

مدل سازی تأثیر تخلخل در کویل حرارتی خورشیدی پر شده با نانوسیال آب و Al_2O_3

مجتبی رضاپور^۱، سید ابوذر فنایی^{۲*}

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران

m.rezapour6624@birjand.ac.ir

^۲ استادیار دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران

sab.famech@birjand.ac.ir

چکیده: در این مطالعه به تجزیه و تحلیل جریان نانوسیال آلومینا با درصد حجمی های ۲ و ۴، در کویل غیرمتخلخل و متخلخل حرارتی تحت شار حرارتی خورشیدی ارائه شده است. همچنین بررسی جامع ماهیت لایه های مرزی، توزیع سرعت و فشار و اثرات حرارتی درون محیط متخلخل فلزی مورد بحث و بررسی قرار گرفته است. برای حل مسئله حاضر معادلات پیوستگی، مومنتوم و انرژی برای نانوسیال درون کویل های استفاده شده است. مقایسه بین نتایج عدد ناسلت متوسط در مدل حاضر و داده های آزمایشگاهی برای کویل بدون تخلخل تطابق قابل قبولی با حداکثر خطای ۱۰/۵٪ را نشان می دهد. با افزایش درصد حجمی نانوسیال در کویل متخلخل افت فشار نیز افزایش یافته به طوری که بیشترین میزان افت فشار مربوط به نانوسیال ۴٪ با مقدار ۴/۴ بار می باشد. با افزایش درصد حجمی نانوسیال میزان ضریب انتقال حرارت جابه جایی و عدد ناسلت بیشتر خواهد شد و در نتیجه، انتقال حرارت در کویل حرارتی متخلخل افزایش پیدا خواهد کرد.

واژه های کلیدی: نانوسیال، عدد ناسلت، تخلخل، ضریب انتقال حرارت جابه جایی، مدل داری.

۱. مقدمه

حرارت جابه‌جایی در اعداد رینولدز مختلف ۵۰۰ تا ۲۵۰۰ برای مکان‌های محوری مختلف لوله مورد بررسی قرار گرفت. در مرجع [۶]، مطالعه کاربردهای انواع نانوسیال، و همچنین به سازوکارهای موجود برای محاسبه هدایت گرمایی و انتقال حرارت در نانوسیال‌ها صورت گرفته است. علاوه بر آن نیز در این بررسی، روابطی برای محاسبه ویسکوزیته نانوسیال و چگالی آن، با توجه به سیال پایه و نانو ذرات ارائه شده است. همچنین روش‌های مختلفی برای محاسبه ضریب انتقال حرارت هدایتی نانوسیال به دست آوردند. در مرجع [۷]، به بررسی عددی انتقال گرما نانوسیال آلومینیا در یک کانال مثلثی تحت شرایط دمای دیواره ثابت، نیز پرداخته شده است. در این کار، مقایسه بین نانوسیال و انتقال گرمای مایع خالص به دست آمده است. نتایج عددی نشان‌دهنده افزایش انتقال حرارت مایع همراه با تغییر در تعلیق ذرات نانومتری در کانال مثلثی است. آن‌ها دریافتند با افزایش کسر حجمی نانوذرات و کاهش قطر، عدد ناسلت نیز افزایش می‌یابد. در مرجع [۸]، در یک کار آزمایشگاهی به بررسی نانوسیال با نانوذرات آلومینیوم‌اکسید و مقایسه آن با آب‌های بدون یونیزه که در رژیم جریان آرام درون لوله مسی قرار دارد، پرداخته شده است. مطالعه آن‌ها افزایش دما در ناحیه ورودی لوله را در پی داشت و نیز بالاتر از آن صرفاً به دلیل افزایش هدایت حرارتی بود. در مرجع [۹]، افزایش همزمان انتقال حرارت به وسیله ترکیب اثر هندسی در کویل‌ها با جریان نانوسیال بررسی شده است. آن‌ها رفتار جریان و عملکرد انتقال حرارت سوسپانسیون‌های نانوسیال را در حالات مختلف لوله‌های مربع حلقه‌ای، مارپیچ مخروطی، مارپیچ دایروی تخت و مارپیچ اسپیرال، مورد بررسی و مقایسه با جریان آب در لوله مستقیم قرار دادند. نتایج نشان می‌دهد که افزودن مقادیر کوچک نانوذرات به یک درصد، باعث بهبود عملکرد انتقال حرارت در تمامی هندسه‌ها می‌شود. در مرجع [۱۰]، به تجزیه و تحلیل تجربی افزایش انتقال حرارت جابه‌جایی نانوسیال طلا - آب در جریان آرام تحت شرایط شار گرما ثابت پرداخته شده است. نتایج نشان داد که افزایش ضریب انتقال حرارت تا ۸، ۱۵ و ۲۳٪ به ترتیب با ۰/۰۰۰۱۵، ۰/۰۰۰۴۵ و ۰/۰۰۰۶۶۷ کسر حجمی نانو ذرات حاصل می‌شود در حالی که ضریب انتقال حرارت و عدد ناسلت نیز با افزایش غلظت افزایش می‌یابد. آن‌ها دریافتند که عوامل افزایش گرما ممکن است مانند حرکت ذرات، هدایت حرارتی بالا و نیز افزایش طول ورودی حرارتی باشد که مورد بحث قرار دادند. از کاربردهای مهم جریان نانوسیال می‌توان به استفاده در سیستم‌های فتوولتائیک حرارتی اشاره کرد. هوسام و همکاران اثر نانوذرات

نانوسیال‌ها سیالات تک‌فازی هستند که کاربردهای فراوانی دارند. تاکنون مطالعات زیادی در زمینه جریان سیال صورت گرفته است، اما جریان نانوسیال‌ها در دهه اخیر با توجه به تأثیرگذاری در افزایش انتقال حرارت، مورد توجه خاصی قرار گرفته‌اند [۱]. در مرجع [۲]، به تجزیه و تحلیل انتقال حرارت و جریان نانوسیال در میکروکانال‌هایی با تیغه‌های استوانه‌ای، مستطیلی و مثلثی همراه با شار ثابت در دیواره‌ها پرداخته شده است. مدل‌سازی در این مرجع برای جریان آرام با رینولدزهای ۱، ۵۰ و ۱۰۰ و درصد حجمی^۱ نانوسیال صفر، دو و چهار درصد انجام شد. نتایج این کار نشان داد که افزایش کسر حجمی نانوذرات جامد منجر به افزایش ضریب انتقال حرارت مایع خنک‌کننده می‌شود، درحالی‌که افزایش عدد ناسلت باعث کاهش ضریب اصطکاک و فشار خواهد شد. آن‌ها دریافتند که در میان تمام فرم‌های مورد بررسی، تیغه مثلثی دارای بهترین معیارهای ارزیابی عملکرد حرارتی است. در مرجع [۳]، مدل‌سازی عددی انتقال حرارت جابه‌جایی اجباری و مشخصات جریان نانوسیال متشکل از آب و تیتانیا^۲ در درصدهای حجمی $0.02 < \phi < 0.2$ گزارش شده که در آن عدد ناسلت و افت فشار نانوسیال در لوله مسی افقی در رژیم جریان آشفته با $5100 < Re < 8000$ ، به کمک روش تک‌فازی مورد بررسی قرار گرفته است. مطابق با نتایج، عدد ناسلت با افزایش عدد رینولدز و غلظت حجمی نانوذرات افزایش پیدا کرده است و در کنار بهبود ضریب انتقال حرارت با استفاده از نانوسیال، افت فشار نیز افزایش یافته است. در مرجع [۴]، به مطالعه جابه‌جایی اجباری جریان نانوسیال در یک میکروکانال طولانی که دامنه آن تحت تأثیر یک میدان مغناطیسی با قدرت یکنواخت قرار گرفته، به روش حجم محدود پرداخته شده است. در این مطالعه، نانوسیال ورودی داغ با تبادل گرما با دیواره‌های میکروکانال سرد می‌شود. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد که اگر به جای نانوسیال آب - نقره از نانوسیال آلومینیا استفاده شود، میزان انتقال حرارت از دیواره‌های میکروکانال در مقادیر رینولدز کم افزایش می‌یابد. در مرجع [۵]، به اثر انتقال حرارت جابه‌جایی بر جریان نانوسیال در ناحیه در حال توسعه یک لوله با شار حرارت ثابت با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی^۳ پرداخته شده است. برای این منظور، نانوسیال حاوی آلومینیوم‌اکسید و آب به عنوان یک فاز مایع با دو اندازه ذرات متوسط ۴۵ و ۱۵۰ نانومتر و چهار کسر حجمی ۱، ۲، ۴ و ۶٪ استفاده شد. در این کار، اثر اندازه ذرات بر روی ضریب انتقال

1. Volumetric Ratio
2. TiO₂
3. Computational Fluid Dynamic (CFD)

عملکرد الکتریکی و حرارتی یک سیستم فتوولتائیک حرارتی مورد بررسی قرار دادند. در مطالعه آن‌ها نانوسیال با نانوذرات سیلیسیوم کاربید، بالاترین راندمان را گزارش کرد [۱۱].

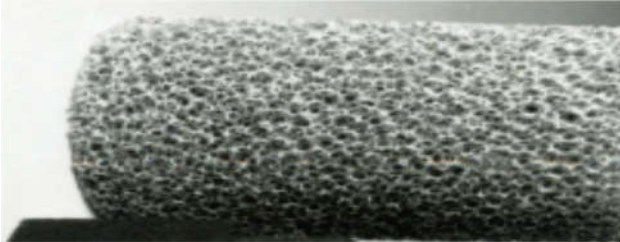
در مرجع [۱۲]، تأثیر غلظت نانوسیال آلومینا بر ویژگی‌های جریان لبه تیز با هر دو حالت کاویتاسیون و غیر کاویتاسیون در جریان آشفته بررسی شده است. هندسه مدل لوله همراه یک سوراخ با نسبت قطر سوراخ به قطر لوله برابر با ۰/۲۹۷ و ضخامت ورق سوراخ ۱۴ میلی‌متر بود. نتایج نشان داد که برای افزایش مقدار کسر حجمی نانوذرات، انرژی جنبشی جریان آشفته در حد کمی در پایین دست، کاهش می‌یابد. همچنین در ناحیه جداسازی در انتهای خروجی، شدت آشفته‌گی به‌طور متوسط با افزایش غلظت نانوسیال، افزایش می‌یابد. کیوسیک و همکاران، افت فشار و ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی از نانوسیال آلومینیوم اکسید را از طریق یک لوله دایره‌ای گرم به‌طور یکنواخت در رژیم جریان آرام مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها بیان کردند ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی نانوسیال‌ها به میزان ۸ درصد در غلظت ۰/۳ درصد در مقایسه با آب خالص افزایش می‌یابد [۱۳].

رفتار جریان عبوری از میان محیط متخلخل به‌علت ساختار منحصر به فرد و اهمیت کاربرد آن در زمینه‌های گوناگون علوم مکانیک، عمران، شیمی، نفت، مدیریت حرارتی در خنک‌سازی الکترونیکی، بهبود عملکرد سیستم‌های انتقال حرارت بسیار قابل توجه است. در همین راستا در مرجع [۱۴] بررسی آزمایشگاهی نانوسیال آلومینا در میکروکانال متخلخل برای درصد حجمی‌های پایین نانوسیال با هدف بررسی ویژگی‌های انتقال گرما و عملکرد حرارتی سردکننده فوم فلزی به کمک یک پردازنده هسته‌ای انجام شده و نتایج مربوط به تغییر عدد ناسلت برای نانوسیال را که با درصد حجمی ۰/۱ تا ۰/۸ درصد در نظر گرفته شده، گزارش شده است. نتایج تجربی در این مرجع که برای درصدهای حجمی پایین نانوسیال و اعداد رینولدز بین ۲۰۰ تا ۶۰۰ صورت گرفت، نشان داد که در صورت استفاده از فوم‌های فلزی متخلخل، میانگین عدد ناسلت افزایش می‌یابد. علاوه بر این در کاربردی دیگر از محیط‌های متخلخل جریان مخلوط هیدروژن-هوا در یک فوم آلومینیومی در مرجع [۱۵]، با هدف کاربرد فوم‌های متخلخل در الکترودهای پیل سوختی هیدروژنی بررسی شده است. همچنین تأثیر پارامترهای مهم بر جریان و انتقال حرارت در محیط متخلخل در این کار مورد بحث قرار گرفت. در مرجع [۱۶]، به بررسی روش‌های تولید فوم‌های آلومینیومی متخلخل پرداخته شده است و پارامترهایی از قبیل نفوذپذیری فوم‌ها با تخلخل بیش از ۶۰٪ مورد تحلیل قرار گرفته است. اساس کار مدل فرض اصلی مدل

نفوذپذیری شامل یک جریان در یک دیافراگم دایره‌ای است. نفوذپذیری فوم‌های منفذدار آلومینیوم با استفاده از روغن ترانسفورماتور به‌عنوان مایع اندازه‌گیری می‌شود. در مرجع [۱۷]، مدل ساده‌ای از جریان و انتقال حرارت هوا درون فوم‌های فلزی آلومینیومی بررسی شده و به توصیف چگونگی توزیع دما در آن نیز پرداخته شده است. مدل آن‌ها یک کانال دوبعدی که تحت شار حرارتی ثابت قرار داشت، به‌صورت عددی حل نمودند و داده‌های نمونه آزمایشگاهی خود را با نتایج مدل‌سازی مطابقت دادند که نتایج از تطابق خوبی برخوردار بود. در مرجع [۱۸]، به تجزیه و تحلیل فین گرمایی درون میکروکانال متخلخل پر شده با نانوسیال‌های مختلف Cu و Al_2O_3 بر پایه آب پرداخته شده است. برای توصیف جریان سیال از معادله داری استفاده شده است و دو مدل معادله با پراکندگی حرارتی برای انتقال گرما استفاده شده است. نتایج آن‌ها نشان داد که نانوسیال مس بر پایه آب در مقایسه با نانوسیال آب آلومینیومی عملکرد بهتری در این تجهیزات دارد. در مرجع [۱۹]، جریان سیال تک‌فاز در محیط‌های متخلخل به همراه شرایط مرزی مرتبط با این مدل‌ها مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج این مطالعه نشان داد هنگامی که جریان به‌طور کاملاً توسعه‌یافته باشد شرایط ورود به یک کانال متخلخل با مدل‌های مختلف جریان با شرایط ورودی معادلات ناویر استوکس سازگاری دارد. همچنین در مرجع [۲۰]، اشکال مختلفی از معادله جریان در محیط متخلخل را که معادل معادله ناویر استوکس است، برای جریان تک‌فازی مورد بحث قرار گرفته است. در کاری دیگر به جریان نانوسیال‌های مغناطیسی هیدروپنماتیکی روی یک ورقه با توجه به اثرات تابش حرارتی و شناوری پرداخته شده است. در این کار تحلیل پارامتری و بررسی تأثیر پارامترهای مختلف فیزیکی مانند پارامترهای شناوری و مغناطیسی، اندازه نانوذرات، غلظت نانوذرات را انجام گرفته است [۲۱]. در مرجع [۲۲]، به حل تحلیلی معادله انرژی برای فاز جامد درون محیط متخلخل که به‌صورت دوبعدی تحت یک شار ثابت گرمایی قرار داشت پرداخته شده است. مهم‌ترین دستاورد این کار بررسی قابلیت خنک‌کاری تجهیزات توسط سیالاتی با ضریب هدایت حرارتی پایین بود.

با توجه به بررسی انجام‌شده، مطالعه جریان نانوسیال درون محیط متخلخل به‌طور معمول دربرگیرنده کارکردهای سیالی - حرارتی نبوده و همچنین بررسی جریان نانوسیال درون کوئل متخلخل به‌لحاظ این کارکردها بررسی نشده است. در این کار، به بررسی تجزیه و تحلیل پارامترهای حرارتی و سیالی جریان نانوسیال با درصد حجمی‌های بالا در فوم‌های فلزی متخلخل پرداخته شده است. همچنین بررسی

می‌شود. نانوسیال آلومینا بر پایه آب بوده که خواص نانوسیال آلومینا تحت تأثیر دو عامل درصد حجمی ذرات ϕ و خواص سیال پایه محاسبه می‌شود. در این مطالعه، ضریب انتقال حرارت هدایتی نانوسیال که از مدل ماکسول به دست آمده است، وابسته به k_p و k_b خواهد بود که به ترتیب ضرایب انتقال حرارت سیال پایه و جزء نانوسیال می‌باشند. همچنین k_{Al} ضریب انتقال حرارت هدایتی فوم آلومینیومی متخلخل فلزی است. برای حل عددی جریان نانوسیال درون کویل متخلخل از نرم‌افزار کامسول^۴ استفاده شده است.



شکل (۲): نمونه‌ای از فوم‌های فلزی متخلخل مورد بررسی در مدل حاضر

۳. معادلات حاکم

برای بیان معادلات حاکم در مسئله، در ابتدا به بررسی نحوه محاسبه خاصیت‌های مختلف نانوسیال مورد استفاده مسئله حاضر پرداخته می‌شود. ضریب انتقال حرارت هدایتی^۵ مطابق با مرجع [۶]، از معادله ماکسول^۶ به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$k_{eff,maxwell} = \frac{k_p + 2k_b + 2(k_p - k_b)\phi}{k_p + 2k_b - (k_p - k_b)\phi} k_b \quad (1)$$

همچنین چگالی، ضریب چسبندگی سینماتیکی و ظرفیت حرارتی نانوسیال به ترتیب از روابط (۲)، (۳) و (۴) مطابق با مرجع [۱۰]، به صورت زیر به دست می‌آید:

$$\rho_{nf} = \rho_b(1 - \phi) + \rho_p\phi \quad (2)$$

$$\mu_{nf} = \mu_b(1 + 2.5\phi) \quad (3)$$

$$c_{p,nf} = (1 - \phi)c_{p,b} + (\phi c_{p,p}) \quad (4)$$

معادلات پیوستگی، مومنتوم و انرژی، برای تجزیه و تحلیل جریان نانوسیال حاکم بر فیزیک مسئله مطابق با روابط (۵) تا (۷) می‌باشد:

$$\rho_{nf} \nabla \cdot (u) = 0 \quad (5)$$

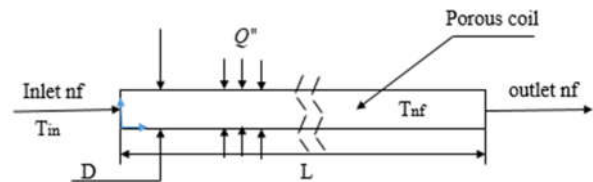
$$\rho_{nf} (u \cdot \nabla) u = \nabla \cdot [-pL + \mu_{nf} (\nabla u + (\nabla u)^T)] \quad (6)$$

$$\rho_{nf} C_{p,nf} u \cdot \nabla T = \nabla \cdot (k \nabla T) + \sum Q \quad (7)$$

پارامتریک و جامع ماهیت لایه مرزی، توزیع سرعت و فشار و اثرات توزیع میدان حرارتی درون کویل متخلخل به عنوان محیطی با قابلیت انتقال حرارت بالا برای کارکردهای شار حرارتی ثابت مورد بحث و بررسی قرار گرفته است. در این بررسی، در ابتدا جریان نانوسیال آلومینا درون کویل بدون تخلخل بررسی و اعتبارسنجی شده، سپس با ابعاد یکسان و شرایط مرزی مشابه نانوسیال درون کویل متخلخل با درصد تخلخل مشخص و درصدهای حجمی نانوسیال مختلف بررسی شده و اثرات تبادل حرارتی و میزان بهبود آن به دست می‌آید.

۲. توصیف مدل

در کار حاضر، مدل‌سازی جریان نانوسیال آلومینا با درصد حجمی‌های متفاوت در یک کویل متخلخل از فوم فلزی^۱ انجام شده که ساختار این کویل در شکل (۱) نشان داده شده است. مدل‌سازی ابتدا در یک کویل بدون تخلخل با مدل آزمایشگاهی و تحلیلی اعتبارسنجی شده است. سپس به تأثیر تخلخل بر پارامترهای انتقال حرارت نانوسیال پرداخته و در ادامه تجزیه و تحلیل انتقال حرارت، تغییرات عدد ناسلت و ضریب انتقال حرارت جابه جایی برای درصد حجمی‌های مختلف بررسی شده است. ابعاد کویل‌های متخلخل و بدون تخلخل به طور مشابه انتخاب شده است، به طوری که امکان اعتبارسنجی همه نتایج با توجه به مقایسه حالت غیرمتخلخل فراهم شود. مدل‌سازی در حالت دوبعدی با طول L و قطر D و جنس فوم از نوع آلومینیوم^۲ انجام شده است. همچنین شار حرارتی برابر با Q'' از دیواره‌های کویل به داخل آن وارد می‌شود. T_{in} دمای ورودی و T_{nf} دمای نانوسیال، T_w دمای دیواره کویل و P_{out} نشان‌دهنده فشار خروجی است. برای کویل بدون تخلخل جریان آرام در نظر گرفته شده، درحالی‌که برای جریان در کویل متخلخل از معالعه داری استفاده می‌شود که در اعداد رینولدز مختلفی تحلیل شده است.



شکل (۱): طرح‌واره مدل‌سازی مسئله

مقدار درصد تخلخل برابر با ϵ بوده و پارامتر نفوذپذیری^۳ برابر با K خواهد بود. در شکل (۲)، نمونه کاربردی از فوم‌های متخلخل که در این کویل برای مدل‌سازی از آن‌ها استفاده شده است، مشاهده

4. Console
5. Thermal conductivity
6. Maxwell

1. Produced by ERG Inc
2. AL 6101-T6
3. permeability

مرزی عدم لغزش برای دیواره کویل در نظر گرفته شده است. هدف از مدل‌سازی حاضر در محدوده ذکر شده عدد رینولدز و رژیم آرام جریان نانوسیال استفاده از آن به خصوص در کاربردهای خورشیدی از جمله کویل‌های آبگرمکن خورشیدی است.

۴. نتایج

در این کار به بررسی تأثیرات تخلخل در کویل حرارتی پر شده با نانوسیال آلومینا پرداخته شده است. برای بررسی این جریان طول کویل برابر با ۱۲۰۰ میلی‌متر و قطر آن ۴/۷۵ میلی‌متر در نظر گرفته شده و درصدهای حجمی مربوط به نانوسیال برابر با سه مقدار ۲، ۴ و ۸ درصد انتخاب شده است. در این مدل‌سازی کویل در ابتدا و جهت مقایسه با نتایج آزمایشگاهی، غیرمتخلخل فرض شده اما پس از آن بررسی تأثیرات تخلخل و مقایسه بین جواب‌های حالت متخلخل و غیر متخلخل انجام شده است. مقایسه بین محیط غیرمتخلخل و متخلخل با توجه به این امر صورت می‌گیرد که اولاً هندسه‌های در نظر گرفته شده نیز کاملاً مشابه هستند و علاوه بر آن کارکرد حرارتی جریان نانوسیال در کویل بدون تخلخل و متخلخل در هر دو مسئله یکسان است. هدف از این مقایسه، تعیین میزان بهبود کارکرد کویل حرارتی در محیط‌های غیرمتخلخل و متخلخل است. برای حل در نرم‌افزار کامسول که بر مبنای روش المان محدود انجام می‌شود، الگوریتم حلی برای محیط غیرمتخلخل و متخلخل مشابه با الگوریتم Simple بوده و درون نرم‌افزار با حل‌کننده MUMPS نام‌گذاری شده است.

جدول (۱): محاسبه خواص نانوسیال آلومینا برای درصد حجمی‌های مختلف شامل هدایت حرارتی [۶] و چگالی، ویسکوزیته دینامیکی و گرمای مخصوص فشار ثابت [۱۰] از رابطه‌های (۱) تا (۴)

ماده	$\rho (\frac{kg}{m^3})$	$C_p (\frac{J}{kg.K})$	$k (\frac{W}{m.K})$	$\mu (pa.s)$
آب	۹۹۷/۰۰	۴۱۷۹/۰۰	۰/۶۰۰	۰/۰۰۰۸۹۱
آلومینیوم اکسید Al_2O_3	۳۹۷۰/۰۰	۷۶۵/۰۰	۴۰/۰۰۰	-
نانوسیال ۲٪	۱۰۶۰/۶۴	۴۱۱۰/۷۲	۰/۶۱۱	۰/۰۰۰۹۳۵۵
نانوسیال ۴٪	۱۱۲۴/۲۸	۴۰۴۲/۴۴	۰/۶۲۲	۰/۰۰۰۹۸۰۱

برای به دست آوردن نتایج نانوسیال آلومینا، خاصیت‌های آن مطابق با جدول (۱) در درصد حجمی‌های مختلف با توجه به روابط (۱) تا (۴) محاسبه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، با افزایش درصد حجمی نانوسیال ضریب انتقال حرارت هدایتی، لزجت و چگالی نانوسیال نسبت به سیال پایه افزایش می‌یابد، درحالی‌که ظرفیت گرمایی ویژه آن کاهش خواهد یافت. هدایت حرارتی نانوسیال وابسته به هدایت حرارتی استاتیکی ماکسول از رابطه (۱) محاسبه شده که این مقدار با

برای مدل‌سازی جریان متخلخل مقدار k در معادله (۷) با کمیت k_{eff} به صورت زیر از [۲۰] جایگزین می‌شود:

$$k_{eff} = \varepsilon k_{nf} + (1 - \varepsilon) k_{Al} \quad (۸)$$

علاوه بر این، در محیط متخلخل معادله داری^۱ رابطه مربوط به سرعت با گرادیان فشار را به کمک دو کمیت چسبندگی و نفوذپذیری بیان می‌کند. این رابطه به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$u = -\frac{K}{\mu} \nabla P \quad (۹)$$

به منظور بررسی بهتر انتقال حرارت حاصل از جریان نانوسیال، پارامترهای مهم انتقال حرارت از قبیل میزان تغییرات ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی^۲ و عدد ناسلت مورد توجه قرار گرفته است. برای محاسبه ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی مطابق رابطه (۱۰)، تغییرات را بر اساس اختلاف دمای نانوسیال در هر مقطع از لوله و دمای دیواره مطابق با مرجع [۱۴]، به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$h(x) = \frac{Q''}{(T_{nf} - T_w)} \quad (۱۰)$$

ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی در رابطه بالا به شار ورودی به کویل، دمای نانوسیال و دمای دیواره کویل وابسته است که توزیع دمای روی دیواره و دمای متوسط در هر مقطع عرضی نانوسیال برای محاسبه ناسلت محلی درون کویل استفاده شده و لذا تغییرات این توزیع دماها در طول کویل بر عدد ناسلت تأثیرگذار خواهد بود. رابطه تغییرات عدد ناسلت طبق رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$Nu_D(x) = \frac{h(x) D}{k_{nf}} \quad (۱۱)$$

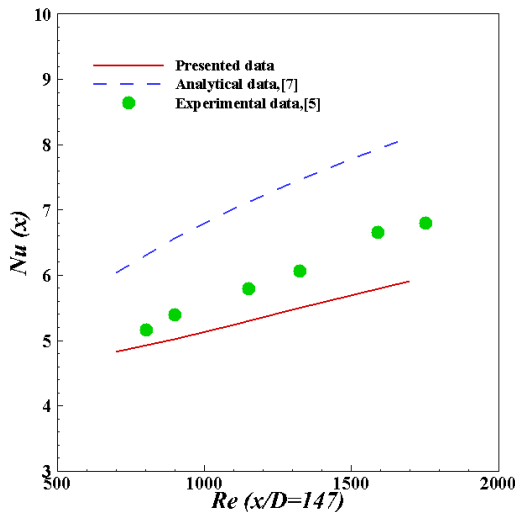
همچنین برای مقایسه با حالت تحلیلی روابط عدد ناسلت مطابق با معادله در [۶]، درون کویل بدون تخلخل به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$Nu = \begin{cases} 1.953 \left(\text{RePr} \frac{D}{x} \right)^{1/2} \text{ for } \left(\text{RePr} \frac{D}{x} \right) \geq 33.3 \\ 4.364 + 0.0722 \text{RePr} \frac{D}{x} \text{ for } \left(\text{RePr} \frac{D}{x} \right) < 33.3 \end{cases} \quad (۱۲)$$

شرایط مرزی حرارتی مسئله شامل دمای ورودی نانوسیال برابر با ۲۹۵ درجه کلوین، شار حرارتی وارده از دیواره کویل برابر با مقدار ثابت که این مقدار ثابت در بخش‌های مختلف در محدوده ۴۰۰۰ تا ۹۰۰۰ وات بر مترمربع تغییر می‌کند و شرط شار حرارتی ثابت در خروجی کویل است. همچنین شرایط مرزی سیالی و معادله پیوستگی و داری شامل سرعت نانوسیال ورودی به کویل ثابت و بین ۰/۱ تا ۰/۳ متر بر ثانیه معادل با اعداد رینولدز در محدوده ۵۰۰ تا ۲۰۰۰، فشار نسبی صفر نسبت به محیط در خروجی کویل و همچنین شرط

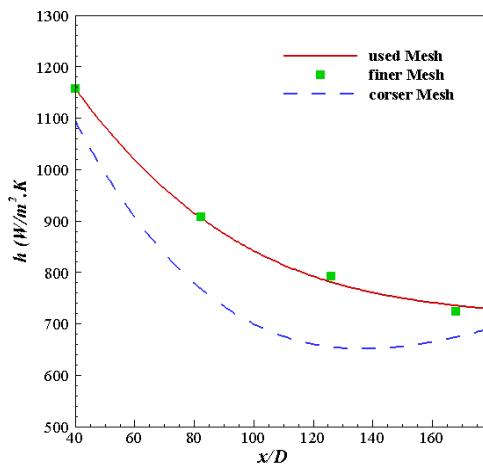
1. Darcy
2. Convective Heat Transfer Coefficient

علاوه بر این در کلیه حالت‌ها با افزایش عدد رینولدز میزان عدد ناسلت نیز افزایش یافته است.



شکل (۴): مقایسه تغییرات عدد ناسلت بر حسب عدد رینولدز در نسبت طول به قطر برابر با ۱۴۷ در مدل حاضر با داده‌های آزمایشگاهی [۵] و تحلیلی [۷] برای نانوسیال ۴٪ در کویل بدون تخلخل و شار حرارتی ۸۸۴۶ وات بر مترمربع

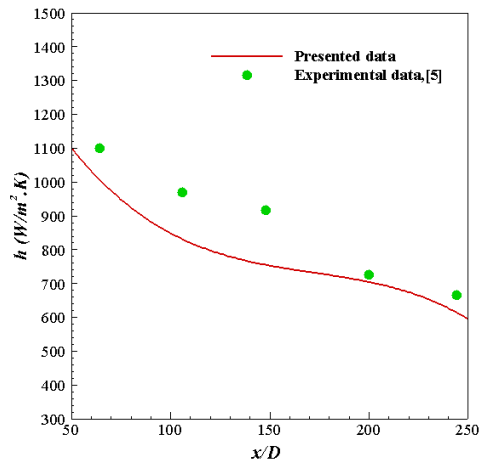
برای بررسی استقلال از شبکه در این مدل‌سازی پارامتر ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی برای شبکه‌هایی با تعداد ۷۳۶۲، ۹۸۴۶ و ۱۲۲۰۱ گره، مطابق با شکل (۵) بررسی شده است. شبکه انتخاب شده از نوع نامنظم مثلثی بوده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، اگر میزان گره‌ها از مقدار شبکه درشت با تعداد ۷۳۶۲ به شبکه منتخب با تعداد ۹۸۴۶ تغییر پیدا کند، جواب به‌طور قابل توجهی تحت تأثیر قرار می‌گیرد، اما برای شبکه‌هایی با تعداد بزرگ‌تر از ۹۸۴۶، نتایج نشان می‌دهد که دیگر جواب با افزایش تعداد گره تغییری نخواهد داشت و بنابراین استقلال از شبکه در حالت منتخب برای مسئله حاضر وجود دارد. بنابراین همه جواب‌ها با تعداد گره ۹۸۴۶ به دست آمده‌اند.



شکل (۵): مطالعه استقلال از شبکه‌بندی در رینولدز برابر با ۱۵۸۰

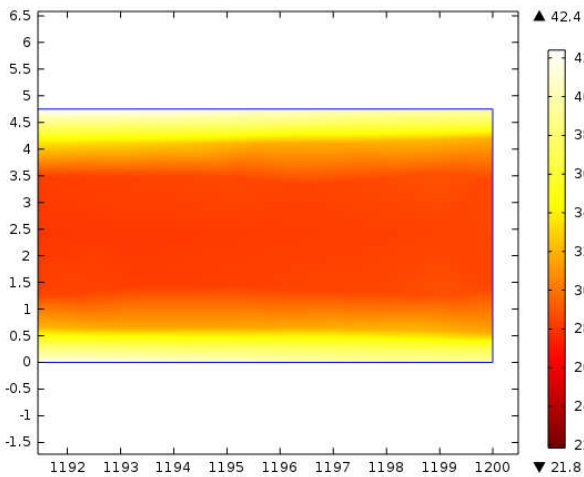
توجه به بسیار کوچک بودن هدایت حرارتی دینامیکی نانوسیال تقریباً قابل قبولی است. همچنین لزجت نانوسیال از مدل استاتیکی از رابطه (۳) محاسبه شده که این مقدار نیز با توجه به بسیار کوچک بودن لزجت براونی نانوسیال در این مسئله قابل قبول است.

داده‌های لازم برای اعتبارسنجی این مسئله در حالت با تخلخل در درصد حجمی بالا موجود نبوده و بنابراین مقایسه در حالت بدون تخلخل انجام گرفته است. برای اعتبارسنجی کار حاضر، مطابق با شکل (۳)، تغییرات ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی بر حسب نسبت طول به قطر در مدل حاضر با نتایج گزارش شده آزمایشگاهی [۵]، در شرایط مشابه شامل شار حرارتی ۸۸۴۶ وات بر مترمربع، دمای نانوسیال ورودی ۲۹۵ درجه کلوین و عدد رینولدز ۱۵۸۰ برای نانوسیال ۴ درصد درون کویل بدون تخلخل مقایسه شده است. با توجه به شکل حاضر، نتایج تطابق قابل قبولی با داده‌های آزمایشگاهی با حداکثر خطای ۱۷/۱٪ دارد. همچنین با افزایش طول لوله ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی نانوسیال کاهش پیدا می‌کند جایی که در ابتدای کویل این مقدار برابر با ۱۱۰۰ و در انتهای آن برابر با ۶۵۰ وات بر مترمربع درجه کلوین است.



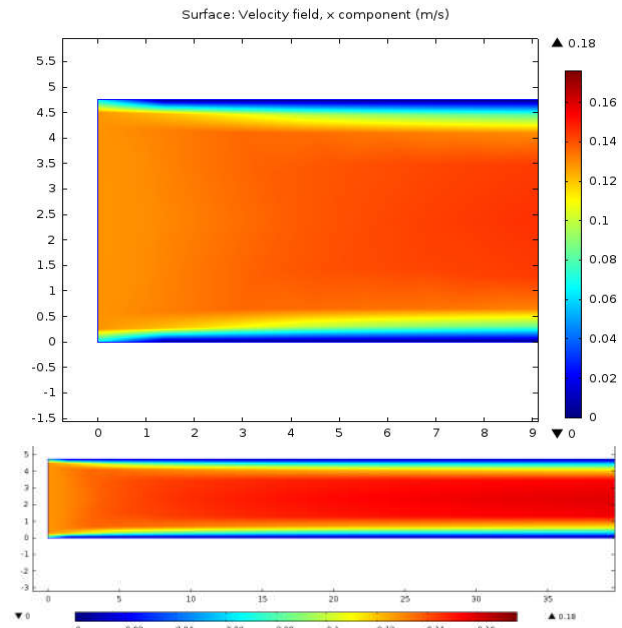
شکل (۳): مقایسه تغییرات ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی بر حسب پارامتر طول به قطر در مدل حاضر با داده‌های آزمایشگاهی [۵] برای نانوسیال ۴٪ درون کویل بدون تخلخل در عدد رینولدز برابر با ۱۵۸۰ و شار حرارتی ۸۸۴۶ وات بر مترمربع

در شکل (۴) تغییرات عدد ناسلت بدست آمده از مدل حاضر با داده‌های تحلیلی محاسبه شده در مرجع [۷]، و مدل آزمایشگاهی [۵] در شرایط مشابه با شکل (۳)، مقایسه شده‌اند. مطابق با این شکل مقدار حداکثر درصد خطای محاسبه شده بین نتایج مدل حاضر و مدل آزمایشگاهی برابر با ۱۰/۵ درصد است. همچنین نتایج مربوط به مدل سازی حاضر نسبت به داده‌های تحلیلی به نتایج آزمایشگاهی نزدیک‌تر است به صورتی که اختلاف بین نتایج ارائه شده با نتایج آزمایشگاهی حداقل ۹/۴٪ کمتر از اختلاف بین نتایج تحلیلی و آزمایشگاهی است.



شکل (۷): کانتور دما در انتهای کویل بدون تخلخل برای نانوسیال ۴٪ و در عدد رینولدز برابر با ۷۰۰ و شار حرارتی ۸۸۴۶ وات بر مترمربع

در شکل (۸)، کانتور دما برای جریان نانوسیال درون کویل متخلخل که با خواص ۷۹/۶٪ تخلخل، نفوذپذیری برابر با ۱۰ به توان منفی ده مترمربع و شرایط هیدرودینامیکی و حرارتی مشابه با کویل بدون تخلخل نشان داده شده است. با توجه به این شکل، برخلاف حالت غیرمتخلخل در کویل متخلخل کانتور دما تقریباً یکنواخت است. این امر به دلیل توزیع سرعت وابسته به فشار داری در حالت متخلخل بوده که سبب ایجاد گرادیانهای محلی حرارتی درون محیط متخلخل شده و یک توزیع دمایی ترکیبی یکنواخت تر درون آن ایجاد می‌کند. با توجه به شکل‌های (۷) و (۸) تغییرات دما در عرض کویل برای جریان نانوسیال در محیط غیرمتخلخل ۲۰ درجه سانتی‌گراد است که بیشترین مقدار آن در نزدیکی دیواره خواهد بود، درحالی‌که این مقدار برای محیط متخلخل در حدود ۱۱ درجه سانتی‌گراد با کاهش حدود ۴۰ درصدی است. در شکل (۸) که مربوط به حالت متخلخل می‌باشد به دلیل اینکه توزیع سرعت مطابق با معادله داری وابسته به فشار است، تأثیرات لایه مرزی سیالی روی حرارت سبب ایجاد گرادیانهای محلی حرارتی درون محیط متخلخل شده و یک توزیع دمایی ترکیبی یکنواخت درون کویل ایجاد می‌کند. اما در شکل (۷) که مربوط به کویل بدون تخلخل است، لایه مرزی سرعتی وابستگی کمتری نسبت به فشار داشته و در نتیجه اختلاف دما قابل توجهی بین سطح کویل و دمایی روی خط مرکزی آن دیده می‌شود. در کاربرد تبادل حرارتی خورشیدی به‌طور معمول یکنواخت بودن دما بسیار مناسب است؛ چون سبب یک مخلوط با دمایی یکنواخت می‌شود و بنابراین از این لحاظ کویل حرارتی متخلخل با توجه به مقایسه بین شکل‌های (۷) و (۸) بسیار مناسب می‌باشد.

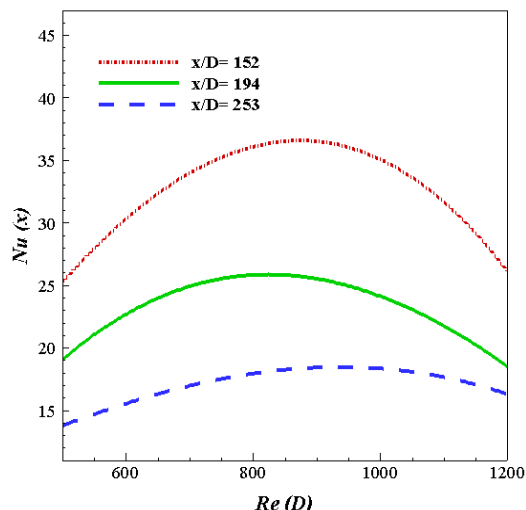


شکل (۶): کانتور سرعت در ناحیه ورودی کویل بدون تخلخل برای جریان نانوسیال ۴٪ در عدد رینولدز برابر با ۷۰۰ و شار حرارتی ۸۸۴۶ وات بر مترمربع

در شکل (۶)، نمایش کانتور سرعت جریان نانوسیال در ابتدای کویل حرارتی نشان داده شده است. مطابق با این شکل، در طول ابتدایی این کویل، تشکیل لایه مرزی و تغییرات پروفیل سرعت قابل توجه بوده که این عوامل سبب خواهد شد کمیت‌های اصطکاکی - حرارتی درون این مسئله نقش قابل توجهی داشته باشد. بنابراین تغییرات این کمیت‌ها در جریان‌های مختلف با نانوسیال درون محیط‌های متخلخل از اهمیت زیادی برخوردار است. علاوه بر این به‌طور معمول با توجه به شکل (۶) در حرکت یک نانوسیال درون یک کویل، پروفیل سرعت تابعی از کمیت‌های سطحی است و در نزدیک سطح بیشتر تحت تأثیر قرار می‌گیرد که این امر در محیط غیرمتخلخل نسبت به محیط متخلخل متفاوت خواهد بود.

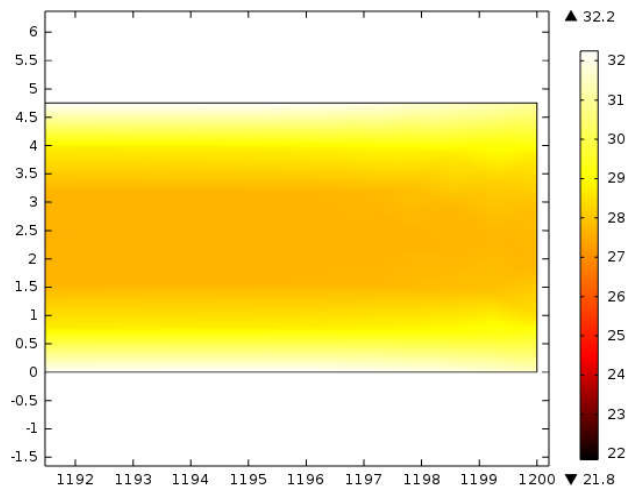
در شکل (۷)، کانتور دمایی مربوط به جریان نانوسیال در عدد رینولدز ۷۰۰ و دمایی ورودی ۲۹۵ کلوین برای حالت کویل بدون تخلخل طی فاصله معینی از طول لوله (در قسمت انتهایی لوله) مشاهده می‌شود. طبق این کانتور لایه مرزی حرارتی در کویل ایجاد خواهد شد و تشکیل این لایه مرزی در انتهای کویل نشان می‌دهد در کویل بدون تخلخل دمایی نانوسیال در طول کویل به حالت توسعه‌یافته حرارتی نرسیده؛ بنابراین همواره حداکثر دما روی سطح بوده و این مقدار تا حداقل ممکن روی محور مرکزی کویل تغییر خواهد کرد. لذا در این جریان بدون تخلخل، نوسانات دمایی بیشتر بوده که ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی و نیز عدد ناسلت تغییر می‌دهد.

و به طبع آن عدد ناسلت کاهش می‌یابد به عبارتی هر چه به پایین دست جریان نزدیک شویم میزان تبادل حرارتی درون محیط متخلخل کاهش خواهد یافت. همچنین با افزایش عدد رینولدز میزان ضریب عدد نایلت در ابتدا افزایش یافته به طوری که بیشترین مقادیر عدد ناسلت مربوط به اعداد رینولدز بین ۸۰۰ تا ۱۰۰۰ می‌باشد و پس از آن به دلیل قدرت عبوردهی بیشتر جریان در اعداد رینولدز بالا میزان این ضریب کاهش خواهد یافت. مطابق با شکل (۱۰) با توجه به تأثیر تخلخل بر عدد ناسلت ملاحظه می‌شود در رینولدز ۷۰۰ و برای پارامتر نسبت طول به قطر برابر ۱۴۷، عدد ناسلت برابر با ۳۴ است، این در حالی است که برای همین شرایط جریان نانوسیال درون کویل بدون تخلخل مطابق با شکل (۴) عدد ناسلت برابر با ۴/۹ خواهد بود. مشابه همین نتیجه در مورد ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی نیز مطرح است. این امر به این معناست که به وجود آمدن تخلخل سبب می‌شود پارامترهای انتقال حرارتی درون کویل افزایش قابل توجهی یافته که این افزایش می‌تواند در بهبود و افزایش انتقال حرارت از دیواره به نانوسیال موثر باشد.



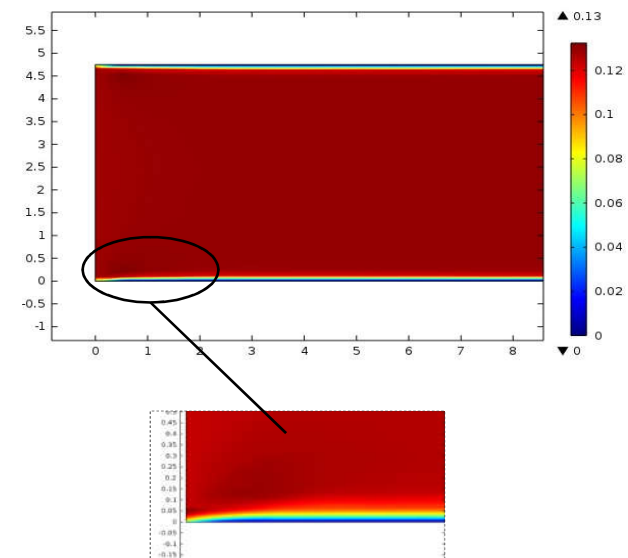
شکل (۱۰): تغییرات عدد ناسلت نانوسیال بر حسب عدد رینولدز در نسبت طول به قطرهای مختلف درون کویل متخلخل برای نانوسیال ۴٪ در تخلخل ۷۹/۶٪ و شار حرارتی ۸۸۴۶ وات بر مترمربع

تغییرات درصد حجمی نانوسیال نیز خود می‌تواند منجر به تغییر در کمیت‌های حرارتی درون کویل شود. در شکل (۱۱)، تغییرات ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی بر حسب عدد رینولدز برای جریان نانوسیال با درصد حجمی‌های ۲ و ۴، درون کویل متخلخل مشاهده می‌شود. مطابق با این شکل با افزایش درصد حجمی نانوسیال ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی افزایش می‌یابد، به طوری که بیشترین مقدار ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی در تمام طول کویل مربوط به نانوسیال ۴٪ خواهد بود. این امر به دلیل افزایش کمیت‌های حرارتی



شکل (۸): کانتور دما در انتهای کویل متخلخل برای نانوسیال ۴٪ در عدد رینولدز برابر با ۷۰۰ با درصد تخلخل برابر با ۷۹/۶ و شار حرارتی ۸۸۴۶ وات بر مترمربع

سرعت دارسی اثرات سرعت در دامنه را مشخص می‌کند و کانتور سرعت در نزدیکی دیواره‌ها و تشکیل لایه مرزی روی دیواره‌ها در شکل (۹) دیده می‌شود. مطابق با شکل (۹) ضخامت لایه مرزی تشکیل شده در کویل متخلخل بسیار کوچک است، این در حالی است که لایه مرزی تشکیل شده در کویل بدون تخلخل که در شکل (۶) مشخص شد، دارای ضخامت بیشتری نسبت به این حالت دارد.



شکل (۹): کانتور سرعت در ناحیه ورودی کویل متخلخل برای نانوسیال ۴٪ در رینولدز ۷۰۰ با درصد تخلخل برابر با ۷۹/۶ و شار حرارتی ۸۸۴۶ وات بر مترمربع

در شکل (۱۰) تغییرات عدد ناسلت با درصد حجمی ۴ بر حسب عدد رینولدز در مقادیر مختلف نسبت طول به قطر بررسی شده است. هر چه طول کویل افزایش پیدا می‌کند ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی

در شکل (۱۲)، تغییرات عدد ناسلت برای جریان نانوسیال آلومینا با درصدهای حجمی ۲ و ۴، درون کویل متخلخل نشان داده شده است. مطابق با این شکل، به‌طور مشابه با تغییرات ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی در شکل (۱۱)، با افزایش درصد حجمی نانوسیال در محدوده عدد رینولدز کوچک‌تر از ۱۱۵۰ عدد ناسلت نیز افزایش پیدا می‌کند و در نتیجه آن می‌توان به افزایش تبادل حرارتی کویل حرارتی دست یافت. البته در عدد رینولدز برابر با ۱۱۵۰ افزایش درصد حجمی نانوسیال تأثیری بر تغییر عدد ناسلت نداشته و در مقادیر عدد رینولدز بزرگ‌تر از ۱۱۵۰ با افزایش درصد حجمی نانوسیال درون محیط متخلخل مقدار عدد ناسلت کاهش یافته است.

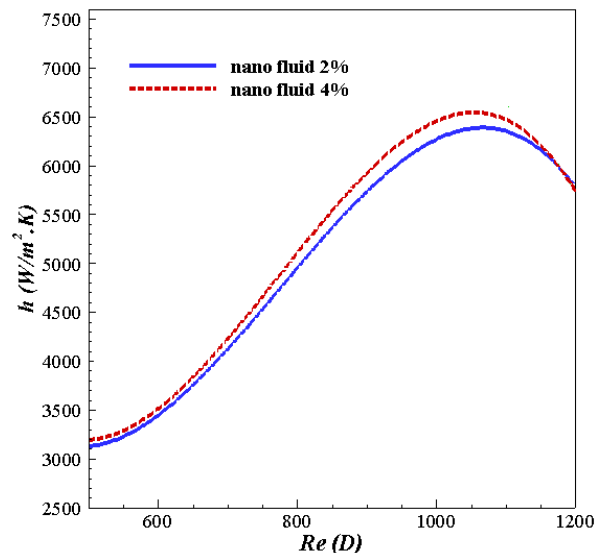
در جدول (۲)، برای نشان دادن اختلاف مقدار ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی و عدد ناسلت برای نانوسیال با درصدهای حجمی مختلف و در حالت‌های با و بدون تخلخل، مقادیر این کمیت در شرایط عدد رینولدز ۱۰۵۰ و نسبت طول به قطر برابر با ۵۱ محاسبه شده است. همان‌طور که در این جدول مشاهده می‌شود، در این عدد رینولدز افزایش درصد تخلخل سبب بهبود عملکرد حرارتی کویل شده درحالی‌که مقادیر ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی و عدد ناسلت مربوط به حالات متخلخل با درصدهای مختلف حجمی نانوسیال به‌طور قابل توجهی بیشتر از مقدار مربوط به حالت بدون تخلخل است.

جدول (۲): مقایسه ضریب انتقال حرارت برای دو حالت متخلخل و بدون تخلخل با درصد حجمی‌های متفاوت نانوسیال برای رینولدز ۱۰۵۰ و نسبت طول به قطر برابر با ۵۱

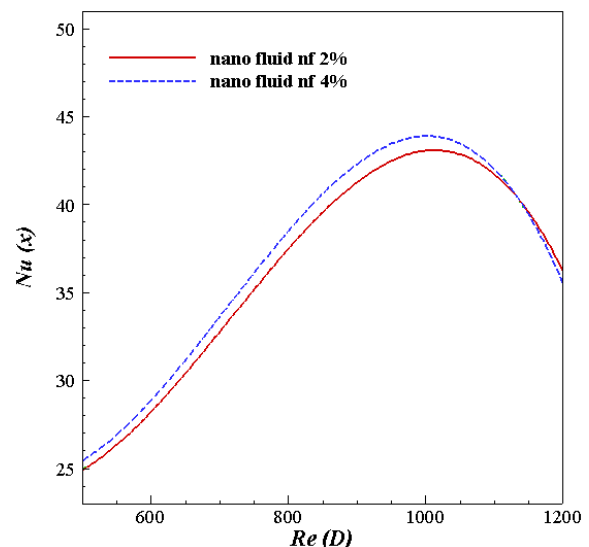
ماده	شرایط	Nu	$h\left(\frac{w}{m^2.K}\right)$
نانوسیال ۴٪	بدون تخلخل	۷/۲۵	۹۳۳/۲۱
نانوسیال ۲٪	متخلخل	۴۹/۵۸	۶۳۷۷/۹۵
نانوسیال ۴٪	متخلخل	۴۹/۹۳	۶۵۳۸/۶۸

در شکل (۱۳)، نانوسیال آلومینا در درصدهای حجمی ۲ و ۴ با درصد تخلخل ۷۹/۶ و رینولدز بالا درون کویل متخلخل اندازه‌گیری شده است. همان‌طور که در شکل دیده می‌شود، فشار در طول کویل به‌صورت خطی تغییر می‌کند. با افزایش درصد حجمی نانوسیال در کویل متخلخل افت فشار نیز افزایش یافته، به‌طوری‌که بیشترین میزان افت فشار مربوط به نانوسیال ۴٪ با مقدار ۴/۴ بار می‌باشد. این افزایش افت فشار ناشی از افزایش میزان جزء ذرات در نانوسیال با افزایش مقدار درصد حجمی خواهد بود. علاوه بر این، ایجاد فشار بالا برای عبور سیال می‌تواند باعث افزایش دمای نانوسیال بدون تغییر فاز شود که این امر در کاربردهای مختلف صنعتی بسیار مؤثر است.

نانوسیال از قبیل ظرفیت حرارتی و ضریب انتقال حرارت هدایتی با افزایش درصد اکسید آلومینیوم درون نانوسیال مطابق با جدول (۱) می‌باشد که منجر به افزایش انتقال حرارت از دیواره به سیال خواهد شد. همچنین با افزایش عدد رینولدز از میزان تأثیرات درصد حجمی بر ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی کاسته شده، به‌طوری‌که در عدد رینولدز برابر با ۱۲۰۰ ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی با افزایش درصد نانوسیال تقریباً تغییر قابل توجهی ندارد.



شکل (۱۱): مقایسه تغییرات ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی نسبت به عدد رینولدز در نسبت طول به قطر برابر با ۵۱ درون کویل متخلخل برای درصدهای حجمی متفاوت نانوسیال با تخلخل ۷۹/۶٪ و شار حرارتی ۸۸۴۶ وات بر مترمربع



شکل (۱۲): مقایسه تغییرات ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی نسبت به عدد رینولدز درون کویل متخلخل برای درصدهای حجمی متفاوت نانوسیال در نسبت طول به قطر برابر با ۱۰۲ با تخلخل ۷۹/۶٪ و شار حرارتی ۸۸۴۶ وات بر مترمربع

شده است که مطابق با آن با افزایش شار حرارتی دمای خروجی افزایش می‌یابد. این اختلاف دما ناشی از افزایش عدد ناسلت در محیط متخلخل است؛ به عبارتی بر اساس نتایج حاصل در مقاله حاضر چون ضریب انتقال حرارت جابه جایی و عدد ناسلت افزایش قابل توجهی دارد، این اختلاف دما بین ورودی و خروجی کویل ایجاد می‌شود. با افزایش نسبت طول به قطر حداکثر میزان افزایش دما برابر با ۱/۶۷٪ و حداقل آن برابر با ۰/۶٪ به ترتیب در شارهای ورودی ۸۰۰۰ و ۴۰۰۰ وات بر متر مربع مشاهده شده است.

۵. نتیجه گیری

در این مطالعه، به بررسی و تجزیه و تحلیل حرارتی-سیالی نانوسیال آلومینا بر پایه آب درون یک کویل در دو حالت بدون تخلخل و با تخلخل پرداخته شده است. مهم ترین نتایج به دست آمده در این پژوهش به صورت زیر بیان می‌شوند:

- مقایسه بین نتایج عدد ناسلت متوسط در مدل حاضر و داده‌های آزمایشگاهی برای کویل بدون تخلخل تطابق قابل قبولی با حداکثر خطای ۱۰/۵٪ را نشان می‌دهد، درحالی‌که این حل نسبت به نتایج تحلیلی جواب‌های نزدیک تری را به داده‌های آزمایشگاهی ارائه داده است.
- با افزایش درصد حجمی نانوسیال در کویل متخلخل افت فشار نیز افزایش یافته، به طوری که بیشترین میزان افت فشار مربوط به نانوسیال ۴٪ با مقدار ۴/۴ بار است.

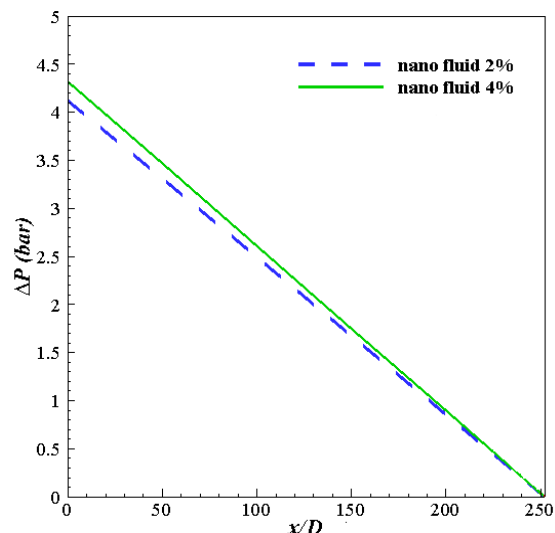
- با افزایش درصد حجمی نانوسیال آلومینا میزان ضریب انتقال حرارت جابه جایی و عدد ناسلت بیشتر خواهد شد که در پی آن، انتقال حرارت در کویل حرارتی متخلخل افزایش پیدا خواهد کرد.

- به طور میانگین، عدد ناسلت و ضریب انتقال حرارت جابه جایی برای نانوسیال آلومینا در کویل متخلخل نسبت به جریان این نانوسیال در کویل بدون تخلخل حدود ۷ برابر بیشتر است.

- با افزایش نسبت طول به قطر کویل به ترتیب در شارهای ورودی ۸۰۰۰ و ۴۰۰۰ وات بر مترمربع حداکثر میزان افزایش دما برابر با ۱/۶۷٪ و حداقل آن برابر با ۰/۶٪ مشاهده می‌شود.

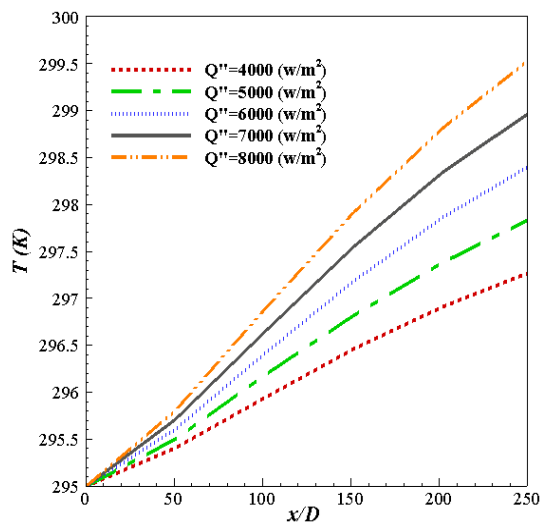
- در کاربرد تبادل حرارتی خورشیدی به طور معمول، یکنواخت بودن دما بسیار مناسب است؛ چون سبب ایجاد یک مخلوط با دمای یکنواخت می‌شود و بنابراین از این لحاظ کویل حرارتی متخلخل بسیار مناسب است.

با توجه به نتایج، با استفاده از کویل متخلخل ضریب انتقال حرارت جابه جایی نانوسیال نسبت به کویل بدون تخلخل به میزان قابل توجهی افزایش خواهد یافت که مهندسان می‌توانند از این دستاورد برای سیستم‌های صنعتی با بهبود عملکرد حرارتی استفاده کنند.



شکل (۱۳): تغییرات فشار برحسب نسبت طول به قطر در کویل متخلخل برای درصد حجمی مختلف نانوسیال با درصد تخلخل ۷۹/۶ و شار حرارتی ۸۸۴۶ وات بر مترمربع

در شکل (۱۴)، تغییرات دمای نانوسیال آلومینا ۴٪ نسبت به تغییرات طول به قطر برای شار حرارتی متفاوت در کویل متخلخل با درصد تخلخل ۷۹/۶ و رینولدز ۹۰۰ مشاهده می‌شود. همان طور که در این شکل دیده می‌شود، با افزایش میزان شار حرارتی ورودی به کویل، دمای نانوسیال افزایش می‌یابد.



شکل (۱۴): تغییرات دما برحسب نسبت طول به قطر در کویل متخلخل برای شار حرارتی متفاوت و نانوسیال ۴٪ در رینولدز برابر با ۹۰۰ و درصد تخلخل ۷۹/۶

از آنجایی که اختلاف دمای ورودی و خروجی کویل برای کاربردهای متفاوت از جمله زمینه خورشیدی مهم است، در شکل (۱۴)، در شارهای خورشیدی متفاوت اختلاف دما یا به عبارتی دمای خروجی کویل تحت شار حرارتی خورشیدی متفاوت روی کویل اندازه‌گیری

فهرست علائم	
x طول (mm)	P فشار ($kgm^{-1}s^{-2}$)
علائم یونانی	Pr عدد پراکتل
ρ چگالی (kgm^{-3})	Re عدد رینولدز
μ لزجت دینامیکی ($kgm^{-1}s^{-1}$)	u سرعت (ms^{-1})
ϵ درصد تخلخل	T دما (K)
∇ گرادیان	C_p ظرفیت گرمایی ویژه ($J.kg^{-1}K^{-1}$)
ϕ درصد حجمی نانوسیال	h ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی ($w.m^{-2}K^{-1}$)
زیرنویس‌ها	Nu عدد ناسلت
nf نانوسیال	Q'' شار حرارتی (Wm^{-2})
w دیواره	K نفوذپذیری (m^2)
in ورودی	k ضریب انتقال حرارت هدایتی (W/m^1K^{-1})
b پایه	L طول کوئل (mm)
p جزء	D قطر کوئل (mm)
eff مؤثر	
Al آلومینیوم	

مراجع

- [1] Chakole, M. M., *Heat Transfer Enhancement Techniques with Special Attention to Passive Methods of Heat Transfer Enhancement*, Anchor Academic Publishing, 2016.
- [2] Behnampourm A., Akbari, A., Safaei, M. R., Ghavami, M., Marzban, A., Ahmadi, G., zarringhalam, M., and Mashayekhi, R., "Analysis of Heat Transfer and Nanofluid Flow in Microchannels with Trapezoidal, Rectangular and Triangular Shaped Ribs", *Physica E*, Vol. 91, No. 17, pp. 15–31, 2017.
- [3] Davarnejad, R., and Ardehali, R. M., "Modeling of TiO_2 -water Nanofluid Effect on Heat Transfer and Pressure Drop", *International Journal of Engineering*, Vol. 27, No. 2, pp. 195–202, 2014.
- [4] Karimipour, A., and Orazio, A. D., "The Effects of Different Nano Particles of Al_2O_3 and Ag on The MHD Nanofluid Flow and Heat Transfer in a Microchannel Including Slip Velocity and Temperature Jump", *Physica E*, Vol. 86, No. 16, pp. 146–153, 2016.
- [5] Keshavarz, M., Darabi, M., Mohammad, S., Haddad, H., and Davarnejad, R., "Modeling of Convective Heat Transfer of a Nano Fluid in The Developing Region of Tube Flow with Computational Fluid Dynamics", *International Communicate Heat and Mass Transfer*, Vol. 38, No. 9, pp. 1291–1295, 2011.
- [6] دلیل، زارع، «بررسی روش‌های موجود برای محاسبه ضریب هدایت گرمایی در نانوسیال‌ها»، ستاد ویژه توسعه فناوری نانو، دوره ۱۰، شماره ۱۹۸، صفحه ۱۱۱–۱۳۹۴.
- [7] Zeinali Heris, S., Noie, S. H., Talaii, E., and Sargolzaei, J., "Numerical Investigation of Al_2O_3 /Water Nanofluid Laminar Convective Heat Transfer Through Triangular Ducts", *Nanoscale Research Letter*, Vol. 6, No. 1, pp. 179, 2011.
- [8] Wen, D., and Ding, Y., "Experimental Investigation into Convective Heat Transfer of Nanofluids at the Entrance Region Under Laminar Flow Conditions", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 47, pp. 5181–5188, 2004.
- [9] Sasmito, A. P., Kurnia, J. C., and Mujumdar, A. S., "Numerical Evaluation of Laminar Heat Transfer Enhancement in Nanofluid Flow in Coiled Square Tubes", *Nanoscale Research Letters*, pp. 1–14, 2011.
- [10] Sabir, R., Ramzan, N., Umer, A., and Muryam, H., "An Experimental Study of Forced Convective Heat Transfer Characteristic of Gold Water Nanofluid in Laminar Flow", *Science International*, Vol. 27, No. 1, pp. 235–241, 2015.
- [11] Abdulrasool, H., Sopian, K., Hameed, A., and Alshamani, A. N., "Experimental Investigation of Jet Array Nanofluids Impingement in Photovoltaic / Thermal Collector", *Solar energy*, Vol. 144, pp. 321–334, 2017.
- [12] Kabeel, A. E., and Abdelgaied, M., "Study on The Effect of Alumina Nano-Fluid on Sharp-Edge Orifice Flow Characteristics in Both Cavitations and Non-Cavitations Turbulent Flow Regimes", *Alexandria Engineering Journal*, Vol. 55, pp. 1–7, 2016.
- [13] Sik, K., Pil, S., and Choi, S. U., "Flow And Convective Heat Transfer Characteristics of Water-Based Al_2O_3 Nanofluids in Fully Developed Laminar Flow Regime", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 52, No. 1, pp. 193–199, 2009.
- [14] Bayomy, A. M., and Saghir, M. Z., "Experimental Study of Using C- Al_2O_3 -Water Nanofluid Flow Through Aluminum Foam Heat Sink", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 107, pp. 181–203, 2017.
- [15] رضاپور، مجتبی، فنایی، سید ابوزر، «مدلسازی تأثیرات حرارتی-سیالی محیط متخلخل بر مخلوط هیدروژن-هوا عبوری از آن با نرم‌افزار Comsol»، چهارمین کنفرانس هیدروژن و پیل سوختی، ۱۳۹۶.
- [16] Furman, E. L., Finkelstein, A. B., and Cherny, M. L., "Permeability of Aluminium Foams Produced By Replication Casting", *Metals (Basel)*, Vol. 8, pp. 49–57, 2013.
- [17] Dukhan, N., and Chen, K. C., "Heat Transfer Measurements in Metal Foam Subjected to Constant Heat

- Flux*", Experimental Thermal and Fluid Science, Vol. 32, No. 2, pp. 624–631, 2007.
- [18] Pourmehran, O., Rahimi-gorji, M., Hatami, M., Sahebi, S. R., and Domairry, G., "Numerical Optimization of Microchannel Heat Sink (MCHS) Performance Cooled by KKL Based Nanofluids in Saturated Porous Medium", Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers, Vol. 20, pp. 1–20, 2015.
- [19] Hamdan, M. H., "Single-Phase Flow Through Porous Channels a Review of Flow Models and Channel Entry Conditions", Applied Mathematics and Computation, Vol. 222, pp. 203–222, 1994.
- [20] Bijan, A., Nield, D. A., "Convection in Porous Media Convection in Porous Media", Third Edition. Durham, North Carolina, USA, 2006.
- [21] Pourmehran, O., Rahimi-gorji, M., and Ganji, D. D., "Heat Transfer and Flow Analysis of Nanofluid Flow Induced by a Stretching Sheet in The Presence of an External Magnetic Field", Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers, Vol. 65, pp. 1–10, 2016.
- [22] Dukhan, N., and Ratowski, J., "Convection Heat Transfer Analysis for Darcy Flow in Porous Media", 14th International Heat Transfer Conference, Vol. 7, pp. 1–7, 2010.