



مدل‌سازی عملکرد هیدرولیکی - حرارتی یک کانال نیمه‌متخلخل سینوسی با جریان نانوسیال و اعمال میدان مغناطیسی

نجات شیخ پور^۱، آرش میرعبداله لواسانی^{۲*}، غلامرضا صالحی^۳

^۱ دانش‌آموخته مقطع دکتری، گروه مهندسی مکانیک، واحد تهران مرکزی، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

^{۲,۳} دانشیار، گروه مهندسی مکانیک، واحد تهران مرکزی، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

مقاله مستقل، تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۱۰/۱۸؛ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۰۳/۱۱؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۴/۰۳

چکیده

در این مطالعه، عملکرد هیدرولیکی-حرارتی یک کانال موجی نیمه‌متخلخل با جریان نانوسیال و اعمال میدان مغناطیسی ارزیابی شده است. میدان مغناطیسی عمود بر کانال اعمال شده است. جریان نانوسیال در این طرح، به صورت تک‌فاز، تراکم‌ناپذیر و دائم در نظر گرفته شده است. محدوده‌ی عدد هارتمن و عدد دارسی به ترتیب $0 \leq Ha \leq 10$ و $10^{-5} \leq Da \leq 10^{-2}$ است. نانوذرات اکسید منیزیم در چهار کسر حجمی مختلف (۰، ۲، ۴ و ۵ درصد) مورد بررسی قرار گرفته است. معادلات حاکم، به روش حجم محدود حل شده است. بر اساس نتایج به دست آمده، افزایش کسر حجمی نانوذرات و موج کانال باعث بهبود انتقال حرارت خواهد شد. در یک رینولدز ثابت، افزایش تعداد موج کانال از ۴ تا ۶ موجب کاهش ۷/۸ درصدی عملکرد هیدرولیکی-حرارتی شده است. افزایش نفوذپذیری در محیط متخلخل، سبب تشدید عدد ناسلت و کاهش اصطکاک شده است. بهترین عملکرد هیدرولیکی-حرارتی در عدد دارسی ۰/۰۱ به مقدار ۱۰/۰۸ و کمترین آن در عدد دارسی ۰/۰۰۰۱ به مقدار ۰/۵۲ است. همچنین، وجود میدان مغناطیسی تأثیر مثبتی بر عملکرد حرارتی داشته است. نتایج حاصل از این مطالعه می‌تواند در طراحی میدلهای حرارتی، راه‌گشا باشد.

کلمات کلیدی: عملکرد هیدرولیکی-حرارتی؛ تحلیل عددی؛ کانال موج‌دار؛ میدان مغناطیسی؛ کانال نیمه متخلخل.

Modeling the hydraulic-thermal performance of a sinusoidal semi-porous channel with nanofluid flow and applying a magnetic field

Nejat Sheikhpour¹, Arash Mirabdollah Lavasani^{2,*}, Gholamreza Salehi²

¹ PhD graduate, Department of Mechanical Engineering, Central Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

^{2,3} Assoc. Prof., Department of Mechanical Engineering, Central Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

Abstract

In this study, the hydraulic-thermal performance of a semi-porous wave channel with nanofluid flow and applied magnetic field has been evaluated. The magnetic field is perpendicular to the channel. In this design, single-phase, incompressible and permanent nanofluid flow is considered. The ranges of Hartmann number and Darcy number are $0 \leq Ha \leq 10$ and $10^{-5} \leq Da \leq 10^{-2}$, respectively. Magnesium oxide nanoparticles have been investigated in four different volume fractions (0, 2, 4 and 5%). The governing equations are solved by the finite volume method. Based on the obtained results, increasing the volume fraction of nanoparticles and channel wave improves heat transfer. At constant Reynolds number, increasing the number of wave channels from 4 to 6 resulted in a 7.8% decrease in thermal hydraulics. The increase in permeability in the porous medium has increased the Nusselt number and reduced friction. The best thermal hydraulic performance is 10.08 at Darcy number 0.01 and the lowest is 0.52 at Darcy number 0.0001. Also, the presence of magnetic field has a positive effect on thermal performance. The results of this study can be useful in the design of heat exchangers.

Keywords: Thermal hydraulic performance; Numerical analysis; wavy channel; Magnetic field; Semi-porous channel.

* نویسنده مسئول؛ تلفن: -

آدرس پست الکترونیک: arashlavasani@iauctb.ac.ir

۱- مقدمه

بررسی موضوع انتقال حرارت جابه‌جایی اجباری در کانال‌ها به دلیل کاربرد صنعتی فراوانی که دارد، مورد توجه محققان قرار گرفته است. برای نمونه می‌توان به مبدل‌های گرمائی، دیگ‌های حرارتی، کلکتورهای (سامانه‌های) خورشیدی، مبدل‌های قدرت، میکرومبدل‌های حرارتی، مبدل‌های کاتالیستی و حتی رادياتور ماشین اشاره کرد [۱]. بازده انرژی مطلوب در مبدل‌های حرارتی یکی از موضوعات مهم در علوم مهندسی است. در سال‌های اخیر، تلاش‌هایی برای طراحی و ساخت بهینه مبدل‌ها انجام شده است. عملکرد این تجهیزات حرارتی را می‌توان با استفاده از نانوذرات، موج‌دار کردن دیواره‌ها، محیط‌ها و لایه‌های متخلخل و نیروی مغناطیسی و... بهینه کرد.

یکی از روش‌های تقویت انتقال حرارت استفاده از نانوسیالات است. نانوسیالات می‌توانند با ایجاد پراکندگی حرارتی در جریان، سبب افزایش رسانایی حرارتی و در نتیجه افزایش قابل توجهی سرعت انتقال حرارت شوند. تأثیر نانوسیال بر میدان جریان توجهات زیادی را به دلیل اهمیت در کاربردهای عملی، به خود جلب کرده و مطالعات متعددی در این زمینه انجام شده است. آرورا^۱ و گوپتا [۲] به صورت تجربی انتقال حرارت و افت فشار نانوسیال در یک لوله دایره‌ای در غلظت‌های مختلف را ارزیابی کردند. آن‌ها مشاهده کردند که کسر حجمی و دبی نانوسیال باعث افزایش عدد ناسلت می‌شود. عملکرد عددی هیدرودینامیکی نانوسیال هیبریدی در یک میکروکانال توسط کومار^۲ و همکاران [۳] بررسی شد. آن‌ها اثر کسر حجمی نانوذرات بر عملکرد هیدرودینامیکی تجزیه و تحلیل کردند. مشخص شد که وجود نانوذرات منجر به افزایش انتقال حرارت، افت فشار و ضریب اصطکاک می‌شود. تحلیل آن‌ها نشان داد که عملکرد هیدرودینامیکی برای کسر حجمی بالاتر نانوسیال‌های هیبریدی در مقایسه با سیال پایه بهتر است.

یکی از موضوعات مهم در طراحی مبدل‌ها و کانال‌های حرارتی، افزایش نسبت سطح انتقال حرارت به حجم در این تجهیزات است. تغییر هندسه کانال به سمت کانال‌ها با دیواره‌های موجی می‌تواند این هدف مهم در طراحی را برآورده سازد. می‌توان در مبدل‌های حرارتی با روش موج‌دار کردن دیواره‌ها،

اندازه مبدل را به حداقل رساند. در ده‌های اخیر، تحقیق پیرامون بررسی خصوصیات جریان سیال داخل کانال‌ها و لوله‌های موج‌دار به طور قابل ملاحظه‌ای افزایش یافته است. بر اساس نتایج ارائه شده از مسلمی و همکاران [۴]، شکل موجی (سینوسی) میکروکانال تأثیر مستقیمی بر انتقال حرارت دارد. با افزایش دامنه موج میکروکانال، عدد ناسلت افزایش یافته است. از سوی دیگر افزایش انتقال حرارت در نسبت طول موج بالاتر کانال موج‌دار به عنوان یک روش مؤثر برای افزایش انتقال حرارت دیده می‌شود. مرادی و همکاران [۵] با بهره‌گیری از روش‌های آزمایشگاهی (تجربی) و محاسباتی انتقال حرارت یک کانال مستطیلی را با دنده‌های موج را بررسی کردند. نتایج کار آنها نشان داد که ضریب عملکرد حرارتی دنده‌های موج ۲۲/۱ تا ۲۸/۷ درصد بیشتر از دنده‌های مقطع مستطیلی بود. تأثیر دامنه جداره کانال بر انتقال حرارت و ویژگی‌های جریان آرام در یک کانال سینوسی، توسط مهتا^۳ و همکاران [۶] تحلیل شد. آنها به نتیجه رسیدند که افزایش دامنه موج کانال باعث افزایش عدد ناسلت محلی و میانگین می‌شود.

مسأله انتقال حرارت در کانال‌های متخلخل از موضوعات جذاب تحقیقاتی به دلیل کاربرد گسترده‌ی آن است. در سال‌های اخیر، محققان با هدف بررسی تأثیر محیط‌های متخلخل بر جریان و انتقال حرارت جابه‌جایی مطالعات متعددی انجام دادند. جمارانی و همکاران [۷] با بهره‌گیری از روش‌های تحلیلی و عددی به بررسی عدد ناسلت (انتقال حرارت جابه‌جایی) در یک کانال با ماده متخلخل جزئی پرداختند. یرامال^۴ و همکاران [۸] انتقال حرارت جابه‌جایی ترکیبی در یک کانال متخلخل را بررسی کردند. در کار آنها، با افزایش ارتفاع فضای متخلخل در داخل کانال، انتقال حرارت جابه‌جایی افزایش یافت. پورمؤید و همکاران [۹] به بررسی عددی تأثیرات میدان مغناطیسی مماسی و ثابت بر الگوی جریان و انتقال حرارت از یک استوانه پوشیده شده با نوار متخلخل پرداختند و به این نتیجه رسیدند که افزایش مؤلفه دارسی، سبب بهبود انتقال حرارت (عدد ناسلت متوسط) می‌شود. تحلیل انتقال حرارت جابه‌جایی اجباری جریان نانوسیال، در یک میکروکانال در حضور بلوک‌های متخلخل و میدان مغناطیسی توسط ابراهیم و همکاران [۱۰] انجام شد. با توجه

³ Mehta⁴ Yaeramlle¹ Arora² Kumar

مگنتوهیدرودینامیک^۹ را بر انتقال حرارت جابه‌جایی ترکیبی در یک کانال بررسی کردند، آن‌ها دریافتند که میدان مغناطیسی، باعث افزایش بی‌ثباتی جریان و در نهایت بهبود نرخ انتقال حرارت می‌شود. اثر میدان مغناطیسی بر انتقال حرارت اجباری توسط محمدی و همکاران [۱۹] در یک مجرای استوانه‌ای بررسی شد. نتایج پژوهش عددی آن‌ها نشان داد که وجود نانوذرات در سیال پایه (آب) باعث افزایش عدد ناسلت در مقایسه با آب خالص می‌گردد. همچنین، اثر میدان مغناطیسی، سبب افزایش نرخ حرارت مبادله شده می‌گردد. شیخ‌پور و همکاران [۲۰] تأثیر میدان مغناطیسی و محیط متخلخل بر انتقال حرارت جابه‌جایی در یک کانال موج‌دار بررسی کردند و نتایج آن‌ها نشان می‌دهد که عدد رینولدز، محیط متخلخل و میدان مغناطیسی تأثیر مثبتی بر انتقال حرارت مبادله شده دارند.

نتایج بررسی مطالعات انجام شده روی کانال‌ها، نشان می‌دهد که تاکنون، بررسی کامل و جامع تمامی مؤلفه‌های کلیدی تأثیرگذار بر جریان و انتقال حرارت در این هندسه‌ها انجام نشده است. بدین منظور، در این پژوهش با استفاده از مدل‌سازی عددی، بررسی جامعی از مؤلفه‌های مؤثر بر انتقال حرارت جابه‌جایی، افت فشار و ضریب عملکرد هیدرولیکی-حرارتی^{۱۰} در یک کانال متخلخل موجی شکل تحت تأثیر میدان مغناطیسی ارائه شده است. به‌طور کلی، برخی از مهمترین نوآوری‌های این مطالعه عبارتند از:

- اعمال شار حرارتی غیریکنواخت نسبت به مکان (سینوسی) بر روی جداره کانال موجی شکل است.

- بررسی اثربخشی هم‌زمان میدان مغناطیسی، محیط متخلخل موج دیواره و نانوسیال بر ضریب عملکرد هیدرولیکی-حرارتی یک کانال موج‌دار است.

اهمیت این مطالعه در امکان‌سنجی و بررسی افزایش کارایی حرارتی یک کانال موج‌دار از یک مبدل حرارتی طراحی شده با میدان مغناطیسی، محیط متخلخل و با جریان عبوری نانوسیال است.

به نتایج به دست آمده، در حضور محیط متخلخل با افزایش عدد رینولدز، افت فشار و ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی (عدد ناسلت) افزایش می‌یابد.

یکی از روش‌های بهبود و کنترل انتقال حرارت، تأثیر میدان مغناطیسی روی جریان سیال است [۱۱]. استفاده از میدان مغناطیسی در جابه‌جایی طبیعی، باعث کاهش سرعت در نزدیکی دیواره شده و انتقال حرارت را کاهش می‌دهد [۱۲]. بررسی انتقال حرارت جابه‌جایی در حضور میدان مغناطیسی موضوع تحقیقات بسیاری بوده است. باتاچاریا^۱ و همکاران [۱۳] انتقال حرارت و جریان نانوسیال در یک کانال کوچک موج‌دار حضور میدان مغناطیسی خارجی را به صورت عددی شبیه‌سازی کردند. نتایج کار آن‌ها نشان‌دهنده افزایش انتقال حرارت با اعمال میدان‌های مغناطیسی بود. محاسبه میزان انتقال حرارت جابه‌جایی نانوسیال در یک هندسه‌ی دارای میدان مغناطیسی با تولید انرژی، توسط بنوس^۲ و سیریس^۳ [۱۴] انجام شد. در کار آن‌ها اعمال میدان مغناطیسی خارجی باعث تقویت حرارت جابه‌جایی شد. مورات^۴ و همکاران [۱۵] به صورت عددی مؤلفه‌های انتقال حرارت و جریان نانوسیال در حضور میدان مغناطیسی برای حالت جابه‌جایی اجباری در یک لوله را بررسی کردند و به این نتیجه رسیدند که به دلیل وجود میدان مغناطیسی و نانوذرات، سرعت جریان کاهش می‌یابد ولی از طرفی عدد ناسلت با میدان مغناطیسی رابطه مستقیم دارد. هان^۵ و همکاران [۱۶] به بررسی عددی انتقال حرارت جابه‌جایی اجباری و تولید آنتروپی در یک میکروکانال دارای میدان مغناطیسی پرداختند و مشاهده کردند که عدد هارتمن باعث بهبود نرخ انتقال حرارت می‌شود. همچنین، با بهره‌گیری از روش عددی، کالپانا^۱ و همکاران [۱۷] خصوصیات جریان یک میدان مغناطیسی را در یک کانال حاوی نانوسیال هیبریدی مورد مطالعه قرار دادند. نتایج کار آن‌ها نشان داد که با وجود میدان مغناطیسی، لایه مرزی نازک‌تر شده و نرخ انتقال حرارت را افزایش می‌یابد. همچنین، تغییر در مقادیر مؤلفه مغناطیسی، غلظت نانوذرات و دامنه دیواره موج باعث بهبود انتقال حرارت می‌شوند. السید^۲ و عبدالواحد^۸ [۱۸] اثر

⁶ Kalpana

⁷ Elsaid

⁸ Abdel-wahed

⁹ Magnetohydrodynamics (MHD)

¹⁰ PEC (Performance Evaluation Criteria)

¹ Bhattacharyya

² Benos

³ Sarris

⁴ Erdem

⁵ Lixuesong Han

۲- بیان مسأله

در این بخش، هندسه، معادلات حاکم و مدل ریاضی مسأله، شرایط مرزی و خواص ترموفیزیکی نانوسیال بیان شده است.

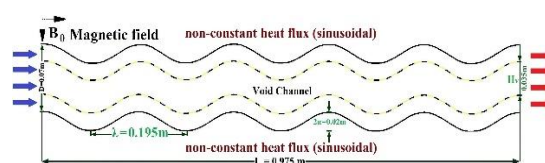
دارد. در این پژوهش، توزیع شار حرارتی دیواره کانال موج دار، به صورت غیریکنواخت و سینوسی (متغیر با مکان) و متناسب با رابطه (۲) اعمال می شود.

$$q'' = 50000 + 1000 \sin(x/\lambda) \quad (2)$$

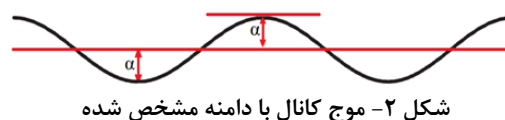
جدول ۱- مقادیر هندسی کانال موج دار	
واحد (میلی متر)	مؤلفه ها (پارامتر)
۹۷۵	L
۱۹۵	λ
۱۴۰	D_h
۷۰	D
۳۵	Hv
۲۰	2α
۱۷/۵	$Hp_1 = Hp_2 = D/4$

۲-۱- هندسه و فرضیات مسأله

طرح‌نمایی هندسه مورد بررسی، در شکل ۱ نشان داده شده است. در این هندسه، L طول کانال، λ و α به ترتیب دوره تناوب و دامنه موج، Hv ارتفاع (لایه) خالی از محیط متخلخل، Hp ارتفاع لایه متخلخل، D ارتفاع (قطر) کانال و D_h قطر هیدرولیکی کانال است. هندسه مسأله، یک کانال موج دار، اشباع شده از نانوسیال، نیمه متخلخل و تحت تأثیر میدان مغناطیسی یکنواخت است. ماده متخلخل در درون کانال به صورت مرزی به دیواره‌های موج دار چسبیده است.



شکل ۱- هندسه کانال موج دار دارای محیط متخلخل با اعمال میدان مغناطیسی



با توجه به اینکه دیواره‌های بالایی و پایینی کانال به صورت موجی طراحی شده‌اند، رابطه‌ی موج کانال به صورت معادله (۱) باشد [۲۱].

$$y(x) = \alpha (\cos(\frac{x}{\lambda}) - 1) \quad (1)$$

در این معادله، λ و α به ترتیب دوره تناوب و دامنه موج می باشند. در جدول ۱ مؤلفه‌های هندسه مورد بررسی، بر حسب میلی متر مشخص شده است. همان نانوسیال، با سرعت یکنواخت وارد کانال به ارتفاع H_v می شود. دامنه حل، تحت تأثیر میدان مغناطیسی یک عرضی B قرار

در این شبیه سازی موارد زیر به عنوان فرض های پژوهش در نظر گرفته شده اند.

- ۱- واکنش شیمیایی و نیروی خارجی وجود ندارد.
- ۲- اتلاف حرارتی ناچیز در نظر گرفته شده است.
- ۳- سیال در دست بررسی (از نظر ریاضی) به صورت یک محیط پیوسته و تکفازی در نظر گرفته شده است.
- ۴- نانوذرات و ذرات سیال پایه در تعادل حرارتی می باشند.
- ۵- رژیم جریان آرام در نظر گرفته شده است.
- ۶- نانوسیال به عنوان سیال نیوتنی در نظر گرفته شده است.
- ۷- رژیم جریان دائم (پایا) است.
- ۸- هندسه مسأله (کانال) به صورت دوبعدی مورد بررسی قرار گرفته است (تغییر در جهت z وجود ندارد).
- ۹- نانوسیال غیر قابل تراکم در نظر گرفته شده است.
- ۱۰- عدم وجود لغزش میان ذرات نانو و سیال پایه (اندازه ذرات نانو به اندازه های کوچک است که می توان از سرعت لغزشی بین ذرات نانو و ذرات سیال پایه صرفه نظر کرد).
- ۱۱- خواص ترموفیزیکی نانوسیال ثابت است.
- ۱۲- در محیط های متخلخل با فرض تعادل حرارتی مدل سازی انتقال حرارت انجام شده است.

Steady

۱۳- محیط متخلخل در کار حاضر همگن است.

۲-۲- معادلات حاکم و مدل ریاضی مسأله

معادلات حاکم، برای تحلیل میدان سرعت و توزیع دما، شامل معادله پایستاری جرم، معادلات اندازه حرکت در جهات x و y و همچنین معادله بقای انرژی است. با توجه به اینکه، میدان مغناطیسی یکنواخت بر دامنه حل اعمال شده است، یک عبارت چشمه، جهت در نظر گرفتن نیروی لورنتس ناشی از میدان مغناطیسی، به معادله اندازه حرکت اضافه شده است. همچنین، یک عبارت چشمه بدلیل وجود لایه (محیط متخلخل)، تحت عنوان عبارت داری به معادله اندازه حرکت اضافه شده است. معادلات (۳) تا (۶) به ترتیب معادلات پایستاری جرم، بقای مومنتوم (اندازه حرکت) و در نهایت معادله بقای انرژی در دو بُعد را نشان می‌دهند [۲۲ و ۲۴].

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (3)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = - \frac{1}{\rho_{nf}} \frac{\partial p}{\partial x} + \theta_{nf} \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) - \frac{1}{\rho_{nf}} \mu_{nf} \frac{u}{K_{porous}} \quad (4)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = - \frac{1}{\rho_{nf}} \frac{\partial p}{\partial y} + \theta_{nf} \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) - \frac{\sigma_{nf}}{\rho_{nf}} B_0^2 v - \frac{1}{\rho_{nf}} \mu_{nf} \frac{v}{K_{porous}} \quad (5)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} = \frac{k_m}{\rho_{nf} c_p} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) \quad (6)$$

معادلات (۳) تا (۶) برای حالت جریان دوبعدی و تراکم‌ناپذیر ($\rho = \text{const}$) است. در این معادلات θ_{nf} ، σ_{nf} ، μ_{nf} ، ρ_{nf} و k_{nf} به ترتیب چگالی، ویسکوزیته دینامیکی، رسانایی الکتریکی، ویسکوزیته سینماتیکی و ضریب هدایت حرارتی نانو سیال است. B_0 مقدار میدان مغناطیسی (بر حسب تسلا^۱) وارد شده است. عبارت $\sigma_{nf} B_0^2 u$ - تأثیر نیروی میدان مغناطیسی

را بر روی حرکت سیال نشان می‌دهد. در واقع، میدان مغناطیسی به عنوان یک نیروی بدنه‌ای به معادله اندازه حرکت اضافه شده است. همچنین، $\mu_{nf} \frac{u}{K_{porous}}$ و $\mu_{nf} \frac{v}{K_{porous}}$ عبارات مربوط به مدل داری هستند که بدلیل وجود محیط متخلخل، به معادله اندازه حرکت اضافه شده‌اند. K_{porous} معرف خاصیت نفوذپذیری در محیط متخلخل است. معادله (۶) مربوط به رابطه بقای انرژی است. در شرایطی که تعادل حرارتی بین فاز جامد (لایه متخلخل) و سیال برقرار باشد، به عبارتی دیگر، دمای فاز جامد و سیال در نقاط مختلف با هم برابر باشند $T_f = T_s = T$. در معادله انرژی، k_m ضریب هدایت حرارتی کل است که به صورت زیر تعریف می‌گردد.

$$k_m = (1 - \epsilon) k_s + \epsilon k_f \quad (7)$$

اندیس‌های s و f به ترتیب به فاز جامد (لایه متخلخل) و سیال اشاره دارند.

در این معادله عبارت $(1 - \epsilon)$ بیانگر نسبت مقطع (محیط) اشغال شده توسط فاز جامد به کل سطح است. با توجه به فرض پایداری (دائم) جریان، عبارت‌های $\frac{\partial u}{\partial t}$ و $\frac{\partial v}{\partial t}$ حذف می‌شوند. روابط و همچنین مؤلفه‌های بی‌بُعد مورد استفاده در این تجزیه و تحلیل در ادامه تعریف شده است. عدد رینولدز به کمک معادله زیر محاسبه می‌شود.

$$Re = \frac{\rho_{nf} V_{in} D_h}{\mu_{nf}} \quad (8)$$

در این رابطه ρ_{nf} ، V_{in} ، D_h و μ_{nf} به ترتیب چگالی، سرعت ورودی، قطر هیدرولیکی و ویسکوزیته دینامیکی نانو سیال می‌باشند. رابطه قطر هیدرولیکی در کانال دوبعدی به صورت $D_h = 2D$ است. سرعت ورودی سیال بر اساس عدد رینولدز از رابطه (۹) محاسبه خواهد شد.

$$V_{in} = \frac{Re \mu_{nf}}{\rho_{nf} D_h} \quad (9)$$

^۱ Tesla

مورد استفاده در جریان‌های تحت تأثیر میدان مغناطیسی، عدد هارتمن است. عدد هارتمن، نسبت نیروی الکترومغناطیسی به نیروی ویسکوز می‌باشد که بیانگر شدت میدان مغناطیسی بوده و به صورت رابطه (۱۶) تعریف می‌گردد [۱۰].

$$Ha = B_0 L \sqrt{\frac{\sigma_{nf}}{\mu_{nf}}} \quad (17)$$

در این رابطه B_0 و L به ترتیب شدت میدان مغناطیسی و طول مشخصه کانال می‌باشند. برای تحلیل افت فشار حاصل از اصطکاک، از معادله زیر که به معادله دارسی-ویسباخ^۱ معروف می‌باشد، استفاده شده است.

$$h_f = \frac{\Delta P}{\gamma} = f \cdot \frac{L}{D_h} \cdot \frac{V^2}{2g} \quad (18)$$

در این رابطه h_f معرف افت فشار بر حسب متر است. در نتیجه، ضریب اصطکاک f با رابطه (۱۹) قابل محاسبه است [۲۵].

$$f = \frac{2\Delta P D_h}{L \rho_{nf} V^2} \quad (19)$$

در این رابطه ΔP افت فشار در طول فضای محاسباتی مورد نظر است که به صورت رابطه (۲۰) تعریف می‌شود.

$$\Delta P = P_{in} - P_{out} \quad (20)$$

معیار ارزیابی عملکرد هیدرولیکی-حرارتی (کارایی کلی سامانه) که نسبت عدد ناسلت به نسبت ضریب اصطکاک است، طبق رابطه (۲۱) محاسبه خواهد شد. از این رابطه، جهت بررسی و دستیابی به شرایط ایده‌آل استفاده می‌شود [۲۶].

$$PEC = \frac{(Nu/Nu_0)}{(f/f_0)^{1/3}} \quad (21)$$

در این رابطه Nu_0 و f_0 به ترتیب عدد ناسلت و ضریب اصطکاک حالت مرجع می‌باشند.

ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی به کمک معادله زیر محاسبه می‌شود [۲۳].

$$h = \frac{Q''}{(T_w - T_{bulk})} \quad (10)$$

در این رابطه T_w دمای دیواره کانال و T_{bulk} دمای بالک نانوسیال است. همچنین Q'' شار حرارتی اعمال شده است. عدد ناسلت محلی از رابطه (۱۱) به دست می‌آید [۲۳].

$$Nu_{local} = \frac{h_{local} D_h}{k_{nf}} \quad (11)$$

عدد ناسلت متوسط، دمای بالک و دمای دیواره به صورت زیر تعریف می‌شوند.

$$Nu_{avg} = \frac{1}{L} \int_0^L Nu_{local} dx \quad (12)$$

$$T_{bulk} = \frac{\int u T dy}{\int u dy} \quad (13)$$

$$T_w = \frac{1}{A} \int T dA \quad (14)$$

ضریب تخلخل برای یک محیط متخلخل به صورت رابطه (۱۵) تعریف شده و مقدار آن از صفر تا یک است [۲۴].

$$\varepsilon = \frac{V_v}{V_T} \quad (15)$$

در این رابطه V_v حجم فضای خالی در نمونه محیط متخلخل و V_T حجم کل نمونه محیط متخلخل است. عدد بی‌بعد دارسی به صورت نسبت نفوذپذیری (قابلیت نفوذ) در محیط متخلخل به ناحیه سطح مقطع بیان شده و به صورت رابطه زیر است [۲۴].

$$Da = \frac{K_{porous}}{D_h^2} \quad (16)$$

که در آن K_{porous} معرف نفوذپذیری (قابلیت نفوذ در محیط متخلخل) بر حسب m^2 است. همچنین، عدد بی‌بعد

¹ Darcy-Weisbach

$$P = P_{\text{Outlet}} \quad (26)$$

۴-۲- خواص ترموفیزیکی نانوسیال

در جداول ۲ و ۳ خواص ترموفیزیکی (ظرفیت گرمایی، چگالی، رسانایی گرمایی، ویسکوزیته دینامیکی و رسانایی الکتریکی نانوسیال (سیال پایه و نانوذره) نشان داده شده است.

جدول ۲- خواص ترموفیزیکی آب در دمای محیط [۲۸]

مقدار	واحد	خواص ترموفیزیکی
۴۱۸۲	J(kg.K)	ظرفیت گرمایی
۹۹۸/۲	kg/m ³	چگالی
۰/۶	W(m.K)	رسانش گرمایی
۰/۰۰۱۰۰۳	kg/m.s	ویسکوزیته دینامیکی
۰/۰۵	m ^{1-Ω} 1 ¹⁻	رسانایی الکتریکی

جدول ۳- خواص ترموفیزیکی نانوذره (MgO) [۲۸]

مقدار	واحد	خواص ترموفیزیکی
۸۷۴	J(kg.K)	ظرفیت گرمایی
۳۵۸۰	kg/m ³	چگالی
۵۵	W(m.K)	رسانش حرارتی
۱/۴۲×۱۰ ^{-۱۰}	m ^{1-Ω} 1 ¹⁻	رسانایی الکتریکی

در مطالعه حاضر، با توجه به کسر حجمی پایین نانوذرات برای مدل سازی نانوسیالات، از مدل تک فاز استفاده شده است. فرض شده است که هیچ گونه لغزشی بین فاز جامد و سیال وجود ندارد و بین نانوذرات و سیال پایه تعادل گرمایی برقرار است. به عبارتی، با توجه به اندازه محدود نانوذرات و همچنین، حرکت لغزشی ناچیز بین ذرات و سیال پایه می توان فرض تعادل گرمایی و سرعتی را به کار برده و لذا نانوسیال را می توان به عنوان یک ماده تک فاز در نظر گرفت. از این رو تمام معادلات حاکم مانند پیوستگی، حرکت و انرژی که برای سیال خالص کاربرد دارد و مستقیماً برای نانوسیال نیز می تواند مورد استفاده قرار گیرد [۲۷].

۳- مدل سازی و تحلیل مسأله (روند حل عددی)

در این بخش، روند کلی روش حل مسأله، جزئیات تولید شبکه

۳-۲- شرایط مرزی مسأله

شرایط مرزی هیدرولیکی و حرارتی (شرط مرزی دیواره، ورودی و خروجی) برای تعیین میدان جریان و توزیع دما و حل معادلات پیوستگی، اندازه حرکت و انرژی به صورت زیر است.

۱-۳-۲- شرط مرزی ورودی کانال

در ورودی کانال از شرط مرزی velocity inlet^۱ استفاده شده است. پروفیل سرعت در ورودی یکنواخت می باشد.

$$u = u_{\text{inlet}} \quad (22)$$

سرعت ورودی جریان نانوسیال متناسب با عدد رینولدز، از رابطه (۲۳) محاسبه شده است.

$$V_{\text{in}} = \text{Re} \frac{\mu_{\text{nf}}}{\rho_{\text{nf}} D_h} \quad (23)$$

که در آن μ_{nf} ویسکوزیته نانوسیال، Re عدد رینولدز جریان، ρ_{nf} چگالی نانوسیال و D_h قطر هیدرولیکی است. همچنین دمای سیال ورودی به صورت زیر در نظر گرفته شده است.

$$T = T_{\text{inlet}} = 30 \cdot \text{K} \quad (24)$$

۲-۳-۲- شرط مرزی دیواره

برای سرعت، از شرط عدم لغزش استفاده شده است. لذا تمامی مؤلفه های سرعت بر روی مرز دیواره صفر است. شرایط مرزی سرعت بر روی دیوارهای کانال به صورت زیر می باشد.

$$u = v = 0 \quad (25)$$

برای شرط مرزی حرارتی، از شار سینوسی (شار حرارتی متناوب) مطابق با معادله (۲) استفاده شده است.

۳-۳-۲- شرط مرزی خروجی کانال

شرط مرزی در خروجی کانال، فشار خروجی^۲ انتخاب شده است.

² Pressure outlet

¹ سرعت ورودی

معادلات موارد مربوط به گرادیان، نیز از مدل کمترین مربعات مبتنی بر سلول^۳ استفاده شده است. به منظور گسسته‌سازی معادلات موارد مربوط به فشار مدل استاندارد در نظر گرفته شده است. برای جداسازی معادلات اندازه حرکت و انرژی مدل‌های (تقریب) مرتبه دوم (یا روش بالادست مرتبه دوم)^۴ انتخاب شده است. برای مدل‌سازی خواص ترموفیزیکی نانوسیال، اعمال میدان مغناطیسی و شار حرارتی متناوب (غیریکنواخت و سینوسی) از کدنویسی کامپیوتری توسعه داده شده توسط کاربر^۵ استفاده گردیده است.

۳-۲- تولید شبکه

با هدف انجام حل مسأله، میدان حل شبکه‌بندی شده است. برای این منظور، با استفاده از نرم‌افزار پیش‌پردازنده، هندسه مورد نظر شبکه‌بندی و دامنه حل به مجموعه‌ای از حجم کنترل‌ها تبدیل شده است. هندسه مسأله (میدان حل) به صورت سازمان‌یافته و غیریکنواخت و با سلول‌ها (المان‌ها) چهارضلعی شبکه‌بندی شده است. همچنین، در نواحی که گرادیان شدید مورد انتظار است، تراکم بیشتری نسبت به دیگر نواحی در نظر گرفته شده است.

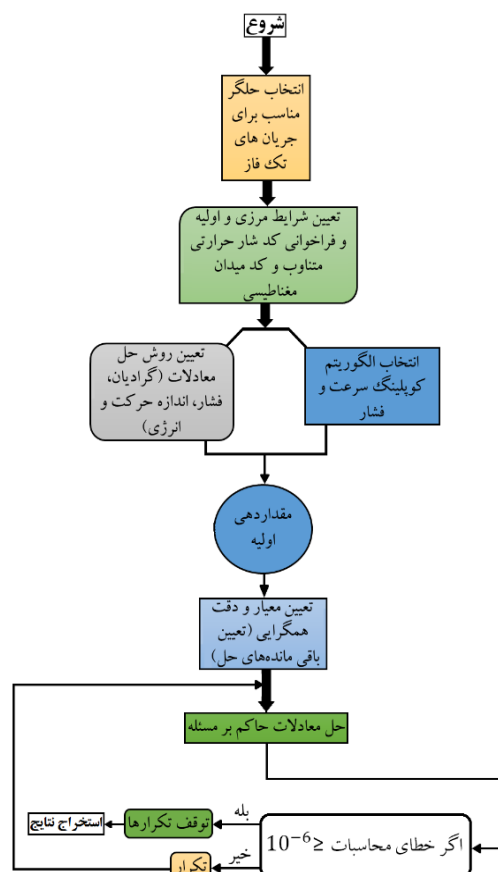
۳-۳- تنظیمات حلگر

با هدف تعیین نوع حلگر مسأله، از یک مدل دوبعدی با ساختار صفحه‌ای^۶ و رژیم جریان پایدار^۷ برای معادلات مربوط به بقا استفاده شده است. با توجه به اینکه، در این مطالعه جریان به صورت تراکم ناپذیر در نظر گرفته شده است، بنابراین، نوع حلگر مبتنی بر فشار، استفاده شده است. همچنین در کار حاضر، از روش استاندارد برای درونیابی مؤلفه‌ی فشار استفاده شده است.

۴- بررسی استقلال از شبکه‌بندی و اعتبارسنجی

در شکل ۴ قسمتی از شبکه تولید شده با سازمان نشان داده شده است. در نزدیکی دیواره‌های کانال موج‌دار با نسبت مناسبی شبکه ریزتر شده است.

و تنظیمات حلگر بیان شده است. روندنمای انجام مدل‌سازی عددی در شکل ۳ نشان داده شده است.



شکل ۳- روندنمای انجام مدل‌سازی عددی

۳-۱- روند کلی روش حل مسأله

در این مطالعه، به منظور حل معادلات حاکم بر مسأله، از روش حجم محدود^۱ (حجم کنترل) استفاده شده است. جهت طراحی هندسه مسأله و شبکه‌بندی آن، از نرم‌افزار گمبیت نسخه ۲/۴ و برای تحلیل و آنالیز مسأله از نرم‌افزار فلوئنت نسخه ۱۸/۲ [۲۹] استفاده شده است. با هدف حل همزمان (کوپلینگ) مؤلفه‌های فشار-سرعت از الگوریتم سیمپل^۲ استفاده شده است. در واقع، با هدف رسیدن به ارتباط صحیح بین فشار و سرعت الگوریتم سیمپل انتخاب شده است. برای جداسازی

^۴ Second Order Upwind

^۵ User-defined functions (UDF)

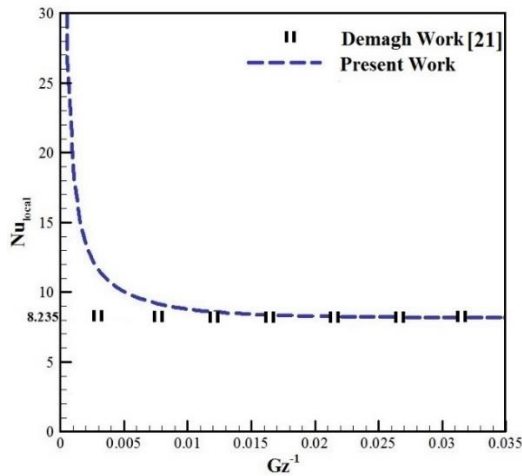
^۶ P1ner 2D

^۷ steady

^۱ FVM (Finite Volume Method)

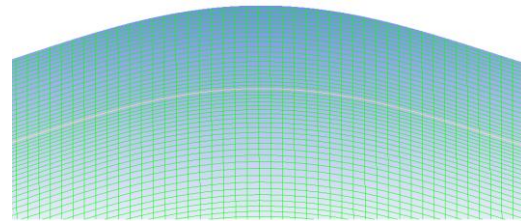
^۲ SIMPLE (Semi-Implicit Method for Pressure Linked Equations)

^۳ Least-squares Cell-Based

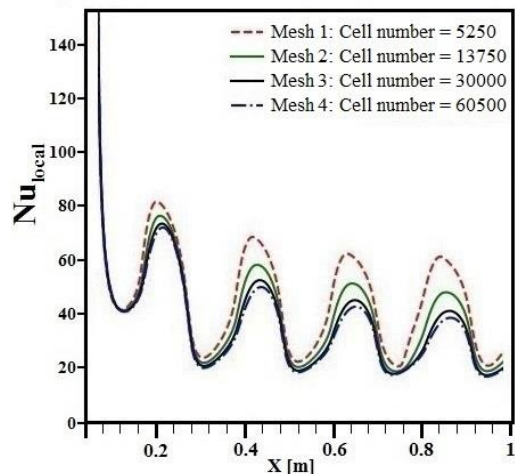


شکل ۶- مقایسه مطالعه حاضر و کار دماه [۲۱] جهت عدد ناسلت در جریان آرام در کانال

از مطالعه دماه^۱ [۲۱] برای صحت‌سنجی حل عددی استفاده شده است. شکل ۶ این مقایسه را نشان می‌دهد. در جریان آرام کاملاً توسعه یافته داخل کانال تخت با شرط مرزی حرارتی شار ثابت، وقتی که جریان از لحاظ حرارتی کاملاً توسعه یافته باشد، ناسلت محلی به عدد 8.235 خواهد رسید. همانطور که مشهود است، اختلاف کمتر از یک درصد است. نتیجه این مقایسه نشان می‌دهد که نتایج از همبستگی و تطابق مناسبی برخوردار بوده است. شکل ۷ مقایسه پروفیل سرعت برای کانال متخلخل کار حاضر با مطالعه سیلوا^۲ و دلموس^۳ [۳۰] را نشان می‌دهد. ضریب تخلخل و عدد دارسی در مطالعه سیلوا و دلموس به ترتیب برابر 0.6 و 0.004 است. آن‌ها نتایج خود را به صورت پروفیل سرعت توسعه یافته برای یک کانال که نصف عرض آن دارای محیط متخلخل است، ارائه دادند. نتایج نشان می‌دهد که میزان انحراف مطالعه حاضر از کار سیلوا و دلموس [۳۰] کمتر از ۲ درصد است.



شکل ۴- قسمتی از شبکه تولید شده با سازمان

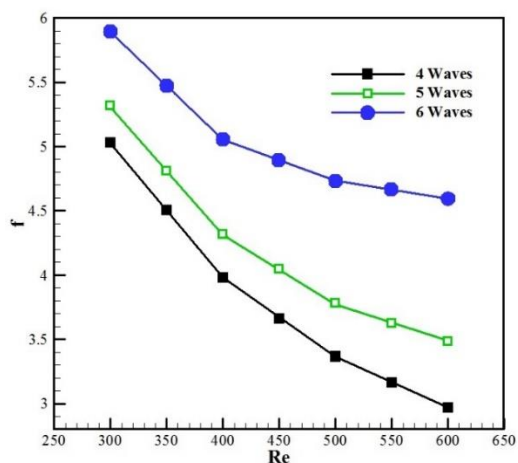


شکل ۵- بررسی استقلال از شبکه کانال موج‌دار متخلخل

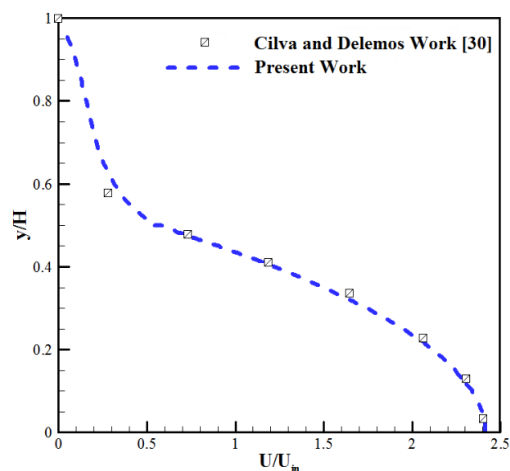
فرآیند استقلال نتایج نسبت به شبکه محاسباتی، برای کانال موج‌دار متخلخل انجام و نتایج آن در شکل ۵ مشخص شده است. در شکل ۵ عدد ناسلت محلی به ازای چهار شبکه با اندازه‌های متفاوت ترسیم شده است. این شکل، نشان می‌دهد که شبکه شماره ۳ دقت مورد نظر را دارد. یعنی عدد ناسلت برای شبکه شماره ۳ نسبت به شبکه شماره ۴ تغییرات بسیار ناچیزی دارد. بنابراین شبکه شماره ۳ به عنوان شبکه بهینه انتخاب گردیده است.

³ De Lemos

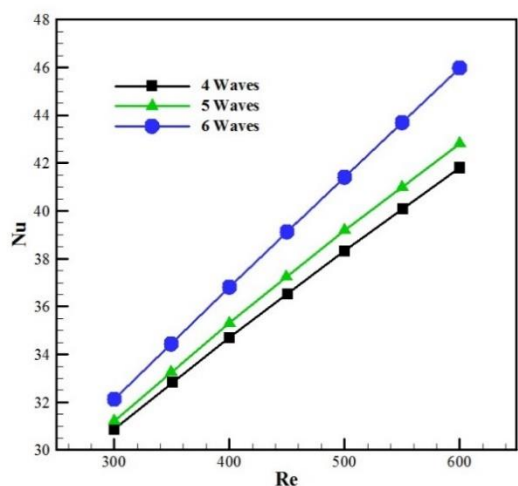
¹ Demagh
² Silva



شکل ۸- تأثیر تعداد موج‌های کانال بر ضریب اصطکاک در محدوده عدد رینولدز ۳۰۰ تا ۶۰۰ ($\varphi = 0.04$)



شکل ۷- مقایسه توزیع سرعت با مطالعه سیلوا و دالموس [۳۰]



شکل ۹- تأثیر تعداد موج‌های کانال بر عدد ناسلت متوسط در محدوده عدد رینولدز ۳۰۰ تا ۶۰۰ ($\varphi = 0.04$)

در شکل ۹ تأثیر تعداد موج به عدد ناسلت در محدوده عدد رینولدز ۳۰۰ تا ۶۰۰ نشان داده شده است. همانطور که شکل ۹ نشان می‌دهد، با افزایش عدد رینولدز، عدد ناسلت در هر سه موج ۴، ۵ و ۶ افزایش می‌یابد. علت این موضوع آن است که در انتقال حرارت جابه‌جایی اجباری هنگامی که سرعت جریان سیال زیاد می‌شود ضخامت لایه مرزی کوچک می‌شود. علاوه بر این، در یک عدد رینولدز ثابت، با افزایش تعداد موج، عدد ناسلت افزایش یافته است. بطوری‌که در عدد رینولدز ۶۰۰، عدد ناسلت از تعداد ۴ به ۶ حدود ۱۲/۲ درصد افزایش یافته است.

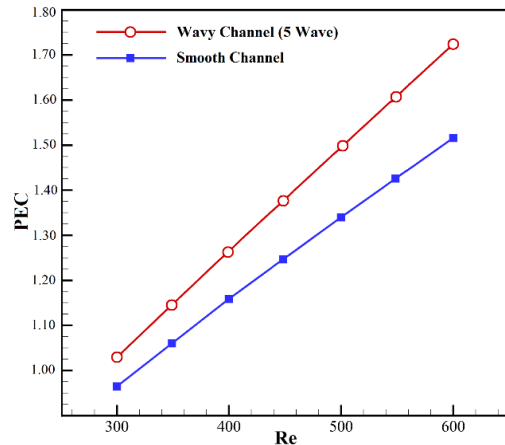
۵- نتایج و بحث

در این بخش، نتایج شبیه‌سازی عددی ارائه و تأثیر موج کانال، کسرحجمی ذرات نانو، میدان مغناطیسی و لایه متخلخل بررسی شده است.

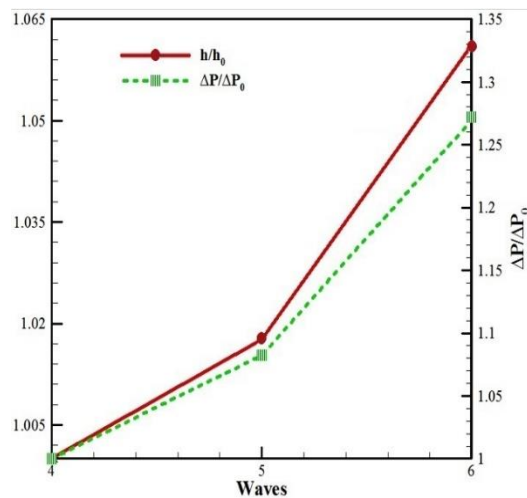
۵-۱- بررسی تأثیر موج کانال

تأثیر تعداد موج بر ضریب اصطکاک در محدوده عدد رینولدز ۳۰۰ تا ۶۰۰ در شکل ۸ نشان داده شده است. در همه رینولدزها، همواره موج کانال باعث افزایش افت فشار و ضریب اصطکاک می‌شود. علت آن تغییراتی است که به واسطه موج کانال در جریان ایجاد می‌شود، است. همچنین، مشخص است که با افزایش عدد رینولدز، ضریب اصطکاک به مقدار قابل توجهی کاهش می‌یابد. با توجه به اینکه ضریب اصطکاک با توان دوم سرعت رابطه عکس دارد، همواره افزایش عدد رینولدز کاهش ضریب اصطکاک را به دنبال دارد.

درصد بیشتر از کانال صاف (تخت) است. دلیل این امر این است که موج دیواره با تغییر در رژیم جریان سبب تغییر در لایه مرزی شده و انتقال حرارت جابه‌جایی را افزایش می‌دهد.



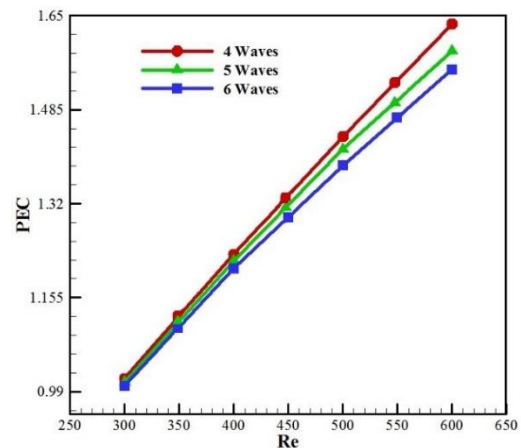
شکل ۱۱- مقایسه ضریب عملکرد هیدرولیکی-حرارتی کانال موجی شکل با کانال تخت



شکل ۱۲- نسبت ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی و نسبت افت فشار در موج‌های مختلف ($\phi = 0.04$)

شکل ۱۲ نسبت ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی و افت فشار در تعداد موج مختلف کانال (۴، ۵ و ۶) نشان داده شده است. همانطور که دیده می‌شود، با افزایش تعداد موج‌ها، نسبت ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی و افت فشار به ترتیب به مقدار ۵/۶ و ۲۷ درصد افزایش یافته‌اند. چون وجود دیواره‌های موجی

علت این پدیده آن است که با افزایش تعداد موج کانال، جریان‌های گردابه‌ای ایجاد شده سبب تغییر در رژیم جریان می‌شود، لایه مرزی حرارتی را برهم می‌زند و افزایش انتقال حرارت جابه‌جایی را به همراه دارد.



شکل ۱۰- عملکرد هیدرولیکی-حرارتی در موج‌های مختلف در محدوده عدد رینولدز ۳۰۰ تا ۶۰۰ ($\phi = 0.04$)

شکل ۱۰ عملکرد هیدرولیکی-حرارتی کانال در موج‌های مختلف (۴، ۵ و ۶) نشان شده است. مطابق شکل ۱۰ می‌توان استنباط نمود که با افزایش عدد رینولدز از ۳۰۰ تا ۶۰۰، عملکرد هیدرولیکی-حرارتی کانال برای تعداد موج ۴، ۵ و ۶ به ترتیب حدود ۶۵، ۵۶ و ۵۲ درصد افزایش یافته است. علاوه بر این، در عدد رینولدز ثابت، با افزایش تعداد موج، عملکرد هیدرولیکی-حرارتی کانال کاهش یافته است؛ بطوری که برای عدد رینولدز ۶۰۰، افزایش تعداد موج از ۴ تا ۶ موجب کاهش عدد ناسلت به مقدار حدود ۷/۸ درصد شده است. علت کاهش عملکرد هیدرولیکی-حرارتی کانال به افزایش افت فشار (افزایش ضریب اصطکاک) نانوسیال با افزایش تعداد موج کانال برمی‌گردد.

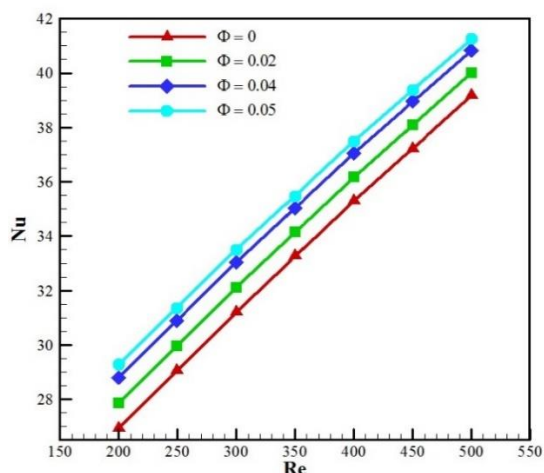
در شکل ۱۱ ضریب عملکرد کانال موجی شکل با کانال تخت مقایسه شده است. با مقایسه این دو هندسه مشخص است که ضریب عملکرد کانال موجی شکل در تمام اعداد رینولدز بیشتر از کانال تخت است. این افزایش در اعداد رینولدز بالا بیشتر است. به عبارتی، موج دیوار و سرعت جریان (عدد رینولدز) با کارایی حرارتی کانال رابطه مستقیم دارند. به طوری که در رینولدز ۶۰۰، راندمان حرارتی کانال موجی حدود ۱۸

باعث تغییر در رژیم جریان و لایه مرزی می‌شود. به این علت سبب افزایش انتقال حرارت و همچنین افت فشار شده است.

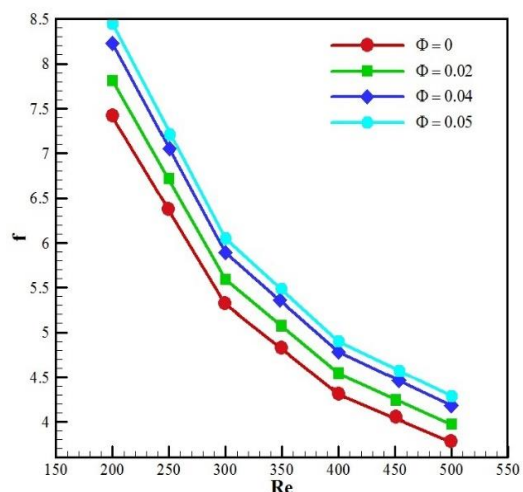
بر خورد ملکولی کاهش یافته و باعث کمتر شدن ضریب هدایت نانوسیال می‌شود.

۲-۵- بررسی تأثیر نانوذرات

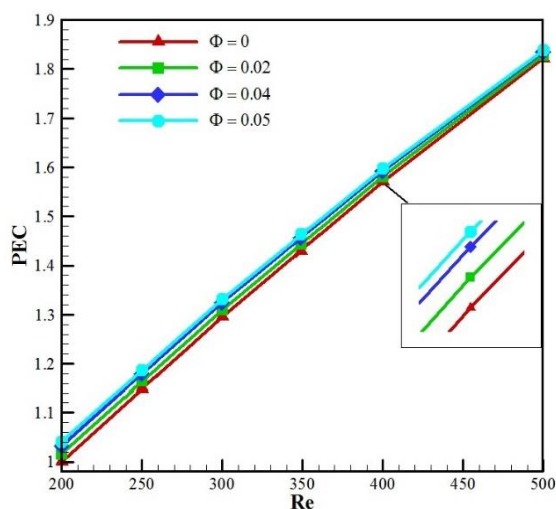
در شکل ۱۳ تأثیر کسر حجمی نانوذره بر ضریب اصطکاک نشان داده شده است. با توجه به شکل، با افزایش کسر حجمی از ۰ تا ۵ درصد، ضریب اصطکاک ۱۴ تا ۱۹ درصد افزایش یافته است. چون افزایش کسر حجمی نانوسیال، سبب تقویت لزجت سیال شده که این امر به نوبه خود باعث افزایش مقاومت در برابر حرکت سیال و در نتیجه کاهش فشار و ضریب اصطکاک می‌گردد.



شکل ۱۴- تأثیر کسر حجمی نانوذرات بر عدد ناسلت در کانال موج‌دار و در محدوده رینولدز ۲۰۰ تا ۵۰۰



شکل ۱۳- تأثیر کسر حجمی نانوذرات بر ضریب اصطکاک در کانال موج‌دار و در محدوده رینولدز ۲۰۰ تا ۵۰۰



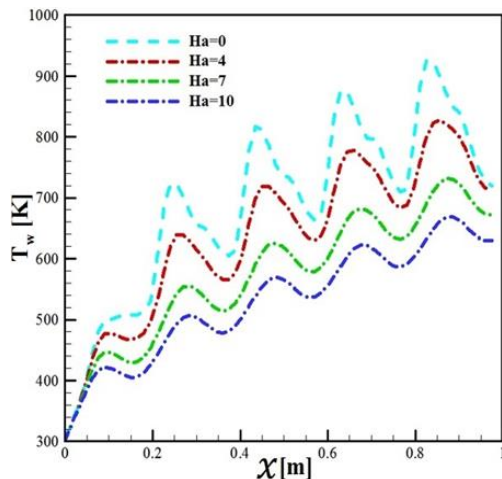
شکل ۱۵- تغییرات عملکرد هیدرولیکی-حرارتی کانال موج‌دار با کسر حجمی نانوذرات

شکل ۱۴ تأثیر کسر حجمی نانوذره بر عدد ناسلت نشان داده شده است. همانطور که مشهود است با افزایش عدد رینولدز و کسر حجمی نانوذرات، عدد ناسلت افزایش می‌یابد. مشخص است که با افزایش کسر حجمی از ۰ تا ۵ درصد، عدد ناسلت حدود ۷/۸ تا ۹/۲۵ درصد افزایش یافته است. دلیل این موضوع آن است که با افزایش کسر حجمی ذرات، دانسیته نانوسیال افزایش می‌یابد و موجب افزایش ممنوم (اندازه حرکت) و تقویت مکانیزم‌های انتقال حرارت جابه‌جایی می‌گردد. علت آن ناشی از بهبود خواص هدایت حرارتی سیال است. روند افزایش این ضریب در رینولدزهای بالاتر با کسر حجمی بالاتر نانوذره بیشتر است. در رینولدزهای کوچک

برای ارزیابی تأثیرگذاری نانوذرات بر انتقال حرارت، عملکرد هیدرولیکی-حرارتی برای کانال موج‌دار با استفاده از رابطه PEC محاسبه و در شکل ۱۵ نشان داده شده است. همانطور که در شکل دیده می‌شود، عملکرد هیدرولیکی-حرارتی کانال، با افزایش عدد رینولدز و در کسر حجمی

۳-۵- تأثیر میدان مغناطیسی

دمای محلی دیواره و ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی محلی در راستای محوری کانال در عددهای هارتمن مختلف در شکل ۱۷ نشان داده شده است.

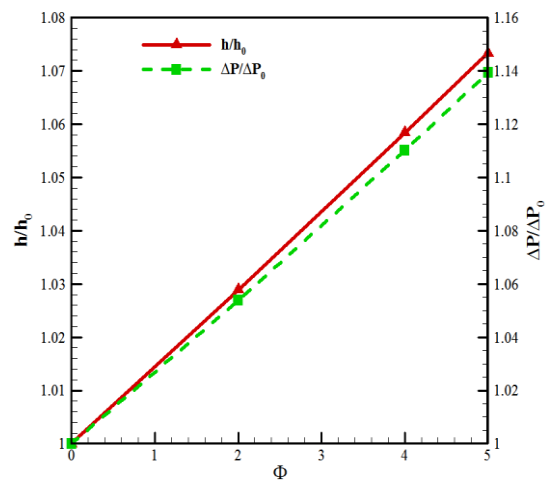


شکل ۱۷- تأثیر میدان مغناطیسی (عدد هارتمن) بر دمای دیواره کانال ($\text{Re} = 500$, $\phi = 0.04$)

مشهود است که افزایش میدان مغناطیسی که با عدد بی‌بعدی هارتمن نشان داده شده است، باعث کاهش دمای دیواره کانال و افزایش ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی می‌شود. به نحوی که با تغییر عدد هارتمن از صفر به ۱۰ بیشینه دما که در موج آخر کانال است حدود ۲۵۵ درجه کلون کاهش می‌یابد. دلیل این موضوع این است که، با افزایش شدت میدان مغناطیسی و به طبع آن عدد هارتمن، میزان نیروی الکترومغناطیسی تقویت می‌شود و جریان نانوسیال را به طرف جدارها متمایل کرده، باعث افزایش سرعت در نزدیکی جداره و کاهش سرعت در مرکز کانال می‌گردد. پس با افزایش عدد هارتمن، اختلاف دما در نزدیکی جداره بیشتر و قابلیت جذب حرارت از دیواره افزایش می‌یابد.

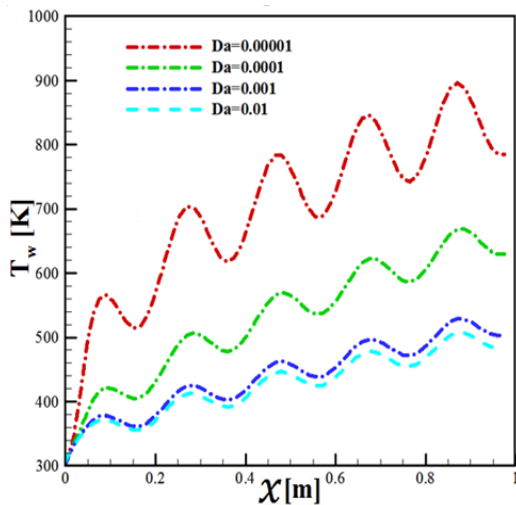
جهت ارزیابی عملکرد هیدرولیکی-حرارتی کانال موج‌دار، این معیار با استفاده از معادله PEC برای حالت‌های فوق محاسبه شده ($Da = 0.001$) و در جدول ۴ نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش عدد هارتمن از ۰ تا ۱۰، عملکرد هیدرولیکی-حرارتی نانوسیال با $\phi = 0.04$ و در محدوده عدد رینولدز ۱۰۰ تا ۵۰۰ در $Da = 0.001$ ، به میزان

نانوذرات مختلف روند افزایشی داشته است. بطوری که افزایش عدد رینولدز از ۲۰۰ تا ۵۰۰ در کسر حجمی نانوذرات مختلف موجب افزایش PEC به میزان ۲ تا ۴/۷۶ درصد می‌شود. همچنین در عدد رینولدز ثابت ۳۰۰، با افزایش کسر حجمی نانوذرات از ۰ تا ۵ درصد موجب افزایش عملکرد هیدرولیکی-حرارتی به میزان حدود ۴ درصد می‌شود. علت آن ناشی از افزایش کسر حجمی نانوذرات است که باعث افزایش رسانایی حرارتی نانوسیال و در نتیجه تقویت انتقال حرارت جابه‌جایی اجباری می‌شود.



شکل ۱۶- نسبت ضریب انتقال حرارت و افت فشار در کسر حجمی نانوذرات

نسبت ضریب انتقال حرارت و افت فشار در کسر حجمی‌های مختلف در رینولدز ۳۰۰ نسبت به سیال پایه در شکل ۱۶ مشخص شده است. قابل مشاهده است که نسبت ضریب انتقال حرارت و افت فشار با کسر حجمی نانوذرات تزریق شده به سیال پایه، رابطه مستقیم دارد. بطوری که با افزایش کسر حجمی نانوذرات از ۰ تا ۵ درصد در $\text{Re} = 300$ ، نسبت ضریب انتقال حرارت و نسبت افت فشار به ترتیب به میزان حدود ۷ و ۱۴ درصد افزایش یافته است. دلیل آن این است که تزریق ذرات نانو به سیال پایه باعث افزایش چگالی و لزجت دینامیکی نانوسیال شده و افت فشار افزایش می‌یابد. علت آن ناشی از افزایش نرخ برش در جداره‌ها به دلیل وجود ذرات جامد در نانوسیال خنک‌کننده است.



شکل ۱۸- تأثیر نفوذپذیری (عدد دارسی) بر دمای دیواره
($Re = 500, \phi = 0.04$)

جدول ۵- تأثیر عدد دارسی را بر عدد ناسلت در
رینولدزهای مختلف ($Ha = 10, \phi = 0.04$)

$Da = 0.00001$	$Da = 0.0001$	$Da = 0.001$	$Da = 0.01$
500	400	300	200
Re	Re	Re	Re
$1/70$	$1/52$	$1/32$	$1/17$
22	22	22	-
$1/92$	$1/67$	$1/40$	$1/19$
222	22	22	-
$2/22$	$1/88$	$1/50$	$1/12$
22	222	22	-
$2/33$	$2/13$	$1/83$	$1/41$
222	22	22	-
$6/92$	$5/85$	$4/50$	$3/25$
22	222	22	-
$10/08$	$9/05$	$7/33$	$5/54$
22	22	22	-

(%) : درصد تغییر (افزایش) نسبت به حالت اول است.

جدول ۵ عملکرد هیدرولیکی-حرارتی به ازای عدد دارسی‌های مختلف در کسر حجمی نانوذرات ۴ درصد، نشان داده شده است. همانطور که از داده‌های این جدول دیده می‌شود، عملکرد هیدرولیکی-حرارتی کانال موج‌دار با رینولدز (سرعت جریان) و نفوذپذیری (عدد دارسی) نسبت مستقیم

حدود ۱۳ تا ۵۶ درصد افزایش می‌یابد. دلیل آن این است که با اعمال میدان مغناطیسی جریان به جداره‌ها متمایل می‌شود و گرادیان دما در نزدیکی جداره‌ها باعث افزایش حرارت مبادله شده و در نهایت تقویت عملکرد هیدرولیکی-حرارتی می‌شود.

جدول ۴- تأثیر عدد هارتمن را بر عملکرد هیدرولیکی
حرارتی PEC در رینولدزهای مختلف ($Da = 0.0001$)

$Da = 0.0001$	$Da = 0.001$	$Da = 0.01$	$Da = 0.1$
500	400	300	200
Re	Re	Re	Re
$1/70$	$1/52$	$1/32$	$1/17$
22	22	22	-
$1/92$	$1/67$	$1/40$	$1/19$
222	22	22	-
$2/22$	$1/88$	$1/50$	$1/12$
22	222	22	-
$2/33$	$2/13$	$1/83$	$1/41$
222	22	22	-
$6/92$	$5/85$	$4/50$	$3/25$
22	222	22	-
$10/08$	$9/05$	$7/33$	$5/54$
22	22	22	-

(%) : درصد تغییر (افزایش) نسبت به حالت اول است.

۴-۵- تأثیر لایه محیط (متخلخل)

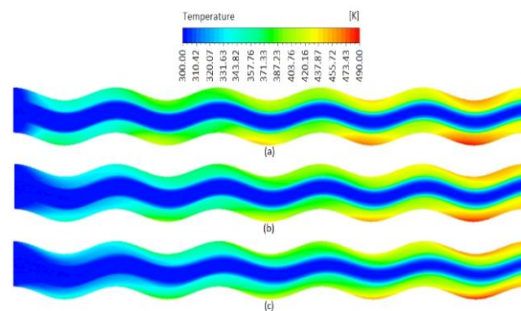
تأثیر تغییرات عدد دارسی بر دمای دیواره در شکل ۱۸ نشان داده شده است. مشهود است که کمینه دمای دیواره در موج اول و بیشینه دمای آن در موج آخر است. همچنین، با افزایش عدد دارسی، از 0.00001 به 0.1 از بیشینه دمای دیواره حدود ۴۲ درصد کاسته می‌شود. دلیل این موضوع، ناشی از آن است که با افزایش عدد دارسی نفوذپذیری فضای متخلخل بیشتر شده، در نتیجه دبی سیال عبوری این فضا افزایش یافته و قابلیت جذب حرارت از دیواره و انتقال حرارت تقویت شده است.

۶- نتیجه گیری

در این مطالعه، تأثیر مؤلفه‌های مختلف بر عملکرد هیدرولیکی-حرارتی در یک کانال موج‌دار تجزیه و تحلیل شده است. میدان مغناطیسی عمود بر کانال اعمال شده و در نزدیکی دیواره‌ها از محیط متخلخل استفاده شده است. دیوارهای کانال دارای شار حرارتی متناوب غیرثابت (سینوسی) هستند. جریان ذرات نانو در ۴ کسر حجمی مختلف، محیط متخلخل در ۴ عدد داری مختلف (۱۰^{-۵}، ۱۰^{-۴}، ۱۰^{-۳} و ۱۰^{-۲}) و اعمال میدان مغناطیسی در ۴ عدد هارتمن مختلف (۰، ۴، ۷ و ۱۰) و در رینولدزهای مختلف مورد بررسی قرار گرفته است. به طور کلی مشاهده شد که کسر حجمی ذرات نانو، موج کانال، محیط متخلخل و میدان مغناطیسی منجر به رفتار حرارتی متفاوتی در این هندسه می‌شود. نتایج حاصل از مطالعه حاضر به طور خلاصه به صورت زیر ارائه گردیده است:

- ۱- تزریق ذرات نانو باعث بهبود انتقال حرارت خواهد شد. به گونه‌ای که در رینولدز ۵۰۰ و یکسان بودن بقیه مؤلفه‌ها، تزریق ذرات نانو در کسر حجمی ذرات نانو ۵ درصد باعث افزایش عدد ناسلت به میزان ۵/۲۸۸ درصد خواهد شد.
- ۲- عملکرد هیدرولیکی-حرارتی کانال، با افزایش کسر حجمی نانوذرات روند افزایشی داشته است. بطوری که در عدد رینولدز ۲۰۰ تا ۵۰۰ در کسر حجمی مختلف، عملکرد هیدرولیکی-حرارتی به میزان ۲ تا ۴/۷۶ درصد افزایش خواهد یافت.
- ۳- با افزایش تعداد موج کانال عدد ناسلت افزایش می‌یابد. به عبارتی، با افزایش تعداد موج کانال و ایجاد جریان‌های گردابه‌ای، رژیم جریان و لایه مرزی تغییر کرده و افزایش انتقال حرارت جابه‌جایی را به همراه دارد.
- ۴- با افزایش شدت میدان مغناطیسی (عدد هارتمن)، گرادیان دما در نزدیکی جداره بیشتر و قابلیت جذب حرارت از دیواره بهبود پیدا می‌کند.
- ۵- با تقویت عدد هارتمن از ۰ تا ۱۰، عملکرد هیدرولیکی-حرارتی نانو سیال در محدوده عدد رینولدز ۱۰۰ تا ۵۰۰ در $Da = 0.001$ ، به میزان حدود ۱۳ تا ۵۶ درصد افزایش می‌یابد.
- ۶- با ارزیابی ضریب اصطکاک بر حسب هارتمن‌های مختلف، این نتیجه حاصل می‌شود که ضریب اصطکاک روندی افزایشی دارد. به نحوی که در رینولدز ثابت (۵۰۰) با افزایش عدد هارتمن از ۰ به ۱۰ ضریب اصطکاک ۳ برابر می‌شود، اما در

دارد. کمترین ضریب عملکرد هیدرولیکی-حرارتی در عدد داری ۰/۰۰۰۰۱ با مقدار ۰/۵۲ و بیشترین در عدد داری ۰/۰۱ با مقدار ۱۰/۰۸ مشاهده می‌شود. علت افزایش عملکرد هیدرولیکی-حرارتی با افزایش عدد داری، این است که با افزایش عدد داری، میزان نفوذپذیری محیط متخلخل افزایش یافته و مقاومت این محیط در برابر عبور جریان کم شده و این امر باعث می‌شود انتقال حرارت جابه‌جایی افزایش و اصطکاک کاهش یابد. مطابق با عدد داری که به صورت $Da = \frac{K}{D_h^2}$ تعریف می‌شود، بین عدد داری با نفوذپذیری تناسب مستقیمی برقرار است. پس، با افزایش عدد داری، نفوذپذیری در محیط متخلخل تقویت شده و به طبع حرارت مبادله شده افزایش می‌یابد.



شکل ۱۹- کانتور دما به ازای مقادیر مختلف عدد داری

کانتورهای دما به ازای داری‌های مختلف، در شکل ۱۹ آورده شده است. این کانتور بیانگر آن است که بیشینه دمای کانال، در موج آخر رخ می‌دهد. علاوه بر این، با افزایش عدد داری، بیشینه دمای دیواره کاهش می‌یابد به گونه‌ای که با افزایش عدد داری از ۰/۰۰۰۰۱ به ۰/۰۰۰۱ و از ۰/۰۰۰۱ به ۰/۰۰۱، بیشترین دمای روی دیواره کانال به ترتیب به میزان ۲۳۳ و ۱۶۰ درجه کلون کاهش می‌یابد. علت آن همان طوری که بیان شد، ناشی از آن است که با افزایش عدد داری، نفوذپذیری (دبی) نانو سیال درون محیط متخلخل بیشتر شده و در نهایت حرارت بیشتری از دیواره جذب می‌شود. پس با افزایش دبی عبوری قابلیت جذب حرارت از دیواره تقویت شده است.

σ (siemens/m)	رسانایی الکتریکی
ϑ (m ² /s)	ویسکوزیته سینماتیکی
φ (%)	کسر حجمی نانوذرات

مراجع

- [1] Saidur, R. Leong, K. Y. and Mohammed, H. A. (2011) A review on applications and challenges of nanofluids. *Renew. Sustain. Energy Rev*, 15, 1646–1668.
- [2] Arora, N. Gupta, M. (2022) An experimental study on heat transfer and pressure drop analysis of Al₂O₃/water nanofluids in a circular tube. *Mater. Today Proc*, 69, 199-204.
- [3] Avinash-Kumar, R. Kavitha, M. and Manoj Kumar, P. (2021) Numerical study of graphene-platinum hybrid nanofluid in microchannel for electronics cooling, *Proc. Inst. Mech. Eng. Pt. C J. Mechan. Eng. Sci*, 235, 5845-5857.
- [4] Moslemi, M. Mahmoodnezhad, M. Edalatpanah, S.A. Mohammed-Zubair, S.A. Wahed-Khalifa, H.A. (2023) Magnetic Field Effect and Heat Transfer of Nanofluids within Waveform Microchannel. *Comput. Model. Eng. Sci*, 134. 1957–1973.
- [5] Moradi, T. Shahbazian, H. Hoseinalipour, M. Sunden, B. (2023) Effects of wavy ribs on vortex generation and thermal-hydraulic performance in a rotating rectangular channel. *Appl. Therm. Eng.*, 222. 119952.
- [6] Mehta, S.K. Pati, S. and Baranyi, L. (2022) Effect of amplitude of walls on thermal and hydrodynamic characteristics of laminar flow through an asymmetric wavy channel. *Case Stud. Therm. Eng.*, 31. 101796.
- [7] جمارانی، ع.، معرفت، م.، اسحق نیموری، م. (۲۰۱۵) معرفی تعریف عدد ناسلت مناسب برای جریان سیال در یک لوله با ماده متخلخل جزئی. *نشریه مهندسی مکانیک مدرس*. ۱۵ (۶)، ۲۷۸-۲۸۶.
- [8] Yaerramle, V. Premachandran, B. and Talukdar, P. (2021) Mixed Convection From a Heat Source in a Channel with a Porous Insert: A Numerical Analysis Based on Local Thermal Non-Equilibrium Model. *Therm. Sci. Eng. Prog*, 25. 101010.
- [9] پورموید، ع.، ولی‌پور، م.، ص.، رحمتی، ع.، و رحمانی، ر. (۲۰۱۴). بررسی عددی تأثیرات میدان مغناطیسی مماسی و ثابت بر جریان و انتقال حرارت از یک استوانه پوشیده شده با نوار متخلخل. *نشریه مکانیک سازه‌ها و شاره‌ها*. ۴ (۴)، ۱۹۱-۲۰۵.
- [10] Ibrahim, M. Saeed, T. Bani, F.R. Sedeh, S.N. Chu, Y. M. and Toghraie, D. (2021) Two-phase Analysis of Heat Transfer and Entropy Generation of Water-based Magnetite Nanofluid Flow in a Circular Microtube with Twisted Porous Blocks under a Uniform Magnetic Field. *Powder Technol*, 384. 522–541.

مجموع در این شرایط ضریب عملکرد هیدرولیکی-حرارتی روندی مثبت داشت و حدود ۴۳ درصد افزایش پیدا می‌کند. ۷- با وجود محیط متخلخل و افزایش عدد دارسی (افزایش نفوذپذیری لایه متخلخل و کاهش مقاومت ویسکوز) همواره عملکرد هیدرولیکی-حرارتی بهبود پیدا کرد. به طوری که کمترین ضریب عملکرد هیدرولیکی-حرارتی در کمترین عدد دارسی (۰/۰۰۰۰۱) با مقدار ۰/۵۲ و بیشترین آن در بالاترین عدد دارسی (۰/۰۱) با مقدار ۱۰/۰۸ مشاهده می‌شود. پس استفاده از محیط متخلخل دارای نتایج مطلوب‌تری نسبت به استفاده میدان مغناطیسی بود.

۷- علائم، نشانه‌ها و ارقام

B (T)	میدان مغناطیسی
D (m)	قطر (ارتفاع) کانال
Da (m)	عدد دارسی
D _h (m)	قطر هیدرولیکی
Ha (-)	عدد هارتمن
h _{local} (w/m ² K)	ضریب حرارت جابه‌جایی
K (m ²)	نفوذپذیری محیط متخلخل
K (w/m K)	ضریب رسانش حرارتی
L (m)	طول مشخصه کانال
H _p (m)	ارتفاع لایه متخلخل
PEC (-)	عملکرد هیدرولیکی-حرارتی
Pr (-)	عدد پرانتل
q'' (w/m ²)	شار حرارتی
T _w (K)	دمای دیواره کانال
V _v (m ³)	حجم حفره در محیط متخلخل
V _T (m ³)	حجم کل در محیط متخلخل
ΔP (Pa)	افت فشار
α (m)	دامنه موج
δ (m)	ضخامت لایه مرزی هیدرودینامیکی
δ _t (m)	ضخامت لایه مرزی حرارتی
ε (%)	تخلخل
λ (m)	طول موج کانال
μ (Pa.s)	ویسکوزیته دینامیکی
ρ (kg/m ³)	چگالی

- [20] Sheikhpour N, Mirabdollah Lavasani A, Salehi G (2022) Study the Effects of Magnetic Field and Porous Medium on Heat Transfer and Flow of a Nanofluid in a Wavy Channel. *J. Mode . Engine*, 20 (71): 13–25.
- [21] Demagh, Y. Bordja, I. Kabar, Y. and Benmoussa, H. (2015) A design method of an S-curved parabolic trough collector absorber with a three-dimensional heat flux density distribution. *Sol. Energy*, 122. 873-884.
- [۲۲] نوری، ر.، گرجی، م.، دمیری گنجی، د. (۲۰۱۴). بررسی عددی اثر میدان مغناطیسی بر انتقال حرارت اجباری نانوسیال در یک کانال سینوسی شکل، نشریه مهندسی مکانیک مدرس. ۱۳ (۱۴)، ۴۳-۵۵.
- [23] Ashorynejad H.R. and Zarghami (2018) A. Magnetohydrodynamics flow and heat transfer of Cu-water nanofluid through a partially porous wavy channel. *Int. J. Heat Mass Transf*, 119 .247-258.
- [24] Nazari, S. and Toghraie, D. (2017) Numerical simulation of heat transfer and fluid flow of Water-CuO Nanofluid in a sinusoidal channel with a porous medium. *Physica E*, 87. 134–140.
- [25] Kays, W.M. and London, AL. Compact heat exchangers. 3rd ed. Melbourne. Kreiger Publishing, 1984.
- [26] Khoshvaght-Aliabadi, M. (2014) Influence of different design parameters and Al_2O_3 -water nanofluid flow on heat transfer and flow characteristics of sinusoidal-corrugated channels. *Energy Convers Manag*, 88. 96–105.
- [27] Mceuen, P.L. Fuhrer, M.S. and Park H. (2002) Single-Walled Carbon Nanotube Electronics. *IEEE Trans. Nanotechnol*, 1. 78-85.
- [28] Minea A.A. and El-Maghlany W.M. (2018) Influence of hybrid nanofluids on the performance of parabolic trough collectors in solar thermal systems: recent findings and numerical comparison. *Renew. Energy*, 120. 350–364.
- [29] A. Fluent, (2011) Ansys fluent theory guide, ANSYS Inc., USA, vol. 15317, pp. 724–746.
- [30] Silva R.A. and De Lemos, M.J.S. (2003) Turbulent flow in a channel occupied by a porous layer considering the stress jump at the interface. *Int. J. Heat Mass Transf*, 46. 5113-5121.
- [۱۱] رحمتی، ا.، نجارنظامی، ا. (۲۰۱۷). شبیه‌سازی جریان جابجایی طبیعی نانوسیال در یک محفظه شیبدار تحت میدان مغناطیسی به روش شبکه بولتزمن، نشریه مهندسی مکانیک امیرکبیر. ۴۹ (۳)، ۵۹۵-۶۰۴.
- [12] Kefayati, GH. R. (2013) Lattice Boltzmann simulation of MHD natural convection in a nano fluid- filled cavity with sinusoidal temperature distribution. *Powder Technol*, 243. 171-183.
- [13] Bhattacharyya, S. Sharma, AK. Vishwakarma, DK. Goel, V. (2023) Influence of magnetic baffle and magnetic nanofluid on heat transfer in a wavy minichannel. *Sustain. Energy Technol. Assessments*, 56. 102954.
- [14] Benos, L. and Sarris, I.E. (2019) Analytical Study of the Magnetohydrodynamic Natural Convection of a Nanofluid Filled Horizontal Shallow Cavity with Internal Heat Generation. *Int. J. Heat Mass Transf*, 130. 862-873.
- [15] Erdem, M. and Varol, Y. (2020) Numerical Investigation of Heat Transfer and Flow Characteristics of MHD Nano-fluid Forced Convection in a Pipe, *J. Therm. Anal. Calorim*, 139. 3879–3909.
- [16] Han, L. Lu, C. Yumashev, A. Bahrami, D. Kalbasi, R. Jahangiri, M. and Mosavi, A. (2021) Numerical investigation of magnetic field on forced convection heat transfer and entropy generation in a microchannel with trapezoidal ribs. *Eng. Appl. Comput. Fluid Mech*, 15. 1746–1760.
- [17] Kalpana, G. Madhura, KR. and Kudenatti, RB. (2022) Magnetohydrodynamic boundary layer flow of hybrid nanofluid with the thermophoresis and Brownian motion in an irregular channel: A numerical approach. *Eng. Sci. Technol*, 32. 101075.
- [18] Elsaid, EM. and Abdel-wahed. (2022) MHD mixed convection Ferro Fe_3O_4 /Cu-hybrid-NF runs in a vertical channel. *Chin. J. Phys*, 76 . 269–282.
- [19] Mohammadi, S. Azimi, N. and Khazaei M. (2022) CFD simulation of the effect of magnetic field on convective heat transfer and ferrofluid flow inside a pipe. *J. Mode . Engine*, 20. 155–166.