نشریه علمی- پژوهشی مهندسی هوانوردی
سال بیست و هشتم، شماره اول، بهار و تابستان 1405

بررسی عددی انتقال گرما و اصطکاک جریان نانوسیال دریک لوله جاذب فولادی متخلخل

میثم محمودی[*1]
1- عضو هیئت علمی، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه ولایت، ایرانشهر
(دریافت مقاله: 1404/02/13 تاریخ پذیرش: 1404/06/11)

چکیده
امروزه، بهبود مصرف انرژی و عملکرد حرارتی سیستم‌ها مورد توجه محققین است. استفاده از نانوسیال در محیط متخلخل، روشی رایج برای افزایش نرخ انتقال گرما است. در این پژوهش، انتقال گرما و جریان درون یک لوله حاوی محیط متخلخل با نانوسیال بررسی عددی شده است. مدل‌سازی دو بعدی با فرض جریان آرام، دمای ثابت و نانوسیال آب-نقره، با هدف بهبود انتقال گرما انجام شده است. هدف اصلی، دستیابی همزمان به کمترین ضریب اصطکاک و بیشترین نرخ انتقال گرما است.. با شرایط نانوسیال در کسر حجمیϕ=0.05 با ضریب تخلخل $0.08 < \varepsilon < 0.98$، و عدد دارسی متغییر، $10^{-8} < Da < 10^{-2}$، $CF = 0.19$ و$K = 6.09$ برای یک لوله از جنس فولاد بررسی انجام شده است. این بررسی نشان داد که کاهش عدد دارسی منجر به افزایش عدد ناسلت (تقریباً 94 درصد در طول لوله) و ضریب اصطکاک می‌شود. افزایش انتقال گرما ناشی از افزایش اندرکنش بین نانوسیال و ماده متخلخل است. اعداد دارسی بزرگتر، بازیافت انرژی کمتری در مقایسه با هدررفت انرژی دارند. کاهش دما نیز می‌تواند دلیل دیگری برای افزایش عدد ناسلت باشد. افزایش سرعت، فشار و عدد رینولدز در طول لوله نیز عامل افزایش ضریب اصطکاک است.

واژه‌های کلیدی: لوله جاذب فولادی ، نانوسیال، محیط متخلخل، ضریب اصطکاک، عدد ناسلت

Numerical Investigation of Heat Transfer and Flow Friction of Nanofluid in a Porous Steel Absorber Tube

1st Meysam Mahmoudi

Abstract
Nowadays, improving energy consumption and thermal performance of systems has attracted considerable attention from researchers. The use of nanofluids in porous media is a common method to enhance heat transfer rates. In this study, heat transfer and fluid flow inside a pipe containing a porous medium saturated with a nanofluid were numerically investigated. A two-dimensional model with the assumptions of laminar flow, constant temperature, and water-silver nanofluid was developed to enhance heat transfer. The main objective was to achieve simultaneously the lowest friction factor and the highest heat transfer rate. The study was conducted for a nanofluid volume fraction of f = 0.05, porosity ε in the range of $0.08 < \varepsilon < 0.98$, and variable Darcy number in the range of $10^{-8} < Da < 10^{-2}$, with friction factor CF = 0.19 and Nusselt number K = 6.09 for a steel pipe. The results showed that decreasing the Darcy number leads to an increase in the Nusselt number (approximately 94% along the pipe length) and friction factor. The enhanced heat transfer is attributed to the increased interaction between the nanofluid and the porous matrix. Larger Darcy numbers result in lower energy recovery compared to energy loss. Temperature reduction may also contribute to the increase in Nusselt number. Furthermore, increases in velocity, pressure, and Reynolds number along the pipe were identified as factors that raise the friction factor.

Key words: *Steel Absorber Tube; Nanofluid; Porous Medium; Friction Factor; Nusselt Number*

* نویسنده پاسخگو: میثم محمودی ، تلفن: 09376910697 ، پست الکترونیک: M.mahmoudi@velayat.ac.ir
این مقاله تحت لیسانس آفرینندگی مردمی (Creative Commons License) در دسترس شما قرار گرفته است. برای جزئیات این لیسانس از آدرس https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode دیدن فرمایید.

مقدمه

امروزه توسعه و به‌کارگیری روش‌هایی که بتوانند موجب افزایش انتقال گرما شوند، به یکی از موضوعات مهم و مورد توجه مهندسان و پژوهشگران تبدیل شده است. لوله متخلخل به دلیل کاربردهای گسترده در صنایع مختلف از جمله سیستم‌های خنک‌کننده، مبدل‌های حرارتی و انرژی‌های تجدیدپذیر مورد توجه قرار گرفته است. به طور کلی ضریب انتقال گرما جابجایی در سیستم های متشکل از محیط های متخلخل بیشتر است. علت این امر بیشتر بودن ضریب هدایت حرارتی ماتریس متخلخل در مقایسه با سیالات و افزایش سطح تبادل گرما است[1]. در برخی موارد پر کردن کل سیستم با محیط متخلخل جهت بهبود انتقال گرما لزومی ندارد. با توجه به اینکه در سیستم هایی که سیالات جریان دارند، قرار گرفتن محیط متخلخل در مسیر جریان سبب ایجاد افت فشار در حرکت سیال نیز می گردد. در بسیاری از موارد قرار دادن محیط متخلخل در نیمی از سیستم جهت افزایش انتقال گرما کفایت می کند. وجود محیط متخلخل در مسیر جریان سیال، ضریب هدایت حرارتی و ظرفیت گرمایی موثر جریان را بهبود داده و همچنین ماتریس متخلخل جامد سرعت انتقال گرما تشعشعی را به خصوص در سیستم هایی که گاز جریان دارد، افزایش می دهد. به طور کلی بهبود انتقال گرما توسط محیط های متخلخل با سه مکانیزم عمده صورت می گیرد[1]:

1- توزیع و پخش سیال در سیستم و ایجاد هم زدگی و کاهش ضخامت لایه مرزی
2- بهبود ضریب هدایت حرارتی و ظرفیت گرمایی موثر جریان
3- بهبود خواص تشعشعی

مواد متخلخل که در آن ها از جریان نانوسیالات استفاده می شود، خواص انتقال گرمای بسیار مطلوبی را نشان می دهند. در سال های اخیر تلاش های فراوانی برای مطالعه محیط های متخلخل اشباع شده توسط نانوسیالات صورت گرفته است. این مطالعات بر روی انواع انتقال گرما جابجایی آزاد، اجباری و هم چنین ترکیبی و با استفاده از هندسه های گوناگون محیط متخلخل و خواص و ویژگی های متعددی انجام شده است. در اغلب مطالعات، وابستگی سرعت، دما، نسبت حجمی نانوسیال، ضریب اصطکاک و نرخ انتقال گرما سطحی را به پارامترهایی نظیر نسبت بویانسی[1]، پارامتر حرکت براونی، عدد ترموفورسیس[2] و عدد لوییس[3] ارتباط داده اند[1]. از دیگر روش‌های افزایش انتقال گرما که در سال‌های اخیر مورد توجه قرار گرفته است، استفاده از نانوسیال می‌باشد. با پیشرفت تکنولوژی، ذرات فلزی و غیر فلزی در ابعاد نانومتر تولید شده اند. دو پارامتری که در بهبود انتقال گرما جابجایی نقش بسیار مهمی دارند، مساحت سطح و هم چنین رسانش حرارتی سیال عامل هستند. مساحت سطح با استفاده از اتصال پره و یا ساختارهای متخلخل به سطوح انتقال گرما و رسانش گرمایی با ترکیب کردن نانوذرات بارسانش بسیار بالا با سیال عامل و تولید نانوسیال بهبود داده می شوند. ساختارهای متخلخل سلول باز بارسانش گرمایی بالا نظیر فوم های فلزی به عنوان جایگزینی برای فین های معمول، به دلیل نسبت بالای مساحت سطح به حجم، مقاومت پایین سیال و توانایی بالای آن ها در ترکیب سیال در حال گذر ارائه شده اند. در یک دهه گذشته، مواد با ساختارهای سلولی به طور وسیع مورد مطالعه تجربی و تئوری برای طراحی نوین محلول ها و مبدل های گرمایی قرار گرفته اند. یکی از پارامترهای مهم در طراحی مبدل های گرمایی، افت فشار سیال در داخل لوله ها می باشد که توجه محققان بسیاری را به خود جلب کرده است[1]. نیلد[4] به صورت تحلیلی جریان آرام توسعه یافته جابجایی اجباری را برای یک محیط متخلخل که توسط یک نانوسیال اشباع شده و تحت شرط مرزی شار گرمایی ثابت قرار گرفته را مورد مطالعه قرار دادند[2]. یک مدل که اثرات حرکت براونی و ترموفورسیس را در نظر می گیرد توسط آن ها ارائه شده است. حاجیپور و مولایی دهکردی انتقال گرما مختلط نانوسیالات را در یک کانال عمودی که بخشی از آن از ماده متخلخل پر شده است، را به طور تجربی و عددی بررسی کردند. نتایج آن ها نرخ انتقال گرما به واسطه حضور نانوذرات در سیال عامل را گزارش نمودند[3]. مغربی و همکاران انتقال گرما جابجایی اجباری نانوسیال در کانال متخلخل و تاثیرات جریان و مهاجرت نانوذرات را بر انتقال گرما داخل یک کانال که با محیط متخلخل پوشیده شده است را مورد مطالعه قرار داده اند. این فرض در نظر گرفته شده است که نانوذرات به طور غیریکنواخت داخل کانال قرار پخش شده اند. تاثیرات عدد لویس، عدد اشمیت[5] و نسبت تغییر یافته

[1] Buoyancy

[2] Thermophoresis
[3] Lewis number
[4] Nield
[5] Schmidt number

پخش بر توزیع نسبت حجمی مورد بحث و بررسی قرار گرفته اند[4]. متین و پاپ[6] به طور عددی انتقال گرما جابجایی اجباری را برای جریان توسعه یافته نانوسیال داخل یک کانال متخلخل افقی را بررسی نمودند. شکل بسته حل تحلیلی برای معادلات بدون بعد مومنتوم، انرژی و تاثیر درصد حجمی نانوذرات، عدد دارسی[7]، برینکمن[8]، سورت[9]عدد ناسلت، سرعت و دما در کار آن ها بررسی شده است[5]. نظری و همکاران به صورت تجربی به بررسی انتقال گرما جابجایی نانوسیال آلومینیوم اکسید با غلظت های مختلف درون لوله پر شده از ماده متخلخل فوم آلومینیومی پرداختند. شرط مرزی دما ثابت برای دیواره لوله در نظر گرفته شده و برای چندین دبی ، افت فشار و نرخ انتقال گرما محاسبه شده است. نتایج با نتایج حاصل از جریان آب خالص در داخل لوله ای مشابه، بدون وجود محیط متخلخل مقایسه شده و افزایش چشمگیری در نرخ انتقال گرما، البته به قیمت افزایش افت فشار مشاهده شده است. نتایج همچنین نسبت مستقیمی بین عدد ناسلت و نسبت حجمی نانوذرات نشان می-دهد. نانوسیال آلومینیوم اکسید و آب در پنج درصد حجمی مختلف آماده شده اند[6]. شیخ الاسلامی بر روی شبیه‌سازی عددی انتقال گرما جابجایی طبیعی نانوسیال درون لوله تحت میدان مغناطیسی کار کرد. تاثیر اعداد دارسی، رایلی[10]، هارتمن[11]، کسر حجمی و میدان مغناطیسی برروی انتقال حرارت جابجایی بررسی شد. نتایج نشان داد که با افزایش عدد هارتمن، نرخ انتقال حرارت افزایش یافته و همچنین با افزایش عدد دارسی و عدد رایلی، نرخ انتقال حرارت کاهش می‌یابد[7]. اکبر و همکاران به مطالعه انتقال گرما و جریان نانوسیال مغناطیسی درون کانالی با محیط متخلخل متحرک پرداختند. نتایج نشان داد که در اعداد رینولدز و پارامترهای انقباض و انبساط، جریان حوالی ناحیه متخلخل کاهش می‌یابد. همچنین نتایج نشان داد که سرعت انتقال حرارت با افزایش عدد رینولدز افزایش می‌یابد[8].

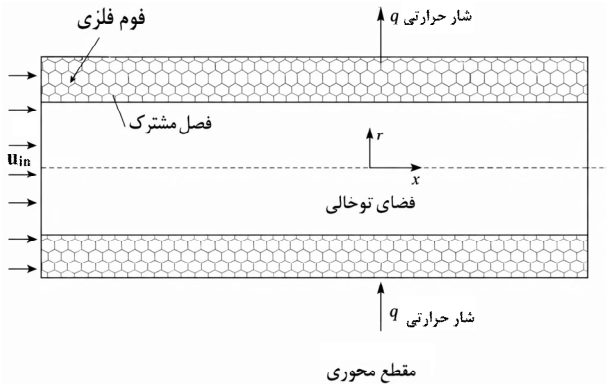
بقایی سریزدی و همکاران به مطالعه عددی بر روی انتقال گرما جابجایی اجباری نانوسیال درون یک لوله پرشده از محیط متخلخل پرداختند. همچنین در این پژوهش تاثیر محیط متخلخل بر توزیع کسر حجمی ذرات مورد بحث و بررسی قرار گرفت. نتایج نشان آن ها نشان داد که عدد ناسلت با افزایش کسر حجمی ذرات افزایش یافته است[9]. امانی و همکاران به مطالعه تجربی برروی مشخصات انتقال حرارت جابجایی و افت فشار نانوسیال درون یک لوله پرشده با محیط متخلخل، پرداختند. نتایج این مطالعه حاکی از افزایش عدد ناسلت در هنگام افزایش کسر حجمی نانوذرات و عدد رینولدز بود[10]. نظری و تقرائی انتقال گرمای جابجایی و جریان سیال را با استفاده از نانوسیال آب-اکسید مس را در یک کانال سینوسی با حضور محیط متخلخل آنالیز کردند. نتایج این مطالعه نشان داد که وجود یک محیط متخلخل در یک کانال و اضافه کردن نانوذرات به سیال پایه، عدد ناسلت و ضریب انتقال حرارت را افزایش می‌دهد. همچنین نتایج نشان داد که با افزایش عدد رینولدز، گرادیان دما افزایش می‌یابد[11]. شیخ‌نژاد و همکاران به بررسی جریان و انتقال حرارت فروسیال درون لوله افقی پر شده با ماده متخلخل تحت بارهای مغناطیسی ثابت پرداختند. نتایج آن ها نشان می دهد که وجود رسانه های متخلخل و میدان مغناطیسی به طور قابل توجهی ضریب انتقال حرارت را افزایش می دهد. افزایش انتقال حرارت به ترتیب تا 2/2 و 1/4 برابر با حضور رسانه ها و میدان مغناطیسی است. همچنین، همزمانی حضور رسانه های متخلخل و میدان مغناطیسی انتقال گرما را تا 2/4 برابر افزایش می دهد[12]. بارنوون و همکاران، به مطالعه عددی جریان آرام و انتقال گرما نانوسیال غیرنیوتنی با حضور محیط متخلخل پرداختند. در این مطالعه تاثیر کسر حجمی نانوذرات، عدد رینولدز، عدد دارسی و نسبت ضخامت بررسی شد. نتایج نشان داد که اثر لایه متخلخل بر افزایش انتقال گرما جابجایی بیشتر از عدد رینولدز است. زیرا در یک کسر حجمی ثابت، محیط متخلخل نقش پررنگ‌تری در افزایش انتقال گرما نسبت به افزایش عدد رینولدز دارد[13]. اخیرا ژانگ و همکاران به بررسی جریان نانوسیال در یک لوله متخلخل با تولید حرارت پرداختند[14]. نتایج آن ها و سایر کارهای اخیر نشان داد که استفاده از نانوسیال به طور قابل توجهی انتقال گرما را بهبود می‌بخشد و این بهبود با افزایش غلظت نانوذرات و نفوذپذیری لوله متخلخل بیشتر می‌شود. همچنین، تولید گرما داخلی تأثیر قابل توجهی بر توزیع دما و پروفیل سرعت جریان دارد. این مطالعه بینش‌های ارزشمندی را برای طراحی و بهینه‌سازی سیستم‌های انتقال گرما با استفاده از

[6] Matin & Pop
[7] Darcy Number
[8] Brinkman number
[9] Soret number
[10] Rayleigh
[11] Hartmann

نانوسیال در لوله های متخلخل ارائه می‌دهد[18-15]. فنایی و رضاپور[21-19] به بررسی های حرارتی نانوسیال در کویل های حرارتی متخلخل و غیر متخلخل تحت شار حرارتی خورشیدی متمرکز شدند. نتایج آن ها نشان داد با افزایش کسر حجمی، میزان ضریب انتقال گرمای جابجایی و عدد ناسلت افزایش یافته و در نتیجه، گرمای منتقل شده به کویل حرارتی متخلخل افزایش می‌یابد. صانعی و همکاران به شبیه سازی عددی جریان نانوسیال و انتقال گرما در میکروکانال های متخلخل با آرایش های مختلف مسیر جریان پرداخته اند. نتایج آن ها بیانگر تاثیر قابل توجه هندسه و چیدمان مسیر بر افزایش بهره وری انتقال گرما و بهینه سازی جریان سیال می باشد[22]. اولادتان و همکاران به مطالعه عملکرد گرمایی و هیدرولیکی سینک حرارتی میکروکانال را با استفاده از نانوسیال های هیبریدی به صورت عددی مورد بررسی قرار دادند. نتایج تحلیل شده آن ها نشان می دهد که استفاده از نانوسیال های ترکیبی در محیط متخلخل می تواند عملکرد انتقال گرما را به طور چشمگیری افزایش دهد[23]. مرور پژوهش‌های پیشین نشان می‌دهد که افزایش انتقال حرارت با استفاده از نانوذرات و محیط‌های متخلخل، در دهه‌های اخیر به یکی از زمینه‌های مهم تحقیقاتی تبدیل شده است. در این راستا، مطالعات عددی و تجربی متعددی درباره جریان سیال و انتقال حرارت در لوله‌های جاذب با استفاده از سیالات عامل مختلف انجام شده است. نتایج این تحقیقات بیانگر آن است که به‌کارگیری نانوسیالات می‌تواند موجب بهبود عملکرد حرارتی و افزایش نرخ انتقال گرما شود. با وجود پیشرفت‌های قابل توجه در این حوزه، همچنان اطلاعات محدودی درباره مقایسه عملکرد حرارتی مونونانوسیالات پایه آب یا روغن با نانوسیالات هیبریدی، به‌ویژه در لوله‌های جاذب سامانه‌های حرارتی، تحت شرایط کاری مختلف وجود دارد. با توجه به اهمیت این موضوع، در پژوهش حاضر انتقال حرارت و جریان سیال در یک لوله جاذب حاوی محیط متخلخل و نانوسیال، به‌صورت عددی مورد بررسی قرار گرفته است. هدف اصلی این مطالعه، تحلیل همزمان رفتار حرارتی و هیدرودینامیکی جریان با تمرکز بر افزایش عدد ناسلت و کاهش ضریب اصطکاک است؛ دو پارامتر مهم و تا حدی متضاد که به‌ترتیب در بهبود نرخ انتقال گرما و کاهش مقاومت جریان نقش اساسی دارند.

معرفی مساله

در مسئله حاضر، یک مدل دوبعدی از جریان آرام نانوسیال درون لوله‌ای با دیواره دارای دمای ثابت و شار گرمایی یکنواخت، در حضور محیط متخلخل در نظر گرفته شده است. که نانوسیال در آن جریان دارد. شکل **1** شماتیک دوبعدی مسئله مورد بررسی را نشان می‌دهد. در این مدل، جریان نانوسیال درون لوله‌ای حاوی محیط متخلخل شبیه‌سازی شده است. نانوسیال مورد استفاده در این پژوهش، نانوسیال آب– نقره در نظر گرفته شده است. محیط متخلخل نیز به‌صورت همگن و از نوع فوم فلزی فرض شده است. مشخصات هندسی لوله جاذب مورد نظر در جدول **1** ارائه شده است. همچنین جنس دیواره لوله از فولاد در نظر گرفته شده است.



شکل 1- نمایش شماتیک مساله حاضر

جدول1- مشخصات لوله جاذب حرارتی مفروض

قابلیت جذب حرارتی لوله	0.96
طول لوله	24 cm
قطر داخلی لوله	1 cm
قطر بیرونی لوله	3 cm

معادلات حاکم، شرایط مرزی، خواص نانوسیال و روش حل عددی

در این بررسی تعادل حرارتی بین سیال پایه و نانوذرات برای نانو سیال در نظر گرفته می شود. با صرف نظر از تلفات حرارتی اصطکاکی و جابجایی آزاد و نیروهای خارجی و همچنین تراکم ناپذیر بودن سیال، معادلات پیوستگی، مومنتم و انرژی حاکم بر جریان سیال درون لوله حرارتی با فرض ثابت بودن خواص سیال عبارتند از[24]:

معادله پیوستگی:

$$\frac{\partial v_j}{\partial x_j} = 0 \qquad (1)$$

معادله مومنتوم:

$$\nabla \frac{1}{\varphi}\frac{\partial v_i}{\partial t} + \frac{1}{\varphi^2}\frac{\partial v_j v_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho}\frac{\partial P}{\partial x_i} + Fg_i - \frac{\gamma}{K}v_i + \frac{\gamma}{\varphi}\frac{\partial^2 v_i}{\partial x_j \partial x_j} \qquad (2)$$

معادله انرژی:

$$\sigma\frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\partial v_j T}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j}\left(\alpha\frac{\partial T}{\partial x_j}\right) \qquad (3)$$

که در این معادلات توابع برداری g_i x_i v_i به ترتیب سرعت صافی موقعیت و جاذبه می باشند. و کمیت عددی $P=p-\rho g_i T_i$ فشار اصلاحی می باشد که ρ و ϕ دانسیته وتخلخل می باشند و کمیت های υ،κ،α و σ به ترتیب ضریب ویسکوزیته جنبشی، نفوذ پذیری، پخش حرارتی و ظرفیت حرارتی ثابت می باشند که طبق رابطه (4) تعریف می شود.

$$\sigma = \varphi + \frac{\rho_s c_{p,s}}{\rho c_p}(1-\varphi) \qquad (4)$$

زیر نویس s مشخص کننده بخش جامد در محیط متخلخل است. عبارت کلی چگالی می تواند بیان کننده تغییرات چگالی باشد. عبارت کلی چگالی می تواند بیان کننده تغییرات چگالی باشد $\rho=\rho 0+(1+F)$که تابع تکرار شونده F طبق رابطه (5) تعریف می شود

$$F = -\beta_T(T-T_0) \qquad (5)$$

کمیت β_T مشخص کننده ضریب انبساط حجمی حرارتی می باشد و ρ_0 دانسیته مرجع در دمای T_0 می باشد. تعمیم رابطه برینکمن که در رابطه مشخص شده است بیان می کند که مقاومت ویسکوز یا نیروی درگ ویسکوز با فاز جامد در جریان سیال در تماس با سطح به کار برده می شود. معادله برینکمن یکی از توانایی های راضی کننده بدون خطا شرایط مرزی روی یک سطح نفوذ ناپذیر است که مرزهای آن محیط متخلخل می باشد. نکته قابل توجه این است که معادله برینکمن در ملحق کردن نظریات بین معادلات ناویراستوکس و دارسی ضروری می باشد. وقتی که تخلخل نزدیک واحد می شود در پی آن نفوذ پذیری به بی نهایت میل می کند. بنابراین معادله برینکمن را به معادله کلاسیک ناویراستوکس برای سیال خالص تغییر می دهد. و هنگامی که نفوذ پذیری به سمت صفر میل می کند ترم برینکمن قابل چشم پوشی است و قانون دارسی مد نظر است. در این پژوهش، به‌دلیل شبیه‌سازی هندسه سامانه به‌صورت یک محیط متخلخل، عدد رینولدز بر اساس رابطه ویژه جریان در بستر متخلخل تعریف و محاسبه می‌شود. ازاین‌رو، عدد رینولدز بستر متخلخل مطابق رابطه (6) قابل بیان است. [25]:

$$Re_p = \frac{\rho u d_p}{\mu(1-\varepsilon)} \qquad (6)$$

که در آن، u، سرعت ظاهری، d_p قطر ذرات تشکیل‌دهنده بستر، ρ و μ به ترتیب چگالی ویسکوزیته سیال جاری در بستر هستند. در این مطالعه مقادیر سرعت ورودی فازهای تشکیل‌دهنده نانو سیال به بستر طوری در نظر گرفته شد که محدوده عدد رینولدز قبل از ورود به محدوده درهم قرار گیرد. برای به دست آوردن تراوایی در هر یک از مدل ها، از رابطه کوزنی-کارمن[12] که به‌صورت رابطه ی (7) است، استفاده می‌شود [26]:

$$K = \frac{d_p^2 \varepsilon^3}{36k(1-\varepsilon)^2} \qquad (7)$$

که در آن d_p ، قطر ذرات تشکیل‌دهنده‌ی بستر، ε تخلخل بستر و κ معیاری از پیچش مسیر جریان داخل حفره‌ها است که برای ذرات کروی هموار برابر 5 در نظر گرفته می‌شود. همچنین طبق رابطه (8) داریم:

$$CF = \frac{1.75}{\sqrt{150(\varepsilon)^3}} \qquad (8)$$

روش حل عددی به کمک الگوریتم سیمپل برای کوپل شدن سرعت و فشار و با روش حجم محدود برای حل مساله استفاده می شود. برای معادلات حرکت و انرژی از دقت مرتبه اول و میزان همگرایی برای معادلات حرکت 10^{-5} و برای

[12] Kozney-Carman

معادله انرژی 10^{-9} می باشد. جریان سیال درون لوله پایا، دوبعدی، تراکم ناپذیر و آرام می باشد. سیال کاری نانوسیال به صورت تک فاز در نظر گرفته شده است. با توجه به خواص ترموفیزیکی بالاتر نانوسیالات در مقایسه با سیالات پایه، نانوسیالات به منظور تقویت انتقال گرما انتخاب می شوند. چگالی و ظرفیت گرمایی ویژه نانوسیالات می تواند با استفاده از روابط(9) و (10) محاسبه می شوند[23-27]:

$$\rho_{nf} = \rho_{bf}.(1-\varphi) + \rho_{np}.\varphi \quad (9)$$

$$C_{p,nf} = \frac{\rho_{bf}.(1-\varphi)}{\rho_{nf}}.C_{p,bf} + \frac{\rho_{np}.\varphi}{\rho_{np}}.C_{p,np} \quad (10)$$

$C_{p,np}$ ، ρ_{nf} و φ به ترتیب ظرفیت گرمایی نانوسیالات و مایعات پایه و کسر حجمی نانوذرات است. با در نظر گرفتن حالت تعادل حرارتی بین مایع پایه و نانوذرات ، ظرفیت گرمای ویژه ای حاصل می شود. هدایت گرمای با رابطه ماکسول مطابق با رابطه (11) محاسبه می شود[23-27]:

$$k_{nf} = \frac{k_{np} + 2k_{bf} - 2\varphi(k_{bf} - k_{np})}{\frac{k_{np}}{k_{bf}} + 2 + \frac{k_{bf} - k_{np}}{k_{bf}}.\varphi} \quad (11)$$

برای یافتن ویسکوزیته نانوسیالات از رابطه (12) استفاده می شود:

$$\mu_{nf} = \mu_{bf}(1 + 2.5\varphi + 6.5\varphi^2) \quad (12)$$

پارامترهای مهم دیگری برای محاسبه مانند عدد ناسلت ، عدد رینولدز و عدد پرانتل وجود دارد. انتقال همرفتی گرما از طریق گیرنده به این پارامترها بستگی دارد. عدد رینولدز متغیر است زیرا سرعت جرم جریان انتقال حرارت درون گیرنده مطابق معادله تغییر خواهد کرد که در رابطه (13) نشان داده شده است.

$$Re = \frac{\dot{m}}{P_{cs}\,\mu} \quad (13)$$

در اینجا P_{cs} قسمت داخلی لوله است. برای پیدا کردن عدد ناسلت برای نواحی مختلف، اول عدد پرانتل را از طریق تساوی رابطه (14) محاسبه می کنیم و سپس ضریب انتقال گرمای جابجایی را طبق رابطه (15) خواهیم داشت:

$$Pr = \frac{\mu_{nf} C_{p,nf}}{k_{nf}} \quad (14)$$

$$h_{\text{همرفتی}} = \frac{Nu_{nf}\, k_{nf}}{D_h} \quad (15)$$

در اینجا D_h قطر هیدرولیک است.

$$D_h = \frac{4\,A_{cs}}{P_{cs}}$$

انتقال گرما جابجایی از طریق نانوسیالات با استفاده از رابطه (16) محاسبه می شود:

$$Q_{\text{همرفتی}} = h_{\text{همرفتی}}\, A_{ni}(T_r - T_{avg}) \quad (16)$$

که در آن T_r و T_{avg} به ترتیب دمای سطح گیرنده و میانگین دمای مایع انتقال حرارت هستند. ضریب اصطکاک[13] برای ارزیابی عملکرد مقاومت جریان است. ضریب اصطکاک ازرابطه (17) بدست می آید.

$$f = \frac{\Delta p}{l}\frac{2r}{1/2\rho u^2} \quad (17)$$

زیر نویس های f، s وnf به ترتیب اشاره به سیال خالص پایه، نانوذرات و نانوسیال دارد. برای هدایت حرارتی و لزجت نانوسیالات مدل های تئوری مختلفی ارائه شده است که در آن اثر اندازه ذره، کسرحجمی ذره، وابستگی دما و خواص سیال پایه را با در نظر گرفتن حرکت براوانی نانوذرات در محدوده های دمایی مختلف در نظر گرفته می شود. در روابط فوق ϕ کسرحجمی نانوذرات است. خواص ترموفیزیکی نانوسیال آب - نقره در کسر حجمی های مختلف به ترتیب در جداول **2** آمده است.

جدول 2: خواص نانوسیال آب – نقره در کسرحجمی های مختلف

	$\rho(kg/m^3)$	$C_p(J/Kg\cdot K)$	$\mu(kg/(m\cdot s)$	$k(W/m\cdot K$
آب	997	4178	0.001006	0.613
نقره	10500	235	-	429
ϕ=2%	1156.2	3591.1	0.0010	0.6366
ϕ=5%	1294.9	2960.7	0.0011	0.6943

[13] friction factor

شرایط مرزی جریان:

شرط مرزی جریان برای ورودی:

$$0 \le r \le R \ , \ 0 \le \theta \le 2\pi \ , \quad Z = 0 \rightarrow \quad V = Vi \qquad (18)$$

شرط مرزی جریان برای خروجی:

$$0 \le r \le R \ , \ 0 \le \theta \le 2\pi \ , \quad Z = l \rightarrow \ \frac{\partial V}{\partial z} = 0, \quad p = 0 \qquad (19)$$

شرط مرزی جریان برای سطوح خارجی لوله:

$$0 \le Z \le L, 0 \le r \le R \ , 0 \le \theta \le 2\pi \rightarrow V = 0 \qquad (20)$$

شرایط مرزی حرارتی:

شرط مرزی حرارتی برای ورودی:

$$0 \le r \le R \ , \quad 0 \le \theta \le 2\pi \ , \qquad Z = 0 \ , T = Ti \qquad (21)$$

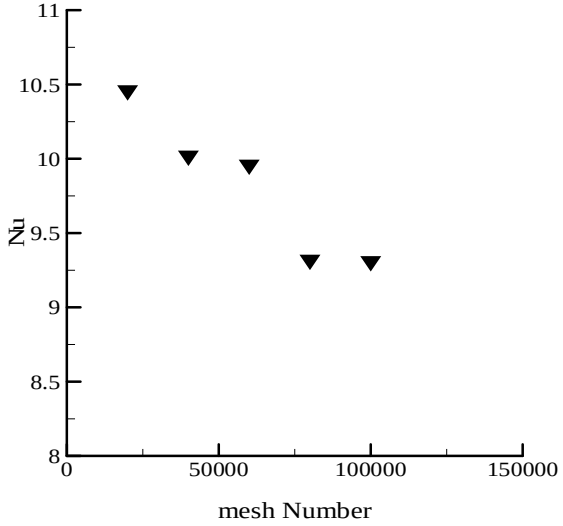
شرط مرزی حرارتی برای خروجی:

$$0 \le r \le R \ , \quad 0 \le \theta \le 2\pi \ , \qquad Z = l \ , \qquad \frac{\partial T}{\partial z} = 0 \qquad (22)$$

شرط مرزی حرارتی برای سطح:

$$0 \le Z \le L \ , 0 \le r \le ru, \quad 0 \le \theta \le 2\pi \rightarrow \ q'' = cte \qquad (23)$$

در این پژوهش، استقلال حل عددی از اندازه شبکه محاسباتی و همچنین صحت‌سنجی نتایج مورد ارزیابی قرار گرفته است. برای بررسی استقلال نتایج از شبکه، عدد ناسلت برای پنج شبکه مختلف در لوله و برای سیال خالص آب محاسبه شده است. شکل **2** تغییرات عدد ناسلت را نسبت به تعداد سلول‌های شبکه نمایش می‌دهد. همان‌گونه که در شکل مشاهده می‌شود، از شبکه چهارم به بعد تغییر قابل‌توجهی در مقدار عدد ناسلت رخ نمی‌دهد؛ ازاین‌رو، شبکه چهارم به‌عنوان شبکه بهینه در نظر گرفته شده است.



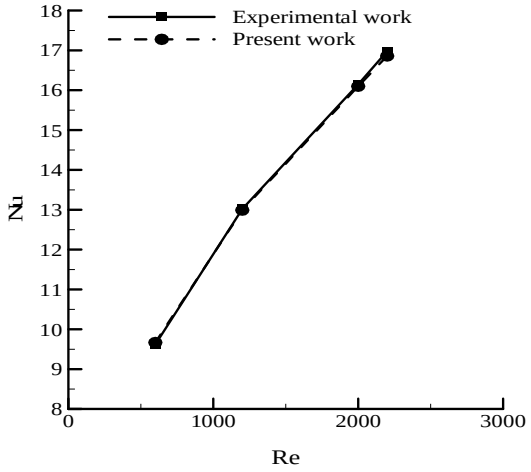
شکل2- تغییرات عدد ناسلت بر حسب تعداد سلول های شبکه

نتایج و بحث

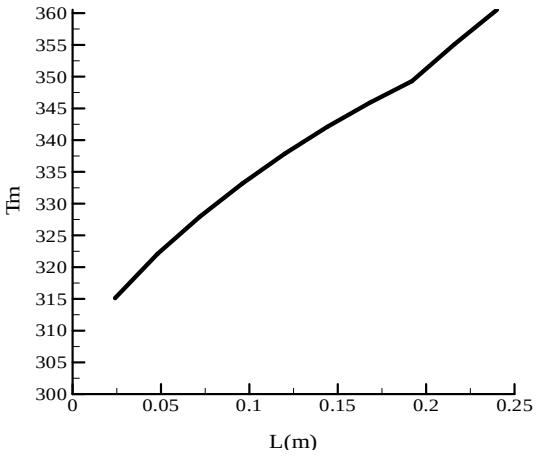
مقایسه نتایج شبیه‌سازی با داده‌های تجربی نظری و همکاران [27] برای انتقال حرارت جابجایی نانوسیال درون لوله‌ای پرشده با فوم آلومینیومیِ متخلخل با کسر حجمی یک درصد، در شکل **3** ارائه شده است. در مطالعه تجربی، لوله‌ای به طول 30 سانتی‌متر و قطر 2 سانتی‌متر با دیواره دارای دمای ثابت به‌کار گرفته شده است. در این مدل، شرط مرزی سرعت در ورودی لوله و شرط مرزی فشار در خروجی آن اعمال شده است. همچنین لوله به‌طور کامل با ماده متخلخل دارای تخلخل 60 درصد پر شده است. نتایج مقایسه نشان می‌دهد که خطای محاسباتی کمتر از دو درصد بوده و بنابراین دقت و قابلیت اعتماد مدل عددی مورد استفاده در این پژوهش تأیید می‌شود. جهت بررسی های گرمایی و اصطکاک جریان نانوسیال داخل لوله ارتفاع تحتانی محیط متخلخل R_1، ارتفاع فوقانی محیط متخلخل R_2 ، و در در محدوده $0<R_1<R_2<0.95$، ضریب تخلخل $0.08 < \varepsilon < 0.98$، عدد دارسی Da، $10^{-8} < Da < 10^{-2}$ در نظر گرفته می شوند.

شکل های **4** و **5** به ترتیب تغییرات دمای میانگین نانوسیال و ضریب انتقال گرمای جابجایی در امتداد سطح لوله را نشان می دهند. این بررسی با شرایط لوله از جنس فولاد با طول $L = 0.24$ cm، و کسر حجمی $\phi=0.05$، $\varepsilon = 0.8$، $CF = 0.19$ و $K = 6.09$ با عدد $Da = 10^{-2}$ صورت گرفته است. همانطور که مشاهده می شود محیط متخلخل با ایجاد آشفتگی در جریان نانوسیال و در نتیجه افزایش نرخ انتقال حرارت باعث افزایش دمای نانوسیال می شود و با اتمام ناحیه ی متخلخل کاهش دما را در پی خواهد داشت.

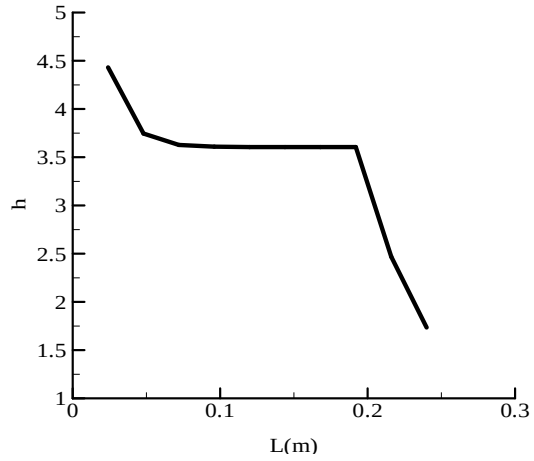
بر اساس تعریف، عدد ناسلت یک کمیت بدون بعد است که بیانگر نسبت انتقال حرارت جابجایی به هدایت حرارتی در یک سیال می‌باشد. این عدد رابطه‌ای مستقیم با شار گرمایی و طول مشخصه دارد و در عین حال نسبت معکوسی با اختلاف دمای بین سیال و دیواره و همچنین ضریب رسانش گرمایی سیال دارد. به عبارت دیگر، هرچه اختلاف دمای بین دیواره و سیال کمتر باشد، عدد ناسلت مقدار بالاتری خواهد داشت که نشان‌دهنده انتقال حرارت مؤثرتر است



شکل3- مقایسه اعداد ناسلت برای اعداد رینولدز مختلف کارحاضر با کار تجربی مرجع[25]



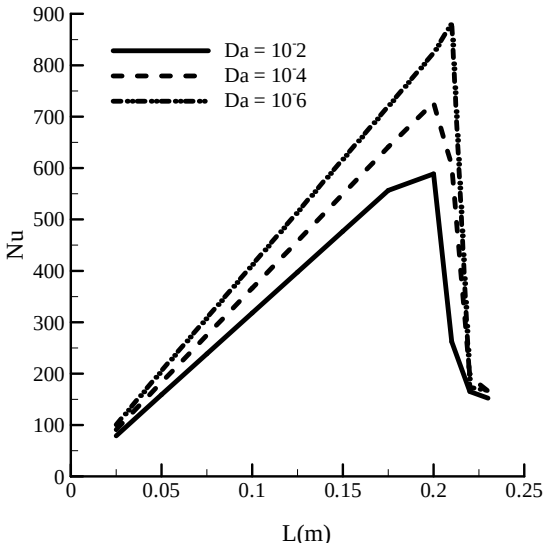
شکل 4- تغییرات دمای میانگین نانوسیال در امتداد سطح لوله فولادی با طول L = 0.24 cm، کسر حجمی0.05 = ϕ ، 0.8 = ε، CF = 0.19 و K = 6.09



شکل 5-تغییرات دمای میانگین نانوسیال در امتداد سطح لوله فولادی با طول L =0.24 cm، و کسر حجمی0.05=ϕ، 0.8 = ε، CF = 0.19 و K = 6.09

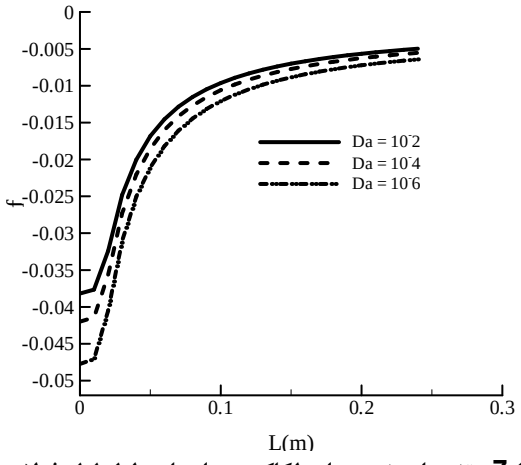
شکل **6** تغییرات عدد ناسلت را در راستای طول لوله برای مقادیر مختلف عدد دارسی نشان می‌دهد. نتایج حاکی از آن است که با افزایش طول لوله و در امتداد مسیر ناحیه متخلخل، مقدار عدد ناسلت روندی صعودی دارد و بیانگر افزایش انتقال حرارت در طول مسیر است. با این حال، در انتهای لوله و در ناحیه‌ای که محیط متخلخل پایان می‌یابد، کاهش محسوسی در مقدار عدد ناسلت مشاهده می‌شود. همچنین با کاهش عدد دارسی (که معادل کاهش نفوذپذیری محیط متخلخل است) برهم‌کنش بین نانوسیال و ساختار متخلخل شدت می‌یابد. این افزایش برهم‌کنش موجب نازک‌تر شدن لایه مرزی حرارتی و در نتیجه بهبود چشمگیر انتقال حرارت جابجایی می‌گردد. نتایج نشان می‌دهد که در شرایط بهینه، این پدیده می‌تواند میزان انتقال حرارت جابجایی را تا حدود 94 درصد افزایش دهد.

در ادامه به بررسی تغییرات ضریب اصطکاک در راستای طول لوله فولادی با شرایط ϕ=0.05، ε = 0.98، R_2=0.05، R_1=0.9 و برای سه حالت مختلف برای عدد دارسی که عبارتند از: $Da = 10^{-2}$، $Da = 10^{-4}$ و $Da = 10^{-6}$ پرداخته می شود. در شکل 7 این تغییرات نشان داده شده است. در نمودار تغییرات ضریب اصطکاک در راستای طول لوله و برای اعداد دارسی مختلف علامت منفی حاکی از این است که ضریب اصطکاک در خلاف جریان حرکت نانوسیال وارد می شود.



شکل6- تغییرات عدد ناسلت در راستای طول لوله فولادی با طول L =0.24 cm، کسرحجمی0.05=ϕ، 0.8 = ε، CF= 0.19 ،R_1=0.9، R_2=0.05، و برای سه حالت متفاوت عدد دارسی

همانطور که در شکل **7** مشاهده می شود، در راستای طول ضریب اصطکاک به عدد رینولدز و زبری لوله بستگی دارد. زبری در کل لوله یکنواخت می باشد و فقط رینولدز در این مساله بر میزان ضریب اصطکاک اثر می گذارد. کاهش نفوذپذیری (عدد دارسی کوچک)، مقاومت هیدرولیکی را افزایش داده و باعث رشد عدد رینولدز محلی می‌شود. این اثر همراه با افزایش فشار استاتیک، ضریب اصطکاک را افزایش می دهد.مشاهده می مقدار ضریب اصطکاک 5 درصد نسبت به دارسی 10^{-6} و 4 درصد نسبت به دارسی 10^{-4} افزایش داشته است. ترکیب نانوسیال و محیط متخلخل، بازیابی انرژی را در مقایسه با تلفات ویسکوز بهبود می‌بخشد هدف ما از انجام این پژوهش رسیدن به اعداد ناسلت بالا و ضریب اصطکاک پایین می باشد. هرچه عدد ناسلت بزرگتر باشد گویای این امر است که نرخ انتقال حرارت بین سیال و جداره ها بیشتر بوده است. پس هم برای گرمایش سیال و هم برای سرمایش آن به ناسلت های بالا نیاز داریم.



شکل7- تغییرات ضریب اصطکاک در راستای طول لوله فولادی با طول L =0.24 cm، کسرحجمیϕ=0.05، ε = 0.8، CF= 0.19 R_1=0.9، R_2=0.05، و برای سه حالت متفاوت عدد دارسی

نتیجه گیری کلی

هدف از کارحاضر بررسی انتقال حرارت و اصطکاک جریان نانوسیال در یک لوله حرارتی شامل محیط متخلخل می باشد که با هدف کاهش اصطکاک و همچنین افزایش نرخ حرارت اثر توام حضور نانوسیال در محیط متخلخل بررسی گردید. نتایج حاصل نشان می دهد محیط متخلخل با ایجاد آشفتگی در جریان نانوسیال و در نتیجه افزایش نرخ انتقال حرارت باعث افزایش دمای نانوسیال می شود و با اتمام ناحیه ی متخلخل کاهش دما را در پی خواهد داشت همچنین با کاهش عدد دارسی یا نفوذپذیری، مقدار عدد ناسلت تقریبا 5 درصد نسبت به دارسی 10^{-6} و تقریبا 64 درصد نسبت به دارسی 10^{-4} افزایش می یابد. نتایج حاکی از رشد تقریبا 94 درصدی عدد ناسلت در طول لوله است. همچنین مقدار ضریب اصطکاک نیز 5 درصد نسب به دارسی 10^{-6} و 4 درصد نسبت به عدد دارسی 10^{-4} افزایش داشته است. علت افزایش انتقال حرارت را می توان مربوط به افزایش اندرکنش بین نانوسیال و ماده متخلخل دانست. در واقع اعداد دارسی بزرگتر دارای میزان بازیابی انرژی کمتری در مقایسه با هدر رفت انرژی هستند. علت دیگر افزایش عدد ناسلت را میتوان کاهش دما نیز دانست. علت افزایش ضریب اصطکاک را نیز میتوان مربوط به افزایش سرعت، فشار و عدد رینولدز در طول لوله دانست. می توان گفت که با کاهش عدد دارسی که نشان دهنده کاهش در میزان تخلخل محیط می باشد، نفوذپذیری سیال در داخل لایه متخلخل کم می شود و سیال برای عبور از لایه متخلخل با مقاومت چندانی روبرو نمی شود، در نتیجه سرعت افزایش می یابد و با توجه به کوپل بودن میدان دما و سرعت، با افزایش سرعت، دما کاهش می یابد. پس می توان گفت که با افزایش سرعت مقدار عدد ناسلت نیز افزایش می یابد ضریب اصطکاک با میزان آشفتگی جریان تغییر می کند. که به عدد رینولدز و زبری لوله بستگی دارد. زبری در کل لوله یکنواخت می باشد و فقط رینولدز در این مساله بر میزان ضریب اصطکاک اثر می گذارد.

مراجع و منابع

[1] Rashidi, S., Esfahani, J. A., & Rashidi, A. (2017). A review on the applications of porous materials in solar energy systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 73, 1198–1210.

[2] Nield, D. A., & Kuznetsov, A. V. (2009). Thermal instability in a porous medium layer saturated by a nanofluid. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 52(25–26), 5796–5801.

[3] Hajipour, M., & Dehkordi, A. M. (2012). Analysis of nanofluid heat transfer in parallel-plate vertical channels partially filled with porous medium. *International journal of thermal sciences*, 55, 103–113.

[4] Maghrebi, M. J., Nazari, M., & Armaghani, T. (2012). Forced convection heat transfer of nanofluids in a porous channel. *Transport in porous media*, 93(3), 401–413.

[5] Matin, M. H., & Pop, I. (2013). Forced convection heat and mass transfer flow of a nanofluid through a porous channel with a first order chemical reaction on the wall. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 46, 134–141.

[6] Nazari, M., Ashouri, M., Kayhani, M. H., & Tamayol, A. (2015). Experimental study of convective heat transfer of a nanofluid through a pipe filled with metal foam. *International Journal of Thermal Sciences*, 88, 33–39.

[7] Sheikholeslami, M., & Domiri Ganji, D. (2018). Numerical investigation of nanofluid melting heat transfer between two pipes. *Alexandria Engineering Journal*, 57(3), 1261–1269.

[8] Akbar, M. Z., Ashraf, M., Farooq Iqbal, M., & Ali, K. (2016). Heat and mass transfer analysis of unsteady MHD nanofluid flow through a channel with moving porous walls and medium. *AIP Advances*, 6, 045222.

[9] Baqaie Saryazdi, A., Talebi, F., Armaghani, T., & Pop, I. (2016). Numerical study of forced convection flow and heat transfer of a nanofluid flowing inside a straight circular pipe filled with a saturated porous medium. *The European Physical Journal Plus*, 131, 78.

[10] Amani, M., Ameri, M., & Kasaeian, A. (2016). The Experimental Study of Convection Heat Transfer Characteristics and Pressure Drop of Magnetite Nanofluid in a Porous Metal Foam Tube. *Transport in Porous Media*, 116(2), 959–974.

[11] Nazari, S., & 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: Low-dimensional Systems and Nanostructures*, 87, 134–140.

[12] Sheikhnejad, Y., Hosseini, R., & Avval, M. S. (2017). Experimental study on heat transfer enhancement of laminar ferrofluid flow in horizontal tube partially filled porous media under fixed parallel magnet bars. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 424, 16–25.

[13] Barnoon, P., & Toghraie, D. (2018). Numerical investigation of laminar flow and heat transfer of non-Newtonian nanofluid within a porous medium. *Powder Technology*, 325, 78–91.

[14] Zhang, H., Li, Y., & Wang, X. (2023). Experimental and numerical analysis of nanofluid flow in a porous tube with heat generation. *Applied Thermal Engineering*, 220, 120987.

[15] Kumar, A., Singh, R., & Sharma, P. (2022). Heat transfer enhancement in porous tube using nanofluids: A numerical study. *International Journal of Thermal Sciences*, 170, 107456.

[16] Ahmed, M., Hussain, S., & Hayat, T. (2023). Numerical investigation of nanofluid flow and heat transfer in a porous tube with variable viscosity. *Journal of Molecular Liquids*, 370, 121234.

[17] Sohel Murshed, S. M., & Nieto de Castro, C. A. (2022). Thermal performance of nanofluids in porous media: A comprehensive review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 156, 112345.

[18] Selimefendigil, F., & Oztop, H. F. (2022). Effect of magnetic field on nanofluid flow and heat transfer in a porous tube. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 185, 123456.

[19] Rezapour, M., & Fanaee, S. A. (2023). Modeling the effect of porosity on a solar water-cooled coil filled with water and Al2O3 nanofluid. *Energy Engineering and Management*, 10(1), 100–111.

[20] Fanaee, S. A., & Rezapour, M. (2019). Analysis of the Fluid-Thermal Regime with the Developed Brinkman Model in a Porous Coil for Solar Energy Application. *Modares Mechanical Engineering*, 19(4), 855–863.

[21] Fanaee, S. A., & Rezapour, M. (2020). The modeling of constant/variable solar heat flux into a porous coil with concentrator. *Journal of Solar Energy Engineering*, 142(1), 011004.

[22] Sanei, F., Ali, M. A. B., Jasim, D. J., Salahshour, S., Akbari, O. A., & Emami, N. (2024). Numerical simulation of the nanofluid flow and heat transfer in porous microchannels with different flow path arrangements using single-phase and two-phase models. *International Journal of Thermofluids*, 24, 100846.

[23] Oladetan, J. O., Fujah, F. M., Omosehin, O. S., Atofarati, E. O., Nwabuko, U.,

Olakoyejo, O. T., & Adelaja, A. O. (2025). Numerical Investigation of Heat Transfer Performance of Hybrid Nanofluid in Porous Substrate in Microchannel Heat Shink. *International Journal of Applied and Computational Mathematics*, 11(4).

[24] Vafai, K., & Thiyagaraja, R. (1987). Analysis of flow and heat transfer at the interface region of a porous medium. *Int. J. Heat Mass Transfer*, 30, 1391–1405.

[25] Calmidi, V. V. (1998). *Transport phenomena in high porosity fibrous metal foams* (Doctoral dissertation). University of Colorado.

[26] Boomsma, K., & Poulikakos, D. (2001). On the effective thermal conductivity of a three-dimensionally structured fluid-saturated metal foam. *Int. J. Heat Mass Transfer*, 44, 827–836.

[27] Nazari, M., Ashouri, M., Kayhani, M. H., & Tamayol, A. (2015). Experimental study of convective heat transfer of a nanofluid through a pipe filled with metal foam. *International Journal of Thermal Sciences*, 88, 33–39.