



## بررسی عددی تأثیر نانو سیال در عملکرد حرارتی و الکتریکی سلول‌های خورشیدی

میراعلم مهدی<sup>1\*</sup>، محمدرضا خشنود<sup>2</sup>

1- دانشیار، گروه حرارت سیالات، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی تهران، تهران، ایران  
2- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی تهران، تهران، ایران  
\* تهران، صندوق پستی، [M.mahdi@sru.ac.ir](mailto:M.mahdi@sru.ac.ir)

### چکیده

سیستم‌های فتوولتائیک حرارتی (PV/T) با ترکیب تولید برق و گرما، راهکاری مؤثر برای افزایش بهره‌وری انرژی خورشیدی ارائه می‌دهند. در سال‌های اخیر، پژوهش‌های متعددی در زمینه بهبود عملکرد سیستم‌های فتوولتائیک حرارتی با استفاده از روش‌های خنک‌سازی و نانوسیالات انجام شده است. در حال حاضر پژوهشگران در حال تحقیق بر روی سلول‌های خورشیدی بوده و دنبال بهترین راهکار جهت افزایش بهره‌وری از این پدیده نوظهور هستند و این موجب انگیزه هر چه بیشتر محققان در این زمینه شده است. با توجه به کاهش بازده الکتریکی سلول‌های خورشیدی در دماهای بالا، استفاده از نانوسیالات به‌عنوان سیال خنک‌کننده می‌تواند عملکرد این سیستم‌ها را بهبود بخشد. در این پژوهش، عملکرد حرارتی و الکتریکی یک سیستم PV/T با استفاده از نانوسیال آلومینا در سه کسر حجمی (2/5، 5 و 10 درصد) و در دبی‌های جرمی مختلف ( $10 \frac{L}{h}$  تا  $60 \frac{L}{h}$ ) برای سیال عامل آب و نانو آلومینا با سه درصد حجمی 2/5، 5 و 10 درصد به‌صورت عددی بررسی شده است. شبیه‌سازی با نرم‌افزار ANSYS Fluent و مدل دو فاز مخلوط انجام شده و خواص نانوسیال از طریق تابع تعریف‌شده کاربر (UDF) به نرم‌افزار معرفی گردیده است. نتایج حاصل از تحلیل عددی نشان می‌دهد که استفاده از نانوسیال با کسر حجمی 2.5٪ باعث افزایش 14.2٪ در بازده حرارتی و 6.8٪ در بازده الکتریکی نسبت به سیال پایه (آب) می‌شود. این یافته‌ها نشان‌دهنده پتانسیل بالای نانوسیالات در بهینه‌سازی عملکرد سیستم‌های فتوولتائیک حرارتی و افزایش بهره‌وری انرژی خورشیدی هستند.

کلیدواژه‌گان: سیستم PV/T، انتقال حرارت جریان، دینامیک سیالات محاسباتی، راندمان حرارتی، راندمان الکتریکی

## Numerical investigation of the effect of nanofluid on the thermal and electrical performance of solar cells

Miaalam Mahdi<sup>1\*</sup>, Mohammadreza Khoshnood<sup>2</sup>,

1- Associate Professor, Department of Mechanical Engineering, Shahid Rajaee Teacher Training University, Tehran, Iran.

2- Master's degree, Mohammadreza Khoshnood, Department of Mechanical Engineering, Shahid Rajaee Teacher Training University, Tehran, Iran

\* Tehran, Iran, [M.mahdi@sru.ac.ir](mailto:M.mahdi@sru.ac.ir)

Received: 13 May 2025 Accepted: 15 November 2025

### Abstract

Photovoltaic thermal (PV/T) systems offer an effective solution to increase solar energy efficiency by combining electricity and heat generation. Researchers are currently researching solar cells and looking for the best solution to increase the efficiency of this emerging phenomenon, and this has motivated more and more researchers in this field.

Given the reduction in electrical efficiency of solar cells at high temperatures, the use of nanofluids as a coolant can improve the performance of these systems. In this study, the thermal and electrical performance of a PV/T system using alumina nanofluid in three volume fractions (2.5%, 5%, and 10%) and at different mass flow rates ("10" L/h to "60" "L"/"h") for water and nanoalumina working fluid with three volume percentages of 2.5, 5, and 10% has been numerically investigated. The simulation was performed using ANSYS Fluent software and a two-phase mixed model, and the properties of the nanofluid were introduced to the software through a user-defined function (UDF). The results of

numerical analysis show that the use of nanofluid with a volume fraction of 2.5% increases the thermal efficiency by 14.2% and the electrical efficiency by 6.8% compared to the base fluid (water). These findings indicate the high potential of nanofluids in optimizing the performance of thermal photovoltaic systems and increasing solar energy efficiency.

**Keywords:** PV/T system, flow heat transfer, computational fluid dynamics, thermal efficiency, electrical efficiency



شکل 1 الگوریتم بررسی عددی تأثیر نانو سیال در عملکرد حرارتی و الکتریکی سلول‌های خورشیدی

### 1- مقدمه

با توجه به اینکه منابع سوخت‌های فسیلی در آینده نه چندان دور به پایان خواهند رسید، بشریت نیازمند یافتن و اطمینان از کارآیی منابع جدید انرژی است. انرژی خورشیدی به عنوان یک منبع ارزان قیمت و قابل دسترس، می‌تواند جایگزین مناسبی برای سوخت‌های فسیلی باشد. انرژی خورشیدی به عنوان یکی از منابع مطمئن انرژی‌های تجدیدپذیر، توسط بسیاری از کشورها مورد استفاده قرار گرفته و دولت‌ها شرایط ساخت واحدهای تولید انرژی بر پایه انرژی خورشیدی را فراهم کرده‌اند. سیستم‌های فتوولتائیک که قادر به تبدیل مستقیم انرژی خورشیدی به الکتریسیته هستند، دارای بازدهی حدود ۵ تا ۲۰

درصد می‌باشند. افزایش دمای پانل‌ها باعث کاهش بازدهی الکتریکی آن‌ها می‌شود، اما با خنک سازی پانل‌ها می‌توان این اثر نامطلوب را کاهش داد. یکی از راهکارهای مؤثر برای بهبود عملکرد سیستم‌های PV، استفاده از سیستم‌های فتوولتائیک حرارتی (PV/T) است که به طور هم‌زمان برق و گرما تولید می‌کنند.

آگراول و همکارانش [6] تحلیل اکسرژی و انرژی خنک سازی فتوولتائیک توسط یک میکروکانال را در شرایط مختلف آب و هوایی (نقاط مختلف هندوستان) انجام دادند. در این تحلیل طول، عرض کانال به ترتیب 120 و 120/5 میلی متر می باشد. نتایج این تحلیل که توسط نرم افزار متلب انجام شد، بیانگر افزایش 70 درصدی بهره حرارتی سالیانه نسبت به تک کانال معمولی می باشد.

مهدوی عادل [7] مهدوی و فراهت به بررسی نتایج آزمایشگاهی اثر تغییر جریان جرمی نانوسیال بر راندمان الکتریکی سیستم پرداختند. در این آزمایش ها پارامترهای مختلف جوی، حرارتی و الکتریکی سیستم همچون شدت تابش خورشید، سرعت باد، دمای محیط، دمای نانوسیال ورودی، دمای نانوسیال خروجی، دمای سطح مدول فتوولتائیک، دمای صفحه جاذب، ولتاژ مدار باز و جریان اتصال کوتاه اندازه گیری شده است. با انجام یک سری آزمایش به بررسی تغییرات دبی در سه حالت جریان آرام، گذرا و آشفته بر راندمان های انرژی و اکسرژی کلکتور و همچنین با حل عددی به بررسی تغییرات دبی بر راندمان الکتریکی کلکتور و مقایسه آنها با نتایج بدست آمده از کار آزمایشگاهی پرداخته شده است. با بررسی نتایج مشخص می شود که استفاده از سیستم خنک کاری باعث افزایش راندمان الکتریکی می شود، که با افزایش دبی جریان این افزایش راندمان روندی صعودی دارد.

قهفرخی [8] به مطالعه عددی عملکرد یک گردآورنده حرارتی فتوولتائیک خورشیدی با نانوسیال برای جریان آرام پرداختند. پس از بررسی معادلات حاکم، دمای میانگین سطح مدول فتوولتائیک، بیشینه توان الکتریکی و بازده گردآورنده حرارتی فتوولتائیک خورشیدی برای جریان آرام سیال عامل آب و نانوسیال محاسبه و مقایسه شد. با توجه به اهمیت انتقال حرارت سیال و وجود ذرات با ضریب انتقال حرارت هدایتی بالا، انتقال حرارت بهتر و بیشتر صورت گرفته و بازده حرارتی و الکتریکی گردآورنده حرارتی فتوولتائیک خورشیدی افزایش می یابد. برای اطمینان از صحت کار، نتایج این مطالعه عددی با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شده و از همخوانی مناسبی برخوردار است.

خنجری [9] به بررسی عددی استفاده از نانوسیال در یک سیستم حرارتی فتوولتائیک خنک شده با آب پرداختند. کلکتور حرارتی فتوولتائیک یا PV/T یک فناوری هیبریدی است که گرما و برق را به طور همزمان تولید می کند. هدف از پژوهش بررسی اثرات استفاده از نانوسیال بر عملکرد سیستم PV/T بود. سیالات خنک کننده در نظر گرفته شده در شبیه سازی آب خالص، نانوسیال آب نقره و نانوسیال آب آلومینا بودند. نتایج عددی نشان دادند که با افزایش کسر حجمی نانوذرات، راندمان و ضریب انتقال حرارت افزایش می یابد. حداکثر درصد افزایش ضریب انتقال حرارت برای نانوسیال آلومینا-آب و نقره-آب به ترتیب 12٪ و 43٪ بود. افزایش سرعت سیال ورودی عملکرد انتقال حرارت سیستم PV/T را بهبود می بخشد. نتایج این مطالعه با نتایج تجربی موجود در ادبیات مقایسه شده و تطابق مناسبی را نشان می دهد.

خدادادی [10] به پژوهش بر روی عملکرد حرارتی نانوسیال با استفاده از NEPCM در سیستم PVT-LFR پرداختند. در این پژوهش تأثیر نرخ های جریان جرمی مختلف و تأثیر افزودن نانوذرات  $Al_2O_3$  به خنک کننده و PCM بر عملکرد کلکتور ارزیابی شده و به منظور مدل سازی سیستم PVT-LFR یک حل کننده گذرا انتخاب شده است. معادلات حاکم بر PVT-LFR با استفاده از رویکرد (CFD) دینامیک سیالات محاسباتی حل شده است. الگوریتم

در این تحقیق، با استفاده از نرم افزار ANSYS Fluent، ابتدا سلول خورشیدی با رایزر دایره ای طولی طراحی شده و عملکرد آن با چهار نوع سیال عامل شامل آب و نانوسیال آلومینا در سه کسر حجمی (5.2٪، 5٪ و 1٪) و در دبی های جرمی مختلف ( $1 \frac{L}{h}$ ،  $2 \frac{L}{h}$ ،  $3 \frac{L}{h}$ ،  $4 \frac{L}{h}$ ،  $5 \frac{L}{h}$  و  $60 \frac{L}{h}$ ) شبیه سازی شده است. هدف اصلی، محاسبه دمای خروجی سیال، دمای سطح سلول، افت فشار، بازده حرارتی، بازده الکتریکی و بازده کلی سیستم است. در نهایت، با مقایسه نتایج، بهترین سیال عامل و دبی جرمی که منجر به بیشترین بازدهی می شود، تعیین خواهد شد. نوآوری این پژوهش در استفاده از نانوسیال آلومینا با مدل دو فاز مخلوط در هندسه رایزر دایره ای طولی و تحلیل جامع پارامترهای عملکردی سیستم PV/T است. مراحل تحقیق شامل طراحی هندسه سیستم، تعریف شرایط مرزی، تعیین خواص فیزیکی سیال، شبیه سازی عددی با نرم افزار ANSYS Fluent، و تحلیل نتایج حرارتی و الکتریکی در شرایط مختلف عملیاتی می باشد. این روند به منظور بهینه سازی عملکرد سیستم و افزایش بازدهی انرژی خورشیدی طراحی شده است. همچنین، اعتبارسنجی مدل عددی با داده های آزمایشگاهی موجود در ادبیات انجام شده تا صحت نتایج تضمین گردد. شکل 1 الگوریتم بررسی عددی تأثیر نانوسیال در عملکرد حرارتی و الکتریکی سلول های خورشیدی را و مراحل چگونگی انجام این پژوهش را نشان می دهد.

## 2- پیشینه تحقیق

در سال های اخیر، پژوهش های متعددی در زمینه بهبود عملکرد سیستم های فتوولتائیک حرارتی با استفاده از روش های خنک سازی و نانوسیالات انجام شده است. روین [1] به بررسی دستگاه خنک کننده مبتنی بر برخورد جت برای خنک سازی سلول های فتوولتائیک متراکم تحت غلظت بالا پرداخت. نتایج نشان داد که توزیع غیریکنواخت انتقال حرارت ناچیزی بر عملکرد الکتریکی دارد. مهدوی عادل و همکاران [2-4] پس از سال ها تحقیقات نظری و آزمایشگاهی، مدلی مفصل الکتریکی و حرارتی برای گردآورنده های هوایی و آبی فتوولتائیک حرارتی خورشیدی توسعه دادند. این مدل برای محاسبه پارامترهای الکتریکی و حرارتی و بهینه سازی از منظر اکسرژی طراحی شده بود. آن ها یک بیان تحلیلی برای کارایی انرژی کلی سیستم در ترم های حرارتی، الکتریکی، طراحی و پارامترهای آب و هوایی استنتاج کردند و برنامه ای شبیه سازی کامپیوتری برای محاسبه پارامترهای گردآورنده های هوایی فتوولتائیک حرارتی خورشیدی ایجاد کردند. نتایج شبیه سازی های الکتریکی و حرارتی آن ها دقیق تر از داده های مقالات قبلی بود.

بارو و همکارانش [5] سیستم ترکیبی شامل برخورد جت سیال و میکروکانال را بررسی نمودند. آنها ابتدا توسط دستگاه سیستم ترکیبی میکروکانال ارتباط بین ضریب انتقال حرارت و عدد رینولدز را بررسی نموده و رابطه ای را برای آن توسعه دادند. سپس با حل عددی، کاربرد آن را به فتوولتائیک همراه با متمرکزکننده با شدت تشعشع خورشید بالا تا 1905 تمعیم دادند. همچنین توان خروجی فتوولتائیک همراه با متمرکزکننده نیز محاسبه کردند که نتیجه ی آن بدین صورت بود که دمای فتوولتائیک همراه با متمرکزکننده کمتر از 100 °C بوده و تا کمتر از 40 °C نیز می توانست کاهش یابد.

### 3- روش تحقیق

در این پژوهش، عملکرد حرارتی و الکتریکی یک سیستم فتوولتائیک حرارتی (PV/T) با استفاده از نانوسیال آلومینا در شرایط مختلف عملیاتی به صورت عددی بررسی شده است. شبیه‌سازی عددی با استفاده از نرم‌افزار ANSYS Fluent نسخه 2024 R 1 و با رویکرد حجم محدود انجام شده است. مدل دو فاز مخلوط برای تحلیل رفتار نانوسیال به کار گرفته شده و خواص ترموفیزیکی نانوسیال از طریق تابع تعریف شده کاربر (UDF) به نرم‌افزار معرفی گردیده است.

هندسه سیستم شامل یک کلکتور PV/T با رایزرهای دایره‌ای طولی است که اجزای آن شامل پوشش شیشه‌ای، لایه EVA، سلول‌های فتوولتائیک، لایه تدلار، صفحه جاذب آلومینیومی، لوله‌های انتقال حرارت و لایه عایق پلی‌یورتان می‌باشد. ابعاد هندسی اجزا مطابق جدول 1 در نظر گرفته شده‌اند.

شرایط مرزی به صورت زیر تعریف شده‌اند:

-دمای ورودی سیال:  $298K$

-شار حرارتی تابشی:  $558 \frac{W}{m^2}$

-دیواره‌های جانبی و پایین کلکتور: آدیاباتیک

سطح بالایی سلول خورشیدی: انتقال حرارت ترکیبی جابه‌جایی و تشعشع - خروجی لوله: فشار ثابت

شبه‌بندی به صورت سازمان‌یافته و با استفاده از شبکه لایه مرزی در ناحیه داخلی لوله انجام شده است تا دقت انتقال حرارت در نزدیکی دیواره‌ها افزایش یابد. برای بررسی استقلال شبکه، شبیه‌سازی با سه تعداد سلول مختلف انجام شده و با توجه به نزدیکی نتایج، مدل با تعداد سلول  $4440576$  به عنوان مبنای تحلیل انتخاب شده است. دبی جرمی سیال عامل در محدوده  $10 \frac{L}{h}$ ،  $20 \frac{L}{h}$ ،  $30 \frac{L}{h}$ ،  $40 \frac{L}{h}$  و  $50 \frac{L}{h}$  و  $60 \frac{L}{h}$  تغییر داده شده و برای سه کسر حجمی نانوسیال آلومینا (5/2٪، 5/5٪ و 10٪) شبیه‌سازی صورت گرفته است. برای گسسته‌سازی معادلات از روش‌های زیر استفاده شده است:

- گرادین: Least Squares Cell Based
- فشار: Presto
- مومنتوم و انرژی: Second Order Upwind
- الگوریتم جفت‌سازی فشار و سرعت: Simple

### 4- معادلات حاکم

روابط استفاده شده در این پژوهش دو دسته هستند اولی روابط حاکم بر نانوسیال که شامل معادله بقای جرم، بقای اندازه حرکت و بقای انرژی است و دسته دوم روابط مربوط به سلول فتوولتائیک است. اصل اساسی که از آن در مکانیک سیالات استفاده می‌شود اصل بقای جرم است، این اصل بیان می‌کند که جرم نه تولید می‌شود و نه از بین می‌رود و توسط معادله پیوستگی برای جریان چندفاز به صورت زیر بیان می‌گردد:

$$\nabla \cdot (\rho_{eff} \cdot V_m) = 0 \quad (1)$$

در این معادله  $\rho_{eff}$  چگالی موثر و  $V_m$  سرعت mixture می‌باشد. مکانیک سیالات تنها با داشتن معادله پیوستگی مشخص نمی‌شود بلکه باید اصل بقای اندازه حرکت یا قانون دوم نیوتن را در مورد آن بیان کرد،

SIMPLE برای جفت کردن سرعت و فشار در این پژوهش استفاده گردیده است. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که راندمان الکتریکی سیستم با کاهش نرخ جریان جرمی و افزودن نانوذرات به PCM کاهش می‌یابد، اما با افزودن نانوذرات به خنک‌کننده، عملکرد الکتریکی سیستم افزایش می‌یابد. اما بازدهی حرارتی سیستم با افزایش دبی جرمی افزایش می‌یابد. علاوه بر این، افزودن نانوذرات به آب و مواد تغییر فاز تأثیر مثبتی نیز بر بازده حرارتی کلکتور دارد. جیا و همکاران [11]، به پژوهش تجزیه و تحلیل عددی کلکتور فتوولتائیک حرارتی با استفاده از نانوسیال به عنوان خنک‌کننده پرداختند. سلول‌های فتوولتائیک و کلکتور حرارتی در یک سیستم ادغام می‌شوند تا کلکتور فتوولتائیک حرارتی را تشکیل دهند و نانوسیال به عنوان خنک‌کننده برای کاهش دمای سلول‌های فتوولتائیک استفاده می‌شود. هدف این کار تجزیه و تحلیل عددی یک کلکتور فتوولتائیک حرارتی با استفاده از نانوسیال است. برای به دست آوردن نتایج بیشتر در مورد تأثیر پارامترهای عملکرد بر عملکرد کلکتور فتوولتائیک حرارتی، مدل‌های ریاضی جمع‌کننده فتوولتائیک حرارتی پیشنهاد شده است. در این کار، تأثیر نوع نانوسیال و غلظت حجمی بر راندمان تبدیل فتوولتائیک، دمای سلول فتوولتائیک، توان حرارتی و الکتریکی بررسی می‌شود. اثرات پارامترهای کلکتور فتوولتائیک بر عملکرد نیز مورد تجزیه و تحلیل و بحث قرار می‌گیرد. نتایج نشان می‌دهد که عملکرد کلکتور فتوولتائیک حرارتی با نانوسیال آب/  $Al_2O_3$  بهتر از کلکتور فتوولتائیک حرارتی با استفاده از نانوسیال آب/  $TiO_2$  است. هنگامی که جریان انبوه نرخ نانوسیال  $0/03$  کیلوگرم بر ثانیه است، توان الکتریکی کلکتور فتوولتائیک حرارتی با نانوسیال آب/  $Al_2O_3$  بسیار بیشتر از فتوولتائیک حرارتی نانوسیال آب/  $TiO_2$  است.

شن و همکاران [12] به پژوهش بررسی عددی عملکرد حرارتی کلکتور حرارتی فتوولتائیک با کانال‌های خنک‌کننده موازی مختلف پرداختند. در این پژوهش، مدل نظری انتقال حرارت در کلکتور حرارتی فتوولتائیک با کانال‌های خنک‌کننده موازی مختلف برای ارزیابی اثر کانال‌های خنک‌کننده موازی بر عملکرد حرارتی کلکتور ایجاد شده است. برای طراحی ساختار کانال‌های خنک‌کننده موازی، تأثیر پارامترهای ساختاری مورد بحث قرار می‌گیرد. نتایج عددی نشان می‌دهد که با تعداد زیر کانال‌های 10، افت فشار کانال‌های خنک‌کننده کمترین است. در همین حال، دمای ماژول‌های فتوولتائیک کم و به طور مساوی توزیع شده است. علاوه بر این، پیکربندی نوع I ورودی و خروجی بهترین انتخاب است، زیرا افت فشار کانال‌های خنک‌کننده کم بوده و عملکرد حرارتی کلکتور عالی است. با افزایش نسبت قطر بین کانال اصلی و کانال‌های فرعی، دمای ماژول‌های فتوولتائیک کاهش می‌یابد و به طور مساوی توزیع می‌شود. علاوه بر این، رقم شایستگی کانال‌های خنک‌کننده با  $D/d = 4$  می‌تواند 50٪ بزرگتر از  $D/d = 2$  باشد. در میان این مطالعات، مقاله Bin Yan و همکاران [13] به‌طور خاص به تحلیل عددی و آزمایشگاهی سیستم PV/T با سیال پایه پرداخته است. در پژوهش حاضر، با افزودن نانوسیال آلومینا و استفاده از مدل دو فاز مخلوط، تأثیر کسر حجمی نانوذرات بر عملکرد سیستم بررسی شده است. تفاوت‌های کلیدی شامل انتخاب نوع سیال، هندسه رایزر دایره‌ای، شرایط مرزی و استفاده از تابع تعریف شده کاربر (UDF) برای خواص نانوسیال است که منجر به بهینه‌سازی عملکرد سیستم شده‌اند.

در این معادله،  $\dot{G}$  نرخ کل تابش خورشیدی است  $A_c$  مساحت کلکتور،  $\tau_g$  ضریب گذر شیشه که برابر 0/88 و  $\alpha_{cell}$  نرخ جذب سلول فتوولتائیک است که حدوداً 0/9 درصد لحاظ می‌شود.

انرژی الکتریکی سلول فتوولتائیک  $E_{pv}$  نیز به شرح زیر است:

$$E_{pv} = Q_s \eta_e \quad (9)$$

که  $\eta_e$  بازده الکتریکی سلول‌های فتوولتائیک است [16]:

$$\eta_{el} = \eta_r [1 - 0/0045(T_{cell} - 298/15)] \quad (10)$$

که  $T_{cell}$  دمای سلول فتوولتائیک و  $\eta_r$  راندمان الکتریکی تحت استاندارد شرایط عملیاتی است.

راندمان الکتریکی سیستم فتوولتائیک حرارتی نیز به عبارت است از: [17]

$$\eta_e = \frac{P_m}{\dot{G} \cdot A_c} \quad (11)$$

در معادله فوق،  $P_m$  توان صفحه فتوولتائیک حرارتی،  $\dot{G}$  نرخ کل تابش خورشیدی و  $A_c$  مساحت کلکتور است.

$Q_t$  انرژی گرمایی جذب شده توسط لوله عبارت است از: [18]

$$Q_t = \dot{m} C_p (T_o - T_i) \quad (12)$$

راندمان حرارتی سیستم فتوولتائیک عبارت است از: [19]

$$\eta_t = \frac{\dot{m} C_p (T_o - T_i)}{\dot{G} \cdot A_c} \quad (13)$$

که  $\dot{m}$  نرخ دبی جرمی سیال خنک کننده از کلکتور ،  $T_{inlet}$  دمای ورودی،  $T_{outlet}$  دمای خروجی سیال و  $C_p$  نیز ظرفیت گرمایی در نظر گرفته می‌شود. راندمان کلی نیز عبارت است از: [20]

$$\eta_s = \eta_t + \eta_e \quad (14)$$

دمای موثر آسمان نیز به صورت زیر بیان می‌شود [21]:

$$T_{sky} = 0.715 T_a^{1.5} / 0.552 \quad (15)$$

$T_a$  دمای هوای ورودی و با مقدار 298 K است. ضریب انتقال حرارت همرفتی به صورت زیر بیان می‌شود [22]

$$h_w = 3V_w/5 + 8/7 \quad (16)$$

که در آن  $V_w$  سرعت باد محلی است.

## 5- نتایج و بحث

قبل از بررسی پارامترهای هندسی و تأثیر نانو سیال بر راندمان یک سلول خورشیدی، لازم است اعتبارسنجی صورت بگیرد. در این پژوهش بررسی دقت نتایج شبیه‌سازی با مرجع [13] صورت گرفته است. سطح مقطع کلکتور فتوولتائیک حرارتی در شکل 2 نشان داده شده که از یک شیشه پوشش، یک لایه اتیلن وینیل استات (EVA)، سلول‌های فتوولتائیک، یک لایه تدار، یک لایه جذبی صفحه، لوله‌های جمع‌کننده سرپانتین و یک لایه عایق پلی‌اورتان تشکیل شده است. جدول 1 ابعاد اجزای مختلف سیستم PV/T را به ترتیب

اندازه‌ی حرکت حاصل ضرب جرم در سرعت است. قانون دوم نیوتن بیان می‌کند که برابند نیروهایی که بر یک جسم اثر میکند برابر با تغییرات خالص مومنتوم است.

$$\nabla(\rho_{eff,0} V_m V_m) = -\nabla P + \nabla \cdot [\tau] - \rho_{eff,0} \beta_{eff} (T - T_0) + \nabla \cdot \left( \sum_{k=1}^n \phi_k \rho_k V_{dr,k} V_{dr,k} \right) \quad (2)$$

در این معادله،  $\nabla P$  گرادیان فشار،  $\nabla \cdot [\tau]$  دیورژانس تنش برشی،  $\rho_{eff,0} \beta_{eff} (T - T_0)$  نیروی بویانسی و  $(\sum_{k=1}^n \phi_k \rho_k V_{dr,k} V_{dr,k})$  نیروی ناشی از سرعت نسبی است.

معادله انرژی نیز برای جریان چندفاز عبارت است از:

$$\nabla \cdot \left( \sum_{k=1}^n \phi_k V_k \rho_k E_k \right) = \nabla \cdot (K_{eff} \cdot \nabla T) \quad (3)$$

که  $\nabla \cdot (K_{eff} \cdot \nabla T)$  ترم نفوذ و  $\nabla \cdot (\sum_{k=1}^n \phi_k V_k \rho_k E_k)$  ترم جا به جایی است.

$$\rho_{eff} = \phi \rho_p + (1 - \phi) \rho_f \quad (4)$$

که  $\rho_{eff}$  چگالی موثر،  $\rho_p$  چگالی ذره،  $\rho_f$  نیز چگالی سیال می‌باشد.

$$\beta_{eff} = \left[ \frac{1}{1 + \frac{(1-\phi)\rho_f\beta_f}{\phi\rho_p}} + \frac{1}{1 + \frac{\phi\rho_p}{(1-\phi)\rho_f}} \right] \times \beta_f \quad (5)$$

معادله فوق ضریب هدایت می‌باشد.

برای محاسبه‌ی قابلیت هدایت حرارتی موثر در نانو سیال چندین رابطه ارائه شده که عبارتند از:

الف) قابلیت هدایت حرارتی موثر در نانو سیال با توجه به کار چون و همکاران [14]:

$$\frac{K_{eff}}{K_f} = 1 + 64/7 \times \phi^{0/746} \left( \frac{d_f}{d_p} \right)^{0/369} \left( \frac{K_s}{K_f} \right)^{0/7476} \times Pr^{0/9955} \times Re^{1/2321} \quad (6)$$

که در این رابطه، اثر قطر ذرات و حرکت براونی آنها در نظر گرفته شده است.

ب) رابطه دیگری برای ضریب هدایت موثر توسط ماکسول [15] ارائه شده است:

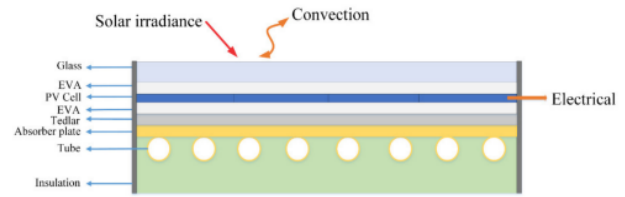
$$\frac{K_{eff}}{K_f} = \frac{K_p + 2K_f - 2\phi \cdot (K_f - K_p)}{K_p + 2K_f + \phi \cdot (K_f - K_p)} \quad (7)$$

انرژی کل خورشیدی دریافت شده توسط سلول فتوولتائیک ،  $Q_s$  به

صورت زیر نیز بیان می‌شود:

$$Q_s = \dot{G} \cdot A_c \cdot \tau_g \cdot \alpha_{cell} \quad (8)$$

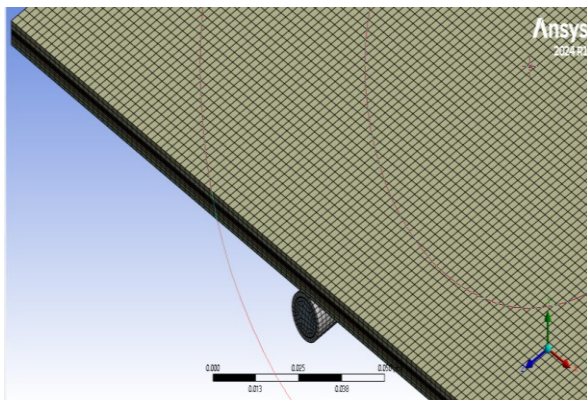
به صفحه پوشش شیشه ای انجام می گیرد و در نرم افزار از شرط mix استفاده شده است. شبکه بندی به صورت با سازمان برای هر ناحیه به صورت جداگانه مطابق شکل 4 انجام شده است. درون لوله از شبکه لایه مرزی استفاده شده تا مدل سازی برای انتقال حرارت در کنار دیواره به درستی انجام شود. برای تأیید استقلال حل از شبکه، میانگین دمای مازول های فتولتائیک حرارتی با تعداد سلولهای 3,389,238، 4,440,576 و 5,640,576 مطابق شکل 5 و جدول 3 بررسی شده است. با توجه به نزدیک بودن نتایج مربوط به تعداد سلول 4440576 در حالت 56740576، در نتیجه برای کاهش هزینه محاسبات در ادامه تحلیل ها مدل با تعداد سلول 4440576 به عنوان مبنای شبیه سازی فتولتائیک خورشیدی با رایزر دایره ای طولی انتخاب گردید.



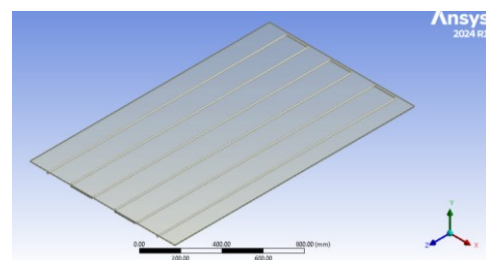
شکل 2 نمای شماتیک سیستم PV/T مورد مطالعه [13]

جدول 1 پارامترهای هندسی مازول PV/T [13]

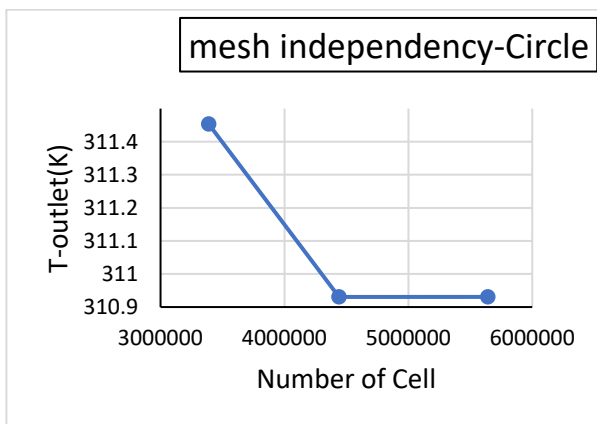
ابعاد (mm)	هندسه
1640 × 992 × 2	Glass cover
1640 × 992 × 0.5	EVA
1640 × 992 × 0/3	PV cell
1640 × 992 × 1	Tedlar
1640 × 992 × 1/5	Aluminum absorber plate
11	Water pipe inner diameter



شکل 4 کیفیت شبکه ایجاد شده بر روی سلول خورشیدی و ناحیه رایزر ورودی



شکل 3 هندسه سلول خورشیدی



شکل 5 تغییرات دمای خروجی سیال برحسب تعداد سلول شبکه

جدول 3 نتایج استقلال از مش مربوط به کلکتور خورشیدی

mesh	Number of Cells	T_Outlet	Error(%)
1	3389238	311/453	
2	4440576	310/9307	0/16769
3	5640576	310/9306	3/21615

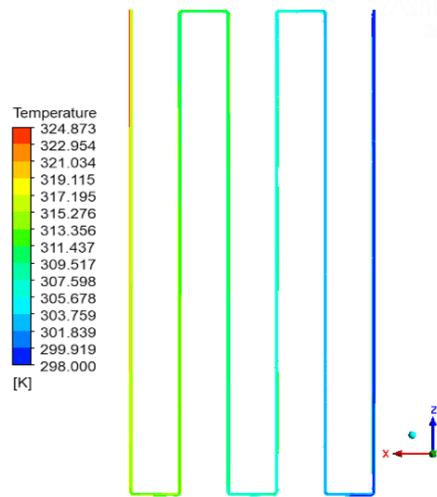
برای بررسی دقت نتایج بدست آمده، ابتدا سیال عامل همانند [13] آب به صورت تک فاز شبیه سازی شده است و نتایج مربوط به تغییرات دمای خروجی

نشان می دهند. با توجه به پارامترهای هندسی، مدل سازی سلول خورشیدی انجام شده که مطابق شکل 2 است. کلکتور خورشیدی به صورت رایزر دایره ای طولی با سیال عامل با دبی های جرمی 300 L/h، 140L/h، 220L/h، 60L/h مورد تحلیل قرار گرفته است. شبیه سازی با استفاده از نرم افزار انسیس فلونت با رویکرد حجم محدود صورت گرفته که برای کوپل میدان سرعت و فشار از الگوریتم SIMPLE استفاده شده است. اطلاعات مربوط به نوع و دقت گسسته سازی معادلات در جدول 2 ارائه شده است.

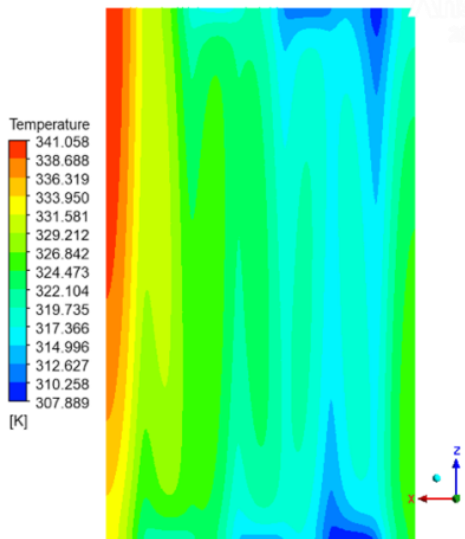
جدول 2 اطلاعات مربوط به گسسته سازی معادلات

روش گسسته سازی	معادله
Least squares Cell Based	گرادیان
Presto	فشار
Second order upwind	مومنتم
Second order upwind	انرژی

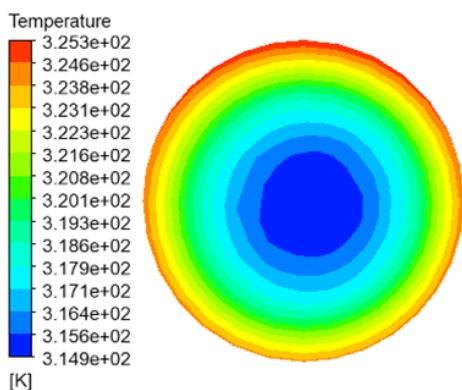
آب با دمای T=298 K و دبی جرمی مختلف وارد لوله شده و با دریافت گرما از سلول خورشیدی دمای آن افزایش می یابد. بنابراین شرط مرزی دبی-جرمی ورودی برای ورودی لوله انتخاب شده است. خروجی لوله به صورت فشار خروجی تعریف شده و شار حرارتی در صفحه بالایی سلول خورشیدی 558 w/m<sup>2</sup> در نظر گرفته شده است. در پایین کلکتور فتولتائیک حرارتی و لوله و دیواره های جانبی به علت اینکه انتقال حرارتی انجام نمی شود، به صورت دیوارهای آدیاباتیک در نظر گرفته شده و جابه جایی و تشعشع روی سطح مربوطه



شکل 7 توزیع دمای رایزرها برای نانو آلومینا 5٪ و دبی 40L/h



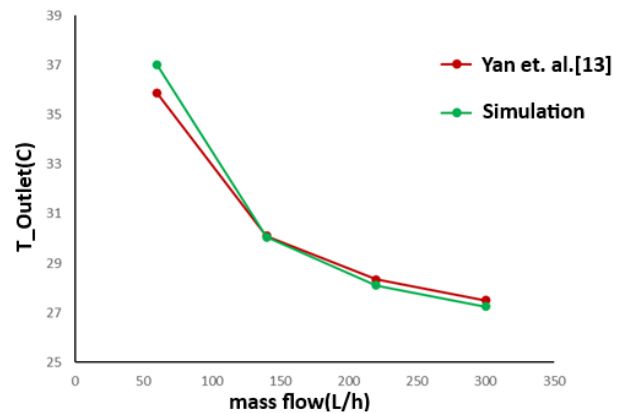
شکل 8 توزیع دمای سطح سلول خورشیدی برای نانو آلومینا 5٪ و دبی 40L/h



شکل 9 توزیع دمای خروجی برای سیال عامل نانو آلومینا 10٪ و دبی 40L/h

آلومینا با درصد‌های حجمی  $\varphi=5\%$ ،  $\varphi=5/2\%$ ،  $\varphi=10\%$  نمایش داده شده است که با بررسی نتایج و نمودارها می‌توان پی برد که سیال عامل

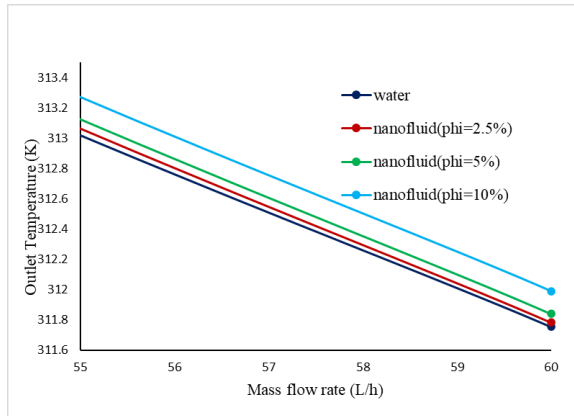
لوله خنک کن با نتایج آزمایشگاهی [13] مطابق شکل 6 ارائه شده است. مطابقت خوبی بین نتایج عددی و آزمایشگاهی بدست آمده و بیشترین مقدار خطا حدود 4 درصد برای دبی 30 L/h بدست آمد.



شکل 6 تغییرات دمای خروجی لوله خنک کننده بر حسب دبی جرمی آب

در ادامه شبیه‌سازی برای سیال‌های آب، نانو آلومینا 2.5٪، 5٪ و 10٪ برای شش دبی مختلف به ترتیب  $\dot{m}=10\text{L/h}$ ،  $20\text{L/h}$ ،  $30\text{L/h}$ ،  $40\text{L/h}$ ،  $50\text{L/h}$ ،  $60\text{L/h}$  انجام شده است. شکل 7 توزیع دمای رایزر را برای سیال عامل نانو سیال 5٪ و دبی 40L/h نشان می‌دهد. سیال با دمای 298K وارد رایزر شده و با دریافت گرما از سلول خورشیدی دمای آن افزایش یافته تا دمای آن حدود 319K در خروجی رایزر محاسبه شده است. با افزایش دمای نانو سیال در طول رایزر موجب کاهش بازده حرارتی آن شده و حرارت کمتری را در قسمت انتهایی از سلول خورشیدی دریافت می‌کند. توزیع دمای سلول خورشیدی در شکل 8 نشان داده شده است. بازه دمایی روی سلول خورشیدی از 307K الی 340K تغییر می‌کند.

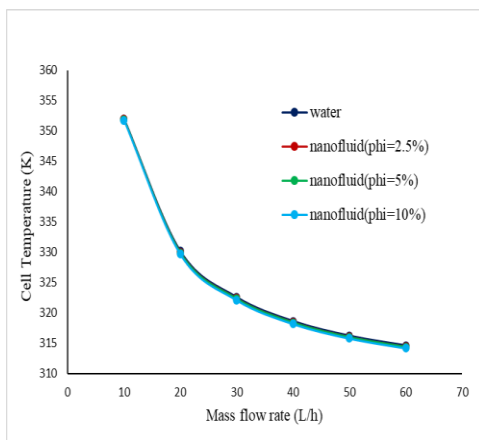
کمترین مقدار دما مربوط به محل ورودی سیال به رایزر است و با افزایش دمای سیال درون لوله میزان دریافت گرما از سلول کاهش یافته و در نتیجه دمای سلول خورشیدی افزایش می‌یابد. توزیع دمای سیال در خروجی رایزر در شکل 9 آمده است. در مقطع خروجی توزیع دما نشان می‌دهد که اختلاف دمای حدود 10 درجه وجود دارد طوری که مرکز لوله دما حدود 315K و ناحیه نزدیک به جداره رایزر دما به مقدار 325 K افزایش می‌یابد. این اختلاف دما بیانگر این است که با افزایش ضریب نفوذ سیال عامل می‌توان به توزیع یکنواختی در مقطع رایزر رسید و در نتیجه میزان انتقال حرارت افزایش خواهد یافت. جدول 4 نیز نتایج شبیه‌سازی تعیین جریان بهینه برای  $\dot{m} = 40 \frac{\text{L}}{\text{h}}$  برای سیال عامل آب و نانو



ب- تغییرات دمای خروجی رایزر برحسب دبی جرمی در محدوده 55L/h تا 60L/h به صورت برگنمایی شده

شکل 10 تغییرات دمای خروجی رایزر برحسب دبی جرمی

نانوذره دمای خروجی بیشتر می‌شود. قابل ذکر است شکل 10-ب تغییرات دمای خروجی رایزر برحسب دبی جرمی در محدوده 55L/h تا 60L/h به صورت برگنمایی شده نشان می‌دهد. مقدار دمای متوسط سلول خورشیدی برحسب تغییرات دبی جرمی در شکل 11-الف آمده است. روند تغییرات دمای سلول خورشیدی نیز شبیه دمای خروجی سیال رایز با افزایش دبی جرمی کاهش می‌یابد (از مقدار 358K تا 318K). با افزایش کسر حجمی نانوسیال، دمای سلول خورشیدی کاهش می‌یابد که این تغییرات در شکل 11-ب نشان داده شده است.



الف- تغییرات دمای سلول خورشیدی برحسب دبی جرمی 10 L/h تا 60L/h

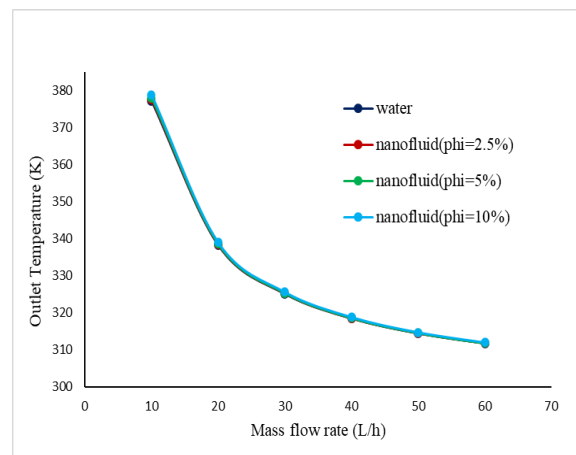
نانوآلومینا تاثیر بسزایی در بازدهی حرارتی و الکتریکی را ایفا می‌کند که در ادامه بحث به تحلیل این مورد پرداخته شده است.

در این بخش، نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی سیستم PV/T با استفاده از نانوسیال آلومینا در سه درصد حجمی (1٪، 2/5٪ و 10٪) و در دبی‌های جرمی مختلف (10L/h تا 60L/h) ارائه و تحلیل شده‌اند. هدف از این تحلیل، بررسی تأثیر نوع سیال و نرخ جریان بر عملکرد حرارتی و الکتریکی سیستم است. شکل 10-الف تغییرات دمای خروجی رایزر را برحسب دبی جرمی برای آب خالص و نانوسیال با کسر حجمی مختلف را نشان می‌دهد. با افزایش دبی جرمی دمای خروجی سیال کاهش می‌یابد و شیب این تغییرات از دبی جرمی 10L/h تا 30L/h با شیب تندی برای همه‌ی حالت‌ها اتفاق افتاده و بعد از آن شیب تغییرات کاهش یافته است. مقدار دمای خروجی از 377K تا 312K کاهش می‌یابد که بیانگر تأثیر دبی جرمی بر روی دمای سیال است. برای بررسی دقیق‌تر تأثیر نانوسیال روی دمای خروجی، قسمتی از نمودار برگنمایی شده و مشخص است که برای یک دبی جرمی مشخص اضافه کردن نانو ذره به آب موجب افزایش دمای خروجی سیال شده و با افزایش درصد

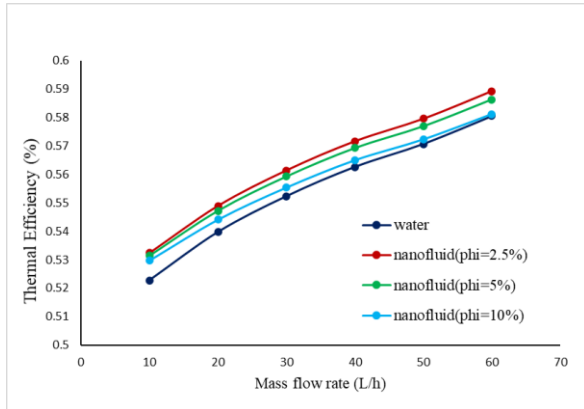
جدول 4 نتایج شبیه سازی تعیین جریان بهینه برای  $\dot{m} = 40 \frac{L}{h}$

working fluid	$T_{outlet}(K)$	$T_{Cell}(K)$
water	31/32	322/82
Nanofluid, $\phi=5/2\%$	31/35	32/822
Nanofluid, $\phi=5\%$	31/39	32/604
Nanofluid, $\phi=10\%$	31/49	32/27

working fluid	$\eta_{a_e}$	$\eta_{a_{th}}$	$\eta_{a_{total}}$
water	/562	/1456	0/708
Nanofluid, $\phi=5/2\%$	0/576	0/145	0/717
Nanofluid, $\phi=5\%$	0/569	0/145	0/715
Nanofluid, $\phi=10\%$	0/564	0/146	0/711

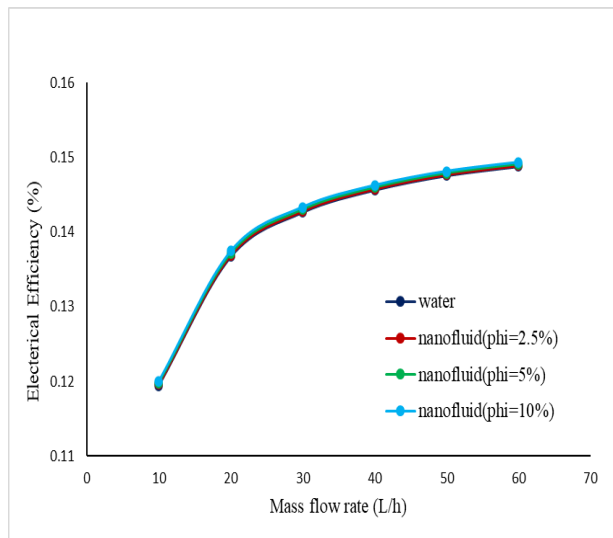


الف- تغییرات دمای خروجی رایزر برحسب دبی جرمی 10L/h تا 60L/h

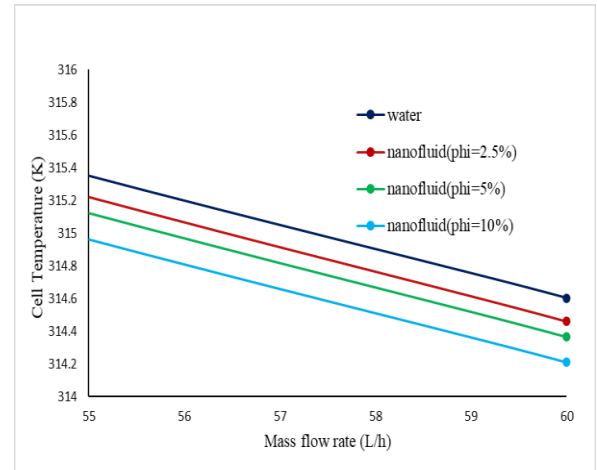


شکل 13 تغییرات راندمان حرارتی سلول خورشیدی برحسب دبی جرمی

شکل 14-الف تغییرات راندمان الکتریکی برحسب دبی جرمی را نشان می‌دهد. راندمان الکتریکی نیز با افزایش دبی جرمی افزایش می‌یابد. افزایش کسر حجمی نانوذره موجب افزایش راندمان الکتریکی شده است. علت این موضوع این است که بازدهی الکتریکی به دمای سلول بستگی دارد و هرچه دمای سلول مقدار کمتری باشد، دارای بیشترین بازدهی الکتریکی است و این مورد در سیال عامل نانوالومینا  $\phi = 10\%$  قابل مشاهده است و همان طور که مشاهده می‌شود، دمای سلول در این نوع سیال عامل دارای کمترین مقدار ممکن است. در نهایت تغییرات راندمان کلی برحسب دبی جرمی در شکل 15 ارائه شده است. سیال عامل نانوالومینا  $\phi = 2/5$  بیشترین بازدهی کلی را دارد و دلیل این مورد نیز این است که بازدهی کلی از حاصل جمع بازدهی الکتریکی با بازدهی حرارتی حاصل می‌شود و و حالت سیال عامل نانوالومینا  $\phi = 5\%$  بیشترین بازدهی کلی را دارد.



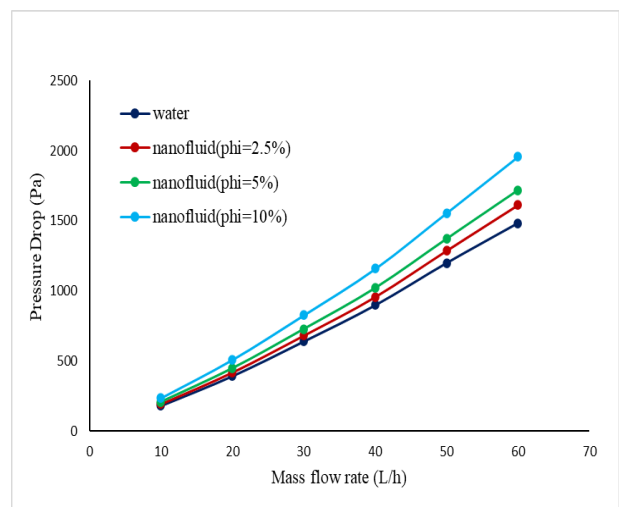
شکل 14-الف تغییرات راندمان الکتریکی سلول خورشیدی برحسب دبی جرمی از دبی جرمی  $(10 \frac{L}{h} \text{ تا } 60 \frac{L}{h})$



ب- تغییرات دمای سلول خورشیدی برحسب دبی جرمی  $55 \text{ L/h}$  تا  $60 \text{ L/h}$  به صورت بزرگنمایی شده

شکل 11 تغییرات دمای سلول خورشیدی برحسب دبی جرمی

شکل 12 تغییرات افت فشار سیال در رایزر را برحسب دبی جرمی نشان می‌دهد. برای همه دبی جرمی مقدار افت فشار بیشتر مربوط به سیال عامل نانوالومینا  $\phi = 10\%$  است. در دبی جرمی پایین اختلاف بین افت فشار پایین است و با افزایش دبی جرمی این اختلاف بیشتر می‌شود که این مربوط به افزایش مستقیم لزجت سیال با درصد نانو ذره می‌باشد. با توجه به روند کاهش دمای سلول و افزایش افت فشار با افزایش دبی جرمی، می‌توان مقدار بهینه‌ای برای دبی جرمی پیدا کرد. تغییرات راندمان حرارتی برحسب دبی جرمی در شکل 13 آمده است. افزایش دبی جرمی منجر به افزایش راندمان حرارتی شده است. سیال عامل نانوالومینا با کسر حجمی  $\phi = 2/5$  بیشترین راندمان حرارتی را دارد، علت این موضوع این است که راندمان حرارتی به حاصل ضرب  $C_p \times \Delta T$  بستگی دارد و این مورد در نانوسیال نانوالومینا  $\phi = 2/5$  بیشترین مقدار ممکن را دارد. به همین علت راندمان حرارتی این نوع سیال عامل نسبت به سایرین بیشترین مقدار ممکن است. پس از آن نانوسیال با کسر حجمی  $\phi = 5\%$  و  $\phi = 10\%$  در رتبه های بعدی هستند.



شکل 12 تغییرات افت فشار سیال رایزر برحسب دبی جرمی

● محاسبات انجام شده نشان می دهد، که راندمان حرارتی سیال عامل نانو آلومینا با درصد حجمی  $\phi = 2/5$  بیشترین بازدهی حرارتی را دارد.

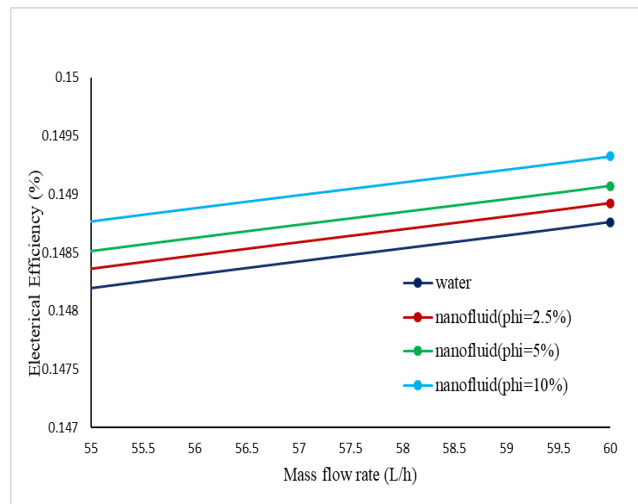
● افزایش کسر حجمی نانوسیال موجب جذب حرارت بیشتر از سلول خورشیدی شده و در نتیجه دمای سلول کاهش یافته و موجب افزایش راندمان الکتریکی شده است. افزایش دبی جرمی سیال نیز راندمان الکتریکی را زیاد می کند.

● راندمان کلی سیستم که حاصل جمع راندمان الکتریکی و حرارتی است به کسر حجمی نانوسیال وابسته بوده و برای سیال عامل نانو آلومینا با درصد حجمی  $\phi = 2/5$  بیشترین مقدار را دارد.

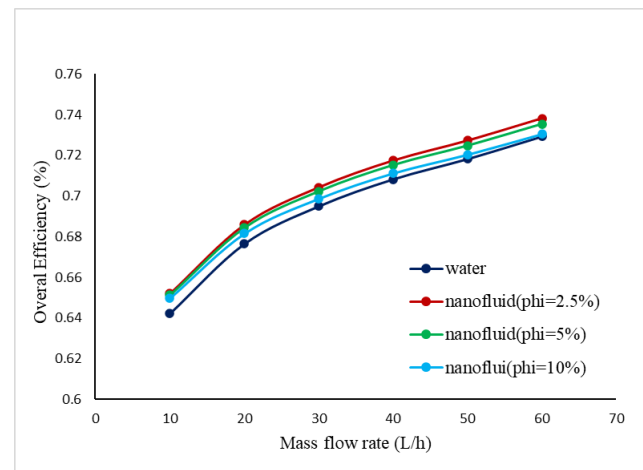
مقایسه نتایج با داده های آزمایشگاهی موجود در منابع علمی معتبر نشان داد که مدل عددی توسعه یافته دارای دقت مناسبی بوده و می تواند به عنوان ابزاری مؤثر در طراحی و بهینه سازی سیستم های PV/T مورد استفاده قرار گیرد. نوآوری این تحقیق در استفاده هم زمان از نانوسیال آلومینا، مدل دو فازی مخلوط، تابع تعریف شده کاربر (UDF)، و هندسه رایزر دایره ای طولی بوده که منجر به ارائه نتایج دقیق تر و کاربردی تر نسبت به مطالعات پیشین شده است.

## 7- مراجع

- [1] A. Roynce and C. J. Dey, Design of a jet impingement cooling device for densely packed PV cells under high concentration, *Solar energy*, Vol. 81, No. 8, pp. 1014–1024, 2007.
- [2] M. M. Adeli, F. Sobhnamayan, M. A. Alavi, S. Farahat, and F. Sarhaddi, Experimental exergetic performance evaluation of a photovoltaic thermal (PV/T) air collector and comparison with numerical simulation, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering*, Vol. 225, No. 3, pp. 161–172, 2011.
- [3] M. M. Adeli, F. Sobhnamayan, S. Farahat, M. A. Alavi, and F. Sarhaddi, Experimental performance evaluation of a photovoltaic thermal (PV/T) air collector and its optimization, *Strojniški vestnik - Journal of Mechanical Engineering*, Vol. 58, No. 5, pp. 309–318, 2012.
- [4] F. Sarhaddi, S. Farahat, H. Ajam, A. Behzadmehr, and M. M. Adeli, An improved thermal and electrical model for a solar photovoltaic thermal (PV/T) air collector, *Appl Energy*, Vol. 87, No. 7, pp. 2328–2339, 2010.
- [5] J. Barrau, J. Rosell, D. Chemisana, L. Tadriss, and M. Ibáñez, Effect of a hybrid jet impingement/micro-channel cooling device on the performance of densely packed PV cells under high concentration, *Solar energy*, Vol. 85, No. 11, pp. 2655–2665, 2011.
- [6] S. Agrawal and G. N. Tiwari, Energy and exergy analysis of hybrid micro-channel photovoltaic thermal module, *Solar energy*, Vol. 85, No. 2, pp. 356–370, 2011.
- [7] M.A.Mahdavi, S.Farahat "Laboratory study of the effect of changing the concentration of nanofluid as a coolant on the efficiency of photovoltaic collector Thermal," *ISME2014*-16950.
- [8] I. Ghahfarkhi, F. Sarhadi and Al. Hosseinnejad, Numerical study of the performance of a solar photovoltaic thermal collector with nanofluid for laminar flow, *Third International Conference on New Approaches in Energy Conservation*, 2014. (in Persian)
- [9] Y. Khanjari, F. Pourfayaz, and A. B. Kasaeian, Numerical investigation on using of nanofluid in a water-cooled photovoltaic



شکل 14- ب تغییرات راندمان الکتریکی سلول خورشیدی بر حسب دبی جرمی (بزرگنمایی شده)



شکل 15 تغییرات راندمان کلی سلول خورشیدی بر حسب دبی جرمی

## 6- نتیجه گیری

در این پژوهش، عملکرد حرارتی و الکتریکی یک سیستم فتوولتائیک حرارتی (PV/T) با استفاده از نانوسیال آلومینا در هندسه رایزر دایره ای طولی و با مدل دو فازی مخلوط به صورت عددی بررسی شد. نتایج حاصل از شبیه سازی نشان داد که استفاده از نانوسیال با ضریب هدایت حرارتی بالا موجب کاهش دمای سطح سلول، افزایش دمای خروجی سیال، و بهبود بازده حرارتی و الکتریکی سیستم می شود. افزایش کسر حجمی نانوذرات از 1٪ به 2/5٪ منجر به افزایش 14/2٪ در بازده حرارتی و 6/8٪ در بازده الکتریکی نسبت به سیال پایه (آب) گردید. همچنین، دبی جرمی  $60 \frac{L}{h}$  به عنوان مقدار بهینه برای بیشترین بازده کلی سیستم شناسایی شد. افت فشار در این شرایط قابل قبول بوده و تأثیر منفی قابل توجهی بر عملکرد سیستم نداشته است.

مهم ترین نتایج بدست آمده در این شبیه سازی عبارتند از:

- thermal system, *Energy Convers Manag*, Vol. 122, pp. 263–278, 2016.
- [10] M. Khodadadi, S. Ali, Z. Ebrahimpour, and M. Sheikholeslami, Thermal performance of nanofluid with employing of NEPCM in a PVT-LFR system, *Sustain Energy Technol Assessments*, Vol. 47, pp.101340, 2021.
- [11] Y. Jia, F. Ran, C. Zhu, and G. Fang, Numerical analysis of photovoltaic-thermal collector using nanofluid as a coolant, *Solar Energy*, Vol. 196, pp. 625–636, 2020.
- [12] C. Shen, F. Liu, S. Qiu, X. Liu, F. Yao, and Y. Zhang, Numerical study on the thermal performance of photovoltaic thermal (PV/T) collector with different parallel cooling channels, *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, Vol. 45, pp. 101101, 2021.
- [13] B. Yan *et al.*, Numerical and experimental investigation of photovoltaic/thermal systems: parameter analysis and determination of optimum flow, *Sustainability*, Vol. 14, No. 16, pp.10156, 2022.
- [14] C. H. Chon, K. D. Kihm, S. P. Lee, and S. U. S. Choi, Empirical correlation finding the role of temperature and particle size for nanofluid (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) thermal conductivity enhancement, *Appl Phys Lett*, Vol. 87, No. 15, pp. 153107, 2005.
- [15] X. Wang, X. Xu, and S. U. S. Choi, Thermal conductivity of nanoparticle-fluid mixture, *J Thermophys Heat Trans*, Vol. 13, No. 4, pp. 474–480, 1999.
- [16] M. R. Goma, M. Al-Dhaifallah, A. Alahmer, and H. Rezk, Design, modeling, and experimental investigation of active water cooling concentrating photovoltaic system, *Sustainability*, Vol. 12, No. 13, pp. 5392, 2020.
- [17] M. Sardarabadi, M. Passandideh-Fard, and S. Z. Heris, Experimental investigation of the effects of silica/water nanofluid on PV/T (photovoltaic thermal units), *Energy*, Vol. 66, pp. 264–272, 2014.
- [18] G. Hailu and A. S. Fung, Optimum tilt angle and orientation of photovoltaic thermal system for application in greater Toronto area, Canada, *Sustainability*, Vol. 11, No. 22, pp. 6443, 2019.
- [19] M. Sardarabadi, M. Hosseinzadeh, A. Kazemian, and M. Passandideh-Fard, Experimental investigation of the effects of using metal-oxides/water nanofluids on a photovoltaic thermal system (PVT) from energy and exergy viewpoints, *Energy*, Vol. 138, pp. 682–695, 2017.
- [20] 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.
- [21] S. R. Maadi, H. Sabzali, A. Kolahan, and D. Wood, Improving the performance of PV/T systems by using conical-leaf inserts in the coolant tubes, *Solar Energy*, Vol. 212, pp. 84–100, 2020.
- [22] A. A. Hawwash, A. K. A. Rahman, S. A. Nada, and S. Ookawara, Numerical investigation and experimental verification of performance enhancement of flat plate solar collector using nanofluids, *Appl Therm Eng*, Vol. 130, pp. 363–374, 2018.