



Semnan University



Research Article

## Effect of Magnetic Field and Hybrid Nanofluid on Heat Transfer Through a Microchannel

Ali Salehin <sup>a</sup>, Arash Mirabdollah Lavasani <sup>b,\*</sup>, Mohammad Nimafar <sup>c</sup>, Gholamreza Salehi <sup>b</sup>, Mohammad Vahabi <sup>c</sup>

<sup>a</sup> PhD Candidate, Department of Mechanical Engineering, Central Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

<sup>b</sup> Associate Professor, Department of Mechanical Engineering, Central Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

<sup>c</sup> Assistant Professor, Department of Mechanical Engineering, Central Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

### PAPER INFO

#### Paper history:

Received: 20 August 2023

Revised: 03 February 2024

Accepted: 27 February 2024

#### Keywords:

Variable boundary condition,  
Soybean oil,  
Magnesium oxide,  
Aluminum dioxide,  
Constant heat flux.

### ABSTRACT

This numerical study examines the influence of a magnetic field and hybrid nanofluid on heat transfer in a microchannel. The microchannel with a square cross-section and dimensions of  $0.5 \times 0.5$  mm, is situated within a cube-shaped piece. A heat flux of  $3750 \text{ W/m}^2$  and a constant magnetic field of 1 tesla, perpendicular to the flow, are applied. The research employs a hybrid nanofluid, with soybean oil as the base fluid and hybrid nanoparticles comprising 75% magnesium oxide and 25% aluminum dioxide, at a volume fraction of 1 to 4%. The laminar fluid flow is used, and the volume flow inside the microchannel is 0.01, 0.025, 0.05, 0.075, and 0.1 ml/s, respectively. The numerical analysis utilizes a single-phase model, and the finite volume method is employed to solve the equations. The results indicate that applying boundary conditions of forced convection with ambient air on the five sides of the cube-shaped piece can enhance the convective heat transfer coefficient by 8.3% to 50%, compared to the absence of force convection in the faces under certain conditions.

DOI: <https://doi.org/10.22075/jme.2024.31548.2514>

© 2024 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: [arashlavasani@iauctb.ac.ir](mailto:arashlavasani@iauctb.ac.ir)

#### How to cite this article:

Salehin, A., Mirabdollah Lavasani, A., Nimafar, M., Salehi, G., & Vahabi, M. (2024). Effect of magnetic field and hybrid nanofluid on heat transfer through a microchannel. *Journal of Modeling in Engineering*, 22(78), 185-199. doi: 10.22075/jme.2024.31548.2514

## تأثیر میدان مغناطیسی و نانوسیال هیبریدی بر انتقال حرارت از یک میکروکانال

علی صالحین<sup>۱</sup>، آرش میرعبداله لواسانی<sup>۲\*</sup>، محمد نیمافر<sup>۳</sup>، غلامرضا صالحی<sup>۲</sup>، محمد وهابی<sup>۳</sup>

اطلاعات مقاله	چکیده
دریافت مقاله: ۱۴۰۲/۰۵/۲۹	مطالعه حاضر به بررسی عددی اثر میدان مغناطیسی و نانوسیال هیبریدی بر انتقال حرارت از یک میکروکانال می‌پردازد. میکروکانال با سطح مقطع مربع و ابعاد $0.5 \times 0.5$ میلی‌متر در داخل قطعه مکعبی شکل ایجاد شده است. قطعه مکعبی شکل از یک وجه تحت شار حرارتی و میدان مغناطیسی ثابت به ترتیب $3750$ وات بر مترمربع و یک تسلا بصورت عمود بر جریان قرار گرفته است. در این پژوهش از نانوسیال هیبریدی، روغن سویا به‌عنوان سیال پایه و نانوذرات هیبریدی با شرایط اختلاط $75$ درصد اکسید منیزیم و $25$ درصد دی‌اکسید آلومینیوم با کسر حجمی یک تا $4$ درصد استفاده شده است. جریان آرام و دبی حجمی‌های سیال داخل میکروکانال $0.01$ ، $0.025$ ، $0.05$ ، $0.075$ ، $0.1$ میلی‌لیتر بر ثانیه می‌باشد. در مطالعه عددی از مدل تک-فاز و برای حل معادلات از روش حجم محدود استفاده شده است. نتایج نشان می‌دهد که استفاده از شرط مرزی انتقال حرارت جابه‌جایی اجباری با هوای محیط در $5$ وجه قطعه مکعبی شکل نسبت به عدم استفاده از انتقال حرارت جابه‌جایی اجباری در وجوه می‌تواند باعث افزایش ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی بین $8/3$ تا $50$ درصد شود.
بازنگری مقاله: ۱۴۰۲/۱۱/۱۴	
پذیرش مقاله: ۱۴۰۲/۱۲/۰۸	
<b>واژگان کلیدی:</b> شرط مرزی متغیر، روغن سویا، اکسید منیزیم، دی‌اکسید آلومینیوم، شار حرارتی ثابت.	

DOI: <https://doi.org/10.22075/jme.2024.31548.2514>

© 2024 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/>)

## ۱- مقدمه

را بررسی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد عدد ناسلت و مقاومت جریان نانوسیال به ترتیب  $1/12$  تا  $1/66$  و  $1/02$  تا  $1/80$  برابر آب مقطر است. به‌آیین و نیمافر [۲] افزایش انتقال حرارت جریان دو نانوسیال در میکروکانال مستطیلی را مورد مطالعه قرار دادند و بیان کردند استفاده از نانوسیال دی‌اکسید تیتانیوم و اکسید مس ضریب انتقال حرارت را به ترتیب بین  $4-12$  و  $9-18$  درصد برای کسر حجمی‌های مختلف افزایش داد. منوری و همکاران [۳] جریان نانوسیال با پنج شکل نانوذره در میکروکانال مستقیم با چهار سطح مقطع مختلف مورد تحلیل قرار دادند. نتایج آن‌ها نشان داد بیشترین ضریب انتقال حرارت به ترتیب در میکروکانال با

امروزه با توجه به نیازمند بودن افزایش انتقال حرارت در دستگاه‌های مختلف در صنایع به ویژه در دستگاه‌های کوچک، تحقیقات زیادی در این زمینه برای پیدا کردن راهکارهای بهینه انجام شده است. با توجه به اهمیت موضوع انتقال حرارت و توسعه علم و تکنولوژی این تحقیقات با سرعت روزافزونی در حال انجام است. انتقال حرارت بالاتر نانوسیال نسبت به آب باعث استفاده از نانوسیال به عنوان سیال حامل در تجهیزات شده است. لی و همکاران [۱] به صورت آزمایشگاهی در یک میکروکانال عملکرد اتلاف حرارت جریان نانوسیال در کسر حجمی  $0/1$  تا  $0/5$  درصد

\* پست الکترونیک نویسنده مسئول: arashlavasani@iauctb.ac.ir

۱. دانشجوی دکتری، گروه مهندسی مکانیک، واحد تهران مرکزی، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

۲. دانشیار، گروه مهندسی مکانیک، واحد تهران مرکزی، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

۳. استادیار، گروه مهندسی مکانیک، واحد تهران مرکزی، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

استناد به این مقاله:

صالحین، علی، میرعبداله لواسانی، آرش، نیمافر، محمد، صالحی، غلامرضا، وهابی، محمد. (۱۴۰۳). تأثیر میدان مغناطیسی و نانو سیال هیبریدی بر انتقال حرارت از یک میکرو کانال. مدل سازی در مهندسی، ۲۲(۷۸)، ۱۸۵-۱۹۹. doi: 10.22075/jme.2024.31548.2514

قرار دادند و بیان کردند تأثیر انتشار حرارتی نانوسیال‌های رقیق در انتقال حرارت جابه‌جایی در مقیاس میکرو بیشتر از مقیاس ماکرو است.

با توجه به اینکه برخی از تجهیزات حرارتی مورد استفاده در صنعت تحت تأثیر میدان مغناطیسی قرار می‌گیرند، محققان مطالعات زیادی در زمینه تأثیرات میدان مغناطیسی بر خصوصیات جریان و انتقال حرارت در کانال‌ها انجام داده‌اند. شیخ‌پور و همکاران [۱۱] جریان یک نانوسیال در کانال موج‌دار دارای محیط متخلخل و تحت میدان مغناطیسی را تحلیل عددی کردند. آنها به نتیجه رسیدند که وجود میدان مغناطیسی در همه موارد، انتقال حرارت و افت فشار را افزایش می‌دهد. تامسه و ساهین [۱۲] ساختار جریان، تولید آنتروپی و رفتار حرارتی یک نانوسیال را تحت میدان مغناطیسی یکنواخت در یک کانال شیاردار مستطیلی بررسی کردند. بررسی آنها نشان داد که با استفاده از میدان مغناطیسی یکنواخت، لایه مرزی حرارتی در شیارهای مستطیلی نازک می‌شود و گرادیان دما در نزدیکی دیواره گرم شده افزایش می‌یابد. تأثیر همزمان کسر حجمی و میدان مغناطیس ثابت بر عملکرد حرارتی نانوسیال توسط آیدین و همکاران [۱۳] تحلیل شد و به این نتیجه رسیدند که استفاده از نانوسیال مغناطیسی و میدان مغناطیسی، سبب کاهش مقاومت حرارتی و افزایش راندمان و ضریب انتقال حرارت می‌شود. ارباب زکی یولاه و همکاران [۱۴] اثر پارامترهای مهم بر جریان نانوسیال هیریدی در حضور میدان مغناطیسی را تحلیل کردند و به این نتیجه رسیدند که سرعت انتقال انرژی نانوسیالات هیریدی نسبت به سیالات سنتی بالاتر است. سپهرنیا و همکاران [۱۵] اثر میدان مغناطیسی بر عملکرد ترموهیدرولیکی آب در میکروکانال سیلیکونی در یک تراشه الکترونیکی مطالعه کردند. آنها یافتند که برای همه دبی‌های جرمی با افزایش عدد هارتمن از صفر تا ۱۶ مقاومت حرارتی، نسبت بیشینه اختلاف دمای تراشه الکترونیکی به شار حرارتی و معیار ارزیابی عملکرد کاهش و تولید آنتروپی افزایش می‌یابد. اکبری و همکاران [۱۶] مشخصات انتقال جرم یک نانوسیال در یک میکروکانال تحت میدان مغناطیسی متناوب (AC) را مطالعه کردند و به این نتیجه رسیدند که در قدرت ۲۱ میلی‌تسلا، ماکزیم افزایش ضریب انتقال جرم کلی ۷۲/۲٪ در مقایسه با حالت غیاب میدان مغناطیسی به دست می‌آید. با توجه به تحقیقات صورت گرفته مشخص شد که

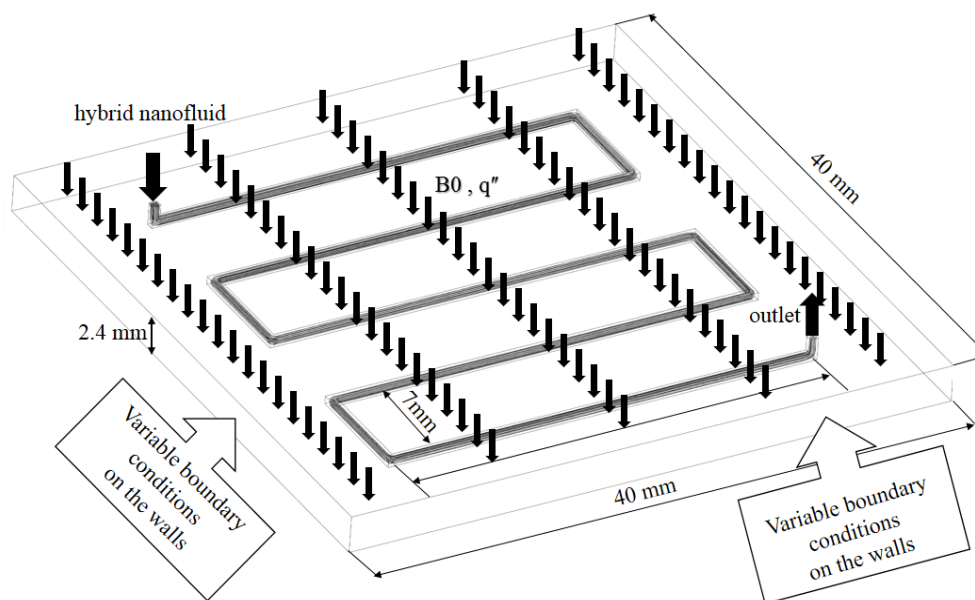
سطح مقطع مثلثی، بیضوی، شش ضلعی و دایروی حاصل شد. بررسی جریان نانوسیال در میکروکانال مستقیم با روش عددی توسط عبدالله مسعودعلی و همکاران [۴] صورت گرفت. آنها سه نوع فین مستطیلی، پیچشی و زیگزاگ را در کانال مستطیلی صاف قرار دادند و بیان کردند که فین زیگزاگ بهترین عملکرد حرارتی را دارد و فین پیچشی به طور غیر منتظره‌ای افت فشار را تا ۱۵۰ درصد نسبت به فین مستطیلی صاف کاهش می‌دهد. با توجه به خصوصیت ترموفیزیکی متفاوت نانوذرات و اثرات آنها در بهبود ضریب عملکرد حرارتی- هیدرولیکی، محققان را بر آن داشت تا از نانوذرات هیبریدی به جای نانوذره در تجهیزات حرارتی با هدف رسیدن به شرایط مطلوب استفاده کنند. مومنی شورکچالی و همکاران [۵] توانایی افزایش نرخ انتقال حرارت یک نانوسیال هیبریدی در موتورهای احتراق داخلی شبیه‌سازی عددی کردند. نتایج آنها بهبود ضریب انتقال حرارت را برای نانوسیال هیبریدی نسبت به سیال پایه نشان داد. طالبی و همکاران [۶] تأثیر جریان یک نانوسیال و نانوسیال هیبریدی در جداره بر انتقال حرارت جابه‌جایی اجباری بصورت تجربی بررسی کردند. بر اساس نتایج به دست آمده از تحقیق آنها، نانوسیال هیبریدی و نانوسیال نسبت به آب خالص انتقال حرارت جابه‌جایی را به ترتیب ۱۱/۹ و ۷/۸ درصد بهبود می‌دهند. جمعیتی و پورمحمدیان [۷] تأثیر وجود نانوسیال هیبریدی در مبدل حرارتی پیچشی دو سیاله با روش عددی مورد مطالعه قرار دادند. نتایج بررسی آنها حاکی از آن بود که استفاده از نانوسیال هیبریدی نسبت به آب سبب عملکرد حرارتی بهتری می‌شود. قنبری و هیهات [۸] به صورت آزمایشگاهی و با هدف تأثیر استفاده از نانوسیال هیبریدی بر افزایش بازده جذب انرژی تابشی خورشید یک آزمایش انجام دادند. نتایج کار آنها نشان داد که استفاده از نانوسیال هیبریدی در کسر حجمی ۰/۰۴ درصد بیش از ۹۰ درصد انرژی خورشید را جذب می‌کند. اگری و همکاران [۹] با بهره‌گیری از روش مدلسازی عددی جریان نانوسیال هیبریدی در کسر حجمی مختلف در میکروکانال در حضور مولدهای گردابی بررسی کردند. آنها در این تحقیق به این نتیجه رسیدند که نرخ انتقال حرارت و افت فشار افزایش می‌یابد. شبیه‌سازی عددی جریان نانوسیال هیبریدی در میکروکانال مستقیم با فین متخلخل توسط زی‌های و همکاران [۱۰] صورت گرفت. آنها اثرات کسر حجمی نانوذرات را نیز مورد بررسی

ترتیب  $40 \times 40 \times 2/4$  میلی‌متر است که یک میکروکانال با سطح مقطع مربع با ابعاد  $0/5 \times 0/5$  میلی‌متر و طول  $170/4$  میلی‌متر به شکل مارپیچ در آن ایجاد شده است (شکل ۱). وجه بالایی قطعه مکعبی شکل تحت شار حرارتی ثابت  $3750$  وات بر مترمربع قرار دارد و سایر وجوه تحت دو شرایط مختلف با و بدون انتقال حرارت جابه‌جایی اجباری با هوای محیط اطراف قرار گرفته است. همچنین قطعه مکعبی شکل تحت میدان مغناطیسی با قدرت ثابت  $(B_0)$  یک تسلا بصورت عمود بر هندسه و جریان است. نانوسیال هیبریدی روغن سویا-دی‌اکسید آلومینیوم-اکسید منیزیم با شرط مرزی سرعت ورودی یکنواخت و دمای ثابت وارد میکروکانال شده و پس از انتقال حرارت با شرط مرزی فشار خروجی خارج می‌شود.

مطالعه‌ای جهت تأثیر استفاده از نانوسیال هیبریدی با روغن گیاهی (روغن سویا) به عنوان سیال پایه تحت میدان مغناطیسی یکنواخت یک تسلا بر میکروکانال با شرایط مرزی متغیر در وجوه انجام نشده است. لذا در این پژوهش به بررسی انتقال حرارت، افت فشار و ضریب عملکرد نانوسیال هیبریدی روغن سویا-اکسید منیزیم-دی‌اکسید آلومینیوم در دبی حجمی، کسر حجمی‌های مختلف و در شرایط مرزی متغیر، در میکروکانال مورد بررسی قرار گرفته است.

## ۲- بیان مسأله و شرایط مرزی

هندسه مسأله عبارت است از یک قطعه مکعبی شکل از آلیاژ آلومینیوم گرید ۶۰۶۳ با ابعاد (طول و عرض و ارتفاع) به



شکل ۱- ساختار میکروکانال ایجاد شده در داخل قطعه مکعبی شکل با اعمال شار حرارتی و میدان مغناطیسی به وجه بالایی و شرایط مرزی متغیر در سایر وجوه قطعه مکعبی شکل

د- شرط عدم لغزش در مرز جامد و سیال در نظر گرفته شده است.  
ه- اثر میدان مغناطیسی یکنواخت در نظر گرفته شده است.  
و- نانوسیال هیبریدی یک سیال نیوتنی است.  
ز- کسر حجمی نانوسیال هیبریدی یک تا ۴ درصد است. با توجه به اینکه در کسر حجمی‌های پایین نانوذرات مدل تک فاز، دو فاز مخلوط و دوفاز اویلر لاگرانژی نتایج یکسان و انطباق خوبی با نتایج آزمایشگاهی دارد [۱۷]. به دلیل زمان کمتر محاسبات از مدل تکفاز استفاده شده است.

## ۳- معادلات حاکم بر مسأله و فرض‌های تحقیق

برای حل معادلات حاکم فرض‌هایی در نظر گرفته شده است که عبارت است از:

- الف- میدان جریان در میکروکانال به صورت پایدار، آرام، تراکم ناپذیر و سه بعدی در نظر گرفته شده است.
- ب- اثر انتقال حرارت تشعشی ناچیز در نظر گرفته شده است.
- ج- جریان قبل از ورود میکروکانال به شرایط توسعه یافتگی حرارتی و هیدرولیکی کامل رسیده است.

متوسط‌گیری وزنی سطحی<sup>۱</sup> و دمای توده نانوسیال هیبریدی از طریق متوسط‌گیری وزنی جرمی<sup>۲</sup> محاسبه شده است.

### ۳-۱-۲- عدد ناسلت

عدد ناسلت از رابطه (۷) به دست آمده است [۲۱].

$$Nu = \frac{h_{avg} D_s}{k} \quad (7)$$

در رابطه بالا  $k$  ضریب هدایت حرارتی و  $D_s$  قطر هیدرولیکی می‌باشد که بصورت زیر تعریف شده است [۱].

$$D_s = \frac{2W_s H_s}{W_s + H_s} \quad (8)$$

$W_s$ ،  $H_s$  به ترتیب عرض و ارتفاع سطح مقطع میکروکانال هستند.

### ۳-۱-۳- ضریب اصطکاک

ضریب اصطکاک از رابطه زیر محاسبه می‌شود.

$$f = \frac{-\frac{dP}{dx} D_s}{\frac{1}{2} \rho V^2} \quad (9)$$

### ۳-۱-۴- ضریب عملکرد حرارتی-هیدرولیکی

ضریب عملکرد حرارتی-هیدرولیکی [۲۲] به صورت زیر تعریف می‌گردد.

$$\eta = \frac{\left(\frac{Nu_{hnf}}{Nu_f}\right)}{\left(\frac{f_{hnf}}{f_f}\right)^{\frac{1}{3}}} \quad (10)$$

در رابطه (۱۰)  $Nu_{hnf}$ ،  $f_{hnf}$ ،  $Nu_f$ ،  $f_f$  به ترتیب عدد ناسلت و ضریب اصطکاک نانوسیال هیبریدی در حضور میدان مغناطیسی، و عدد ناسلت و ضریب اصطکاک برای جریان روغن سویا در حضور میدان مغناطیسی بوده است.

### ۳-۲- خواص ترموفیزیکی نانوسیال هیبریدی

نانوذرات به طور مساوی در سیال پایه توزیع و تعلیق بصورت مداوم فرض شده است. تعادل حرارتی بین نانوذرات و سیال پایه وجود دارد و هیچ سرعت لغزشی بین ذرات وجود ندارد.

### ۳-۲-۱- چگالی نانوسیال هیبریدی

چگالی نانوسیال هیبریدی از رابطه (۱۱) تعریف می‌گردد [۲۳].

$$\rho_{hnf} = (1 - \varphi)\rho_f + \varphi \rho_{hp} \quad (11)$$

در رابطه بالا  $\rho$  و  $\varphi$  به ترتیب چگالی و کسر حجمی می‌باشد. اندیس  $hp$ ،  $hnf$  و  $f$  به ترتیب برای نانوسیال

با توجه به فرض‌های فوق معادلات ناویراستوکس و انرژی بصورت زیر بیان می‌شود [۱۸، ۳].

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{V} = 0 \quad (1)$$

$$\rho (\vec{\nabla} \cdot \vec{\nabla}) \vec{V} = -\vec{\nabla} P + \mu \nabla^2 \vec{V} + F \quad (2)$$

$$\rho C_p (\vec{\nabla} \cdot \vec{\nabla} T) = k (\nabla^2 T) + q'' + \frac{J^2}{\sigma_{hnf}} \quad (3)$$

در رابطه (۲) ترم چشمه  $F$  نیروی لورنتس ناشی از میدان مغناطیسی است که به معادله ممنتوم اضافه شده است. در رابطه (۳) ترم چشمه  $q''$  ناشی از شار حرارتی و ترم چشمه  $\frac{J^2}{\sigma_{hnf}}$  ناشی از میدان مغناطیسی می‌باشد که به معادله انرژی اضافه شده است.

$T$ ،  $P$  و  $V$  به ترتیب دما، فشار و مولفه سرعت می‌باشند. نیروی لورنتس [۱۸] از رابطه زیر بدست می‌آید.

$$F = J \times B \quad (4)$$

در رابطه (۴)  $F$ ،  $J$  و  $B$  به ترتیب نیروی لورنتس، چگالی جریان و قدرت میدان مغناطیسی بر حسب تسلا می‌باشند. ضمناً چگالی جریان از رابطه (۵) محاسبه می‌شود [۱۹].

$$J = \sigma_{hnf} (E + U \times B) \quad (5)$$

در رابطه (۵)  $E$ ،  $U$ ،  $\sigma_{hnf}$  به ترتیب رسانای الکتریکی نانوسیال هیبریدی بر حسب زیمنس بر متر، میدان سرعت بر حسب متر بر ثانیه و میدان الکتریکی خارجی اعمال شده می‌باشد که در این تحقیق میدان الکتریکی خارجی صفر فرض شده است.

### ۳-۱-۱- اعداد بدون بعد و متغیرهای مرتبط

#### ۳-۱-۱-۱- ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی متوسط

ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی متوسط از رابطه زیر محاسبه می‌شود [۲۰، ۲۱].

$$h_{avg} = \frac{q''}{(T_w - T_{hnf})} \quad (6)$$

در رابطه بالا  $q''$ ،  $T_w$  و  $T_{hnf}$  به ترتیب شار حرارتی اعمال شده به سطح صفحه بالایی قطعه مکعبی شکل، دمای دیواره میکروکانال، دمای توده نانوسیال هیبریدی هستند. لازم به ذکر است دمای دیواره میکروکانال از طریق

<sup>2</sup> Mass-Weighted Average

<sup>1</sup> Area-Weighted Average

۳-۲-۶- چگالی، ویسکوزیته دینامیکی و رسانای حرارتی روغن سویا

چگالی، ویسکوزیته دینامیکی و رسانای حرارتی روغن سویا با روابط (۲۱-۲۴) تعریف شده است [۲۵-۲۶].

$$\rho = a + bT \quad (21)$$

در رابطه (۲۱) ضریب  $a$  ثابت و  $b$  ضریب ثابت با شیب منفی و  $T$  دما بر حسب سانتی گراد بوده است.

$$\mu = \vartheta \times \rho \quad (22)$$

$\vartheta$  ویسکوزیته سینماتیکی بر حسب میلی مترمربع بر ثانیه با رابطه (۲۳) تعریف می شود، که  $T$  در این رابطه دما بر حسب کلوین است.

$$\ln(\vartheta) = A + \frac{B}{T} + \frac{C}{T^2} \quad (23)$$

$$k(T) = aT^2 + bT + c \quad (24)$$

در رابطه (۲۴)  $a$ ،  $b$  و  $c$  ضرایب ثابت و  $T$  دما بر حسب سانتی گراد است.

جدول ۱- مشخصات ترموفیزیکی نانوذرات [۲۷]

دی اکسید آلومینیوم	اکسید منیزیم	
۳۹۷۰	۳۵۶۰	چگالی ( $kg/m^3$ )
۷۶۵	۹۵۵	ظرفیت گرمایی ویژه ( $J/kg.K$ )
۴۰	۴۵	رسانای حرارتی ( $W/m.K$ )
$10^{-12}$	$10^{-14}$	رسانای الکتریکی ( $S/m$ )

#### ۴- روش حل و اعتبارسنجی روش حل عددی

در این مطالعه برای حل معادلات حاکم از روش حجم محدود و به کمک نرم افزار انسیس فلونت ۲۰۲۱ انجام شده است. برای وابسته کردن سرعت و فشار، الگورتیم سیمپل انتخاب شده است. در گسسته سازی مولفه فشار از روش مرتبه دوم و برای گسسته سازی جمله جابه جایی و پخش از روش بالادست مرتبه دوم استفاده شده است. معیار همگرایی معادلات پیوستگی، ممنوتوم و انرژی  $10^{-12}$  بوده است.

#### ۴-۱- استقلال از شبکه محاسباتی

در این مطالعه از مش حجمی poly-hexcore استفاده گردیده است. جهت حل دقیق تر انتقال حرارت، نزدیک دیواره

هیبریدی، نانوذرات هیبریدی و سیال پایه (روغن سویا) بوده است.

#### ۳-۲-۲- ظرفیت گرمایی ویژه نانوسیال هیبریدی

ظرفیت گرمایی ویژه ( $C_p$ ) نانوسیال هیبریدی از رابطه زیر تعریف می شود [۲۳].

$$(\rho C_p)_{hnf} = (1 - \varphi)(\rho C_p)_f + \varphi(\rho C_p)_{hp} \quad (12)$$

#### ۳-۲-۳- رسانای حرارتی نانوسیال هیبریدی

رسانای حرارتی ( $k$ ) نانوسیال هیبریدی از رابطه زیر تعریف می گردد [۲۳].

$$\frac{k_{hnf}}{k_f} = \frac{k_{hp} + 2k_f - 2(k_{hp} - k_f)\varphi}{k_{hp} + 2k_f + (k_{hp} - k_f)\varphi} \quad (13)$$

#### ۳-۲-۴- ویسکوزیته دینامیکی نانوسیال هیبریدی

برای تحلیل ویسکوزیته دینامیکی ( $\mu$ ) نانوسیال هیبریدی از رابطه برینکمن (۱۴) استفاده شده است [۲۳].

$$\mu_{hnf} = \frac{\mu_f}{(1 - \varphi)^{2.5}} \quad (14)$$

#### ۳-۲-۵- رسانای الکتریکی نانوسیال هیبریدی

رسانای الکتریکی ( $\sigma$ ) نانوسیال هیبریدی از رابطه مکسول [۲۳-۲۴] استفاده شده است.

$$\frac{\sigma_{hnf}}{\sigma_f} = 1 + \frac{3\left(\frac{\sigma_{hp}}{\sigma_f} - 1\right)\varphi}{\left(\frac{\sigma_{hp}}{\sigma_f} + 2\right) - \left(\frac{\sigma_{hp}}{\sigma_f} - 1\right)\varphi} \quad (15)$$

در روابط بالا کسر حجمی، چگالی، ظرفیت گرمایی ویژه، رسانای حرارتی و رسانای الکتریکی نانوذرات هیبریدی بصورت زیر بیان می شود و مقادیر آن در جدول ۱ آورده شده است [۲۳].

$$\varphi = \varphi_1 + \varphi_2 \quad (16)$$

$$\rho_{hp} = \frac{\varphi_1 \rho_1 + \varphi_2 \rho_2}{\varphi} \quad (17)$$

$$(C_p)_{hp} = \frac{\varphi_1 (C_p)_1 + \varphi_2 (C_p)_2}{\varphi} \quad (18)$$

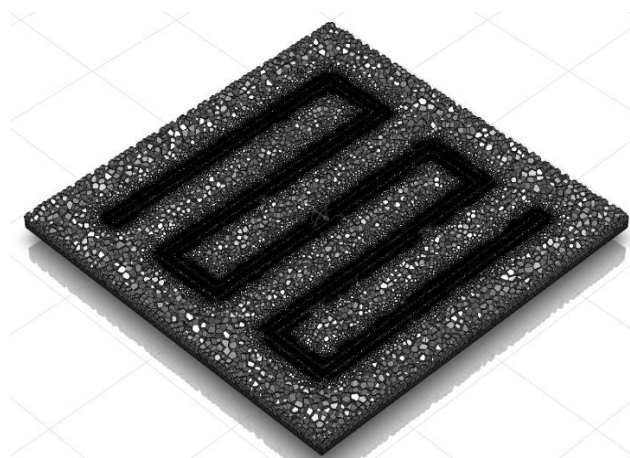
$$k_{hp} = \frac{\varphi_1 k_1 + \varphi_2 k_2}{\varphi} \quad (19)$$

$$\sigma_{hp} = \frac{\varphi_1 \sigma_1 + \varphi_2 \sigma_2}{\varphi} \quad (20)$$

جدول ۲- دمای میکروکانال در شبکه بندی‌های مختلف

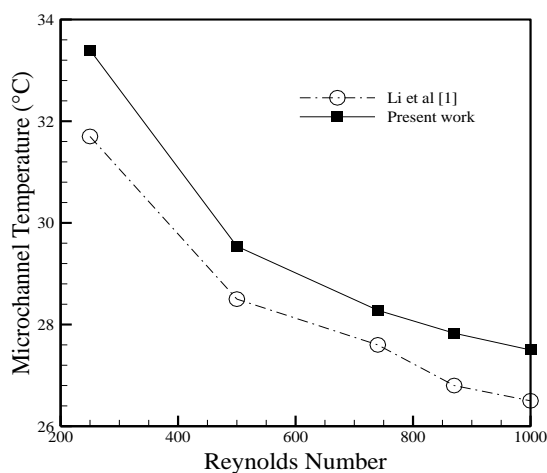
حالت	تعداد سلول	دمای دیواره میکروکانال (K)
اول	۱۶۵۷۹۶	۳۱۹/۶۶
دوم	۴۴۷۹۸۱	۳۱۹/۶۳
سوم	۸۱۸۸۹۲	۳۱۹/۵۹۶
چهارم	۱۰۱۷۹۴۶	۳۱۹/۵۹۰

میکروکانال تعداد ۱۰ لایه برای لایه مرزی ایجاد شده است (شکل ۲). برای استقلال حل از تعداد شبکه محاسباتی، چهار شبکه مختلف انتخاب شده است (جدول ۲) و برای شرایط (شار حرارتی ۳۷۵۰ وات بر مترمربع، نانوسیال هیبریدی روغن سویا-اکسیدمنیزیم-دی‌اکسیدآلومینیوم، در نسبت اختلاط ۱:۱ نانوذرات در سیال پایه، کسر حجمی ۴ درصد، قدرت میدان مغناطیسی یک تسلا، دبی حجمی ۰/۱ میلی‌لیتر بر ثانیه) مطالعه شده است. همانطور که در جدول ۲ مشخص است در تعداد شبکه ۸۱۸۸۹۲ نتایج حل تقریباً مستقل از تعداد شبکه بوده است.



شکل ۲- نمایی از شبکه بندی poly-hexcore قطعه مکعبی شکل و میکروکانال ایجاد شده در آن

ناسلت بین کار تجربی با روش حل عددی حدوداً بین ۱/۵۸ تا ۲/۶۷ درصد بوده است.



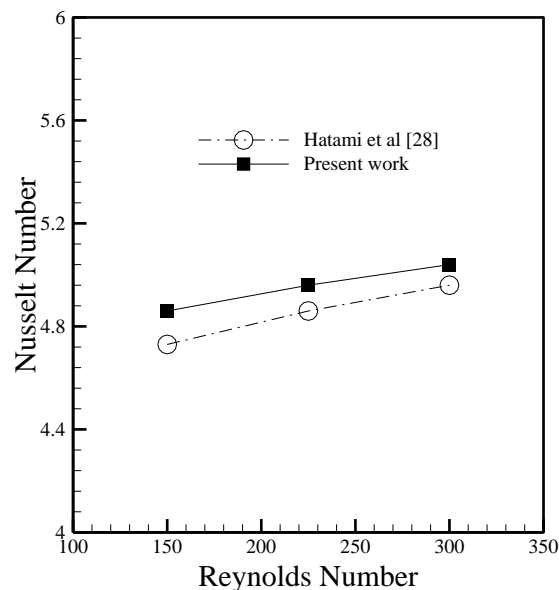
شکل ۳- مقایسه کار تجربی لی و همکاران [۱] با کار حاضر برای تغییرات دمای میکروکانال با عدد رینولدز

#### ۲-۴- اعتبار سنجی روش حل عددی با کار تجربی

برای اعتبار سنجی انتقال حرارت، حل عددی حاضر برای جریان نانوسیال آب-دی‌اکسیدآلومینیوم در کسر حجمی ۰/۵ درصد و عدد رینولدز ۲۵۰ تا ۱۰۰۰ با نتایج کار تجربی لی و همکاران [۱] مقایسه شده است. همانطور که در شکل (۳) مشاهده می‌شود حل عددی همخوانی خوبی با کار تجربی دارد و اختلاف دمای دیواره حدوداً بین ۳/۷ تا ۵/۳ درصد است که برای حل عددی قابل قبول است.

برای اعتبار سنجی میدان مغناطیسی یکنواخت، حل عددی با کار تجربی حاتمی و همکاران [۲۸] در شرایط عدد هارتمن  $10^4 \times 10^3 / 136$ ، ظرفیت حرارتی ثابت ۱۲۶ وات، نانوسیال آب-اکسید آهن با کسر حجمی ۰/۱ درصد، در نقطه  $\frac{x}{D} = 133$  لوله یک متری مقایسه شده است. همانطور که در شکل (۴) مشاهده شده است درصد خطا مقدار عدد

همانطور که در روابط ۲۱ و ۲۴ مشخص شده است خصوصیات ترموفیزیکی روغن سویا تابع دما است. تأثیر خنک کاری میکروکانال و نانوسیال هیبریدی با استفاده از شرط مرزی انتقال حرارت جابه‌جایی اجباری با هوای محیط در دبی حجمی‌های پایین بسیار بالاتر از دبی حجمی‌های بالا است. همین امر سبب می‌شود چگالی و رسانای حرارتی روغن سویا (نانوسیال هیبریدی) در دبی حجمی‌های پایین (۰/۰۱ میلی‌لیتر بر ثانیه) در شرط مرزی انتقال حرارت جابه‌جایی اجباری با هوای محیط نسبت به بدون حضور آن به ترتیب ۷/۲۷ و ۸/۲ درصد بیشتر شود. با افزایش دبی حجمی و کمتر شدن تأثیر شرط مرزی انتقال حرارت جابه‌جایی اجباری با هوای محیط در خنک کردن میکروکانال و نانوسیال، چگالی و رسانای حرارتی نانوسیال هیبریدی در دبی حجمی (۰/۱ میلی‌لیتر بر ثانیه) برای شرط مرزی انتقال حرارت جابه‌جایی اجباری با هوای محیط نسبت به بدون حضور آن به ترتیب ۰/۰۰۱ و ۰/۱۴ درصد بیشتر می‌باشد (شکل ۵-الف، شکل ۵-د). با شرط مرزی انتقال حرارت جابه‌جایی اجباری با هوای محیط نسبت به بدون حضور آن باعث کاهش دمای نانوسیال هیبریدی و افزایش چگالی بین ۰/۰۰۱ تا ۷/۲۷ درصد (شکل ۵-الف)، ویسکوزیته دینامیکی بین ۴/۶۵ تا ۴۴/۲۵ درصد (شکل ۵-ب)، ظرفیت گرمایی ویژه بین ۰/۱۴ تا ۰/۴ درصد (شکل ۵-ج) و رسانای حرارتی بین ۰/۱۴ تا ۸/۲ درصد (شکل ۵-د) می‌شود. با افزایش دبی حجمی، سرعت عبور نانوسیال هیبریدی از میکروکانال بیشتر شده است و به تبع آن نانوسیال هیبریدی در حجم معین فرصت کمتری برای گرم شدن دارد. در نتیجه دمای نانوسیال هیبریدی نیز کمتر شده است. با توجه به اینکه خواص روغن سویا تابع دما است. این کاهش دمای نانوسیال باعث افزایش چگالی به مقدار ۷/۳۶ و ۱۴/۱۰ درصد (در شکل ۵-الف)، ویسکوزیته دینامیکی به مقدار ۸۷/۶۵ و ۹۲/۷۸ درصد (شکل ۵-ب)، ظرفیت گرمایی ویژه به مقدار ۰/۲۱ و ۰/۴۶ درصد (شکل ۵-ج) و رسانای حرارتی نانوسیال هیبریدی به مقدار ۹/۳۵ و ۱۶/۶۶ درصد (شکل ۵-د) به ترتیب در شرط مرزی با و بدون انتقال حرارت جابه‌جایی اجباری با هوای محیط از دبی حجمی ۰/۰۱ تا ۰/۱ میلی‌لیتر بر ثانیه شده است.



شکل ۴- مقایسه کار تجربی حاتمی و همکاران [۲۸] با کار حاضر برای تغییرات عدد ناسلت با عدد رینولدز

## ۵- بررسی نتایج و بحث

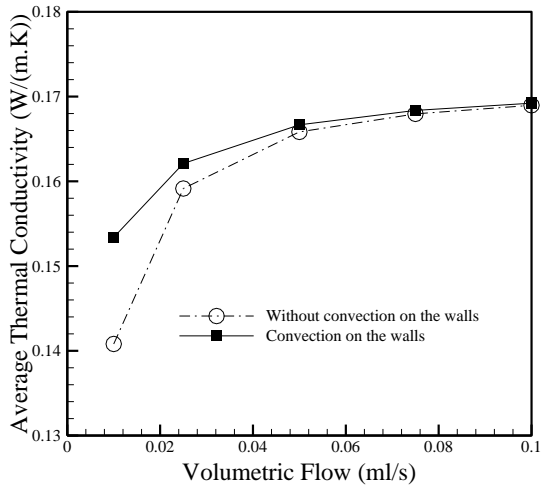
### ۵-۱- بررسی تأثیر تغییر شرایط مرزی وجوه قطعه مکعبی شکل در انتقال حرارت و مشخصات جریان نانوسیال هیبریدی تحت میدان مغناطیسی

در این بخش تأثیر تغییر شرایط مرزی بصورت با و بدون انتقال حرارت جابه‌جایی اجباری با هوای محیط در ۵ وجه قطعه مکعبی شکل در انتقال حرارت و مشخصات جریان نانوسیال هیبریدی (با کسر حجمی یک درصد، شرایط اختلاط ۲۵ درصد دی‌اکسید آلومینیوم و ۷۵ درصد اکسید-منیزیم در روغن سویا، دبی حجمی ۰/۰۱ تا ۰/۱ میلی‌لیتر بر ثانیه، شار حرارتی ۳۷۵۰ وات بر مترمربع و قدرت میدان مغناطیسی یکنواخت یک تسلا) بررسی شده است.

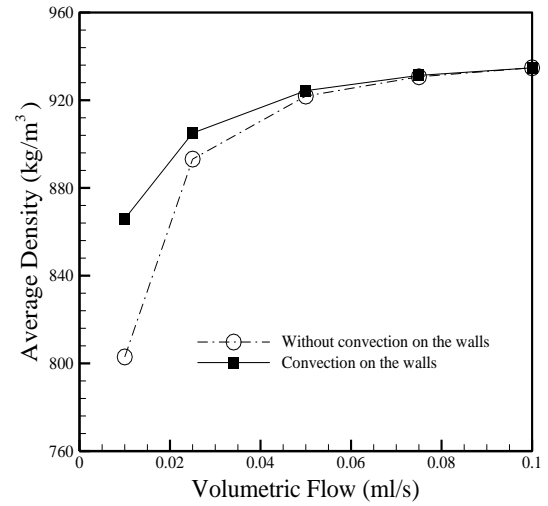
### ۵-۱-۱- تغییرات خصوصیات ترموفیزیکی نانوسیال هیبریدی

در شکل (۵) تغییرات خصوصیات ترموفیزیکی نانوسیال هیبریدی با دبی حجمی تحت میدان مغناطیسی در اثر تغییر شرایط مرزی در ۵ وجه قطعه مکعبی شکل نشان داده شده است. هنگامی که از شرط مرزی انتقال حرارت جابه‌جایی اجباری با هوای محیط در ۵ وجه قطعه مکعبی شکل با کمک فن استفاده می‌کنیم، باعث کاهش دمای دیواره میکروکانال و به تبع آن کاهش دمای نانوسیال هیبریدی شده است.



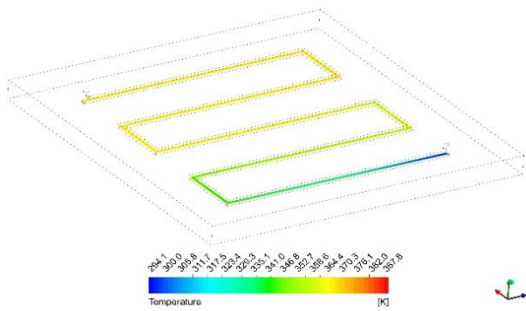


(د) رسانای حرارتی

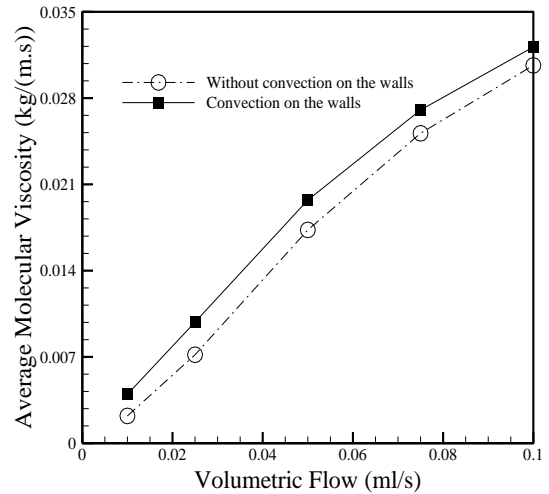


(الف) چگالی دینامیکی

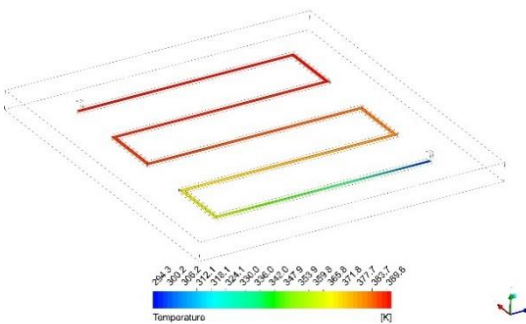
شکل ۵- تغییرات خصوصیات ترموفیزیکی نانوسیال هیبریدی با دبی حجمی تحت میدان مغناطیسی در اثر تغییر شرایط مرزی در ۵ وجه قطعه مکعبی شکل



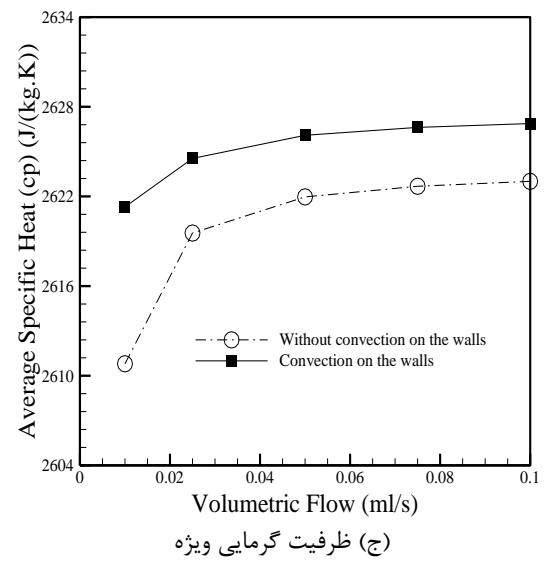
(الف) در شرط مرزی انتقال حرارت جابه‌جایی اجباری با هوای محیط در وجوه



(ب) ویسکوزیته مولکولی



(ب) در شرایط مرزی بدون انتقال حرارت جابه‌جایی اجباری با هوای محیط در وجوه

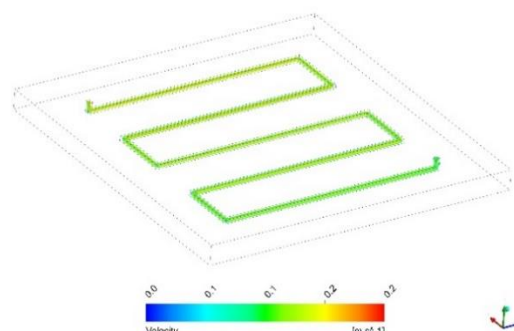


(ج) ظرفیت گرمایی ویژه

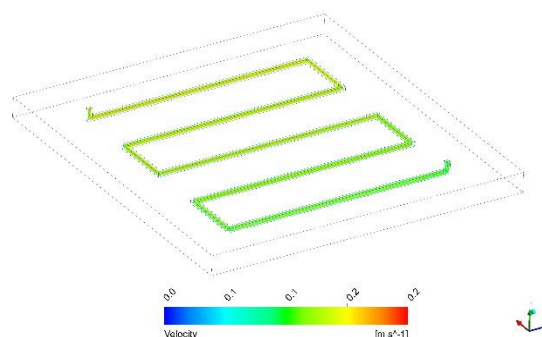
شکل ۶- کانتور دما برای جریان نانوسیال هیبریدی در میکروکانال در حالت ( $B_0=1\text{ Tesla}$ ,  $q''=3750\text{ W/m}^2$ ,  $Q=0.025\text{ ml/s}$ )

### کانتورهای دما و جریان در میکروکانال

شکل های (۶) و (۷) به ترتیب کانتور دما و جریان نانوسیال هیبریدی برای دبی حجمی  $0.025$  میلی لیتر بر ثانیه در شرایط مرزی با و بدون انتقال حرارت جابه جایی اجباری در وجوه قطعه مکعبی شکل نشان داده شده است. اگر از شرط مرزی انتقال حرارت جابه جایی در وجوه استفاده شود دمای نانوسیال هیبریدی کمتر شده است (شکل ۶). همچنین بیشینه سرعت جریان در مرکز میکروکانال و کمترین مقدار سرعت در نزدیکی دیواره ها می باشد (شکل ۷).



(الف) در شرط مرزی انتقال حرارت جابه جایی اجباری با هوای محیط در وجوه



(ب) در شرط مرزی بدون انتقال حرارت جابه جایی اجباری با هوای محیط در وجوه  
شکل ۷- کانتور سرعت برای جریان نانوسیال هیبریدی در میکروکانال در حالت

$$(B_0=1\text{ Tesla}, q''=3750\text{ W/m}^2, Q=0.025\text{ ml/s})$$

### ۵-۱-۲- ضریب انتقال حرارت جابه جایی متوسط

در شکل (۸) ضریب انتقال حرارت جابه جایی متوسط در دبی حجمی و شرایط مرزی مختلف وجوه نشان داده شده است.

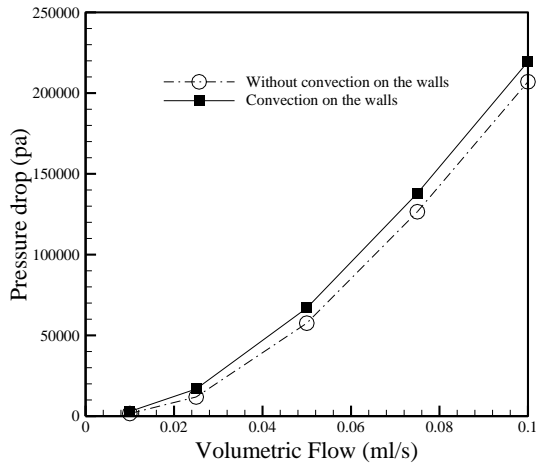
### ۵-۱-۲-۱- تأثیر شرط مرزی با و بدون انتقال حرارت جابه جایی اجباری در وجوه

هنگامی که از شرط مرزی انتقال حرارت جابه جایی اجباری با هوای محیط در  $5$  وجه قطعه مکعبی شکل با کمک فن استفاده می شود، دمای وجوه قطعه مکعبی و دیواره میکروکانال کمتر شده است، در نتیجه اختلاف دمای میکروکانال و نانوسیال هیبریدی عبوری کاهش یافته است. با توجه به رابطه  $6$  کاهش اختلاف دمای میکروکانال و نانوسیال هیبریدی باعث افزایش ضریب انتقال حرارت جابه جایی متوسط می گردد. از طرفی کاهش دمای دیواره میکروکانال باعث کاهش دمای نانوسیال هیبریدی می شود و به تبع آن باعث افزایش چگالی، ظرفیت گرمایی ویژه و رسانای حرارتی (قسمت ۵-۱-۱) می شود. مجموع این دلایل باعث افزایش ضریب انتقال حرارت جابه جایی متوسط به مقدار قابل توجه در حدود  $50\%$  درصد در دبی حجمی  $0.025$  میلی لیتر بر ثانیه شده است. در دبی حجمی بالا ( $0.1$  میلی لیتر بر ثانیه) به دلیل اثرگذاری کمتر شرط مرزی انتقال حرارت جابه جایی اجباری و مقدار افزایش کمتر در چگالی، ظرفیت گرمایی ویژه و رسانای حرارتی که در شکل (۵-الف، ج و د) و توضیحات قسمت ۵-۱-۱ ارائه شده است، ضریب انتقال حرارت جابه جایی متوسط با شرط مرزی انتقال حرارت جابه جایی اجباری نسبت به بدون حضور آن  $8/3\%$  درصد افزایش داشته است (شکل ۸).

### ۵-۱-۲-۲- تأثیر افزایش دبی حجمی بر ضریب انتقال حرارت جابه جایی متوسط

با افزایش دبی حجمی نانوسیال هیبریدی در هر دو شرط مرزی سرعت افزایش و ضخامت لایه مرزی کاهش می یابد، که باعث افزایش گرادیان سرعت و دما شده و در نتیجه انتقال حرارت افزایش می یابد. نکته دوم اینکه با افزایش دبی حجمی، حجم بیشتر نانوسیال در زمان معین گرمای بیشتری را دفع می کند، نکته سوم با افزایش دبی حجمی دمای نانوسیال هیبریدی کمتر می شود و باعث افزایش چگالی، ظرفیت گرمایی ویژه و رسانای حرارتی می شود (قسمت ۵-۱-۱). در نتیجه ضریب انتقال حرارت جابه جایی متوسط با افزایش دبی حجمی از  $0.025$  تا  $0.1$  میلی لیتر بر ثانیه در شرایط عدم استفاده از انتقال حرارت جابه جایی اجباری در وجوه قطعه مکعبی شکل  $24/25\%$  درصد افزایش یافته است. ضریب انتقال حرارت جابه جایی متوسط با شرط مرزی انتقال حرارت جابه جایی اجباری با هوای محیط علاوه بر مواردی که ذکر شده است تحت تأثیر انتقال حرارت جابه جایی اجباری از وجوه نیز هست، و همانطور که قبلاً

تحت شرایط مرزی با انتقال حرارت جابه‌جایی اجباری با هوای محیط نسبت به بدون حضور آن خنک‌تر شده است. خنک‌تر شدن نانوسیال هیبریدی باعث افزایش ویسکوزیته بین ۴/۶۵ و ۴۴/۲۵ درصد شده است (شکل ۵-ب)، که به تبع آن افت فشار بین ۵/۶۷ و ۴۳/۷۳ درصد افزایش داشته است (شکل ۹).



شکل ۹- تغییرات افت فشار با دبی حجمی نانوسیال هیبریدی تحت میدان مغناطیسی با دو شرط مرزی با و بدون انتقال حرارت جابه‌جایی اجباری با هوای محیط

### ۵-۲- بررسی تأثیر درصد کسرحجمی و درصد اختلاط نانوذرات در سیال پایه در انتقال حرارت و مشخصات جریان در حضور میدان مغناطیسی

در جداول ۳ و ۴ تأثیر درصد کسرحجمی ۱، ۲، ۳ و ۴ درصد در شرایط اختلاط نانوذرات ۲۵ درصد دی‌اکسید آلومینیوم و ۷۵ درصد اکسید منیزیم در سیال پایه (روغن سویا)، دبی-حجمی ۰/۰۲۵ میلی‌لیتر بر ثانیه، میدان مغناطیسی با قدرت یک تسلا، شار حرارتی ۳۷۵۰ وات بر مترمربع و شرط مرزی انتقال حرارت جابه‌جایی اجباری با هوای محیط در ۵ وجه قطعه مکعبی شکل، مشخصات جریان و خصوصیات ترموفیزیکی نانوسیال نشان داده شده است.

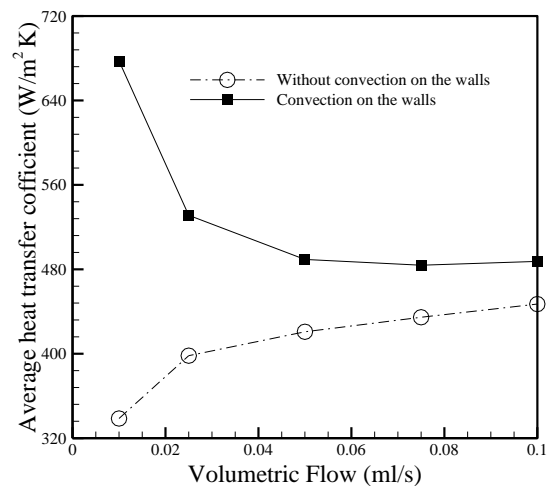
### ۵-۲-۱- تأثیر افزایش کسرحجمی بر ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی متوسط

در جدول ۳ نشان می‌دهد که با افزایش کسرحجمی نانوسیال هیبریدی از یک تا ۴ درصد، چگالی و رسانای حرارتی نانوسیال هیبریدی به ترتیب ۸/۴۴ و ۸/۳۲ درصد افزایش می‌یابد. در نتیجه انتقال حرارت بین دیواره میکروکانال و نانوسیال هیبریدی افزایش می‌یابد. این موجب کاهش اختلاف دمای میکروکانال و نانوسیال

اشاره شد اثر آن با افزایش دبی‌حجمی کمتر شده است. تا دبی‌حجمی ۰/۰۷۵ میلی‌لیتر بر ثانیه، اختلاف دمای میکروکانال و نانوسیال هیبریدی بیشتر شده است که باعث کاهش ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی به مقدار ۴۸۳/۷۷ وات بر مترمربع کلون شده است و سپس با افزایش بیشتر دبی‌حجمی افزایش یافته است (شکل ۸).

### ۵-۱-۳- افت فشار

تأثیر دبی‌حجمی و تغییر شرط مرزی بر افت فشار به شرح ذیل توضیح می‌گردد.



شکل ۸- تغییر ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی با دبی‌حجمی نانوسیال هیبریدی تحت میدان مغناطیسی با دو شرط مرزی با و بدون انتقال حرارت جابه‌جایی اجباری با هوای محیط

### ۵-۱-۳-۱- تأثیر افزایش دبی‌حجمی بر افت فشار

افزایش دبی‌حجمی نانوسیال هیبریدی باعث افزایش سرعت و اندازه حرکت جریان می‌شود که خود اولین عامل افزایش فشار است. تعداد زانویی‌ها به کار رفته در میکروکانال با توجه به رابطه  $\Delta p = k \frac{v^2}{2g}$  دومین عامل افزایش افت فشار بوده است. افزایش ویسکوزیته و مقاومت در مقابل جاری شدن نانوسیال هیبریدی به دلیل کاهش دمای نانوسیال هیبریدی و وابستگی ویسکوزیته دینامیکی روغن سویا به تغییرات دما (شکل ۵-ب) سومین عامل افزایش افت فشار بوده است. افت فشار با افزایش دبی‌حجمی نانوسیال هیبریدی از ۰/۱ تا ۰/۱ میلی‌لیتر بر ثانیه برای شرط مرزی با و بدون انتقال حرارت جابه‌جایی با هوای محیط به ترتیب برابر ۹۸/۶۸ و ۹۹/۲۱ درصد افزایش داشته است (شکل ۹).

۵-۱-۳-۲- تأثیر تغییر شرط مرزی وجوه بر افت فشار دمای نانوسیال هیبریدی در جریان نانوسیال هیبریدی

### ۶- نتیجه گیری

در این مطالعه اثر نانوسیال هیبریدی دی‌اکسید آلومینیوم-اکسید منیزیم-روغن سویا با درصد اختلاط ۲۵-۷۵ و کسر-حجمی یک درصد در میکروکانال داخل قطعه مکعبی شکل که یک وجه آن تحت شار حرارتی ثابت ۳۷۵۰ وات بر مترمربع و سایر وجوه قطعه مکعبی شکل تحت شرایط مرزی متغیر بوده است، در حضور میدان مغناطیسی ثابت با قدرت یک تسلا بصورت عمود بر جریان، مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین تأثیر کسر حجمی یک تا ۴ درصد در شرایط اختلاط ۲۵ درصد دی‌اکسید آلومینیوم ۷۵ درصد اکسید-منیزیم در روغن سویا با حضور میدان مغناطیسی با قدرت یک تسلا و شرط مرزی انتقال حرارت جابه‌جایی اجباری با هوای محیط در ۵ وجه قطعه مکعبی شکل در انتقال حرارت و مشخصات جریان بررسی شده است. نتایج حاصل از این مطالعه به شرح ذیل می‌باشد:

۱- اثر شرط مرزی انتقال حرارت جابه‌جایی اجباری با هوای محیط در ۵ وجه قطعه مکعبی بر ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی متوسط در دبی‌های پایین تر بسیار بیشتر از دبی‌های بالاتر می‌باشد. به طوری که با شرط مرزی انتقال حرارت جابه‌جایی اجباری با هوای محیط نسبت به بدون حضور آن، ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی متوسط در دبی‌های ۰/۱ میلی‌لیتر بر ثانیه حدوداً ۵۰ درصد و در دبی‌های بالاتر (۰/۱ میلی‌لیتر بر ثانیه) ۸/۳ درصد افزایش داشته است.

۲- افت فشار جریان نانوسیال هیبریدی با کسر حجمی یک درصد تحت میدان مغناطیسی در هر دو شرایط مرزی با و بدون انتقال حرارت جابه‌جایی اجباری وجوه قطعه مکعبی-شکل با هوای محیط، با افزایش دبی‌های نانوسیال از ۰/۱ تا ۰/۱ میلی‌لیتر بر ثانیه به ترتیب ۹۸/۶۸ و ۹۹/۲۱ درصد افزایش داشته است.

۳- افت فشار جریان نانوسیال هیبریدی با کسر حجمی یک درصد تحت میدان مغناطیسی در شرایط مرزی انتقال حرارت جابه‌جایی اجباری وجوه قطعه مکعبی شکل با هوای محیط نسبت به بدون حضور آن بین ۵/۶۷ و ۴۳/۷۳ درصد بیشتر شده است.

۴- ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی متوسط برای نانوسیال هیبریدی با شرایط اختلاط ۲۵ درصد دی‌اکسید آلومینیوم و ۷۵ درصد اکسید منیزیم در روغن سویا با افزایش کسر-حجمی یک تا ۴ درصد ۸/۱۶ درصد افزایش داشته است.

هیبریدی شده است، و با توجه به رابطه ۶، ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی متوسط افزایش داشته است. ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی متوسط با افزایش درصد کسر-حجمی از یک تا ۴ درصد نانوسیال هیبریدی ۸/۱۶ درصد افزایش داشته است (جدول ۴).

### ۵-۲-۲- تأثیر افزایش کسر حجمی بر افت فشار

همانطور که در جدول ۳ مشخص است با افزایش کسر-حجمی نانوسیال هیبریدی از یک تا ۴ درصد، ویسکوزیته دینامیکی ۶/۴۹ درصد افزایش یافته است که باعث افزایش اصطکاک نانوسیال هیبریدی با سطوح داخلی دیواره میکروکانال شده است. به همین خاطر با افزایش کسر حجمی نانوسیال هیبریدی از یک تا ۴ درصد افت فشار ۷/۱۰ درصد بیشتر شده است (جدول ۴).

### ۵-۲-۳- تأثیر افزایش کسر حجمی بر ضریب عملکرد

#### حرارتی- هیدرولیکی

همانطور که در جدول ۴ مشخص است با توجه اثر مطلوب‌تر انتقال حرارت نسبت به ضریب اصطکاک، ضریب عملکرد برای تمامی کسر حجمی یک تا ۴ درصد بالاتر از یک می‌باشد. بنابراین استفاده از نانوسیال‌های هیبریدی با شرایط ذکر شده توصیه می‌شود.

### جدول ۳- تغییرات خصوصیات ترموفیزیکی نانوسیال هیبریدی

بر حسب کسر حجمی

کسر حجمی ( $\phi$ )	چگالی ( $kg/m^3$ )	رسانای حرارتی ( $W/m.k$ )	ویسکوزیته دینامیکی ( $kg/m.s$ )
۱	۹۰۵/۰۲	۰/۱۶۲۱۰۰	۰/۰۰۹۸۲۶۲
۲	۹۳۲/۸۵	۰/۱۶۶۹۰۶	۰/۰۱۰۰۴۳۳
۳	۹۶۰/۶۸	۰/۱۷۱۸۱۱	۰/۰۱۰۲۷۰۶
۴	۹۸۸/۵۲	۰/۱۷۶۸۱۸	۰/۰۱۰۵۰۸۵

### جدول ۴- تغییرات مشخصات جریان و انتقال حرارت نانوسیال

هیبریدی بر حسب کسر حجمی

کسر حجمی ( $\phi$ )	ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی ( $w/m^2.k$ )	افت فشار ( $pa$ )	ضریب عملکرد
۱	۵۳۱/۲۰	۱۶۸۰۸/۷۶	۱/۱۶۳
۲	۵۴۶/۶۵	۱۷۲۱۸/۴۸	۱/۱۶۳
۳	۵۶۲/۳۹	۱۷۶۴۶/۵۷	۱/۱۶۳
۴	۵۷۸/۴۳	۱۸۰۹۳/۷۳	۱/۱۶۳

Nu	عدد ناسلت	۵- افت فشار نانوسیال هیبریدی برای شرایط اختلاط ۲۵ درصد دی اکسید آلومینیوم و ۷۵ درصد اکسید منیزیم در روغن سویا با افزایش کسر حجمی از یک تا ۴ درصد ۷/۱۰ درصد افزایش داشته است.
P	فشار	۶- با توجه به اینکه ضریب عملکرد برای تمامی کسر حجمی یک تا ۴ درصد در شرایط اختلاط ۲۵ درصد دی اکسید- آلومینیوم و ۷۵ درصد اکسید منیزیم در روغن سویا بالاتر از یک می باشد. بنابراین استفاده از نانوسیال های هیبریدی توصیه می شود.
q"	شار حرارتی	
T	دما	
V	میدان سرعت	
W	عرض میکروکانال	
<b>علائم یونانی</b>		
$\mu$	ویسکوزیته دینامیکی	
$\nu$	ویسکوزیته سینماتیکی	
$\rho$	چگالی	
$\sigma$	رسانای الکتریکی	B قدرت میدان مغناطیسی ( تسلا )
$\varphi$	کسر حجمی	Cp ظرفیت گرمای ویژه
<b>زیر نویس</b>		
avg	متوسط	Ds قطر هیدرولیکی
f	سیال پایه	E میدان الکتریکی خارجی
hnf	نانوسیال هیبریدی	f ضریب اصطکاک
hp	نانوذره هیبریدی	F نیروی لورنتس
w	دیواره میکروکانال	H ارتفاع میکروکانال
		h ضریب انتقال حرارت جابه جایی
		J شدت جریان الکتریکی
		K رسانای حرارتی

## ۸- مراجع

- [1] C. Li, J. Huang, Y. Shang, and H. Huang. "Study on the flow and heat dissipation of water-based alumina nanofluids in microchannels." *Case Studies in Thermal Engineering* 22, (2020): 100746.
- [2] A. Behaen, and M. Nimafar. "Numerical investigation on heat transfer enhancement inside a rectangular microchannel with vortex generator using TiO2- CuO- water nanofluid." *Journal of Mechanical Engineering Research* 3, no. 1 (2020): 1-11.
- [3] A. Monavari, J. Jamaati, and M. Bahiraei. "Thermohydraulic performance of a nanofluid in a microchannel heat sink: Use of different microchannels for change in process intensity." *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers* 125, (2021): 1-14.
- [4] A.M. Ali, M. Angelino, and A. Rona. "Numerical analysis on the thermal performance of microchannel heat sinks with Al2O3 nanofluid and various fins." *Applied Thermal Engineering* 198, (2021): 117458.
- [5] N. Momeni Shourakchally, A.M. Jadidi, and M. Azadi. "Numerical analysis of heat transfer in silicon oxide-titanium oxide hybrid nanofluid based on water and ethylene glycol for cooling." *Applied Energy Conversion* 1, no. 1 (2022): 38-47. (in Persian)
- [6] M.H. Talebi, V. Kalantar, M. R. Nazari, and H. Kargarsharifabad. "Experimental Investigation of the Forced Convective Heat Transfer of hybrid Cu / Fe3O4 Nanofluids." *Journal of Solid and Fluid Mechanics* 8, no. 4 (2019): 229-238. (in Persian)
- [7] M. Jamiati, and H. Pourmohamadian. "performance enhancement of a two-fluid corrugated torsional heat exchanger containing hybrid nanofluids." *Journal of Mechanical Engineering and Vibration* 11, no. 4 (2020): 37-48. (in Persian)

- [8] R. Ghanbari, and M.M. Heyhat. "Experimental Study of the Effect of Magnesium Oxide and Multi-Walled Carbon Nanotubes Hybrid Nanofluid on Increasing the Absorption Efficiency of Solar Radiation." *Amirkabir Journal of Mechanical Engineering* 54, no. 5 (2022): 1101-1124. (in Persian)
- [9] I. Aguirre, A. Gonzalez, and E. Castillo. "Numerical study on the use of shear-thinning nanofluids in a micro pin-fin heat sink including vortex generators and changes in pin shapes." *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers* 136, (2022): 104400.
- [10] Y. Zhai, P. Yao, X. Shen, and H. Wang. "Thermodynamic evaluation and particle migration of hybrid nanofluids flowing through a complex microchannel with porous fins." *International Communications in Heat and Mass Transfer* 135, (2022): 106118.
- [11] N. Sheikhpour, A. Mirabdollah Lavasani, and G. Salehi. "Study the Effects of Magnetic Field and Porous Medium on Heat Transfer and Flow of a Nanofluid in a Wavy Channel." *Journal of Modeling in Engineering* 20, no. 71 (2022): 13-25. (in Persian)
- [12] S. Tumse, and B. Sahin. "Influence of uniform magnetic field on hydrothermal characteristics and entropy production in a nanofluid filled rectangular grooved channel." *Case Studies in Thermal Engineering* 45, (2023): 102973.
- [13] D.Y. Aydın, E. Aydın, and M. Gürü. "The effects of particle mass fraction and static magnetic field on the thermal performance of NiFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> nanofluid in a heat pipe." *International Journal of Thermal Sciences* 183, (2023): 107875.
- [14] A.Z. Ullah, X. Guo, T. Gul, I. Ali, A. Saeed, and A.M. Galal. "Thin film flow of the ternary hybrid nanofluid over a rotating disk under the influence of magnetic field due to nonlinear convection." *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* 573, (2023): 170673.
- [15] M. Sepehrnia, H. Khorasanizadeh, and M.B. Shafiei. "Numerical Simulation of Magnetic Field Effect on Thermal and Thermo-Hydraulic Performance and Entropy Generation of a Silicon Microchannel Heat Sink Under Uniform Heat Flux." *Amirkabir Journal of Mechanical Engineering* 53, no. 1 (2021): 517-538. (in Persian)
- [16] P. Akbari, M. Haghshenasfard, M. Nasr Esfahany, and M. Ehsani. "Mass transfer characteristics of ferrofluids flowing through a microchannel under AC magnetic field." *International Communications in Heat and Mass Transfer* 139, (2022): 106436.
- [17] S. Kumar, A.D. Kothiyal, M.S. Bisht, and A. Kumar. "Turbulent heat transfer and nanofluid flow in a protruded ribbed square passage." *Results in physics* 7, (2017): 3603-3618.
- [18] S. Davoodabadi Farahani, M. Amiri, B. Kazemi Majd, and A. Mosavi. "Effect of magnetic field on heat transfer from a channel: Nanofluid flow and porous layer arrangement." *Case Studies in Thermal Engineering* 28, (2021): 101675.
- [19] S.V. Mousavi, M. Barzegar Gerdroodbary, M. Sheikholeslami and D.D. Ganji. "The influence of a magnetic field on the heat transfer of a magnetic nanofluid in a sinusoidal channel." *The European Physical Journal Plus* 131, (2016): 1-12.
- [20] R.k. Ajeel, W.S.I.W. Salim, and K. Hasnan. "Experimental and numerical investigations of convection heat transfer in corrugated channels using alumina nanofluid under a turbulent flow regime." *Chemical Engineering Research and Design* 148, (2019): 202-217.
- [21] P. Bhandari, and Y.K. Prajapati. "Thermal performance of open microchannel heat sink with variable pin fin height." *International Journal of Thermal Sciences* 159, (2021): 106609.
- [22] T.K. Nandi, and H. Chattopadhyay. "Numerical investigations of developing flow and heat transfer in raccoon type microchannels under inlet pulsation." *International Communications in Heat and Mass Transfer* 56, (2014): 37-41.
- [23] B.P. Geridonmeza, and H.F. Oztop. "Effects of inlet velocity profiles of hybrid nanofluid flow on mixed convection through a backward facing step channel under partial magnetic field." *Chemical Physics* 540, (2021): 111010.
- [24] J.C. Maxwell. "A Treatise on Electricity and Magnetism." second edition, Oxford University Press. Cambridge, (1904): 435-441.
- [25] B. Esteban, J.R. Riba, G. Baquero, A. Rius, and R. Puig. "Temperature dependence of density and viscosity of vegetable oils." *BIOMASS AND BIOENERGY* 42, (2012): 164-171.

- [26] J.F. Hoffmann, J.F. Henry, G. Vaitilingom, R. Olives, M. Chirtoc, D. Caron, and X. Py. "Temperature dependence of thermal conductivity of vegetable oils for use in concentrated solar power plants, measured by 3omega hot wire method." *International Journal of Thermal Sciences* 107, (2016): 105-110.
- [27] A.H. Pordanjani, S.M. Vahedi, S. Aghakhani, M. Afrand, H.F. Oztop, and N. Abu-Hamdeh. "Effect of magnetic field on mixed convection and entropy generation of HNF in an inclined enclosure: sensitivity analysis and optimization." *European Physical Journal Plus* 134, (2019): 1-20.
- [28] N.Hatami, A. Kazemnejad Banari, A. Malekzadeh, and A.R. Pouranfard. "The effect of magnetic field on nanofluids heat transfer through a uniformly heated horizontal tube." *Physics Letters A* 381, no. 5 (2017): 510-515.