



Semnan University

Journal of Modeling in Engineering

Journal homepage: <https://modelling.semnan.ac.ir/>

ISSN: 2783-2538



Research Article

Experimental and CFD Simulation Study of Heat Transfer Enhancement in a Flat-Plate Photovoltaic Thermal Collector with Spiral Cooling Channels

Sina Talebi^a, Faramarz Hormozi^a, Amir Heidari^{a,*} , Saman Rashidi^b

^a Faculty of Chemical, Petroleum and Gas Engineering, Semnan University, Semnan, Iran

^b Faculty of New Sciences and Technologies, Semnan University, Semnan, Iran

PAPER INFO

Paper history:

Received: 2025-05-01

Revised: 2025-08-21

Accepted: 2025-09-06

Keywords:

Heat transfer;
Computational Fluid
Dynamics (CFD);
Photovoltaic thermal
collector;
Turbulator;
Aluminum-oxide
nanofluid.

ABSTRACT

A photovoltaic cell converts solar radiation energy into electrical energy. Radiation on the photovoltaic surface causes an increase in the temperature of the photovoltaic cell, which leads to a decrease in the efficiency of the photovoltaic system. In this paper, a new structure of a thermal collector for absorbing energy from the operation of the photovoltaic cell was examined using Computational Fluid Dynamics (CFD) simulations. The main geometry is a flat-plate photovoltaic collector with a spiral cooling channel beneath the plate, using water as the working fluid within the laminar flow Reynolds number range. In this paper, the effect of the presence of turbulators with different angles of 15°, 30°, 45°, 60°, 75° and 90° was simulated. Then, the presence of nanofluid with aluminum oxide nanoparticles in different volume fractions of 1 to 4% was investigated. Also, the effect of a combined system of turbulators and nanofluid with nanoparticles on the increase in heat transfer was investigated. The CFD simulation results were evaluated using two performance criteria: the ratio of total heat transfer rate during cooling to the power required for flow circulation and the standard deviation criterion (evaluating the temperature distribution uniformity on the photovoltaic surface). The results showed that the system with a 15° turbulator provided better hydraulic and thermal performance compared to the baseline system, the nanofluid system, and the combined system.

DOI: <https://doi.org/10.22075/jme.2025.37601.2845>

© 2026 Published by Semnan University Press.

This is an open access article under the CC-BY 4.0 license. (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

* Corresponding author.

E-mail address: amirheidari@semnan.ac.ir

How to cite this article:

Talebi, S., Hormozi, F., Heidari, A. & Rashidi, S., "Experimental and CFD Simulation Study of Heat Transfer Enhancement in a Flat-Plate Photovoltaic Thermal Collector with Spiral Cooling Channels." Journal of Modeling in Engineering, 24 85 (2026): 235–250, doi: 10.22075/jme.2025.37601.2845

بررسی آزمایشگاهی و شبیه سازی CFD میزان افزایش انتقال حرارت در کلکتور فتوولتائیک حرارتی صفحه تخت با کانال های خنک کننده مارپیچ

سینا طالبی^۱، فرامرز هرمزی^۱، امیر حیدری^{۱*}، سامان رشیدی^۲

چکیده	اطلاعات مقاله
سلول فتوولتائیک، انرژی تشعشی خورشید را به انرژی الکتریکی تبدیل می کند. تابش به سطح فتوولتائیک، باعث افزایش دما سلول فتوولتائیک شده، و کاهش بازده سیستم فتوولتائیک را به همراه دارد. در این مقاله توسط شبیه سازی دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) ساختار جدیدی از یک کلکتور حرارتی در جذب انرژی حاصل از عملکرد سلول فتوولتائیک مورد بررسی قرار گرفت. هندسه اصلی کلکتور فتوولتائیک، یک صفحه تخت با کانال خنک کننده مارپیچ در زیر صفحه توسط سیال آب و در محدوده جریان آرام می باشد. در این مقاله اثر حضور آشفته ساز با زوایای مختلف ۱۵°، ۳۰°، ۴۵°، ۶۰°، ۷۵° و ۹۰° شبیه سازی گردید. سپس حضور نانوسیال با نانوذرات اکسید آلومینیوم در کسرحجمی های مختلف ۱ تا ۴ درصد بررسی شد. همچنین، اثر سیستم ترکیبی از آشفته ساز و نانوسیال بر میزان افزایش انتقال حرارت مورد بررسی قرار گرفت. نتایج شبیه سازی CFD به کمک دو معیار ارزیابی عملکرد سیستم (نسبت کل نرخ انتقال حرارت در فرآیند خنک سازی به توان مورد نیاز برای گردش جریان) و معیار انحراف استاندارد (بررسی پراکندگی توزیع دما روی صفحه فتوولتائیک) مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاصل شده نشان داد کانال دارای آشفته ساز ۱۵° از نظر هیدرولیکی و حرارتی در مقایسه با سیستم پایه، سیستم نانوسیال و سیستم ترکیبی بهره وری مناسب تری را به همراه دارد.	دریافت مقاله: ۱۴۰۴/۰۲/۱۱ بازنگری مقاله: ۱۴۰۴/۰۵/۳۰ پذیرش مقاله: ۱۴۰۴/۰۶/۱۵
	واژگان کلیدی: انتقال حرارت، دینامیک سیالات محاسباتی (CFD)، کلکتور فتوولتائیک حرارتی، آشفته ساز جریان، نانوسیال اکسید آلومینیوم.
DOI: https://doi.org/10.22075/jme.2025.37601.2845	

۱- مقدمه

امروزه تمایل در جهت استفاده از انرژی های تجدیدپذیر به دلیل نگرانی های ایجاد شده در زمینه هزینه سوخت های فسیلی و محدودیت های موجود برای منابع و به همراه داشتن مشکلات زیست محیطی که در صورت استفاده از این سوخت ها پدیدار می شود، افزایش پیدا کرده است [۱]. یکی از سیستم هایی که انرژی خورشیدی توسط آن بهره برداری می شود سامانه های خورشیدی تولید انرژی الکتریکی هستند. سلول های فتوولتائیک حدود ۹۰ درصد از انرژی خورشیدی دریافت شده از خورشید را جذب می کنند.

بازده این نوع از سیستم ها بین ۴ تا ۱۷ درصد و این مقدار با توجه به نوع سلول خورشیدی و شرایط کارکرد متغیر است [۲، ۳]. در تبدیل انرژی تشعشی به انرژی الکتریکی، سلول فتوولتائیک با افزایش دما همراه می شود که موجب کاهش بازده سیستم فتوولتائیک می گردد. در کلکتور فتوولتائیک حرارتی، انرژی خورشیدی به انرژی گرمایی و الکتریکی تبدیل می شود. این سیستم ترکیبی از واحد فتوولتائیک و گردآورنده حرارتی به منظور تولید همزمان انرژی الکتریکی و حرارتی است. با توجه به عملکرد بهتر صفحات فتوولتائیک در دمای پایین، یکی از چالش های

* پست الکترونیک نویسنده مسئول: amirheidari@semnan.ac.ir

۱- دانشکده مهندسی شیمی، نفت و گاز، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران

۲- دانشکده علوم و فناوری های نوین، گروه انرژی، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران

استناد به این مقاله:

طالبی، سینا، هرمزی، فرامرز، حیدری، امیر و رشیدی، سامان، "بررسی آزمایشگاهی و شبیه سازی CFD میزان افزایش انتقال حرارت در کلکتور فتوولتائیک حرارتی صفحه تخت با کانال های خنک کننده مارپیچ." مدل سازی در مهندسی، ۲۴ (۱۴۰۵): ۲۳۵-۲۵۰. doi: 10.22075/jme.2025.37601.2845

اصلی در این زمینه کاهش دمای صفحه فتوولتائیک می‌باشد. از جمله راهکارهای موثر در کنترل دمای صفحات فتوولتائیک تغییر در هندسه مسیر جریان سیال خنک کننده (کانال) می‌باشد. در سال‌های اخیر محققین به بررسی موضوع افزایش راندمان حرارتی کلکتور فتوولتائیک در حضور کانال خنک‌کننده با هندسه های مختلف پرداخته‌اند. مددی و همکاران [۴] ارتقای عملکرد سامانه‌های فتوولتائیک-حرارتی (PV/T) از طریق ترکیب روش‌های غیرفعال و استفاده از نانوسیال MWCNT-آب را مورد بررسی قرار دادند. آنها با بررسی مقاطع مختلف کانال، پره‌ها، آشفته‌سازهای صفحه‌ای و هندسه‌های موج‌دار، کارایی حرارتی و انرژی سیستم را با معیار استاندارد ISO مقایسه کردند. نتایج نشان داد که به کارگیری نانوسیال در کنار تغییرات هندسی باعث افزایش بازده و کاهش ضریب تلفات حرارتی می‌شود و در برخی حالت‌ها، عملکرد الکتریکی تا حدود ۵٪ نیز بهبود می‌یابد. در مجموع، مطالعه تأکید می‌کند که اصلاح هندسه جمع‌کننده همراه با نانوسیالات می‌تواند راهکاری مؤثر برای بهبود همزمان راندمان حرارتی و الکتریکی PV/T باشد.

سیالات متداول به کارگرفته شده در سیستم‌های خورشیدی، سیال پایه آب یا هوا می‌باشد. از آنجا که سیالات پایه خواص ترموفیزیکی کافی از خود نشان نمی‌دهند، این امر موجب محدود شدن عملکرد سیستم‌های خورشیدی می‌شود. چگونگی بهبود عملکرد سیالات مورد استفاده در سیستم‌های انتقال حرارتی روز به روز اهمیت بیشتری پیدا می‌کند. یکی از مؤثرترین روش‌ها جهت افزایش هدایت حرارتی، افزودن جامدات در ابعاد نانومتر به سیالات است که این ذرات می‌توانند فلزات، اکسیدهای فلزی، گرافیت و یا نانولوله‌های کربنی باشند. به ترکیب این ذرات با سیال پایه نانوسیال گفته می‌شود. نانوسیالات به دلیل بهبود کلی در انتقال حرارت توجه بسیاری از پژوهشگران را به خود جلب نموده است. در تحقیق فودهولی و همکاران [۵] مروری از نمونه پژوهش‌های انجام شده توسط محققین در به کارگیری نانوسیالات در سیستم‌های خورشیدی ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهند استفاده از نانوسیالات بهبود قابل توجهی در میزان انتقال حرارت را به همراه دارد.

راهکار دیگری که می‌تواند در افزایش تبادل حرارتی سیال خنک‌کننده با صفحه فتوولتائیک موثر باشد، تغییر در ساختار هندسی مسیر یا کانال‌های خنک‌کننده‌ها می‌باشد.

نسرین و تریپتی [۶] به بررسی تأثیر نرخ جریان جرمی و دمای ورودی هوا بر کارایی سیستم هیبریدی فتوولتائیک-حرارتی (PV/T) با استفاده از فین‌های آلومینیومی در شرایط آب‌وهوایی بنگلادش پرداختند. این مطالعه با استفاده از روش اجزای محدود (FEM) و شبیه‌سازی سه‌بعدی، سیستمی با شش ورقه آلومینیومی به‌عنوان مبدل حرارتی را تحلیل کرده است. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش نرخ جریان جرمی هوا از ۰/۱۵ تا ۰/۵۳۵ کیلوگرم بر ثانیه، انرژی حرارتی تولیدشده بین ۳۰۲ تا ۵۱۴ وات متغیر است. همچنین افزایش ۵ درجه سانتی‌گرادی دمای ورودی، کارایی کلی (جمع کارایی حرارتی و الکتریکی) را ۰/۳۳٪ بهبود می‌دهد، هرچند کارایی الکتریکی کاهش می‌یابد. لیما تلز و همکاران [۷] به بررسی عملکرد حرارتی یک سیستم خنک‌کننده تک‌کاناله برای پنل‌های فتوولتائیک با استفاده از نانوسیالات مختلف (Al_2O_3 ، CuO و ZnO) و حضور بافل‌ها پرداختند. این مطالعه با شبیه‌سازی عددی مبتنی بر دینامیک سیالات محاسباتی انجام گردید و اثرات حرکت براونی نانوذرات، غلظت‌های مختلف نانوذرات (تا ۱۰٪ حجمی)، اثر رینولدز (۱۸-۱۸۰۰)، و شدت تابش خورشیدی (۲۰۰-۱۰۰۰ وات بر مترمربع) بررسی شدند. نتایج نشان داد که نانوسیال CuO در محدوده رینولدز پایین، راندمان حرارتی رو ۵/۶۷٪ نسبت به آب خالص بهبود می‌دهد، در حالی که غلظت ۱۰٪ Al_2O_3 دما را تا ۱۵٪ کاهش و راندمان الکتریکی را ۴٪ افزایش می‌دهد (در محدوده رینولدز ۱۸ تا ۴۲). همچنین نتایج نشان داد که افزایش عدد رینولدز و کاهش تابش خورشیدی، اثر نانوسیال را کاهش می‌دهد و استفاده از بافل‌ها راندمان الکتریکی را ۲٪ بهبود بخشیده است. همچنین در مراجع [۸، ۹] علاوه بر به کارگیری آشفته‌ساز جریان، افزودن نانوسیال نیز مورد بررسی محققین قرار گرفته است.

در این مقاله عملکرد حرارتی سیستم فتوولتائیک حرارتی صفحه تخت در حضور کانال‌های گذرنده در بخش زیرین صفحه فتوولتائیک توسط روش CFD در حالت‌های مختلف ارزیابی شده است. در حالت اول اثر افزودن آشفته‌ساز (turbulator) برای افزایش اختلاط سیال و یکنواختی دما در سطح صفحه فتوولتائیک مورد بررسی قرار خواهد گرفت. در حالت دوم اثر افزودن نانوسیال حاوی نانوذرات اکسید آلومینیوم برای ارتقاء خواص حرارتی سیال و عملکرد

۲-۱- روش آزمایشگاهی

در این پژوهش به منظور اعتبارسنجی مدل CFD، داده‌های تجربی جهت مقایسه با نتایج CFD از یک سامانه آزمایشگاهی استخراج گردید. شکل (۱-الف) سیستم فتوولتائیک حرارتی آزمایشگاهی و شکل (۱-ب) کانال خنک‌سازی صفحه خورشیدی را نشان می‌دهد. در شکل (۱-ب) از سمت پایین کلکتور سیال آب خالص خنک‌کننده وارد کانال مارپیچ شده و با طی مسیر و دریافت حرارت از سطح زیرین صفحه فتوولتائیک به خروجی در قسمت بالای کلکتور رسیده از سیستم خارج می‌شود. دما در ۹ نقطه مختلف روی صفحه فتوولتائیک به وسیله ترمومتر لیزری TES-1327K، دمای سیال آب ورودی و خروجی از کلکتور به وسیله دماسنج دیجیتال، شار تابشی خورشید و دبی سیال آب ورودی به ترتیب به وسیله شارسنج TES-132 Solar Power Meter و استوانه مدرج اندازه‌گیری شدند. مطالعات آزمایشگاهی در دبی‌های ۴۰۰، ۷۵۰ و ۱۲۰۰ میلی‌لیتر و شار ثابت ۴۰۰ وات بر متر مربع انجام شد و نتایج آن در بخش اعتبارسنجی گزارش گردیده است.

۲-۲- روش حل عددی

در این شبیه‌سازی، بیشترین عدد رینولدز سیال آب در ورودی کانال مربعی (۱۰×۱۰ میلی‌متر) برابر با $Re=1994$ حاصل گردید، که رژیم جریان سیال را در محدوده جریان آرام قرار می‌دهد. وجود آشفتگی‌ساز در کانال جریان آرام، به‌تنهایی انتقال کامل به رژیم آشفتگی را ایجاد نمی‌کند، بلکه اغتشاشات موضعی در لایه مرزی القا می‌کند که انتقال حرارت همرفتی را تقویت می‌نماید. آشفتگی‌ساز با زوایای مختلف، جریان‌های ثانویه و گردابه‌های کوچک را در مقیاس محلی ایجاد می‌کند که اختلاط سیال را بهبود داده و توزیع حرارت را یکنواخت‌تر می‌سازد. در پژوهش‌های [۷، ۱۱، ۱۲] نشان داده شد که شکل و زاویه بهینه آشفتگی‌ساز انتقال حرارت را از طریق گردابه‌های کنترل‌شده بدون تغییر الگوی کلی جریان به حالت آشفتگی، افزایش می‌دهد. با حفظ رژیم جریان آرام و تمرکز بر بهینه‌سازی انتقال حرارت و یکنواختی دما با حداقل هزینه پمپاژ، استفاده از مدل‌های آشفتگی در شبیه‌سازی ضروری به نظر نمی‌رسد. با این حال، آشفتگی‌سازها ممکن است اثرات غیرخطی بر پروفیل سرعت و دما ایجاد کنند که در مدل جریان آرام ساده نادیده گرفته

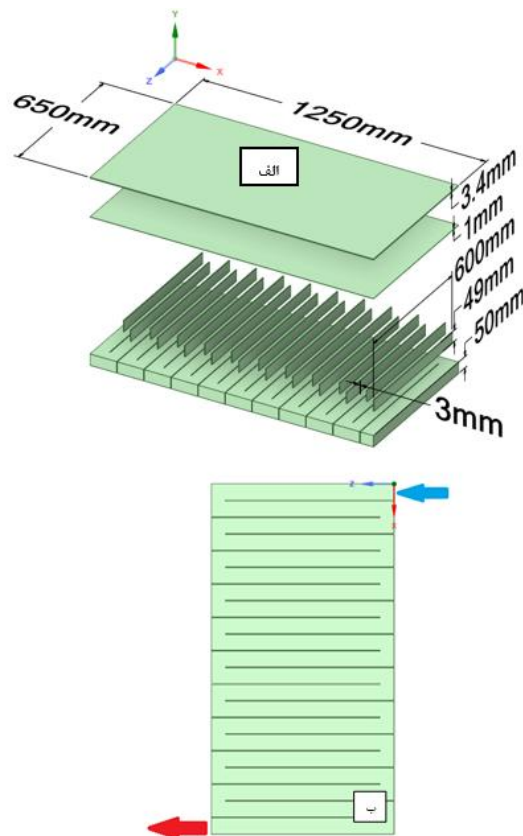
حرارتی سیستم ارائه خواهد شد. همچنین در حالت سوم، رفتار حرارتی سیستم با ترکیب آشفتگی‌ساز و نانو سیال مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۲- روش‌ها

به منظور ارزیابی مشخصه‌های الگوی جریان در کانال‌های عبور سیال خنک‌کننده و میزان بهبود انتقال حرارت در سیستم فتوولتائیک حرارتی از تکنیک دینامیک سیالات محاسباتی استفاده گردید. با توجه به نتایج بدست آمده از پژوهش‌های گذشته [۱ و ۱۰]، استفاده از کانال جریان در سیستم‌های فتوولتائیک بهبود کلی در راندمان حرارتی و الکتریکی مشاهده شد. لذا در این پژوهش میزان اثر بخشی حضور کانال جریان همراه با آشفتگی‌ساز و نانو سیال در عملکرد حرارتی سیستم فتوولتائیک مورد بررسی قرار می‌گیرد. در نهایت بهترین شرایط عملیاتی با توجه به نتایج حاصل شده از شبیه‌سازی بر مبنای معیارهای کارایی و یکنواختی توزیع دما بر روی پنل فتوولتائیک معرفی می‌شود.



شکل ۱- (الف) کلکتور فتوولتائیک حرارتی صفحه تخت با سیال خنک‌کننده آب (ب) کانال خنک‌سازی زیر صفحه فتوولتائیک



شکل ۲- (الف) هندسه کلکتور فتوولتائیک شامل لایه ها: شیشه و سلول فتوولتائیک، محافظ EVA، محافظ Tedlar، صفحه جاذب آلومینیومی و کانال جریان (ب) هندسه کانال مارپیچ

۲-۳- معادله بقای مومنوم

معادله حرکت در سه جهت x ، y و z به ترتیب در معادلات ۲، ۳ و ۴ معرفی شده است:

$$\rho \left(u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) = -\frac{\partial P}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \quad (2)$$

$$\rho \left(u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right) = -\frac{\partial P}{\partial y} + \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) \quad (3)$$

شود. برای مدیریت این اثرات، رویکردهایی نظیر مدل جریان آرام با اغتشاشات موضعی یا ترم‌های تصحیحی در معادلات ناویر-استوکس به کار گرفته می‌شود. پژوهش [۷] نشان می‌دهد که مدل جریان آرام برای تحلیل عملکرد سیستم کافی است و پیچیدگی محاسباتی را کاهش می‌دهد. بنابراین، آشفته‌ساز در جریان آرام صرفاً اغتشاشات موضعی ایجاد می‌کند و مدل جریان آرام برای شبیه‌سازی مناسب است. معادلات حاکم بر اساس روش حجم محدود و در شرایط پایا حل گردید. به منظور گسسته سازی معادلات از طرح مرتبه دوم Upwind و ارتباط بین سرعت و فشار از الگوریتم SIMPLE استفاده شد. همچنین حل با دقت مضاعف و معیار همگرایی برای معادلات پیوستگی و مولفه‌های سرعت 10^{-6} در نظر گرفته شده است.

۲-۳- هندسه کلکتور در شبیه‌سازی CFD

در شکل (۲-الف) هندسه کلکتور در شبیه‌سازی که از چند بخش به ترتیب از بالا به پایین: شیشه، سلول فتوولتائیک، محافظ EVA، محافظ Tedlar (ضریب هدایت حرارتی معادل برابر با $0.55 \left(\frac{W}{m.k} \right)$)، صفحه جاذب آلومینیومی و کانال جریان است. ابعاد هندسه شبیه‌سازی برابر با هندسه آزمایشگاهی در نظر گرفته شده است. شکل (۲-ب) تصویری از نوارهای عرضی موجود در کانال و کانال جریان که نقش هدایت سیال در مسیر مارپیچی را بر عهده دارد نشان می‌دهد.

۳- معادلات حاکم

معادلات حاکم بقای جرم (پیوستگی)، حرکت، انرژی و همچنین معادلات بخش نانو سیالات و معیار ارزیابی عملکرد در این تحقیق به ترتیب شامل معادلات زیر می‌باشند:

۳-۱- معادله پیوستگی

معادله پیوستگی در شرایط دانسیته ثابت و پایا به صورت زیر ارائه می‌گردد:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

در این معادله u ، v و w به ترتیب سرعت سیال در جهت‌های x ، y و z می‌باشند.

همچنین برای محاسبه ظرفیت گرمایی ویژه نانوسیال از [۱۶] استفاده شد:

$$C_{p_{nf}} = \frac{(1 - \varphi)(\rho C_p)_{np} + \varphi(\rho C_p)_{bf}}{\rho_{nf}} \quad (9)$$

که در این رابطه $C_{p_{np}}$ ، $C_{p_{bf}}$ و $C_{p_{nf}}$ به ترتیب ظرفیت گرمایی ویژه نانوسیال، سیال پایه و نانوذرات می‌باشند.

۳-۵- معیار ارزیابی عملکرد η

برای ارزیابی کیفیت عملکرد کانال با شکل مارپیچ، در تحت شرایط جریان و محدوده‌های شار مختلف، می‌توان فاکتور کیفیت را معرفی کرد. این فاکتور از نسبت کل نرخ انتقال حرارت در حین خنک‌سازی به توان مورد نیاز برای جریان در گردش اجباری درون کانال بدست می‌آید [۱۴]:

$$\eta = \frac{\dot{Q}}{P} = \frac{\dot{m} C_p \Delta T}{\frac{1}{\eta} \dot{Q} \Delta P} \quad (10)$$

در رابطه (۱۰) $\dot{m}$ دبی جرمی سیال ورودی به کانال، C_p ظرفیت گرمایی ویژه سیال، ΔT اختلاف دمای سیال ورودی و خروجی از کانال (کلون)، η بازده پمپ، $\dot{Q}$ دبی حجمی سیال ورودی به کانال، ΔP افت فشار ورودی و خروجی کانال می‌باشد.

۳-۶- شرایط مرزی

شرایط مرزی در نظر گرفته شده برای شبیه‌سازی عددی شامل سرعت جریان در ورودی کانال خنک‌کننده در دمای ۳۰۰ کلون، فشار در خروجی کانال اتمسفریک و شار ثابت خورشید بر سطح کلکتور فتوولتائیک می‌باشند.

جدول ۱- استقلال از شبکه کلکتور فتوولتائیک حرارتی مارپیچ در دبی ورودی ۹۰۰ میلی لیتر بر دقیقه

شماره مش	تعداد مش	ΔP (Pa)	Q (J/s)	زمان(دقیقه)
۱	۳۲۴۰۶۱	۱۸٫۹۶	۳۳۶	۱۶
۲	۸۱۷۶۴۷	۱۹٫۳۹	۳۳۳	۳۰
۳	۱۸۸۹۱۴۶	۲۰٫۹۶	۳۲۷	۷۷
۴	۶۵۲۲۹۱۳	۲۰٫۹۵	۳۲۶	۳۸۳

۴- بحث و نتایج

۴-۱- استقلال از شبکه

به منظور بررسی استقلال نتایج عددی از تعداد مش، چهار سری مش مختلف مورد بررسی قرار گرفت. جدول ۱

$$\begin{aligned} \rho \left(u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) &= \rho g - \frac{\partial P}{\partial z} \\ &+ \mu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) \end{aligned} \quad (4)$$

که پارامترهای P ، μ و g به ترتیب فشار، ویسکوزیته و شتاب گرانش می‌باشند.

۳-۳- معادله انرژی

معادله انرژی طبق معادله ۵ معرفی می‌شود:

$$\begin{aligned} u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} + w \frac{\partial T}{\partial z} &= \alpha \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \end{aligned} \quad (5)$$

که پارامترهای T و α به ترتیب دما و ضریب نفوذ حرارتی می‌باشد.

۳-۴- روابط تئوری نانوسیالات

به منظور بررسی اثر نانو ذره بر خواص سیال در شبیه‌سازی CFD، از روابط تئوری نانوسیالات ارائه شده در منابع استفاده شده است. رابطه تئوری ارائه شده برای هدایت حرارتی نانوسیالات توسط ماکسول [۱۳] بر اساس رابطه زیر می‌باشد:

$$k_{nf} = k_{bf} \frac{k_s + 2k_{bf} + 2\varphi(k_s - k_{bf})}{k_s + 2k_{bf} - \varphi(k_s - k_{bf})} \quad (6)$$

که در این رابطه k_{nf} ، k_{bf} ، k_s و φ به ترتیب دانسیته نانوسیال، هدایت حرارتی سیال پایه، هدایت حرارتی نانوذرات و کسر حجمی نانوذرات در سیال پایه می‌باشند. برای محاسبه دانسیته از رابطه پاک و چو [۱۴] استفاده گردید:

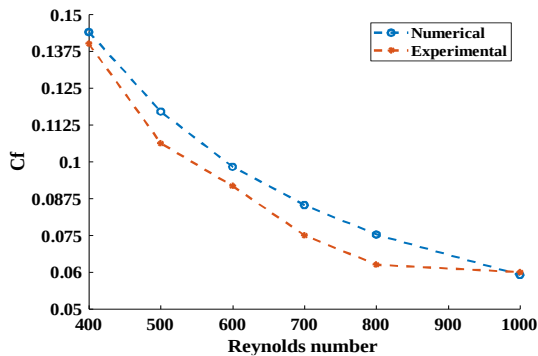
$$\rho_{nf} = (1 - \varphi)\rho_{bf} + \varphi\rho_s \quad (7)$$

که در این رابطه پارامترهای ρ_{nf} ، ρ_{bf} و ρ_s ترتیب دانسیته‌های نانوسیال، سیال پایه و نانوذرات می‌باشند. ویسکوزیته نانوسیال از رابطه اینشتین [۱۵] به دست می‌آید:

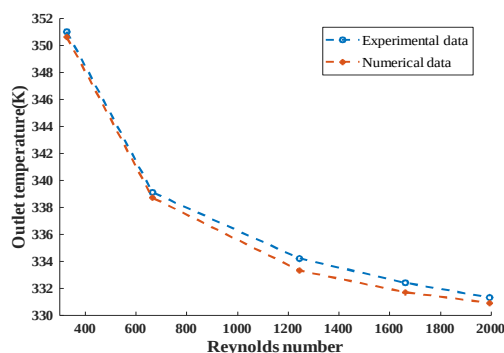
$$\mu_{nf} = (1 + 2.5\varphi)\mu_{bf} \quad (8)$$

که در این رابطه μ_{nf} و μ_{bf} به ترتیب ویسکوزیته‌های نانوسیال و سیال پایه می‌باشند.

مختلف مورد بررسی قرار گرفت. نتایج این مقایسه در شکل (۴) ارائه شده است. مقدار متوسط خطای نتایج CFD و آزمایشگاهی برابر ۱/۶٪ حاصل شد. با توجه به نتایج حاصل، می‌توان اطمینان داشت که مدل CFD می‌تواند در شبیه‌سازی‌های انجام شده در این پژوهش، دقت مناسب و قابل اطمینان از پاسخ را ارائه نماید.



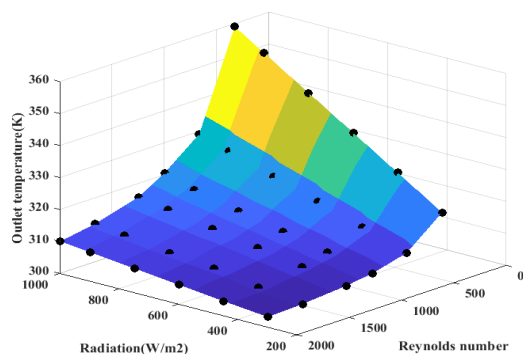
شکل ۳- مقایسه ضریب اصطکاک بین فرمول تجربی (فرمول (۱۲)) و شبیه‌سازی CFD



شکل ۴- مقایسه دمای آب خروجی از کلکتور نتایج آزمایشگاهی و عددی در شار ثابت ۴۰۰ وات بر مترمربع در ۵ دبی مختلف

۵- نتایج عددی

۵-۱- اثر رینولدز جریان و شار حرارتی بر دمای صفحه PV و آب خروجی از کلکتور



شکل ۵- تاثیر رینولدز سیال خنک‌کننده در شار مختلف بر دمای آب خروجی از کلکتور

مشخصات مش‌های مورد بررسی را ارائه می‌دهد. با توجه به نتایج حاصل شده برای افت فشار، تغییرات دما و مقدار انرژی بین سیال و صفحه فتوولتائیک مش (۳) به دلیل اختلاف کم نتایج با مش (۴) و زمان محاسباتی پایین‌تر به عنوان مش مناسب در شبیه‌سازی انتخاب گردید.

۴-۲- اعتبارسنجی

جهت اعتبارسنجی بررسی عددی، از نتایج شبیه‌سازی CFD ضریب اصطکاک داخل کانال و مقایسه آن با رابطه تجربی ارائه شده توسط شاه و لندن [۱۷]، استفاده گردید. به منظور محاسبه ضریب اصطکاک کانال در شبیه‌سازی CFD از رابطه (۱۱)، استفاده شد:

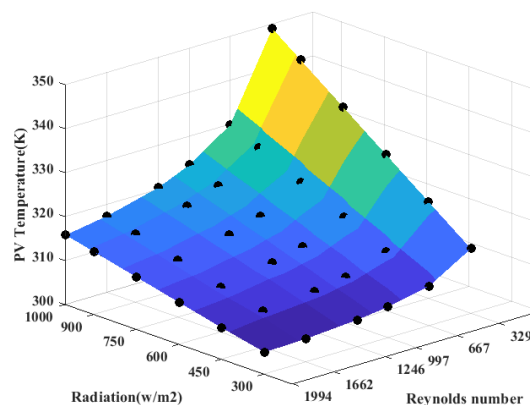
$$f = 2\Delta P D_h / \rho L u_m^2 \quad (11)$$

که در این رابطه $D_h(m)$ قطر هیدرولیکی کانال خنک‌کننده، $P(Pa)$ افت فشار کانال، $u_m(m/s)$ سرعت متوسط سیال خنک‌کننده داخل کانال، $\rho(kg/m^3)$ دانسیته سیال و $L(m)$ طول کانال و f ضریب بی بعد اصطکاک می‌باشد. رابطه (۱۲) نتایج همبستگی تجربی حاصل توسط شاه و همکاران [۱۷] را به عنوان یک تابع چند جمله‌ای ارائه می‌دهد، می‌باشد که در معادله زیر نشان داده شده است:

$$f = \frac{96}{Re} (1 - 1.355r + 1.946r^2 + 1.701r^3 + 0.956r^4 - 0.253r^5) \quad (12)$$

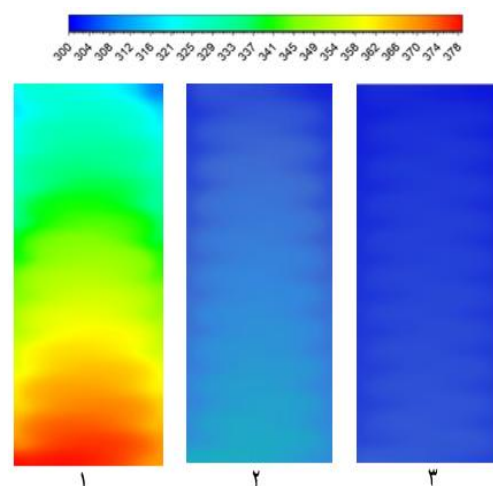
که r نسبت بین عرض و ارتفاع کانال خنک‌کننده می‌باشد. در شکل (۳) مقایسه نتایج CFD و نتایج رابطه (۱۲) ارائه شده است. مقدار متوسط خطای بین نتایج CFD و رابطه تجربی (۱۲) برابر با ۵٪ درصد حاصل گردید. این اختلاف می‌تواند به علت در نظر گرفتن فرضیات شبیه‌سازی CFD، شامل جریان پایا، خواص ثابت سیال (مانند ویسکوزیته و چگالی) و هندسه کاملاً صاف کانال باشند. در مقابل، در اندازه‌گیری‌های تجربی، عواملی مانند ناهمواری سطح دیواره‌های کانال، خطاهای ابزاری (حدود ۱-۲٪ عدم قطعیت در فلومترها و فشارسنج‌ها)، تغییرات محیطی مانند تغییرات دمای محیط و اثرات سه‌بعدی جزئی (مانند تلاطم محلی در اتصالات) مؤثر هستند. همچنین به منظور بررسی دقیق‌تر مدل CFD، نتایج حل عددی و آزمایشگاهی دمای خروجی از کلکتور فتوولتائیک حرارتی در رینولدزهای

در شکل (۷-۱) میزان تابش ۱۰۰۰ وات بر مترمربع و دبی آب ۲۰۰ میلی‌لیتر بر دقیقه است که در این حالت بیشترین دمای صفحه به حدود ۳۸۰ کلوین می‌رسد. در شکل (۷-۲) میزان تابش ۶۰۰ وات بر مترمربع و دبی آب ۶۰۰ میلی‌لیتر بر دقیقه و شکل (۷-۳) تحت تابش ۳۰۰ وات بر مترمربع و دبی آب ۱۲۰۰ میلی‌لیتر بر دقیقه می‌باشد. نتایج نشان می‌دهد که در دبی ۲۰۰ میلی‌لیتر بر دقیقه، دمای سیال خروجی از کلکتور (طبق شکل (۵)) در عدد رینولدز (۳۲۹) از ۳۰۰ کلوین در ورودی به ۳۶۰ کلوین در خروجی می‌رسد. این اختلاف شدید دما بین ورودی و خروجی کلکتور، ناهمگن بودن توزیع دما بر روی صفحه فتوولتائیک را به همراه دارد (شکل (۷-۱)) که می‌تواند بر روی عملکرد صفحه فتوولتائیک تاثیر منفی به همراه داشته باشد. در شکل (۷-۱) اثر وجود نقاط داغ نشان داده شده است. با افزایش دبی سیال خنک‌کننده از ۲۰۰ میلی‌لیتر به ۶۰۰ میلی‌لیتر، به علت کاهش زمان اقامت سیال خنک‌کننده در کلکتور، سیال خنک‌کننده فرصت کمتری دارد تا با تبادل حرارتی به صفحه فتوولتائیک دمای آن افزایش یابد. تحت این شرایط همان‌طور که در شکل (۵) نشان داده شده است، در دبی ۶۰۰ میلی‌لیتر دمای آب از ۳۰۰ کلوین در ورودی به ۳۱۲ کلوین در خروجی می‌رسد که در مقایسه با دبی ۲۰۰ میلی‌لیتر با ۴۸ کلوین افت دما روبرو شده است و در شکل (۶) نیز اثر افزایش دبی از ۲۰۰ میلی‌لیتر بر دقیقه به ۶۰۰ میلی‌لیتر بر دقیقه بر روی دمای صفحه فتوولتائیک با افت دما به میزان ۳۵ کلوین همراه بوده است. تحت این شرایط، همان‌طور که در شکل‌های (۵) و (۶) نشان داده شده، افزایش دبی از ۲۰۰ به ۶۰۰ میلی‌لیتر بر دقیقه باعث کاهش دمای سطح فتوولتائیک به میزان حدود ۳۵ کلوین و کاهش اختلاف دمای سیال از ورودی تا خروجی از ۴۸ کلوین به ۱۲ کلوین می‌گردد. در کانتور شکل (۷-۲) و (۷-۳) نیز تغییرات دبی به همراه تغییرات شار تابشی نشان می‌دهند که با افزایش دبی سیال خنک‌کننده صفحه فتوولتائیک از شرایط دما بالا دور شده است. با توجه به تاثیر عدد رینولدز بر روی نحوه توزیع دمای صفحه فتوولتائیک می‌توان گفت که شرایط مناسب برای عملکرد صفحه فتوولتائیک شرایطی می‌تواند باشد که دمای کل صفحه فتوولتائیک همگن‌تر و هزینه پمپاژ پایین‌تر حاصل گردد. در این راستا برای بررسی عملکرد سیستم، همزمان از دو مشخصه معیار ارزیابی عملکرد (رابطه (۱۰)) و معیار انحراف



شکل ۶- تاثیر رینولدز جریان آب خنک‌کننده در شارهای مختلف بر روی دمای متوسط صفحه فتوولتائیک

شکل‌های (۵) و (۶) به ترتیب اثر رینولدز (دبی سیال خنک‌کننده) در شارهای مختلف را بر روی دمای آب خروجی از کلکتور و دمای متوسط صفحه فتوولتائیک نشان می‌دهند. همان‌طور که در شکل‌های (۵) مشخص است با افزایش رینولدز دمای سیال خروجی از کلکتور کاهش می‌یابد و در نتیجه حرارت تجمع پیدا کرده در داخل سیستم با افزایش رینولدز جریان از سیستم با نرخ بیشتری خارج می‌شود. این امر باعث کاهش دمای سطح فتوولتائیک می‌گردد (شکل (۶)) که ارتباط مستقیم با افزایش بهره‌وری سیستم فتوولتائیک دارد. جهت بررسی اثر تغییرات رینولدز و شار حرارتی بر توزیع دمای صفحه فتوولتائیک سه نمونه از شرایط عملیاتی برگزیده شد تا تغییرات دمایی روی صفحه فتوولتائیک بررسی گردد. در شکل (۷) کانتور و شرایط انتخاب شده را نشان می‌دهد.

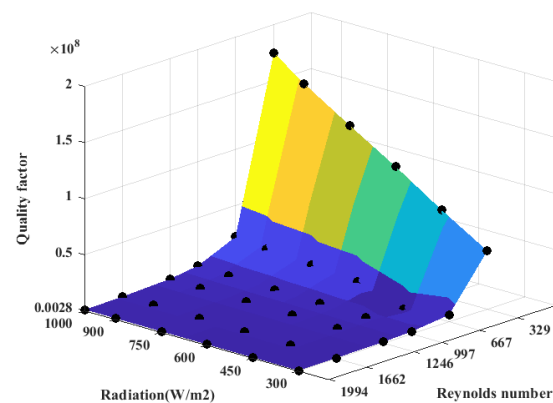


شکل ۷- کانتور دما (بر اساس کلوین) صفحه فتوولتائیک تحت تاثیر دبی ۲۰۰ (شماره ۱)، ۶۰۰ (شماره ۲) و ۱۲۰۰ (شماره ۳) میلی‌لیتر بر دقیقه آب خنک‌کننده به ترتیب در شار ثابت ۱۰۰۰، ۶۰۰ و ۳۰۰ وات بر مترمربع

استاندارد توزیع دمای بر روی صفحه فتوولتائیک استفاده گردید.

۵-۱-۱- معیار ارزیابی عملکرد

شکل (۸) معیار ارزیابی عملکرد را نشان می‌دهد. این فاکتور در واقع نسبت میزان حرارت گرفته شده از سیستم در زمان خنک‌سازی در برابر میزان انرژی الکتریکی مورد نیاز گردش سیال خنک‌کننده توسط پمپ می‌باشد. مقادیر بالای این فاکتور نشان از عملکرد مناسب سیستم در برابر صرف انرژی اجباری گردش آب است.



شکل ۸- معیار ارزیابی عملکرد

در تمامی شرایط مورد بررسی در این مقاله مقدار معیار ارزیابی عملکرد بسیار بزرگ بدست آمد (محور عمودی شکل (۸)). این نتیجه به این معنی است که میزان انرژی به گردش در آوردن سیال توسط پمپ در برابر انرژی خارج شده از سیستم توسط سیال قابل صرف نظر است.

جدول ۲- درصد انحراف استاندارد

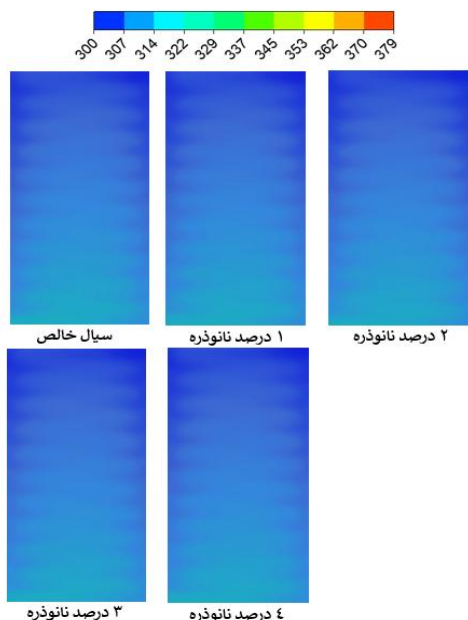
شدت تابش ($\frac{W}{m^2}$) دبی ($\frac{ml}{min}$)	۳۰۰	۴۵۰	۶۰۰	۷۵۰	۹۰۰	۱۰۰۰
۲۰۰	۱۹/۹	۲۷/۵	۵۳/۳	۶۸/۵	۷۷/۷	۶۸/۳
۴۰۰	۱۲/۱	۱۵/۱	۱۹/۹	۲۳/۶	۳۲/۹	۴۵/۶
۶۰۰	۹/۸	۱۱/۵	۱۴/۶	۱۷/۳	۲۰/۳	۲۳/۰
۷۵۰	۸/۶	۱۰/۳	۱۱/۷	۱۴/۱	۱۷/۱	۱۸/۵
۱۰۰۰	۶/۷	۸/۷	۹/۸	۱۰/۹	۱۳	۱۴/۶
۱۲۰۰	۸/۱	۸/۳	۸/۷	۹/۷	۱۱/۱	۱۲/۲

۵-۱-۲- معیار انحراف استاندارد

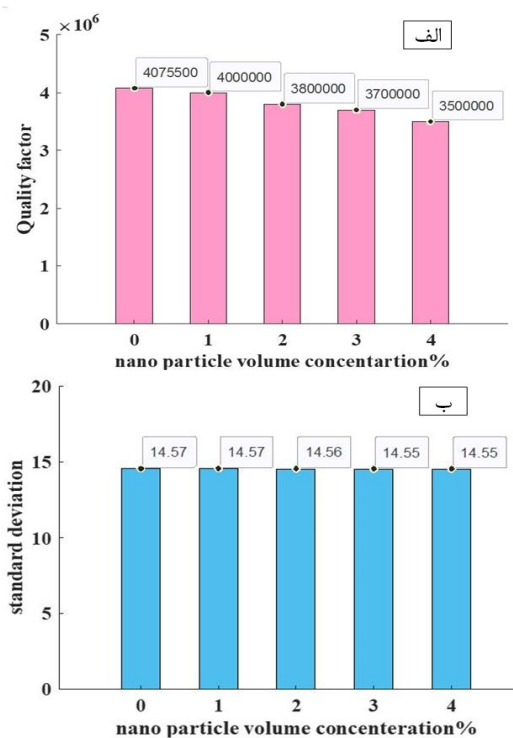
در جدول ۲ نتایج معیار انحراف استاندارد نرمالایز شده توزیع دما بر روی صفحه فتوولتائیک نشان داده شده است. باتوجه به داده‌های جدول ۲ این نتیجه حاصل می‌شود که

هرچه دبی سیال آب جهت خنک‌سازی صفحه افزایش می‌یابد، مقدار انحراف استاندارد کوچک‌تر شده و بر این اساس می‌توان گفت که صفحه دارای توزیع یکنواخت‌تری از دما می‌باشد. به طور مثال در میزان تابش ۱۰۰۰ وات بر متر مربع در دبی ۲۰۰ میلی‌لیتر بر دقیقه انحراف استاندارد بالاترین مقدار را دارد (شکل ۷-۱) و این بدین معنی است که توزیع دما در این شرایط نسبت به سایر شرایط مورد بررسی ناهمگنی بیشتری دارد و می‌تواند راندمان الکتریکی سیستم فتوولتائیک را تحت تاثیر منفی قرار دهد. همچنین نتایج جدول ۲ نشان می‌دهد، با افزایش دبی سیال میزان انحراف معیار در تابش‌های مختلف تفاوت زیادی با یکدیگر ندارد. به طور مثال در دبی ۱۲۰۰ میلی‌لیتر بر دقیقه با توجه به بهبود در استخراج حرارت از صفحه فتوولتائیک، علاوه بر کوچک بودن معیار انحراف استاندارد نسبت به سایر دبی‌ها، مقدار انحراف معیار در شارهای مختلف نزدیک به یکدیگر است که این موضوع توزیع تقریباً یکنواخت دما بر روی صفحه فتوولتائیک را نشان می‌دهد. این ویژگی می‌تواند افزایش راندمان سیستم الکتریکی را به همراه داشته باشد. باتوجه به شکل (۸)، بهترین معیار ارزیابی در دبی پایین حاصل می‌گردد. علت این موضوع به این دلیل است که در دبی پایین هزینه کمتری جهت پمپاژ سیال صرف می‌شود. اما از طرفی طبق داده‌های جدول ۲ در دبی پایین، پراکندگی توزیع دما با افزایش میزان تابش به سرعت زیاد می‌شود. در نتیجه دبی پایین برای این سیستم و شرایط کاری آن توصیه نمی‌گردد. با افزایش دبی تا محدوده ۶۰۰ میلی‌لیتر بر دقیقه سیستم با شرایط مطلوب‌تری از همگنی توزیع دما بر روی صفحه فتوولتائیک ایجاد می‌شود (جدول ۲) اما این شرایط با توجه به شکل (۸) در آستانه افزایش هزینه پمپاژ است. هدف اصلی تحقیق رسیدن به شرایط مناسبی از عملکرد سیستم است که هم از نظر معیار ارزیابی عملکرد و هم معیار انحراف استاندارد وضعیت مطلوبی داشته باشد. با توجه به داده‌های حاصل از شبیه‌سازی جهت بهبود شرایط مشخص شد که آستانه افزایش هزینه‌ها در دبی ۶۰۰ میلی‌لیتر بر دقیقه است. بنابراین دبی ۶۰۰ میلی‌لیتر بر دقیقه به عنوان دبی مناسب برای بررسی سایر پارامترهای عملیاتی بر عملکرد صفحه فتوولتائیک انتخاب شده است. در ادامه اثر افزودن نانوسیال و آشفته‌سازها در عملکرد صفحه فتوولتائیک مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

نشان می‌دهد. زاویه قرارگیری آشفته ساز به شکلی است تا سیال را به سمت صفحه بالا (محل قرار گیری صفحه فتوولتائیک) هدایت نماید. نتایج شبیه‌سازی CFD برای آشفته‌ساز در زوایای مختلف ۱۵، ۳۰، ۴۵، ۶۰، ۷۵ و ۹۰ درجه بررسی شده است.



شکل ۹- کانتور دمای صفحه فتوولتائیک (بر اساس کلونین) تحت تاثیر درصدهای مختلف نانوسیال اکسید آلومینیوم



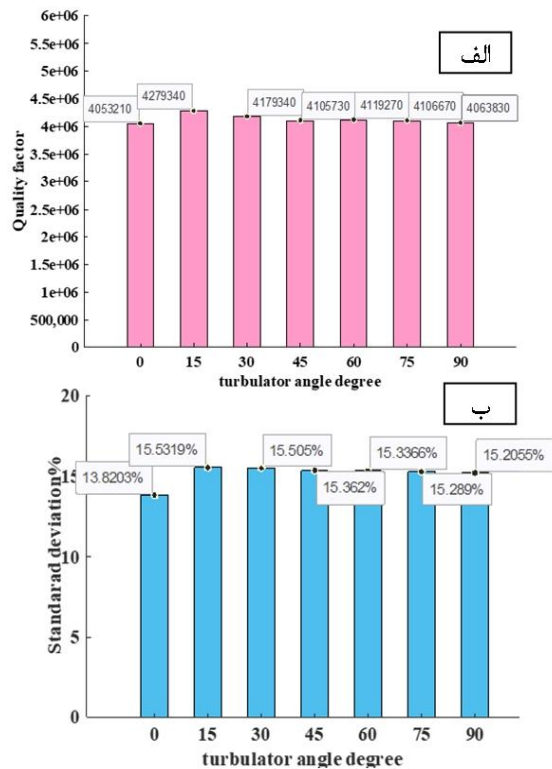
شکل ۱۰- الف) معیار ارزیابی عملکرد با حضور نانوسیال و ب) درصد انحراف استاندارد توزیع دما با حضور نانو سیال

۵-۲- تاثیر نانوسیال درون کلکتور بر بهبود میزان انتقال حرارت

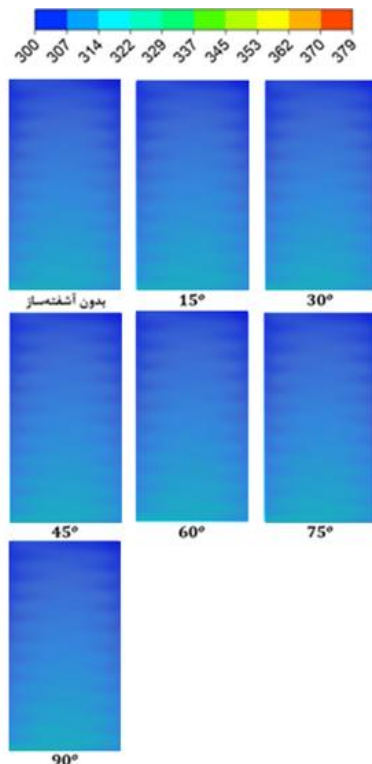
در این بخش از تحقیق جهت بهبود میزان انتقال حرارت از صفحه فتوولتائیک به سیال خنک‌کننده، تاثیر حضور نانوسیال آلومینیوم اکسید در درصدهای ۱ تا ۴ درصد حجمی مورد بررسی قرار گرفت. شرایط عملیاتی مورد بررسی شامل دبی ۶۰۰ میلی لیتر بر دقیقه و تابش ۶۰۰ وات بر متر مربع است. با توجه به شکل (۹) به منظور کمی سازی اثر نانو ذره بر روی عملکرد سیستم حرارتی فتوولتائیک، معیار ارزیابی عملکرد و معیار انحراف استاندارد دمای صفحه در نمودارهای شکل (۱۰) ارائه شده است. طبق شکل (۱۰-الف) نتایج بررسی بر اساس معیار ارزیابی عملکرد نشان داد وقتی سیال خالص است میزان افت فشار در مقایسه با نانوسیال در درصدهای مختلف کمتر بوده و در نتیجه هزینه پمپاژ کمتر است. در صورت افزودن نانوذره به مقدار ۴ درصد حجمی معیار ارزیابی عملکرد نسبت به سیال خالص ۱۲/۵٪ کاهش می‌یابد که نشان از افزایش افت فشار و بالا رفتن هزینه پمپاژ است. از سوی دیگر استفاده از نانوسیال، به دلیل افزایش هدایت حرارتی (معادله ۶) و ظرفیت گرمایی ویژه (معادله ۹) است که نرخ کل انتقال حرارت را نسبت به توان پمپاژ بهبود می‌بخشد. با این حال، بر اساس نتایج شکل (۱۰-ب) درصد تغییرات انحراف استاندارد توزیع دما روی سطح فتوولتائیک با تغییر درصد نانو ذره در سیال ناچیز باقی می‌ماند. این موضوع می‌تواند به علت باقی ماندن شرایط جریان آرام با حضور نانو سیال باشد. در این شرایط، الگوی جریان تغییر قابل توجهی نمی‌کند تا بتواند یکنواختی حرارتی را به‌طور قابل توجهی تغییر دهد. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که نانوسیال کارایی استخراج گرما را افزایش می‌دهد، اما الگوی جریان را به شکل موثری تغییر نمی‌دهد و بنابراین مشاهده می‌شود درصد انحراف استاندارد توزیع دما به‌صورت تقریباً ثابت باقی می‌ماند.

۵-۳- تاثیر آشفته‌ساز سیال درون کلکتور بر بهبود میزان انتقال حرارت

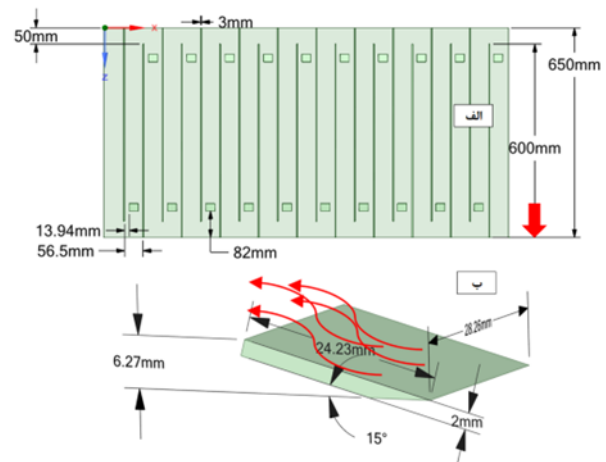
یکی از روش‌های افزایش میزان انتقال حرارت سیال داخل کانال به کارگیری آشفته‌ساز جریان است. در شکل (۱۱-الف) موقعیت قرارگیری آشفته‌ساز در داخل کانال نمایش داده شده است. شکل (۱۱-ب) یک نمونه از آشفته‌ساز را



شکل ۱۲- الف) معیار ارزیابی عملکرد با آشفته‌ساز در زوایای مختلف و ب) درصد انحراف استاندارد توزیع دما در حضور آشفته‌ساز



شکل ۱۳- کانتور دما (بر اساس کلونین) صفحه فتوولتائیک تحت تاثیر حضور آشفته‌ساز در زوایای متفاوت



شکل ۱۱- الف) موقعیت قرارگیری آشفته‌ساز در داخل کانال گذرنده سیال ب) آشفته‌ساز داخل کانال گذرنده سیال

با توجه به نمودار شکل (۱۲-الف) بیشترین میزان بهبود در استخراج حرارت در برابر افت فشاری که آشفته‌ساز به صورت مانع در مسیر جریان در مقایسه با حالت بدون آشفته‌ساز و تمامی زوایا ایجاد می‌کند، بر مبنای معیار عملکرد مربوط به آشفته‌ساز 15° است. میزان افزایش در معیار عملکرد با آشفته‌ساز 15° نسبت به حالت بدون آشفته‌ساز $5/6\%$ است. از طرفی هرچند وجود آشفته‌ساز باعث بهبود در اختلاط سیال داخل کانال می‌شود، اما بر اساس نتایج بدست آمده انحراف استاندارد زاویه 15° با توجه به نمودار شکل (۱۲-ب) در مقایسه با حالت بدون آشفته‌ساز به مقدار $9/4\%$ افزایش یافته است. البته لازم به ذکر است این مقدار افزایش تاثیر چندانی بر روی الگوی پراکندگی و توزیع دما بر روی صفحه فتوولتائیک نداشته است (شکل ۱۳). در ادامه با توجه به داده‌های بدست آمده، سیستم ترکیبی از نانوسیال با درصد کسر حجمی ۴ درصد که دمای خروجی نسبت به سایر درصدهای نانوذرات و سیال خالص بیشتر بود، به همراه آشفته‌ساز 15° نیز مورد بررسی قرار گرفت تا با مقایسه معیار عملکرد و معیار انحراف استاندارد شرایط مناسب برای سیستم مورد بررسی حاصل گردد.

جدول ۳- معیار ارزیابی عملکرد و درصد انحراف سیستم ترکیبی

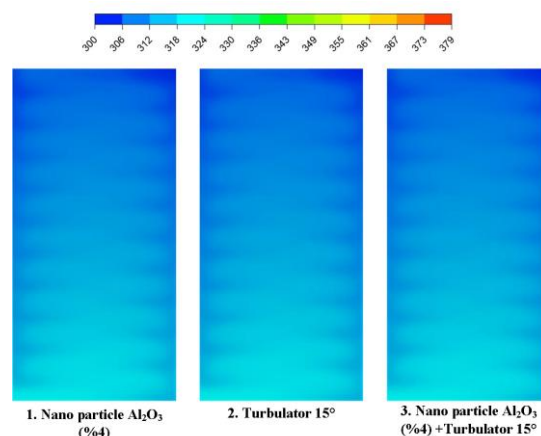
حالت سیستم	معیار ارزیابی عملکرد	درصد انحراف معیار	دمای خروجی (کلونین)
Nanoparticle 4%	۳۵۰۰۰۰	۱۴٫۵۶	۳۱۱٫۸۹
Turbulator 15°	۴۲۷۹۳۳۵	۱۴٫۶۵	۳۱۱٫۷۴
Nanoparticle 4% + turbulator 15°	۳۰۳۷۸۲۲	۱۴٫۶۶	۳۱۱٫۸۸۷

ترکیبی با نانوسیال و آشفته‌ساز تا حدی موجب بهبود در جذب حرارت از سیستم گردید، اما به دلیل افزایش مقاومت هیدرولیکی و افزایش هزینه پمپاژ، بازده کلی آن نسبت به حالت‌های ساده‌تر کمتر بوده است. همچنین اثر آشفته‌ساز در کنار نانوسیال بهبودی برای این سیستم به همراه نداشت. این نتایج نشان می‌دهد که استفاده همزمان از دو روش بهینه‌سازی لزوماً به بهبود عملکرد کلی منجر نمی‌شود و انتخاب راهکار مناسب نیازمند توجه به موازنه میان افزایش انتقال حرارت و افت فشار است. بر این اساس، بررسی‌ها نشان داد که تغییر جداگانه پارامترهایی مانند غلظت نانوذرات و زاویه آشفته‌ساز نسبت به حالت ترکیبی، برای سیستم مورد مطالعه کارآمدتر می‌باشد.

۵-۵- نتیجه‌گیری

در این پژوهش به کمک روش CFD عملکرد یکی سیستم فتوولتائیک حرارتی با حضور آشفته‌ساز، نانوسیال و ترکیب آشفته‌ساز و نانوسیال در شرایط مختلف عملیاتی بررسی گردید. با توجه به نتایج بدست آمده در این تحقیق، نتایج زیر حاصل گردید:

- بر اساس بررسی‌های انجام‌شده، دبی مناسب برای سیستم طراحی‌شده برابر با ۶۰۰ میلی‌لیتر بر دقیقه تعیین شد. افزایش دبی بیش از این مقدار، منجر به افزایش هزینه پمپاژ می‌شود که نسبت به میزان افزایش در استخراج حرارت توجیه‌پذیر نیست. در واقع، این مقدار دبی به‌عنوان آستانه‌ای در نظر گرفته می‌شود که فراتر رفتن از آن باعث غلبه هزینه‌های پمپاژ بر منافع حرارتی خواهد شد.
- در مقایسه عملکرد نانوسیال در سیستم، کسر حجمی ۴ درصد از نانوذرات بیشترین میزان استخراج حرارت را در میان درصدهای مختلف داشت، چرا که در این شرایط بیشترین دمای خروجی سیال حاصل شد. با این حال، معیار ارزیابی عملکرد سیستم با این نانوسیال حدود ۱۳/۶ درصد کمتر از سیال خالص بود که نشان‌دهنده افزایش هزینه‌های پمپاژ است.
- وجود آشفته‌ساز به دلیل بهبود اختلاط سیال، می‌تواند بر بازدهی هیدرولیکی سیستم تأثیرگذار باشد. عواملی مانند موقعیت قرارگیری، شکل، زاویه، نوع سیستم و سیال مورد استفاده تأثیر مستقیمی بر این بازدهی دارند و می‌توانند هزینه پمپاژ را افزایش دهند. در حضور



شکل ۱۴- مقایسه کانتور دمای صفحه فتوولتائیک (بر حسب کلون) در شرایط مختلف عملیاتی (۱) حضور ۴٪ حجمی نانوذره Al_2O_3 ، (۲) آشفته‌ساز ۱۵ درجه، (۳) آشفته‌ساز ۱۵ درجه همراه با ۴٪ حجمی نانوذره Al_2O_3

۵-۴- سیستم ترکیبی از نانوسیال در حضور آشفته‌ساز

به منظور مقایسه عملکرد سیستم ترکیبی نانوسیال و آشفته‌ساز، سه مقایسه برای بررسی میزان همگنی دما بر روی سطح صفحه فتوولتائیک و معیار ارزیابی عملکرد مورد بررسی قرار گرفتند. حالت‌های مورد بررسی شامل (۱) حضور ۴٪ حجمی نانوذره Al_2O_3 ، (۲) آشفته‌ساز ۱۵ درجه، (۳) آشفته‌ساز ۱۵ درجه همراه با ۴٪ حجمی نانوذره Al_2O_3 می‌باشند. بر اساس نتایج ارائه شده در شکل (۱۴) و جدول ۳، مقایسه‌ای برای بررسی میزان بهبود انتقال حرارت در سیستم ترکیبی با سیستم پایه انجام شد. نتایج نشان داد دمای خروجی سیال در سیستم ترکیبی شامل نانوسیال با غلظت ۴ درصد نانوذرات اکسید آلومینیوم و آشفته‌ساز با زاویه ۱۵ درجه، از ۳۰۰ کلون در ورودی به ۳۱۲ کلون در خروجی می‌رسد که دمای سیال خروجی در سیستم حالت بدون آشفته‌ساز و سیستم حالت سیال خالص به ترتیب ۳۱۱/۸۸ کلون و ۳۱۱/۷ کلون بود. این مقدار افزایش دمای خروجی قابل توجه نیست. همچنین میزان معیار انحراف استاندارد این حالت (سیستم ترکیبی) در مقایسه با سیال خالص و بدون آشفته‌ساز ۵/۷ درصد پایین‌تر است. بعلاوه، معیار ارزیابی عملکرد سیستم ترکیبی در مقایسه با سیستم با حالت آب خالص و سیستم با حالت آشفته‌ساز، به ترتیب به میزان ۱۳/۶ درصد و ۹/۲ درصد پایین‌تر بود، که نشان از افزایش هزینه پمپاژ نسبت به این دو حالت است. بنابراین می‌توان گفت که اگرچه سیستم

تقدیر و تشکر

این مقاله به یاد و پاسداشت استاد ارجمند و همکار گرامی، به زنده‌یاد دکتر فرامرز هرمزی تقدیم می‌گردد. یادشان همیشه گرامی باد.

تعارض منافع

نویسندگان اعلام می‌کنند که در مورد انتشار این مقاله تعارض منافع وجود ندارد.

تاییدیه اخلاقی

نویسندگان متعهد می‌شوند که مطالب این مقاله را در هیچ مجله دیگری به چاپ نرسانده‌اند.

مشارکت‌های نویسندگان

سینا طالبی: جمع‌آوری داده‌ها، تحلیل یافته‌ها، انجام محاسبات CFD و مطالعات آزمایشگاهی، نگارش و تهیه پیش‌نویس مقاله

فرامرز هرمزی: ارائه ایده تحقیق و راهنمایی علمی

امیر حیدری: راهنمایی علمی، ویرایش تخصصی مقاله، ارزیابی و تفسیر نتایج

سامان رشیدی: مشاوره علمی و ویرایش تخصصی مقاله

منابع مالی

این مقاله دارای حمایت مالی نمی‌باشد.

آشفته‌ساز با زاویه ۱۵ درجه، در مقایسه با سیستم سیال خالص بدون آشفته‌ساز، نانوسیال و سیستم ترکیبی، به ترتیب افزایش معیار ارزیابی عملکرد برابر با ۵/۵ درصد، ۲۲/۲ درصد و ۱۲ درصد مشاهده شد.

سیستم مجهز به آشفته‌ساز ۱۵ درجه، از نظر عملکرد حرارتی و هزینه پمپاژ، بین دو سیستم دیگر قرار گرفته و تعادلی مناسب میان بهره‌وری حرارتی و مصرف انرژی فراهم می‌کند.

علاوه بر دستاوردهای به‌دست‌آمده در این پژوهش، پاسخ به برخی پرسش‌های کلیدی نیازمند مطالعات و تحقیقات آتی است:

- چه شکل و موقعیتی از آشفته‌ساز منجر به بیشینه نرخ انتقال حرارت می‌شود، به‌گونه‌ای که ضمن حفظ حداقل هزینه پمپاژ، توزیع یکنواخت‌تری از دما بر سطح فتوولتائیک حاصل گردد.
- در حضور آشفته‌ساز، کدام درصد حجمی از نانوسیال‌های رایج مورد استفاده در کلکتورهای خورشیدی، منجر به راندمان بهینه‌ی حرارتی و الکتریکی خواهد شد.
- تغییرات در هندسه‌ی کانال، نوع آشفته‌ساز و سیال چه تاثیر همزمانی بر بازده حرارتی و الکتریکی دارند.

جدول ۴- علائم و اختصارات

معنی (به انگلیسی)	معنی (به فارسی)	علامت/اختصار
Specific heat capacity	ظرفیت گرمایی ویژه	$C_p \left(\frac{J}{kg \cdot K} \right)$
Specific heat capacity of base fluid	ظرفیت گرمایی ویژه سیال پایه	$C_{p_{bf}} \left(\frac{J}{kg \cdot K} \right)$
Specific heat capacity of nanofluid	ظرفیت گرمایی ویژه نانوسیال	$C_{p_{nf}} \left(\frac{J}{kg \cdot K} \right)$
Specific heat capacity of nanoparticles	ظرفیت گرمایی ویژه نانوذرات	$C_{p_{np}} \left(\frac{J}{kg \cdot K} \right)$
Computational Fluid Dynamics	دینامیک سیالات محاسباتی	CFD
Hydraulic diameter	قطر هیدرولیکی	$D_h (m)$
Friction factor	ضریب اصطکاک	f
Gravitational acceleration	شتاب گرانش	$g \left(\frac{m}{s^2} \right)$

$h \left(\frac{W}{m^2 \cdot K} \right)$	ضریب انتقال حرارت	Heat transfer coefficient
$k \left(\frac{W}{m \cdot K} \right)$	هدایت حرارتی	Thermal conductivity
$k_{bf} \left(\frac{W}{m \cdot K} \right)$	هدایت حرارتی سیال پایه	Thermal conductivity of base fluid
$k_{nf} \left(\frac{W}{m \cdot K} \right)$	هدایت حرارتی نانوسیال	Thermal conductivity of nanofluid
$k_s \left(\frac{W}{m \cdot K} \right)$	هدایت حرارتی نانوذرات	Thermal conductivity of nanoparticles
$L(m)$	طول کانال	Channel length
$\dot{m} \left(\frac{kg}{s} \right)$	دبی جرمی	Mass flow rate
$P(pa)$	فشار	Pressure
$\Delta P(pa)$	افت فشار	Pressure drop
PV	فتوولتائیک	Photovoltaic
PVT	کلکتور فتوولتائیک حرارتی	Photovoltaic Thermal Collector
$Q(W)$	نرخ انتقال حرارت	Heat transfer rate
Re	عدد رینولدز	Reynolds number
$T(K)$	دما	Temperature
$\Delta T(K)$	اختلاف دما	Temperature difference
$TES - 132$	ترمومتر لیزری	Laser Thermometer (TES-132)
$u \left(\frac{m}{s} \right)$	سرعت در جهت x	Velocity in x-direction
$v \left(\frac{m}{s} \right)$	سرعت در جهت y	Velocity in y-direction
$w \left(\frac{m}{s} \right)$	سرعت در جهت z	Velocity in z-direction
x, y, z	مختصات سه‌بعدی	Three-dimensional coordinates
$\alpha \left(\frac{m}{s^2} \right)$	ضریب نفوذ حرارتی	Thermal diffusivity
$\mu(Pa \cdot s)$	ویسکوزیته	Viscosity
$\mu_{bf}(Pa \cdot s)$	ویسکوزیته سیال پایه	Viscosity of base fluid
$\mu_{nf}(Pa \cdot s)$	ویسکوزیته نانوسیال	Viscosity of nanofluid

$\rho \left(\frac{kg}{m^3} \right)$	چگالی	Density
$\rho_{bf} \left(\frac{kg}{m^3} \right)$	چگالی سیال پایه	Density of base fluid
$\rho_{nf} \left(\frac{kg}{m^3} \right)$	چگالی نانوسیال	Density of nanofluid
$\rho_{sf} \left(\frac{kg}{m^3} \right)$	چگالی نانوذرات	Density of nanoparticles
ϕ	کسر حجمی	Volume fraction

مراجع

- [1] Bisengimana, Emmanuel, Yanping Yuan, Maxime Binama, Gaudence Nyiranzeyimana, and Jinzhi Zhou. "A review on the influence of the components on the performance of PVT modules." *Solar Energy* 226 (2021): 365-388.
- [2] Chow, Tin-Tai. "A review on photovoltaic/thermal hybrid solar technology." *Renewable Energy* 4 (2018): 88-119.
- [3] Chandrasekar, Murugesan, Sivan Suresh, Tamilkolundu Senthil Kumar, and Murugesan Ganesh Karthikeyan. "Passive cooling of standalone flat PV module with cotton wick structures." *Energy Conversion and Management* 71 (2013): 43-50.
- [4] Maadi, Seyed Reza, Hossein Sabzali, and Ahmad Arabkoohsar. "Performance characterization of nano-enhanced PV/T systems in various cross-sections, extended flow turbulators, fins, and corrugated patterns." *Renewable Energy* 229 (2024): 120720.
- [5] Fudholi, Ahmad, Nur Fariha Mohd Razali, Mohd Hafiz Ruslan, and Kamaruzzaman Sopian. "Application of nanofluids for photovoltaic thermal (PVT) collectors: A review." *Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences* 74, no. 1 (2020): 35-44.
- [6] Tripty, Tasmin Akter, and Nasrin, Rehena. "Efficiency upgrading of solar PVT finned hybrid system in Bangladesh: Flow rate and temperature influences." *Heliyon* 10, no. 7 (2024).
- [7] Lima-Téllez, T., J. F. Hinojosa, Irving Osiris Hernández-López, and S. Fernando Moreno. "Numerical study of the thermal performance of a single-channel cooling PV system using baffles and different nanofluids." *Heliyon* 10, no. 15 (2024).
- [8] Aissa, Abderrahmane, Naef A. A. Qasem, Abed Mourad, Houssein Laidoudi, Obai Younis, Kamel Guedri, and Anas Alazzam. "A review of the enhancement of solar thermal collectors using nanofluids and turbulators." *Applied Thermal Engineering* 220 (2023): 119663.
- [9] Shen, Chaoqun, Feifan Liu, Sheng Qiu, Xiangdong Liu, Feng Yao, and Yan Zhang. "Numerical study on the thermal performance of photovoltaic thermal (PV/T) collector with different parallel cooling channels." *Sustainable Energy Technologies and Assessments* 45 (2021): 101101.
- [10] Sardouei, Mohammad Mehdi, Hamid Morteza pour, and Kazem Jafari Naeimi. "Temperature distribution and efficiency assessment of different PVT water collector designs." *Sādhana* 43, no. 6 (2018): 84.
- [11] Abdollahi, A., and M. Shams. "Optimization of shape and angle of attack of winglet vortex generator in a rectangular channel for heat transfer enhancement." *Applied Thermal Engineering* 81 (2015): 376-387.
- [12] da Silva, F. A., D. J. Dezan, A. V. Pantaleao, and L. O. Salviano. "Longitudinal vortex generator applied to heat transfer enhancement of a flat plate solar water heater." *Applied Thermal Engineering* 158 (2019): 113790.
- [13] Maxwell, James Clerk. *A treatise on electricity and magnetism*, Vol. 1. Clarendon press, 1873.
- [14] Pak, Byung Chan, and Young I. Cho. "Hydrodynamic and heat transfer study of dispersed fluids with submicron metallic oxide particles." *Experimental Heat Transfer* 11, no. 2 (1998): 151-170.

[15] Einstein, Albert. Eine neue bestimmung der moleküldimensionen. ETH Zurich, 1905.

[16] Staszak, Michał, and Grażyna Musielak. "Numerical simulations of flow and heat exchange in zigzag-shaped microchannels." Applied Sciences 14, no. 21 (2024): 9826.

[17] Shah, Ramesh K., and A. Louis London. Laminar Flow Forced Convection in Ducts: A Source Book for Compact Heat Exchanger Analytical Data. Academic Press, 1978.