

مقایسه تجربی عملکرد سیستم‌های فتوولتائی/گرمایی حاوی نانوسیال‌های هیبریدی دوتایی و سه تایی - بخش دوم: تحلیل انرژی

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

چکیده

با توجه به اهمیت سامانه‌های فتوولتائی/گرمایی در بهره‌برداری هم‌زمان از انرژی خورشیدی، در این مطالعه عملکرد انرژی یک سیستم فتوولتائی/گرمایی خنک‌شونده با نانوسیال‌های هیبریدی به صورت آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفت. آزمایش‌ها با استفاده از یک شبیه‌ساز خورشیدی با شدت تابش کنترل‌شده انجام شد و راندمان‌های انرژی گرمایی، انرژی الکتریکی و انرژی کل سیستم بر اساس داده‌های تجربی محاسبه گردید. هدف مطالعه بررسی اثر دبی جرمی (۲۰، ۴۰، ۶۰ و ۸۰ کیلوگرم بر ساعت) بر راندمان‌های انرژی با استفاده از نانوسیال‌های هیبریدی دوتایی (اکسید گرافن/اکسید تیتانیوم، اکسید گرافن/اکسید آهن و اکسید تیتانیوم/اکسید آهن) و سه‌تایی (اکسید گرافن/اکسید تیتانیوم/اکسید آهن) بود. نتایج نشان داد که راندمان انرژی گرمایی با افزایش دبی جرمی به‌طور محسوسی افزایش یافته و بیشترین مقدار آن برای نانوسیال سه‌تایی در دبی ۸۰ کیلوگرم بر ساعت به ۱/۶۷ درصد رسید. راندمان انرژی الکتریکی در محدوده‌ای تقریباً ثابت باقی ماند (بین ۱۲/۷ تا ۱۳/۷ درصد) و تفاوت‌ها عمدتاً ناشی از نوع نانوسیال بودند. مقایسه نانوسیال‌ها نشان داد که ترکیب‌های حاوی اکسید گرافن و به‌ویژه نانوسیال سه‌تایی عملکرد برتری نسبت به سایر ترکیب‌ها دارند.

واژه‌های کلیدی: سیستم فتوولتائی/گرمایی، نانوسیال هیبریدی، راندمان گرمایی، راندمان الکتریکی، انرژی، انرژی خورشیدی.

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

A. Shahsavar

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

Abstract

In this study, a photovoltaic/thermal (PV/T) system cooled by hybrid nanofluids was experimentally evaluated. The aim was to investigate the effect of mass flow rate (20, 40, 60, and 80 kg/h) on the thermal, electrical, and overall exergy efficiencies using binary hybrid nanofluids (graphene oxide/titanium dioxide-water, graphene oxide/iron oxide-water, and titanium dioxide/iron oxide-water) as well as a ternary hybrid nanofluid (graphene oxide/titanium dioxide/iron oxide-water). The results showed that the thermal exergy efficiency significantly increased with mass flow rate, reaching a maximum of 1.67% for the ternary nanofluid at 80 kg/h. Electrical exergy efficiency remained nearly constant (ranging from 12.7% to 13.7%), with differences mainly attributed to the type of nanofluid. Overall exergy efficiency also improved with increasing mass flow rate, achieving a maximum of 15.36% for the ternary nanofluid. Comparison among the nanofluids revealed that those containing graphene oxide, particularly the ternary hybrid nanofluid, exhibited superior performance compared to other combinations. Overall, the use of ternary hybrid nanofluids can be considered an effective approach to enhance exergy efficiency in photovoltaic/thermal systems.

Keywords: Photovoltaic thermal system, hybrid Nanofluid, Thermal efficiency, Electrical efficiency, Exergy, Solar energy.

مواجه هستند [۵]. راندمان نسبتاً پایین سلول‌های فتوولتائی در دماهای بالا خروجی الکتریکی را کاهش می‌دهد و سیالات کاری معمولی مانند آب یا هوا هدایت گرمایی محدودی دارند که حذف گرما را محدود می‌کند [۶]. در سال‌های اخیر، نانوسیال‌ها به عنوان سیالات پیشرفته انتقال گرما معرفی شده‌اند [۷]. این سیالات، که شامل سوسپانسیون نانوذرات در سیالات پایه هستند، هدایت گرمایی، ظرفیت گرمایی ویژه و عملکرد انتقال گرمایی همرفتی بهتری نسبت به سیالات معمولی نشان می‌دهند [۸] و امکان خنک‌کاری موثرتر سلول‌های فتوولتائی و بازایی انرژی گرمایی بیشتری را فراهم می‌کنند [۹].

به‌ویژه، نانوسیال‌های هیبریدی که شامل دو یا چند نوع نانوذره هستند، با ایجاد اثر هم‌افزایی، ویژگی‌های ترموفیزیکی برتر و پایداری بیشتر نسبت به نانوسیال‌های تک‌ذره‌ای ارائه می‌دهند [۱۰-۱۲].

چندین مطالعه تجربی و عددی، پیشرفت‌های قابل توجهی را در انتقال گرما و عملکرد سیستم‌های فتوولتائی/گرمایی هنگام استفاده از

۱- مقدمه

تقاضای جهانی رو به رشد برای انرژی پایدار، تلاش‌های تحقیقاتی در زمینه فناوری‌های تجدیدپذیر را که هم‌زمان قادر به افزایش کارایی و کاهش اثرات زیست‌محیطی هستند، تشدید کرده است [۱]. سیستم‌های ترکیبی فتوولتائی/گرمایی به دلیل توانایی تولید هم‌زمان برق و انرژی گرمایی، توجه زیادی را به خود جلب کرده‌اند [۲]. این سیستم‌ها با ادغام سلول‌های فتوولتائی و گردآورهای گرمایی، نه تنها راندمان کلی تبدیل انرژی را افزایش می‌دهند، بلکه اثرات منفی دمای بالای عملیاتی بر عملکرد ماژول‌های فتوولتائی را کاهش می‌دهند [۳]. در نتیجه، سیستم‌های فتوولتائی/گرمایی به عنوان راه‌حل مناسب برای کاربردهای ساختمانی، صنعتی و سیستم‌های انرژی توزیع شده مورد توجه قرار گرفته‌اند [۴].

با وجود مزایا، سیستم‌های فتوولتائی/گرمایی سنتی با چالش‌هایی

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

تاریخ دریافت: ۰۴/۰۶/۳۱

تاریخ پذیرش: ۰۴/۱۱/۲۷

چنین سیال‌های هیبریدی گزارش کرده‌اند. شهسوار و جها [۱۳] به‌صورت تجربی تأثیر استفاده همزمان از یک آشفته‌سازی چرخشی و نانوسیال هیبریدی دوتایی در یک سیستم فتوولتائی/گرمایی را بررسی کردند. برای این منظور از نوار پیچ‌خورده به‌عنوان آشفته‌سازی و از نانوسیال اکسید کبالت/اکسید تیتانیوم-آب با نسبت‌های اختلاط مختلف و غلظت‌های حجمی گوناگون استفاده شد. نتایج نشان داد که پارامترهایی مانند نسبت اختلاط نانوذرات، دبی جرمی سیال، گام پیچ و سرعت چرخش آشفته‌سازی اثر قابل توجهی بر راندمان انرژی و انرژی سیستم دارند. در شرایط بهینه، بیشینه راندمان انرژی حدود ۷۳ درصد و بیشینه راندمان انرژی حدود ۱۴ درصد به دست آمد. نجف‌پور و همکاران [۱۴] یک روش نوین بر پایه به‌کارگیری نانوسیال هیبریدی سه‌تایی همراه با طراحی بهینه هندسی را برای بهبود قابل‌توجه در انتقال گرما و کاهش تولید آنتروپی در سیستم‌های فتوولتائی/گرمایی معرفی کردند. شبیه‌سازی سه‌بعدی با نرم‌افزار Comsol برای بررسی عملکرد گرمایی و هیدروپدینامیکی هیت‌سینک گرمایی مینی‌کانالی متصل به سلول‌های فتوولتائی انجام شد. نتایج نشان داد تغییرات هندسی نقش مهمی در ارتقای عملکرد گرمایی دارند و یکی از پیکربندی‌ها بهترین راندمان انتقال گرما را ایجاد می‌کند. همچنین با استفاده از روش تاگوچی و سطح پاسخ، مقادیر بهینه پارامترهایی مانند عدد رینولدز، دمای ورودی، کسر حجمی و فاکتور شکل نانوذرات به دست آمد که منجر به کاهش تلفات گرمایی و جریان شد. الحربی و الزهرانی [۱۵] اثر نانوسیال هیبریدی سه‌تایی شامل نانولوله‌های کربنی چندجداره، آلومینا و مس بر عملکرد یک سیستم فتوولتائی/گرمایی را به صورت تجربی بررسی کردند. مدل شامل ماده تغییر فاز (پارافین) و چهار استوانه برای هدایت جریان نانوسیال طراحی گردید. نتایج نشان داد که افزایش عدد رینولدز، کسر حجمی و فاکتور شکل نانوذرات باعث بهبود بازدهی سیستم می‌شود. در شرایط بهینه، بازده الکتریکی حدود ۸ درصد و راندمان گرمایی بیش از ۷۱ درصد به دست آمد. شعلان و همکاران [۱۶] از نانوسیال هیبریدی دوتایی شامل اکسید روی و اکسید تیتانیوم با غلظت بسیار کم برای مدیریت گرمایی یک سیستم فتوولتائی/گرمایی استفاده کردند. سه پنل مشابه با روش‌های خنک‌کاری هوا، آب و نانوسیال هیبریدی مورد آزمایش قرار گرفت و نتایج عددی و تجربی مقایسه شدند. یافته‌ها نشان داد که خنک‌کاری با نانوسیال هیبریدی بیشترین کاهش دما را ایجاد کرده و بهبود قابل توجهی در توان خروجی و راندمان الکتریکی نسبت به دو روش دیگر داشته است. ربیعی و همکاران [۱۷] رویکردی نوین برای مدیریت گرمایی پنل‌های فتوولتائی مجهز به متمرکزکننده ارائه کردند که در آن از ترکیب نانوسیال هیبریدی و هیت‌سینک مینی‌کانالی با دیواره موج‌دار استفاده شده بود. شبیه‌سازی‌های عددی برای پیکربندی‌های مختلف نشان داد که طراحی بهینه موجب افزایش چشمگیر راندمان الکتریکی و توان خروجی، همراه با نیاز بسیار کم به توان پمپاژ می‌شود. بهره‌گیری از دیواره موج‌دار و لایه متخلخل موجب تقویت انتقال گرما از طریق ایجاد آشفته‌سازی ثانویه و افزایش برهم‌کنش سیال و دیواره شده بود. همچنین با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی و الگوریتم ژنتیک، شرایط بهینه برای تعادل میان راندمان، یکنواختی دما و مصرف انرژی تعیین گردیده بود.

بررسی ادبیات تحقیق نشان می‌دهد که هم نانوسیال‌های هیبریدی

دوتایی و هم سه‌تایی در بهبود فرآیند خنک‌کاری پنل‌های فتوولتائی مؤثر هستند و مقالات متعددی در این زمینه منتشر شده است. با این حال، مقایسه همزمان عملکرد این دو گروه از نانوسیال‌ها در سیستم‌های فتوولتائی/گرمایی تنها در یک تحقیق انجام شده است. در آن پژوهش، شهسوار [۱۸] عملکرد سوسپانسیون‌های پایدار اکسید گرافن/اکسید تیتانیوم-آب، اکسید گرافن/اکسید آهن-آب و اکسید تیتانیوم/اکسید آهن-آب به‌عنوان نانوسیال‌های هیبریدی دوتایی و از سوسپانسیون اکسید گرافن/اکسید تیتانیوم/اکسید آهن-آب به‌عنوان نانوسیال هیبریدی سه‌تایی را در یک سیستم فتوولتائی/گرمایی مجهز به گردآور صفحه-لوله مارپیچی به‌صورت تجربی بررسی کرد. نتایج نشان داد که بهترین عملکرد گرمایی، الکتریکی و کلی همواره متعلق به نانوسیال هیبریدی سه‌تایی بوده و بدترین عملکرد به نانوسیال اکسید تیتانیوم/اکسید آهن-آب اختصاص داشت. همچنین مشخص شد که با افزایش دبی جرمی، بازده گرمایی، الکتریکی و کلی هر دو گروه از نانوسیال‌ها بهبود می‌یابد. با وجود این، آن پژوهش تنها به تحلیل انرژی بسنده کرده بود، در حالی که تحلیل انرژی با در نظر گرفتن کیفیت انرژی می‌تواند ارزیابی جامع‌تر و دقیق‌تری از عملکرد سامانه ارائه دهد. بر همین اساس، هدف مطالعه حاضر تحلیل انرژی همان سیستم و مقایسه کارایی نانوسیال‌های هیبریدی دوتایی و سه‌تایی از این منظر است. در تمامی آزمایش‌ها غلظت حجمی نانوسیال‌ها برابر با ۱ درصد در نظر گرفته شده و اثر تغییر دبی جرمی در بازه ۲۰ تا ۸۰ کیلوگرم بر ساعت بر بازده‌های گرمایی، الکتریکی و کلی سیستم از دیدگاه انرژی مورد بررسی قرار گرفته است.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- سامانه آزمایشگاهی و تجهیزات اندازه‌گیری

سامانه آزمایشگاهی شامل یک گردآور صفحه-لوله مارپیچی بود که در پشت پنل فتوولتائی قرار داشت. برای افزایش انتقال گرما، یک صفحه مسی با چسب گرمایی در زیر پنل نصب شد و لوله مارپیچی مسی (قطر داخلی ۴ میلی‌متر، ضخامت ۱ میلی‌متر) روی آن جوش داده شد (شکل ۱). مجموعه لوله‌ها با لایه‌ای از پشم شیشه عایق‌کاری شد. سیال خنک‌کننده در مدار بسته شامل مخزن دو لیتری، پمپ جریان مستقیم با هد ۳/۵ متر و یک مبادله‌کن صفحه‌ای گردش می‌کرد. نانوسیال پس از عبور از گردآور وارد مبادله‌کن شده و انرژی گرمایی خود را به محلول آب-اتیلن گلیکول منتقل می‌کرد. دمای محلول توسط حمام دمای ثابت ۱۸۰۰ وات کنترل می‌شد تا دمای خروجی نانوسیال به مقدار اولیه ۲۰ درجه سلسیوس بازگردد. افت فشار و دبی جریان با فشارسنج تفاضلی Rosemount 3051CD و دبی‌سنج روتاری Malema-M10000 اندازه‌گیری شد. فهرست تجهیزات اصلی در جدول ۱ ارائه شده است.

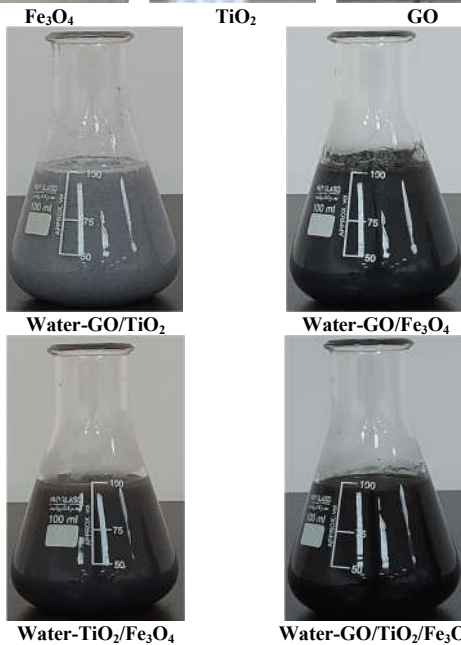
شبیه‌ساز خورشیدی قادر به ایجاد تابش ۱۰۰۰ وات بر متر مربع در دمای محیط ۲۲ درجه سلسیوس بود (شکل ۲). در طراحی آن از چهار لامپ LED ده‌واتی، چهار لامپ متال هالید ۴۰۰ وات، محفظه آلومینیومی، چهار فن DC و یک دیمر AC استفاده شد تا تابشی نزدیک به نور خورشید ایجاد شود. یکنواختی نور تولیدشده با دستگاه تابش‌سنج Trotec BF06 بررسی گردید. پنل فتوولتائی استفاده شده،

۲-۲- آماده‌سازی و پایدارسازی نانوسیال‌های هیبریدی

نانوسیال‌های هیبریدی دوتایی و سه‌تایی با روش دو مرحله‌ای تهیه شدند. نانوذرات اکسید گرافن (GO)، اکسید تیتانیوم (TiO_2) و اکسید آهن (Fe_3O_4) از تأمین‌کنندگان معتبر تهیه شد و با سیال پایه مخلوط گردیدند. ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی این نانوذرات در جدول ۳ ارائه شده‌اند. غلظت کل نانوذرات ۱ درصد حجمی بود و نسبت اختلاط برای نانوسیال‌های دوتایی ۱:۱ و برای سه‌تایی ۱:۱:۱ در نظر گرفته شد. این نسبت اختلاط در تمامی آزمایش‌ها ثابت بوده و هدف اصلی مطالعه، بررسی اثر شرایط عملکردی سامانه فتوولتائی/گرمایی بر راندمان‌های انرژی است، نه بهینه‌سازی ترکیب نانوسیال. در نهایت، سوسپانسیون به مدت دو ساعت با دستگاه اولتراسونیک پروبی (Hielscher UP400S)، توان ۴۰۰ وات و فرکانس ۲۴ کیلوهرتز) همگن‌سازی شدند. شکل ۳ نمونه واقعی نانوذرات و نانوسیال‌های سنتز شده را نشان می‌دهد.

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

نانوذره			خاصیت
Fe_3O_4	TiO_2	GO	
۹۹/۵	۹۹/۹	۹۹/۳	خلوص
۴۸۰۰	۴۲۳۰	۱۵۰۰	چگالی (کیلوگرم بر متر مکعب)
۲۰-۱۵	۳۰	۵۵۰۰-۱۵۰۰	سایز (نانومتر)



شکل ۳- تصویر واقعی نانوذرات و نانوسیال‌های مورد استفاده در مطالعه حاضر [۱۸].

مدل ۱۰ وات ساخت شرکت Eco-Worthy آمریکا بود (جدول ۲). دمای سطح پنل با شش ترموکوپل نوع K اندازه‌گیری و ثبت شد و پارامترهای الکتریکی با مولتی‌متر LUTRUN ثبت گردید.



شکل ۱- گردآور صفحه-لوله استفاده شده در مطالعه حاضر [۱۸].

جدول ۱- مشخصات تجهیزات مورد استفاده در دستگاه آزمایشگاهی.

دستگاه	مدل	دقت
نورسنج	TROTEC-BF06	±۰/۵
دماسنج	K-type	±۰/۷۵
ترموکوپل	TES-1327 K	±۰/۱
مولتی‌متر	LUTURON-DW6060	±۰/۱۸
مولتی‌متر	LUTURON-DW6060	±۰/۱
دبی‌سنج	Malema-MI0000	±۰/۲
فشارسنج	Rosemount 3051CD	±۰/۱



شکل ۲- شبیه‌ساز خورشیدی به کار گرفته شده در مطالعه حاضر [۱۸].

جدول ۲- مشخصات فنی پنل فتوولتائی مورد استفاده.

نوع	سیلیکون تک کریستالی
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 سلسیوس)	-۰/۴۷

قطر متوسط نانوذرات و پایداری نانوسیال‌ها، به ترتیب، به کمک آزمون‌های DLS و زتاپتانسیل ارزیابی گردیدند. نتایج حاکی از آن بود که اندازه متوسط نانوذرات در نانوسیال‌ها کمتر از ۶۰ نانومتر است و مقادیر زتاپتانسیل کمتر از ۳۰- میلی‌ولت گزارش شدند. برای بررسی بیشتر پایداری نانوسیال‌ها، هر دو آزمون DLS و زتاپتانسیل با فاصله زمانی یک هفته برای مدت یک ماه تکرار شدند. تغییر محسوسی در نتایج آزمایش‌ها مشاهده نشد. بنابراین، می‌توان ادعا کرد که نانوسیال‌های سنتز شده در تحقیق حاضر حداقل برای مدت یک ماه پایدار می‌باشند.

۲-۳- خواص ترموفیزیکی نانوسیال‌ها

چگالی و گرمای ویژه نانوسیال‌ها، به ترتیب، با روابط (۱) و (۲) محاسبه شدند [۱۹]:

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

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

که ϕ غلظت حجمی ذرات، و اندیس‌های w و p به ترتیب نشان‌دهنده آب و نانوذرات هستند. هدایت گرمایی با دستگاه KD2-Pro (شرکت Decagon، آمریکا) اندازه‌گیری شد. نتایج نشان داد که نانوسیال سه‌تایی بیشترین هدایت گرمایی و نانوسیال اکسید آهن/اکسید تیتانیوم-آب کمترین آن را دارد (جدول ۴).

جدول ۴- خواص ترموفیزیکی نانوسیال‌های مورد بررسی.

نانوسیال	ρ_{nf} (kg/m ³)	$c_{p,nf}$ (J/kg.K)	k_{nf} (W/m.K)
GO/TiO ₂ -water	۱۰۳۲/۱۸۴	۴۱۱۹/۵۸۹	۰/۷۲۶
GO/Fe ₃ O ₄ -water	۱۰۱۷/۵۳۴	۴۱۰۸/۴۲۹	۰/۷۳۳
TiO ₂ /Fe ₃ O ₄ -water	۱۰۳۳/۷۷۹	۴۰۲۷/۹۴۷	۰/۶۸۷
GO/TiO ₂ /Fe ₃ O ₄ -water	۱۰۲۱/۴۶۵	۴۰۸۸/۶۸۹	۰/۷۷۲

۳- آنالیز آگرزری

به منظور ارزیابی عملکرد سیستم بر مبنای قانون دوم ترمودینامیک، تحلیل آگرزری برای بررسی کیفیت انرژی‌های ورودی و خروجی انجام شد. در این راستا، آگرزری ورودی سیستم ناشی از تابش خورشیدی بوده و آگرزری خروجی شامل توان الکتریکی تولیدی پنل، آگرزری گرمایی بازیافتی توسط نانوسیال و همچنین توان مصرفی پمپ در اثر افت فشار سیال است.

آگرزری ورودی ناشی از تابش خورشیدی مطابق با مدل پتلا محاسبه شده است که به صورت زیر بیان می‌شود [۲۰]:

$$Ex_{solar} = I_r A_{pv} \left[1 - \frac{4}{3} \left(\frac{T_a}{T_{sun}} \right) + \frac{1}{3} \left(\frac{T_a}{T_{sun}} \right)^4 \right] \quad (3)$$

که در آن I_r شدت تابش خورشیدی، A_{pv} مساحت پنل فتولتائی، T_a دمای محیط و T_{sun} دمای خورشید است که برابر با ۵۸۰۰ کلوین در نظر گرفته شده است.

آگرزری الکتریکی خروجی سیستم برابر با توان الکتریکی خالص تولیدی پنل فتولتائی پس از کسر توان مصرفی پمپ است. توان مصرفی پمپ ناشی از افت فشار نانوسیال بوده و به صورت $\frac{\dot{m}\Delta p}{\rho_{nf}\eta_p}$ محاسبه می‌شود که در آن، \dot{m} دبی جرمی نانوسیال، Δp افت فشار نانوسیال و η_p

راندمان پمپ (که برابر با ۷۵٪ در نظر گرفته شده است) می‌باشد. بر این اساس، راندمان آگرزری الکتریکی سیستم مطابق رابطه (۳) تعریف می‌شود [۲۰]:

$$\lambda_{el} = \frac{VI - \frac{\dot{m}\Delta p}{\rho_{nf}\eta_p}}{I_r A_{pv} \left[1 - \frac{4}{3} \left(\frac{T_a}{T_{sun}} \right) + \frac{1}{3} \left(\frac{T_a}{T_{sun}} \right)^4 \right]} \times 100 \quad (4)$$

که V ولتاژ خروجی پنل فتولتائی و I جریان خروجی پنل فتولتائی است.

از سوی دیگر، آگرزری گرمایی بازیافتی توسط نانوسیال ناشی از افزایش دمای سیال در مبادله‌کن گرمایی است. این مؤلفه بیانگر کیفیت انرژی گرمایی قابل استفاده در مقایسه با دمای مرجع محیط بوده و مطابق با رابطه (۵) محاسبه می‌شود:

$$\lambda_{th} = \frac{\dot{m}c_{p,nf}(T_{out} - T_{in}) \left(1 - \frac{T_a}{T_o} + \frac{273}{T_o} \right)}{I_r A_{pv} \left[1 - \frac{4}{3} \left(\frac{T_a}{T_{sun}} \right) + \frac{1}{3} \left(\frac{T_a}{T_{sun}} \right)^4 \right]} \times 100 \quad (5)$$

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

در نهایت، راندمان آگرزری کل سیستم به صورت مجموع راندمان‌های آگرزری الکتریکی و گرمایی تعریف می‌شود:

$$\lambda_{ov} = \lambda_{th} + \lambda_{el} \quad (6)$$

۴- تحلیل عدم قطعیت

به منظور ارزیابی دقت راندمان‌های آگرزری الکتریکی، گرمایی و کل سیستم فتولتائی/گرمایی، تحلیل عدم قطعیت بر اساس روش کلاسیک موفات [۲۱] انجام شد. دقت ابزارهای اندازه‌گیری مورد استفاده در این تحقیق پیش‌تر در جدول ۱ ارائه شده و در محاسبات عدم قطعیت لحاظ شده‌اند.

بر اساس روش موفات، عدم قطعیت یک پارامتر وابسته از ترکیب عدم قطعیت متغیرهای مستقل مؤثر بر آن به دست می‌آید. اگر R پارامتر خروجی و v_i متغیرهای مستقل باشند، عدم قطعیت کل از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

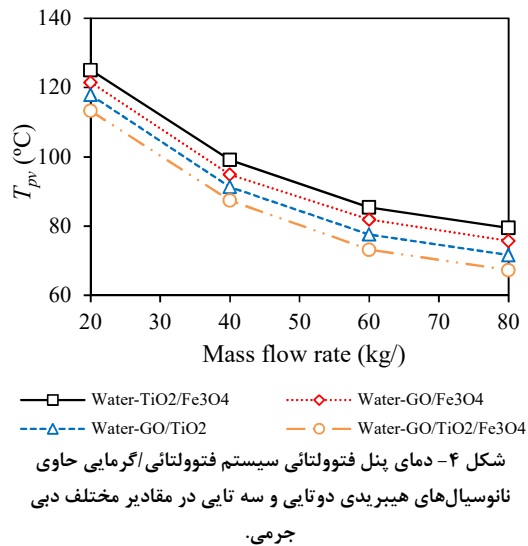
$$\delta R = \sqrt{\left(\frac{\partial R}{\partial v_1} \delta v_1 \right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial R}{\partial v_n} \delta v_n \right)^2} \quad (6)$$

که در آن، δv_i عدم قطعیت هر متغیر مستقل مطابق جدول ۱ و $\frac{\partial R}{\partial v_1}$ شاخص حساسیت خروجی نسبت به آن متغیر است.

بر اساس روابط (۳) تا (۵)، راندمان آگرزری الکتریکی تابع پارامترهای الکتریکی، هیدرولیکی و تابش خورشیدی است، در حالی که راندمان آگرزری گرمایی عمدتاً به اختلاف دمای نانوسیال، دبی جرمی و شرایط محیطی وابسته است. راندمان آگرزری کل نیز به صورت ترکیبی از این دو مؤلفه تعریف می‌شود. بر این اساس، عدم قطعیت هر یک از راندمان‌ها از ترکیب عدم قطعیت متغیرهای مستقل مؤثر بر آن‌ها محاسبه شد.

نتایج تحلیل حساسیت نسبی نشان داد که عدم قطعیت راندمان آگرزری الکتریکی بیشترین تأثیر را از ولتاژ، جریان و شدت تابش خورشیدی می‌پذیرد، در حالی که پارامترهای دمایی و افت فشار نقش ثانویه‌ای دارند. در مقابل، عدم قطعیت راندمان آگرزری گرمایی به‌طور غالب تحت تأثیر اندازه‌گیری دمای ورودی و خروجی نانوسیال قرار دارد

از منظر فیزیکی، کاهش دمای پنل با افزایش دبی جرمی را می‌توان به افزایش شدت جابجایی اجباری در لوله مارپیچ نسبت داد. با افزایش دبی، سرعت سیال و عدد رینولدز افزایش یافته و در نتیجه، ضریب انتقال گرما جابجایی بین دیواره لوله و نانوسیال تقویت می‌شود. این امر، مقاومت گرمایی سمت سیال را کاهش داده و نرخ انتقال گرمای همرفتی از پنل فتولتانی به سیال خنک‌کننده را افزایش می‌دهد. در نتیجه، گرمای تولیدی در پنل با سرعت بیشتری دفع شده و دمای سطح پنل کاهش می‌یابد. از سوی دیگر، تفاوت عملکرد میان نانوسیال‌ها به‌طور مستقیم به خواص ترموفیزیکی آن‌ها، به‌ویژه هدایت گرمایی، بازمی‌گردد. نانوسیال سه‌تایی به دلیل برخورداری از بالاترین هدایت گرمایی (مطابق جدول ۴)، انتقال گرمای مؤثرتری را در لایه مرزی سیال فراهم کرده و باعث کاهش بیشتر دمای پنل می‌شود. حضور اکسید گرافن در ترکیب نانوسیال‌ها نقش کلیدی در این فرآیند دارد؛ زیرا ساختار صفحه‌ای و هدایت گرمایی بالای آن موجب تسهیل انتقال انرژی و کاهش گرادیان‌های دمایی موضعی می‌شود. به همین دلیل، نانوسیال‌های حاوی اکسید گرافن همواره عملکرد بهتری نسبت به ترکیب اکسید تیتانیوم/اکسید آهن از خود نشان داده‌اند. کاهش دمای پنل نه‌تنها از دیدگاه انتقال گرما حائز اهمیت است، بلکه اثر مستقیمی بر بهبود عملکرد الکتریکی و آگزروی سیستم نیز دارد. کاهش دمای کاری پنل موجب کاهش تلفات گرمایی به محیط و افزایش کیفیت انرژی بازیافتی می‌شود که این موضوع به‌خوبی افزایش راندمان آگزروی گرمایی و بهبود ملایم راندمان آگزروی کل مشاهده‌شده در این مطالعه را توجیه می‌کند.



راندمان آگزروی گرمایی سیستم فتولتانی/گرمایی حاوی نانوسیال‌های هیبریدی دوتایی و سه تایی در نظر گرفته شده در مطالعه حاضر برای مقادیر مختلف دبی جرمی در شکل ۵ نمایش داده شده است. بررسی نتایج نشان می‌دهد که با افزایش دبی جرمی از ۲۰ تا ۸۰ کیلوگرم بر ساعت، راندمان آگزروی گرمایی برای تمامی نانوسیال‌ها روندی افزایشی داشته است. به‌عنوان نمونه، در نانوسیال سه‌تایی اکسید گرافن/اکسید تیتانیوم/اکسید آهن-آب، مقدار راندمان از ۰/۹۹ درصد

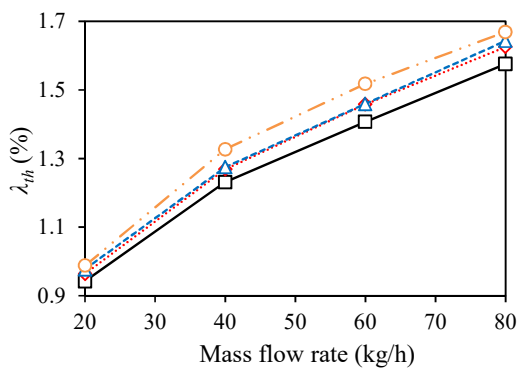
و دبی جرمی و تابش خورشیدی در رتبه‌های بعدی اهمیت قرار می‌گیرند. از آنجا که راندمان آگزروی کل برابر مجموع دو مؤلفه الکتریکی و گرمایی است، عدم قطعیت آن به‌طور هم‌زمان از پارامترهای دمایی، الکتریکی و تابش خورشیدی تأثیر می‌پذیرد.

بر اساس این تحلیل جامع، بیشترین عدم قطعیت محاسبه‌شده برای راندمان‌های آگزروی سیستم برابر با ۵/۶۹ درصد بوده که این مقدار به‌عنوان حالت بحرانی (worst-case) گزارش شده است. نتایج نشان می‌دهد که توزیع عدم قطعیت بین متغیرهای ورودی یکنواخت نبوده و ماهیت فیزیکی هر راندمان، عامل تعیین‌کننده در حساسیت آن نسبت به پارامترهای اندازه‌گیری است.

۵- نتایج

شکل ۴ تغییرات دمای متوسط سطح پنل فتولتانی را بر حسب دبی جرمی برای نانوسیال‌های هیبریدی مختلف نشان می‌دهد. نتایج بیانگر آن است که با افزایش دبی جرمی از ۲۰ به ۸۰ کیلوگرم بر ساعت، دمای پنل در تمامی نانوسیال‌ها به‌طور قابل توجهی کاهش یافته است. برای نانوسیال هیبریدی سه‌تایی اکسید گرافن/اکسید تیتانیوم/اکسید آهن-آب، دمای پنل از ۱۱۴/۲۷ درجه سلسیوس در دبی ۲۰ کیلوگرم بر ساعت به ۶۷/۳۰ درجه سلسیوس در دبی ۸۰ کیلوگرم بر ساعت کاهش یافته است که بیانگر افت دمایی حدود ۴۰/۶ درصد است. در نانوسیال‌های هیبریدی دوتایی نیز روند مشابهی مشاهده می‌شود؛ به‌طوری که کاهش دمای پنل برای ترکیب‌های اکسید گرافن/اکسید تیتانیوم-آب، اکسید گرافن/اکسید آهن-آب و اکسید تیتانیوم/اکسید آهن-آب به ترتیب حدود ۳۹/۲، ۳۷/۶ و ۳۶/۴ درصد گزارش شده است. این مقایسه نشان می‌دهد که بیشترین کاهش دما همواره مربوط به نانوسیال سه‌تایی و کمترین آن مربوط به ترکیب اکسید تیتانیوم/اکسید آهن است. همچنین، در هر دبی جرمی مشخص، اختلاف دمای پنل میان بهترین و ضعیف‌ترین نانوسیال قابل توجه است. به‌عنوان نمونه، در دبی ۸۰ کیلوگرم بر ساعت، دمای پنل برای نانوسیال سه‌تایی برابر با ۶۷/۳۰ درجه درجه سلسیوس است، در حالی که این مقدار برای نانوسیال اکسید تیتانیوم/اکسید آهن-آب به ۷۹/۵۱ درجه درجه سلسیوس می‌رسد؛ یعنی اختلافی حدود ۱۲/۲۰ درجه درجه سلسیوس که نشان‌دهنده برتری آشکار عملکرد خنک‌کاری نانوسیال سه‌تایی است.

از دیدگاه کیفی، نتایج نشان می‌دهد که افزایش دبی جرمی در تمامی نانوسیال‌ها منجر به کاهش یکنواخت و پیوسته دمای پنل فتولتانی شده است. این رفتار نشان می‌دهد که فرآیند خنک‌کاری در کل بازه دبی مورد بررسی تحت کنترل جابجایی اجباری قرار دارد و هیچ‌گونه رفتار غیرخطی یا ناپایدار در روند تغییرات دما مشاهده نمی‌شود. علاوه بر این، ترتیب عملکرد نانوسیال‌ها در کاهش دمای پنل در تمام دبی‌ها ثابت باقی مانده است؛ به‌طوری که نانوسیال سه‌تایی همواره کمترین دمای پنل و نانوسیال اکسید تیتانیوم/اکسید آهن-آب بیشترین دمای پنل را نشان داده است. این یکنواختی در رتبه‌بندی نانوسیال‌ها بیانگر آن است که تفاوت عملکرد آن‌ها ناشی از تفاوت‌های بنیادی در خواص ترموفیزیکی و مکانیزم انتقال گرما بوده و نه نوسانات آزمایشگاهی.



شکل ۵- راندمان آگزروی گرمایی سیستم فتولتایی/گرمایی حاوی نانوسیال‌های هیبریدی دوتایی و سه تایی در مقادیر مختلف دبی جرمی.

راندمان آگزروی الکتریکی سیستم فتولتایی/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. راندمان آگزروی الکتریکی در مقایسه با راندمان گرمایی تغییرات بسیار اندکی با تغییر دبی جرمی از ۲۰ تا ۸۰ کیلوگرم بر ساعت نشان داده است. به‌عنوان مثال، در نانوسیال سه‌تایی اکسید گرافن/اکسید تیتانیوم/اکسید آهن-آب، مقدار راندمان تقریباً ثابت مانده و تنها از ۱۳/۶۹ درصد در دبی ۲۰ به ۱۳/۷۰ درصد در دبی ۸۰ رسیده است؛ تغییری ناچیز که کمتر از یک دهم درصد است. همین روند در سایر نانوسیال‌ها نیز مشاهده می‌شود، به‌گونه‌ای که تغییر دبی عملاً اثری محسوس بر راندمان آگزروی الکتریکی نداشته است. ثابت ماندن راندمان آگزروی الکتریکی با تغییر دبی را می‌توان به دو دلیل اصلی نسبت داد: نخست اینکه توان تولیدی پنل عمده تابع شدت تابش است و تغییر دبی تنها از مسیر تغییر دمای پنل اثر می‌گذارد؛ دوم اینکه با افزایش دبی، در کنار بهبود خنک‌کاری، افت فشار و توان مصرفی پمپ نیز افزایش می‌یابد. بنابراین بخش قابل توجهی از سود ناشی از کاهش دمای پنل، توسط افزایش توان پمپاژ خنثی می‌شود و تغییرات خالص در آگزروی الکتریکی کوچک باقی می‌ماند. مقایسه بین نانوسیال‌ها نشان می‌دهد که بهترین عملکرد مربوط به نانوسیال سه‌تایی است که در تمام دبی‌ها راندمان حدود ۱۳/۷ درصد به دست آورده است. پس از آن، ترکیب اکسید گرافن/اکسید آهن با راندمان ۱۳/۳۵ درصد در رتبه دوم قرار دارد. در میان نانوسیال‌های دوتایی، کمترین راندمان مربوط به ترکیب اکسید تیتانیوم/اکسید آهن است که حدود ۱۲/۷۴ درصد را ثبت کرده است. اختلاف میان بهترین و ضعیف‌ترین نانوسیال در این بخش حدود یک درصد مطلق و نزدیک به ۸ درصد نسبی است که نشان می‌دهد انتخاب نوع نانوسیال در بهبود راندمان الکتریکی مؤثرتر از تغییر دبی جرمی است.

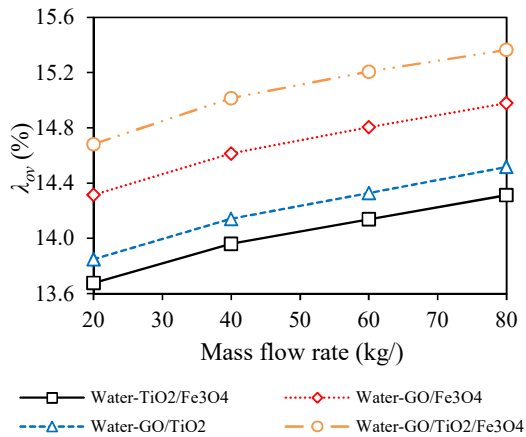
به طور کلی می‌توان نتیجه گرفت که راندمان آگزروی الکتریکی سیستم تقریباً مستقل از تغییرات دبی جرمی سیال بوده و تفاوت‌ها بیشتر به نوع نانوسیال وابسته است. حضور اکسید گرافن در ترکیب، چه در حالت دوگانه و به‌ویژه در حالت سه‌گانه، تأثیر مثبتی بر بهبود

در دبی ۲۰ به ۱/۶۷ درصد در دبی ۸۰ رسیده است که بیانگر رشدی در حدود ۶۹ درصد است. تغییر مشابهی در سایر نانوسیال‌های دوتایی نیز مشاهده می‌شود؛ به‌طور مثال در ترکیب اکسید تیتانیوم/اکسید آهن راندمان از ۰/۹۴ به ۱/۵۸ درصد افزایش یافته که معادل حدود ۶۸ درصد بهبود است. افزایش دبی جرمی، سرعت متوسط سیال در لوله ماریچ را افزایش داده و در نتیجه، شدت همرفت در کلکتور تقویت می‌شود. در این شرایط، ضریب انتقال گرمای جابجایی بین دیواره لوله و نانوسیال افزایش یافته و مقاومت گرمایی سمت سیال کاهش می‌یابد؛ بنابراین گرمای تولیدی پنل با کارایی بیشتری به سیال منتقل می‌شود. پیامد مستقیم این رخداد، کاهش دمای متوسط سطح پنل و نیز یکنواخت‌تر شدن توزیع دمایی آن است. از منظر قانون دوم، کاهش تلفات گرمایی به محیط و افزایش سهم گرمای بازیافتی قابل بهره‌برداری، باعث افزایش آگزروی گرمایی خروجی و در نهایت رشد راندمان آگزروی گرمایی می‌گردد.

مقایسه نانوسیال‌ها در هر دبی نشان می‌دهد که ترکیب سه‌تایی همواره بالاترین راندمان را به‌دست آورده است. به‌طور خاص در دبی ۶۰ کیلوگرم بر ساعت، این نانوسیال راندمان ۱/۵۲ درصد داشته، در حالی که پایین‌ترین مقدار در همین شرایط مربوط به ترکیب اکسید تیتانیوم/اکسید آهن با راندمان ۱/۴۱ درصد است؛ یعنی حدود ۸ درصد اختلاف عملکرد. برتری نانوسیال سه‌تایی را می‌توان ناشی از ترکیب همزمان ویژگی‌های ترموفیزیکی و انتقال گرما دانست؛ به‌گونه‌ای که افزایش رسانش گرمایی (مطابق جدول ۴) باعث تقویت انتقال گرما در لایه مرزی و افزایش نرخ برداشت گرما از پنل می‌شود. علاوه بر این، حضور GO به دلیل ماهیت ساختاری و هدایت گرمایی بالاتر، نقش مؤثرتری در تسهیل انتقال انرژی و کاهش گرادیان‌های دمایی موضعی دارد؛ در نتیجه دمای پنل پایین‌تر مانده و سهم آگزروی بازیافتی افزایش می‌یابد. در میان نانوسیال‌های دوتایی، ترکیبات حاوی اکسید گرافن همواره راندمان بالاتری نسبت به اکسید تیتانیوم/اکسید آهن داشته‌اند. برای نمونه در دبی ۸۰ کیلوگرم بر ساعت، راندمان اکسید گرافن/اکسید تیتانیوم و اکسید گرافن/اکسید آهن به‌ترتیب ۱/۶۴ و ۱/۶۳ درصد بوده، در حالی که اکسید تیتانیوم/اکسید آهن تنها ۱/۵۸ درصد راندمان داشته است. این نتایج نشان می‌دهد که نقش اکسید گرافن در افزایش رسانش گرمایی و بهبود عملکرد انتقال گرما پرنسبتر از سایر نانوذرات است.

به طور کلی می‌توان نتیجه گرفت که هم افزایش دبی جرمی و هم استفاده از نانوسیال سه‌تایی موجب ارتقای قابل توجه راندمان آگزروی گرمایی شده‌اند. در همه شرایط آزمایش، ترکیب سه‌تایی بهترین عملکرد را ارائه داده و در بین ترکیب‌های دوتایی، حضور اکسید گرافن تعیین‌کننده بوده است. بنابراین، می‌توان گفت که به‌کارگیری اکسید گرافن به‌عنوان بخشی از ترکیب نانوسیال، تأثیر مثبت چشمگیری بر بهبود راندمان گرمایی از دیدگاه آگزروی دارد.

همزمان از دو عامل تأثیر می‌پذیرد: دبی جرمی و نوع نانوسیال. اگرچه افزایش دبی جرمی در همه شرایط منجر به بهبود راندمان شده، اما اختلاف‌های محسوس بین نانوسیال‌ها نشان می‌دهد که انتخاب نوع ترکیب نانوذرات نقش تعیین‌کننده‌تری در ارتقای بازده کلی دارد. در این میان، نانوسیال سه‌تایی به دلیل اثر هم‌افزایی نانوذرات بهترین عملکرد را داشته و ترکیب‌های حاوی اکسید گرافن نسبت به ترکیب اکسید تیتانیوم/اکسید آهن مزیت آشکاری از خود نشان داده‌اند.



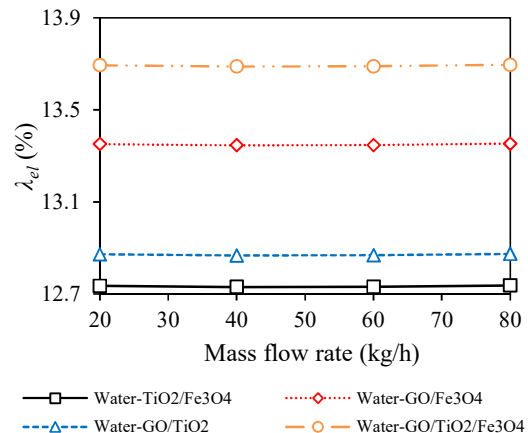
شکل ۷- راندمان آگزروی کل سیستم فتوولتائی/گرمایی حاوی نانوسیال‌های هیبریدی دوتایی و سه تایی در مقادیر مختلف دبی جرمی.

نتایج حاصل از بررسی راندمان‌های آگزروی گرمایی، الکتریکی و کل نشان داد که اثر دبی جرمی و نوع نانوسیال در این سه شاخص رفتاری متفاوت اما تکمیل‌کننده دارند. در بخش گرمایی، افزایش دبی جرمی از ۲۰ به ۸۰ کیلوگرم بر ساعت موجب رشد قابل توجه راندمان شده؛ به طوری که در نانوسیال سه‌تایی راندمان از ۰/۹۹ به ۱/۶۷ درصد افزایش یافت، که معادل حدود ۶۹ درصد بهبود است. در مقابل، راندمان الکتریکی تقریباً مستقل از تغییر دبی بود و مقدار آن برای بهترین نانوسیال (سه‌تایی) در محدوده‌های ثابت حدود ۱۳/۷ درصد باقی ماند. این موضوع نشان می‌دهد که تولید توان الکتریکی بیشتر به تابش خورشیدی وابسته است و تغییرات دبی تنها از طریق کنترل دمای سطح پنل اثر غیرمستقیم دارد.

در بخش راندمان کل، اثر هر دو عامل گرمایی و الکتریکی ترکیب شده و نتیجه آن روندی صعودی اما ملایم‌تر نسبت به راندمان گرمایی است. برای مثال، در ترکیب سه‌تایی راندمان کلی از ۱۴/۶۸ درصد در دبی ۲۰ به ۱۵/۳۶ درصد در دبی ۸۰ رسید؛ یعنی حدود ۴/۶ درصد افزایش نسبی. این نشان می‌دهد که افزایش دبی جرمی با کاهش دمای کاری پنل هم سهم گرمایی و هم سهم الکتریکی را تقویت می‌کند، هرچند سهم افزایش گرمایی غالب‌تر است.

از منظر مقایسه بین نانوسیال‌ها، در هر سه شاخص، نانوسیال سه‌تایی بهترین عملکرد را ارائه داده و اختلاف آن با ضعیف‌ترین نانوسیال (اکسید تیتانیوم/اکسید آهن) در راندمان کل به بیش از ۷ درصد نسبی رسیده است. همچنین مشاهده شد که ترکیب‌های حاوی اکسید گرافن همواره راندمان بالاتری نسبت به ترکیب اکسید

راندمان الکتریکی داشته و ترکیب سه‌تایی بهترین عملکرد را از خود نشان داده است.



شکل ۶- راندمان آگزروی الکتریکی سیستم فتوولتائی/گرمایی حاوی نانوسیال‌های هیبریدی دوتایی و سه تایی در مقادیر مختلف دبی جرمی.

راندمان آگزروی کل سیستم فتوولتائی/گرمایی حاوی نانوسیال‌های هیبریدی دوتایی و سه تایی در نظر گرفته شده در مطالعه حاضر برای مقادیر مختلف دبی جرمی در شکل ۷ نمایش داده شده است. مشهود است که راندمان آگزروی کل با افزایش دبی جرمی از ۲۰ تا ۸۰ کیلوگرم بر ساعت در تمامی نانوسیال‌ها روندی صعودی دارد. برای نمونه، در نانوسیال سه‌تایی اکسید گرافن/اکسید تیتانیوم/اکسید آهن-آب، مقدار راندمان از ۱۴/۶۸ درصد در دبی ۲۰ به ۱۵/۳۶ درصد در دبی ۸۰ افزایش یافته است؛ یعنی حدود ۴/۶ درصد رشد نسبی. در ترکیب‌های دوتایی نیز روند مشابهی مشاهده می‌شود. به عنوان مثال، راندمان نانوسیال اکسید گرافن/اکسید آهن از ۱۴/۳۱ به ۱۴/۹۸ درصد افزایش یافته که معادل حدود ۴/۷ درصد بهبود است. از آنجا که راندمان کل برابر مجموع سهم گرمایی و الکتریکی است، روند افزایشی آن با دبی عمدتاً تحت سلطه افزایش سهم گرمایی قرار دارد؛ زیرا راندمان آگزروی گرمایی نسبت به دبی حساسیت بیشتری نشان می‌دهد. با این وجود، کاهش دمای پنل می‌تواند بهبود جزئی در بخش الکتریکی نیز ایجاد کند و در مجموع باعث رشد ملایم اما پایدار راندمان آگزروی کل گردد. مقایسه نانوسیال‌ها نشان می‌دهد که ترکیب سه‌تایی در تمام دبی‌ها بالاترین راندمان را ارائه داده است. برای نمونه، در دبی ۶۰ کیلوگرم بر ساعت، این ترکیب راندمانی برابر با ۱۵/۲۱ درصد داشته است، در حالی که پایین‌ترین راندمان مربوط به اکسید تیتانیوم/اکسید آهن با مقدار ۱۴/۱۴ درصد بوده است؛ یعنی اختلافی حدود ۱/۰۷ درصد مطلق و نزدیک به ۷/۵ درصد نسبی. در بین نانوسیال‌های دوتایی، ترکیب اکسید گرافن/اکسید آهن بهترین عملکرد را نشان داده و در بیشتر شرایط بالاتر از اکسید گرافن/اکسید تیتانیوم و اکسید تیتانیوم/اکسید آهن قرار گرفته است. از سوی دیگر، ترکیب اکسید تیتانیوم/اکسید آهن ضعیف‌ترین راندمان کلی را در تمامی دبی‌ها به خود اختصاص داده است.

به طور کلی می‌توان نتیجه گرفت که راندمان آگزروی کل به‌طور

تیتانیوم/اکسید آهن داشتند. این امر بیانگر اهمیت حضور اکسید گرافن در ارتقای رسانش گرمایی و پایداری نانوسیال و در نهایت بهبود عملکرد کلی سامانه فتوولتائی/گرمایی است.

به طور کلی می‌توان نتیجه گرفت که برای دستیابی به بیشینه راندمان اگزرژی در سیستم‌های فتوولتائی/گرمایی، استفاده از نانوسیال سه‌تایی به همراه افزایش دبی جرمی تا حدود بهینه، راهکاری مؤثر محسوب می‌شود. این ترکیب نه تنها بهبود چشمگیری در شاخص گرمایی ایجاد کرده بلکه توانسته است برتری خود را در راندمان کلی نیز نشان دهد.

۶- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، عملکرد اگزرژی یک سیستم فتوولتائی/گرمایی خنک‌شونده با نانوسیال‌های هیبریدی دوتایی و سه‌تایی در شرایط مختلف دبی جرمی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که راندمان اگزرژی گرمایی به شدت تحت تأثیر دبی جرمی بوده و با افزایش آن، بهبود چشمگیری در تمامی نانوسیال‌ها مشاهده شد. در مقابل، راندمان اگزرژی الکتریکی تغییرات بسیار اندکی با تغییر دبی نشان داد و اختلاف‌ها عمدتاً ناشی از نوع نانوسیال بودند. بررسی راندمان کلی بیانگر آن بود که هر دو عامل دبی و ترکیب نانوسیال نقش مهمی در بهبود کارایی سامانه دارند، هرچند اثر دبی نسبت به بخش گرمایی محسوس‌تر است. در تمامی شرایط، نانوسیال سه‌تایی بهترین عملکرد را ارائه داد و اختلاف آن با ضعیف‌ترین نانوسیال (اکسید تیتانیوم/اکسید آهن-آب) به بیش از ۷ درصد نسبی در راندمان کلی رسید. همچنین، مشاهده شد که ترکیب‌های حاوی اکسید گرافن نسبت به سایر ترکیب‌ها عملکرد برتری داشته‌اند. به طور کلی، نتایج نشان می‌دهند که به‌کارگیری نانوسیال سه‌تایی و افزایش دبی جرمی تا مقادیر بهینه می‌تواند به‌عنوان رویکردی مؤثر برای ارتقای راندمان اگزرژی سامانه‌های فتوولتائی/گرمایی مطرح شود.

با توجه به نتایج به‌دست‌آمده، سامانه فتوولتائی/گرمایی مورد بررسی پتانسیل بالایی برای کاربرد در مناطق با تابش خورشیدی بالا و دمای محیط زیاد، مانند بسیاری از نواحی گرم و خشک ایران، دارد. در این مناطق، افزایش دمای پنل فتوولتائی معمولاً منجر به افت راندمان الکتریکی می‌شود، در حالی که استفاده از سامانه PV/T امکان بازیابی گرما و کاهش دمای پنل را به‌صورت هم‌زمان فراهم می‌کند. این ویژگی می‌تواند منجر به بهبود راندمان اگزرژی کل سیستم و استفاده مؤثرتر از منابع خورشیدی شود.

با این حال، به‌کارگیری صنعتی سامانه‌های PV/T با برخی محدودیت‌ها نیز همراه است. پیچیدگی ساختاری نسبت به سیستم‌های فتوولتائی متداول، نیاز به تجهیزات جانبی مانند پمپ و مبادله‌کن گرمایی، افزایش افت فشار و در نتیجه مصرف توان کمکی، و همچنین هزینه‌های اولیه بالاتر از جمله چالش‌های اصلی این سامانه‌ها محسوب می‌شوند. علاوه بر این، عملکرد گرمایی سیستم به شرایط اقلیمی، کیفیت سیال عامل و استراتژی کنترلی وابسته بوده و نیازمند طراحی بهینه متناسب با شرایط محلی است.

در مجموع، نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که سامانه PV/T در صورت طراحی و بهره‌برداری مناسب، می‌تواند گزینه‌ای کارآمد برای

کاربردهای ساختمانی و صنعتی در اقلیم‌های گرم باشد، هرچند بررسی‌های اقتصادی و تحلیل چرخه عمر برای ارزیابی نهایی امکان‌پذیری صنعتی آن ضروری است.

با در نظر گرفتن عملکرد برتر نانوسیال هیبریدی سه‌تایی در بهبود شاخص‌های اگزرژی، پیشنهاد می‌شود در مطالعات آینده اثر پارامترهایی نظیر غلظت حجمی نانوسیال، دمای ورودی سیال خنک‌کننده و همچنین نسبت اختلاط نانوذرات بر راندمان‌های اگزرژی گرمایی، الکتریکی و کل مورد بررسی قرار گیرد. بررسی هم‌زمان این پارامترها می‌تواند به شناسایی شرایط کاری بهینه و تبیین دقیق‌تر رفتار سامانه فتوولتائی/گرمایی در کاربردهای عملی کمک نماید.

۷- مراجع

- [1] Abu Elezz M, Aboeleneen NM, Abd-ElMonem NM, Sorour FH. A comprehensive review: Functional nanomaterials for renewable energy: Innovations, applications, and sustainable strategies. *Next Materials* 2025 Oct;9:101001.
- [2] Bian C, Song J, Jin X, Jiang W, Jie X, Yang L. Thermal management in photovoltaic-thermal systems: advances, challenges, and cross-domain applications. *Applied Thermal Engineering*. 2025 Nov;279:127791.
- [3] Lebbi M, Touafek K, Boutina L. Solar photovoltaic thermal hybrid systems – detailed reviews. *Applied Thermal Engineering*. 2025 Nov;279:127867, 2025.
- [4] Togun H, Basem A, Kadhum AAH, Abed AM, Biswas N, Rashid FL, Lawag RA, Ali HM, Mohammed HI, Mandal DK. Advancing photovoltaic thermal (PV/T) systems: Innovative cooling technique, thermal management, and future prospects. *Solar Energy May*;291:113402.
- [5] Kolamroudi MK, Jaiyeoba OH, Ilkan M, Safaei B. A comprehensive review on the artificial intelligence for the development of thermal concentrating photovoltaic systems. *Solar Energy*. 2025 Nov;301:113937.
- [6] Mimezami SA, Huda N, Saidur R, Strezov V. A comprehensive review in pursuit of optimal solar performance: Nanofluids, solar hybrid systems, and challenges ahead. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*. 2025 Sep;81:104420.
- [7] Nazari MA, Ahmadi MH, Kumar R, Ongar B, Zhansulu U, Blazek V, Prokop L, Miasak S. Thermal management improvement of batteries by use of Nanofluids: A comprehensive and updated review. *International Journal of Heat and Fluid Flow*. 2025 Sep;115:109877.
- [8] Shahsavari A, Abouecian J, Jahromi HRA. Advanced building utility systems: Utilizing a thermal wheel and a photovoltaic/thermal system equipped with a nanofluid/nano-enhanced PCM-based spectral splitter. *Energy and Buildings*. 2025 Jun;337:115669.
- [9] Alqatamin A, Su J. Computational analysis of photovoltaic thermal performance using Al₂O₃/Water and CNT/water nanofluids with perforated V-shape heatsink. *Energy*. 2025 Oct;334:137793.
- [10] Smrity AMA, Yin P. Bridging computational and experimental boundaries: a review of theoretical modeling and experimental validation of hybrid nanofluids in heat transfer applications. *International Journal of Heat and Fluid Flow*. 2025 Sep;115:109873.
- [11] Manimaran M, Norizan MN, Kassim MHM, Adam MR, Abdullah N, Norrahim MNF. Critical review on the stability and thermal conductivity of water-based hybrid nanofluids for heat transfer applications. *RSC Advances*. 2025 May;15:14088-14125.
- [12] Sundar LS, Tavares SMO, Pereira AMB, Sousa ACM. Review on thermal efficiency augment of flat plate collector equipped with mono and hybrid nanofluids and with inserts. *International Journal of Thermofluids*. 2025 Mar;26:101111.
- [13] Shahsavari A, Jha P. Experimentally exploring the synergy of rotating twisted tape turbulators and hybrid nanofluids for

- enhanced photovoltaic thermal system performance. *Energy*. 2024 Dec;313:133950.
- [14] Najafpour A, Hosseinzadeh K, Hasibi A, Ranjbar AA, Ganji DD. Entropy based optimization of mini-channel heat sinks with advanced ternary nanofluids for photovoltaic cells and geometrical enhancements. *Results in Engineering*. 2025 Jun;26:104982.
- [15] Alharbi AA, Alzahrani AR. Optimizing photovoltaic thermal systems with ternary hybrid nanofluids: Statistical and regression analysis. *Engineering Science and Technology, an International Journal*. 2025 Apr;64:102010.
- [16] Shaalan ZA, Hussein AM, Abdullah MZ, Alsayah AM, Alshukri MJ, Khaled M., Enhanced photovoltaic cooling using ZnO/TiO₂ hybrid nanofluids: numerical and experimental analysis. *International Journal of Thermo fluids*. 2025 May;27:101222.
- [17] Rabiei S, Khosravi R, Varasteh F, Etmian A. Optimizing high-concentrator photovoltaic efficiency: Numerical study of hybrid nanofluid and porous wavy walled mini channel heat sink. *International Journal of Thermal Sciences*. 2025 Nov;217:110103.
- [۱۸] شهسوار ا، مقایسه تجربی عملکرد سیستم‌های فتوولتایی/گرمایی حاوی نانوسیال‌های هیبریدی دوتایی و سه تایی - بخش اول: آنالیز انرژی. *مجله مهندسی مکانیک دانشگاه تبریز*. ۱۴۰۳، د. ۵۴، ش. ۱، ص ۱۴۱-۱۴۸.
- [19] 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 Jul;5:226.
- [20] 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 Apr;395:136460.
- [21] Moffat R. Describing the uncertainties in experimental results. *Experimental Thermal and Fluid Science*. 1988 Jan;1:3-17.