

۱- مقدمه

سیستم فتوولتاییک حرارتی، عملکرد حرارتی آن را بهبود بخشیدند. حزمی و همکاران [۸] عملکرد دو سامانه فتوولتاییک حرارتی ترموسیفون^۱ (بدون پمپ) و پمپی و با سیال کاری آب را به صورت عددی و تجربی بررسی کردند. بررسی آن‌ها نشان داد که بازده انرژی الکتریکی و اگزرژی سامانه پمپی نسبت به سامانه ترموسیفون به ترتیب ۳ و ۲/۵ درصد بیشتر است. دابی و تای [۹] عملکرد دو نوع متفاوت از سامانه‌های فتوولتاییک حرارتی که شامل سلول‌های تک کریستاله^۲ و یا چندکریستاله^۳ سیلیکونی بودند را در یک مطالعه تجربی مورد ارزیابی قرار دادند. میانگین بازده انرژی حرارتی و الکتریکی برای سیستم نوع اول به ترتیب ۴۰/۷ و ۱۱/۸ درصد و برای سیستم نوع دوم ۳۹/۴ و ۱۱/۵ درصد گزارش شد.

یکی از راه‌های افزایش بازده سیستم‌های فتوولتاییک حرارتی، تغییر نوع سیال عامل آن است [۱۰، ۱۱، ۱۲]. در این رابطه می‌توان به مطالعه سرحدی و همکاران [۱۳] اشاره کرد. آن‌ها یک سامانه فتوولتاییک حرارتی با سیال هوا را به صورت عددی مورد مطالعه قرار دادند و نشان دادند بازده آن می‌تواند به ۴۵ درصد برسد. الساکور و همکاران [۱۴] در یک مطالعه عددی، به بررسی تأثیر استفاده از مواد تغییر فاز دهنده^۴ در عملکرد حرارتی سیستم فتوولتاییک حرارتی پرداختند. همچنین کاظمیان و همکاران [۱۵] اثر استفاده از ماده تغییر فازدهنده در یک سیستم فتوولتاییک حرارتی را از نظر انرژی، اگزرژی و زیست‌محیطی بصورت آزمایشگاهی بررسی کردند. تأثیر رژیم جریان آرام و یا آشفته بر روی عملکرد سیستم فتوولتاییک در مطالعه یزدانی فرد و همکاران [۱۶] بررسی شد. آن‌ها مشاهده کردند که نوع نانوذرات بر بازده انرژی و اگزرژی کلی سامانه فتوولتاییک حرارتی اثر اندکی دارد. همچنین، در جریان آشفته بازده انرژی کلی سامانه به‌طور محسوسی بیشتر از جریان آرام است.

استفاده از نانوسیال در سامانه فتوولتاییک حرارتی می‌تواند روشی مؤثر به‌منظور افزایش بازده آن باشد [۱۷، ۱۸]. بدین منظور می‌توان به مطالعه از می و همکاران [۱۹] اشاره کرد. آن‌ها عملکرد سامانه‌های شامل سیالات عامل مختلف همچون اتیلن‌گلیکول، مخلوط آب و اتیلن‌گلیکول و نانوسیالات با سیال پایه مخلوط آب و اتیلن‌گلیکول را مورد مطالعه قرار دادند. باسام و همکاران [۲۰] در سیستم خنک‌کاری فتوولتاییک از حرکت نانوسیال به همراه میکرو پره استفاده کردند. در مطالعه دیگری خنجری و همکاران [۲۱] نشان دادند با افزایش درصد حجمی نانوذرات نقره و اکسید آلومینیوم در سیال پایه آب، می‌توان بازده انرژی و اگزرژی یک سیستم فتوولتاییک حرارتی را افزایش داد. سردارآبادی و همکاران [۲۲] در یک مطالعه تجربی، بازده انرژی و اگزرژی یک سامانه فتوولتاییک حرارتی با نانوسیالات اکسید

امروزه با توجه به افزایش قیمت حامل‌های انرژی، مشکلات زیست‌محیطی و همچنین محدود بودن این منابع، اهمیت روزافزون انرژی‌های تجدیدپذیر بر کسی پوشیده نیست. بزرگترین منبع انرژی تجدیدپذیر در جهان خورشید است به طوری که زمین سالانه حدود ۳/۸۵ میلیون اگزا ژول انرژی خورشیدی دریافت می‌کند [۱].

به‌طور کلی دریافت انرژی از تابش خورشید به دو صورت مستقیم و غیر مستقیم صورت می‌پذیرد. در روش مستقیم، با استفاده از سلول‌های فتوولتاییک، حرارت جذب شده توسط فوتون‌های نور خورشید به صورت مستقیم به انرژی الکتریکی تبدیل می‌شود؛ در حالی که در روش غیر مستقیم، با استفاده از یک کلکتور خورشیدی و سیال عامل که عموماً آب می‌باشد، انرژی حرارتی خورشید جذب می‌شود. هر کدام از روش‌های مستقیم و غیر مستقیم استحصال انرژی خورشیدی، مزایا و معایب خاص خودش را دارد؛ با این حال می‌توان با ترکیب این دو سیستم، مشخصات حرارتی سیستم را بهبود داد. در یک سامانه فتوولتاییک حرارتی به کمک ترکیب فتوولتاییک ساده و کلکتور حرارتی می‌توان انرژی الکتریکی و حرارتی را به صورت همزمان دریافت کرد. با توجه به هزینه کم‌تر، بازده بالاتر، طول عمر بیشتر و همچنین کاربری ساده‌تر سیستم‌های فتوولتاییک حرارتی با سیال خنک‌کننده هوا و آب، این سامانه‌ها به‌صورت گسترده در صنعت مورد استفاده قرار می‌گیرند [۲]. لازم به ذکر است با توجه به ظرفیت گرمایی ویژه بالاتر آب نسبت به هوا، استفاده از سامانه‌های فتوولتاییک حرارتی با سیال خنک‌کننده آب بازده بالاتری نسبت به هوا دارد [۳].

امروزه استفاده از شیوه‌های نوین جهت بهبود عملکرد سامانه‌های فتوولتاییک حرارتی مورد علاقه دانشمندان می‌باشد. شهسوار و همکاران [۴] اثر استفاده از پوشش شیشه‌ای را بر عملکرد یک سامانه فتوولتاییک حرارتی با سیال کاری هوا به صورت عددی و تجربی بررسی کردند. آن‌ها مشاهده کردند که بازده انرژی الکتریکی در صورت استفاده از پوشش شیشه‌ای در سامانه فتوولتاییک حرارتی کاهش و بازده انرژی حرارتی سامانه افزایش می‌یابد. کتکنداوار و همکاران [۵] در یک مطالعه تجربی نشان دادند با افزودن پوشش شیشه‌ای به سامانه‌های فتوولتاییک حرارتی، ولتاژ مدار باز تا حدود ۱۶ درصد نسبت به سامانه فتوولتاییک معمولی می‌تواند افزایش پیدا کند. اثر عواملی همچون پوشش شیشه‌ای، ضریب پوشش، سرعت باد و دمای محیط بر عملکرد یک سامانه فتوولتاییک حرارتی ترموسیفون در پژوهشی توسط چو و همکاران [۶] بررسی شد. در مطالعه دیگری احمدی و همکاران [۷] به کمک افزودن پره‌های سینوسی به

¹ Thermosyphon ² Monocrystalline ³ Polycrystalline

⁴ Phase change materials

حرارت از سلول‌های فتوولتاییک در لوله‌های کلکتور صفحه تخت از نانوسیال استفاده شده است. جریان سیال، پس از خنک‌کاری سلول‌های الکتریکی، گرم شده و پس از خروج از کلکتور اولیه، توسط پمپ قرار داده شده در مسیر به درون کلکتور دیگری هدایت می‌شود که دمای نسبتاً بالاتری دارد و سپس وارد مبدل حرارتی می‌شود. مبدل حرارتی از یک لوله مارپیچ به قطر ۱۵ سانتیمتر ساخته شده که درون یک مخزن بسیار بزرگ به قطر ۵۰ سانتیمتر قرار گرفته است. درون مخزن سیال نیز آب با دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد وجود دارد. قسمت الکتریکی سیستم نیز شامل باتری‌های ذخیره‌کننده، مدار کنترل شارژ باتری و مصرف‌کننده الکتریکی جریان مستقیم، است.

در شکل (۲) نمونه آزمایشگاهی ساخته شده نمایش داده شده است. لازم به ذکر است سیستم فتوولتاییک حرارتی به گونه‌ای قرار گرفته که در تمامی طول روز به صفحه آن نور خورشید تابیده و در سایه نباشد.



شکل ۲ نمونه آزمایشگاهی ساخته شده

۲-۱- آماده‌سازی نانوسیالات

آب خالص به عنوان مایع پایه و MWCNT، SWCNTها و GNPها به عنوان نانوذرات در این مطالعه استفاده شده‌اند. تمام نانوسیالات از شرکت VCN Materials در ایران خریداری شده‌اند. خواص نانوسیالات در جدول (۱) فهرست شده است. همچنین مراحل آماده‌سازی نانوسیال در شکل (۳) نشان داده شده و شکل (۴) تصویر TEM (میکروسکوپ الکترونی عبوری) از نانوذرات تهیه شده را نشان می‌دهد.

۳- معادلات حاکم

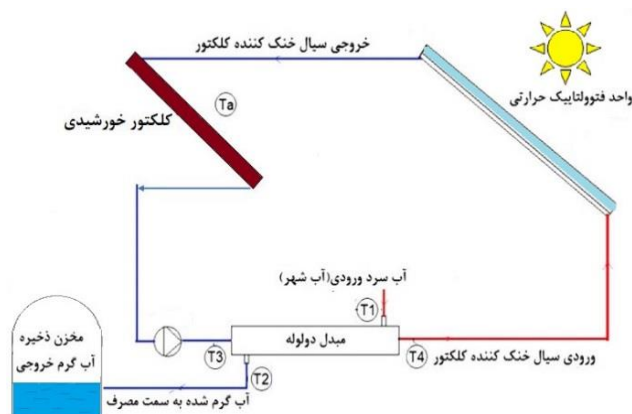
عملکرد یک سامانه فتوولتاییک حرارتی می‌تواند از منظرهای مختلفی مطالعه شود؛ با این حال، بررسی ترمودینامیکی یک

تیتانیوم-آب، اکسید آلومینیوم-آب و اکسید روی-آب با درصد جرمی ۰/۲ درصد را بررسی کردند. بررسی آن‌ها نشان داد، بیشترین بازده انرژی و انرژی الکتریکی مربوط به سامانه با نانوسیال اکسید تیتانیوم-آب می‌باشد و همچنین سامانه با نانوسیال اکسید روی-آب بیشترین بازده انرژی و انرژی حرارتی را دارد.

بررسی مطالعات گذشته نشان می‌دهد، تاکنون پژوهش‌های زیادی به منظور بررسی اثر سیالات خنک‌کننده مختلف بر عملکرد سیستم‌های فتوولتاییک حرارتی صورت گرفته است. اگرچه تاکنون پژوهش و تحقیقی که در آن اثرات استفاده از نانوسیالات خنک‌کننده مختلف بر بازده انرژی و انرژی الکتریکی فتوولتاییک حرارتی و کلکتور خورشیدی بیان شده باشد، کمتر ارائه شده است و نوآوری مطالعه حاضر محسوب می‌گردد. در پژوهش حاضر بصورت تجربی، عملکرد یک سیستم فتوولتاییک حرارتی (به تنهایی) و ترکیب آن با کلکتور خورشیدی مورد مطالعه قرار می‌گیرد. همچنین، عملکرد سیستم‌های فتوولتاییک حرارتی و کلکتور خورشیدی با سیال آب خالص و نانوسیالات خنک‌کننده شامل نانولوله کربنی چند جداره، نانولوله کربنی تک جداره و نانوذرات گرافن، مقایسه می‌شوند.

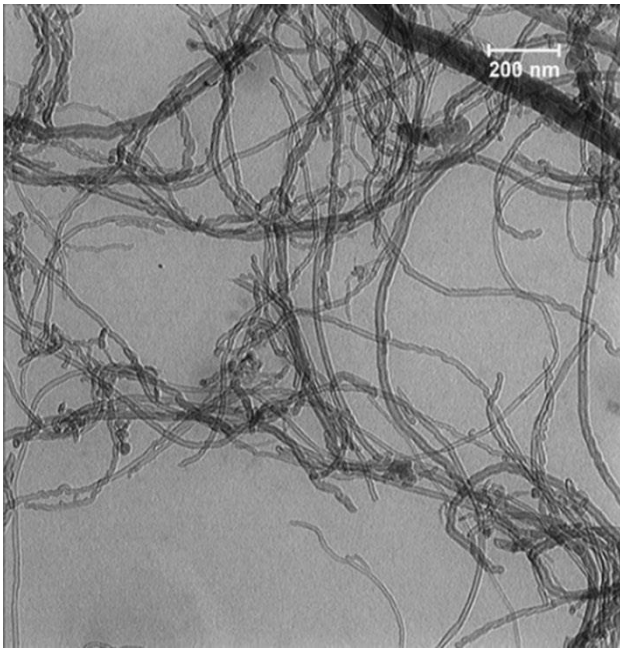
۲- روش آزمایشگاهی

در شکل (۱)، نمونه آزمایشگاهی سامانه فتوولتاییک حرارتی و کلکتور خورشیدی پژوهش حاضر، به صورت شماتیک نشان داده شده است.

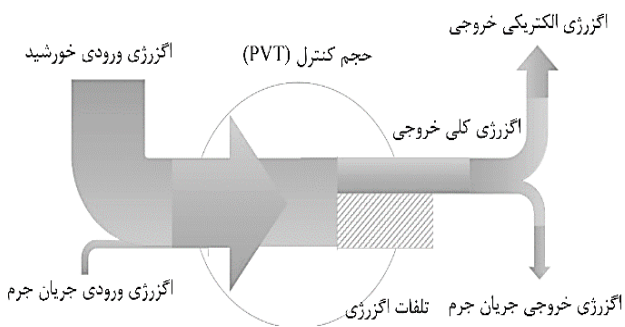


شکل ۱ شماتیک نمونه آزمایشگاهی در مطالعه پیش رو

همانطور که در شکل مشاهده می‌شود، دو سیکل جریان سیال شامل سلول‌های فتوولتاییک دارای کلکتور و یک کلکتور خورشیدی در دستگاه وجود دارد. در سیکل اول به منظور جذب



شکل ۴ عکس TEM از نانوذرات



شکل ۵ جریان اگرژی سیستم فتوولتاییک حرارتی و کلکتور خورشیدی

۳-۱- معادلات انرژی

با در نظر گرفتن سامانه فتوولتاییک حرارتی و کلکتور خورشیدی بعنوان یک حجم کنترل واحد و با فرض شرایط شبه پایا، قانون اول ترمودینامیک بصورت زیر نوشته می‌شود:

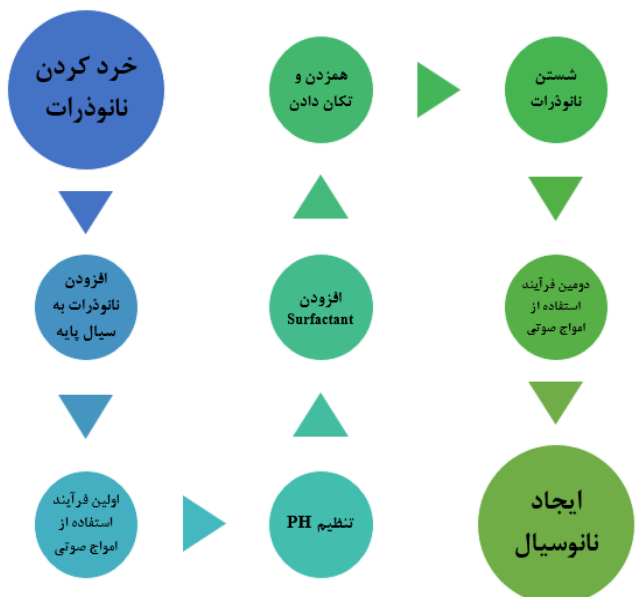
$$\begin{aligned} \sum \dot{E}_{in} &= \sum \dot{E}_{out} + \sum \dot{E}_{loss} \\ &\Rightarrow \dot{E}_{sun} + \dot{E}_{mass,in} \\ &= \dot{E}_{el} + \dot{E}_{mass,out} + \dot{E}_{loss} \end{aligned} \quad (1)$$

در این رابطه، \dot{E}_{in} ، \dot{E}_{out} و \dot{E}_{loss} به ترتیب نرخ انرژی ورودی، خروجی و تلف شده در سامانه فتوولتاییک حرارتی و کلکتور خورشیدی هستند. همچنین \dot{E}_{sun} نشان‌دهنده میزان انرژی تابشی جذب شده توسط سامانه فتوولتاییک حرارتی و کلکتور خورشیدی است که توسط رابطه (۲) تعیین می‌شود:

سامانه فتوولتاییک حرارتی به دلیل ارائه کارایی سامانه در شرایط عملکردی متفاوت از اهمیت بالاتری برخوردار است. تحلیل ترمودینامیکی سیستم معمولاً به صورت ارزیابی انرژی الکتریکی و حرارتی سامانه نمود پیدا می‌کند؛ اما باید توجه داشت از آنجا که تحلیل انرژی سامانه‌های فتوولتاییک حرارتی کیفیت انرژی را در نظر نمی‌گیرد، تحلیل انرژی سامانه‌های فتوولتاییک حرارتی ضروری به نظر می‌رسد. نمودار انرژی سامانه فتوولتاییک حرارتی و کلکتور خورشیدی در شکل (۵) نشان داده شده است.

جدول ۱ خواص فیزیکی نانوذرات استفاده شده در پژوهش حاضر

نوع ذره	کمیت مورد بررسی	مقدار
MWCNT	خلوص / %	95
	قطر / nm	20 – 30
	طول / μm	5 – 10
SWCNT	چگالی / $g cm^{-3}$	2.1
	خلوص / %	95
	قطر / nm	5 – 20
GNP	طول / μm	2
	چگالی / $g cm^{-3}$	2.1
	خلوص / %	99.5
	قطر / nm	1 – 20
	طول / μm	< 40
	چگالی / $g cm^{-3}$	1.9 – 2.2



شکل ۳ فرآیند آماده‌سازی نانوسیال

$$\eta_{el} = \frac{\dot{E}_{el} - \dot{E}_P}{\dot{E}_{sun}} = \frac{V_{oc} \cdot I_{sc} \cdot FF - \dot{E}_P}{\dot{G} \cdot A_c \cdot \tau_g \cdot \alpha_{cell}} \quad (7)$$

$$\eta_{th} = \frac{\dot{E}_{th}}{\dot{E}_{sun}} = \frac{\dot{m}_f c_{p,f} [(T_{f,out} - T_{f,in})_{PVT} + (T_{f,out} - T_{f,in})_c]}{\dot{G} \cdot A_c \cdot \tau_g \cdot \alpha_{cell}} \quad (8)$$

۳-۲- معادلات انرژی

با در نظر گرفتن سامانه فتوولتاییک حرارتی و کلکتور خورشیدی بعنوان یک حجم کنترل واحد و با فرض شرایط پایا، معادله انرژی بصورت زیر نوشته می‌شود:

$$\sum \dot{E}x_{in} = \sum \dot{E}x_{out} + \sum \dot{E}x_{loss} \quad (9)$$

در این رابطه $\dot{E}x_{in}$ ، $\dot{E}x_{out}$ و $\dot{E}x_{loss}$ به ترتیب نرخ انرژی ورودی، خروجی و تلف شده در سامانه فتوولتاییک حرارتی و کلکتور خورشیدی هستند. می‌توان معادله فوق را با در نظر گرفتن جزئیات به صورت زیر بازنویسی کرد:

$$\begin{aligned} \dot{E}x_{sun} + \dot{E}x_{mass.in} \\ = \dot{E}x_{el} + \dot{E}x_{mass.out} \\ + \dot{E}x_{loss} \end{aligned} \quad (10)$$

$\dot{E}x_{sun}$ نشان‌دهنده میزان انرژی تابشی جذب شده توسط خورشید است که بصورت زیر محاسبه می‌شود [۶]:

$$\dot{E}x_{sun} = \dot{G} A_c \left(1 - \frac{T_a}{T_{sun}}\right) \quad (11)$$

در رابطه بالا، A_c مساحت گردآورنده حرارت، \dot{G} نرخ تابش خورشید ورودی بر واحد سطح، T_a دمای محیط و T_{sun} دمای معادل خورشید بعنوان یک جسم سیاه بوده که تقریباً برابر ۵۸۰۰ کلوین است. تغییر انرژی جریان جرم ورودی و خروجی از کلکتور نیز به صورت زیر محاسبه می‌شود [۲۷]:

$$\begin{aligned} \dot{E}x_{mass.out} - \dot{E}x_{mass.in} = \\ = \dot{m}_f [(h_{f,out} - h_{f,in}) \\ - T_a (s_{f,out} - s_{f,in})] \end{aligned} \quad (12)$$

در این رابطه، \dot{m}_f دبی جرمی سیال عبوری از کلکتور، $h_{f,in}$ و $h_{f,out}$ به ترتیب آنتالپی جریان جرم در ورودی و خروجی کلکتور

$$\dot{E}_{sun} = \dot{G} \cdot A_c \cdot \tau_g \cdot \alpha_{cell} \quad (2)$$

در رابطه بالا، A_c مساحت گردآورنده حرارت، τ_g ضریب عبور تابش خورشید از پوشش شیشه‌ای، α_{cell} ضریب جذب تابش خورشید توسط سلول‌های فتوولتاییک و کلکتور خورشیدی و \dot{G} نرخ تابش خورشید ورودی بر واحد سطح گردآورنده حرارت است. شایان ذکر است، مقدار \dot{G} در طول آزمایش توسط تابش‌سنج اندازه‌گیری می‌شود. در رابطه (۳)، نرخ تغییر انرژی جرم عبوری از گردآورنده حرارت بصورت زیر قابل تعیین است:

$$\begin{aligned} \dot{E}_{mass.out} - \dot{E}_{mass.in} = \dot{E}_{th} \\ = \dot{m}_f c_{p,f} (T_{f,out} - T_{f,in}) \end{aligned} \quad (3)$$

در این رابطه، \dot{m}_f دبی جرمی سیال عبوری از گردآورنده حرارت، $c_{p,f}$ ظرفیت گرمایی ویژه سیال، $T_{f,in}$ و $T_{f,out}$ به ترتیب دمای متوسط سیال در ورودی و خروجی گردآورنده حرارت هستند. توان الکتریکی خروجی از سامانه فتوولتاییک حرارتی توسط رابطه (۴) تعیین می‌شود [۲۳]:

$$\dot{E}_{el} = V_{oc} \cdot I_{sc} \cdot FF \quad (4)$$

در رابطه بیان شده، V_{oc} ولتاژ مدار باز، I_{sc} جریان اتصال کوتاه و FF ضریب انباشتگی^۱ است. ضریب انباشتگی که بیان‌کننده کیفیت سلول‌های فتوولتاییک است، توسط رابطه (۵) محاسبه می‌شود [۲۴]:

$$FF = \frac{V_{max} \cdot I_{max}}{V_{oc} \cdot I_{sc}} \quad (5)$$

در این رابطه، V_{max} بیشترین ولتاژ خروجی و I_{max} بیشترین جریان خروجی از واحد فتوولتاییک است که توسط کارخانه سازنده و در شرایط استاندارد آزمایشگاهی تعیین می‌شوند. توان پمپ موردنیاز به‌منظور به‌گردش در آوردن سیال در سامانه فتوولتاییک حرارتی و کلکتور خورشیدی توسط رابطه (۶) قابل تعیین است [۲۵]:

$$\dot{E}_p = \frac{\dot{m}_f \Delta P}{\rho_f \eta_p} \quad (6)$$

در رابطه بالا، ΔP افت فشار سیال در داخل گردآورنده حرارت، ρ_f چگالی سیال و η_p بازده پمپ است. بازده انرژی الکتریکی و حرارتی سامانه فتوولتاییک حرارتی و کلکتور خورشیدی توسط روابط (۷) و (۸) محاسبه می‌شوند [۲۶]:

¹ Fill factor

جدول ۲ دقت و عدم قطعیت تجهیزات اندازه‌گیری استفاده شده در انجام آزمایش

تجهیز	دقت	عدم قطعیت (حداکثر خطا)
مولتی‌متر - ولتاژ	$\pm (0.5\% + 1)$	0.058 V
مولتی‌متر - جریان	$\pm (0.8\% + 1)$	0.018 A
تشعشع سنج	$\pm 10 \frac{W}{m^2}$ $+ 0.38 \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}$	$5.77 \frac{W}{m^2}$
ترموکوپل RTD	$\pm 0.15 ^\circ C$ to $\pm 0.25 ^\circ C$	0.14 $^\circ C$
ترموکوپل PT 100	$\pm 0.15 ^\circ C$ to $\pm 0.25 ^\circ C$	0.14 $^\circ C$
ترمومتر جیوه‌ای	$\pm 0.5 ^\circ C$	0.29 $^\circ C$
ظرف اندازه‌گیری دبی	1 mL	$2.88 \times 10^{-4} L$
زمان سنج	0.01 s	$5.77 \times 10^{-3} s$

۳-۳-۱- عدم قطعیت بازده حرارتی

با توجه به رابطه (۸) برای بازده حرارتی، عدم قطعیت بازده حرارتی با فرض تأثیرات اندک تغییرات ظرفیت گرمای ویژه سیال با تغییرات دما، برای دبی جرمی ۳۰ لیتر در ساعت بصورت زیر محاسبه می‌گردد:

$$\frac{\delta \eta_{th}}{\eta_{th}} = \pm \sqrt{\left(\frac{-\delta G}{G}\right)^2 + \left(\frac{\delta \dot{m}}{\dot{m}}\right)^2 + \left(\frac{\delta T_{out}}{T_{out}}\right)^2 + \left(-\frac{\delta T_{in}}{T_{in}}\right)^2} \quad (15)$$

$$= \pm 0.0094$$

به عنوان نمونه با در نظر گرفتن حداکثر بازده حرارتی از لحاظ انرژی ثابت شده در آزمایش که حدود ۵۰ درصد برای سیال عامل آب مقطر است و همچنین در نظر گرفتن اطمینان ۹۵٪ از جواب محاسبات بازده مشاهده می‌شود که خطای محاسبات بازده کمتر از ۲٪ می‌باشد. بنابراین اطمینان از صحت جواب‌ها به میزان بالایی مورد اطمینان است.

۳-۳-۲- عدم قطعیت بازده حرارتی از لحاظ انرژی

با توجه به رابطه انرژی حرارتی و ساده سازی آن خواهیم داشت:

و همچنین $S_{f,in}$ و $S_{f,out}$ به ترتیب انرژی جرم در ورودی و خروجی هستند. از آنجا که تمام انرژی الکتریکی معادل کار در دسترس است، انرژی الکتریکی خروجی از سامانه فتوولتاییک حرارتی و کلکتور خورشیدی برابر اختلاف توان الکتریکی خروجی و توان مصرفی پمپ است که در رابطه زیر بیان می‌شود [۸]:

$$\dot{E}x_{el} = FF \cdot V_{oc} \cdot I_{sc} - \dot{E}x_{pump} \quad (13)$$

در نهایت بازده انرژی سیستم فتوولتاییک حرارتی و کلکتور خورشیدی توسط روابط زیر محاسبه می‌شوند:

$$\varepsilon = \frac{\dot{E}x_{el} + \dot{E}x_{th}}{\dot{E}x_{sun}} \quad (14)$$

۳-۳-۳- تحلیل عدم قطعیت

یکی از مهمترین ضروریات یک پژوهش آزمایشگاهی و تجربی، این است که بتوان به قطعیت داده‌های بدست آمده و محاسبات آنها پی برد. تحلیل عدم قطعیت که یکی از تکنیک‌های سیستماتیک است [۲۸]، به‌طور کامل برای تمامی اجزای سیستم مورد آزمایش و نتایج حاصل از آن در پژوهش حاضر، انجام شده است. در این مقاله، برای ارزیابی عدم قطعیت یک پارامتر، معادله زیر مورد استفاده قرار می‌گیرد. δv عدم قطعیت کل برای یک پارامتر است و می‌تواند به‌صورت زیر ارزیابی شود:

$$\delta v = \sqrt{(\delta v_{rep})^2 + (\delta v_{eqp})^2} \quad (14)$$

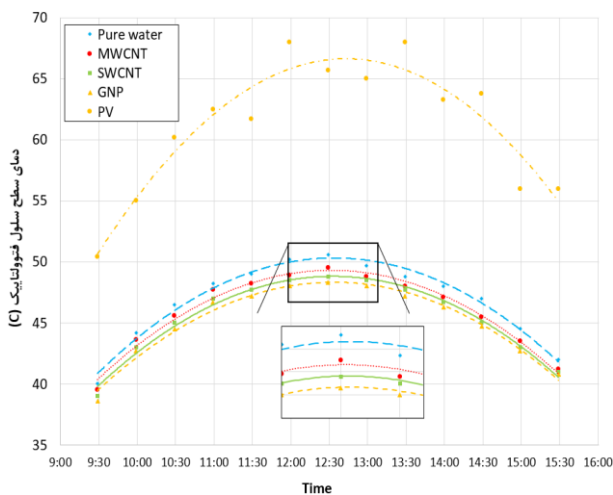
اینجا δv_{eqp} عدم قطعیت تجهیزات و δv_{rep} عدم قطعیت تکرار است. اگر n متغیر غیر وابسته که با v_i شناخته می‌شوند وجود داشته باشد و R یک تابع خطی از این متغیرها باشد، یعنی $R = R(v_1, v_2, \dots, v_n)$ ، عدم قطعیت R یعنی δR وابسته به عدم قطعیت هر متغیر یعنی δv_i با معادله زیر محاسبه می‌شود:

$$\delta R = \sqrt{\left(\frac{\partial R}{\partial v_1} \delta v_1\right)^2 + \left(\frac{\partial R}{\partial v_2} \delta v_2\right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial R}{\partial v_n} \delta v_n\right)^2} \quad (15)$$

جدول (۲) حداکثر عدم قطعیت کل و دقت ابزارهای اندازه‌گیری را ارائه می‌دهد. همان‌طور که در این جدول نشان داده شده، حداکثر عدم قطعیت مطلق برای تمامی پارامترها کمتر از ۵٪ است که نشان‌دهنده قابلیت اطمینان آزمایش‌های تجربی انجام شده در این تحقیق می‌باشد.

همانطور که در شکل (۶) نمایش داده شده، بطور میانگین کمتر از ۲ درصد اختلاف بین نتایج وجود دارد که نشان‌دهنده صحت اعتبارسنجی بوده و این اختلاف اندک نیز به دلیل یکسان نبودن تجهیزات آزمایشگاهی و بازه زمانی انجام آزمایش در دو پژوهش می‌باشد.

هدف اصلی سامانه‌های فتوولتائیک حرارتی بهبود عملکرد سامانه، بوسیله خنک‌کاری سلول‌های فتوولتائیک است. بنابراین، ارزیابی دمای سلول‌های فتوولتائیک اهمیت بسیار زیادی دارد. در شکل (۷)، تغییرات روزانه دمای سلول‌های الکتریکی برای واحد فتوولتائیک معمولی و سامانه‌های فتوولتائیک حرارتی با سیال خنک‌کننده آب خالص و نانوسیالات مختلف با ۰/۰۵ درصد جرمی ترسیم شده است:



شکل ۷ دمای سطح سیستم فتوولتائیک همراه با نانوسیالات مختلف در مقایسه با سیستم بدون کلکتور

همانگونه که مشاهده می‌شود، استفاده از سامانه‌های فتوولتائیک حرارتی (همراه با کلکتور)، دمای سلول‌های فتوولتائیک را به میزان قابل توجهی نسبت به واحد فتوولتائیک معمولی (بدون کلکتور) کاهش می‌دهد. میانگین روزانه دمای سطح سامانه‌های فتوولتائیک حرارتی برای سیال خنک‌کننده آب خالص و نانوسیالات شامل نانولوله کربنی چند جداره، نانولوله کربنی تک جداره و نانوذرات گرافن ۰/۰۵ درصد جرمی به ترتیب ۴۶/۸، ۴۵/۹، ۴۵/۴ و ۴۵/۰ درجه سانتی‌گراد است؛ درحالی‌که مقدار دمای سطح برای واحد فتوولتائیک معمولی ۶۱/۲ درجه سانتی‌گراد است. همچنین، اختلاف دمای سطح سامانه‌های فتوولتائیک حرارتی حاوی سیال خنک‌کننده آب با نانوسیالات شامل نانولوله کربنی چند جداره، نانولوله کربنی تک جداره و نانوذرات گرافن ۰/۰۵ درصد جرمی به ترتیب ۰/۹، ۱/۴ و ۱/۸ درجه سانتی‌گراد است.

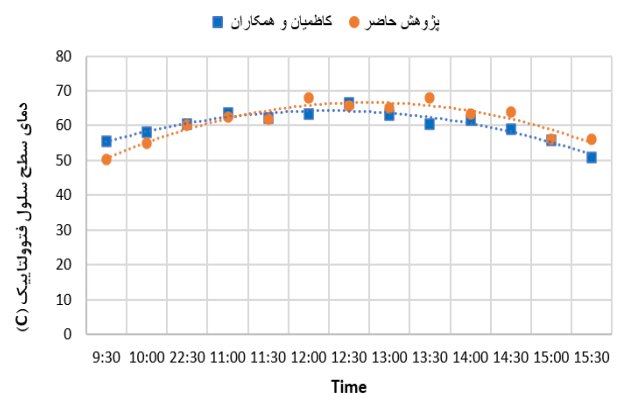
$$\frac{\delta \eta_{Ex,th}}{\eta_{Ex,th}} = \pm \sqrt{\left(\frac{\delta \eta_{th}}{\eta_{th}}\right)^2 + \left(\frac{\delta T_{out,coll}}{T_{out,coll}}\right)^2 + \left(\frac{-\delta T_a}{T_a}\right)^2} \quad (16)$$

$$= \pm 0.0165$$

میانگین اگزرژی‌های حرارتی محاسبه شده برای کلکتور، با سیال‌کاری آب مقطر، حداکثر ۱/۸٪ می‌باشد. بنابراین برای حداکثر عدم قطعیت اگزرژی حرارتی حدود ۳٪ خطا خواهد داشت که اکثر این خطا ناشی از اندازه‌گیری دمای محیط می‌باشد.

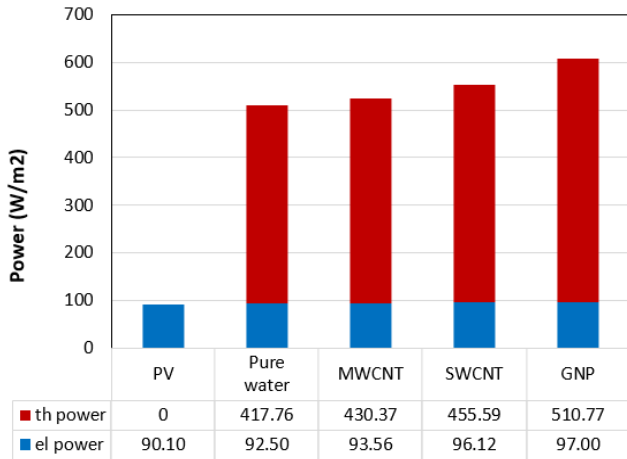
۴- نتایج و بحث

تست‌های تجربی در روزهای ۱۵ مرداد تا ۱۵ شهریور ماه و در ساعت ۹ الی ۱۶، در دانشگاه فردوسی مشهد (عرض جغرافیایی ۳۶ درجه و طول جغرافیایی ۵۹ درجه) انجام گرفته است. لازم به ذکر است، دلیل انتخاب بازه زمانی موردنظر برای انجام آزمایش‌ها، مناسب بودن میزان تابش خورشید برای رسیدن به عملکرد بهتر سیستم است. به دلیل تغییرات اندک میزان تابش در این مدت یکماهه، نتایج برای روزی که بیشترین مقدار تابش ورودی به سیستم ثبت شده از ساعت ۹ الی ۱۶ ارائه گردیده است و نتایج میانگین هم برای همان روز می‌باشد. در تمامی آزمایش‌ها دبی جرمی سیال خنک‌کننده عبوری از کلکتور سیستم فتوولتائیک حرارتی، ۳۰ و ۵۰ کیلوگرم بر ساعت می‌باشد. سیالات مورد بررسی در این پژوهش شامل آب خالص دیونیزه، نانوسیال شامل نانوذرات گرافن، نانولوله کربنی چند جداره و نانولوله کربنی تک جداره می‌باشد. ابتدا به منظور اعتبارسنجی نتایج، دمای سطح سیستم فتوولتائیک برای مقاله حاضر و پژوهش کاظمیان و همکاران [۱۵] در شکل (۶) مقایسه شده است.



شکل ۸ دمای سطح سیستم فتوولتائیک پژوهش حاضر در مقایسه با کار کاظمیان و همکاران [۱۵]

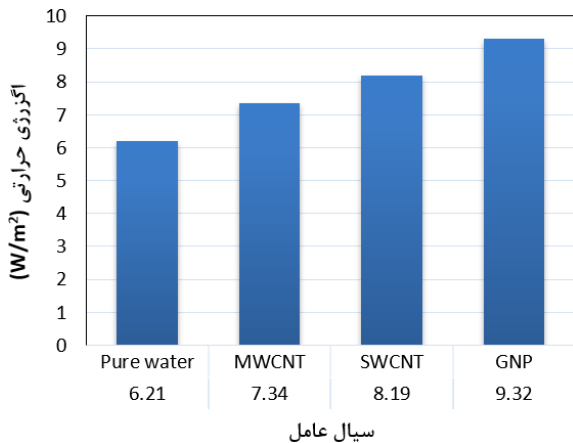
نانوذرات گرافن بیشترین راندمان الکتریکی را دارد. در ظاهر خورشیدی مقدار راندمان الکتریکی نانوسیال خنک‌کننده شامل نانوذرات گرافن حدود ۱۲ درصد می‌باشد. در تحلیلی دیگر از دیدگاه انرژی، میانگین انرژی خروجی الکتریکی و حرارتی در طی یک روز برای سیستم فتوولتائیک حرارتی، محاسبه و در شکل (۱۰)، نشان داده شده است.



شکل ۱۰ توان الکتریکی و حرارتی بر واحد سطح کلکتور از دیدگاه انرژی در سیستم فتوولتائیک حرارتی

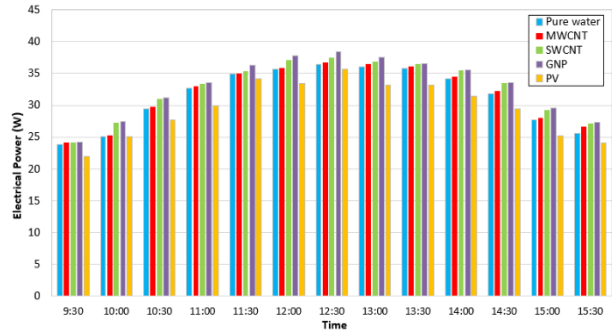
بر اساس محاسبات انجام و ارائه شده در شکل (۱۰)، استفاده از نانوسیالات شامل نانولوله کربنی چند جداره، نانولوله کربنی تک جداره و نانوذرات گرافن به ترتیب به مقدار ۳/۰۲٪، ۹/۰۶٪ و ۲۲/۲۶٪ موجب افزایش توان حرارتی سیستم (نسبت به آب خالص) خواهد شد.

در شکل (۱۱)، میانگین انرژی حرارتی روزانه دریافتی از سیستم فتوولتائیک حرارتی، با سیالات عامل مختلف نشان داده شده است. بیشترین مقدار میانگین توان حرارتی سیستم فتوولتائیک از دیدگاه انرژی برای نانوسیال شامل نانوذرات گرافن و به میزان ۹/۳۲ وات بر مترمربع می‌باشد.

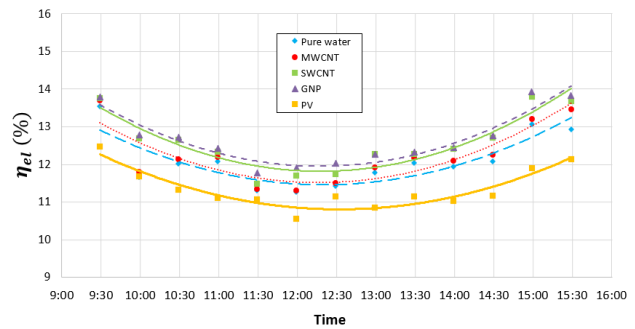


شکل ۱۱ انرژی حرارتی سیستم به ازای سیالات عامل مختلف

در ادامه تغییرات روزانه توان و راندمان الکتریکی خروجی از سامانه فتوولتائیک حرارتی با سیال خنک‌کننده آب و نانوسیالات شامل نانولوله کربنی چند جداره، نانولوله کربنی تک جداره و نانوذرات گرافن با ۰/۰۵ درصد جرمی تعیین و به ترتیب در شکل‌های (۸) و (۹) نشان داده شده است.



شکل ۸ توان الکتریکی سیستم فتوولتائیک حرارتی خنک شونده با نانوسیالات مختلف در مقایسه با سیستم بدون کلکتور حرارتی



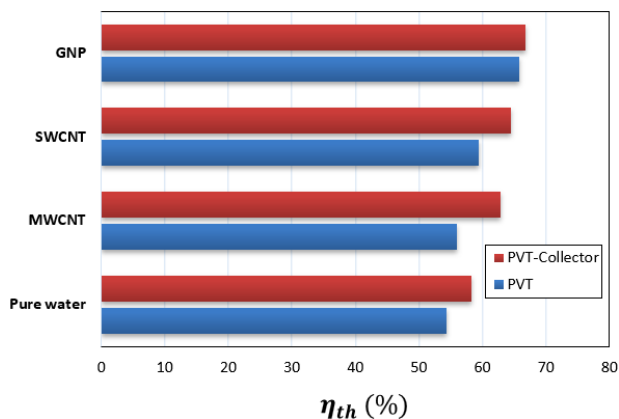
شکل ۹ راندمان الکتریکی سیستم فتوولتائیک حرارتی خنک شونده با نانوسیالات مختلف در مقایسه با سیستم بدون کلکتور حرارتی

با توجه به شکل (۸)، استفاده از سیستم فتوولتائیک حرارتی توان الکتریکی خروجی از سامانه را نسبت به واحد فتوولتائیک معمولی افزایش می‌دهد. این امر ناشی از کاهش دمای سطح سیستم فتوولتائیک حرارتی در مقایسه با واحد فتوولتائیک معمولی است. شکل (۸) همچنین نشان می‌دهد که با نزدیک شدن به ظهر خورشیدی (حدود ساعت ۱۲:۳۰) توان الکتریکی خروجی از سامانه‌های فتوولتائیک به دلیل افزایش انرژی تابشی ورودی به سامانه، زیاد می‌شود. بعلاوه در ظهر خورشیدی، بیشترین توان الکتریکی خروجی از سامانه فتوولتائیک حرارتی مربوط به نانوسیال خنک‌کننده شامل نانوذرات گرافن ۰/۰۵ درصد جرمی بوده و به میزان ۳۸/۴ وات است.

با توجه به شکل (۹) می‌توان گفت که برای تمامی انواع سیالات با نزدیک شدن به ظهر خورشیدی، میزان راندمان الکتریکی کاهش و با فاصله گرفتن از ظهر خورشیدی راندمان الکتریکی بیشتر می‌شود. همچنین نانوسیال خنک‌کننده شامل

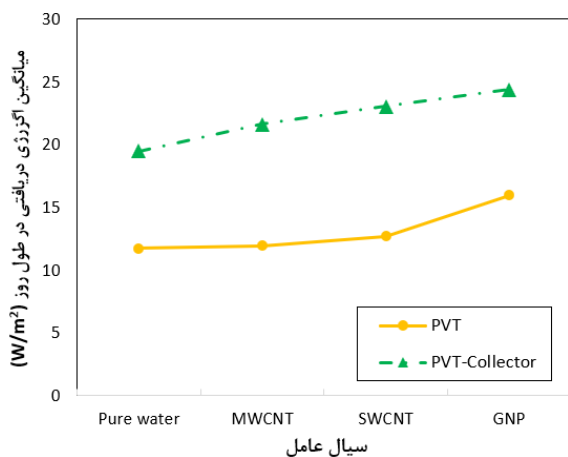
مشاهده می‌شود در این آزمایش‌ها، کلکتور خورشیدی باعث افزایش بیش از دو برابر حرارتی که سیال عامل دریافت می‌کند، شده است.

شکل (۱۴) بازده حرارتی میانگین روزانه دو سیستم فتوولتاییک حرارتی و فتوولتاییک حرارتی با کلکتور را نشان می‌دهد.



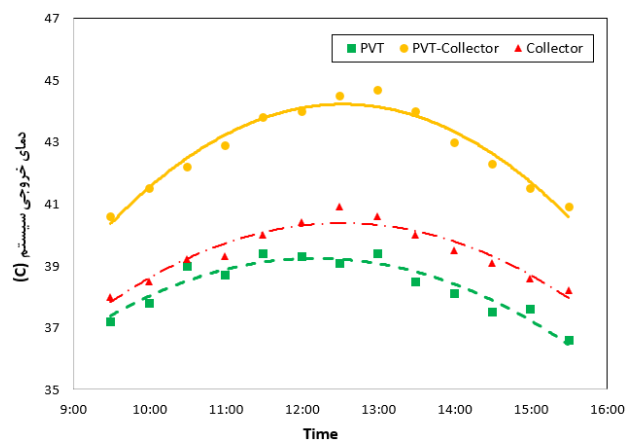
شکل ۱۴ مقایسه بازده حرارتی میانگین روزانه دو سیستم فتوولتاییک حرارتی و فتوولتاییک حرارتی با کلکتور

همانطور که در شکل (۱۴) مشاهده می‌شود، سیستم فتوولتاییک حرارتی به همراه کلکتور خورشیدی توانسته است بازده حرارتی بالاتری را بدست دهد. این بازدهی بالاتر در تمامی سیالات عامل به چشم می‌خورد. مطابق این شکل، بهبود بازده حرارتی در نانوسیال شامل نانولوله کربنی چند جداره بیشتر دیده می‌شود. این بهبود در حدود ۱۲/۴۲ درصد می‌باشد که از مقدار ۵۵/۹۶ به ۶۲/۹۱ رسیده است. همچنین برای سیالات آب خالص، نانوسیال شامل نانولوله کربنی تک جداره و نانوذرات گرافن نیز به ترتیب بهبود ۷/۳۲، ۸/۷۰ و ۱/۷۲ درصدی نتیجه شده است.

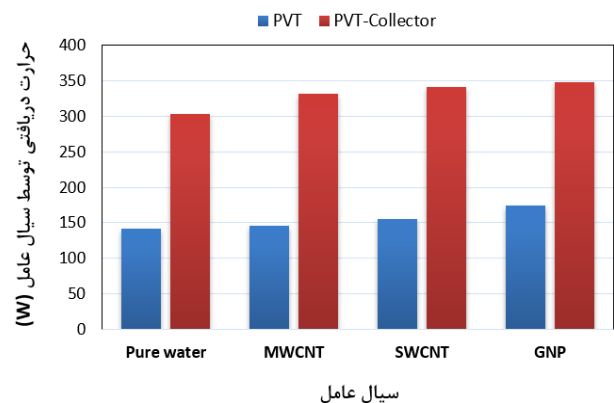


شکل ۱۵ مقایسه میانگین انرژی حرارتی روزانه بین سیستم فتوولتاییک حرارتی و فتوولتاییک حرارتی همراه با کلکتور خورشیدی

همانگونه که قبلاً نیز اشاره شد، یکی از اهداف این مطالعه، بهبود شرایط سیستم فتوولتاییک حرارتی به کمک ترکیب آن با کلکتور خورشیدی است. یکی از فواید این روش، پیش‌گرم کردن سیال ورودی به کلکتور خورشیدی و در نتیجه بهبود عملکرد کلکتور خورشیدی می‌باشد. شکل (۱۲) دمای خروجی سیستم فتوولتاییک حرارتی در حالتی که به صورت تنها و یا همراه با کلکتور خورشیدی در مدار قرار گرفته باشد را نشان می‌دهد. با توجه به این شکل متوسط دمای خروجی از کلکتور ثانویه (به صورت تنها)، سیستم فتوولتاییک حرارتی و سیستم ترکیبی فتوولتاییک حرارتی و کلکتور به ترتیب ۳۹/۴۱، ۳۸/۳۲ و ۴۲/۷۶ درجه سانتی‌گراد می‌باشد.



شکل ۱۲ مقایسه دمای خروجی سیال آب به ازای سیستم‌های فتوولتاییک حرارتی و ترکیب آن با کلکتور خورشیدی



شکل ۱۳ مقایسه حرارت دریافتی توسط سیال عامل بین سیستم فتوولتاییک حرارتی و فتوولتاییک حرارتی همراه با کلکتور خورشیدی

افزایش دمای خروجی از سیستم فتوولتاییک حرارتی تاثیر مستقیمی روی میزان حرارت دریافتی سیال عامل دارد. در شکل (۱۳)، حرارت دریافتی توسط سیال عامل به ازای دو سیستم فتوولتاییک حرارتی و سیستم فتوولتاییک حرارتی ترکیب شده با کلکتور خورشیدی نمایش داده شده است. همانگونه که

درصدی به ترتیب برای نانوسیالات شامل نانولوله کربنی چند جداره، نانولوله کربنی تک جداره و نانوذرات گرافن نسبت به آب خالص صورت می گیرد.

• سیستم فتوولتاییک حرارتی به همراه کلکتور خورشیدی توانسته است در مقایسه با سیستم فتوولتاییک حرارتی بازده حرارتی میانگین روزانه بالاتری را بدست دهد. بهبود بازده حرارتی در نانوسیالات شامل نانولوله کربنی چند جداره بیشتر بوده بطوریکه در حدود ۱۲/۴۲ درصد می باشد. همچنین برای سیالات آب خالص، نانوسیالات شامل نانولوله کربنی تک جداره و نانوذرات گرافن نیز به ترتیب بهبود ۷/۳۲، ۸/۷۰ و ۱/۷۲ درصد حاصل شده است.

۷- فهرست علائم و اختصارات

علائم انگلیسی

A	مساحت (m^2)
c_p	ظرفیت گرمایی ویژه (J/kgK)
\dot{E}	نرخ انرژی (W)
\dot{E}_x	نرخ انرژی (W)
FF	ضریب تابش
\dot{G}	نرخ انرژی تابشی (W/m^2)
h	انتالپی (J/g)
I	جریان الکتریکی (A)
\dot{m}	دبی جرمی (kg/s)
P	فشار (Pa)
s	انرژی (J/gK)
T	دما (K)
V	ولتاژ (V)

علائم یونانی

α	ضریب جذب تابش خورشید
ε	بازده انرژی، %
η	بازده انرژی، %
ρ	چگالی، (kg/m^3)
τ	ضریب عبور تابش خورشید

زیرنویس ها

a	هوا
c	گردآورنده حرارت
$cell$	سلول خورشیدی
el	الکتریکی
f	سیال
gl	پوشش شیشه ای
in	ورودی
$loss$	اتلافی
$mass$	جرم
max	بیشینه
oc	مدار باز
out	خروجی
p	پمپ
PV	فتوولتاییک

میانگین روزانه انرژی حرارتی خروجی از دو سیستم فتوولتاییک حرارتی و فتوولتاییک حرارتی با کلکتور خورشیدی با سیال آب خالص و در حضور نانوسیالات شامل نانولوله کربنی چند جداره، نانولوله کربنی تک جداره و نانوذرات گرافن با درصد جرمی ۰/۰۵ در شکل (۱۵) نشان داده شده است.

همانطور که مشاهده می شود، میانگین انرژی روزانه در سیستم فتوولتاییک حرارتی همراه با کلکتور خورشیدی برای همه سیالات عامل بالاتر از سیستم فتوولتاییک حرارتی می باشد. برای مثال برای سیال آب خالص در صورت استفاده از سیستم دارای کلکتور خورشیدی می توان در طول روز به طور متوسط ۶۶/۲۵ درصد افزایش انرژی از سیستم بدون کلکتور خورشیدی دریافت کرد. همچنین در صورت استفاده از نانوسیالات شامل نانولوله کربنی چند جداره، نانولوله کربنی تک جداره و نانوذرات گرافن، میزان افزایش انرژی دریافتی به ترتیب ۸۱/۳۹، ۸۱/۸۶ و ۵۲/۷۷ درصد خواهد بود.

۶- نتیجه گیری

در این پژوهش بصورت تجربی عملکرد سه سیستم فتوولتاییک ساده، فتوولتاییک حرارتی و فتوولتاییک حرارتی با کلکتور خورشیدی و در حضور نانوسیالات مختلف مطالعه شده است. آزمایش ها در دانشگاه فردوسی مشهد (عرض جغرافیایی ۳۶ درجه و طول جغرافیایی ۵۹ درجه) و در روزهای بدون ابر مرداد و شهریور ماه انجام شده است. بر اساس بررسی های صورت گرفته مهمترین نتایج به شرح زیر می باشد:

• با نزدیک شدن به ظهر خورشیدی توان الکتریکی خروجی از سامانه های فتوولتاییک به دلیل افزایش انرژی تابشی ورودی به سامانه زیاد می شود؛ اما میزان راندمان الکتریکی کاهش می یابد. بنابراین در ظهر خورشیدی، بیشترین توان و بازده الکتریکی خروجی از سامانه فتوولتاییک حرارتی برای نانوسیالات خنک کننده شامل نانوذرات گرافن ۰/۰۵ درصد جرمی به ترتیب ۳۸/۴ وات و ۱۲/۰۲ درصد می باشد.

• استفاده از نانوسیالات شامل نانولوله کربنی چند جداره، نانولوله کربنی تک جداره و نانوذرات گرافن به ترتیب به مقدار ۳۱/۰۲، ۹/۰۶ و ۲۲/۲۶٪ موجب افزایش توان حرارتی سیستم (نسبت به آب خالص) خواهد شد.

• بیشترین مقدار میانگین توان حرارتی سیستم فتوولتاییک حرارتی از دیدگاه انرژی برای نانوسیالات شامل نانوذرات گرافن می باشد که ۹/۳۲ وات بر مترمربع است. اگر آب خالص به عنوان سیال مرجع در نظر گرفته شود، افزایش ۱۸/۱۸، ۳۱/۸۷ و ۵۰/۰۰

PVT فتوولتائیک حرارتی
sc اتصال کوتاه
sun خورشید
th حرارتی

۸- مراجع

- [8] M. Hazami, A. Riahi, F. Mehdaoui, O. Nouicer, and A. Farhat, "Energetic and exergetic performances analysis of a PV/T (photovoltaic thermal) solar system tested and simulated under to Tunisian (North Africa) climatic conditions," *Energy*, vol. 107, pp. 78-94, 2016/07/15/ 2016, <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.03.134>.
- [9] S. Dubey and A. A. O. Tay, "Testing of two different types of photovoltaic-thermal (PVT) modules with heat flow pattern under tropical climatic conditions," *Energy for Sustainable Development*, vol. 17, pp. 1-12, 2013/02/01/2013, <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.esd.2012.09.001>.
- [10] A. Y. Bhat and A. Qayoum, "Synergistic impact of tube configuration and working fluid on photovoltaic-thermal system performance," *Renewable Energy*, vol. 207, pp. 205-217, 2023/05/01/2023, <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.renene.2023.02.086>.
- [11] V. Tirupati Rao, Y. Raja Sekhar, M. Arıcı, N. Ralph Pochont, and D. M. Reddy Prasad, "Experimental investigations on bi-symmetrical web flow water based photovoltaic-thermal (PVT) system: Energy, exergy, and entropy (3-E) analysis," *Solar Energy*, vol. 271, p. 112445, 2024/03/15/ 2024, <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.solener.2024.112445>.
- [12] Z. Ul-Abdin, M. Zeman, O. Isabella, and R. Santbergen, "Investigating the annual performance of air-based collectors and novel bi-fluid based PV-thermal system," *Solar Energy*, vol. 276, p. 112687, 2024/07/01/2024, <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.solener.2024.112687>.
- [13] F. Sarhaddi, S. Farahat, H. Ajam, and A. Behzadmehr, "Exergetic performance assessment of a solar photovoltaic thermal (PV/T) air collector," *Energy and Buildings*, vol. 42, pp. 2184-2199, 2010/11/01/2010, <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2010.07.011>.
- [14] S. Alsaqoor, A. Alqatamin, A. Alahmer, Z. Nan, Y. Al-Husban, and H. Jouhara, "The impact of phase change material on photovoltaic thermal (PVT) systems: A numerical study," *International Journal of Thermofluids*, vol. 18, p. 100365, 2023/05/01/ 2023, <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ijft.2023.100365>.
- [15] A. Kazemian, A. Taheri, A. Sardarabadi, T. Ma, M. Passandideh-Fard, and J. Peng, "Energy, exergy and environmental analysis of glazed and unglazed PVT system integrated with phase change material: An experimental approach," *Solar Energy*, vol. 201, pp. 178-189, 2020/05/01/ 2020, <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.02.096>.
- [1] A. N. Al-Shamani, M. H. Yazdi, M. A. Alghoul, A. M. Abed, M. H. Ruslan, S. Mat, *et al.*, "Nanofluids for improved efficiency in cooling solar collectors – A review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 38, pp. 348-367, 2014/10/01/ 2014, <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.05.041>.
- [2] X. Zhang, X. Zhao, S. Smith, J. Xu, and X. Yu, "Review of R&D progress and practical application of the solar photovoltaic/thermal (PV/T) technologies," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 16, pp. 599-617, 2012/01/01/ 2012, <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.08.026>.
- [3] M. A. Hasan and K. Sumathy, "Photovoltaic thermal module concepts and their performance analysis: A review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 14, pp. 1845-1859, 2010/09/01/ 2010, <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.03.011>.
- [4] A. Shahsavari, M. Ameri, and M. m. Mahmoud Abadi, "Simulation and Test of PV/T Air Systems with Natural Air Flow Operation," *Amirkabir Journal of Mechanical Engineering*, vol. 43, pp. 31-40, 2011, <https://doi.org/10.22060/mej.2011.58>.
- [5] A. V. Kotkondawar, K. Gabhane, and S. Rayalu, "Design and performance evaluation of Front glass-covered photovoltaics-thermal hybrid system for enhanced electrical output and hot water production," *Measurement: Energy*, vol. 2, p. 100006, 2024/06/01/ 2024, <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.meaeene.2024.100006>.
- [6] T. T. Chow, G. Pei, K. F. Fong, Z. Lin, A. L. S. Chan, and J. Ji, "Energy and exergy analysis of photovoltaic-thermal collector with and without glass cover," *Applied Energy*, vol. 86, pp. 310-316, 2009/03/01/ 2009, <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2008.04.016>.
- [7] M. Ahmadinejad, A. Soleimani, and A. Gerami, "Performance enhancement of a photovoltaic thermal (PVT) system with sinusoidal fins: A quasi-transient energy-exergy analysis," *International Journal of Green Energy*, vol. 20, pp. 978-996, 2023/07/15 2023, <https://doi.org/10.1080/15435075.2022.2131434>.

- nano/phase change materials (NPCM) as coolant of electronic chipsets, under free and forced convection," *Applied Thermal Engineering*, vol. 111, pp. 271-279, 2017/01/25/ 2017, <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.09.028>.
- [23] F. Bayrak, N. Abu-Hamdeh, K. A. Alnefaie, and H. F. Öztıp, "A review on exergy analysis of solar electricity production," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 74, pp. 755-770, 2017/07/01/ 2017, <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.03.012>.
- [24] M. Granström, K. Petritsch, A. C. Arias, A. Lux, M. R. Andersson, and R. H. Friend, "Laminated fabrication of polymeric photovoltaic diodes," *Nature*, vol. 395, pp. 257-260, 1998/09/01 1998, <https://doi.org/10.1038/26183>.
- [25] J. Yazdanpanahi, F. Sarhaddi, and M. Mahdavi Adeli, "Experimental investigation of exergy efficiency of a solar photovoltaic thermal (PVT) water collector based on exergy losses," *Solar Energy*, vol. 118, pp. 197-208, 2015/08/01/ 2015, <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.solener.2015.04.038>.
- [26] F. Yazdanifard, M. Ameri, and E. Ebrahimnia-Bajestan, "Performance of nanofluid-based photovoltaic/thermal systems: A review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 76, pp. 323-352, 2017/09/01/ 2017, <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.03.025>.
- [27] S. R. Park, A. K. Pandey, V. V. Tyagi, and S. K. Tyagi, "Energy and exergy analysis of typical renewable energy systems," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 30, pp. 105-123, 2014/02/01/2014, <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.09.011>.
- [28] B. Sun and H. Liu, "Flow and heat transfer characteristics of nanofluids in a liquid-cooled CPU heat radiator," *Applied Thermal Engineering*, vol. 115, pp. 435-443, 2017/03/25/ 2017, <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.12.108>.
- [16] F. Yazdanifard, E. Ebrahimnia-Bajestan, and M. Ameri, "Investigating the performance of a water-based photovoltaic/thermal (PV/T) collector in laminar and turbulent flow regime," *Renewable Energy*, vol. 99, pp. 295-306, 2016/12/01/ 2016, <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.07.004>.
- [17] A. Shahsavari, "Experimental performance comparison of photovoltaic/thermal systems containing binary and ternary hybrid nanofluids - Part I: Energy analysis," *Journal of Mechanical Engineering University of Tabriz*, vol. 54, pp. 141-148, 2024, <https://doi.org/10.22034/jmeut.2024.60219.3372>.
- [18] M. Moein-Jahromi, S. Rahmanian, S. Barzagarloo Kofi, "Investigation of heat absorber geometry effect using nanofluid and Microencapsulated PCM on the photovoltaic-thermal (PV/T) panel performance," *Journal of Mechanical Engineering University of Tabriz*, vol. 51, pp. 413-422, 2022, <https://doi.org/10.22034/jmeut.2022.12264>.
- [19] W. H. Azmi, K. A. Hamid, N. A. Usri, R. Mamat, and K. V. Sharma, "Heat transfer augmentation of ethylene glycol: water nanofluids and applications - A review," *International Communications in Heat and Mass Transfer*, vol. 75, pp. 13-23, 2016/07/01/ 2016, <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2016.03.018>.
- [20] A. M. Bassam, K. Sopian, A. Ibrahim, M. F. Fauzan, A. B. Al-Aasam, and G. Y. Abusaibaa, "Experimental analysis for the photovoltaic thermal collector (PVT) with nano PCM and micro-fins tube nanofluid," *Case Studies in Thermal Engineering*, vol. 41, p. 102579, 2023/01/01/2023, <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.csite.2022.102579>.
- [21] Y. Khanjari, F. Pourfayaz, and A. B. Kasaeian, "Numerical investigation on using of nanofluid in a water-cooled photovoltaic thermal system," *Energy Conversion and Management*, vol. 122, pp. 263-278, 2016/08/15/2016, <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.05.083>.
- [22] M. Alimohammadi, Y. Aghli, E. S. Alavi, M. Sardarabadi, and M. Passandideh-Fard, "Experimental investigation of the effects of using