

بررسی عددی تأثیر استفاده از نانوسیال آب-آلومینیوم اکسید (Al_2O_3) بر روی عملکرد ترمودینامیکی سامانه فتوولتائیک حرارتی (PV/T)

آرمین آلتونی^۱، شیوا گرجیان^{۲*} و ادریس رحمتی^۳

چکیده

انرژی خورشیدی به عنوان یک منبع انرژی تجدیدپذیر می‌تواند برای تولید حرارت و الکتریسیته استفاده شود. در بین سامانه‌های تولید توان با استفاده از انرژی خورشیدی، سامانه فتوولتائیک حرارتی (PV/T) یک فناوری نسبتاً جدید و پرکاربرد است که می‌تواند به طور همزمان انرژی الکتریسیته و گرما تولید کند. در سال‌های اخیر استفاده از مواد نانو در سامانه‌های خورشیدی به طور قابل توجهی گسترش یافته است. در پژوهش حاضر اثر استفاده از نانو سیال آب-آلومینیوم اکسید در سه غلظت حجمی ۰/۱۰، ۰/۰۷۵، ۰/۰۵ درصد و سه دبی حجمی ورودی ۰/۶، ۰/۹، ۱/۲ لیتر بر دقیقه بر بازده الکتریکی، بازده حرارتی و بازده اکسرژی سامانه PV/T در ساعات مختلف روز به صورت عددی با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) و مقایسه آن با نتایج تجربی انجام شده است. دبی حجمی ۱/۲ لیتر بر دقیقه و غلظت حجمی ۰/۱۰ درصد نانوسیال آلومینیوم-اکسید با توجه به خنک‌کاری مناسب سامانه به عنوان نقاط ورودی بهینه به کار گرفته شدند. بیشترین مقدار بازده حرارتی که تابع اختلاف دمای ورودی و خروجی سیال است، در بیشینه شرایط تابش ($960 W/m^2$) با مقدار ۵۳ درصد مشاهده شد. همچنین بیشترین مقدار بازده اکسرژی در فاصله زمانی بعدازظهر (ساعت ۱۶) با مقادیر ۲۱/۶ درصد و کمترین مقدار آن در فاصله زمانی ظهر (ساعت ۱۳) با مقادیر ۱۵/۹ درصد مشاهده شد.

واژه‌های کلیدی: انرژی خورشیدی، بازده انرژی، بازده اکسرژی، فتوولتائیک-حرارتی، نانوسیال.

ارجاع: آلتونی آ.، گرجیان ش. و رحمتی ا. ۱۴۰۱. بررسی عددی تأثیر استفاده از نانوسیال آب-آلومینیوم اکسید (Al_2O_3) بر روی عملکرد ترمودینامیکی سامانه فتوولتائیک حرارتی (PV/T). نشریه پژوهش‌های مکانیک ماشین‌های کشاورزی. ۲۲: ۴۴-۴۴.

۱- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس.

۲- استادیار گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس.

۳- دانشجوی دکتری گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس.

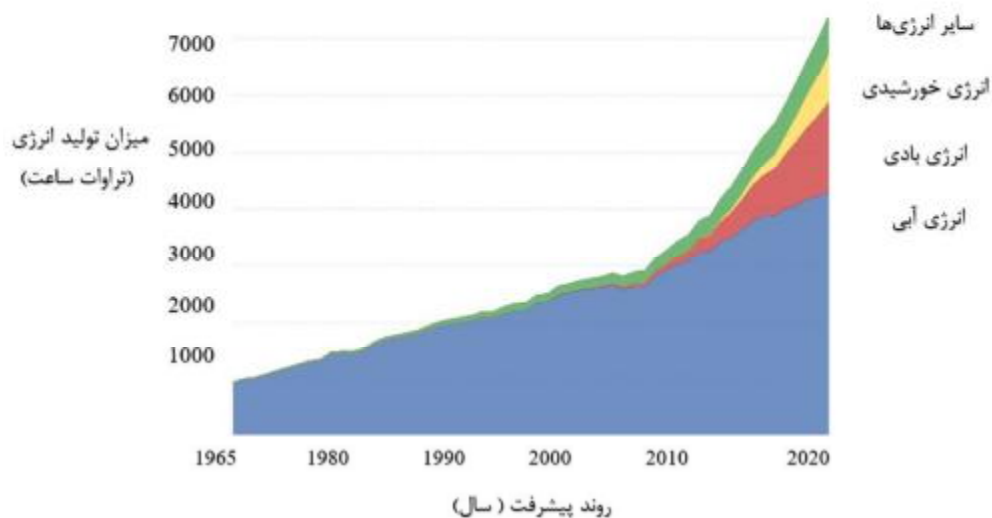
* نویسنده مسئول: Gorjian@modares.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۲/۰۸ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۵/۲۶

مقدمه

امواج دریایی و انرژی زمین‌گرمایی سوق داده است (Karaghoulou & Kazmerski, 2013; Gorjian *et al.*, 2019; Gorjian *et al.*, 2020; Jalili Jamshidian *et al.*, 2018; Nojavan *et al.*, 2017). انرژی تجدیدپذیر انرژی است که به طور طبیعی در یک دوره‌ی زمانی کوتاه، مجدداً به دست می‌آید. در شکل ۱ میزان تولید انرژی با استفاده از منابع مختلف انرژی‌های تجدیدپذیر در جهان آورده شده است.

انرژی مهم‌ترین نیاز هر صنعت به‌ویژه در کشورهای در حال توسعه اقتصادی است. منابع فسیلی که به عنوان شناخته‌ترین منبع انرژی هستند، باعث نگرانی‌های زیست محیطی مانند گرم شدن کره زمین و آلودگی هوا می‌شوند. از طرف دیگر محدودیت منابع فسیلی موجود و تقاضای رو به رشد انرژی در جهان، محققین را به سمت منابع انرژی کارآمد، ایمن، پاک و سازگار با محیط زیست همچون انرژی خورشیدی، زیست‌توده، انرژی هیدروژن، انرژی



شکل ۱- میزان تولید انرژی با استفاده از منابع انرژی‌های تجدیدپذیر (Renewable Energy Generation, World, 2021)

سامانه‌های PV با استفاده از سلول‌های خورشیدی ساخته شده از مواد نیمه‌رسانا تابش خورشیدی را به الکتریسیته تبدیل می‌کنند. یکی از معایب اصلی فن‌آوری PV، پایین بودن بازده الکتریکی آن است. افزایش دمای سلول‌های خورشیدی باعث افت بازده می‌شود. به طوری که توان خروجی سلول در دمای بالاتر از $25^{\circ}C$ به ازای هر درجه افزایش دما، $0/4$ تا $0/5$ درصد کاهش می‌یابد. تنها ۵ تا ۲۰ درصد از میزان انرژی خورشیدی توسط سلول‌های خورشیدی به الکتریسیته تبدیل می‌شود و بسته به نوع سلول به کار گرفته شده و شرایط کاری آن متغیر است. مابقی انرژی به حرارت تبدیل و یا از سطح سلول بازتاب می‌شود (Gorjian *et al.*, 2020).

تاکنون چندین روش خنک‌کاری برای سامانه‌های PV پیشنهاد شده است که در بین آن‌ها روش‌هایی که خنک‌کاری آن‌ها بر پایه مایع و هوا است در زمره

در میان انواع مختلف انرژی‌های تجدیدپذیر، انرژی خورشیدی به دلیل نامحدود بودن، دوست‌دار محیط زیست بودن و امکان بهره‌برداری از آن به طور مستقیم، یکی از منابع امیدوار کننده به‌ویژه در کشورهای با مقدار متوسط تابش خورشیدی است. تخمین زده شده است که مقدار انرژی خورشیدی دریافتی توسط زمین در مدت یک ساعت می‌تواند کل انرژی مورد نیاز بشر را در طول سال فراهم کند (Gorjian *et al.*, 2019; Gorjian, Sharon, *et al.*, 2021). امروزه خورشید به عنوان یک منبع انرژی تجدیدپذیر مهم برای تبدیل شدن به انرژی گرمایی و الکتریسیته شناخته شده است. انرژی خورشیدی را می‌توان به عنوان انرژی حرارتی توسط متمرکزکننده‌های خورشیدی و یا انرژی الکتریکی از طریق سامانه‌های فتوولتائیک^۱ (PV) به دست آورد (Shakouri *et al.*, 2020).

1- Photovoltaic

می‌دهند. روش‌های عددی به تنهایی روند بهینه‌گی فرآیند را پیش‌بینی نمی‌کنند، بنابراین با بکارگیری قانون اول و دوم ترمودینامیک در کنار روش‌های عددی می‌توان به طراحی و عملکرد بهینه سامانه PV دست یافت.

تاکنون پژوهش‌های متعددی به صورت تجربی و عددی در زمینه استفاده از نانوسیال به منظور افزایش عملکرد سامانه‌های خورشیدی انجام شده‌اند که در ادامه مورد بحث قرار می‌گیرند. در پژوهشی تحلیل انرژی، اکسرژی و خصوصیات نوری یک FPC خورشیدی برای تعیین پارامترهای طراحی و عملیاتی همچون نرخ جریان جرمی، دمای محیط، سرعت باد، هندسه گردآورنده، و دمای سیال ورودی با استفاده از نانوسیال‌های CuO ، TiO_2 ، Al_2O_3 و SiO_2 مورد بررسی قرار گرفت (Upadhyay et al., 2015). نتایج نشان داد که استفاده از نانوسیال‌ها سبب بهبود بازده حرارتی گردآورنده می‌گردد و به دنبال آن اندازه گردآورنده و هزینه‌ها کاهش می‌یابند. افزایش دمای محیط و سرعت باد سبب کاهش بازده اکسرژی شد. همچنین با افزایش دمای سیال ورودی تا نقطه بیشینه، بازده اکسرژی روند افزایشی و بعد از گذر از نقطه بیشینه روند کاهشی داشت. در مطالعه‌ای دیگر تأثیر چند نوع نانوسیال مختلف شامل CuO ، Al_2O_3 ، TiO_2 و SiO_2 بر عملکرد متمرکزکننده‌های صفحه تخت خورشیدی به صورت تجربی مورد بررسی قرار گرفت (Faizal et al., 2013). نتایج نشان داد که استفاده از نانو سیال نه تنها منجر به افزایش بازده سامانه می‌گردد بلکه در هزینه‌ها و مصرف انرژی نیز صرفه‌جویی می‌گردد. در نهایت گزارش کردند که نانو ذرات با چگالی بالا و ضریب گرمایی ویژه پایین عملکرد گرمایی بهتری از خود نشان می‌دهند.

در یک پژوهش تجربی عملکرد نانو سیال سیلیکون اکسید (SiO_2) در متمرکزکننده‌های صفحه تخت مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان دادند که افزودن نانوسیال SiO_2 با غلظت حجمی ۰/۱ درصد سبب افزایش بازده گرمایی به مقدار ۴ تا ۸ درصد می‌شود (Salavati Meibodi et al., 2015). خنجری و همکاران در پژوهشی دیگر گزارش شد که افزودن نانو ذرات نقره به آب خالص سبب افزایش خواص فیزیک گرمایی سیال در مقایسه با آب خالص می‌گردد و در نتیجه ضریب انتقال حرارت و بازده سامانه‌ی PV/T افزایش می‌یابد (Khanjari et al., 2016). در یک مطالعه عملکرد یک ماژول PV در مناطق گرمسیر که

پروکاربردترین روش‌ها قرار گرفته‌اند. بدین منظور با بکارگیری سیال آب یا هوا بخش زیادی از حرارت به وسیله انتقال حرارت همرفتی از سلول جذب شده و در نتیجه دمای آن کاهش و بازده الکتریکی افزایش می‌یابد (Gorjian et al., 2021). همچنین می‌توان از سیال گرم شده در کاربردهای حرارتی استفاده کرد. در کنار این دو روش، خنک‌کاری ترموالکتریک، لوله حرارتی، نانو سیال و مواد تغییر فاز دهنده (PCM) روش‌های دیگری هستند که در سامانه‌های PV و گردآورنده‌های حرارتی صفحه تخت^۱ (FPC) یا لوله‌ای تحت خلأ^۲ (ETC) استفاده شده‌اند (Gorjian et al., 2020; Gorjian & Ghobadian, 2015).

نانوذره‌ها اخیراً در سامانه‌های خورشیدی مورد استقبال گسترده‌ای قرار گرفته‌اند. نانو سیال به مخلوطی از ذرات نانو فلزی یا غیرفلزی که در یک سیال پایه معلق شده باشند اطلاق می‌شود. با توجه به نوع سیال پایه مورد استفاده (آلی یا غیر آلی) و همچنین نوع نانوذرات مورد نظر، انواع مختلفی از نانو سیال‌ها همچون نانو سیال‌های استخراجی، زیست‌محیطی (کنترل‌کننده آلودگی محیط زیست)، زیستی و دارویی وجود دارند (Ambreen & Kim, 2020). مهم‌ترین ویژگی مشاهده شده در نانوسیال‌ها افزایش قابل توجه هدایت گرمایی بوده به طوری که این افزایش در غلظت‌های پایین نانوسیال نیز مشاهده می‌شود. بالا بودن هدایت حرارتی، افزایش نرخ انتقال حرارت در یک فاز و بالا بودن شار حرارتی بحرانی باعث می‌شوند تا نانوسیال‌ها خواص خنک‌کنندگی مناسبی داشته باشند (Elsaid et al., 2021). به منظور خنک‌کاری و افزایش بازده سامانه‌های PV می‌توان به سیال مورد نظر نانوذره اضافه کرد. پایین بودن عملکرد سلول‌های خورشیدی در دماهای بالا محققین را به بررسی تجربی استفاده از نانو ذرات در سامانه‌های خورشیدی ترغیب کرده است (Shakouri et al., 2020). این فرآیند زمان‌بر و هزینه‌بر است. بنابراین برای صرفه اقتصادی و زمانی می‌توان از روش‌های عددی به منظور پیش‌بینی عملکرد سامانه استفاده کرد. روش‌های عددی پیچیدگی بسیاری از کارهای تجربی همچون هزینه ساخت سامانه‌ها، زمان‌بر بودن و مواد اولیه مورد استفاده برای آزمایش را کاهش

1- Flat-Plate Collector

2- Evacuated Tube Collector

عنوان خاصیتی از سیال پایه در نظر گرفته شده است. در این جدول، ϕ درصد حجمی نانو سیال، ρ_f چگالی سیال (kg/m^3)، ρ_s چگالی نانو ذرات (kg/m^3)، K_f ضریب هدایت گرمایی سیال ($W/m.K$)، K_s ضریب هدایت گرمایی نانو ذرات ($W/m.K$)، K_{nf} ضریب هدایت گرمایی نانوسیال ($W/m.K$)، C_{pf} ظرفیت گرمایی ویژه سیال ($J/kg.K$)، C_{pnf} ظرفیت گرمایی ویژه نانوسیال ($J/kg.K$)، C_{ps} ظرفیت گرمایی ویژه نانو ذرات، K_b ثابت بولتزمن (J/K)، d_p قطرات ذرات (m)، P فشار سیال (Pa)، A مساحت (m^2)، b ضریب دمایی ($1/k$) و μ_f لزجت سیال (m^2/s) هستند. در این پژوهش، از مدل دینامیکی ای برای نانو ذرات Al_2O_3 استفاده شده است که خواص فیزیکی گرمایی آن در جدول ۳ آورده شده‌اند. هدایت حرارتی مهم‌ترین خاصیت نانوسیال است. پراکنده کردن ذرات نانو در آب خواص فیزیکی گرمایی سیال پایه را بهبود و نرخ انتقال حرارت را افزایش می‌دهد. نانو سیال علاوه بر هدایت حرارتی بالا باید لزجت پایینی داشته باشد. با افزایش غلظت نانو ذرات هدایت حرارتی و لزجت افزایش می‌یابد. لزجت نانو سیال با غلظت حجمی کمتر از ۵ درصد توسط مدل اینشتین و با غلظت‌های بیشتر از ۵ درصد توسط مدل بچلر بیان می‌گردد که اثرات حرکت براونی در مدل لزجت بچلر در نظر گرفته شده‌اند (Maddah et al., 2013). در این پژوهش، از نانو سیال آب آلومینیوم اکسید با سه غلظت حجمی ۰/۰۵، ۰/۰۷۵، ۰/۱۰ (درصد) و با سه دبی جریان ۱/۶، ۰/۹، ۱/۲ استفاده شده است.

توسط آب خنک‌کاری می‌شد مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان دادند که کاهش دمای ماژول PV تا ۲۰ درصد منجر به افزایش ۹ درصد در بازده الکتریکی می‌گردد (Bahaidarah et al., 2013). در یک کار تجربی با بکارگیری یک لوله ساده در پشت ماژول‌های PV به عنوان مبدل حرارتی برای خنک‌کاری، بازدهی ماژول‌ها ۱۰ الی ۱۳ درصد افزایش یافت (Ceylan et al., 2014). مرور منابع صورت گرفته اهمیت استفاده از نانوسیال‌ها را به عنوان خنک‌کننده به روشنی بیان می‌کند. لذا به منظور بررسی اثر نانوسیال بر عملکرد سامانه، کاهش هزینه‌ها و دستیابی به نقطه بهینه شبیه‌سازی فرآیند، یک امری ضروری به نظر می‌رسد. بنابراین هدف از پژوهش حاضر، بررسی عددی تأثیر استفاده غلظت‌های مختلف نانوسیال آلومینیوم اکسید (Al_2O_3) و دبی حجمی سیال ورودی بر عملکرد ترمودینامیکی سامانه PV/T و مقایسه نتایج به دست آمده با نتایج تجربی، به منظور تأیید نتایج عددی است.

مواد و روش‌ها

روش عددی: ویژگی سیال عامل

سیال مورد استفاده در پژوهش حاضر آب خالص است. در جدول ۱ روابط همبستگی دمایی خواص آب در دماهای مختلف بیان شده‌اند. برای بیان محاسبه خواص نانو سیال نظریه‌های مختلفی ذکر شده است. در پژوهش حاضر از دو مدل کلاسیک و دینامیکی برای مدل کردن رسانایی حرارتی استفاده شده است (جدول ۲). در این مدل‌ها تأثیر اندازه ذره، غلظت حجمی نانو ذرات و وابستگی دمایی به

جدول ۱- خواص سیال پایه مورد استفاده در پژوهش حاضر

معادلات	ویژگی‌ها
$r = 4048 \times 10^{-3} T^2 + 999.9$	چگالی (kg/m^3)
$\mu_f = \exp(-1.6 - \frac{1150}{T} + (\frac{690}{T})^2) \times 10^{-3}$	لزجت (m^2/s)
$K_f = -8.01 \times 10^{-6} T^2 + 1.96 \times 10^{-3} + 0.563$	ضریب هدایت گرمایی ($W/m.K$)
$C_{pf} = 4.1855 \times 10^3 (0.966185 + 0.0002874 (\frac{T+100}{100})^{5.62} + (0.011160 \times 10^{-0.036}))$	ظرفیت گرمایی ویژه ($J/kg.K$)
T	دمای سیال (K)

جدول ۲- مدل‌های ریاضی استفاده شده برای به دست آوردن خواص فیزیکی گرمایی نانوسیال

منبع	معادلات	خاصیت
Kakaç & Pramuanjaroenkij (2009)	$r_{nf} = (1 - \phi)r_f + \phi r_s$	چگالی (kg/m ³)
Xuan & Roetzel (2000)	$K_{nf1} = k_f \frac{k_s + 2k_f - 2(k_s - k_f)\phi}{k_s + 2k_f + (k_s - k_f)\phi} + \left(\frac{r_s \phi C_{pc}}{2K_f}\right) \sqrt{\frac{2k_b T}{3\rho d_p m_f}}$	ضریب انتقال حرارت مدل (W/m.K) (۱)
Seyf & Nikaaein, (2012); Xuan et al. (2003)	$k_{nf, Al_2O_3} = k_{static} + k_{brownian}$ $k_{static} = k_f \frac{k_s + 2k_f - 2(k_s - k_f)f}{k_s + 2k_f + (k_s - k_f)f}$ $k_{brownian} = A_1 \sqrt{T(A_2 T + A_3)}$ $A_1 = 5 \times 10^4 b f r_f C_{pf} \sqrt{\frac{k_b}{d_p r_s}}$ $A_2 = \frac{-2.8217 \times 10^{-2} + 3.917 \times 10^{-3}}{273}$ $A_3 = 3.0669 \times 10^{-2} - 3.9112310^{-3}$ $b_{Al_2O_3} = 8.4407(100f)^{-1.073041\%}$	ضریب انتقال حرارتی مدل (W.mK) (۲)
Mishra et al. (2014)	$for \rightarrow f < 0.05, m_{nf} = (1 + 2.5f)m_f$ $for \rightarrow f < 0.05 < 0.1, m_{nf} = (1 + 2.5 + 6.5f^2)$	لزجت (m ² /s)
Kakaç & Pramuanjaroenkij (2009)	$C_{pnf} = \frac{(1-f)C_{pf} + f p_s C_{ps}}{r_{nf}}$	ظرفیت گرمای ویژه (J/kg.K)

مش‌بندی مدل

بعد از طراحی، هندسه مدل با استفاده از روش حجم محدود، مش‌بندی شد. برای صفحه جاذب با توجه به ضخامت آن از روش مش‌بندی سوئیپ، برای جریان سیال داخل لوله از روش پیچ سازگار برای تولید شبکه‌های سه وجهی و همچنین برای لوله از مش‌بندی چهار وجهی منظم برای بهینه کردن شبکه استفاده گردید. به منظور بررسی استقلال نتایج از مش، سه مش‌بندی با اندازه‌های مختلف با هم مقایسه شدند و نتایج آن در جدول ۴ آورده شده است.

با توجه به نتایج به دست آمده، مش‌بندی تأثیر قابل توجهی در نتایج عددی ندارد و فقط هزینه و زمان محاسبات را افزایش می‌دهد. بنابراین برای محاسبات، تعداد المان مناسب در شبکه‌بندی ۴۴۴۲۹۲ در نظر گرفته شد. پس از انجام مش‌بندی هندسه مدل وارد محیط نرم‌افزار (ANSYS Fluent (2019 R3) شد.

جدول ۳- خواص فیزیکی گرمایی نانو ذرات آلومینیوم اکسید (Al₂O₃)

مقدار	ویژگی‌ها
۳۹۷۰	چگالی (kg/m ³)
۴۰	ضریب انتقال حرارت (W/m.K)
۷۶۵	ظرفیت گرمایی ویژه (J/kgK)

شرح هندسه‌ی مدل

سامانه PV/T به منظور انجام تحلیل عددی به همراه هندسه آن در شکل ۲ نشان داده شده است. سامانه از یک مبدل خنک کننده لوله‌ای شکل از جنس فلز مس با ضریب هدایت حرارتی ۳۹۰ W/m²، طول و قطر به ترتیب ۱۲۰۰ و ۶/۳۳ میلی‌متر، یک صفحه جاذب مستطیلی از جنس مس با ضریب هدایت حرارتی ۳۹۰ W/m²، و ابعاد ۰/۳×۲۵۰×۳۴۵ میلی‌متر (طول×عرض×ضخامت) تشکیل شده است.

- سطح تماس بین سلول‌های ماژول PV خورشیدی و صفحه جذب‌کننده به‌طور کامل برقرار شده است.

مشخصات جریان سیال

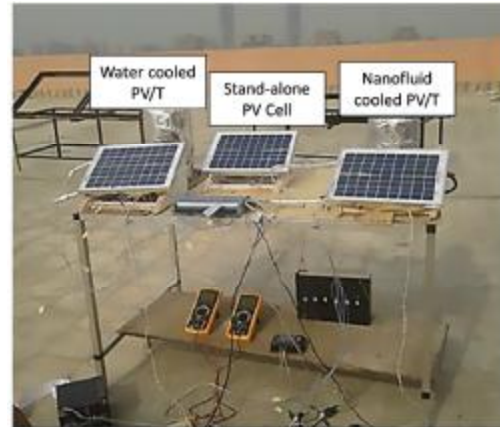
برای مشخص کردن آشفته یا آرام بودن جریان، یک سیال با جابه‌جایی اجباری از عدد بی‌بعد رینولدز^۱ و برای جابه‌جایی طبیعی از عدد بی‌بعد گراشوف^۲ استفاده می‌شود. همچنین از عدد بی‌بعد ریچاردسون^۳ برای مشخص نمودن اجباری، طبیعی و یا تلفیقی بودن جریان می‌توان استفاده کرد. در این پژوهش به دلیل پایین بودن سرعت سیال و غلبه نیروی لزجت به نیروی اینرسی جریان نوع آرام کاملاً توسعه یافته در نظر گرفته شد. شتاب گرانشی زمین یک متغیر بسیار مهم است که روی نیروی شناوری، جابه‌جایی سیال و در نتیجه نوع جریان تأثیرگذار است، این متغیر تابعی از شیب سلول‌های خورشیدی است.

شرایط مرزی

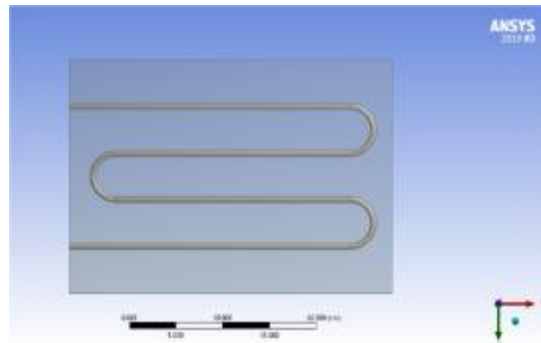
با توجه به اینکه در جریان ورودی $1/min$ ، $1/2$ نانوسیال بهترین عملکرد را نسبت به سایر دبی‌های حجمی داشت بنابراین در پژوهش حاضر برای ورودی لوله‌ها، شرط مرزی جریان ورودی با دبی ذکر شده و جریان خروجی برابر با فشار استاتیکی در نظر گرفته شد. همچنین برای شرط مرزی صفحه جاذب از شار گرمایی متناسب با ساعت تابش استفاده شده است.

معادلات حاکم و تنظیمات حلگر

مطالعه عددی برای یک نانو سیال از حل قوانین اصلی بقای جریان به دست می‌آید. روش حجم محدود در واقع نوعی از روش اجزاء محدود است که در آن معادلات عمومی بقا (بقای جرم، بقای اندازه حرکت و بقای انرژی) در شکل انتگرالی استفاده می‌شوند. محدوده حل به تعداد معینی حجم کنترل مجاور هم تقسیم شده و معادلات در آن محدوده حل می‌گردند. روش حل گر بر اساس فشار بوده که برای مدل جریان آرام در نظر گرفته شده و فشار با پارامتر سرعت به روش Simple کوپل شده است. به عنوان یک طرح درون‌یابی، روش بالا دست مرتبه‌ی دوم^۴



(الف)



(ب)

شکل ۲- الف) تصویر سامانه‌ی PV/T به همراه اجزای آن، ب) مبدل لوله‌ای شکل

جدول ۴- مقایسه‌ی نتایج مش‌بندی‌های مختلف

تعداد المان	دمای خروجی ($^{\circ}C$)	دمای صفحه ($^{\circ}C$)
۴۴۴۲۹۲	۱۳	۳۴
۷۵۵۲۹۶	۱۳/۲	۳۴/۱
۱۴۸۱۴۸۶	۱۳/۳	۳۴/۳

فرض‌های مسأله

بررسی‌ها نشان می‌دهند که اختلاف بین نتایج شبیه‌سازی جریان گذرا و پایا در حدود $0/2$ درصد بوده است (Aste et al., 2012). فرضیات این پژوهش به شرح زیر هستند:

- جریان در این مسأله از نوع جریان پایا، غیر قابل تراکم و یکنواخت است.
- آب و نانو سیال در تعادل گرمایی (هم دما) هستند و در این پژوهش از جریان تک فازی استفاده شده است.
- جریان آرام و کاملاً توسعه یافته است.
- دمای صفحه‌ی جذب‌کننده، دمای پشت و دمای سطح ماژول‌ها یکسان است.

1- Reynolds

2- Grashof

3- Richardson

4- The Second Order Upwind

تحلیل اکسرژی

قانون اول ترمودینامیک فقط کمیت انرژی را تعیین می‌کند و اطلاعاتی در مورد کیفیت انرژی در اختیار قرار نمی‌دهد. زمانی که درجه حرارت تغییر می‌کند، اکسرژی تخریب می‌شود. این تخریب به دلیل افزایش انترپنی سامانه نسبت به محیط است (Xuan *et al.*, 2003). به مقدار اکسرژی برگشت‌ناپذیری و تلف شده، اکسرژی تخریب شده می‌گویند. در این پژوهش اکسرژی تخریب شده از اختلاف مقدار اکسرژی تابش خورشیدی با مجموع اکسرژی گرمایی و الکتریکی محاسبه شد (معادله (۱۲)). بنابراین برای تحلیل اکسرژی و تعیین تلفات اکسرژی، قانون دوم ترمودینامیک به کار گرفته شد. قانون دوم ترمودینامیک برای تحلیل اکسرژی و تعیین تلفات اکسرژی به کار گرفته می‌شود. اکسرژی طبق تعریف، عبارت است از بیش‌ترین مقدار کار قابل حصول از یک جریان سیال یا منبع انرژی، موقعی که از یک حالت معین به تعادل با محیط برسد (Dincer, 2002). تعادل اکسرژی در یک سامانه در معادله (۱۰) بیان شده است (Khanjari *et al.*, 2016):

که در این معادله $\dot{E}x_{fluid,in}$ و $\dot{E}x_{fluid,out}$ به ترتیب مقدار اکسرژی سیال ورودی و خروجی، $\dot{E}x_{solar}$ مقدار اکسرژی تابش خورشید، $\dot{E}x_{electrical}$ مقدار اکسرژی الکتریکی و $\dot{E}x_{destroyed}$ مقدار اکسرژی تلف شده را نشان می‌دهند. این معادله را می‌توان به شکل معادله (۱۱) نوشت:

$$\dot{E}x_{destroyed} = \dot{E}x_{solar} - [\dot{E}x_{electrical} + (\dot{E}x_{fluid,out} - \dot{E}x_{fluid,in})] \quad (11)$$

عبارت داخل پرانتز معادله (۱۱) برابر است با مقدار اکسرژی حرارتی، بنابراین تعادل اکسرژی را می‌توان به صورت معادله (۱۲) نوشت.

$$\dot{E}x_{destroyed} = \dot{E}x_{solar} - [\dot{E}x_{electrical} + (\dot{E}x_{thermal})] \quad (12)$$

معادله داخل کروشه معادله (۱۲) را می‌توان به عنوان بهره مفید اکسرژی نام‌گذاری کرد. در نهایت می‌توان بازده قانون دوم ترمودینامیک را به شکل زیر بدست آورد:

$$h_{11} = \frac{\dot{E}x_{useful.gain}}{\dot{E}x_{solar}} \quad (13)$$

معادله (۱۴) با افزایش اکسرژی سیال به دلیل افزایش دما از ورودی به خروجی مرتبط است.

برای شرایط انتقال حرارت جابه‌جایی و رسانایی انتخاب شده است. مقدار باقیمانده معادلات سرعت، پیوستگی و انرژی در عدد $1e^{-6}$ توسط حل‌گر همگرا می‌شوند. معادلات سه بعدی بقای جرم، مومنتوم و انرژی در جریان پایا به ترتیب به صورت معادلات (۱) الی (۳) قابل بیان هستند (Khanjari *et al.*, 2016).

$$\nabla(\mathbf{r}_{nf} U_{nf}) = 0 \quad (1)$$

$$\nabla(\mathbf{r}_{nf} U_{nf} U_{nf}) = 0 - \nabla P + \nabla \mathbf{r} + \mathbf{r}_{nf} \mathbf{g} \quad (2)$$

$$\nabla(\mathbf{r}_{nf} U_{nf} C_{nf} T) = \nabla(K_{nf} \nabla T) \quad (3)$$

در این معادلات ρ_{nf} چگالی نانو سیال (kg/m^3)، U_{nf} سرعت نانو سیال (m/s)، C_{pnf} ظرفیت گرمای ویژه نانو سیال ($J/kg.K$)، ΔP گرادیان فشار (Pa)، $\Delta \rho$ انتقال پذیری، T تغییرات دما (K)، K ضریب هدایت حرارتی ($W/m.K$) و g شتاب گرانشی (m/s^2) هستند.

تحلیل انرژی

با استفاده از قانون اول ترمودینامیک می‌توان مقدار انرژی به دست آمده از سلول‌های خورشیدی و نسبت انرژی‌های به کار گرفته شده را تخمین زد. بازده حرارتی و الکتریکی سامانه با استفاده از معادلات زیر محاسبه شدند (Khanjari *et al.*, 2016):

$$Q = \dot{m}_{fluid} \times C_{pfluid} (T_{out} - T_{in}) \quad (4)$$

$$P_{in} = G_T \times A \quad (5)$$

$$P_{max} = V_{mpp} I_{mpp} \quad (6)$$

$$h_{th} = \frac{\dot{m}_{fluid} \times C_{pfluid} (T_{out} - T_{in})}{G_T \times A_p} \quad (7)$$

$$h_{electrical} = \frac{P_{max}}{P_{in}} \quad (8)$$

$$h_{total} = h_{electrical} + h_{th} \quad (9)$$

$$\dot{E}x_{fluid,in} + \dot{E}x_{solar} = \dot{E}x_{fluid,out} + \dot{E}x_{electrical} + \dot{E}x_{destroyed} \quad (10)$$

در معادلات ذکر شده، Q میزان گرمای انتقال داده شده در P_{in} مقدار توان تولیدی توسط سلول‌های خورشیدی (W)، η_{th} بازده حرارتی (%)، η_I بازده الکتریکی (%)، \dot{m} نرخ جریان جرمی (kg/s)، P توان (W)، V ولتاژ (V)، I جریان (A)، A_p مساحت صفحه جاذب (m^2) و G_T مقدار تابش خورشید (W/m^2) است.

$$h_{11} = \frac{1}{\left[1 - \frac{4T_0}{3T_{sun}} + \frac{1}{3} \left(\frac{T_0}{T_{sun}}\right)^4\right]} \left[h_{thermal} \left(1 - \frac{T_0}{T_m}\right) + h_{pv} \times P \right] \quad (19)$$

معادله (16) استفاده دیگری از عامل کارنو $\left(1 - \frac{T_0}{T_m}\right)$ را به عنوان اکسرژی انرژی گرمایی تأیید می‌کند (Evola & Marletta, 2014).

نتایج و بحث

تغییرات نرخ جریان ورودی

نرخ جریان ورودی یکی از پارامترهای اساسی در مدل‌سازی سامانه‌های PV/T است. در جریان‌هایی که چرخه یک سیال با جابه‌جایی طبیعی اتفاق می‌افتد ضریب انتقال حرارت و بازده انرژی به طور موثری به نرخ جریان ورودی وابسته هستند. در پژوهش حاضر از سه نرخ جریان ورودی مختلف 1/min، 0.6/min و 0.9/min استفاده شده است. عملکرد این نرخ جریان‌های مختلف مقایسه شده و با توجه به نتایج به دست آمده نرخ جریان 1/min به عنوان نرخ جریان بهینه برای خنک کردن سامانه مورد نظر انتخاب شده است (شکل ۳). در شکل ۴ و جدول ۵ دبی‌های حجمی مختلف و تأثیر آنها بر کاهش دمای سلول‌های خورشیدی نشان داده شده‌اند.

$$\dot{E}_{x_{thermal}} = \dot{m}_{fluid} \times C_{pfluid} \left[(T_{out} - T_{in}) - T_0 \ln \frac{T_{out}}{T_{in}} \right] \quad (14)$$

معادله (14) را می‌توان به صورت زیر نهایی کرد:

$$T_m = \frac{T_{out} - T_{in}}{\ln \frac{out}{in}} \quad (15)$$

$$\dot{E}_{x_{thermal}} = \dot{m}_{fluid} \times C_{pfluid} \left[(T_{out} - T_{in}) - \left(1 - \frac{T_0}{T_m}\right) \right] \quad (16)$$

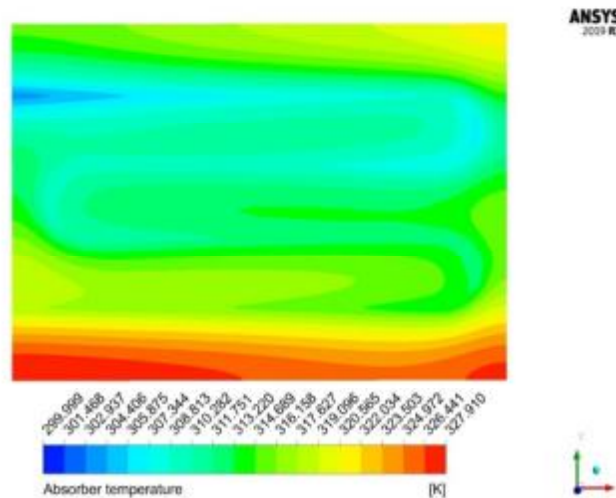
اکسرژی تابش خورشید را می‌توان از معادله (17) محاسبه نمود:

$$\dot{E}_{x_{solar}} = G_t \times A_p \left[\left(1 - \frac{4T_0}{3T_{sun}} + \frac{1}{3} \left(\frac{T_0}{T_{sun}}\right)^4\right) \right] \quad (17)$$

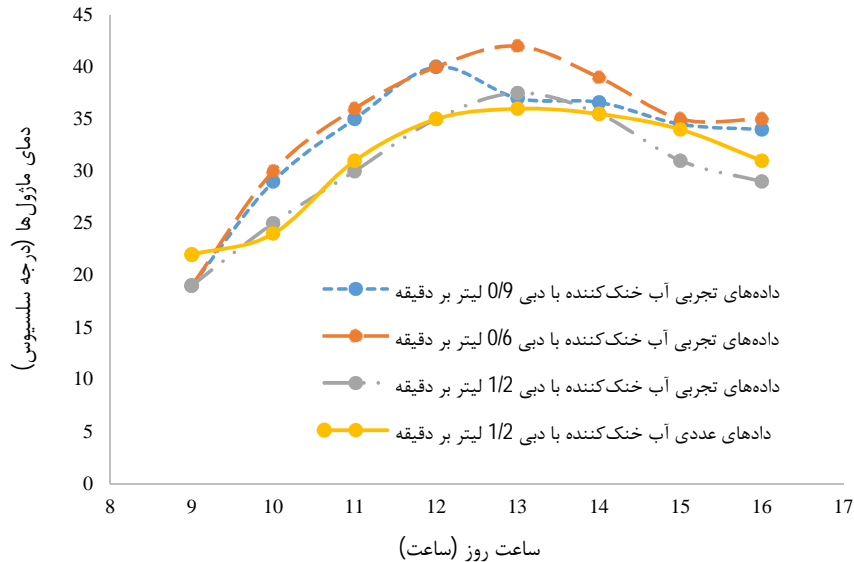
در این معادله T_{sun} دمای خورشید (K)، G_t مقدار تابش خورشیدی (W/m^2)، T_0 دمای محیط (K) و A_p مساحت سطح پنل خورشیدی (m^2) است. انرژی الکتریکی تولید شده توسط پنل‌های خورشیدی برابر با اکسرژی الکتریکی است. زیرا انرژی خالصی است که می‌تواند به‌طور کامل مورد استفاده قرار بگیرد. معادله اکسرژی الکتریکی در زیر ارائه شده است:

$$\dot{E}_{x_{electrical}} = h_{pv} G_t A_{pv} \quad (18)$$

در نتیجه بازده قانون دوم ترمودینامیک را می‌توان توسط معادله (19) نوشت:



شکل ۳- کانتور دمای صفحه خنک شده در دبی جریان 1/min در ساعت ۱۲ ظهر



شکل ۴- تغییرات دمای ماژول‌های PV در ساعت روز با دبی‌های جریان مختلف (0.9، 0.6، 1.2 و 1.2)

جدول ۵- کاهش دمای ماژول PV در دبی‌های حجمی مختلف (0.9، 0.6، 1.2) و مقایسه نتایج عددی و تجربی

اختلاف (%)	نتایج تجربی		نتایج عددی		شرایط آزمایش	
	کاهش دمای ماژول‌ها (%)	کاهش دمای ماژول‌ها (%)	کاهش دمای ماژول‌ها (%)	تابش خورشید (W/m ²)	نرخ جریان نانوسیال (l/min)	تابش خورشید (W/m ²)
1/2	61.0	5/1	5/2	5/2	1/4	5/2
1/2	96.0	6/5	7	7	7/1	7

با توجه به نتایج شکل ۴ و جدول ۵ می‌توان بیان کرد که با افزایش نرخ جریان ورودی دمای ماژول‌های PV کاهش می‌یابد، به طوری که بیشترین کاهش دما در میانگین تابش روز (610 W/m²) و در بیشینه تابش (960 W/m²) به اندازه‌ی 7 °C بوده است. همچنین نتایج عددی در دبی حجمی 1.2 l/min با نتایج تجربی مطابقت داشتند.

این پدیده ناشی از افزایش نرخ انتقال حرارت قابل توجه به دلیل افزودن نانوذرات به سیال پایه است. همچنین افزایش غلظت نانو ذرات در نانو سیال، لزجت و ضخامت لایه مرزی را افزایش داده در نتیجه عدد رینولدز و ظرفیت گرمایی ویژه سیال را کاهش می‌دهد. در حالی که میزان کاهش دما در تیمار شاهد در متوسط تابش خورشید و بیشترین مقدار تابش به ترتیب 5/2 و 7 درجه سلسیوس گزارش شدند. در پژوهشی دیگر اثر نانو سیال کربن به صورت تجربی بر عملکرد سامانه فتوولتائیک طی مدت 4/5 ساعت در روز بررسی و نتایج مشابهی در مورد خواص نانوسیال‌ها گزارش شد (Firoozzadeh et al., 2018).

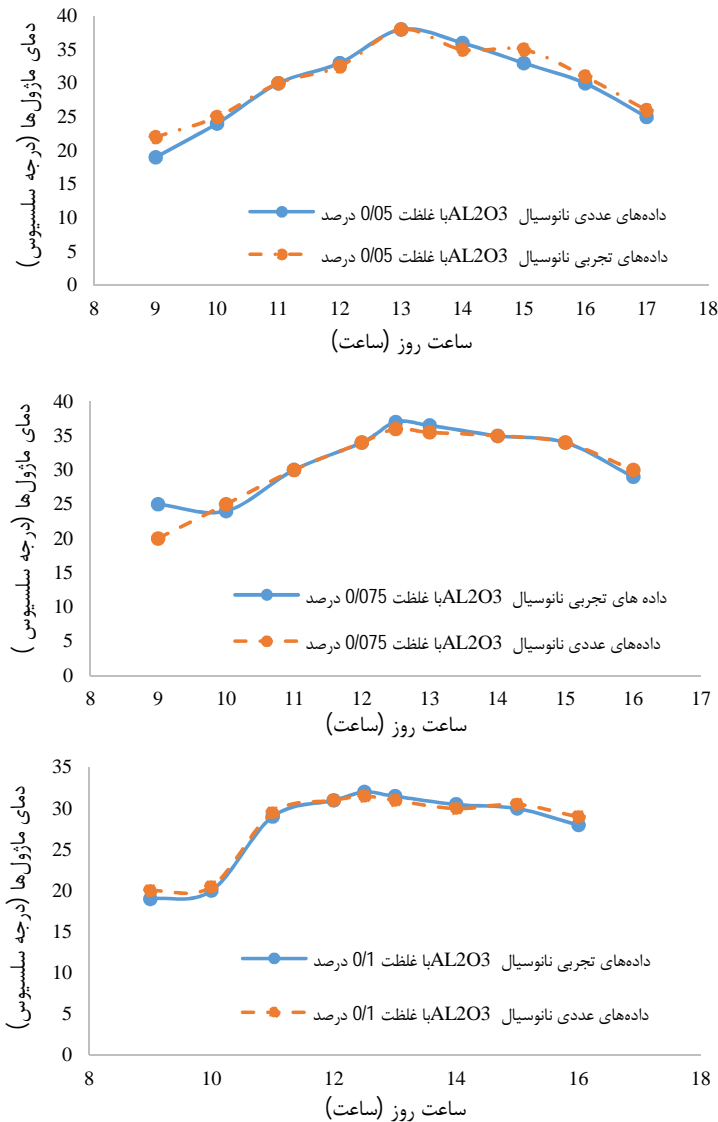
نتایج پژوهش‌های متعدد بیانگر این است که در غلظت‌های پایین نانو ذرات، هدایت گرمایی می‌تواند تا بیشتر از 20 درصد افزایش یابد (Xuan & Roetzel, 2000). این افزایش بیشتر بستگی به عواملی مانند شکل ذرات، درصد حجمی ذرات در محلول و ویژگی‌های حرارتی نانو ذرات و سیال پایه دارد.

با توجه به نتایج شکل ۴ و جدول ۵ می‌توان بیان کرد که با افزایش نرخ جریان ورودی دمای ماژول‌های PV کاهش می‌یابد، به طوری که بیشترین کاهش دما در میانگین تابش روز (610 W/m²) و در بیشینه تابش (960 W/m²) به اندازه‌ی 7 °C بوده است. همچنین نتایج عددی در دبی حجمی 1.2 l/min با نتایج تجربی مطابقت داشتند.

اثر افزودن نانو ذرات به سیال پایه در عملکرد خنک

کردن سامانه‌ی PV/T

اثر افزودن نانوذرات در دبی حجمی 1.2 l/min و غلظت‌های حجمی مختلف (0.10، 0.07 و 0.05 درصد) به منظور خنک‌کاری سامانه به صورت تجربی و عددی در شکل ۵ و جدول ۶ آورده شده‌اند. با توجه به نتایج بررسی تجربی و عددی می‌توان نتیجه گرفت که بیشترین کاهش دمای ماژول در غلظت آلومینیوم اکسید (0.10 درصد) برای بررسی تجربی با مقادیر 10 °C و 8/6 °C و برای بررسی عددی 9 °C و 8/2 °C به ترتیب در بیشترین میزان تابش



شکل ۵- اثر نانوسیال Al_2O_3 در غلظت (۰/۰۵)، (۰/۰۷۵) و (۰/۱۰) بر دمای مازول‌های خورشیدی

بازده الکتریکی سامانه PV/T

برای بدست آوردن بازده الکتریکی سامانه PV/T از معادله (۸) استفاده شده است. با توجه به اثرات دبی‌های حجمی مختلف و غلظت‌های مختلف نانوسیال روی خنک‌کاری سامانه، بهینه‌ترین حالت دبی حجمی ($1/2$ l/min) و غلظت نانوسیال آلومینیوم اکسید (۰/۱۰ درصد حجمی) انتخاب و به عنوان پارامتر ورودی برای به دست آوردن بازده الکتریکی و حرارتی به صورت عددی و تجربی مورد استفاده قرار گرفت. حداکثر بهبود بازده الکتریکی به طور متوسط در طول روز با تابش (610 W/m^2) در بررسی عددی و تجربی به ترتیب

۲۴/۶ و ۲۵/۱ درصد، همچنین در بیشترین مقدار تابش (960 W/m^2) به ترتیب ۲۶/۳ و ۲۷/۹ درصد مشاهده شد (جدول ۷). شکل ۶ اثر نانوسیال Al_2O_3 در غلظت ۰/۱۰ درصد بر بازده الکتریکی سامانه PV/T به صورت تجربی و عددی و مقایسه آن با تیمار شاهد را نشان می‌دهد. در تیمار شاهد خنک‌کننده به کار گرفته نشده و در بیشینه مقدار زاویه و تابش خورشید به دلیل افزایش دمای سلول، بازده الکتریکی به کمترین مقدار خود می‌رسد. روند تغییرات بازده الکتریکی با گزارش‌های صورت گرفته توسط دیگر محققین که به صورت عددی و تجربی با استفاده از نانوسیال‌های مختلف (آلومینیوم اکسید، تیتانیوم دی

2018; Jia *et al.*, 2020; Sardarabadi & Passandideh-Fard, 2016; Shahad *et al.*, 2021)

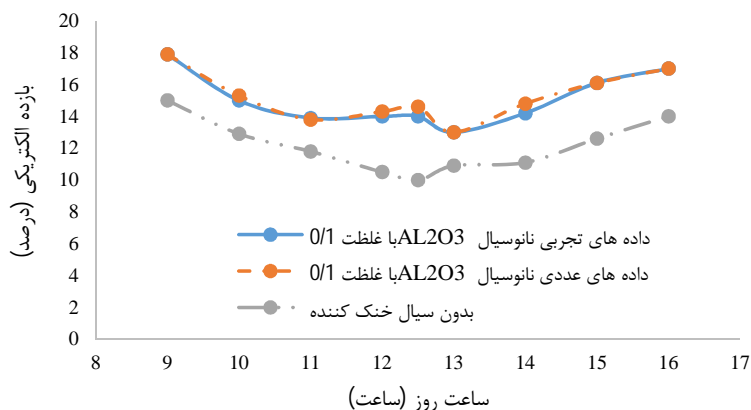
اکسید و اکسید روی) بر روی بازده الکتریکی سامانه PV/T انجام دادند مطابقت داشت (Aberoumand *et al.*,

جدول ۶- کاهش دمای مازول PV در غلظت‌های مختلف نانو سیال آلومینیوم اکسید به صورت تجربی و عددی

اختلاف (%)	نتایج عددی		شرایط آزمایش	
	کاهش دمای مازول‌ها (°C)	کاهش دمای مازول‌ها (°C)	تابش خورشید (W/m ²)	غلظت نانوسیال (%)
۹/۵	۶/۱	۶/۷	۶۱۰	۰/۰۵
۱۶/۷	۷/۲	۶/۰	۹۶۰	۰/۰۵
۳/۶	۶/۴	۶/۲	۶۱۰	۰/۰۷۵
۱۸/۷	۸/۰	۶/۵	۹۶۰	۰/۰۷۵
۴/۰۷	۸/۶	۸/۲	۶۱۰	۰/۱
۱۰	۱۰	۹	۹۶۰	۰/۱

جدول ۷- مقادیر بازده الکتریکی در نانوسیال آلومینیوم اکسید با غلظت ۰/۱ درصد به صورت تجربی و عددی

اختلاف (%)	نتایج عددی		شرایط آزمایش	
	بازده الکتریکی (%)	بازده الکتریکی (%)	تابش خورشید (W/m ²)	غلظت نانوسیال (%)
۲/۰۳	۲۴/۶	۲۵/۱	۶۱۰	۰/۱
۶/۰۸	۲۶/۳	۲۷/۹	۹۶۰	۰/۱



شکل ۶- بازده الکتریکی سامانه PV/T در غلظت حجمی ۰/۱ درصد Al₂O₃

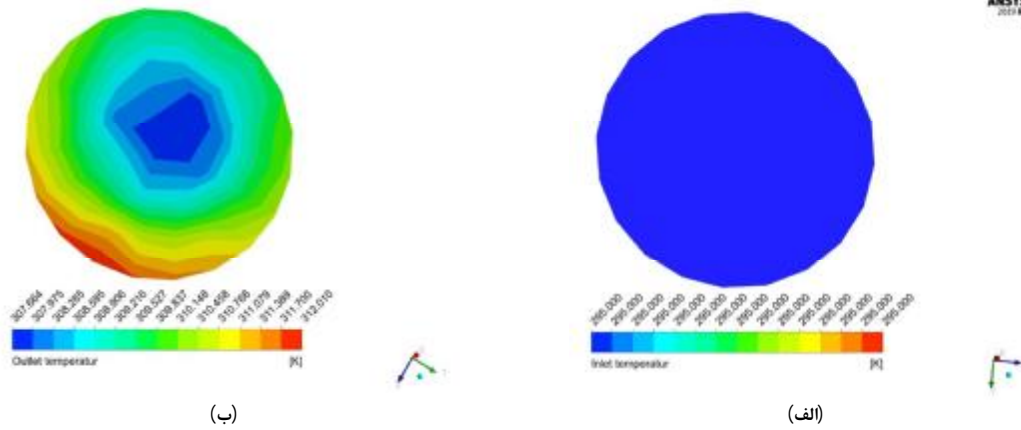
ورودی و خروجی است. با توجه به شکل ۷ سیال ورودی و خروجی اختلاف دمایی در حدود ۱۲ الی ۱۸ درجه سلسیوس دارند. در شکل ۸ تفاوت دمای سیال ورودی و خروجی در ساعات مختلف روز به صورت عددی و تجربی به همراه نمودار بازده حرارتی نشان داده شده است. مقدار بازده حرارتی سامانه تابع اختلاف دمای ورودی و خروجی سیال مبدل حرارتی است که این مقدار در ساعات مختلف روز با توجه به اختلاف دما در محدوده ۳۶-۵۳ درصد متغیر است. همان طور که در شکل نشان داده شده است. بیشترین اختلاف دما در ساعت ۱۲:۳۰ رخ داده است. بنابراین بیشترین بازده حرارتی در این بازه زمانی با مقدار

بازده حرارتی

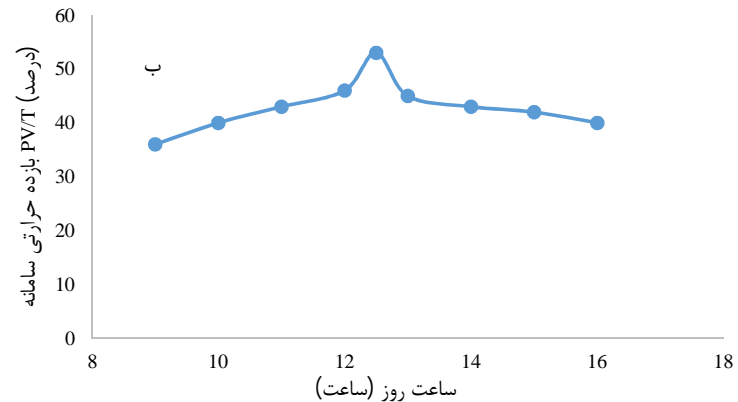
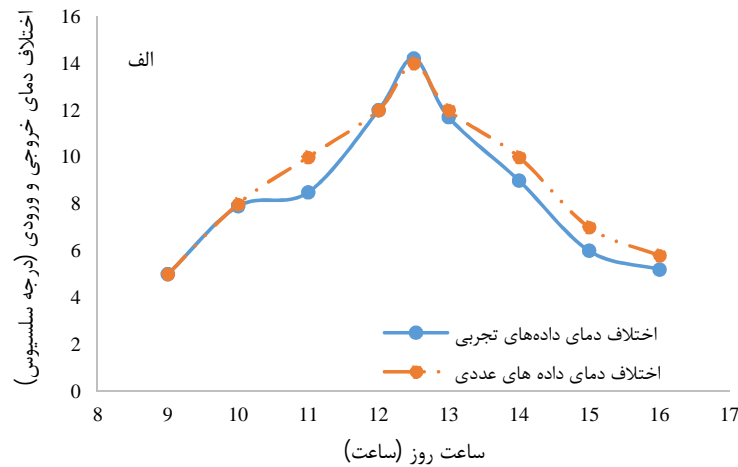
برای بدست آوردن بازده حرارتی سامانه PV/T از معادله (۷) استفاده شد. بازده حرارتی به چهار عامل دبی جریان، میزان تابش خورشید، اختلاف دمای خروجی و ورودی سیال و ظرفیت گرمایی ویژه بستگی دارد (Khoshvaght- Aliabadi *et al.*, 2018). در صورت ثابت بودن مقدار تابش، دبی جریان و ظرفیت گرمایی، بازده حرارتی تنها به اختلاف دمای ورودی و خروجی بستگی دارد. در شکل ۷ کانتور دمایی سیال ورودی و خروجی در نقطه بهینه سامانه و بیشینه شرایط تابشی نشان داده شده است. در این شرایط بازده حرارتی فقط تابع اختلاف دمای سیال

نشان داد که افزودن نانو ذرات در غلظت و شدت تابش‌های مختلف منجر به افزایش بازده حرارتی در محدوده ۶۵ تا ۷۴ درصد می‌گردد (Ghadiri *et al.*, 2015).

۵۳ درصد مشاهده شده است. در پژوهشی مشابه اثر نانوذرات مغناطیسی در غلظت‌های حجمی مختلف (۱ و ۳ درصد) و دو شدت تابش ۶۰۰ و ۱۱۰۰ W/m^2 بر عملکرد سامانه فوتوولتاییک حرارتی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج



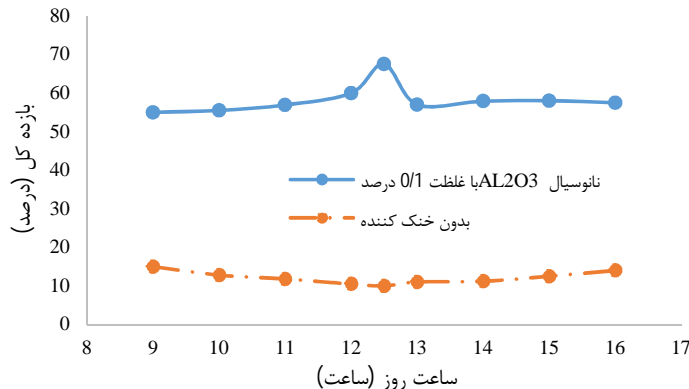
شکل ۷- الف) کانتور دمای ورودی مبدل خنک کننده‌ی سامانه PV/T در غلظت (۰/۱) درصد نانوسیال Al_2O_3 ، ب) کانتور دمای خروجی مبدل PV/T در غلظت (۰/۱) درصد نانوسیال Al_2O_3



شکل ۸- الف) اختلاف دمای سیال ورودی و خروجی در مبدل PV/T، ب) بازده حرارتی سامانه‌ی PV/T

۱/۲ اتفاق می‌افتد که در بیشترین میزان تابش (960 W/m^2) و متوسط روز (610 W/m^2) مقادیر بازده سامانه به ترتیب $67/5$ و $59/43$ درصد هستند (شکل ۹).

بازده کل سامانه PV/T مجموع بازده الکتریکی و بازده حرارتی است (معادله (۹)). با توجه به توضیحاتی که قبلاً اشاره شد می‌توان نتیجه گرفت که بیشترین بازده حرارتی سامانه در غلظت $0/10$ درصد حجمی و دبی جریان $1/\text{min}$

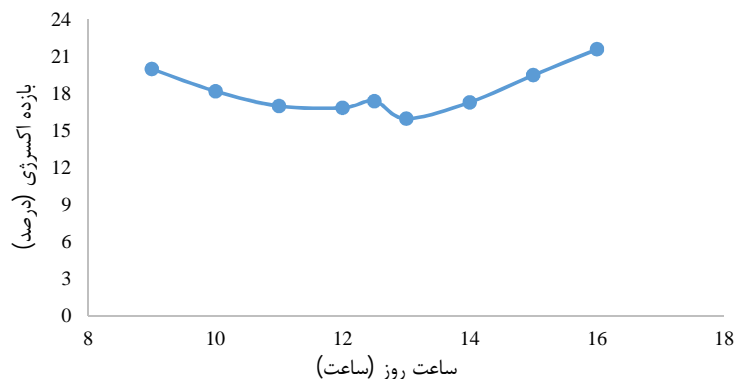


شکل ۹- بازدهی کل سامانه PV/T در ساعات مختلف روز

بعد از ظهر (ساعت ۱۶) با مقادیر 20 و $21/6$ درصد و کمترین مقدار آن در فاصله زمانی ظهر (ساعت ۱۲ و ۱۳) با مقادیر $16/86$ و $15/97$ درصد مشاهده شد. علت پایین بودن بازده اکسرژی در این بازه زمانی به دلیل تخریب اکسرژی و افزایش تلفات است. در تحقیقی دیگر، اثر نانوسیال نقره بر عملکرد ترمودینامیکی سامانه فتوولتائیک حرارتی بررسی و نتایج مشابهی در این راستا گزارش شد (Aberoumand *et al.*, 2018).

تحلیل اکسرژی سامانه PV/T

تغییرات بازده اکسرژی در ساعات مختلف روز در شکل ۱۰ نشان داده شده‌اند. با توجه به این واقعیت که کیفیت انرژی الکتریکی بیشتر از انرژی حرارتی است، بازده الکتریکی نقش مهمی در بازده اکسرژی سامانه ایفا می‌کند. بنابراین رفتار بازده اکسرژی خیلی شبیه بازده الکتریکی است (Aberoumand *et al.*, 2018). بیشترین مقدار بازده اکسرژی در فاصله زمانی صبح (ساعت ۹) و

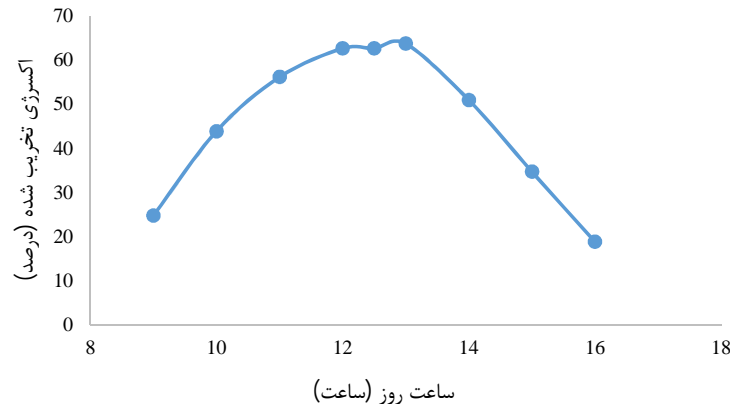


شکل ۱۰- بازدهی اکسرژی سامانه PV/T در ساعات مختلف روز

زمانی ساعت ۱۲ تا ۱۳ با مقدار $63/7$ - $62/7$ مشاهده شد. بنابراین طبق نتایج به دست آمده، بیشترین تلفات و برگشت‌ناپذیری مربوط به ساعاتی است که بیشترین تابش خورشید رخ داده است.

اکسرژی تخریب شده سامانه PV/T

اکسرژی تخریب شده سامانه PV/T در شکل ۱۱ نشان داده شده است. کمترین اکسرژی تخریب شده در ساعت ابتدایی صبح و بعد از ظهر با مقدار $24/76$ و $18/82$ مشاهده شد. همچنین بیشترین تلفات اکسرژی در فاصله



شکل ۱۱- اکسرژی تخریب شده سامانه PV/T در ساعات مختلف روز

۰/۱۰ درصد بوده است. در این غلظت بیشترین بازده الکتریکی در ساعت ۹ صبح با مقادیر ۱۸ درصد و بیشترین بازده حرارتی با مقادیر ۵۸ درصد مربوط به ساعت ۱۲:۳۰ ظهر بوده است. از طرفی دیگر، بیشترین بازده اکسرژی مربوط به اکسرژی الکتریکی است که در فاصله زمانی ۹ صبح و ۴ بعدازظهر به ترتیب با مقادیر ۲۰ و ۲۱/۶ درصد به دست آمدند. از دیگر نتایج پژوهش، بیشترین تخریب اکسرژی در بالاترین مقدار تابش خورشید (960 W/m^2) با مقادیر ۶۳/۷۸ درصد مشاهده شد که دلیلی برای پایین بودن اکسرژی در این نقطه است. همچنین داده‌های تجربی برای اعتبارسنجی نتایج مدل‌های عددی سامانه PV/T به کار گرفته شد، که هدف از این کار استفاده از مدل‌های عددی معتبر برای بررسی‌های بعدی بود. لذا به منظور درک بهتر از فیزیک مسئله، بهینه‌کردن طراحی سامانه و همچنین کاهش هزینه‌ها، بکارگیری روش‌های عددی در کنار روش‌های تجربی فرآیندی کارآمد خواهد بود.

منابع

- Aberoumand, S., Ghamari, S., & Shabani, B. (2018). Energy and exergy analysis of a photovoltaic thermal (PV/T) system using nanofluids: An experimental study. *Solar Energy*, 165: 167-177.
- Al-Karaghoul, A., & Kazmerski, L. L. (2013). Energy consumption and water production cost of conventional and renewable-energy-powered desalination processes. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 24: 343-356.
- Ambreen, T., & Kim, M. H. (2020). Influence of particle size on the effective thermal

بازده کلی سامانه PV/T

با مقایسه بازده الکتریکی و بازده اکسرژی می‌توان نتیجه گرفت که در سامانه PV/T، کمیت مطلوب و با کیفیت بالا انرژی الکتریکی است و در مقابل و با توجه به پایین بودن اختلاف دمای خروجی و ورودی سیال در مبدل حرارتی می‌توان نتیجه گرفت که انرژی حرارتی در این سامانه از کیفیت پایینی برخوردار است. لذا به منظور دستیابی به بیشترین بازده انرژی و اکسرژی و مقادیر بهینه هر یک از پارامترها، طراحی و شبیه‌سازی سامانه‌های PV/T امری ضروری است.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش بررسی عددی تأثیر نانوسیال آلومینیوم اکسید با سیال پایه‌ی آب در سه دبی ورودی 0.6 l/min ، 0.9 و 1.2 و سه غلظت حجمی نانوسیال 0.05 ، 0.07 و 0.10 درصد به منظور بررسی بازده الکتریکی، بازده حرارتی و بازده اکسرژی سامانه PV/T و مقایسه آن با نتایج تجربی انجام شد. نتایج پژوهش نشان دادند که از بین سه نرخ جریان ورودی مختلف، نرخ جریان 1.2 لیتر بر دقیقه به دلیل بیشینه نرخ انتقال حرارت دبی بهینه است، به طوری که بیشترین میزان خنک‌کنندگی سامانه در میانگین تابش روز (610 W/m^2) با مقدار $5/12$ درجه سلسیوس و در بیشینه تابش روز (960 W/m^2) $6/5$ درجه سلسیوس بوده است. همچنین، افزایش غلظت حجمی نانو سیال آلومینیوم اکسید سبب افزایش مقدار ضریب انتقال حرارت، بازده الکتریکی و بازده حرارتی سامانه شد و نتایج نشان داد که بیشترین افزایش مربوط به غلظت حجمی

- photovoltaic solar energy conversion systems. *Journal of Cleaner Production*, 278: 124285.
- Gorjian, S., Singh, R., Shukla, A., & Mazhar, A. R. (2020). On-farm applications of solar PV systems. In S. Gorjian & A. Shukla (Eds.), *Photovoltaic Solar Energy Conversion* (pp. 147–190). Elsevier.
- Gorjian, S., Zadeh, B. N., Eltrop, L., Shamshiri, R. R., & Amanlou, Y. (2019). Solar photovoltaic power generation in Iran: Development, policies, and barriers. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 106: 110-123.
- Jalili Jamshidian, F., Gorjian, S., & Far, M. S. (2018). An Overview of Solar Thermal Power Generation Systems. *Solar Energy Research*, 3(October), 301-312.
- Jia, Y., Ran, F., Zhu, C., & Fang, G. (2020). Numerical analysis of photovoltaic-thermal collector using nanofluid as a coolant. *Solar Energy*, 196: 625-636.
- Kakaç, S., & Pramuanjaroenkij, A. (2009). Review of convective heat transfer enhancement with nanofluids. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 52(13-14), 3187-3196.
- Khanjari, Y., Pourfayaz, F., & Kasaeian, A. B. (2016). Numerical investigation on using of nanofluid in a water-cooled photovoltaic thermal system. *Energy Conversion and Management*, 122: 263–278.
- Khoshvaght-Aliabadi, M., Khaligh, S. F., & Tavassoli, Z. (2018). An investigation of heat transfer in heat exchange devices with spirally-coiled twisted-ducts using nanofluid. *Applied Thermal Engineering*, 143: 358-375.
- Maddah, H., Rezazadeh, M., Maghsoudi, M., & NasiriKokhdan, S. (2013). The effect of silver and aluminum oxide nanoparticles on thermophysical properties of nanofluids. *Journal of Nanostructure in Chemistry*, 3(1): 28.
- Mishra, P. C., Mukherjee, S., Nayak, S. K., & Panda, A. (2014). A brief review on viscosity of nanofluids. *International Nano Letters*, 4(4): 109-120.
- Nojavan, S., Zare, K., & Mohammadi-Ivatloo, B. (2017). Application of fuel cell and electrolyzer as hydrogen energy storage system in energy management of electricity energy retailer in the presence of the renewable energy sources and plug-in electric vehicles. *Energy Conversion and Management*, 136: 404–417.
- Renewable energy generation, World.* (2021). <https://ourworldindata.org/grapher/modern-renewable-energy-consumption?time=earliest..2016>
- conductivity of nanofluids: A critical review. *Applied Energy*, 264: 114684.
- Aste, N., Del Pero, C., & Leonforte, F. (2012). Thermal-electrical Optimization of the Configuration a Liquid PVT Collector. *Energy Procedia*, 30: 1–7.
- Bahaidarah, H., Subhan, A., Gandhidasan, P., & Rehman, S. (2013). Performance evaluation of a PV (photovoltaic) module by back surface water cooling for hot climatic conditions. *Energy*, 59: 445-453.
- Ceylan, İ., Gürel, A. E., Demircan, H., & Aksu, B. (2014). Cooling of a photovoltaic module with temperature controlled solar collector. *Energy and Buildings*, 72: 96-101.
- Elsaid, K., Olabi, A. G., Wilberforce, T., Abdelkareem, M. A., & Sayed, E. T. (2021). Environmental impacts of nanofluids: A review. *Science of The Total Environment*, 763: 144202.
- Evola, G., & Marletta, L. (2014). Exergy and thermoeconomic optimization of a water-cooled glazed hybrid photovoltaic/thermal (PVT) collector. *Solar Energy*, 107: 12–25.
- Faizal, M., Saidur, R., Mekhilef, S., & Alim, M. A. (2013). Energy, economic and environmental analysis of metal oxides nanofluid for flat-plate solar collector. *Energy Conversion and Management*, 76: 162-168.
- Firoozzadeh, M., Shiravi, A. H., & Shafiee, M. (2018). Experimental Study on Photovoltaic Cooling System Integrated with Carbon Nano Fluid. *Journal of Solar Energy Research (JSER)*, 3(4): 287–292.
- Ghadiri, M., Sardarabadi, M., Pasandideh-fard, M., & Moghadam, A. J. (2015). Experimental investigation of a PVT system performance using nano ferrofluids. *Energy Conversion and Management*, 103: 468-476.
- Gorjian, S., Ebadi, H., Calise, F., Shukla, A., & Ingraio, C. (2020). A review on recent advancements in performance enhancement techniques for low-temperature solar collectors. *Energy Conversion and Management*, 222: 113246.
- Gorjian, S., Ebadi, H., Najafi, G., Singh Chandel, S., & Yildizhan, H. (2021). Recent advances in net-zero energy greenhouses and adapted thermal energy storage systems. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 43: 100940.
- Gorjian, S., & Ghobadian, B. (2015). Solar desalination: A sustainable solution to water crisis in Iran. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 48: 571-584.
- Gorjian, S., Sharon, H., Ebadi, H., Kant, K., Scavo, F. B., & Tina, G. M. (2021). Recent technical advancements, economics and environmental impacts of floating

- Salavati Meibodi, S., Kianifar, A., Niazmand, H., Mahian, O., & Wongwises, S. (2015). Experimental investigation on the thermal efficiency and performance characteristics of a flat plate solar collector using SiO_2/EG -water nanofluids. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 65: 71-75.
- Sardarabadi, M., & Passandideh-Fard, M. (2016). Experimental and numerical study of metal-oxides/water nanofluids as coolant in photovoltaic thermal systems (PVT). *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 157: 533-542.
- Seyf, H. R., & Nikaein, B. (2012). Analysis of Brownian motion and particle size effects on the thermal behavior and cooling performance of microchannel heat sinks. *International Journal of Thermal Sciences*, 58, 36-44.
- Shahad, H. A., Abbood, M. H., & Ali, A. A. (2021). Investigating the impact of using nano-fluid as a cooling medium on photovoltaic/thermal panel system performance. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1067(1): 012118.
- Shakouri, M., Ebadi, H., & Gorjian, S. (2020). Solar photovoltaic thermal (PVT) module technologies. In S. Gorjian & A. Shukla (Eds.), *Photovoltaic Solar Energy Conversion* (1st ed., pp. 79-116). Elsevier.
- Upadhyay, S., Sarkar, J., & Sahoo, R. R. (2015). Combined Energy, Exergy and Optical Analyses of Flat Plate Solar Thermal Collector using Nanofluids. *Journal of Material Science and Mechanical Engineering*, 2.
- Xuan, Y., Li, Q., & Hu, W. (2003). Aggregation structure and thermal conductivity of nanofluids. *AIChE Journal*, 49(4), 1038-1043.
- Xuan, Y., & Roetzel, W. (2000). Conceptions for heat transfer correlation of nanofluids. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 43(19): 3701-3707.

Research paper

Numerical Investigation of the Effect of Using Nanofluid (Al₂O₃-Water) on Thermodynamic Performance of PV/T System

A. Altouni¹, Sh. Gorjian^{2*} and E. Rahmati³

Abstract

Solar energy as a renewable energy source can be used to produce heat and electricity. Among solar energy power production systems, photovoltaic thermal (PV/T) technology is almost a new and widely-used hybrid technology that can simultaneously produce heat and electricity. In recent years, nanomaterials in solar energy systems have significantly increased. In the present study, the effect of using nano-fluid water-aluminum oxide at three volumetric concentrations (0.10, 0.07, and 0.05%), and three inlet flow rates (0.6, 0.9, and 1.2 l/min) on the electric efficiency, thermal efficiency and exergy efficiency of PV/T system at different times of the day were numerically calculated using CFD. Then, their results were compared with the observed experimental results. The inlet flow rate of 1.2 liters min⁻¹ and the aluminum oxide nano-fluid concentration of 0.10% were optimized as input points due to the proper cooling of the system. The thermal efficiency is a function of the difference between the inlet and outlet temperatures of the fluid, and its highest value was observed at the maximum irradiation condition (960 W/m²) with 53%. Additionally, the highest and lowest exergy efficiency values were 21.6% and 15.9%, respectively, in the afternoon.

Keywords: Energy efficiency, Exergy efficiency, Photovoltaic-thermal, Nanofluid, Solar energy.

Citation: Altouni A. Gorjian Sh. and Rahmati E. 2022. Numerical Investigation of the Effect of Using Nanofluid (Al₂O₃-Water) on Thermodynamic Performance of PV/T System. 2022. Journal of Researches in Mechanics of Agricultural Machinery. 22: ??-??.

1- M.Sc. Graduate, Department of Biosystems Engineering, Faculty of Agriculture, Tarbiat Modares University (TMU), Tehran, Iran.

2- Assistant Professor, Department of Biosystems Engineering, Faculty of Agriculture, Tarbiat Modares University (TMU), Tehran, Iran.

3- PhD student, Department of Biosystems Engineering, Faculty of Agriculture, Tarbiat Modares University (TMU), Tehran, Iran.

* Corresponding Author: Gorjian@modares.ac.ir

Received: 2020/09/27

Accepted: 2021/06/16