

ارزیابی کارایی مواد متخلخل در انتقال حرارت اجباری: وضعیت حاضر و چالش‌های پیش رو

صادق علی حسینی^۱، آرزو جعفری^{۲*}

۱- کارشناس ارشد مهندسی شیمی، دانشگاه تربیت مدرس

۲- دانشیار مهندسی شیمی، دانشگاه تربیت مدرس

پیام نگار: ajafari@modares.ac.ir

چکیده

در صنعت برای افزایش سطح انتقال حرارت غالباً از پره‌ها استفاده می‌شود؛ اما در برخی موارد به دلیل محدودیت در فضا و شرایط عملیاتی، دارای بازدهی محدودی است. با توجه به توانایی محیط متخلخل در افزایش بازدهی حرارتی، از راه افزایش سطح تبادل انرژی و تغییر در گرادیان سرعت، حضور مواد متخلخل به عنوان راهکاری نوین در افزایش انتقال حرارت مورد توجه قرار گرفته است. در این پژوهش با هدف ارزیابی امکان استفاده از مواد متخلخل در کاربردهای صنعتی، ضمن بررسی آخرین مطالعات، عوامل مؤثر بر انتقال حرارت (عدد ناسلت (Nu)) در حضور این دسته از مواد (آرایش، هدایت حرارتی، گرادیان حفره‌ها، درصد تخلخل، تراوایی و عدد دارسی، ضخامت، سرعت سیال و حضور چشمه حرارتی) ارزیابی شده‌اند. آرایش‌های مختلف بررسی شده در دو دسته جزئی و کاملاً متخلخل تقسیم‌بندی می‌شوند؛ در میان آرایش‌های بررسی شده، آرایش کاملاً متخلخل غالباً بالاترین مقدار افزایش در میزان انرژی تبادل یافته و افت فشار را از خود نشان داده است. با توجه به افزایش افت فشار ضمن حضور محیط متخلخل، معیاری برای ارزیابی آرایش‌های مختلف گزارش شده است. در پایان به محدودیت‌ها و چالش‌های پیش رو در استفاده از این مواد پرداخته شده است.

تاریخ دریافت: ۹۸/۰۵/۰۸

تاریخ پذیرش: ۹۹/۰۳/۰۷

شماره صفحات: ۷۴ تا ۹۰

کلیدواژه‌ها: محیط متخلخل، درصد تخلخل، انتقال حرارت، افت فشار، عدد ناسلت، عدد دارسی

۱. مقدمه

پمپ و کمپرسورهای با توان بالاتر و غیره) همراه است. افزایش اختلاف دمای عملیاتی میان محیط سرد و گرم غالباً در فرایندهای صنعتی بر اساس سازوکارهای انحصاری^۱ استفاده شده، مقادیر معینی در نظر گرفته می‌شود؛ لذا راهکار رایج استفاده شده در صنعت برای افزایش انتقال حرارت، استفاده از پره^۲ است که با افزایش سطح

انتقال حرارت جابه‌جایی متداول‌ترین سازوکار انتقال حرارت در فرایندهای صنعتی به شمار می‌آید؛ افزایش ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی نیازمند ایجاد تغییر در خواص سیال (استفاده از سیال با ضریب انتقال حرارت بالاتر) یا شرایط هیدرودینامیکی آن (افزایش تلاطم) است که با افزایش هزینه‌های عملیاتی و ثابت (استفاده از

1. License
2. Fin

* تهران، دانشگاه تربیت مدرس، دانشکده مهندسی شیمی

۱-۱-۲-۱-۱-۲ آرایش مرکزی

در آرایش مرکزی، محیط متخلخل قرار گرفته در مرکز استوانه (شکل (۲)) با هدایت سیال به سمت جدار لوله و در نتیجه افزایش گرادیان و حداکثر سرعت، کاهش ضخامت لایه مرزی و نهایتاً افزایش در عدد Nu را به همراه خواهد داشت. افزایش ضخامت محیط متخلخل در این آرایش به عنوان عاملی برای افزایش مقدار شار حرارتی در فصل مشترک سیال - جامد گزارش شده است [۸-۱۰]. در مقایسه میزان انرژی انتقال یافته ضمن استفاده از آرایش مرکزی AISI 304^۱ در دو شرط مرزی دما و شار ثابت، مقادیر شار بالاتری برای شرط مرزی دما ثابت گزارش شده است [۱۱].

۱-۱-۲-۲ آرایش مرزی

در این آرایش، محیط متخلخل با قرار گرفتن در دیواره استوانه (شکل (۲)) سیال را به سمت محور استوانه هدایت و با کاهش سطح تماس، میزان حرارت تبادل یافته را کم می‌کند. در حالتی که نرخ هدایت حرارتی مؤثر محیط متخلخل به سیال پایه برابر ۱ (هدایت حرارتی پائین) باشد، محیط متخلخل مانند لایه عایق عمل می‌کند و عدد Nu کاهش خواهد یافت؛ به طوری که در تمام مقادیر بررسی شده برای هدایت حرارتی، مقدار حرارت تبادل یافته در این آرایش نسبت به آرایش‌های متخلخل دیگر کمتر گزارش شده است. بر این اساس افزایش میزان تراوایی^۲ (کاهش عدد دارسی) به دلیل فراهم کردن مسیر دسترسی سیال به دیواره، افزایش انتقال حرارت را به دنبال دارد [۱۳، ۱۲].

انتقال حرارت میزان انرژی تبادل یافته را افزایش می‌دهد [۱ و ۲]. روش جایگزین استفاده از پره، استفاده از محیط متخلخل است که توجه بسیاری از محققان را به خود جلب کرده است [۳-۵]. در این روش با وارد کردن مواد متخلخل در مسیر عبور سیال، علاوه بر افزایش سطح تبادل، تلاطم سیال نیز افزایش خواهد یافت [۶]. از سوی دیگر با توجه به چگالی سطحی بسیار بالاتر مواد متخلخل، سطح افزایش یافته در مقایسه با پره‌ها بسیار بیشتر است [۷]؛ لذا با توجه به اهمیت موضوع، در این مطالعه با هدف ارزیابی امکان استفاده از مواد متخلخل در کاربردهای صنعتی، ابتدا ضمن تعیین هندسه استوانه‌ای به عنوان رایج‌ترین هندسه استفاده‌شونده در تجهیزات صنعتی، نتایج پژوهش‌های پیشین در قالب عوامل مؤثر بر انتقال حرارت ارزیابی شده و نتایج هر یک گزارش شده است؛ سپس به منظور ارزیابی سناریوهای مختلف شاخص کارایی محیط متخلخل معرفی و در پایان چالش‌های پیش رو در صنعتی‌سازی کاربرد این مواد ارائه شد.

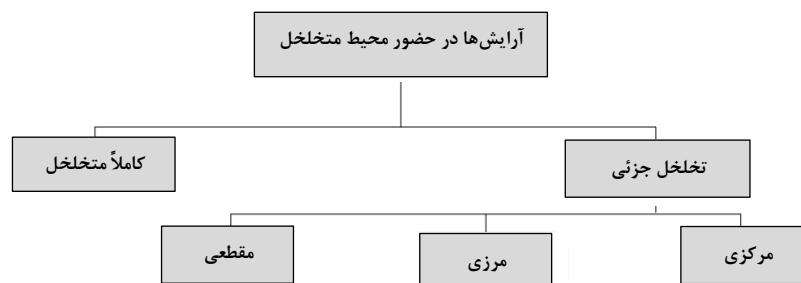
۲. عوامل مؤثر بر انتقال حرارت در هندسه استوانه‌ای متخلخل

۱-۲ آرایش محیط متخلخل

بر اساس مطالعات، آرایش‌ها در حضور محیط متخلخل مطابق طرحواره نمایش داده شده در شکل (۱) قابل دسته‌بندی هستند.

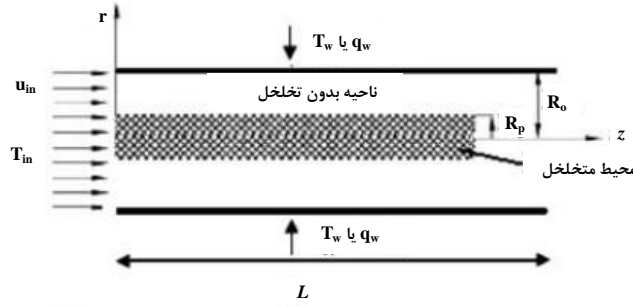
۱-۱-۲ آرایش‌های جزئی

آرایش جزئی در هندسه‌های متخلخل استوانه‌ای در سه دسته قابل بررسی است (شکل (۲)).

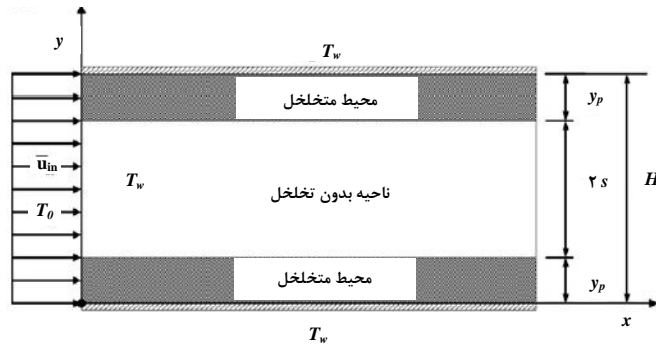


شکل ۱. آرایش‌های مختلف حضور محیط متخلخل در هندسه استوانه‌ای.

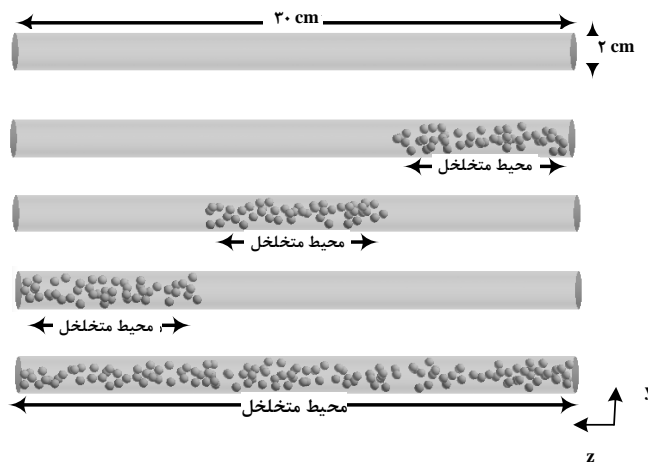
۱. گریدی از stainless steel که به صورت فومی متخلخل با گرادیان حفره‌ها در جهت‌های شعاعی و محوری استوانه استفاده شده است.



(الف)



(ب)

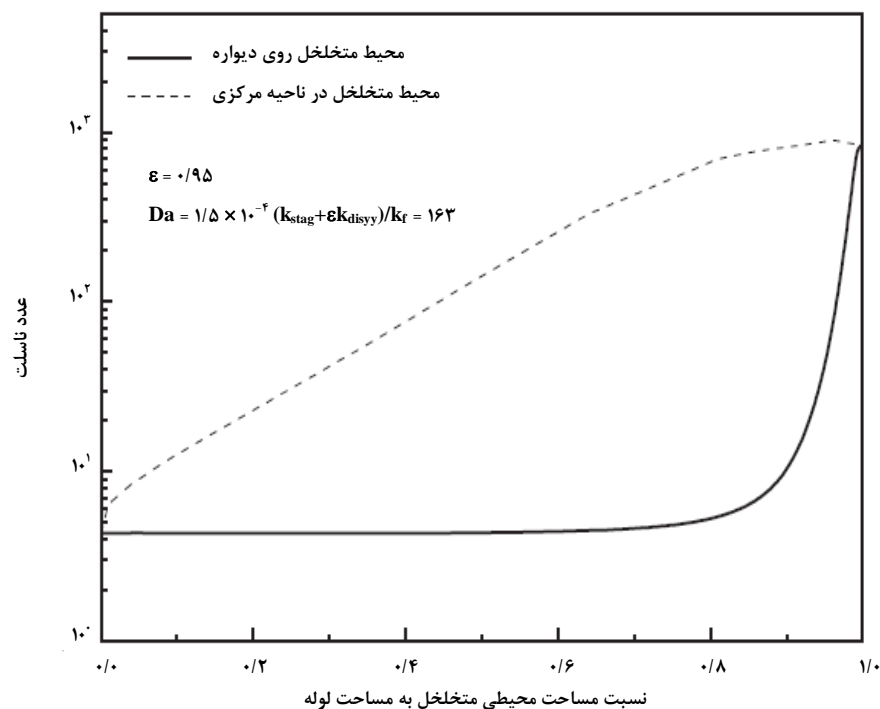


(پ)

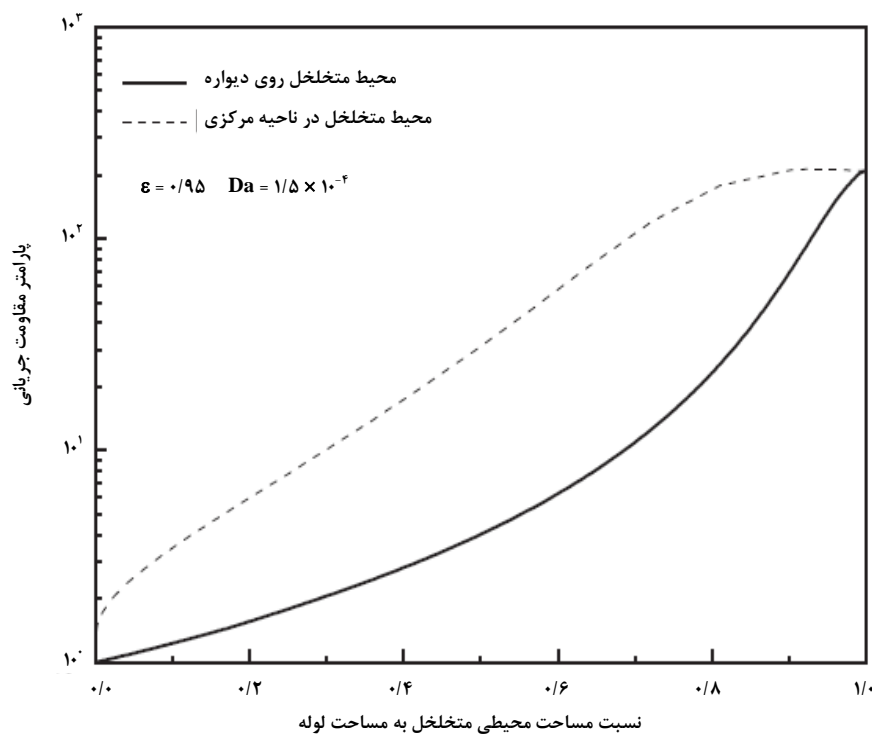
شکل ۲. آرایش (الف) مرکزی [۸]، (ب) مرزی [۱۲] و (پ) مقطعی محیط متخلخل در هندسه استوانه‌ای [۱۴].

شکل (۳)). در حالی که قرارگیری فوم فلزی با آرایش مرزی در لوله، ضمن هدایت جریان سیال به محور لوله موجب افزایش سرعت در این ناحیه می‌شود و در مجاورت خط محوری استوانه، لایه مرزی به بیش‌ترین ضخامت و کم‌ترین گرادیان دمایی خود می‌رسد، به همین عدد Nu در حضور آرایش مرکزی از مقادیر بالاتری نسبت به آرایش مرزی برخوردار است (شکل (۳)).

مقایسه عملکرد حرارتی و هیدرودینامیکی آرایش‌های مرزی و مرکزی فوم فلزی نشان داد که به ازای نیروی محرکه یکسان، لوله‌های با آرایش مرکزی نسبت به آرایش مرزی دارای عملکرد حرارتی و افت فشار بالاتری هستند [۱۵، ۱۲]. مطابق با شکل (۴)، استفاده از آرایش مرکزی ضمن هدایت جریان سیال به دیواره لوله و افزایش تلاطم در این ناحیه و با توجه به رشد لایه مرزی و بالابودن گرادیان دمایی در مجاورت دیواره، عدد Nu را افزایش خواهد داد

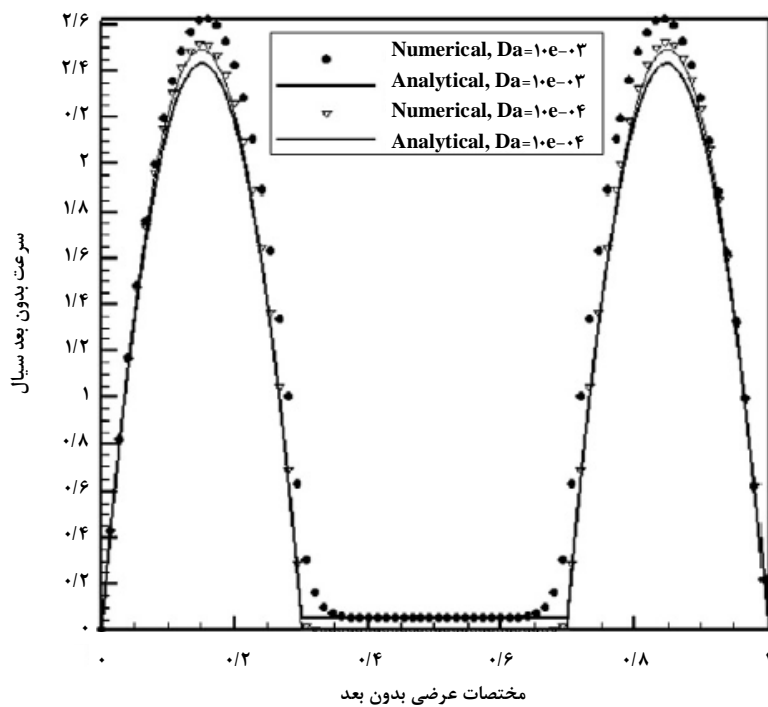


(الف)

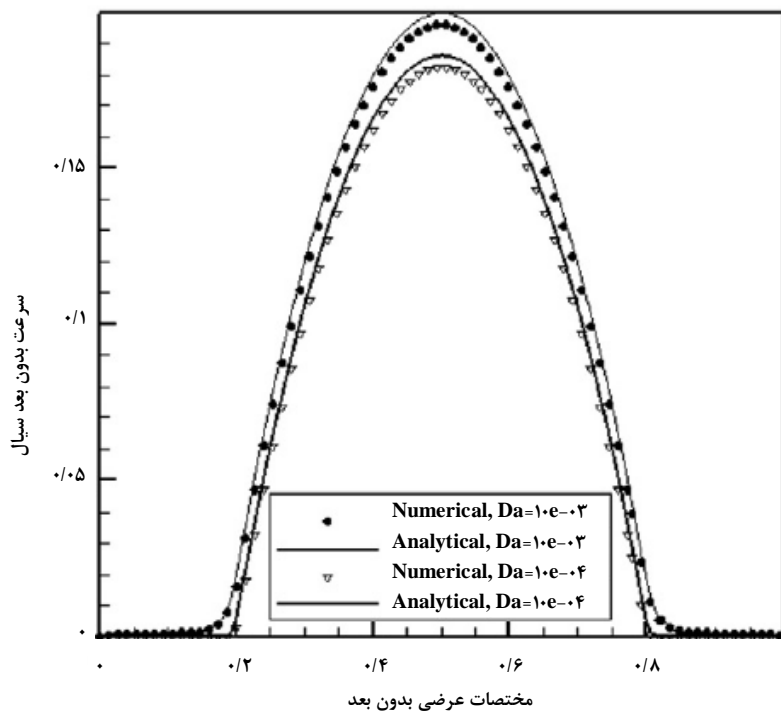


(ب)

شکل ۳. مقایسه اثر آرایش مرکزی و مرزی روی عدد Nu و (الف) عدد Nu و (ب) ضریب اصطکاک [۱۵].



(الف)



(ب)

شکل ۴. (الف) تغییرات سرعت بدون بعد محوری در جهت شعاعی (Y) برای مقادیر مختلفی از عدد دارسی در آرایش (الف) مرکزی و (ب) مرزی [۱۲].

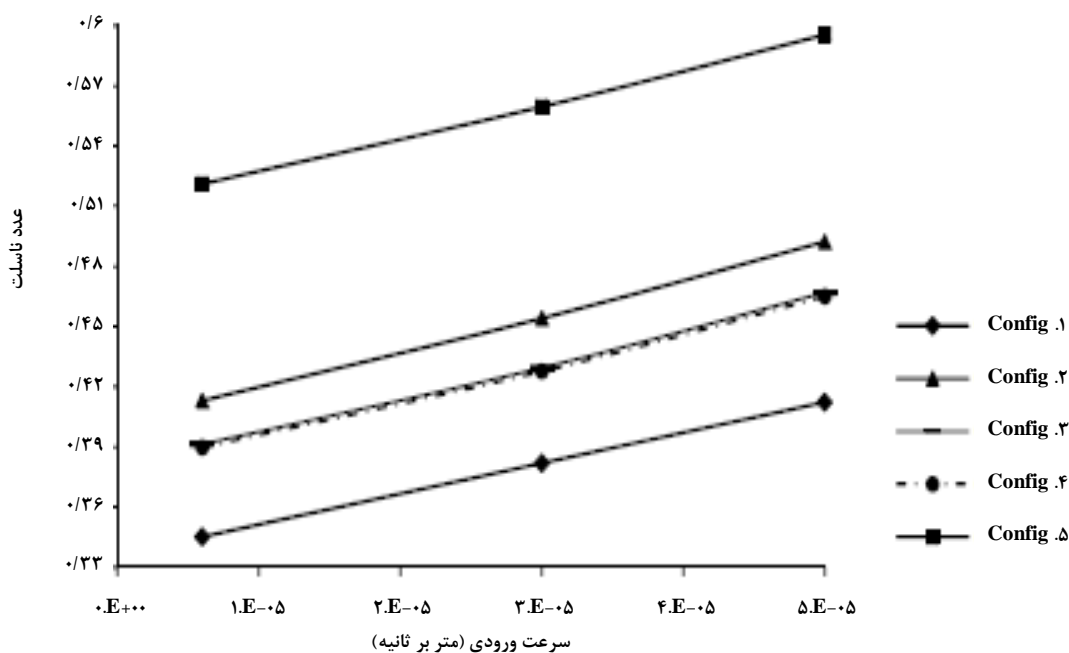
۲-۱-۳ آرایش مقطعی

این آرایش را نخستین بار محققان حاضر در میان آرایش‌های جزئی بررسی کردند (شکل (۲) - پ). در این روش با تقسیم طول استوانه به سه بخش مساوی، هر بار $1/3$ کل حجم آن از فوم آلومینیومی متخلخل پر می‌شود [۱۴، ۱۶]. بر اساس نتایج به‌دست آمده، آرایش $1/3$ ابتدایی بالاترین عملکرد حرارتی را از خود نشان می‌دهد (شکل (۵)). بر اساس طرحواره نشان داده شده در شکل (۶)، حضور فوم آلومینیومی در هندسه مقطعی $1/3$ ابتدایی در مقایسه با ۲ آرایش مقطعی دیگر، علاوه بر افزایش سرعت نانوسیال، طول در دسترس بیشتری برای تبادل انرژی در اختیار نانوسیال قرار داده که منجر به مقادیر بالاتری از عدد Nu می‌شود. مطابق با شکل (۷) در هندسه کاملاً متخلخل، در نواحی پیرامون حفره‌ها و دیواره استوانه، اثر شرط عدم لغزش و رشد لایه مرزی بر کاهش سرعت نانوسیال و همچنین اثر افزایشی آن به دلیل کاهش سطح عبور

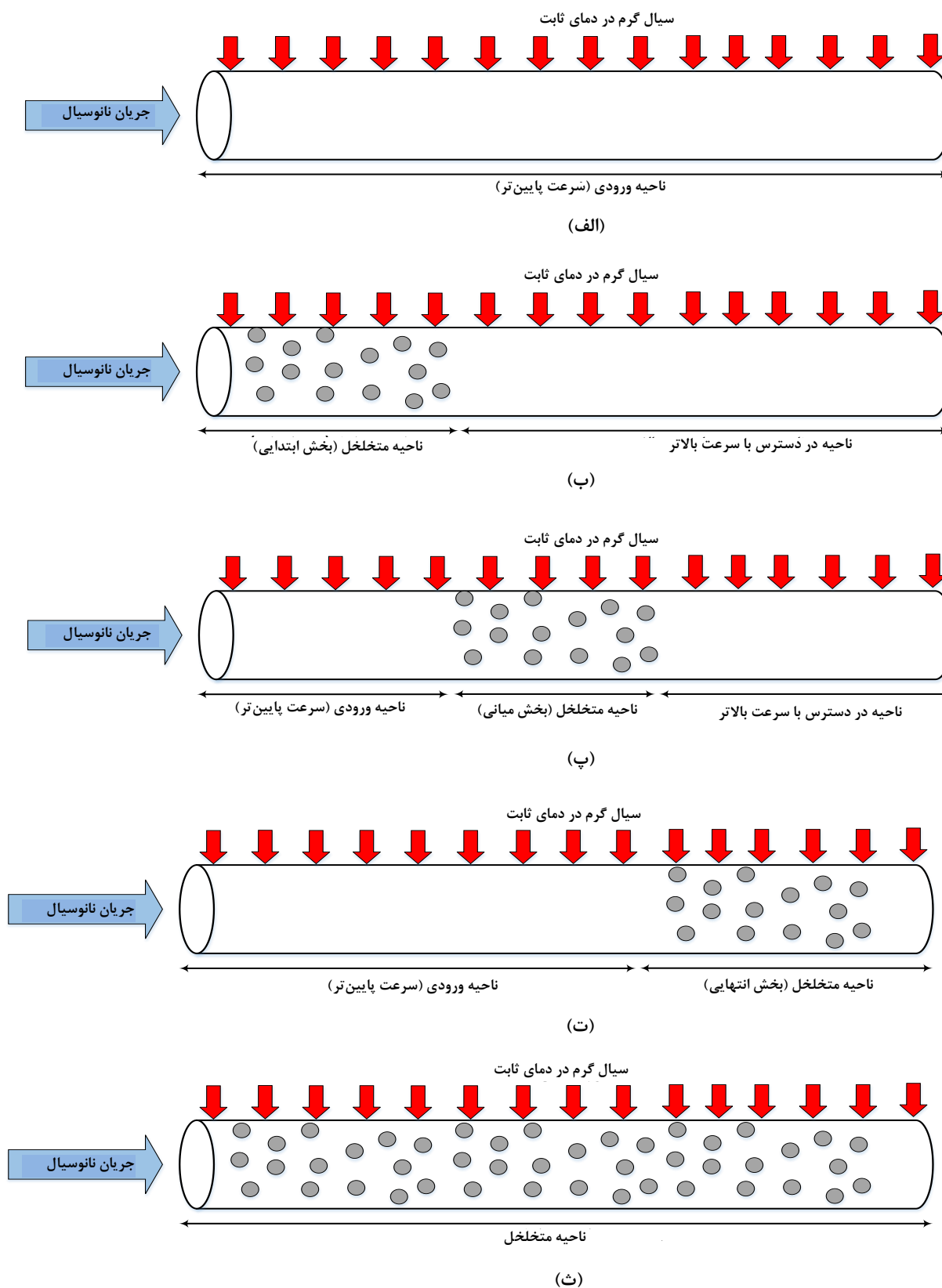
خطوط جریان در فضاهای خالی میان حفره‌ها، قابل مشاهده است.

۲-۱-۲ آرایش کاملاً متخلخل

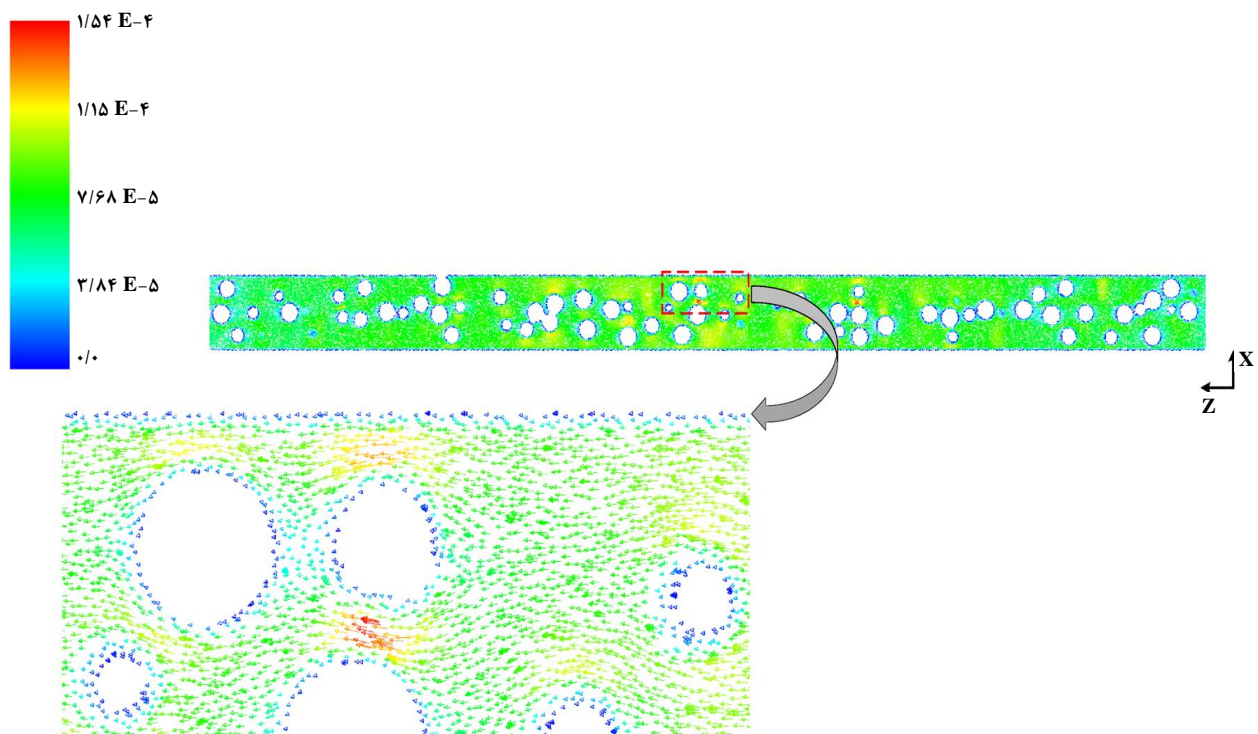
در این آرایش تمام حجم استوانه از ماده متخلخل پر می‌شود و سیال برای عبور از استوانه، از میان محیط متخلخل عبور می‌کند (شکل (۲)). در میان تمام آرایش‌های مطالعه‌شده، هندسه کاملاً متخلخل غالباً دارای بالاترین مقادیر بازدهی حرارتی و افت فشار بوده است. به‌طور کلی افزایش ضخامت محیط متخلخل با افزایش مقادیر سرعت و گرادیان آن در ناحیه بدون تخلخل، و همچنین مقدار سطح تبادل انتقال حرارت، موجب افزایش شار حرارتی تبادل یافته، خواهند شد [۸، ۱۴، ۱۷]. بر اساس نتایج گزارش شده در شکل (۸) افزایش عدد دارسی معادل با افزایش سطح در دسترس برای عبور سیال و کاهش سرعت (تلاطم) (شکل (۹)) و نهایتاً کاهش شار تبادل یافته خواهد بود.



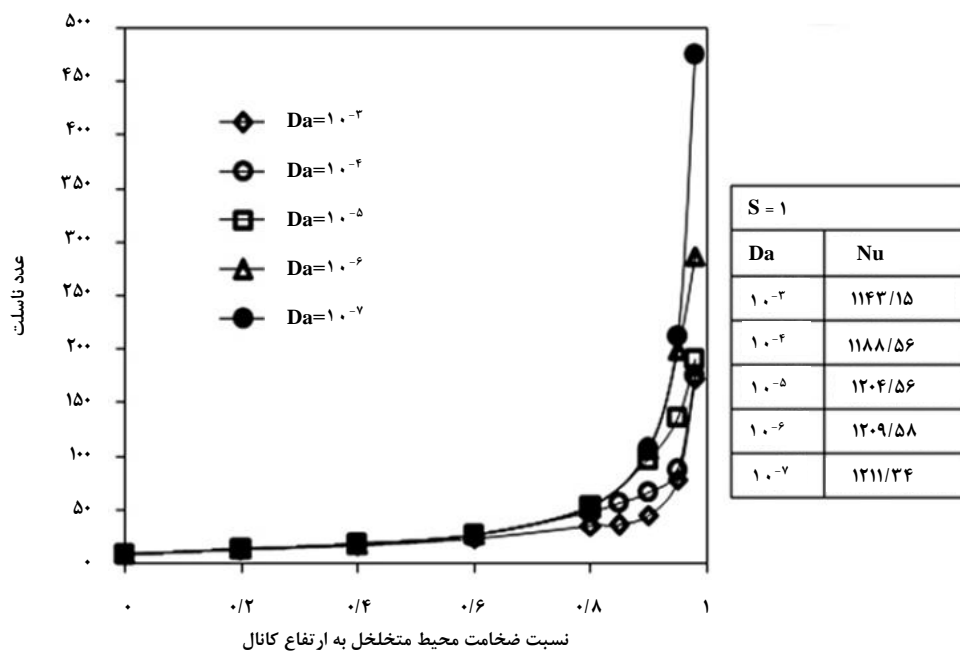
شکل ۵. تغییرات عدد Nu در نسبت به سرعت ورودی نانوسیال در آرایش‌های مختلف [۱۴].



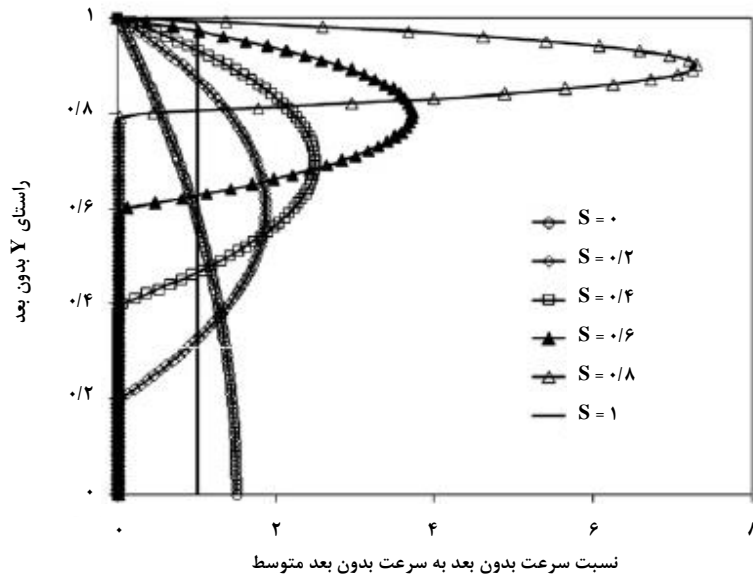
شکل ۶. مقایسه طول در دسترس سیال برای تبادل انتقال حرارت در هندسه‌های (الف) بدون تخلخل، (ب) $1/3$ ابتدایی، (پ) $1/3$ میانی، (ت) $1/3$ انتهایی (ث) کاملاً متخلخل [۱۴، ۱۶].



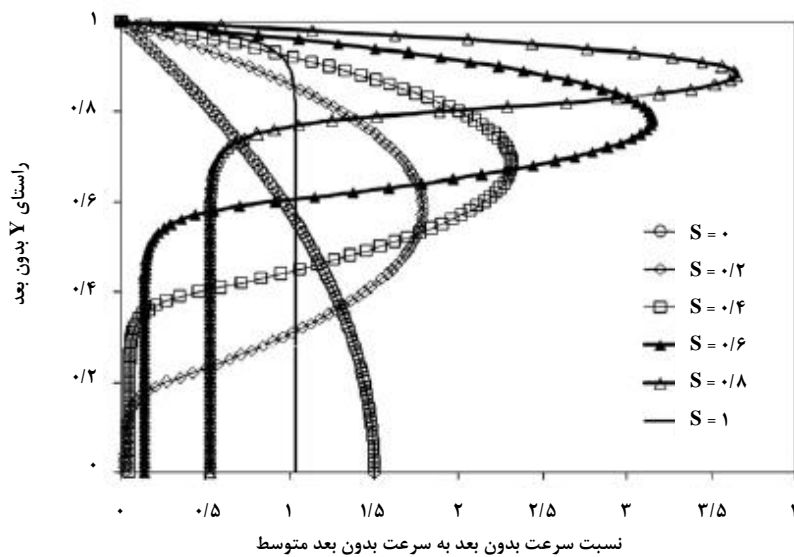
شکل ۷. بردارهای سرعت در آرایش کاملاً متخلخل [۱۴].



شکل ۸. تغییرات عدد ناسلت در مقادیر مختلف عدد دارسی در آرایش جزئی- مرکزی (S=۱ نشان دهنده محیط کاملاً متخلخل است) [۸].



(الف)



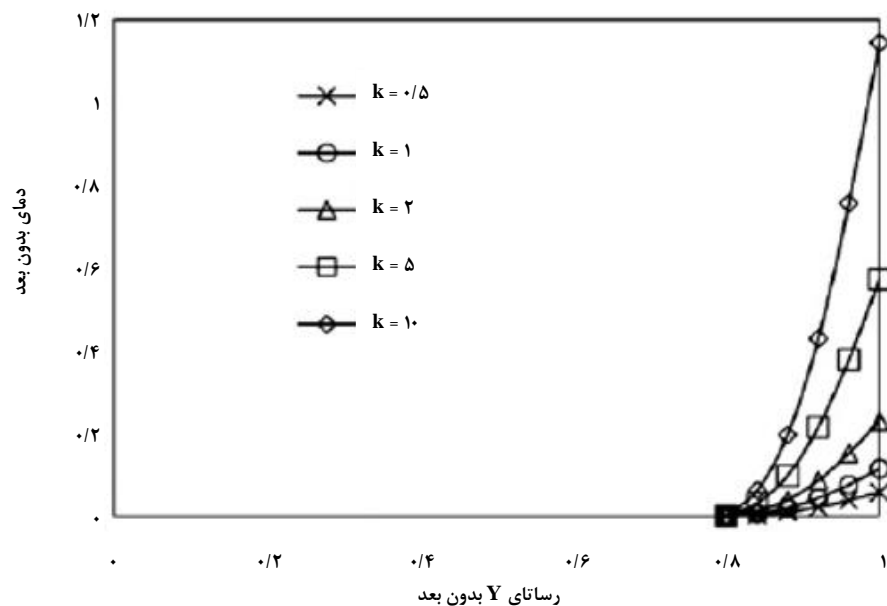
(ب)

شکل ۹. تغییرات سرعت بدون بعد در ضخامت‌های مختلف محیط متخلخل در راستای طول کانال و آرایش مرکزی برای (الف) $Da=10^{-3}$ و (ب) $Da=10^{-5}$ [۸].

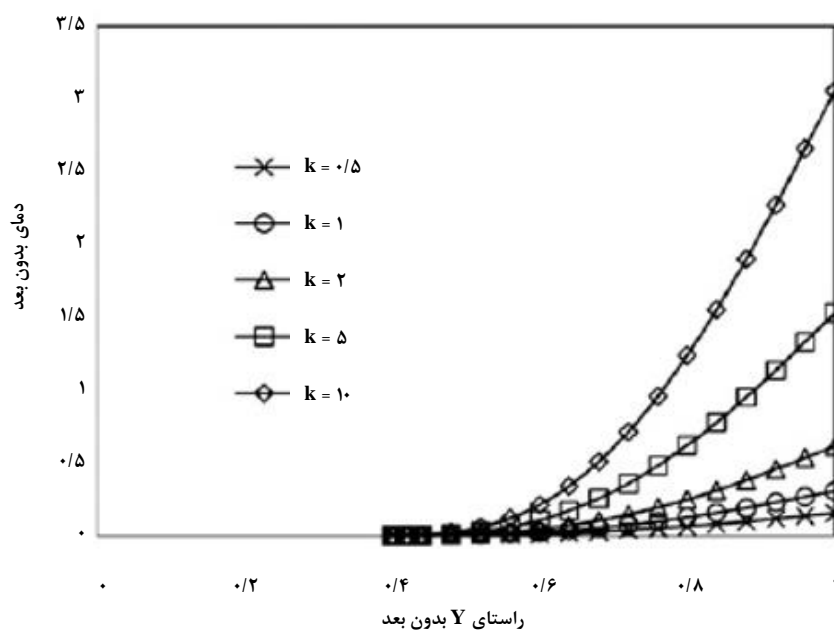
۲-۲ هدایت حرارتی محیط متخلخل

به سیال، دمای بدون بعد سیال افزایش خواهد یافت (شکل (۱۰)) [۸]. نتایج مشابهی را سایر پژوهشگران در خصوص اثر افزایش هدایت حرارتی محیط متخلخل بر میزان شار تبادل یافته گزارش کرده‌اند [۲۰-۱۷].

محمودی و معرفت در بررسی ضخامتی مشخص از محیط متخلخل با آرایش مرزی در مقادیر مختلفی از هدایت حرارتی، مشاهده کردند که با افزایش نرخ هدایت حرارتی مؤثر فاز جامد (محیط متخلخل)



(الف)



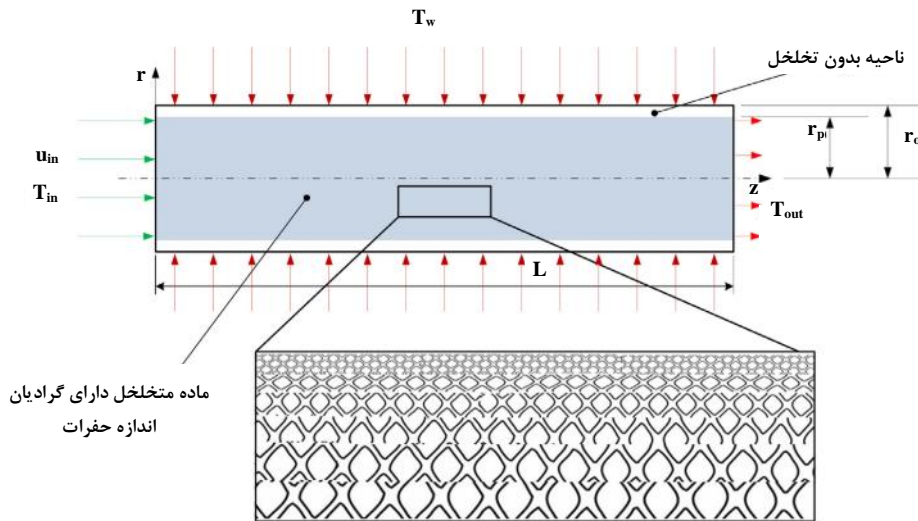
(ب)

شکل ۱۰. توزیع دمایی سیال در ناحیه بدون تخلخل در $Da=10^{-2}$ برای (الف) $S=0.4$ و (ب) $S=0.8$.

حفره‌ها در راستای جریان سیال اثری محدود بر میزان انتقال حرارت از خود نشان داده است؛ در حالی که حضور این گرادیان در جهت شعاعی و در هر دو آرایش تخلخل جزئی و کامل، افزایش قابل توجهی در عملکرد حرارتی به دنبال داشته است [۲۱].

۳-۲ گرادیان حفره‌های موجود در محیط متخلخل

ونگ و همکاران در پژوهشی به مطالعه عددی افزایش انتقال حرارت در لوله‌های پر شده با AISI 304 دارای گرادیان اندازه حفره‌ها پرداختند (شکل (۱۱)). بر اساس نتایج گزارش شده، گرادیان اندازه



شکل ۱۱. عبور هوا از هندسه متخلخل دارای گرادیان حفره‌ها با آرایش جزئی-مرکزی [۲۱].

معرفی شده که در پایان افزایش میزان انرژی تبادل یافته را به دنبال دارد. مطابق با شکل (۱۲) در صورتی که جریان سیال در شرایط یکسان وارد محیط‌های متخلخلی با درصد تخلخل ε_1 و ε_2 شود، به طوری که $\varepsilon_1 < \varepsilon_2$ باشد (کره‌های نمایش داده شده بیانگر نقاط اشغال شده و صلب در حجم استوانه هستند)، با فرض ثابت ماندن چگالی و صرف نظر از تغییرات آن، بر اساس پایستگی جرم با کاهش سطح مقطع، سرعت سیال در هندسه (ب) بیشتر از هندسه (الف) خواهد شد. افزایش سرعت سیال بر اساس رابطه ارگان^۳ (معادله (۱)) منجر به افزایش افت فشار سیال ضمن عبور از محیط متخلخل خواهد شد؛ بنا بر این افت فشار مشاهده شده در هندسه (ب) در مقایسه با هندسه (الف) بیشتر پیش‌بینی می‌شود. افت فشار در آرایش‌های جزئی-مرکزی/مقطعی و کاملاً متخلخل ناشی از دو منشأ اصطکاک در دیواره و نیروی‌های درگ داری و فورچمیر^۴ است. اما در آرایش جزئی-مرزی، به دلیل مجاورشدن محیط متخلخل با دیواره هندسه، تنها افت فشار ناشی از نیروهای درگ مشاهده می‌شود. به همین دلیل افت فشار در آرایش اخیر، کم‌تر از دیگر موارد است [۲۳].

$$\Delta P = \frac{150\mu L (1-\varepsilon)^2}{d_p^2 \varepsilon^3} u + \frac{1.75L\rho (1-\varepsilon)}{d_p \varepsilon^3} u^2 \quad (1)$$

3. Ergun Equation
4. Darcy and Forchheimer Drags

۲-۴ درصد تخلخل

محققان در بررسی اثر درصد تخلخل بر میزان انتقال حرارت به نتایج متفاوتی رسیده‌اند؛ به طوری که تعیین نقش تغییر درصد تخلخل در میزان انتقال حرارت نیازمند بررسی بیشتری است. نتایج پژوهش‌های پیشین در دو دیدگاه زیر قابل دسته‌بندی و ارائه هستند.

۲-۴-۱ بهبود انتقال حرارت با کاهش درصد تخلخل

نظری و همکاران [۲۲] به بررسی جریان سیال پاورلا^۱ و انتقال حرارت، در یک کانال پر شده با استفاده از شبیه‌سازی شبکه بولتزمن^۲ پرداختند؛ آنان با بررسی محدوده تخلخل ۰/۷۵ تا ۰/۹۴ اعلام کردند، با کاهش درصد تخلخل عدد Nu افزایش خواهد یافت. مادرا و همکاران [۱۷] در بررسی اثر درصد تخلخل بر انتقال حرارت، حضور محیط متخلخل در درصدهای ۳۰، ۴۰، ۵۰، ۶۰، ۷۰، ۸۰ و ۹۰ را مقایسه کردند و بر اساس نتایج به دست آورده، درصدهای تخلخل پایین‌تر را عاملی برای رسیدن به بازدهی حرارتی بالاتری معرفی کردند. هانگ و همکاران [۵] نیز افزایش درصد تخلخل را عاملی برای کاهش انتقال حرارت و افت فشار اعلام کردند. در این دیدگاه کاهش درصد تخلخل به عنوان عاملی برای افزایش سرعت سیال، افزایش تلاطم و کاهش ضخامت لایه مرزی

1. Power-Law
2. Lattice Boltzmann Simulation

کاهش می‌دهد؛ لذا برای رسیدن به بالاترین بازدهی حرارتی، لازم است مقادیر بهینه هر کدام از مؤلفه‌های بالا تعیین شوند.

۲-۵ میزان تراوایی و عدد دارسی

بر اساس مطالعات، به‌طور کلی کاهش تراوایی محیط متخلخل و در نتیجه کاهش عدد دارسی موجب هدایت سیال به ناحیه عاری از ماده متخلخل و افزایش حداکثر سرعت و گرادیان آن خواهد شد؛ اما اثر نهایی روی انتقال حرارت تابعی مستقیم از آرایش در نظر گرفته شده است. شکوهمند و همکاران اثر افزایش عدد دارسی را بر آرایش‌های مختلف مطالعه کردند که نتایج آن در جدول (۱) ارائه شده است.

جدول ۱. اثر افزایش عدد Da بر عدد Nu در آرایش‌های مختلف [۱۲].

توضیحات	اثر مشاهده شده روی عدد Nu	آرایش
جریان به سمت دیواره و انتقال حرارت بیشتر تمایل پیدا می‌کند.	افزایش	جزئی - مرزی
با کاهش در مقدار سرعت، اثر تشدید کننده آن کاهش می‌یابد.	کاهش	جزئی - مرکزی
	کاهش	کاملاً متخلخل

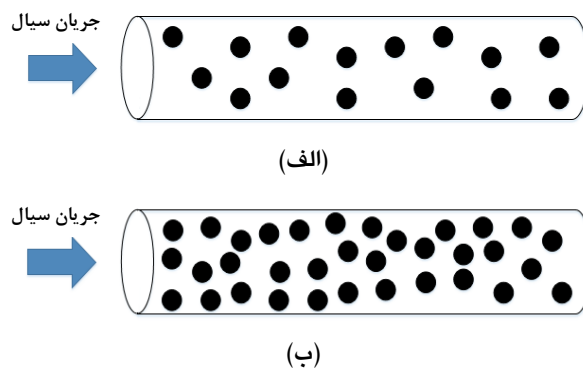
نتایج مشابهی را دیگر پژوهشگران در این باره گزارش کرده‌اند [۲۳، ۲۵، ۳۱].

۲-۶ ضخامت محیط متخلخل

اثر تغییر در ضخامت ماده متخلخل بر میزان انرژی تبادل یافته، تابعی از آرایش استفاده شده خواهد بود. در آرایش مرکزی افزایش ضخامت محیط متخلخل منجر به افزایش سرعت سیال در فضای میان محیط متخلخل و دیواره استوانه می‌شود، به طوری که افزایش انتقال حرارت را به دنبال دارد. این مشاهده می‌تواند نویدبخش استفاده در مبدل‌های حرارتی باشد [۲۳، ۲۵]. مطابق با شکل (۹) با افزایش ضخامت، سرعت بدون بعد تا رسیدن به ضخامت بحرانی افزایش می‌یابد. در این حالت به دلیل کم شدن سطح در دسترس،

در معادله (۱) ϵ و d_p ، μ ، u ، D ، L ، ρ ، p به ترتیب نشان‌دهنده فشار، چگالی، طول لوله، قطر لوله، سرعت ورودی، گرانروی، قطر حفره‌ها و تخلخل هستند [۲۴].

از سوی دیگر، با افزایش سرعت سیال ضمن نزدیک شدن به ناحیه درهم، شیب تغییرات دمایی در مجاورت سطح افزایش می‌یابد و با کاهش رشد لایه مرزی در نهایت عدد Nu افزایش خواهد یافت [۲۵، ۲۶].



شکل ۱۲. اثر درصد تخلخل بر میزان حرارت تبادل یافته.

۲-۴-۲ بهبود انتقال حرارت با افزایش درصد تخلخل

وؤ پرنگ و همکاران در بررسی انتقال حرارت ناپایا در یک لوله با مقطع مربع، افزایش درصد تخلخل را به ترتیب عاملی برای افزایش کاهش در انتقال حرارت و افت فشار معرفی کردند و افزایش عدد Re را عاملی تقویت کننده در افزایش انتقال حرارت دانستند [۲۱]. حق شناس فرد در الگوسازی انتقال حرارت کربن دی‌اکسید در فشارهای فوق بحرانی در لوله‌های عمودی متخلخل با درصدهای تخلخل ۴۰ و ۴۵، افزایش درصد تخلخل را موجب افزایش ضریب انتقال حرارت محلی اعلام کرد [۲۷]. نتایج مشابهی را دیگر پژوهشگران در این خصوص منتشر کرده‌اند [۲۸-۳۰، ۲۵]. افزایش انتقال حرارت در این دیدگاه به افزایش فضای در دسترس برای عبور سیال نسبت داده می‌شود.

در بررسی دو دیدگاه بالا می‌توان برای درصد تخلخل مقدار بهینه‌ای را تصور کرد که علاوه بر افزایش سرعت و تلاطم جریان، موجب کاهش شار جرمی عبوری نشود. افزایش سرعت و تلاطم سیال از یک جهت موجب افزایش ضریب انتقال حرارت می‌شود اما از جهت دیگر زمان ماند سیال^۱ در محیط متخلخل و فرصت تبادل حرارت را

1. Residence Time

متخلخل نیز از سوی محققین گزارش شده است [۳۰، ۵]. لازم به ذکر است که افزایش زیاد سرعت سیال به دلیل کاهش زمان ماند یا زمان تبادل انرژی، کاهش عدد ناسلت را به همراه دارد و اثر حضور محیط متخلخل را کم‌رنگ‌تر می‌کند [۳۴، ۵].

۲-۸ حضور چشمه حرارتی

ترابی و همکاران [۱۸] اثر حضور چشمه حرارتی را بر انتقال حرارت در دو حالت، درون سیال^۱ و درون محیط متخلخل مطالعه کردند. در هر دو حالت اختلاف دمای میان سیال و جامد قابل توجه و حساسیت انتقال حرارت نسبت به نرخ هدایت حرارتی مؤثر (خواص محیط متخلخل) کمتر اعلام شد؛ به عبارت دیگر مشابه اثر افزایش عدد رینولدز، با حضور چشمه حرارتی وابستگی میزان انرژی تبادل یافته به خواص حرارتی محیط متخلخل کاهش می‌یابد. در جدول (۲)، خلاصه‌ای از مطالعات در زمینه تأثیر محیط متخلخل بر انتقال حرارت ارائه شده است.

سیال تمایلی به عبور از فضای بدون تخلخل را ندارد و از داخل ماده متخلخل عبور می‌کند. بنا بر این آرایش حضور محیط متخلخل نیز بر روند اثرگذاری تغییرات ضخامت محیط متخلخل اثر گذار است و لازم است مد نظر قرار گیرد.

با توجه به اثرات ضخامت محیط متخلخل بر سرعت و گرادیان آن (شکل (۹)) و برای رسیدن به راهکاری با قابلیت اجرایی، لازم است در تعیین ضخامت بهینه رویکردی با به حداقل رساندن افت فشار جریان عبوری بررسی شود. در بخش ۳، شاخصی کمی، برای امکان‌سنجی اجرایی استفاده از محیط متخلخل معرفی خواهد شد.

۲-۷ سرعت سیال

در تمام آرایش‌های بررسی شده، نتایج بیان‌گر افزایش میزان حرارت تبادل یافته ضمن افزایش سرعت بوده‌اند. افزایش سرعت (عدد رینولدز)، معادل با افزایش مقدار کمی پدیده‌های انتقال به دلیل غالب شدن ترم‌های جابه‌جایی و افزوده شدن ترم نفوذ گردابه‌ای به معادلات نفوذ است [۳۳، ۳۲]. این اثر افزایشی در محیط‌های

جدول ۲. مروری بر مطالعات اثر حضور محیط متخلخل بر انتقال حرارت.

محققان	آرایش	ماده متخلخل	سیال	نتایج
هوانگ و همکاران [۵]	جزئی- مرکزی	مس	هوا	* افزایش درصد تخلخل منجر به کاهش عدد Nu و افت فشار شد. * در مقادیر بالاتر عدد Re اثر حضور ماده متخلخل کمتر شد. * مقادیر PEC حساب شده در جریان آرام نسبت به جریان درهم مناسب‌تر گزارش شد.
نجومی‌زاده و کریم‌پور [۶]	کاملاً متخلخل	---	نانوسیال	* در مقداری از عدد داریسی، با افزایش بیشتر، مقدار سرعت سیال نیز افزایش یافت. * کاهش درصد تخلخل موجب افزایش گرمای تبادل یافته شد. * نانوسیال بررسی شده: نانولوله‌های کربنی/روغن

۱. بیرون از ناحیه دارای تخلخل و در تماس مستقیم با سیال

(ادامه) جدول ۲. مروری بر مطالعات اثر حضور محیط متخلخل بر انتقال حرارت.

محققان	آرایش	ماده متخلخل	سیال	نتایج
محمودی و معرفت [۸]	جزئی - مرکزی کاملاً متخلخل	---	---	<p>* افزایش ضخامت محیط متخلخل تا مقدار بهینه، عاملی در افزایش سرعت گزارش شد؛ اما در مقادیر بیشتر از مقدار بهینه این روند معکوس اعلام شد.</p> <p>* افزایش هدایت حرارتی محیط متخلخل، افزایش انتقال حرارت را به دنبال داشت.</p> <p>* بالاترین عدد Nu در استفاده از آرایش کاملاً متخلخل گزارش شد.</p>
شکوهمند و همکاران [۱۲]	جزئی - مرکزی / مرزی	---	---	<p>* حداکثر و حداقل مقدار Nu به ترتیب برای آرایش‌های مرکزی و مرزی گزارش شد.</p> <p>* افزایش عدد Da در آرایش‌های مرکزی و مرزی به ترتیب موجب کاهش و افزایش عدد Nu شد.</p> <p>* در آرایش کاملاً متخلخل، افزایش عدد Da کاهش عدد Nu را به همراه داشت.</p>
علی حسینی و همکاران [۲۸]	کاملاً متخلخل	آلومینیوم	نانوسیال	<p>* با افزایش درصد تخلخل، افزایش در مقدار عدد Nu گزارش شد.</p> <p>* نانوسیال بررسی شده: TiO_2 / آب</p>
تحقیق حاضر	جزئی - مقطعی کاملاً متخلخل	آلومینیوم	نانوسیال	<p>* بالاترین عدد Nu در استفاده از آرایش کاملاً متخلخل گزارش شد.</p> <p>* بیشترین انتقال حرارت در میان آرایش‌های جزئی استفاده شده، برای آرایش $1/3$ ابتدایی گزارش شد.</p> <p>* نانوسیال بررسی شده: Al_2O_3 / آب</p>
ترابی [۱۸]	جزئی - مرزی	---	---	<p>* در شرایط یکسان، افزایش ضخامت محیط متخلخل همواره اثری مثبت نداشت و تعیین مقدار بهینه برای بهبود انتقال حرارت ضروری گزارش شد.</p> <p>* افزایش درصد تخلخل، کاهش نرخ هدایت حرارتی و عدد Da، موجب افزایش حداکثر اختلاف دمایی قابل دستیابی میان سیال و کانال اعلام شد.</p>
ونگ و همکاران [۲۱]	جزئی - مرکزی کاملاً متخلخل	AISI 304	هوا	<p>* اثر گرادین تخلخل (اندازه حفره‌ها) روی انتقال حرارت در آرایش‌های جزئی و کاملاً متخلخل، در جهت‌های شعاعی و محوری به ترتیب قابل توجه و محدود گزارش شد.</p> <p>* با حضور محیط متخلخل، افزایش در مقادیر افت فشار و عدد Nu گزارش شد.</p>
تیرانداز و همکاران [۳۵]	کاملاً متخلخل	---	---	<p>* با افزایش توان دوم انحنای هندسه و نرخ شعاع داخلی به بیرونی پوسته استوانه‌ای، مقدار عدد Nu به ترتیب افزایش و کاهش خواهد یافت.</p>

۳. شاخص کارایی محیط متخلخل

پژوهشگران با تعریف شاخص‌هایی ضمن در نظر گرفتن اثر منفی افزایش افت فشار، اجرایی بودن استفاده از محیط متخلخل را ارزیابی کرده‌اند. بر این اساس PEC^۱ به‌عنوان معیاری برای ارزیابی بسترها و آرایش‌های مختلف محیط متخلخل مطابق با رابطه (۲) تعریف شد [۳۶، ۳۷، ۲۳]:

$$PEC = \frac{Nu/Nu_c}{\left(\frac{f}{f_c}\right)^{1/3}} \quad (2)$$

در رابطه (۲)، زیرنویس c بیانگر لوله خالی است؛ بالاتر بودن PEC برای یک سامانه به معنای عملی و به‌صرفه‌تر بودن آن است و به نوعی نسبت افزایش مفید را (انتقال و بازده انرژی) به افزایش ناخواسته (افزایش توان مورد نیاز برای انتقال) بیان می‌کند. هر اندازه مقدار شاخص عملکرد برای یک محیط متخلخل بیشتر باشد، استفاده از آن قابلیت اجرایی بالاتری خواهد داشت؛ به طوری که PEC=1 به‌عنوان حداقل مقدار قابل قبول برای استفاده از یک ماده متخلخل، برای افزایش انتقال حرارت معرفی شده است [۵]. با توجه به نقص رابطه فوق، لازم است سایر مقاومت‌های حرارتی نیز در آن لحاظ شود.

۴. چالش‌ها

توانایی محیط متخلخل در افزایش تلاطم سیال و سطح تبادل انرژی، می‌تواند زمینه‌ساز استفاده صنعتی از مواد متخلخل در زمینه بهبود انتقال حرارت شود؛ اما در کنار برتری‌های استفاده از این مواد کاستی‌هایی نیز وجود دارد که مهم‌ترین آن‌ها عبارت‌اند از:

- افت فشار: حضور ماده متخلخل در محیط انتقال حرارت با افزایش افت فشار سیال همراه است. تأمین فشار لازم برای انتقال سیال نیازمند استفاده از تجهیزات با توان بالاتر است. افزایش توان عملیاتی تجهیزات علاوه بر افزایش هزینه‌های اولیه، هزینه‌های عملیاتی آن‌ها را بالا خواهد برد. در مواردی که هدف استفاده از مواد متخلخل، به کارگیری در سامانه‌های فرایندی فعال^۲ باشد، ممکن است به‌دلیل تغییر در مقادیر هد

مورد نیاز، تغییر در نوع و طراحی مجدد آن‌ها لازم شود.

- مشکلات فرایندی: بیشترین ظرفیت کاربرد مواد متخلخل در زمینه افزایش انتقال حرارت در مقیاس صنعتی، استفاده در مبدل‌های حرارتی است. متداول‌ترین مشکل بهره‌برداری از این تجهیزات، تشکیل رسوب^۳ در مبدل است. تشکیل رسوب سیال عملیاتی در بستر متخلخل، می‌تواند اصطلاحاً با تشکیل نقاط مرده^۴ و به تله‌انداختن سیال، میزان تبادل انرژی را کاهش دهد. بهره‌برداری از این تجهیزات حساسیت بیشتری در مقایسه با تجهیزات متداول خواهد داشت؛ به طوری که پیش‌بینی می‌شود دوره‌های سرویس آن‌ها کوتاه‌تر باشد.

- افزایش هزینه‌های طراحی و ساخت تجهیزات تبادل انرژی: حضور مواد متخلخل در تجهیزات معمول انتقال حرارت، موجب افزایش پیچیدگی‌های طراحی و در نهایت هزینه‌های ساخت آن‌ها خواهد شد.

۵. نتیجه‌گیری کلی

در این مطالعه ضمن بررسی مهم‌ترین مؤلفه‌های مؤثر بر انتقال حرارت در حضور محیط متخلخل و اثرات متقابل آن‌ها بر یکدیگر، شاخصی برای بررسی و سنجش ظرفیت عملیاتی استفاده از این مواد در مقیاس صنعتی ارائه شد. بر اساس نتایج گزارش شده در این مطالعه، با توجه به افزایش سطح در دسترس برای انتقال حرارت ضمن استفاده از مواد متخلخل، پیش‌بینی می‌شود که ابعاد نسل بعدی مبدل‌ها و تجهیزات مجهز به این مواد، به مراتب کوچک‌تر و دارای بازدهی حرارتی به مراتب بالاتری باشند. به منظور رسیدن به بالاترین بازدهی لازم است تا خواص و عوامل اثرگذار در انتقال حرارت در حضور این مواد مورد توجه قرار گیرند. توجه به اثرات تغییر در متغیرهای مؤثر بر انتقال حرارت و اثر غیرمستقیم آن‌ها بر سرعت، تعریف ضخامت بهینه و انتخاب آرایش مناسب، مهم‌ترین مواردی هستند که برای رسیدن به بالاترین بازدهی حرارتی می‌توان بر آن‌ها تأکید کرد؛ به‌عنوان مثال وارد کردن یک ماده متخلخل در آرایش‌های جزئی-مرکزی و جزئی-مرزی اثری کاملاً متضاد خواهد داشت. شرایط عملیاتی و دینامیکی سیال نیز می‌تواند بر نتیجه عملکرد حرارتی مؤثر باشد.

3. Fouling
4. Dead Point

1. Performance Evaluation Criteria (PEC)
2. In Service Process Unit

- exchangers fitted with porous media. Part I: constant wall temperature", *International Journal of Thermal Sciences* 42: pp. 385-395, (2003).
- [11] Mahmoudi, Y., Karimi, N., "Numerical investigation of heat transfer enhancement in a pipe partially filled with a porous material under local thermal non-equilibrium condition", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 68: pp. 161-173, (2014).
- [12] Shokouhmand, H., Jam, F., Salimpour, M., "The effect of porous insert position on the enhanced heat transfer in partially filled channels", *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 38: pp. 1162-1167, (2011).
- [13] Kaya, A., "Effects of buoyancy and conjugate heat transfer on non-Darcy mixed convection about a vertical slender hollow cylinder embedded in a porous medium with high porosity", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 54: pp. 818-825, (2011).
- [14] Alihosseini, S., Jafari, A., "The effect of porous medium configuration on nanofluid heat transfer", *Applied Nanoscience*: pp. 1-12, (2019).
- [15] Yang, C., Nakayama, A., Liu, W., "Heat transfer performance assessment for forced convection in a tube partially filled with a porous medium", *International Journal of Thermal Sciences*, 54: pp. 98-108, (2012).
- [16] Alihosseini, S., "Investigation of Nanoparticle's Effect on Heat Transfer in Porous Foam Using CFD", *Tarbiat Modares University*, (2016).
- [17] Aguilar-Madera, C. G., Valdés-Parada, F. J., Goyeau, B., Ochoa-Tapia, J. A., "Convective heat transfer in a channel partially filled with a porous medium", *International Journal of Thermal Sciences*, 50: pp. 1355-1368, (2011).
- [18] Torabi, M., Karimi, N., Zhang, K., "Heat transfer and second law analyses of forced convection in a channel partially filled by porous media and featuring internal heat sources", *Energy*, 93: pp. 106-127, (2015).
- [19] Dehghan, M., Valipour, M. S., Saedodin, S., Mahmoudi, Y., "Thermally developing flow inside a porous-filled channel in the presence of internal heat generation under local thermal non-equilibrium condition: a perturbation analysis", *Applied Thermal Engineering*, 98: pp. 827-834, (2016).
- [20] Cheng, C. -Y., "A boundary layer analysis of heat transfer by free convection from permeable horizontal cylinders of elliptic cross-section in porous media using a thermal non-equilibrium model", *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 34: pp. 613-622, (2007).
- [21] Wang, B., Hong, Y., Hou, X., Xu, Z., Wang, P., Fang, X., Ruan, X., "Numerical configuration design and investigation of heat transfer enhancement in pipes filled with gradient porous materials", *Energy Conversion and Management*, 105: pp. 206-215, (2015).
- با توجه به انبوه مؤلفه‌های مؤثر در انتقال حرارت در حضور مواد متخلخل و همچنین اثرات متقابل آن‌ها، ارائه و تحلیل الگوهای مؤلفه‌ای برای تبیین بیشتر امکان استفاده از تجهیزات صنعتی منضم به این دسته از مواد، می‌تواند به‌عنوان موضوعی برای مطالعات آینده مد نظر قرار گیرد.

مراجع

- [1] Flynn, A. M., Akashige, T., Theodore, L., "Kern's Process Heat Transfer", John Wiley & Sons, New York, 2nd. Edition, pp. 1-84, (2019).
- [2] Cao, E., "Heat transfer in process engineering", McGraw-Hill, New York, 1st. Edition, pp. 79-250, (2010).
- [3] Al-Sumaily, G. F., Sheridan, J., Thompson, M. C., "Analysis of forced convection heat transfer from a circular cylinder embedded in a porous medium", *International journal of thermal sciences*, 51: pp. 121-131, (2012).
- [4] Al-Salem, K., Oztop, H. F., Kiwan, S., "Effects of porosity and thickness of porous sheets on heat transfer enhancement in a cross flow over heated cylinder", *International communications in heat and mass transfer*, 38: pp. 1279-1282, (2011).
- [5] Huang, Z., Nakayama, A., Yang, K., Yang, C., Liu, W., "Enhancing heat transfer in the core flow by using porous medium insert in a tube", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 53: pp. 1164-1174, (2010).
- [6] Nojoomizadeh, M., Karimipour, A., "The effects of porosity and permeability on fluid flow and heat transfer of multi walled carbon nano-tubes suspended in oil (MWCNT/Oil nano-fluid) in a microchannel filled with a porous medium", *Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures*, 84: pp. 423-433, (2016).
- [7] Xu, H. J., Xing, Z. B., Wang, F., Cheng, Z., "Review on heat conduction, heat convection, thermal radiation and phase change heat transfer of nanofluids in porous media: Fundamentals and applications", *Chemical Engineering Science*, 195: pp. 462-483, (2019).
- [8] Mahmoudi, Y., Maerefat, M., "Analytical investigation of heat transfer enhancement in a channel partially filled with a porous material under local thermal non-equilibrium condition", *International Journal of Thermal Sciences*, 50: pp. 2386-2401, (2011).
- [9] Maerefat, M., Mahmoudi, S. Y., Mazaheri, K., "Numerical simulation of forced convection enhancement in a pipe by porous inserts", *Heat Transfer Engineering*, 32: pp. 45-56, (2011).
- [10] Mohamad, A. A., "Heat transfer enhancement in heat

- [22] Nazari, M., Mohebbi, R., Kayhani, M., "Power-law fluid flow and heat transfer in a channel with a built-in porous square cylinder: Lattice Boltzmann simulation", *Journal of non-Newtonian fluid mechanics*, 204: pp. 38-49, (2014).
- [23] Nimvari, M. E., Maerefat, M., El-Hossaini, M., "Numerical simulation of turbulent flow and heat transfer in a channel partially filled with a porous media", *International Journal of Thermal Sciences*, 60: pp. 131-141, (2012).
- [24] Nield, D. A., Bejan, A., "Convection in porous media", Springer, New York, 4th. Edition, p. 11, (2013).
- [25] Rong, F., Zhang, W., Shi, B., Guo, Z., "Numerical study of heat transfer enhancement in a pipe filled with porous media by axisymmetric TLB model based on GPU", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 70: pp. 1040-1049, (2014).
- [26] Hines, A. L., Maddox, R. N., "Mass transfer: fundamentals and applications", Prentice-Hall Englewood-Cliffs, New Jersey, 1st. Edition, pp. 145-169, (1985).
- [27] Fard, M. H., "CFD modeling of heat transfer of CO₂ at supercritical pressures flowing vertically in porous tubes", *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 37: pp. 98-102, (2010).
- [28] Alihosseini, S., Jafari, A., Haghtalab, A., "Investigation of TiO₂/water nanofluid heat transfer inside a cylinder filled with Aluminium foam with different porosities using CFD", In *Proceedings of the National Conference in Knowledge and Technology Mechanical and Electrical Engineering Iran (Tehran, 2016)*.
- [29] Perng, S. -W., Wu, H. -W., Wang, R. -H., Jue, T. -C., "Unsteady convection heat transfer for a porous square cylinder varying cylinder-to-channel height ratio", *International journal of thermal sciences*, 50: pp. 2006-2015, (2011).
- [30] Wu, H. -W., Wang, R. -H., "Convective heat transfer over a heated square porous cylinder in a channel", *International journal of heat and mass transfer*, 53: pp. 1927-1937, (2010).
- [31] Dehghan, M., Valipour, M. S., Saedodin, S., "Microchannels enhanced by porous materials: heat transfer enhancement or pressure drop increment?", *Energy Conversion and Management*, 110: pp. 22-32, (2016).
- [32] White, F. M., "Fluid Mechanics", McGraw-Hill, New York, 7th. Edition, pp. 364-367, (2011)
- [33] Streeter, V. L., "Fluid Mechanics", McGraw-Hill, Tokyo, 3rd. Edition, pp. 189-196, (1962).
- [34] Akansu, S. O., "Heat transfers and pressure drops for porous-ring turbulators in a circular pipe", *Applied Energy*, 83: pp. 280-298, (2006).
- [35] Tirandaz, N., Dehghan, M., Valipour, M. S., "Heat and fluid flow through a helical annulus enhanced by a porous material: A perturbation study", *Applied Thermal Engineering*, 112: pp. 1566-1574, (2017).
- [36] Zheng, Z. -J., Li, M. -J., He, Y. -L., "Optimization of porous insert configuration in a central receiver tube for heat transfer enhancement", *Energy Procedia*, 75: pp. 502-507, (2015).
- [37] Mehrali, M., Sadeghinezhad, E., Rosen, M. A., Akhiani, A. R., Latibari, S. T., Mehrali, M., Metselaar, H. S. C., "Heat transfer and entropy generation for laminar forced convection flow of graphene nanoplatelets nanofluids in a horizontal tube", *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 66: pp. 23-31, (2015).