نشریه علمی-تخصصی تبدیل انرژی (JEED)
دوره ۹، شماره ۵، زمستان ۱۴۰۱، ص: ۱- ۱۷

J. Energy Conversion
Volume: 9, Issue: 5, 2023: 1−17

DOR: 20.1001.1.20089813.1401.9.5.2.1

آنالیز عددی انتقال حرارت و جریان سیال درون یک لوله حاوی محیط متخلخل و استفاده از نانوسیال

سجاد کیخواه[۱]، احسان‌اله عصاره[۲،*]

۱- کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک، واحد دزفول، دانشگاه آزاد اسلامی، دزفول، ایران، sajjad_keykhah@yahoo.com.
*۲- استادیار، گروه مکانیک، دانشکده مکانیک ، دانشگاه آزاد اسلامی واحد دزفول ، assareh@iaud.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۱/۰۱/۲۹، بازنگری: ۱۴۰۱/۰۴/۲۱، پذیرش: ۱۴۰۱/۰۵/۱۱

چکیده

امروزه بحث افزایش راندمان و بهبود مصرف انرژی در صنایع بیش از پیش مورد توجه محققان قرار گرفته است. به همین دلیل در این پژوهش یه آنالیز عددی انتقال حرارت و جریان سیال درون یک لوله حاوی محیط متخلخل و استفاده از نانوسیال پرداخته شد. استفاده همزمان از ساختار متخلخل و نانوسیال به‌عنوان سیال از نوآوری‌های این پژوهش محسوب می‌شود که باعث افزایش چشم‌گیر انتقال حرارت در لوله می‌شود. مدلسازی به صورت دو بعدی و با فرض جریان آرام، به‌صورت دما ثابت و با حضور نانوسیال آب-نقره جهت بهبود انتقال حرارت انجام شد. هدف اصلی این پژوهش رسیدن به حداقل ضریب اصطکاک و حداکثر عدد ناسلت به‌طور همزمان به‌عنوان دو هدف متضاد برای کاهش مقاومت جریان در لوله و افزایش انتقال حرارت در نظر گرفته شد. پروفیل‌های سرعت؛ فشار و دمای لوله‌ی دو بعدی در کسر حجمی، ضریب تخلخل و اعداد دارسی متفاوتی به‌دست آمد. سپس به بررسی عدد ناسلت و ضریب اصطکاک پرداخته شد. نتایج این بررسی نشان داد که با کاهش عدد دارسی، مقدار عدد ناسلت افزایش می‌یابد. همچنین مقدار ضریب اصطکاک نیز حدودی افزایش داشته است. علت افزایش انتقال حرارت را می‌توان 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

* **عهده‌دار مکاتبات:** assareh@iaud.ac.ir

کلمات کلیدی: لوله حرارتی، محیط متخلخل، نانوسیال، عدد ناسلت، ضریب اصطکاک

۱- مقدمه

انرژی یکی از مهمترین عوامل ضروری برای توسعه کشورها می‌باشد. از طرف دیگر انرژی‌های فسیلی رو به کاهش هستند، که منجر به کاهش یافتن منابع و ذخایر شده است. از طرفی مصرف انرژی به‌خصوص سوخت‌های فسیلی مهمترین عامل آلودگی هوا و تغییرات آب و هوایی می‌باشند. به‌همین دلیل استفاده بهینه از انرژی در فرآیند توسعه اقتصادی همواره به‌عنوان یک هدف مهم در توسعه پایدار مد نظر بوده است.

امروزه روش‌هایی که بتوانند باعث افزایش انتقال حرارت شوند، بسیار مورد توجه مهندسان و پژوهش‌گران است. یکی از روش‌های بهبود انتقال حرارت در فرآیندهای صنعتی استفاده از محیط متخلخل می‌باشد که دارای ضریب هدایت حرارتی بالایی

نحوه استناد به این مقاله: سجاد کیخواه، دکتر احسان اله عصاره. آنالیز عددی انتقال حرارت و جریان سیال درون یک لوله حاوی محیط متخلخل و استفاده از نانوسیال. مهندسی مکانیک تبدیل انرژی. ۱۴۰۱; ۹ (۵) :۱- ۱۷.
DOR: 20.1001.1.20089813.1401.9.5.2.1

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-09]
[DOR: 20.1001.1.20089813.1401.9.5.2.1]

استاز دیگر روش‌های افزایش انتقال حرارت 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 شده‌اند که با افزودن این نانو ذرات به سیال می‌توان ضریب انتقال حرارت سیال پایه را افزایش داد. چنین ترکیبات دو جزئی متشکل از نانو ذرات و سیال پایه، نانوسیال نامیده می‌شوند.

شیخ الاسلامی در سال ۲۰۱۷ بر روی شبیه‌سازی عددی انتقال حرارت جابجایی طبیعی نانوسیال درون لوله تحت میدان مغناطیسی کار کرد. تاثیر اعداد دارسی، رایلی، هارتمن، 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 [۱]. اکبر[1] و همکاران در سال ۲۰۱۶ به مطالعه انتقال حرارت 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 [۲]. میلانی شیروان[2] و همکاران در سال ۲۰۱۶ به مطالعه نرخ انتقال حرارت در یک مبدل حرارتی دو لوله‌ای با حضور محیط متخلخل به همراه شبیه‌سازی عددی و تحلیل حساسیت آن با وجود جریان سیال آشفته پرداختند. نتایج نشان داد که عدد ناسلت با افزایش عدد رینولدز، کاهش عدد دارسی و کاهش ضخامت لایه متخلخل افزایش می‌یابد. همچنین کارایی مبدل حرارتی با افزایش پارامترهای عدد رینولدز و عدد دارسی و ضخامت لایه متخلخل افزایش یافته است [۳]. بقایی سریزدی[3] و همکاران در سال ۲۰۱۶ به مطالعه عددی بر روی انتقال حرارت 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 داد که عدد ناسلت با افزایش کسر حجمی ذرات افزایش یافته است [۴]. امانی[4] و همکاران در سال ۲۰۱۷ 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 [۵]. نظری و تقرائی[5] در سال ۲۰۱۷ انتقال حرارت 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 [۶]. شیخ‌نژاد[6] و همکاران در سال ۲۰۱۷ به بررسی جریان و انتقال حرارت فروسیال درون لوله افقی پر شده با ماده متخلخل تحت بارهای مغناطیسی ثابت پرداختند. نتایج حاکی از افزایش قابل ملاحظه‌ای در انتقال حرارت به‌عنوان یک نتیجه از حضور رسانه‌های حاوی سطوح متخلخل و میدان مغناطیسی تا ۲,۲ و ۱,۴ برابر افزایش در ضریب انتقال حرارت بود. پس نتیجه شد که حضور رسانه‌های متخلخل و میدان مغناطیسی همزمان می‌تواند انتقال گرما را تا ۲,۴ برابر افزایش دهد [۷]. بارنوون[7] و همکاران در سال ۲۰۱۸، به مطالعه عددی جریان آرام و انتقال حرارت 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 حرارت جابجایی بیشتر از عدد رینولدز است. زیرا در یک کسر حجمی ثابت، محیط متخلخل نقش پررنگ‌تری در افزایش انتقال حرارت نسبت به افزایش عدد رینولدز دارد [۸]. میلانی شیروان[8] و همکاران در سال ۲۰۱۷ به بررسی انتقال حرارت درون یک مبدل حرارتی دو لوله‌ای پرشده با محیط متخلخل پرداختند. بررسی نتایج نشان داد به‌علت افزایش عدد رینولدز و عدد دارسی، افزایش عدد ناسلت حدود ۷۷,۸٪ می‌باشد. همچنین نتایج نشان داد که افزایش ضخامت لایه متخلخل منجر به

[1] Akbar
[2] Milani Shirvan
[3] Baqaie Saryazdi
[4] Amani
[5] Nazari and Toghraie
[6] Sheikhnejad
[7] Barnoon
[8] Milani Shirvan

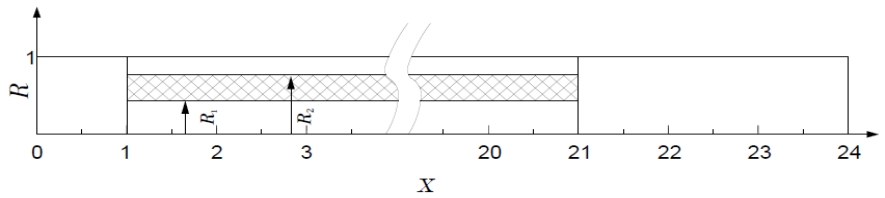
[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-09]
[DOR: 20.1001.1.20089813.1401.9.5.2.1]

کاهش عدد ناسلت شده و کارایی مبدل حرارتی با افزایش عدد رینولدز افزایش یافته و با افزایش عدد دارسی کاهش یافته است [۹]. کومار تیواری و همکاران در سال ۲۰۲۱، بر روی بررسی تجربی و عددی عملکرد حرارتی مبدل حرارتی مجهز به درج‌های مختلف با نانوسیال WO3/آب در شرایط آشفته کار کردند. در این پژوهش یک طراحی جدید لوله منحنی به نام مبدل حرارتی لوله سه‌گانه برای شناسایی ویژگی‌های ترموسیالی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که حداکثر نرخ انتقال حرارت و اثربخشی کلی به ترتیب 1767.91 W/m²K، 1702.71 W/m²K و 1.86، 1.79، در غلظت حجمی بهینه‌شده ۱ درصد با نانوسیال WO3/آب با استفاده از درج نوع دنده‌ای در طول تجربی و محاسباتی به دست می‌آید [۱۰]. نخچی و همکاران در سال ۲۰۲۱، با هدف بررسی افزایش انتقال حرارت، تولید آنتروپی و عملکرد حرارتی نانوسیال‌های آشفته در مبدل‌های حرارتی دو لوله‌ای مجهز به توربولاتورهای استوانه‌ای منفذدار، به مطالعه پرداختند. توربولاتورهای منفذدار پیشنهادی با نانو پودر CuO با ϕ= ۱,۵٪ عملکرد حرارتی η= ۱,۹۳۱ را ارائه داد که به‌طور قابل توجهی بالاتر از سایر مطالعات قبلی بود. نتایج نشان داد که افزایش PI انرژی جنبشی آشفته را به ویژه در نواحی بیرونی توربولاتور استوانه‌ای کاهش می‌دهد [۱۱]. بحیرایی و همکارانش در سال ۲۰۲۱، ویژگی‌های ترموهیدرولیک یک نانوسیال تولید تهیه‌شده بیولوژیکی حاوی نانوپلاکت‌های گرافن در داخل یک لوله مجهز به نوارهای مخروطی پیچ خورده را بهینه کردند. در این پژوهش زاویه شیب، زاویه هندسه و گام، پارامترهای هندسی هستند که برای رسیدن به بالاترین عدد ناسلت و کمترین ضریب اصطکاک بهینه شدند. طبق نتایج به‌دست آمده زاویه شیب و گام در مقایسه با تأثیر آن‌ها بر ضریب اصطکاک، تأثیر بیش‌تری بر روی عدد ناسلت داشتند، در حالی که زاویه هندسی تأثیر بیش‌تری بر ضریب اصطکاک داشت. در نقطه بهینه مربوطه، عدد ناسلت و ضریب اصطکاک به ترتیب حدود ۴۰,۴ درصد و ۲,۲ برابر نسبت به لوله ساده افزایش یافت [۱۲]. القرنی و همکارانش در سال ۲۰۲۱، در مطالعه‌ای، روش‌های ابداعی برای بهبود راندمان حرارتی و عملکرد هیدرولیکی کلکتورهای سهموی با قرار دادن توربولاتورهای مختلف در لوله و افزودن نانوسیال‌های هیبریدی ارائه دادند. یک توربولاتور جدید با منافذ و دنده برای بهبود راندمان حرارتی و هیدرولیکی کلکتورهای سهموی استفاده شد [۱۳].

در این پژوهش یه آنالیز عددی انتقال حرارت و جریان سیال درون یک لوله حاوی محیط متخلخل و استفاده از نانوسیال پرداخته می‌شود. هندسه این پژوهش شامل یک لوله دو بعدی حاوی محیط متخلخل، به‌صورت دما ثابت می‌باشد که نانوسیال در آن جریان دارد. موقعیت ماده متخلخل درون لوله با حضور نانوسیال مدلسازی می‌شود. حداقل ضریب اصطکاک و حداکثر عدد ناسلت به‌طور همزمان به‌عنوان دو هدف متضاد برای کاهش مقاومت جریان در لوله و افزایش انتقال حرارت در نظر گرفته شد و بررسی میزان انتقال حرارت و همچنین اثرات همزمان انتقال حرارت و افت فشار در لوله بررسی و تحلیل خواهد شد.

۲- هندسه مسئله

شماتیک هندسه مسئله در شکل ۱ آمده است. هندسه مسئله شامل یک مدل دو بعدی از جریان آرام با دیواره دما ثابت به همراه شار حرارتی ثابت لوله با حضور محیط متخلخل در آن نظر گرفته می‌شود. برای لوله، طول ۲۴ سانتی‌متر در نظر گرفته می‌شود، و بخش ورودی و خروجی آن به ترتیب دارای ابعاد ۱ و ۳ سانتی‌متر می‌باشند. در لوله یک ناحیه محیط متخلخل قرار داده می‌شود. موقعیت محیط متخلخل توسط دو پارامتر R_1 و R_2 مشخص می‌شود. نانوسیال عامل مورد مطالعه در این تحقیق نانوسیال آب-نقره می‌باشد.



شکل ۱- هندسه مورد بررسی.

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-09]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1401.9.5.2.1]

۳- معادلات حاکم

قانون پایستگی جرم اظهار می‌دارد که جرم موجود در یک سیستم بسته، با صرف‌نظر از فرآیندهایی که در درون آن در حال وقوع است، ثابت و تغییرناپذیر باقی می‌ماند. رابطه کلی بقای جرم به‌صورت زیر می‌باشد [۱۴]:

$$\frac{\partial(u)}{\partial x}+\frac{\partial(v)}{\partial y}+\frac{\partial(w)}{\partial z}=0 \qquad (۱)$$

به‌منظور مدل‌سازی رفتار جریان یکی از معادلات لازم معادله پایستگی اندازه حرکت است. رابطه (۲) معادله پایستگی اندازه حرکت در مختصات دکارتی در راستای x ، می‌باشد. با توجه به این‌که جریان آرام و تراکم ناپذیر است، لذا معادلات به شکل زیر می‌باشد [۱۴]:

$$u\frac{\partial u}{\partial x}+\ v\ \frac{\partial u}{\partial y}+w\ \frac{\partial u}{\partial z}=\ -\frac{1}{\rho_{nf}}\frac{\partial p}{\partial x}+\mu_{nf}(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 u}{\partial y^2}+\frac{\partial^2 u}{\partial z^2}) \qquad (۲)$$

طبق معادله پایستگی انرژی، انرژی ورودی از سمت چپ به‌علاوه انرژی تولید شده در المان برابر است با انرژی خروجی از سمت راست به‌علاوه تغییر انرژی داخلی است. بنابراین معادله انرژی را می‌توان به صورت زیر بیان نمود [۱۴]:

$$\rho_{nf}C_{p,nf}\left(\mathrm{u}\frac{\partial \mathrm{T}}{\partial \mathrm{x}}+\mathrm{v}\frac{\partial \mathrm{T}}{\partial \mathrm{y}}+\mathrm{w}\frac{\partial \mathrm{T}}{\partial \mathrm{z}}\right)=k_{nf}\left(\frac{\partial^2 \mathrm{T}}{\partial \mathrm{x}^2}+\frac{\partial^2 \mathrm{T}}{\partial \mathrm{y}^2}+\frac{\partial^2 \mathrm{T}}{\partial \mathrm{z}^2}\right)+\dot{\mathrm{q}} \qquad (۳)$$

که در رابطه (۳-۲۹) ترم‌های سمت راست معادله انتقال حرارت هدایت، و $\dot{q}$ چشمه حرارتی و سمت چپ بخش انتقال حرارت جابجایی می‌باشد. همچنین $C_{p,nf}$ گرمای ویژه نانوسیال، ρ_{nf} چگالی نانوسیال است.

چگالی نانوسیال

اکثر محققان استفاده از قانون مخلوط‌ها را برای محاسبه چگالی نانوسیالات مناسب می‌دانند و دقت آن را مورد بررسی قرار داده‌اند که این قانون به‌صورت رابطه زیر تعریف می‌شود [۱۵]:

$$\rho_{nf}=(\frac{m}{V})_{nf}=\frac{m_f+m_p}{V_f+V_p}=\frac{\rho_f V_f+\rho_f V_p}{V_f+V_p}=(1-\varphi)\rho_f+\varphi\rho_p \qquad (۴)$$

اندیس‌های p و f به ترتیب نمایانگر نانوذره و سیال پایه هستند و φ کسر حجمی نانوذرات، ρ چگالی و اندیس nf نمایانگر نانوسیال است.

ظرفیت گرمایی ویژه نانوسیال

برای تعریف ظرفیت گرمایی ویژه نانوسیال از مدل پیشنهادی ژوان و روتزل[1] [۱۶] استفاده می‌شود، که این رابطه با فرض تعادل گرمایی بین نانوذرات و سیال پایه استخراج شده است:

$$C_{p_{nf}}=\frac{(1-\emptyset)(\rho c)_f+\emptyset(\rho c)_p}{\rho_{nf}} \qquad (۵)$$

[1] Xuan and Roetzel

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-09]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1401.9.5.2.1]

که در آن ρ_{nf}، ρ_f و ρ_p به ترتیب چگالی نانوذرات، چگالی سیال پایه و چگالی نانوسیال می‌باشند. $\emptyset$ کسر حجمی نانوذرات و c_p و c_f به ترتیب ظرفیت گرمایی ویژه نانوذرات و سیال پایه می‌باشند. همچنین $C_{p_{nf}}$ ظرفیت گرمایی ویژه نانوسیال است.

ضریب هدایت حرارتی نانوسیال

برای تعیین ضریب هدایت حرارتی نانوسیال از مدل چوی[1] و همکاران [۱۷] استفاده شده است. چوی و همکاران فرض کردند که افزایش ضریب هدایت حرارتی نانوسیال ناشی از یک لایه نانو است که در اطراف نانوذرات تشکیل می‌شود.

رابطه ارائه شده توسط آن‌ها به‌صورت زیر می‌باشد:

$$k_{nf} = \frac{k_p + 2k_b + 2(k_p - k_b)(1+\beta)^3\emptyset}{k_p + 2k_b - (k_p - k_b)(1+\beta)^3\emptyset} k_b \quad (۶)$$

که در آن k_p هدایت حرارتی ذرات نانو، k_b ضریب هدایت حرارتی سیال پایه، $\emptyset$ کسر حجمی نانوذرات، و β نسبت ضخامت نانولایه به شعاع ذره اصلی است و معمولا مقدار آن 0.1 در نظر گرفته می‌شود.

لزجت دینامیکی نانوسیال

برای لزجت نانوسیالات مدل‌های تئوری و تجربی فراوانی پیشنهاد شده‌اند. برینکمن مدل خود را به‌صورت رابطه زیر ارائه نمود که برای محاسبه لزجت دینامیکی استفاده می شود [۱۸]:

$$\mu_{nf} = \mu_f \frac{1}{(1-\emptyset)^{2.5}} \quad (۷)$$

قانون دارسی برای محدوده وسیعی از جریان‌ها درون محیط متخلخل معتبر می‌باشد. در حالت سه بعدی رابطه زیر به‌طور کلی به‌صورت زیر بیان می‌گردد [۱۹]:

$$-\nabla \mathrm{P} = \frac{\mu \mathrm{v}}{\mathrm{k}} \quad \rightarrow \quad \mathrm{v} = -\frac{\mathrm{k}}{\mu}\nabla \mathrm{P} \quad (۸)$$

که در این رابطه μ گرانروی سیال، U_{d} میانگین سرعت سطحی، k نفوذپذیری محیط متخلخل و $\boldsymbol{\nabla}\mathrm{P}$ افت فشار در طول واحد می‌باشد. نفوذپذیری به‌طور عمومی، تانسور مرتبه دوم است و همچنین به این نکته باید توجه شود که در حالتی که محیط ایزونتروپیک است، نفوذپذیری اسکالر می‌باشد.

CF ضریب اینرسی[2] مربوط به تخلخل است، که توسط ارگان شرح داده شده و این رابطه در زیر ارائه شده است [۲۰]:

$$CF = \frac{1.75}{\sqrt{150\varepsilon^3}} \quad (۹)$$

ε در این رابطه، ضریب تخلخل است.

ضریب اصطکاک[3] برای ارزیابی عملکرد مقاومت جریان است. ضریب اصطکاک از رابطه زیر به‌دست می‌آید [۲۱]:

$$f = \frac{\Delta p}{l}\frac{2r_0}{(1/2)\rho u^2} \quad (۱۰)$$

در این رابطه، Δp اختلاف فشار، r_0 شعاع لوله، l طول لوله، ρ چگالی سیال و u سرعت محوری می‌باشد.

عدد ناسلت از رابطه زیر محاسبه می‌شود [۲۱]:

$$Nu(x) = \frac{2h(x)r_0}{k_f} \quad (۱۱)$$

[1] Choi
[2] inertia coefficient
[3] friction factor

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-09]
[DOR: 20.1001.1.20089813.1401.9.5.2.1]

که در این رابطه، k_f رسانایی حرارتی، و $h(x)$ ضریب انتقال حرارت جابجایی، r_0 شعاع لوله است.
ضریب انتقال حرارت جابجایی از رابطه زیر محاسبه می‌شود [۲۱]:

$$h(x) = \frac{q}{T_w(x) - T_m(x)} \quad (۱۲)$$

که در این رابطه q شار حرارتی و $T_w(x)$ درجه حرارت برروی دیوار گرم است.
$T_m(x)$ دمای ترمودینامیکی میانگین است و از رابطه زیر محاسبه می‌شود [۲۱]:

$$T_m(x) = \frac{\int_0^{r_0} uTrdr}{\int_0^{r_0} urdr} \quad (۱۳)$$

که در این رابطه، T دما، r شعاع اندازه‌گیری شده از خط مرکزی و u سرعت محوری است.
پارامترهای متغیر مساله عبارتند از:

ارتفاع تحتانی محیط متخلخل R1 . ارتفاع فوقانی محیط متخلخل R2 .
ضریب تخلخل ε. عدد دارسی Da .

در ادامه محدوده متغیرها آورده شده است:

$0<R1<R2<0.95$ $0.08 < \varepsilon < 0.98$ $10^{-8} < Da < 10^{-2}$

۱-۳- حل عددی

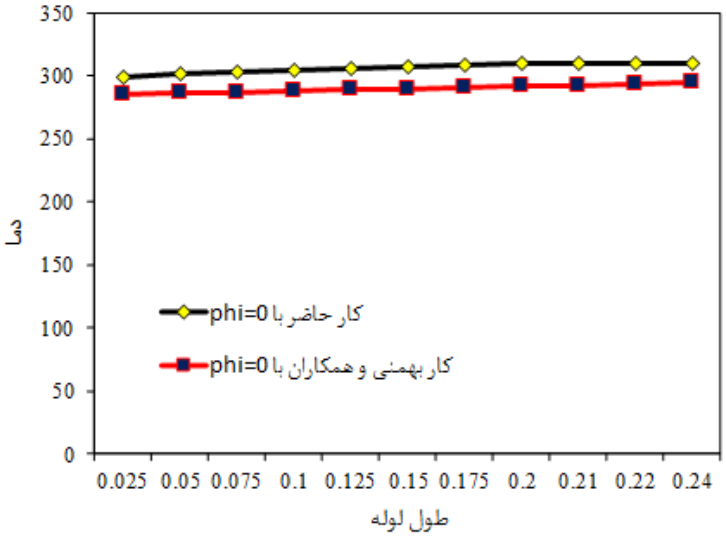
در این پژوهش به آنالیز عددی یک لوله حاوی محیط متخلخل با استفاده از نرم‌افزار کامسول برای حل مسئله پرداخته می شود. هندسه مسئله شامل یک لوله دو بعدی حاوی محیط متخلخل، به‌صورت دما ثابت می‌باشد که نانوسیال در آن جریان دارد. موقعیت ماده متخلخل درون لوله با حضور نانوسیال بهینه‌سازی می‌شود. حداقل ضریب اصطکاک و حداکثر عدد ناسلت به‌طور همزمان به‌عنوان دو هدف متضاد برای کاهش مقاومت جریان در لوله و افزایش انتقال حرارت در نظر گرفته شدند. در نرم‌افزار کامسول با استفاده از روش‌های عددی پیشرفته اقدام به مدلسازی و شبیه‌سازی مسائل فیزیک محور می‌شود. حل مسئله به صورت مدل تک فازی انجام می‌شود. در مدل تک‌فازی، مجموع نانوذرات و سیال پایه به‌صورت یک محیط پیوسته در نظر گرفته می‌شود. این مدل بر این اصل استوار است که بیشتر نانوسیالات مورد استفاده در انتقال حرارت حاوی ذراتی با ابعاد کوچک‌تر از ۱۰۰ نانومتر می‌باشند. به‌دلیل کوچک بودن اندازه ذرات معلق در سیال پایه، عقیده بر این است که این ذرات می‌توانند به سادگی جریان پیدا نمایند و از این‌رو می‌توان فرض کرد که هم‌چون یک سیال عمل می‌نمایند. همچنین از حرکت نسبی بین ذرات و سیال پایه صرف‌نظر شده و اثر حضور نانوذرات در خواص ظاهری در نظر گرفته می‌شود. بنابراین با فرض اینکه که تعادل حرارتی بین ذرات و سیال برقرار باشد، نانوسیال را می‌توان به صورت یک سیال تک‌فازی در نظر گرفت. در مدل تک‌فازی فرض بر این است که نانوذرات و فاز سیال در تعادل حرارتی و هیدرودینامیکی هستند. این مدل‌سازی نسبت به مدل‌سازی دوفازی ساده‌تر و زمان محاسبات در آن کمتر است. بنابراین در بسیاری از تحقیقات تئوری انتقال حرارت جابجایی مورد استفاده قرار گرفته است.

۴- نتایج

۱-۴- اعتبارسنجی

در پژوهش‌های علمی، لازم است به‌منظور اعتبارسنجی نتایج و اعتبار بخشیدن به کار انجام شده، نتایج به‌دست آمده با کارهای پژوهشی دیگر محققان، بررسی شوند و دقت نتایج مورد تایید قرار گیرند. جهت اطمینان از صحت مدلسازی نتایج پس از مدلسازی با نتایج بهمنی و همکاران که روی هندسه مشابه به‌صورت تئوری انجام شده است، مقایسه و اعتبارسنجی خواهد شد. جهت نمونه برای اعتبارسنجی و مقایسه نمودارها نتایج دما در $Da = 10^{-2}$، $\varepsilon = 0.8$ و $\emptyset = 0$ کار حاضر با کار آقای بهمنی و همکاران [۲۲]، بررسی شده است که این نتیجه در شکل ۲ قابل مشاهده است. نتایج این بررسی از دقت بالای مدلسازی حاکی است.

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-09]
[DOR: 20.1001.1.20089813.1401.9.5.2.1]



شکل ۲- نتایج دما در $\varepsilon = 0.8$ ،$Da = 10^{-2}$ و $\emptyset = 0$ کار حاضر با کار آقای بهمنی و همکاران [۲۲].

۴-۲- خواص

خواص ترموفیزیکی سیال پایه آب و نانوذره نقره در جدول ۱ ارائه شده‌اند. عدد پرانتل آب $P_r = 6.2$ فرض می‌شود [۲۳،۲۴].

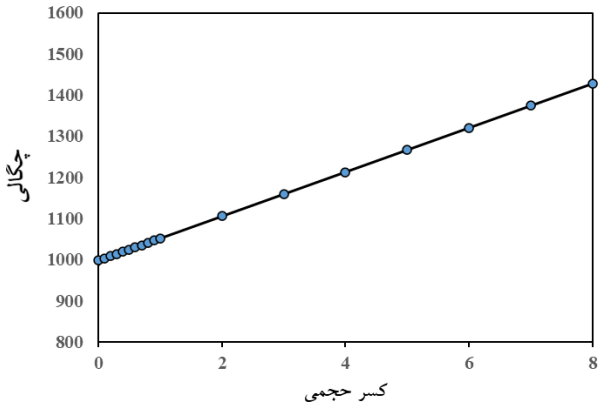
۴-۲- نتایج مدلسازی

در این مرحله به محاسبه خواص نانوسیال برای کسر حجمی‌های متفاوت و در محدوده $\emptyset = 0.1\ \%$ تا $\emptyset = 9\ \%$ می‌پردازیم. در نتیجه خواهیم داشت، نمودار تغیرات خطی چگالی نانوسیال (ρ_{nf}) نسبت به کسر حجمی نانوسیال ($\emptyset$) در شکل ۳ آورده شده است. نتایج نشان می‌دهد با افزایش کسرحجمی، چگالی نیز افزایش می‌یابد.

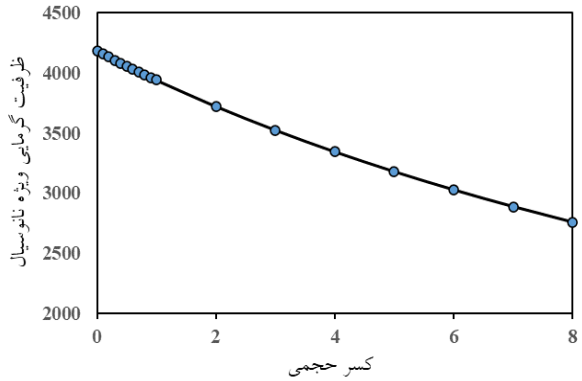
جدول ۱- خواص ترموفیزیکی سیال پایه آب و نانوذره نقره [۲۳،۲۴].

معرفی پارامتر	خاصیت	Ag (نقره)	آب خالص
ظرفیت گرمایی ویژه	C_p [J.Kg^{-1}.K^{-1}]	235	4179.0
چگالی	ρ [kg.m^{-3}]	10500	997.1
ضریب هدایت حرارتی	K [Wm^{-1}.K^{-1}]	429	0.613
ویسکوزیته	μ [Kgm^{-1}s^{-1}]	-	0.001006
ضریب انبساط حرارتی	Thermal Expansion Coefficient (K^{-1}) [β]	-	0.000214
ضریب هدایت الکتریکی	σ [S/m]	6.30×10^{7}	0.005–0.05
عدد پرانتل	P_r	-	6.2

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-09]
[DOR: 20.1001.1.20089813.1401.9.5.2.1]



شکل ۳- نمودار تغییرات خطی چگالی نانوسیال (ρ_{nf}) نسبت به کسر حجمی نانوسیال.

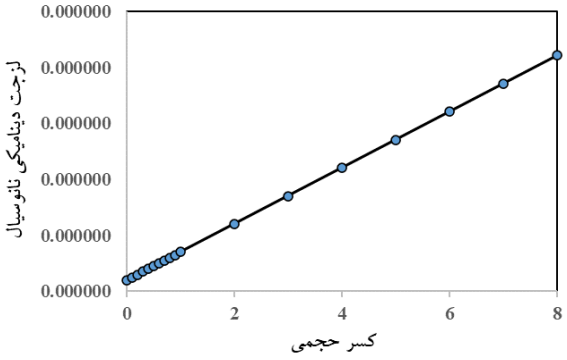


شکل ۴- نمودار تغییرات ظرفیت گرمایی ویژه نانوسیال نسبت به کسر حجمی نانوسیال.

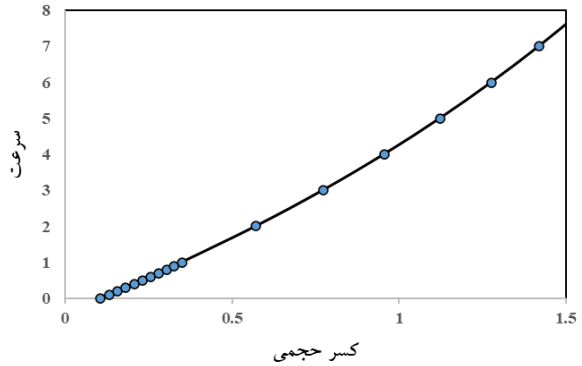
نمودار تغییرات ظرفیت گرمایی ویژه نانوسیال ($C_{p_{nf}}$) نسبت به کسر حجمی نانوسیال ($\emptyset$) در شکل ۴ آورده شده است. نتایج نشان می‌دهد با افزایش کسر حجمی، ظرفیت گرمایی ویژه نانوسیال کاهش می‌یابد.

ادامه نمودار تغییرات ظرفیت لزجت دینامیکی نانوسیال (μ_{nf}) نسبت به کسر حجمی نانوسیال ($\emptyset$) در شکل ۵ آورده شده است. نتایج نشان می‌دهد، با افزایش کسرحجمی، لزجت دینامیکی نیز افزایش می‌یابد.

در ادامه نمودار سرعت در کسر حجمی‌های مختلف در شکل ۶ آورده شده است.



شکل ۵- نمودار تغیرات ظرفیت لزجت دینامیکی نانوسیال نسبت به کسر حجمی نانوسیال.



شکل ۶- نمودار سرعت در کسر حجمی مختلف.

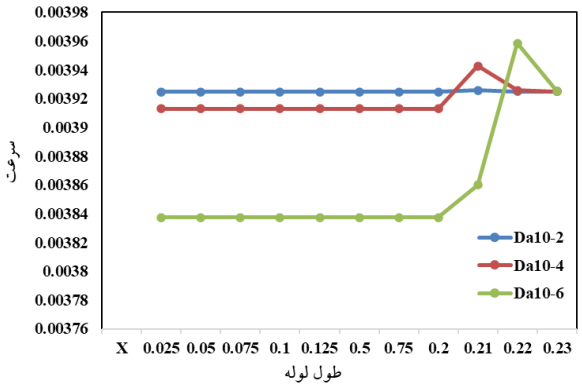
نتایج به‌دست آمده نشان می‌دهد، کسر حجمی بر خواص ترمودینامیکی سیال تاثیر می‌گذارد و با افزایش کسر حجمی سرعت نیز افزایش می‌یابد.

در این قسمت نتایج حاصل شبیه‌سازی از لوله با حضور محیط متخلخل بررسی می‌شود. نتایج این بررسی برای کسر حجمی ۰,۵، ضریب تخلخل ۰,۸ و در طول لوله یعنی محور x انجام می شود. پروفیل سرعت میانگین برای $R1 =$ ، $\emptyset = 0.5$ $\varepsilon = 0.8$ ، $R2 = 0.9$ ، 0.05 و برای سه حالت عدد دارسی $Da = 10^{-2}$ ، $Da = 10^{-4}$ و $Da = 10^{-6}$ در طول لوله در ۷ شکل رسم شده است. پروفیل سرعت در طول‌های مختلفی از لوله بررسی شده است. خط آبی رنگ در نمودار سرعت، دارای بزرگترین مقدار عدد دارسی ($Da = 10^{-2}$) می‌باشد و بیشترین مقدار نفوذ را دارد. هر چه مقدار عدد دارسی کاهش می‌یابد، محیط متخلخل رفتارش به جسم صلب غیر قابل نفوذ، نزدیک می‌شود و همان‌طور که از نمودار فوق پیدا است از مقدار $Da =$

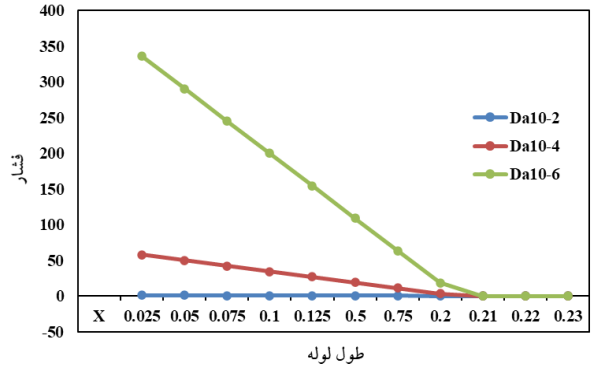
[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-09]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1401.9.5.2.1]

10^{-6} به بعد نفوذ محیط متخلخل تقریبا برابر صفر است و بیشینه‌ی سرعت در ناحیه‌ی میان محیط متخلخل و جداره‌ی لوله رخ داده است.



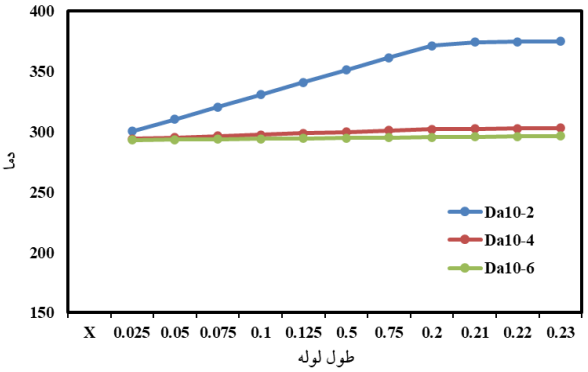
شکل ۷- پروفیل سرعت میانگین برای $\emptyset = 0.5$ ،$R1$، $\varepsilon = 0.8$ ،$R2 = 0.9$ ،0.05.

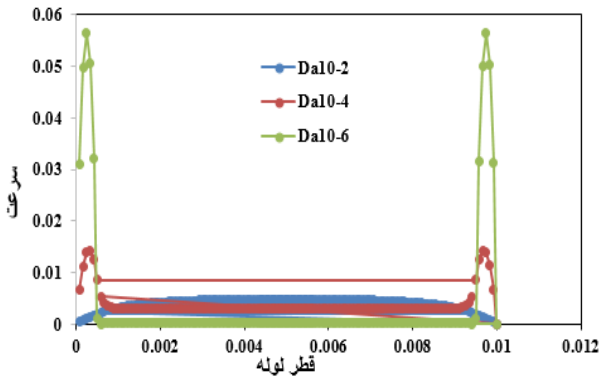


شکل ۸- پروفیل فشار میانگین برای $\emptyset = 0.5$ ،$R1$، $\varepsilon = 0.8$ ،$R2 = 0.9$ ،0.05.

پروفیل فشار میانگین برای $\varepsilon = 0.8$، $R2 = 0.9$، $R1 = 0.05$، $\emptyset = 0.5$ و برای سه حالت عدد دارسی $Da = 10^{-2}$، $Da = 10^{-4}$ و $Da = 10^{-6}$ در طول لوله، در شکل ۸ رسم شده است. با توجه به نمودار فشار که در شکل ۷ آمده است در خواهیم یافت با شروع ناحیه‌ی متخلخل که فشار در حال کاهش است و با اتمام ناحیه‌ی متخلخل فشار به صفر میل خواهد کرد. علت این امر را می‌توان مربوط به آن دانست که در اثر اصطکاکی که بین جریان نانوسیال و لوله اتفاق می‌افتد، منجر به افت فشار نانوسیال می‌شود. همچنین می‌توان گفت نانوسیال قبل از ورود به لوله دارای سطح فشار بالاتری نسبت به هنگام خروجی لوله بوده است و به علت اینکه دبی جریان تغییر می‌کند پس افت فشار را شاهد هستیم. در حقیقت می‌توان گفت ورودی لوله مانند مانعی در برابر عبور جریان (دبی) عمل می‌کند.

پروفیل دما برای $\varepsilon = 0.8$، $R2 = 0.9$، $R1 = 0.05$، $\emptyset = 0.5$ و برای سه حالت عدد دارسی $Da = 10^{-2}$، $Da =$ 10^{-4} و $Da = 10^{-6}$ در طول لوله در شکل ۹ رسم شده است. در ابتدا باید گفت هرچه میزان تخلخل کمتر باشد و رفتار متخلخل ضعیفی بوجود می آید.و رفتار آن یکنواخت و مانند لوله‌ی معمولی (بدون تخلخل) می‌باشد (نمودار داری 10^{-2}). با نگاهی نمودارها در خواهیم یافت که با شروع ناحیه‌ی متخلخل افزایش لحظه‌ای دما را خواهیم داشت. محیط متخلخل با ایجاد آشفتگی در جریان نانوسیال و در نتیجه افزایش نرخ انتقال حرارت باعث افزایش دمای نانوسیال می‌شود و با اتمام ناحیه‌ی متخلخل کاهش دما را در پی خواهد داشت.





[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-09]
[DOR: 20.1001.1.20089813.1401.9.5.2.1]

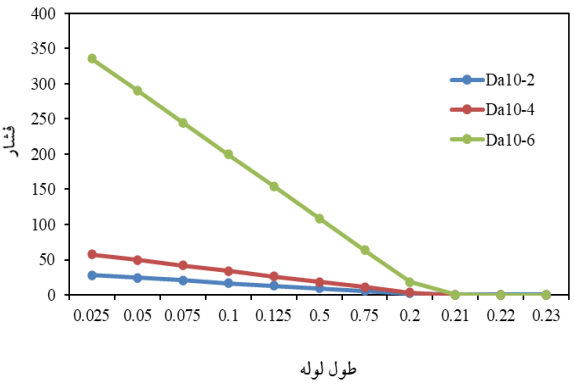
شکل ۹- پروفیل دما برای $\emptyset = 0.5$ ،$R1 = 0.05$ ،$R2 =$ 0.9 ،$\varepsilon = 0.8$

شکل ۱۰- پروفیل سرعت برای $\emptyset = 0.5$ ،$R1 = 0.05$ ،$R2 =$ 0.9 ،$\varepsilon = 0.98$

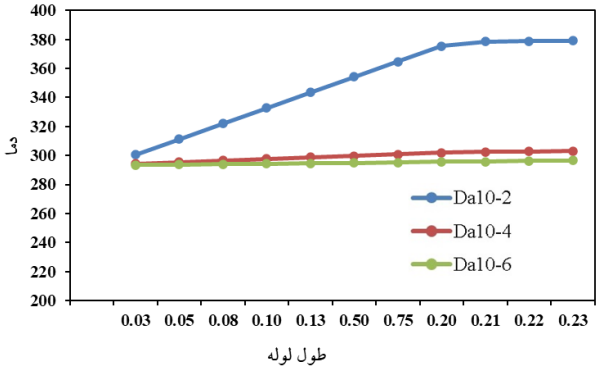
در ادامه نتایج برای کسر حجمی ۰,۵ و ضریب تخلخل ۰,۹۸ در راستای قطر لوله (D) یعنی محور y بررسی می شود. پروفیل سرعت برای $\varepsilon = 0.98$، $R2 = 0.9$، $R1 = 0.05$، $\emptyset = 0.5$ و برای سه حالت عدد دارسی $Da = 10^{-2}$، $Da = 10^{-4}$ و $Da = 10^{-6}$ در راستای قطر لوله در شکل ۱۰ رسم شده است.

با مشاهده پروفیل‌های سرعت نتیجه می‌شود که به‌دلیل اینکه محیط متخلخل روی کف لوله قرار دارد، به‌طبع با کم شدن عدد دارسی؛ محیط متخلخل رفتاری صلب‌گونه از خود نشان می‌دهد و این امر باعث می‌شود تا سرعت بیشینه در ناحیه‌ی بالایی قرار گیرد. در واقع در فاصله‌ی بین جداره‌ی بالایی لوله و محیط متخلخل شاهد بیشینه سرعت خواهیم بود. همچنین همان‌طور که از نمودار بر می‌آید؛ با کمتر شدن مقدار عدد دارسی، نفوذپذیری محیط متخلخل کاهش می‌یابد و در $Da=10^{-6}$ و کمتر محیط متخلخل خاصیت خود را از دست می‌دهد و مانند جسم صلب غیر قابل نفوذ رفتار می‌کند.

در ادامه پروفیل فشار برای $\varepsilon = 0.98$، $R2 = 0.9$، $R1 = 0.05$ ، $\emptyset = 0.5$ و برای سه حالت عدد دارسی $Da = 10^{-2}$، $Da = 10^{-4}$ و $Da = 10^{-6}$ در طول در شکل ۱۱ رسم شده است.



شکل ۱۱- پروفیل فشار برای $\emptyset = 0.5$ ، $R1 = 0.05$ ،$R2 =$ 0.9 ،$\varepsilon = 0.98$



شکل ۱۲- پروفیل دما برای $\emptyset = 0.5$ ،$R1 = 0.05$ ،$R2 =$ 0.9 ،$\varepsilon = 0.98$

نتایج نشان می‌دهد که با شروع ناحیه‌ی متخلخل که فشار در حال کاهش است و با اتمام ناحیه‌ی متخلخل فشار به صفر میل خواهد کرد. علت این امر را می‌توان مربوط به آن دانست که در اثر اصطکاکی که بین جریان نانوسیال و لوله اتفاق می‌افتد، منجر به افت فشار نانوسیال می‌شود.

در ادامه پروفیل دما برای $\varepsilon = 0.98$، $R2 = 0.9$، $R1 = 0.05$، $\emptyset = 0.5$ و برای سه حالت عدد دارسی $Da = 10^{-2}$، $Da = 10^{-4}$ و $Da = 10^{-6}$ در شکل ۱۲ رسم شده است.

در این مرحله به بررسی تغییرات عدد ناسلت در راستای طول لوله در $\emptyset = 0$، R1=0.9، R2=0.05، $\varepsilon = 0.98$ و برای سه حالت متفاوت عدد دارسی $Da = 10^{-2}$، $Da = 10^{-4}$ و $Da = 10^{-6}$ پرداخته می‌شود.

در جدول ۲ تغییرات عدد ناسلت در راستای طول لوله و برای اعداد دارسی مختلف بررسی شده است.

عدد ناسلت عددی بی بعد است که رابطه ی مستقیم با شار حرارتی و طول دارد و همچنین نسبت عکس با میزان اختلاف دمای سیال و جداره؛ ضریب رسانش حرارتی سیال دارد. یعنی هر چه اختلاف دمای جداره و سیال به هم نزدیک تر باشد عدد ناسلت بزرگ‌تر خواهد بود.

جدول ۲- تغییرات عدد ناسلت در راستای طول لوله در $\emptyset = 0.5$، R1=0.9، R2=0.05، $\varepsilon = 0.98$

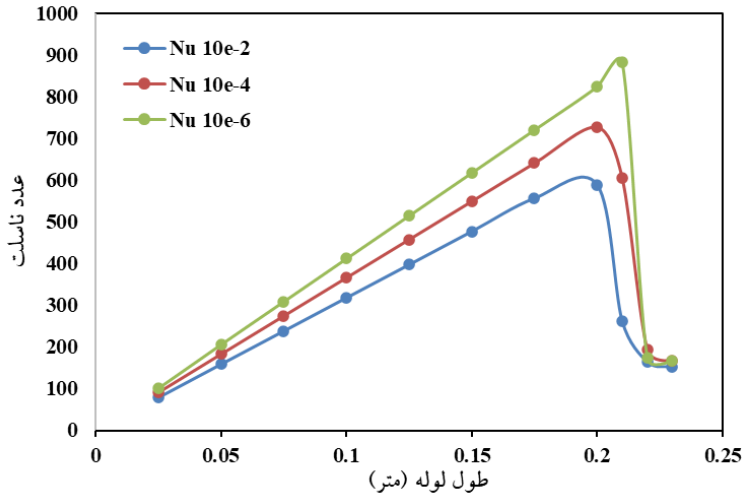
[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-09]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1401.9.5.2.1]

X	مقدار عدد ناسلت برای حالت دارسی 10^{-2}	مقدار عدد ناسلت برای حالت دارسی 10^{-4}	مقدار عدد ناسلت برای حالت دارسی 10^{-6}
0.025	78.91736	91.13022	100.7711
0.05	158.9761	183.1378	205.8011
0.075	238.4629	274.7045	308.7408
0.1	317.95	366.2697	411.655
0.125	397.4373	457.834	514.5691
0.15	476.9247	549.3975	617.4831
0.175	556.3786	640.9593	720.3966
0.2	588.6771	727.264	824.0709
0.21	262.1609	604.9039	882.0778
0.22	165.3225	193.8318	173.3392
0.23	152.4873	166.1864	167.0501

در شکل ۱۳ تغییرات عدد ناسلت در راستای طول لوله و برای اعداد دارسی مختلف بررسی شده است.

نتایج نشان می‌دهد که با افزایش طول لوله و در مسیر محیط متخلخل، عدد ناسلت رو به افزایش است و سیر صعودی دارد. در انتهای لوله و دقیقا جایی که محیط متخلخل تمام می‌شود (محیط متخلخل در مختصات x_1=1cm و x_2= 21cm و به طول ۲۰ سانتی متر است)، شاهد افت عدد ناسلت می‌باشیم.



شکل ۱۳- تغییرات عدد ناسلت در راستای طول لوله در $\emptyset = 0.5$، R1=0.9، R2=0.05، $\varepsilon = 0.98$

در ادامه به نتایج تغییرات ضریب اصطکاک در راستای طول لوله در $\emptyset = 0$، R1=0.9، R2=0.05، $\varepsilon = 0.98$ و برای سه حالت متفاوت عدد دارسی $Da = 10^{-2}$، $Da = 10^{-4}$ و $Da = 10^{-6}$ پرداخته می‌شود.

در جدول ۳ تغییرات ضریب اصطکاک در راستای طول لوله و برای اعداد دارسی مختلف بررسی شده است. این نکته نیز باید ذکر شود که مقدار ضریب اصطکاک عددی بین ۰ تا ۰/۱ است و علامت منفی حاکی از این است که ضریب اصطکاک در خلاف جریان حرکت نانوسیال وارد می‌شود.

جدول ۳- تغییرات ضریب اصطکاک در راستای طول لوله در $\emptyset = 0.5$، R1=0.9، R2=0.05، $\varepsilon = 0.98$

X	مقدار ضریب اصطکاک برای حالت دارسی 10^{-2}	مقدار ضریب اصطکاک برای حالت دارسی 10^{-4}	مقدار ضریب اصطکاک برای حالت دارسی 10^{-6}
0	-0.03818	-0.042	-0.04773
0.01	-0.03766	-0.04142	-0.04707

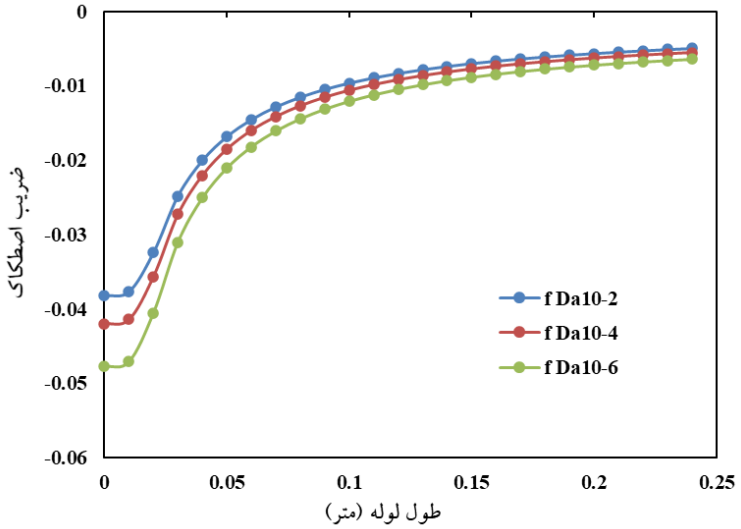
[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-09]
[DOR: 20.1001.1.20089813.1401.9.5.2.1]

0.02	-0.03241	-0.03565	-0.04052
0.03	-0.02481	-0.02729	-0.03102
0.04	-0.02004	-0.02204	-0.02505
0.05	-0.01683	-0.01851	-0.02105
0.06	-0.01455	-0.016	-0.0182
0.07	-0.01284	-0.01413	-0.01608
0.08	-0.01153	-0.01269	-0.01444
0.09	-0.01048	-0.01154	-0.01314
0.1	-0.00963	-0.0106	-0.01208
0.11	-0.00892	-0.00983	-0.01121
0.12	-0.00833	-0.00918	-0.01048
0.13	-0.00782	-0.00862	-0.00985
0.14	-0.00739	-0.00815	-0.00931
0.15	-0.007	-0.00773	-0.00885
0.16	-0.00667	-0.00736	-0.00844
0.17	-0.00637	-0.00704	-0.00808
0.18	-0.00611	-0.00675	-0.00776
0.19	-0.00587	-0.00649	-0.00747
0.2	-0.00566	-0.00626	-0.00722
0.21	-0.00546	-0.00605	-0.00699
0.22	-0.00529	-0.00586	-0.00678
0.23	-0.00512	-0.00569	-0.0066
0.24	-0.00498	-0.00553	-0.00643

همانطور که در شکل ۱۴ مشاهده می شود، در راستای طول ضریب اصطکاک به عدد رینولدز و زبری لوله بستگی دارد. زبری در کل لوله یکنواخت می‌باشد و فقط رینولدز در این مساله بر میزان ضریب اصطکاک اثر می‌گذارد.

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-09]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1401.9.5.2.1]



شکل ۱۴- تغییرات ضریب اصطکاک در راستای طول لوله در $\emptyset = 0.5$، R1=0.9، R2=0.05، $\varepsilon = 0.98$

هدف ما از انجام این پژوهش رسیدن به اعداد ناسلت بالا و ضریب اصطکاک پایین می‌باشد. هرچه عدد ناسلت بزرگ‌تر باشد گویای این امر است که نرخ انتقال حرارت بین سیال و جداره‌ها بیشتر بوده است. پس هم برای گرمایش سیال و هم برای سرمایش آن به ناسلت‌های بالا نیاز داریم.

۵- نتیجه گیری

در این پژوهش یه آنالیز عددی یک لوله حاوی محیط متخلخل به صورت دو بعدی و با حضور نانوسیال آب-نقره جهت بهبود انتقال حرارت پرداخته شد. جهت اطمینان از صحت مدلسازی، نتایج بررسی پروفیل دما در $\varepsilon = 0.8$، $Da = 10^{-2}$ و $\emptyset = 0$ کار حاضر با کار آقای بهمنی و همکاران [۲۲] روی هندسه مشابه کار شده بود، مقایسه و اعتبارسنجی شد که نتایج از دقت بالای این مدلسازی جاکی بود.

پروفیل‌های سرعت؛ فشار و دمای لوله‌ی دو بعدی در کسر حجمی، ضریب تخلخل و اعداد دارسی متفاوتی به‌دست آمد. سپس به بررسی عدد ناسلت و ضریب اصطکاک پرداخته شد. نتایج به‌دست آمده از شبیه‌سازی با نرم‌افزار کامسول نشان داد که با کاهش عدد دارسی، مقدار عدد ناسلت افزایش می‌یابد. همچنین مقدار ضریب اصطکاک نیز با کاهش عدد دارسی، تا حدودی افزایش می‌یابد. همچنین با افزایش ضریب تخلخل، مقدار عدد ناسلت و ضریب اصطکاک کاهش می‌یابد.

نتایج را به صورت کلی می توان در زیر خلاصه کرد:

۱- نتایج نشان می‌دهد که با کاهش عدد دارسی، سرعت به میزان ۲،۰۸ درصد نسب به دارسی $۱۰^{-۶}$ و ۰،۲۵درصد نسبت به دارسی $۱۰^{-۴}$ کمتر می‌شود و بیشینه‌ی سرعت در ناحیه‌ی میان محیط متخلخل و جداره لوله یعنی بین R1=0.9cm و R2=0.05cm اتفاق می‌افتد.

۲- نتایج نشان می‌دهد که با کاهش عدد دارسی، فشار به میزان ۶۰۰ درصد نسب به دارسی $۱۰^{-۶}$ و ۱۰۰ درصد نسبت به دارسی $۱۰^{-۴}$ افزایش پیدا می کند. همچنین در راستای طول لوله نتایج حاکی از افزایش فشار داشته است.

۳- نتایج نشان می‌دهد که با کاهش عدد دارسی، دما در راستای طول لوله افزایش می‌یابد که علت این امر حضور محیط متخلخل می‌باشد و به نوبه خود باعث افزایش انتقال حرارت می‌شود. نتایج نشان داد که افزایش طول لوله از ۰،۰۲۵ سانتی متر به ۰،۲۴ باعث رشد ۲۵ درصدی دما نسبت به عدد دارسی $۱۰^{-۲}$ می‌شود.

۴- نتایج نشان می‌دهد با کاهش عدد دارسی یا نفوذپذیری، مقدار عدد ناسلت ۱۰،۵ درصد نسب به دارسی $۱۰^{-۶}$ و ۱۳،۶۴ درصد نسبت به دارسی $۱۰^{-۴}$ افزایش می‌یابد. نتایج حاکی از رشد تقریبا ۹۴ درصدی عدد ناسلت در طول لوله است. همچنین

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-09]
[DOR: 20.1001.1.20089813.1401.9.5.2.1]

مقدار ضریب اصطکاک نیز ۱۰٫۵ درصد نسب به دارسی $۱۰^{-۶}$ و ۱۵٫۴ درصد نسبت به دارسی $۱۰^{-۴}$ افزایش داشته است. علت افزایش انتقال حرارت را می‌توان 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.

۵- می‌توان گفت که با کاهش عدد دارسی که نشان‌دهنده کاهش در میزان تخلخل محیط می‌باشد، نفوذپذیری سیال در داخل لایه متخلخل کم می‌شود و سیال برای عبور از لایه متخلخل با مقاومت چندانی روبرو نمی‌شود، در نتیجه سرعت افزایش می‌یابد و با توجه به کوپل بودن میدان دما و سرعت، با افزایش سرعت، دما کاهش می‌یابد. پس می‌توان گفت که با افزایش سرعت مقدار عدد ناسلت نیز افزایش می‌یابد.

۶- ضریب اصطکاک با میزان آشفتگی جریان تغییر می‌کند. که به عدد رینولدز و زبری لوله بستگی دارد. زبری در کل لوله یکنواخت می‌باشد و فقط رینولدز در این مساله بر میزان ضریب اصطکاک اثر می‌گذارد.

علائم اختصاری

نام پارامتر	معرفی	واحد
Da	عدد دارسی	-
K	ضریب نفوذپذیری	m^2
R1	ارتفاع تحتانی محیط متخلخل	m
R2	ارتفاع فوقانی محیط متخلخل	m
Re	عدد رینولدز	-
Nu	عدد ناسلت	-
f	ضریب اصطکاک	-
V	سرعت	m/s
P	فشار	Pa
T	دما	℃
r_0	قطر لوله	m
P_r	عدد پرانتل	-
C_p	ظرفیت گرمایی ویژه	$[J.Kg^{-1}.K^{-1}]$
K	هدایت حرارتی	$[Wm^{-1}.K^{-1}]$
x	موقعیت محوری طول لوله	m
h	ضریب انتقال حرارت جابجایی	w/m^2k
CF	ضریب اینرسی	-
حروف یونانی		
∅	کسر حجمی	٪
ε	ضریب تخلخل	-
ρ	چگالی	$kg.m^{-3}$
μ	ویسکوزیته	$[Kgm^{-1}s^{-1}]$ یا Pa·s
σ	ضریب هدایت الکتریکی	[S/m]
مخففها		
nf	نانوسیال	
F	سیال	

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-09]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1401.9.5.2.1]

S فاز جامد

مراجع

[1] M. Sheikholeslami, D. Domiri Ganjib, Numerical investigation of nanofluid melting heat transfer between two pipes, Alexandria Engineering Journal, Volume 57, Issue 3, September 2018, Pages 1261-1269

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

[3] K. Milani Shirvan, R. Ellahi, S. Mirzakhanlari, M. Mamourian, Enhancement of heat transfer and heat exchanger effectiveness in a double pipe heat exchanger filled with porous media: Numerical simulation and sensitivity analysis of turbulent fluid flow, Applied Thermal Engineering, Volume 109, (2016), Part A, Pages 761-774.

[4] A. Baqaie Saryazdi, F. Talebi, T. Armaghani, I. Pop, 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, (2016) 131:78.

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

[6] S. Nazari, D. Toghraie,. 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, (2017) 134-140.

[7] Y. Sheikhnejad, R. Hosseini, M.S. Avval, 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, (2017) 16-25.

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

[9] K. Milani Shirvan, S. Mirzakhanlari, A. Soteris, H.F. Kalogirou, M. Mamourian, Heat transfer and sensitivity analysis in a double pipe heat exchanger filled with porous medium, International Journal of Thermal Sciences 121, (2017) 124-137.

[10] A. Kumar Tiwari, S. Javed., H. F Oztop, Z. Said, N. S. Pandy, Experimental and numerical investigation on the thermal performance of triple tube heat exchanger equipped with different inserts with WO3/water nanofluid under turbulent condition, International Journal of Thermal Sciences 164 (2021) 106861.

[11] M.E. Nakhchi, M Hatami., M. Rahmati, Effects of CuO nano powder on performance improvement and entropy production of double-pipe heat exchanger with innovative perforated turbulators, Vol. 32, (2021) pp. 3063–3074.

[12] M. Bahiraei, Z. Rahimi, F. Nazari, A combined multi-criterion optimization to determine optimum geometrical parameters for flow of an ecofriendly graphene-based nanofluid inside tube enhanced with twisted conical strip inserts, Powder Technology, Vol. 377, (2021), pp. 336–349.

[13] M. M. Alqarni, E. E. Mahmoud, E. A. Algehyne, A. M. El-Refaey , M. A. El-Shorbagy, M. Ibrahim, Improvement of the thermal and hydraulic performance of parabolic trough collectors using hybrid nanofluids and novel turbulators with holes and ribs, Vol. 47, (2021), 101480.

[14] F. M. White, (2002). Fluid Mechanics, McGraw-Hill, 5th edition, ISBN 0-07-283180-4.

[15] A.A. Rabienataj Darzi, M. Farhadi, K. Sedighi, S. Aallahyari, M. Aghajani Delavar, Turbulent heat transfer of Al2O3–water nanofluid inside helically corrugated tubes: Numerical study, International Communications in Heat and Mass Transfer 41, (2013), 68–75.

[16] Y. Xuan,. W. Roetzel, Conceptions for heat transfer correlation of nanofluids, International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 43, (2012), pp 3701–3707.

[17] C. H. Choi, K. Kihm, Thermal Conductivity Enhancement of Nanofluids by Brownian Motion, Journal of Heat Transfer, Vol. 120(8), pp. 813, (2013), 2335.

[18] H.C. Brinkman, The viscosity of concentrated suspensions and solutions. J. Chem. Phys. 20, (1952), 571-580.

[19] D. A. Nield, A. Bejan, Convection in porous media, third ed, springer, New York, (2006).

[20] S. Ergun, Fluid flow through packed column, Chem. Eng. Prog. (1952), 4889-94.

[21] Y. Ge, Z.C. Liu, W. Liu, G. Chen, Active optimization design theory and method for heat transfer unit and its application on shape design of cylinder in convective heat transfer, Int. J. Heat Mass Transfer (90) (2015), 702–709.

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-09]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1401.9.5.2.1]

[22] M.H. Bahmani, G. Sheikhzadeh, M. Zarringhalam, O.A. Akbari, A. Alrashed, G. Ahmadi Sheikh Shabani, M. Goodarzi, Investigation of turbulent heat transfer and nanofluid flow in a double pipe heat exchanger, Advanced Powder Technology, Volume 29, Issue 2, (2018), Pages 273-282
[23] P. Forghani-Tehrani, A. Karimipour, M. Afrand, S. Mousavi, Different nano-particles volume fraction and Hartmann number effects on flow and heat transfer of water-silver nanofluid under the variable heat flux, Physica E, 85, (2017), 271–279.
[24] A. M. Helmenstine, Table of Electrical Resistivity and Conductivity, Flow of Electric Current Through Materials, Science, Technology, and Math, (2017).
[25] k.D. Sarit, Nanofluids-the cooling medium of the future, Heat Transfer Engineering, Vol27, (2006), pp100-120.
[26] S. Keykhah, E. Assareh, R. Moltames, M. Izadi, H. Muhammad Ali, Heat transfer and fluid flow for tube included a porous media: Assessment and Multi-Objective Optimization Using Particle Swarm Optimization (PSO) Algorithm, Physica A: Statistical Mechanics and its Applications 545: (2020) 123804.

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-09]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1401.9.5.2.1]

چکیده انگلیسی:

Numerical analysis of heat transfer and fluid flow inside a tubeinserted of porous media and the use of nanofluid

Sajjad Keykhah, Ehsanolah Assareh*

Department of Mechanical Engineering, Dezful Branch, Islamic Azad University, Dezful, Iran

Received: April 2022, Accepted: August 2022

Abstract

Nowadays, the issue of increasing efficiency and improving energy consumption in industry has become more and more important to researchers. For this reason, in this study, a numerical analysis of heat transfer and fluid flow inside a tube containing a porous medium and the use of nanofluids were performed. Simultaneous use of porous structure and nanofluid as a fluid is one of the innovations of this research that significantly increases heat transfer in the pipe. The modeling was performed in two dimensions with the assumption of slow flow, at a constant temperature and with the presence of water-silver nanofluid to improve heat transfer. The main purpose of this study was to achieve the minimum coefficient of friction and the maximum Nusselt number at the same time as two opposing objectives to reduce the flow resistance in the pipe and increase heat transfer. Speed profiles; Two-dimensional tube pressure and temperature were obtained in volume fraction, porosity coefficient and different Darcy numbers. Then the Nusselt number and the coefficient of friction were investigated. The results of this study showed that by decreasing the Darcy number, the value of the Nusselt number increases. Also, the amount of coefficient of friction has increased somewhat. The reason for the increase in heat transfer can be related to the increased interaction between the nanofluid and the porous material. In fact, larger Darcy numbers have lower energy recovery rates than wasted energy. Another reason for the increase in Nusselt number is the decrease in temperature. The reason for the increase in the coefficient of friction can also be related to the increase in speed, pressure and Reynolds number along the pipe.

Key words: Heat pipe, porous media, nanofluid, Nusselt number, coefficient of friction.

*corresponding author: **assareh@iaud.ac.ir**

Cite this article as: Sajjad Keykhah, Ehsanolah Assareh, Numerical analysis of heat transfer and fluid flow inside a tubeinserted of porous media and the use of nanofluid. Journal of Energy Conversion, 2023, 9(5), 1-17. DOR**:** **20.1001.1.20089813.1401.9.5.2.1**

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-09]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1401.9.5.2.1]