای نانوسیال هیبریدی دوتایی برابر با ۲ و برای نانوسیال هیبریدی سه تایی برابر با ۳ است.

رسانایی گرمایی نانوسیالها نیز با استفاده از دستگاه KD2-Pro (شرکت Decagon، ایالات متحده آمریکا) اندازه گیری شده است. مشهود است که بیشترین رسانایی گرمایی متعلق به نانوسال هیبریدی سه تایی است، در حالی که نانوسیال هیبریدی دوتایی آب-اکسید تیتانیوم/اکسید آهن دارای کمترین رسانایی گرمایی است.



شکل ۳- تصویر واقعی نانوذرات و نانوسیالهای مورد استفاده در مطالعه حاضر.

۳- تهیه نانوسیالهای هیبریدی دوتایی و سه تایی و تعیین خواص ترموفیزیکی آنها

سنتز کلیه نانوسیالها با روش دو مرحله‌ای انجام شده است. در این روش، جرم مناسبی از نانوذرات خریداری شده از بازار با هم ترکیب شده و سپس، در دستگاه اولتراسونیک از نوع پروب (Hielscher UP400S, 400 W, 24 kHz) به مدت دو ساعت در معرض امواج فراصوت قرار داده می‌شود. ویژگی‌های نانوذرات مورد استفاده در مطالعه حاضر در جدول ۳ ارائه شده است. علاوه بر این، عکس واقعی نانوذرات و نانوسیالهای به کار گرفته شده در تحقیق حاضر در شکل ۳ نمایش داده شده‌اند.

جدول ۳- مشخصات نانوذرات به کار گرفته شده در مطالعه حاضر.

نانوذره			خاصیت
Fe ₃ O ₄	TiO ₂	GO	
۹۹/۵	۹۹/۹	۹۹/۳	خلوص
۴۸۰۰	۴۲۳۰	۱۵۰۰	چگالی (کیلوگرم بر متر مکعب)
۲۰-۱۵	۳۰	۵۵۰۰-۱۵۰۰	اندازه (نانومتر)

پس از تهیه نانوسیالها، قطر متوسط نانوذرات موجود در آنها و پایداری نانوسیالها، به ترتیب، با استفاده از آزمونهای DLS^۱ و پتانسیل زتا سنجیده شد. نتایج بدست آمده در شکل‌های ۴ و ۵ ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهند که اولاً، قطر متوسط نانوذرات موجود در کلیه نانوسیالها کمتر از ۶۰ نانومتر است و ثانیاً، پتانسیل زتا برای کلیه نانوسیالها کمتر از ۳۰ میلی ولت است. در نتیجه، می‌توان ادعا کرد که هم سنتز نانوسیالها موفقیت‌آمیز بوده است و هم نانوسیالهای سنتز شده پایدار هستند [۲۵].

چگالی (ρ_{nf})، ظرفیت گرمایی ویژه ($c_{p,nf}$) و رسانایی گرمایی (k_{nf}) نانوسیالهای تهیه شده در جدول ۴ ارائه شده‌اند. چگالی و گرمایی ویژه نانوسیالها با استفاده از معادلات زیر محاسبه شده‌اند [۲۶]:

$$\rho_{nf} = \left(1 - \sum_{n=1}^A \varphi_n\right) \rho_w + \sum_{n=1}^A \varphi_n \rho_{p,n} \quad (1)$$

$$c_{p,nf} = \frac{\left(1 - \sum_{n=1}^A \varphi_n\right) \rho_w c_{p,w} + \sum_{n=1}^A \varphi_n \rho_{p,n} c_{p,p,n}}{\rho_{nf}} \quad (2)$$

که φ غلظت حجمی نانوذرات است و اندیس‌های mf و w و p به

^۱Dynamic light scattering

که شدت تابش خورشیدی، A_{pv} مساحت پنل فتوولتایی، V ولتاژ خروجی پنل فتوولتایی، I جریان خروجی پنل فتوولتایی، m دبی جرمی نانوسیال، Δp افت فشار نانوسیال، η_p بازده پمپ (که برابر با ۷۵٪ در نظر گرفته شده است)، T_{in} دمای ورودی نانوسیال به سیستم و T_{out} دمای خروجی نانوسیال از سیستم است.

طبق رابطه (۵)، برای محاسبه بازده کلی سیستم فتوولتایی/گرمایی، بازده الکتریکی ابتدا تقسیم بر ۰/۳۶ شده و سپس، با بازده گرمایی جمع می‌شود. دلیل این کار این است که انرژی الکتریکی را برخلاف انرژی گرمایی می‌توان به طور کامل به کار تبدیل کرد و در نتیجه، نباید انرژی الکتریکی را به طور مستقیم با انرژی گرمایی جمع کرد. برای تبدیل انرژی الکتریکی به انرژی گرمایی، آن را بر بازده نیروگاه‌های گرمایی متداول (یعنی ۰/۳۶) تقسیم می‌کنند.

۵- آنالیز عدم قطعیت

در مطالعه حاضر، از روش معرفی شده توسط موفات [۲۷] برای تعیین عدم قطعیت پارامترهای عملکردی سیستم استفاده شده است. در 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:

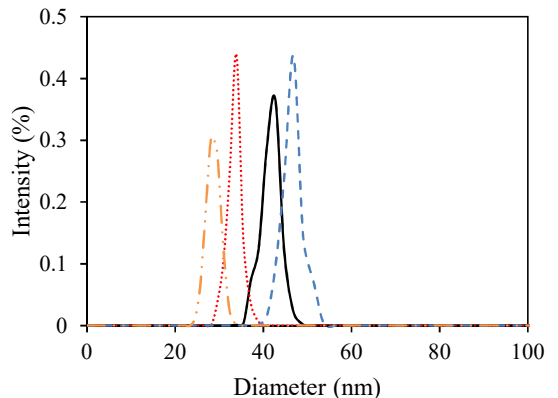
$$\delta R = \sqrt{\left(\frac{\partial R}{\partial v_1} \delta v_1\right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial R}{\partial v_n} \delta v_n\right)^2} \quad (6)$$

که δ نشان دهنده عدم قطعیت یک پارامتر است.

با به کارگیری رابطه فوق، مقدار عدم قطعیت بازده‌های گرمایی و الکتریکی سیستم برای کلیه نانوسیال‌های مورد بررسی در تحقیق حاضر در کلیه دبی‌جرمی‌های لحاظ شده محاسبه شد. نتایج نشان داد که بیش‌ترین مقدار عدم قطعیت بازده‌های گرمایی و الکتریکی سیستم، به ترتیب، برابر با ۴/۹۷ درصد و ۴/۲۳ درصد است که متعلق به نانوسیال سه‌تایی در دبی جرمی ۸۰ کیلوگرم بر ثانیه است.

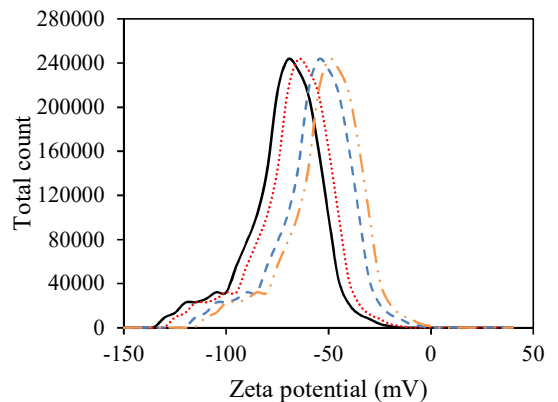
۶- نتایج

بازده گرمایی سیستم فتوولتایی/گرمایی حاوی نانوسیال‌های هیبریدی دوتایی و سه تایی در نظر گرفته شده در مطالعه حاضر برای مقادیر مختلف دبی جرمی در شکل ۶ نمایش داده شده است. طبق نتایج، بیش‌ترین تا کم‌ترین بازده گرمایی سیستم فتوولتایی/گرمایی به سیستم‌های حاوی نانوسیال‌های آب-اکسید گرافن/اکسید تیتانیوم/اکسید آهن (۴۲/۱۴-۵۳/۸۰ درصد)، آب-اکسید گرافن/اکسید تیتانیوم (۴۱/۰۱-۵۲/۸۱ درصد)، آب-اکسید گرافن/اکسید آهن (۴۰/۰۹-۵۲/۲۰ درصد) و آب-اکسید تیتانیوم/اکسید آهن (۳۹/۰۹-۵۰/۵۳ درصد) تعلق دارد. با توجه به یکسان بودن شدت تابش، مساحت پنل فتوولتایی، دبی جرمی و دمای ورودی نانوسیال به گردآور، با بررسی رابطه (۴) می‌توان پی‌برد که تنها عامل تاثیرگذار بر روی بازده گرمایی سیستم که برای نانوسیال‌های مختلف می‌تواند متفاوت باشد، دمای نانوسیال خروجی از گردآور است. با توجه به نتایج ارائه شده در شکل ۶ می‌توان ادعا کرد که در میان نانوسیال‌های مورد بررسی در مطالعه حاضر، دمای خروجی نانوسیال هیبریدی سه‌تایی همواره بیش‌تر از نانوسیال‌های دیگر است. دلیل اصلی این مشاهده، بیش‌تر بودن رسانایی گرمایی این نانوسیال در مقایسه با نانوسیال‌های دیگر است که باعث می‌شود ضریب انتقال گرمای همرفتی و در نتیجه،



Water-GO/TiO2 (solid black line), Water-GO/Fe3O4 (dotted red line), Water-TiO2/Fe3O4 (dashed blue line), Water-GO/TiO2/Fe3O4 (dash-dot orange line)

شکل ۴- نتایج آزمون DLS.



Water-GO/TiO2 (solid black line), Water-GO/Fe3O4 (dotted red line), Water-TiO2/Fe3O4 (dashed blue line), Water-GO/TiO2/Fe3O4 (dash-dot orange line)

شکل ۵- نتایج آزمون پتانسیل زتا.

جدول ۴- خواص ترموفیزیکی نانوسیال‌های مورد بررسی.

k_{nf} (W/m.K)	$C_{p,nf}$ (J/kg.K)	ρ_{nf} (kg/m ³)	نانوسیال
۰/۷۲۶	۴۱۱۹/۵۸۹	۱۰۱۳/۱۸۴	Water-GO/TiO ₂
۰/۷۳۳	۴۱۰۸/۴۲۹	۱۰۱۷/۵۳۴	Water-GO/Fe ₃ O ₄
۰/۶۸۷	۴۰۲۷/۹۴۷	۱۰۳۳/۷۷۹	Water-TiO ₂ /Fe ₃ O ₄
۰/۷۷۲	۴۰۸۸/۶۸۹	۱۰۲۱/۴۶۵	Water-GO/TiO ₂ /Fe ₃ O ₄

۴- آنالیز انرژی

بازده الکتریکی (η_{el})، بازده گرمایی (η_{th}) و بازده کل (η_{ov}) سیستم‌های فتوولتایی/گرمایی به شکل زیر محاسبه می‌شوند [۲۳]:

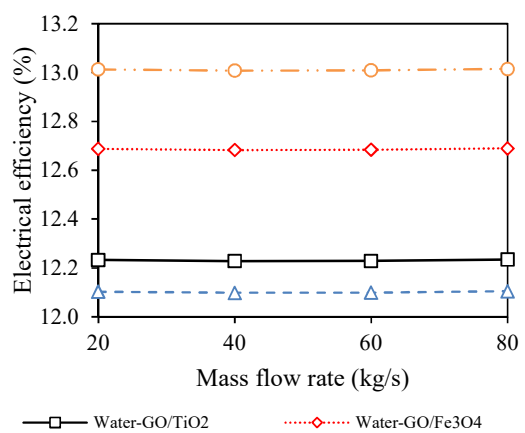
$$\eta_{el} = \frac{VI - \dot{m}\Delta p}{\rho_{nf}\eta_p} \times 100 \quad (3)$$

$$\eta_{th} = \frac{\dot{m}c_{p,nf}(T_{out} - T_{in})}{I_r A_{pv}} \times 100 \quad (4)$$

$$\eta_{ov} = \eta_{th} + \frac{\eta_{el}}{0.36} \quad (5)$$

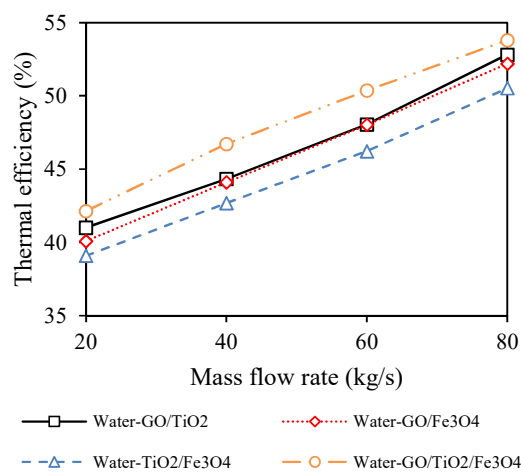
مصرفی پمپ برای جاری ساختن نانوسیال در کلکتور افزایش می‌یابد. ناچیز بودن تغییرات بازده الکتریکی سیستم فتولتایی/گرمایی با تغییر دبی جرمی آشکار می‌کند که میزان افزایش برق تولیدی پنل فتولتایی با افزایش دبی جرمی تقریباً با میزان افزایش توان پمپاژ با افزایش دبی جرمی برابر است.

بازده کلی سیستم فتولتایی/گرمایی حاوی نانوسیال‌های هیبریدی دوتایی و سه‌تایی در نظر گرفته شده در مطالعه حاضر برای مقادیر مختلف دبی جرمی در شکل ۸ نمایش داده شده است. بیش‌ترین تا کم‌ترین بازده کلی سیستم فتولتایی/گرمایی به سیستم‌های حاوی نانوسیال‌های آب-اکسید گرافن/اکسید تیتانیوم/اکسید آهن (۷۸/۲۹-۸۹/۹۵ درصد)، آب-اکسید گرافن/اکسید تیتانیوم (۷۴/۹۹-۸۶/۸۰ درصد)، آب-اکسید گرافن/اکسید آهن (۷۵/۳۳-۸۷/۴۵ درصد) و آب-اکسید تیتانیوم/اکسید آهن (۷۲/۷۱-۸۴/۱۵ درصد) تعلق دارد. همچنین، روند صعودی بازده کلی سیستم فتولتایی/گرمایی با افزایش دبی جرمی نانوسیال در شکل ۸ مشهود است که ناشی از افزایش بازده‌های گرمایی و الکتریکی با افزایش دبی جرمی نانوسیال است.



شکل ۷- بازده الکتریکی سیستم فتولتایی/گرمایی حاوی نانوسیال-های هیبریدی دوتایی و سه‌تایی در مقادیر مختلف دبی جرمی.

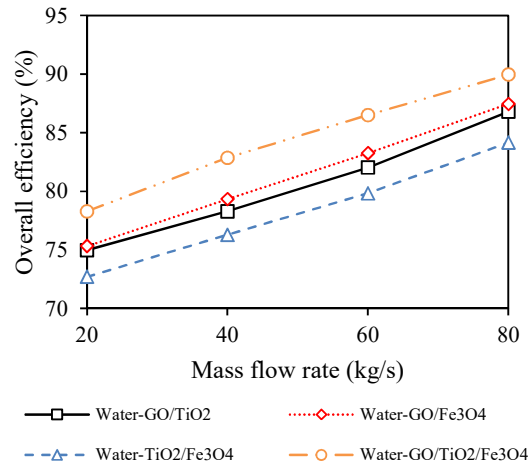
نرخ گرمای منتقل شده از گردآور به این نانوسیال بیش‌تر از گزینه‌های دیگر باشد. علاوه بر این، در شکل ۶ مشهود است که برای کلیه نانوسیال‌ها، افزایش دبی با افزایش بازده گرمایی همراه است که ناشی از افزایش سرعت و در نتیجه، ضریب انتقال گرمای همرفتی می‌باشد. افزایش بازده گرمایی سیستم با رشد دبی جرمی دارای الگوی تقریباً خطی است که دلیل آن در ادامه شرح داده می‌شود. طبق رابطه (۴) و با در نظر گرفتن ثابت بودن مقدار ظرفیت گرمایی ویژه و دمای ورودی نانوسیال، شدت تابش و مساحت پنل فتولتایی، می‌توان پی برد که بازده گرمایی فقط تابعی از دبی جرمی و دمای خروجی نانوسیال از سیستم است. با لحاظ کردن این واقعیت که بیش‌ترین اختلاف میان دماهای خروجی و ورودی نانوسیال برابر با ۱/۲۸ درجه است می‌توان پی برد که تاثیرگذارترین پارامتر بر روی بازده گرمایی سیستم، دبی جرمی نانوسیال است که رابطه مستقیم با بازده گرمایی دارد.



شکل ۶- بازده گرمایی سیستم فتولتایی/گرمایی حاوی نانوسیال‌های هیبریدی دوتایی و سه‌تایی در مقادیر مختلف دبی جرمی.

بازده الکتریکی سیستم فتولتایی/گرمایی حاوی نانوسیال‌های هیبریدی دوتایی و سه‌تایی در نظر گرفته شده در مطالعه حاضر برای مقادیر مختلف دبی جرمی در شکل ۷ نمایش داده شده است. طبق نتایج، بازده الکتریکی سیستم فتولتایی/گرمایی حاوی نانوسیال‌های آب-اکسید گرافن/اکسید تیتانیوم/اکسید آهن، آب-اکسید گرافن/اکسید تیتانیوم، آب-اکسید گرافن/اکسید آهن و آب-اکسید تیتانیوم/اکسید آهن به ترتیب در محدوده ۱۳/۰۱-۱۳/۰۲ درصد، ۱۲/۲۳-۱۲/۲۴ درصد، ۱۲/۶۸-۱۲/۶۹ درصد و ۱۲/۱۰-۱۲/۱۱ درصد می‌باشد. سیستم حاوی نانوسیال هیبریدی سه‌تایی دارای عملکرد الکتریکی بهتری از سایر سیستم‌ها است چرا که عملکرد این نانوسیال در خنک‌کاری پنل فتولتایی بسیار بهتر از کلیه نانوسیال‌های هیبریدی دوتایی است. از طرف دیگر، مشهود است که دبی جرمی تاثیر ناچیزی بر روی عملکرد الکتریکی سیستم فتولتایی/گرمایی دارد. با افزایش دبی جرمی، که با افزایش سرعت نانوسیال همراه است، از طرفی، قابلیت خنک‌کاری نانوسیال بهبود می‌یابد که باعث کاهش دمای پنل فتولتایی و در نتیجه، افزایش توان الکتریکی تولیدی آن می‌شود. از طرف دیگر، با افزایش دبی جرمی، افت فشار نانوسیال و در نتیجه، توان الکتریکی

- [6] Almoatham S, Chiasson A, Mulford R, Moreno-Pena M. Development of experimentally-validated models for nocturnal cooling of thermal systems with photovoltaic thermal (PVT) modules. *Solar Energy*. 2024;268:112279.
- [7] Mortadi M, Fadar AE, Begdouri OA. 4E analysis of photovoltaic thermal collector-based tri-generation system with adsorption cooling: Annual simulation under Moroccan climate conditions. *Renewable Energy*. 2024;221:119828.
- [8] Sirin C, Goggins J, Hajdukiewicz M. A review on building-integrated photovoltaic/thermal systems for green buildings. *Renewable Energy*. 2023;229:120607.
- [9] Soltani S, Kasaeian A, Lavajoo A, Loni R, Najafi G, Mahian O. Exergetic and environmental assessment of a photovoltaic thermal-thermoelectric system using nanofluids: Indoor experimental tests. *Energy Conversion and Management*. 2020;218:112907.
- [10] Tembhare SP, Barai DP, Bhanvase BA. Performance evaluation of nanofluids in solar thermal and solar photovoltaic systems: A comprehensive review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2022;153:111738.
- [11] Murtadha TK. Effect of using Al_2O_3/TiO_2 hybrid nanofluids on improving the photovoltaic performance. *Case Studies in Thermal Engineering*. 2023;47:103112.
- [12] Memon AA, Usmna Khan WA, Muhammad T. Numerical investigation of photovoltaic thermal energy efficiency improvement using the backward step containing Cu- Al_2O_3 hybrid nanofluid. *Alexandria Engineering Journal*. 2023;75:391-406.
- [13] Khalili Z, Sheikholeslami M. Analyzing the effect of confined jet impingement on efficiency of photovoltaic thermal solar unit equipped with thermoelectric generator in existence of hybrid nanofluid. *Journal of Cleaner Production*. 2023;406:137063.
- [14] Azizi M, Tabatabaeeckollor R, Motevali A, Seyedi SRM. Evaluation of mono and hybrid nano-fluids on energy and exergy parameters of a photovoltaic-thermal system equipped with an eccentric parabolic trough concentrator. *Applied Thermal Engineering*. 2023;223:119979.
- [15] Hooshmandzade N, Motevali A, Seyedi SRM, Biparva P. Influence of single and hybrid water-based nanofluids on performance of microgrid photovoltaic/thermal system. *Applied Energy*. 2021;304:117769.
- [16] Bindu MV, Herbert GMJ. Experimental investigation of stability, optical property and thermal conductivity of water based MWCNT- Al_2O_3 -ZnO mono, binary and ternary nanofluid. *Synthetic Metals*. 2022;287:117058.
- [17] Wang MX, Almasi B, Bu sinnah ZA, Majdi HSh, Altalbawy FMA, Toghraie D, Waleed I, Zabibah RS, Altamari US, Zhang YX. A comprehensive laboratory measurement on the thermal characteristics of Ag-Cu-tungsten oxide/water nanofluid in mono, hybrid and ternary cases and presenting a new correlation. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*. 2023;143:104682.
- [18] Ahmed SE, Raizah Z, Arafa AAM, Hussein SA. FEM treatments for MHD highly mixed convection flow within partially heated double-lid driven odd-shaped enclosures using ternary composition nanofluids. *International Communications in Heat and Mass Transfer*. 2023;145:106854.
- [19] Adun H, Adedeji M, Dagbasi M, Bamisile O, Senol M, Kumar R. A numerical and exergy analysis of the effect of ternary nanofluid on performance of Photovoltaic thermal collector. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 2021;145:1413-1429.
- [20] Adun H, Mukhtar M, Adedeji M, Agwa T, Ibrahim KH, Bamisile O, Dagbasi M. Synthesis and application of ternary nanofluid for photovoltaic-thermal system: comparative analysis of energy and exergy performance with single and hybrid nanofluids. *Energies*. 2021;14:4434.
- [21] Adun H, Adedeji M, Ruwa T, Senol M, Kavaz D, Dagbasi M. Energy, exergy, economic, environmental (4E) approach to assessing the performance of a photovoltaic-



شکل ۸- بازده کلی سیستم فتوولتایی/اگرمایی حاوی نانوسیال‌های هیبریدی دوتایی و سه‌تایی در مقادیر مختلف دبی جرمی.

۷- نتیجه‌گیری

در مطالعه حاضر، قابلیت خنک‌کاری نانوسیال‌های هیبریدی دوتایی و سه‌تایی در یک سیستم فتوولتایی/اگرمایی مجهز به گردآور صفحه-لوله مارپیچی مقایسه شده است. آزمایش‌ها برای مقادیر مختلف دبی جرمی نانوسیال و با به کارگیری سوسپانسیون‌های پایدار آب-اکسید گرافن/اکسید تیتانیوم، آب-اکسید گرافن/اکسید آهن و آب-اکسید تیتانیوم/اکسید آهن به عنوان نانوسیال هیبریدی دوتایی و نانوسیال آب-اکسید گرافن/اکسید تیتانیوم/اکسید آهن به عنوان نانوسیال هیبریدی سه‌تایی انجام شده‌اند. نتایج نشان داد که در میان این نانوسیال‌ها، بیش‌ترین بازده‌های گرمایی، الکتریکی و کلی متعلق به نانوسیال هیبریدی سه‌تایی است، در حالی که نانوسیال هیبریدی دوتایی آب-اکسید تیتانیوم/اکسید آهن دارای بدترین عملکرد است. در نهایت، آشکار شد که افزایش دبی جرمی با بهبود عملکرد سیستم همراه است.

۸- مراجع

- [1] Mariam E, Ramasubramanian B, Reddy VS, Dalapati GK, Ghosh S, PA TS, Chakraborty S, Motapothula MR, Kumar A, Ramakrishna S, Krishnamurthy S. Emerging trends in cooling technologies for photovoltaic systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2024;192:114203.
- [2] Kazem HA, Chaichan MT, Al-Waeli AHA, Sopian K. A systematic review of photovoltaic/thermal applications in heat pumps systems. *Solar Energy*. 2024;269:112299.
- [3] Lekbir A, Hassani S, Mekhilef S. Techno-economic and life cycle assessment of a nanofluid-based concentrated Photovoltaic/Thermal-Thermoelectric hybrid system. *Journal of Power Sources*. 2024;595:234066.
- [4] Prakash KB, Chinnasamy S, Manimuthu C, Kumar PM. Assimilation of a novel thermal collector and phase change material in photovoltaic/thermal system - An energy and exergy based comparative study. *Journal of Energy Storage*. 2024;81:110461.
- [5] Abdollahi SA, Ranjbar SF, Jafari M. Numerical investigation of increasing the efficiency of thermal photovoltaic system by changing the level of heat transfer distribution. *Case Studies in Thermal Engineering*. 2024;54:103989.

- thermal system using a novel ternary nanofluid. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*. 2022;50:101804.
- [22] Bhat AY, Qayoum A. Performance enhancement of Photovoltaic-thermal system using hybrid tubes: An assessment of thermodynamic and thermohydraulic efficiencies. *Applied Thermal Engineering*. 2023;230:120652.
- [23] Abdalla AN, Shahsavari A. An experimental comparative assessment of the energy and exergy efficacy of a ternary nanofluid-based photovoltaic/thermal system equipped with a sheet-and-serpentine tube collector. *Journal of Cleaner Production*. 2023;395:136460.
- [24] Kenfack AZ, Nematchoua MK, Simo E, Mfoundikou MN, Fosso JVK, Babikir MH, Chara-Dackou VS. Exergetic optimization of some design parameters of the hybrid photovoltaic/thermal collector with bi-fluid air/ternary nanofluid (CuO/MgO/TiO₂). *SN Applied Sciences*. 2023;5:226.
- [25] Sepehrnia M, Shahsavari A, Maleki H, Moradi A. "Experimental study on the dynamic viscosity of hydraulic oil HLP68-Fe₃O₄-TiO₂-GO ternary hybrid nanofluid and modeling utilizing machine learning technique. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*. 2023;145:104841.
- [26] Shahsavari A, Salimpour MR, Saghafian M, 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*. 2016;76:1-11.
- [27] Moffat R. Describing the uncertainties in experimental results. *Experimental Thermal and Fluid Science*. 1988;1:3-17.