

## بررسی عددی جریان آشفته نانوسیال و قطر نانوذرات بر انتقال حرارت در یک کانال موجی شکل

علی جلایری قره‌قونلو<sup>۱</sup>

کارشناسی ارشد

حسین سلطانی پور<sup>۲</sup>

استادیار

سجادالله رضازاده<sup>۳</sup>

استادیار

مطالعه عددی انتقال حرارت و هیدرودینامیک جریان آشفته و آرام نانوسیال بصورت تراکم ناپذیر، در یک کانال موجی با روش حجم محدود بررسی شده و پارامترهای نسبت قطری، کسر حجمی و قطر نانوذرات در چهار رینولدز تحلیل و نتایج عدد ناسلت، افت فشار و ضریب عملکرد استخراج شده است. اعتبارسنجی، با مطالعات عددی و روابط تحلیلی مقایسه شده و نتایج از همبستگی مناسبی برخوردار بوده است. نتایج نشان داده که استفاده از انحنای سطح انتقال حرارت و افت فشار را بترتیب  $1/78$  و  $1/1$  برابر کرده و از طرفی افزایش کسر حجمی نانوسیال انتقال حرارت و افت فشار را به میزان  $2/1$  و  $3$  برابر افزایش داده است. همچنین استفاده از جریان آرام در مقایسه با جریان آشفته در محدود رینولدز  $1000$  نیز ضریب عملکرد بالاتری داشته است.

واژه های راهنما: نانوسیال، انتقال حرارت، جریان آشفته، عدد ناسلت، افت فشار، کانال موجی

### ۱- مقدمه

با توجه به اینکه سیالات متداول مانند آب، دارای ضریب هدایت کوچکی هستند، دانشمندان با علم به اینکه فلزاتی مانند مس که ضریب هدایتی برابر با  $400 \frac{W}{m.K}$  دارند، تصمیم گرفتند تا ذراتی از این فلزات را وارد سیال پایه کنند. این ذرات نانو، با اضافه شدن به سیال پایه و بالا بردن سطح تبادل گرما ضمن افزایش ضریب هدایت موثر سیال باعث بهبود قابل توجهی در میزان انتقال حرارت می‌شوند. ضمن اینکه باید توجه کرد که افزودن این نانوذرات در سیال پایه در کنار اینکه میزان ضریب هدایت موثر سیال را افزایش می‌دهد، باعث افزایش ویسکوزیته و میزان افت فشار نیز می‌شود. در همین راستا محققان زیادی در این زمینه، سعی در ارائه مدل‌های مناسبی جهت بهبود انتقال حرارت دارند که در ادامه به چند نمونه از این پژوهش‌ها اشاره خواهد شد. Peyghambarzadeh و همکاران [۱] با استفاده از نانوذره  $Al_2O_3$  با قطر  $20$  نانومتر و با استفاده از دو نوع سیال پایه آب و اتیلن‌گلیکول به بررسی نرخ انتقال حرارت نانوسیال پرداختند. آن‌ها با در نظر گرفتن رژیم جریان آشفته برای جریان هر دو نوع نانوسیالات و با در نظر گرفتن بازه  $0/1$  الی  $1$  درصد کسر حجمی به این

<sup>۱</sup> کارشناسی ارشد، دانشکده انرژی‌های تجدید پذیر، کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی ارومیه ali\_jalayeri@mee.uut.ac.ir

<sup>۲</sup> نویسنده مسئول، استادیار، دانشکده انرژی‌های تجدید پذیر، دانشگاه صنعتی ارومیه h.soltanipour@gmail.com

<sup>۳</sup> استادیار، دانشکده انرژی‌های تجدید پذیر، استادیار، دانشگاه صنعتی ارومیه sor.mems@gmail.com

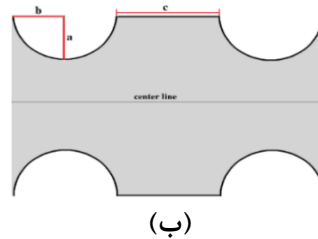
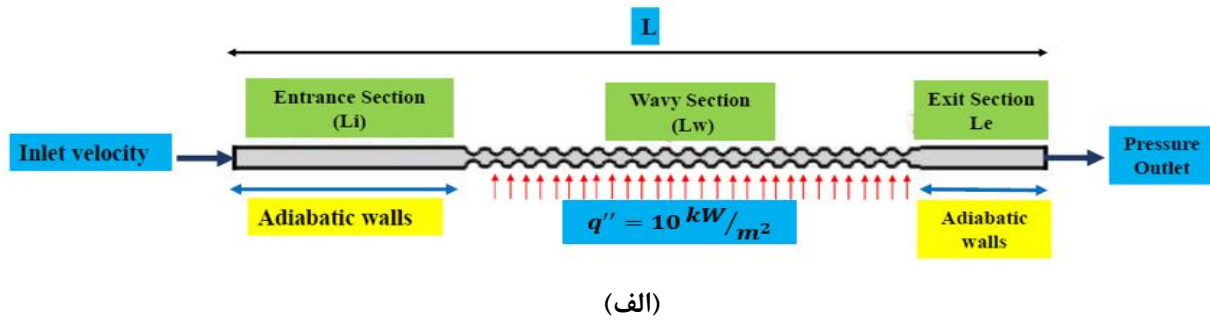
نتیجه رسیدند که بیشترین بهبود انتقال حرارت برای نانوسیال با سیال پایه آب به میزان ۴۰ درصد و در غلظت ۱ درصد و برای نانوسیال  $EG - Al_2O_3$  بیشترین میزان بهبود انتقال حرارت به میزان ۴۵ درصد و در غلظت ۱ درصد می‌باشد. Ajeel و همکاران [۲] مطالعه انتقال حرارت جریان نانوسیالات مختلف را در غلظت‌های گوناگون مورد تحقیق و بررسی قرار داده‌اند. آن‌ها در این مطالعه از نانوذرات  $Al_2O_3$ ،  $SiO_2$ ،  $CuO$  و  $ZnO$  با قطر ۲۰ نانومتر استفاده کرده‌اند. نتایج این پژوهش، نشان داد که در یک رینولدز ثابت میزان عدد ناسلت برای نانوسیال حاوی  $SiO_2$  از بقیه نانوسیالات بیشتر بوده است. بعد از آن سیالات حاوی  $Al_2O_3$ ،  $ZnO$  و  $CuO$  دارای بیشترین نرخ انتقال حرارت نسبت به سیال پایه بوده‌اند. همچنین نتایج حاکی از این بود که بیشترین افت فشار نیز مربوط نانوسیال حاوی  $SiO_2$  بوده است. در نهایت، با بررسی عملکرد کلی جریان نانوسیالات مختلف، بر اساس تغییرات عدد ناسلت و افت فشار، مشخص شد که مطلوب‌ترین نانوسیال از جهت بازده و عملکرد، نانوسیال حاوی  $SiO_2$  می‌باشد. Hamdi و همکاران [۳] نیز به مطالعه بهبود نرخ انتقال حرارت جابه‌جایی اجباری نانوسیال، در رژیم جریان آشغته در داخل یک کانال پرداخته‌اند. آن‌ها نیز از نانوذرات  $Al_2O_3$ ،  $CuO$  و  $SiO_2$  در سیال پایه اتیلن‌گلیکول استفاده کرده‌اند. نتایج نشان داده که، با افزایش غلظت نانوذرات در سیال پایه، بطور میانگین در یک رینولدز ثابت عدد ناسلت افزایش می‌یابد و باعث بهبود نرخ انتقال حرارت می‌شود. در این مطالعه همچنین تاثیر قطر نانوذرات نیز مورد ارزیابی قرار گرفته است و مشاهده شده که، برای نانوسیال حاوی  $SiO_2$  افزایش قطر نانوذرات باعث کاهش میزان انتقال حرارت می‌شود. دلیل این امر نیز کاهش مساحت سطح تبادل انتقال گرما می‌باشد. Naraki و همکاران [۴] با استفاده از نانوذرات  $CuO$  در سیال پایه آب و در بازه رینولدز ۱۰۰ الی ۱۰۰۰ که در رژیم جریان آرام قرار می‌گیرد، نرخ انتقال حرارت را برای بازه کسر حجمی در محدوده صفر الی ۰/۴ درصد بررسی کرده‌اند. در این مطالعه قطر نانوذرات برابر با ۶۰ نانومتر در نظر گرفته شده است. نتایج بدست آمده نشان داده که ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی در بیشترین مقدار بهبود، به میزان ۸ درصد و برای کسر حجمی ۰/۴ درصد در مقایسه با سیال پایه، دست یافته است. Peyghambarzadeh و همکاران [۵] با استفاده از نانوذرات  $CuO$  و  $Fe_2O_3$  به همراه سیال پایه آب و در رژیم جریان آرام به بررسی عملکرد حرارتی جریان نانوسیال پرداخته‌اند. قطر نانوذرات در این مطالعه برای نانوسیال حاوی  $CuO$  و  $Fe_2O_3$  بترتیب برابر با ۴۰ و ۶۰ نانومتر در نظر گرفته شده است. بازه بررسی عدد رینولدز جریان از ۵۰۰ تا ۱۰۰۰ فرض شده و جریان برای کسر حجمی‌های ۰/۱۵، ۰/۴ و ۰/۶۵ درصد حل شده است. نتایج نشان داده که در کسر حجمی ۰/۶۵ درصد، ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی برای برای نانوسیال حاوی  $Fe_2O_3$ ، ۹ درصد و برای نانوسیال حاوی  $CuO$ ، در حدود ۷ درصد نسبت به سیال پایه بهبود داشته است. در دیگر مطالعه انجام شده توسط Hussein و همکاران [۶]، برای نانوذرات  $SiO_2$  و  $TiO_2$  با قطرهای برابر با ۲۲ و ۵۵ نانومتر و در حضور سیال پایه آب برای رژیم جریان آرام و در غلظت‌های ۱ الی ۲/۵ درصد، عدد ناسلت برای  $SiO_2$  و  $TiO_2$  بترتیب به میزان ۱۷/۸۵ و ۱۶/۴ درصد افزایش یافته است. در مطالعه‌ای دیگر توسط Ali HM و همکاران [۷]، بر روی انتقال حرارت جریان آشغته نانوسیال، که حاوی نانوذرات  $ZnO$  با قطر ۲۰ نانومتر، در غلظت‌های ۰/۰۱، ۰/۰۸، ۰/۲ و ۰/۳ درصد و سیال پایه آب بوده است، نشان داده شده که استفاده از این نوع نانوسیال می‌تواند منجر به بهبود ۴۶ درصدی میزان انتقال حرارت در غلظت ۰/۲ درصد شود. نکته جالب توجه در این مطالعه این بوده که تغییرات نرخ انتقال حرارت بر حسب غلظت نانوسیال دارای یک نقطه ماکزیمم (۰/۲ درصد) بوده است و

نشان داده شده که لزوماً افزایش غلظت نانوسیال نمی‌تواند باعث افزایش نرخ انتقال حرارت شود. Elias و همکاران [۸] ضمن استفاده از مخلوط آب و اتیلن‌گلیکول به عنوان سیال پایه و استفاده از نانوذرات  $Al_2O_3$  با قطر ۱۳ نانومتر به مطالعه بهبود انتقال حرارت پرداخته‌اند. این مطالعه برای کسر حجمی صفر الی ۱ درصد انجام گرفته است. نتایج حاکی از این بوده که بالاترین میزان بهبود انتقال حرارت به میزان  $8/3$  درصد، برای نانوسیال با کسر حجمی ۱ درصد، افزایش یافته است. Jalayeri و همکاران [۹] در بررسی انتقال حرارت لوله‌های فین‌دار در رژیم جریان آشفته و از طریق افزایش مساحت سطح انتقال حرارت، متوجه شدند که در استفاده از لوله‌های با تعداد شش پره حداکثر خنک‌کاری و انتقال حرارت صورت می‌پذیرد. Hussein و همکاران [۱۰] با مطالعه رفتار نانوسیالات حاوی نانوذرات  $TiO_2$  و  $SiO_2$  به‌مراه سیال پایه آب در غلظت‌های ۱ الی ۲ درصد و در رژیم جریان آرام دریافتند که عدد ناسلت برای نانوسیال حاوی  $TiO_2$  و  $SiO_2$  نسبت به سیال پایه بترتیب به میزان ۱۱ و  $22/5$  درصد افزایش داشته است. بررسی عددی انتقال حرارت جابه‌جایی اجباری جریان نانوسیال، در یک میکروکانال با بلوک‌های متخلخل در حضور میدان مغناطیسی توسط Ibrahim و همکاران [۱۱] بررسی شده است. در این مطالعه اثرات عدد رینولدز، غلظت نانوذرات، عدد هارتمن و میزان تخلخل بررسی شده است. نتایج نشان داده که در حضور میدان، با افزایش عدد رینولدز افت فشار و ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی افزایش یافته و ضریب اصطکاک کاهش می‌یابد. همچنین، افزایش کسر حجمی و ضریب رسانش سیال، باعث افزایش سرعت انتقال حرارت شده است. علاوه بر این، با افزایش عدد هارتمن، ضریب اصطکاک موضعی و عدد ناسلت افزایش می‌یابد. طبق نتایج بدست آمده، با افزایش میزان تخلخل در بالاترین کسر حجمی، افت فشار متوسط برابر با  $38/171$  پاسکال ثبت شده است. Izadi و همکاران [۱۲] طی یک مطالعه عددی به شبیه‌سازی خنک‌کاری CPU متخلخل اشباع شده از نانوسیال در حضور میدان مغناطیسی پرداخته‌اند. آنها از مدل Darcy-Brinkman-Forchheimer استفاده کرده و با در نظر گرفتن ترم تلفات لزجت شبیه‌سازی را برای یک محیط متخلخل و در حضور میدان مغناطیسی انجام داده‌اند. در این مطالعه نانوسیال آب-آلومینیا در یک فوم (foam) متخلخل با سطح مقطع مستطیلی که سطح بالایی توسط فن خنک می‌شود و سطح پایینی (CPU) به عنوان دیواره دما بالا محسوب می‌شود، مدل شده است. مطالعه انتقال حرارت برای پارامترهای مختلفی نظیر عدد دارسی (Da) ( $5 \times 10^{-2} < Da < 5 \times 10^{-4}$ )، عدد رینولدز (Re) ( $50 < Re < 500$ )، عدد اکرت (Ec) ( $0 < Ec < 5 \times 10^{-2}$ )، میزان تخلخل ( $0.85 < \varepsilon < 0.95$ ) و عدد هارتمن (Ha) ( $0 < Ha < 200$ ) انجام شده است. نتایج نشان داده که افزایش عدد Da می‌تواند باعث بهبود انتقال حرارت شود. در حالی که افزایش عدد Ec منجر به کاهش انتقال حرارت شده است. در خصوص عدد Ha موضعی کمی پیچیده‌تر می‌باشد؛ به این ترتیب که در مقادیر کوچک  $\varepsilon$  (تخلخل) عدد ناسلت بطور محسوسی با افزایش عدد Ha کاهش می‌یابد در حالی که برای مقادیر بزرگ  $\varepsilon$  برعکس این موضوع رخ می‌دهد. بطور کلی استفاده از میدان مغناطیسی و نانوسیال، در تمام حالت‌ها منجر به بهبود انتقال حرارت شده است. Murat و همکاران [۱۳] مطالعه عددی پارامترهای انتقال حرارت و جریان نانوسیال در حضور میدان مغناطیسی برای حالت جابه‌جایی اجباری در یک لوله را انجام داده‌اند. نانوسیال مورد استفاده در این پژوهش Cu-water بوده است. همچنین نیروی میدان مغناطیسی و کسر حجمی در این مطالعه برای حالت‌های  $Ha=0, 10, 20$  و  $\theta = 0, 0.02, 0.04$  فرض شده است. در تمامی جریان‌های مورد بررسی، نشان داده شده که سرعت سیال به دلیل

وجود میدان و نانوذرات کاهش می‌یابد ولی از طرفی عدد ناسلت با میدان رابطه مستقیم داشته است. Abdollahi و همکاران [۱۴] در جهت بهبود انتقال حرارت در یک کانال با سطح مقطع مستطیلی سعی کردند با استفاده از یک مولد گردابه مستطیلی در زاویه‌های حمله متفاوت میزان انتقال حرارت را بهبود دهند. در این مطالعه که در رژیم جریان آرام و برای سیال آب صورت گرفته است، مشاهده شده که میزان عدد ناسلت بصورت محلی در محل مولد گردابه و در مقایسه با کانال ساده افزایش قابل توجهی داشته است. همچنین طی این مطالعه مشاهده شد که، در یک رینولدز معین با تغییر زاویه حمله میزان عدد ناسلت دسوخوش تغییر خواهد شد و می‌توان یک زاویه بهینه جهت بدست آوردن بیشترین عدد ناسلت میانگین تعیین نمود. در مطالعه تجربی انجام گرفته توسط Kwak و همکاران [۱۵] تاثیر دو نوع آرایش عرضی مولدهای گردابه که یکی بصورت خطی و دیگری بصورت مارپیچی بوده بر میزان بهبود نرخ انتقال حرارت و افت فشار جریان بررسی شده است. در این پژوهش مشاهده شده که قرار دادن دو ردیف از مولدهای گردابه بصورت عرضی و تحت آرایش مارپیچی می‌تواند منجر به بهبود ۵ الی ۱۵ انتقال حرارت در تمامی بازه‌های عدد رینولدز در مقایسه با آرایش خطی شود. دلیل این امر اینطور عنوان شده که، وجود دو ردیف از مولدهای گردابه می‌تواند باعث تشدید شدت ورتیسیته شود و نهایتاً میزان انتقال حرارت را افزایش دهد. از طرفی نیز این افزایش انتقال حرارت باعث افزایش افت فشار نیز شده است. این افزایش برای آرایش مارپیچی و در حالتی که از دو ردیف مولد گردابه استفاده شود بین ۶۷ الی ۱۱۷ درصد افزایش داشته است. Joardar و همکاران [۱۶] عملکرد یک لوله پره‌دار (Fin-Tube) را در حضور یک و سه ردیف از مولدهای گردابه در بازه رینولدز ۲۲۰ الی ۹۶۰ تحت رژیم جریان آرام مورد تحقیق قرار داده‌اند. نتایج بدست آمده نشان داده که استفاده از یک ردیف منجر به افزایش ۱۶/۵ الی ۴۴ درصد انتقال حرارت و استفاده از دو ردیف منجر به افزایش ۳۰ الی ۷۰ درصدی انتقال حرارت می‌شود. در مطالعات صورت گرفته، معمولاً نرخ انتقال حرارت و افت فشار در رژیم‌های جریان آرام و آشفته بصورت جداگانه بررسی شده است. اما در این مطالعه، هدف بررسی جزئی نرخ انتقال حرارت، افت فشار و ضریب عملکرد جریان آشفته نانوسیال و مقایسه نتایج آن با رژیم جریان آرام می‌باشد. در این مطالعه تاثیر کسر حجمی نانوذرات، نسبت قطری، عدد رینولدز و قطر نانوذرات مطالعه شده است. نتایج بدست آمده با مطالعات پیشین مقایسه و مشخص شده که استفاده از نانوسیال  $\text{SiO}_2$  در مقایسه با دیگر نانوذرات انتقال حرارت بیشتری را فراهم می‌کند [۲]. همچنین در خصوص شکل هندسی کانال موجی، نسبت بهبود انتقال حرارت به افزایش افت فشار در نمونه حاضر با مطالعات مشابه مقایسه شده است. بعنوان مثال حداکثر ضریب عملکرد بدست آمده در استفاده از کانال موجی، برای مطالعه انجام شده توسط Harikrishnan و همکاران [۱۷] و همچنین Mills و همکاران [۱۸]، به ترتیب ۱/۲ و ۱/۴ ثبت شده است. این در حالی است که در مطالعه حاضر، بیشترین ضریب عملکرد کانال موجی شکل در رژیم جریان آرام و آشفته بترتیب برابر ۲/۱ و ۱/۳۶ ثبت شده است.

## ۲- هندسه و شرایط مرزی

کانال دوبعدی موجی در شکل (۱) نشان داده شده است. ناحیه محاسباتی از سه قسمت ورودی، موجی و خروجی تشکیل شده است. دیواره‌های ناحیه موجی تحت شار حرارتی ثابت ( $q'' = 10 \text{ kW/m}^2$ ) قرار دارند. طول کل کانال، ناحیه ورودی و ناحیه موجی بترتیب برابر با  $L_w = 200\text{mm}$  و  $L_i = 400\text{mm}$ ،  $L = 700\text{mm}$



شکل ۱- الف) مشخصات هندسی کانال و شرایط مرزی ب) مشخصات هندسی ناحیه موجی شکل

می‌باشد. ارتفاع کانال برابر با  $H=10\text{mm}$  در نظر گرفته شده است. در ناحیه موجی مقادیر مربوط به هندسه برای  $b$  و  $c$  برابر  $2.5\text{mm}$  و نسبت‌های قطری مورد استفاده برابر  $a/b=0, 0.25, 0.5, 0.75, 1$  در نظر گرفته شده است. ابعاد مورد استفاده در این مطالعه براساس پژوهش Ajeel و همکاران [۲]، جهت فراهم شدن جریان کاملاً توسعه یافته در ورودی و همچنین جلوگیری از اثرات جریان برگشتی در خروجی نتایج می‌باشد.

### ۳- معادلات حاکم

معادلات حاکم برای حالت دوبعدی، پایا، تراکم ناپذیر، رژیم جریان آشفته و بصورت تک فاز بدست آمده است. با توجه به ادبیات موجود ([۱۹-۲۲]) در بررسی جریانات آشفته، به دلیل اینکه عمق در جهت  $Z$  بی‌نهایت در نظر گرفته شده، لذا گردیدها در جهت عمود بر صفحه را می‌توان ناچیز در نظر گرفت. ضمن اینکه استفاده از مدل دو بعدی موجب کاهش هزینه زمانی محاسبات نیز خواهد شد. معادلات حاکم برای جریان آشفته دوبعدی و پایا بصورت زیر ساده‌سازی شده است.

$$\text{Continuity} \quad \nabla \cdot (\rho_{nf} V) = 0 \quad (1)$$

$$\text{Momentum} \quad \nabla \cdot (\rho_{nf} VV) = -\nabla p + \nabla \cdot [(\mu_{nf} + \mu_t) \nabla V] \quad (2)$$

$$\text{Energy} \quad (\rho c_p)_{nf} (V \cdot \nabla T) = \nabla \cdot [(k_{nf} + k_t) \nabla T] \quad (3)$$

جدول ۱- مقادیر ثوابت موجود در معادلات آشفته‌گی

$C_1$	$C_2$	$C_\mu$	$\sigma_\epsilon$	$\sigma_k$
1.44	1.92	0.09	1.3	1

ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی و عدد ناسلت میانگین از رابطه زیر محاسبه می‌شود.

$$\overline{Nu} = \frac{\bar{h}D_h}{\lambda_{bf}} \quad (۴)$$

$$\bar{h} = q'' \frac{\ln\left(\frac{T_{wall} - T_{m,in}}{T_{wall} - T_{m,out}}\right)}{T_{m,out} - T_{m,in}} \quad (۵)$$

شدت جریان توربولانسی از رابطه (۶) بدست می‌آید.

$$TI = U_{in} \sqrt{2/3} k \quad (۶)$$

در این معادله  $T_{m,out}$  و  $T_{m,in}$  دمای میانگین ورودی و خروجی می‌باشد. سرعت ورودی سیال بر اساس عدد رینولدز از رابطه زیر محاسبه خواهد شد.

$$U_{in} = \frac{Re\mu_{bf}}{\rho_{bf}D_h} \quad (۷)$$

در رابطه سرعت ورودی و عدد ناسلت،  $D_h$  قطر هیدرولیکی بوده و طبق رابطه زیر بدست می‌آید.

$$D_h = 2H \quad (۸)$$

بر اساس اینکه جریان کاملا توسعه یافته بوده، ضریب میانگین فشار، افت فشار و فشار بی‌بعد از روابط زیر محاسبه خواهند شد.

$$\bar{C}_f = \frac{\bar{\tau}_w}{\rho_{bf}U_{in}^2} \quad (۹)$$

$$\Delta P = 4\bar{C}_f \frac{\rho_{bf}L_w U_{in}^2}{2D_h} \quad (۱۰)$$

$$P^* = \frac{P}{\rho u_{in}^2} \quad (۱۱)$$

در نهایت ضریب عملکرد طبق رابطه زیر محاسبه خواهد شد.

$$PEC = \frac{(Nu_{nf}/Nu_0)}{(\Delta P_{nf}/\Delta P_0)^{1/3}} \quad (۱۲)$$

در این مدل‌سازی حالت 0 (مرجع)، حالت کانال ساده و دارای سیال آب خالص می‌باشد.

#### ۴- خواص فیزیکی نانوسیال

بدلیل استفاده از نانوذرات باید خواص موثر سیال اصلاح شوند. به همین منظور چگالی، گرمای ویژه، ضریب رسانش و ویسکوزیته دچار تغییر خواهند شد. نانو ذره مورد استفاده در این مطالعه  $\text{SiO}_2$  می باشد. بر اساس قوانین مخلوطها می توان روابط اصلاح شده برای چگالی و گرمای ویژه را به طریق زیر محاسبه نمود [۲۳].

$$\rho_{nf} = \rho_p FI + \rho_{bf}(1 - FI) \quad (13)$$

$$C_{p_{nf}} = \frac{((1 - FI)\rho C_p)_{bf} + FI(\rho C_p)_p}{\rho_{nf}} \quad (14)$$

بدلیل وابستگی ضریب رسانش و ویسکوزیته به پارامترهای دیگری علاوه بر کسر حجمی نانوسیال، امکان استفاده از قوانین مخلوطها وجود نداشته، بنابراین برای محاسبه مقادیر مربوط به ضریب رسانش و ویسکوزیته از روابط مناسب تری استفاده خواهد شد. برای محاسبه ضریب رسانش از مدل K-K [۲] که حرکت براونی ذرات را در نظر می گیرد و برای غلظت های زیر 4% مناسب است، طبق رابطه زیر استفاده شده است. سایر ثوابت موجود در معادله در جدول (۲) مشخص شده اند.

$$k_{nf} = k_{static} + k_{brownian} \quad (15)$$

$$k_{static} = k_{bf} \left[ \frac{k_p + 2k_{bf} + 2FI(k_p - k_{bf})}{k_p + 2k_{bf} - FI(k_p - k_{bf})} \right] \quad (16)$$

$$k_{brownian} = 5 \times 10^4 \times 8.4407(100FI)^{-1.07304} \times \beta \rho_{bf} C_{p_{bf}} \sqrt{\frac{\alpha T}{\rho_p d_p}} f(T, FI) \quad (17)$$

$$f(T, FI) = (2.8217 \times 10^{-2} FI) + (3.917 \times 10^{-3} \left( \frac{T}{T_0} \right)) + (-3.0669 \times 10^{-2} FI - 3.91123 \times 10^{-3}) \quad (18)$$

در این رابطه  $(\alpha = 1.3807 \times 10^{-23} \text{ J/K})$  ثابت بولتزمن بوده است.

برای محاسبه ویسکوزیته سیال از رابطه Corcione [۲۴] استفاده شده است. در این رابطه  $d_{bf}$  قطر مولکول های سیال پایه و  $d_p$  قطر نانوذرات بوده،  $M$  وزن مولکولی سیال پایه و  $N$  عدد آووگادرو می باشد.

$$\frac{\mu_{nf}}{\mu_{bf}} = \frac{1}{1 - 34.87 \left( \frac{d_p}{d_{bf}} \right)^{-0.3} \times FI^{1.03}} \quad (19)$$

$$d_{bf} = 0.1 \left( \frac{6M}{N\pi\rho_{bf}} \right)^{0.33} \quad (20)$$

جدول ۲- اطلاعات مربوط به محاسبه ثابت  $\beta$ 

Nanoparticles	$\beta$	Concentration	Temperature
SiO <sub>2</sub>	$1.9526 (100FI)^{-1.4594}$	$1\% \leq FI \leq 4\%$	$298\text{ K} \leq T \leq 363\text{ K}$

برای محاسبه ویسکوزیته سیال از رابطه Corcione [۲۴] استفاده شده است. در این رابطه  $d_{bf}$  قطر مولکول-های سیال پایه و  $d_p$  قطر نانوذرات بوده،  $M$  وزن مولکولی سیال پایه و  $N$  عدد آووگادرو می‌باشد.

$$\frac{\mu_{nf}}{\mu_{bf}} = \frac{1}{1 - 34.87 \left(\frac{d_p}{d_{bf}}\right)^{-0.3} \times FI^{1.03}} \quad (19)$$

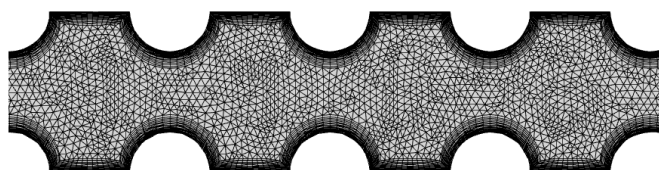
$$d_{bf} = 0.1 \left(\frac{6M}{N\pi\rho_{bf}}\right)^{0.33} \quad (20)$$

## ۵- مدل عددی

مطالعه عددی انتقال حرارت جریان نانوسیال درون یک کانال موجی شکل با روش حجم محدود مدل‌سازی شده است. برای کوپل معادلات سرعت و فشار از الگوریتم SIMPLE و برای گسسته‌سازی معادلات مومنتوم و انرژی از اسکیم Second Order Upwind استفاده شده است. مدل جریان آشفته استفاده شده در این مطالعه بر اساس مطالعات مشابه ([۲]، [۲۲] و [۲۵-۲۷]) بدلیل ارائه نتایج قابل قبول، مدل  $k$ -epsilon بوده و همچنین بر اساس مطالعات و با توجه به اینکه  $y^+$  کوچکتر از یک می‌باشد، برای رفتار سیال در نزدیک دیواره‌ها از حالت Enhanced Wall Treatment ([۲۵] و [۲۸]) استفاده شده است. دقت همگرایی معادلات پیوستگی، مومنتوم و انرژی بترتیب برابر  $10^{-5}$ ،  $10^{-8}$  و  $10^{-8}$  بوده است.

## ۶- مطالعه شبکه و اعتبارسنجی

مطالعه شبکه برای عدد ناسلت و فشار بی‌بعد استخراج شده است. در این مطالعه شش شبکه در نظر گرفته شده است. تعداد سلول‌های مربوط به هر شبکه در جدول (۳) جمع‌آوری شده است. نتایج بدست آمده برای آب در رینولدز 40000 استخراج شده است. شبکه استفاده شده همان‌طور که در شکل (۲) مشاهده می‌شود، غیر سازمان یافته می‌باشد. نتایج حاصل از مطالعه شبکه که در جدول (۳) گردآوری شده، نشان می‌دهد از شبکه پنجم به بعد، درصد خطا برای عدد ناسلت و فشار بی‌بعد زیر دو درصد ثبت شده است. بهمین خاطر ازین شبکه‌بندی برای مدل‌سازی‌ها استفاده شده است.



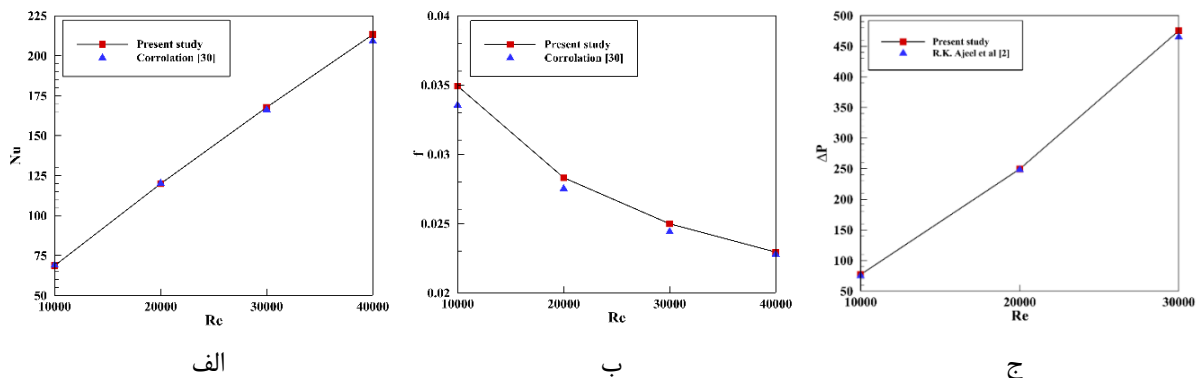
شکل ۲- ساختار شبکه‌بندی کانال موجی شکل



جدول ۳- مطالعه شبکه برای عدد ناسلت و فشار بی‌بعد

Mesh no.	Cells no.	Nu	Error	P*	Error
1	76000	357.54	-	0.676	-
2	94000	372.61	4.04%	0.702	3.7%
3	99000	388.05	3.98%	0.726	3.3%
4	106000	374.80	3.41%	0.739	1.76%
5	110000	369.11	1.52%	0.734	0.68%
6	125000	366.16	0.8%	0.730	0.54%

نتایج مطالعه حاضر برای کانال مستقیم برای عدد ناسلت و ضریب اصطکاک (f) بترتیب با روابط تجربی بدست آمده توسط Dittus-Boelter و Petukov [۲۹] مطابق شکل (۳-الف) و (۳-ب) مقایسه شده است. همان‌طور که مشخص است، در هر دو اعتبارسنجی، همبستگی مناسبی بین مطالعه حاضر و نتایج تجربی دیده می‌شود. در یک اعتبارسنجی دیگر مقادیر افت فشار، برای جریان آشفته درون یک کانال مستقیم، با نتایج بدست آمده توسط Ajeel و همکاران [۲] مقایسه و در شکل (۳-ج) مشخص شده است. نتایج مربوط به این اعتبارسنجی نیز از دقت خوبی برخوردار بوده است.



شکل ۳- اعتبارسنجی برای الف) عدد ناسلت براساس روابط تجربی [۲۹] ب) ضریب اصطکاک براساس روابط تجربی [۲۹] ج) افت فشار براساس تحلیل عددی Ajeel و همکاران [۲]

## ۷- نتایج

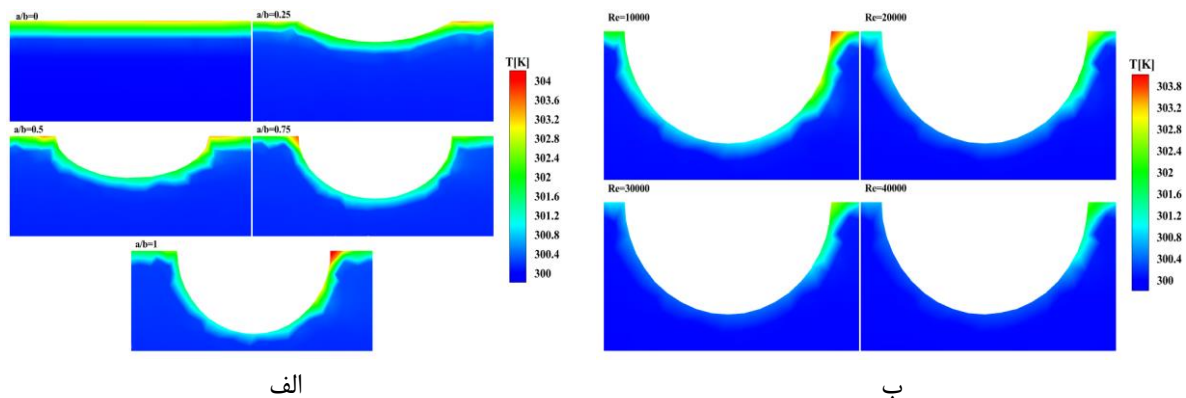
### ۷-۱- تاثیر شکل هندسی کانال بر انتقال حرارت

ناحیه موجی شکل، باعث القا گردابه در جریان شده و افزایش نسبت قطری باعث افزایش شدت این گردابه‌ها در جریان شده است. در نهایت از طریق تخریب لایه مرزی حرارتی و افزایش اختلاط، باعث افزایش نرخ انتقال حرارت می‌شود. باتوجه به شکل (۴-الف) می‌توان مشاهده نمود که با افزایش نسبت قطری ضخامت لایه مرزی حرارتی کاهش یافته و سیال در مجاورت دیواره تحت شار حرارتی، به دمای سیال ورودی نزدیک شده و همچنین در اثر القا گردابه ناشی از انحنا سطح، میزان اختلاط افزایش یافته و نهایتاً نرخ انتقال حرارت با بهبود روبه‌رو شده است. شکل (۴-ب)، تغییرات میدان دما بر حسب عدد رینولدز را برای  $a/b=1$  و در  $FI=2\%$  نشان

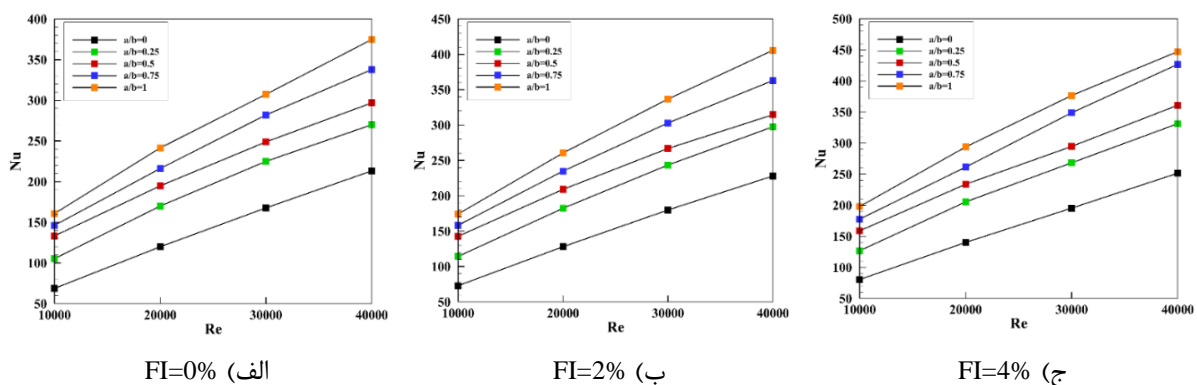
می‌دهد. مشخص است با افزایش عدد رینولدز، میزان اختلاط جریان، از طریق بالا بردن شدت گردابه‌ها، بالا رفته و به همین خاطر نرخ انتقال حرارت بهبود یافته است. شکل (۵) تغییرات عدد ناسلت برحسب رینولدز در کسر حجمی و مدل مشخص را نشان می‌دهد. بالاترین نرخ انتقال حرارت ثبت شده ناشی از افزایش نسبت قطری مربوط به حالت  $a/b=1$  در  $Re=40000$  و در تمامی کسر حجمی‌ها به میزان  $1/78$  برابر بوده است.

## ۷-۲- تاثیر غلظت نانوذرات بر میزان انتقال حرارت

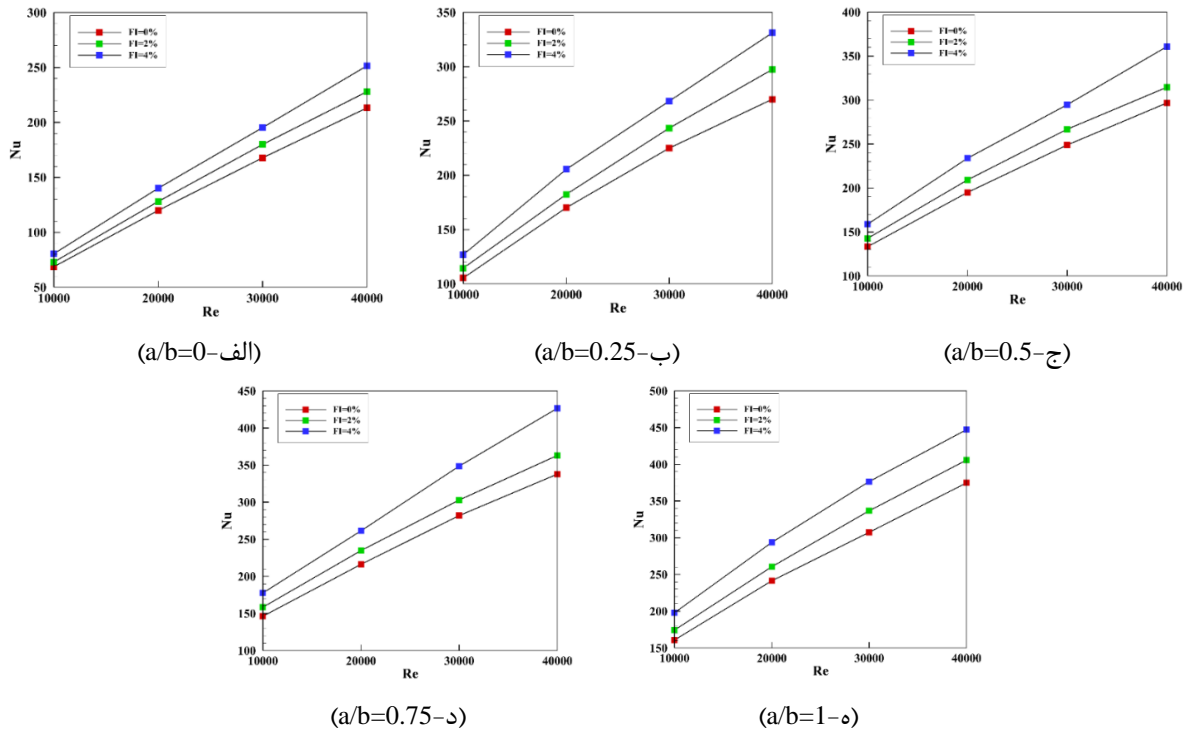
ذات نانوذرات جهت بالا بردن ضریب رسانش سیال می‌باشد. لذا می‌توان با تغییر دادن کسر حجمی ضریب رسانش سیال را افزایش داد. در همین راستا با توجه به اینکه مسئله بصورت تک‌فاز بررسی شده و همچنین طی مطالعاتی که صورت گرفته [۲]، کسر حجمی‌های مناسب و رایج برای بررسی انتقال حرارت اینگونه مسائل تا حداکثر  $FI=8\%$  گزارش شده است. بهمین خاطر، در این مسئله کسر حجمی‌های  $FI=0\%, 2\%, 4\%$  در نظر گرفته شده است. افزایش کسر حجمی از طریق افزایش تعداد نانوذرات و سطح انتقال حرارت باعث افزایش ضریب رسانش سیال و انتقال حرارت شده است. همچنین نتایج نشان داده، بیشترین نرخ انتقال حرارت در یک رینولدز ثابت و مدل مشخص، در غلظت  $FI=4\%$  و به میزان  $2/1$  درصد رخ داده است. در شکل (۶) می‌توان تاثیر کسر حجمی نانوذرات را در تغییرات عدد ناسلت مشاهده نمود.



شکل ۴- الف) کانطور دما در  $Re=10000$  و  $FI=2\%$  درصد برای نسبت‌های قطری متفاوت (ب) کانطور دما در  $a/b=1$  و  $FI=2\%$  برای رینولدزهای گوناگون



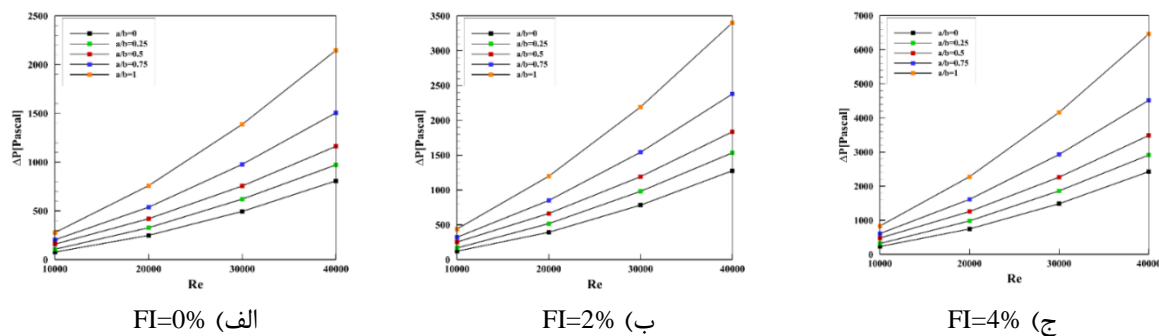
شکل ۵- تاثیر شکل هندسی کانال بر انتقال حرارت (الف)  $FI=0\%$  (ب)  $FI=2\%$  (ج)  $FI=4\%$



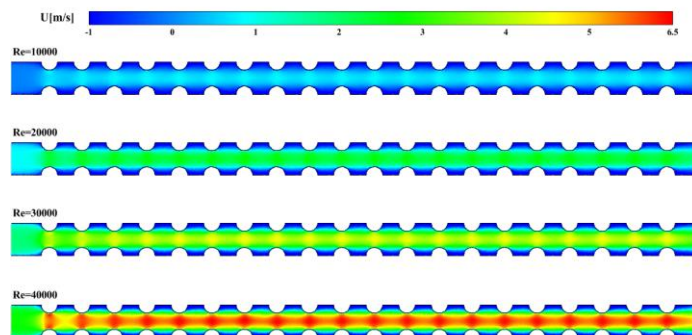
شکل ۶- تاثیر کسر حجمی نانوذرات بر تغییرات عدد ناسلت

### ۳-۷- تاثیر شکل هندسی کانال بر افت فشار

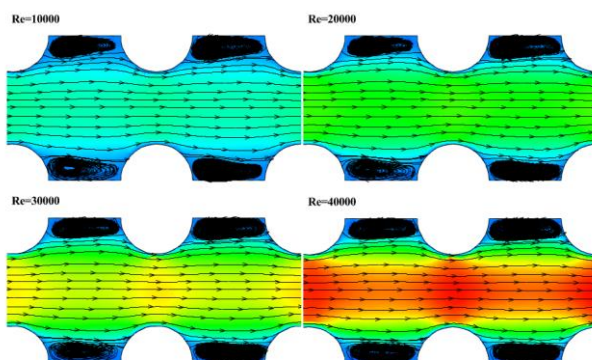
کانال‌های موج‌دار ضمن اینکه باعث افزایش نرخ انتقال حرارت می‌شوند، ولی از طرفی نیز استفاده از همین کانال‌ها از طریق افزایش تنش برشی، باعث افزایش افت فشار در کانال نیز خواهد شد. به همین خاطر میزان افت فشار درون کانال برای نسبت‌های قطری مختلف استخراج و نتایج آن در شکل (۷) مشخص شده است. نتایج نشان داده که در یک کسر حجمی و رینولدز ثابت، میزان افت فشار درون کانال، به دلیل افزایش تنش برشی و ایجاد جریان‌های ثانویه رشد داشته است. همانطور که در شکل (۸) و (۹) مشخص است، بدلیل افزایش عدد رینولدز و همچنین کاهش سطح مقطع در ناحیه موجی شکل، بنا به اصل پیوستگی، گردآیان سرعت محوری و همچنین شدت گردابه‌ها افزایش یافته است و باعث رشد افت فشار درون کانال شده است. باتوجه به شکل (۱۰) و (۱۱) مشاهده می‌شود که افزایش نسبت قطری باعث کاهش سطح مقطع و در نتیجه افزایش گردآیان سرعت محوری و همچنین افزایش ابعاد گردابه‌ها شده و نهایتاً افت فشار با رشد روبه‌رو شده است. بالاترین افزایش افت فشار ثبت شده، برای  $a/b=1$ ،  $Re=40000$  و  $FI=4\%$  به میزان  $8/1$  برابر نسبت به مدل پایه بوده است.



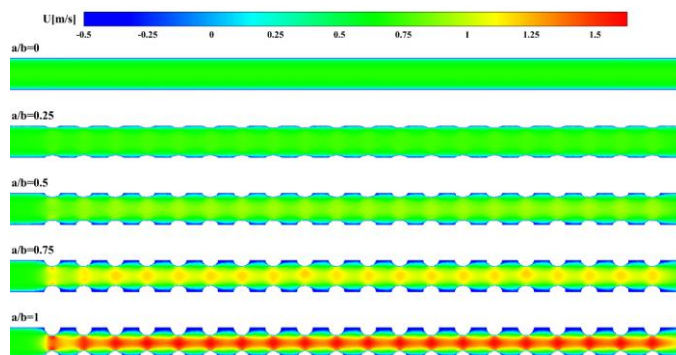
شکل ۷- تاثیر شکل هندسی بر افت فشار



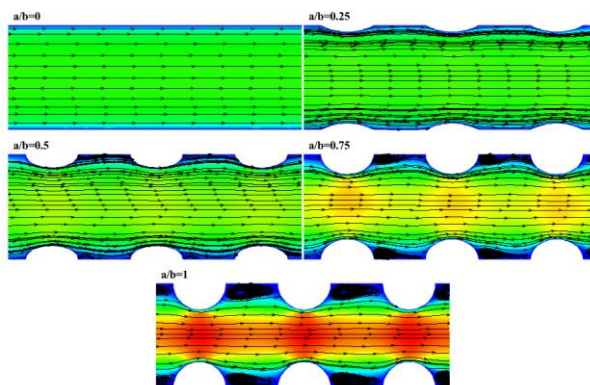
شکل ۸- کانتور سرعت محوری در  $a/b=1$  و  $FI=2\%$  در رینولدزهای مختلف



شکل ۹- تغییرات گردابه‌های القا شده در جریان برای  $a/b=1$  و  $FI=2\%$



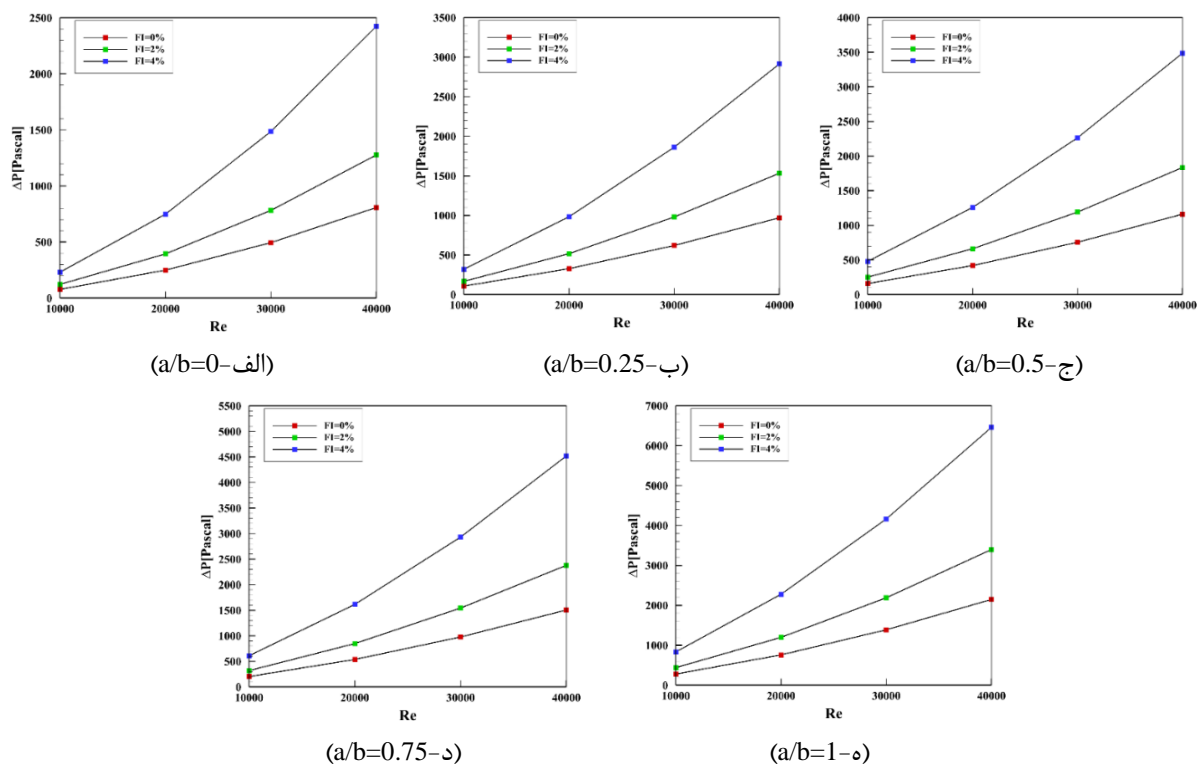
شکل ۱۰- کانتور سرعت محوری در  $Re=10000$  و  $FI=2\%$



شکل ۱۱- تغییرات گردابه‌های القا شده در جریان برای  $Re=10000$  و  $FI=2\%$

#### ۷-۴- تاثیر کسر حجمی نانوذرات بر میزان افت فشار

استفاده از نانوذرات باعث افزایش ویسکوزیته سیال می‌شود. ویسکوزیته در واقع عاملی است که در برابر حرکت سیال از خود مقاومت نشان می‌دهد. این افزایش ویسکوزیته سیال در اثر استفاده از نانوذرات باعث می‌شود که توان پمپاژ سیال نیز افزایش یابد که به مفهوم افزایش میزان افت فشار می‌باشد. از همین رو، تاثیر افزایش افت فشار در اثر استفاده از نانوذرات در کسر حجمی‌های گوناگون بررسی و با سیال پایه مقایسه شده است. در شکل (۱۲) می‌توان تاثیر استفاده از نانوذرات را مشاهده نمود. نتایج نشان می‌دهد که افزایش میزان کسر حجمی باعث افزایش افت فشار درون کانال می‌شود. بیشترین افت فشار ناشی از هندسه و نانوذره مربوط به  $a/b=1$  و کسر حجمی  $FI=4\%$  بوده است. بالاترین افت فشار ناشی از افزایش کسر حجمی در تمامی رینولدزها و برای  $FI=4\%$  نسبت به  $FI=0\%$ ، در تمامی نسبت‌های قطری معین به میزان ۳ برابر ثبت شده است.



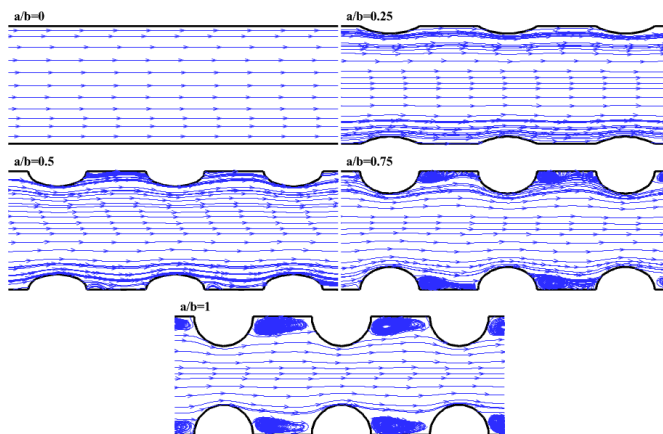
شکل ۱۲- تاثیر غلظت نانوذرات بر افت فشار برای هندسه‌های مختلف

#### ۷-۵- مقایسه همزمان میدان دما، میدان سرعت، خطوط جریان و شدت جریان توربولانسی

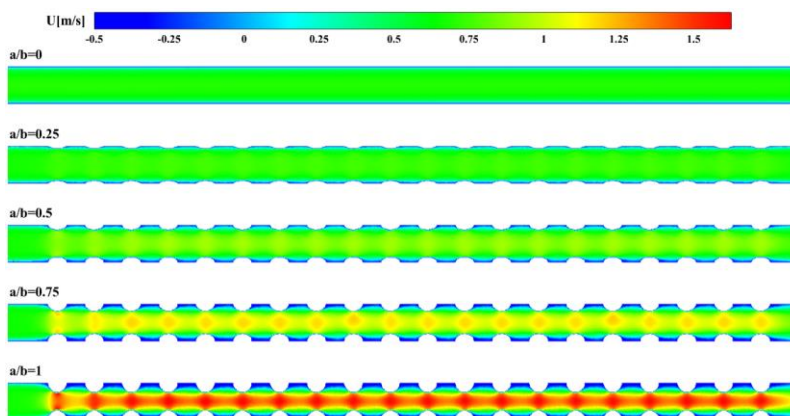
##### ۷-۵-۱- بررسی تاثیر نسبت قطری

در این قسمت برای حالت  $Re=10000$  و در کسر حجمی  $FI=2\%$  تغییرات میدان دما، سرعت محوری، شدت جریان توربولانسی و خطوط جریان مقایسه شده‌اند. شکل (۱۳) و (۱۴) خطوط جریان و میدان سرعت محوری را برای نسبت‌های قطری مختلف نشان می‌دهند. مشخص است که با افزایش نسبت قطری، ابعاد گردابه‌ها و گرادیان سرعت محوری (بدلیل کاهش سطح مقطع در ناحیه موجی شکل و بنا به اصل پیوستگی) افزایش می‌یابد. از طرف دیگر باتوجه به شکل (۱۵)، افزایش ابعاد گردابه‌ها و گرادیان سرعت محوری، باعث افزایش

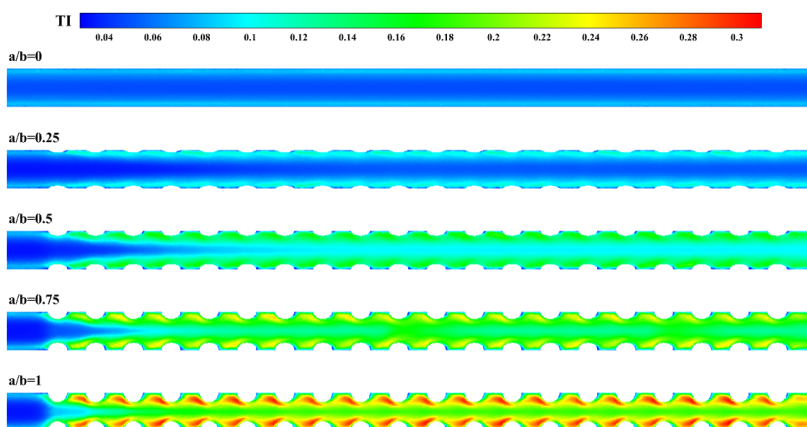
شدت میدان توربولانسی شده است. به همین خاطر، میزان اختلاط ناشی از افزایش ابعاد گردابه‌ها، گرادیان سرعت محوری و شدت میدان توربولانسی، افزایش یافته و نهایتاً باعث رشد انتقال حرارت شده است. همان طور در شکل (۱۶) نیز مشخص است، ضخامت لایه مرزی حرارتی، با افزایش نسبت قطری کاهش یافته و باعث بهبود انتقال حرارت شده است.



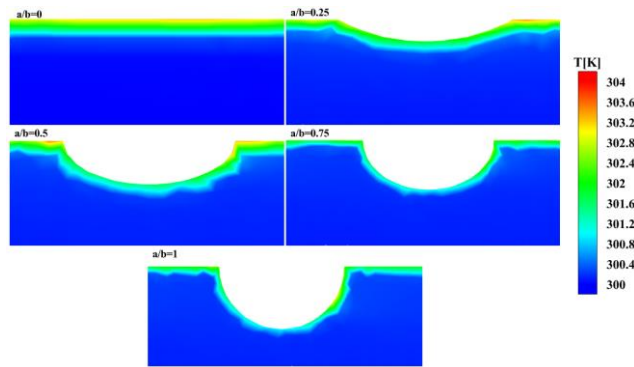
شکل ۱۳- خطوط جریان برای نسبت‌های قطری مختلف در  $Re=10000$  و  $FI=2\%$



شکل ۱۴- کانتور سرعت محوری برای نسبت‌های قطری مختلف در  $Re=10000$  و  $FI=2\%$



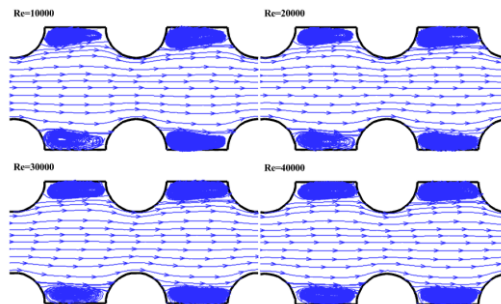
شکل ۱۵- کانتور شدت جریان توربولانسی برای نسبت‌های قطری مختلف در  $Re=10000$  و  $FI=2\%$



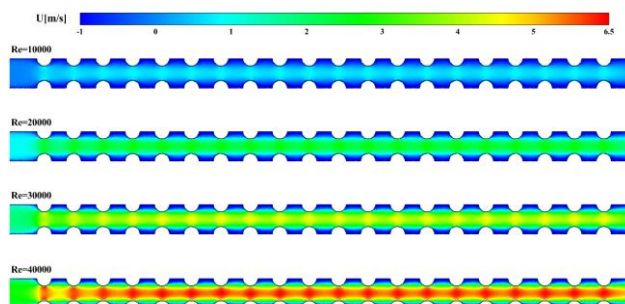
شکل ۱۶- کانتور دما برای نسبت‌های قطری مختلف در  $Re=10000$  و  $FI=2\%$

### ۲-۵-۷- مطالعه تاثیر عدد رینولدز

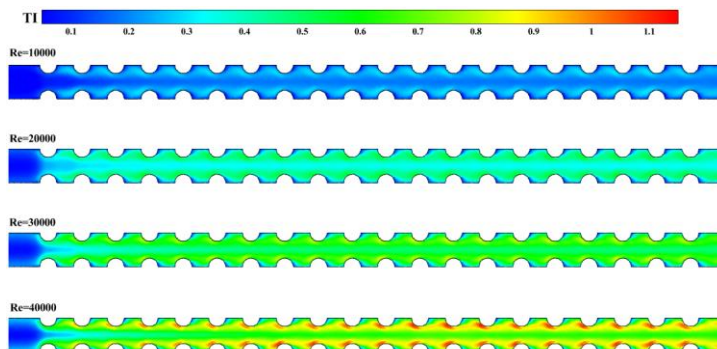
در این بخش برای حالت  $a/b=1$  و  $FI=2\%$  در رینولدزهای مختلف تغییرات میدان دما، سرعت محوری، شدت جریان توربولانسی و خطوط جریان مقایسه شده، تا بتوان تاثیر افزایش عدد رینولدز را درک نمود. در شکل (۱۷) مشخص است که در تمامی رینولدزها گردابه در اثر انحنای سطح ایجاد شده است. ولی با توجه به شکل (۱۸) و (۱۹) که تغییرات میدان سرعت محوری و شدت جریان توربولانسی را نشان می‌دهند، مشخص است که با افزایش عدد رینولدز، گردایان سرعت افزایش یافته و همچنین باعث افزایش شدت جریان توربولانسی شده است. در مجموع با افزایش سرعت سیال و در نتیجه افزایش شدت جریان توربولانسی و شدت گردابه‌های موجود در جریان، میزان اختلاط بالا رفته و از طرفی با تخریب لایه مرزی حرارتی، نرخ انتقال حرارت افزایش یافته است. در شکل (۲۰) می‌توان مشاهده نمود که افزایش عدد رینولدز در نهایت باعث کاهش ضخامت لایه مرزی حرارتی شده و دمای سیال در نزدیکی دیواره تحت شار حرارتی به دمای ورودی سیال نزدیک شده است.



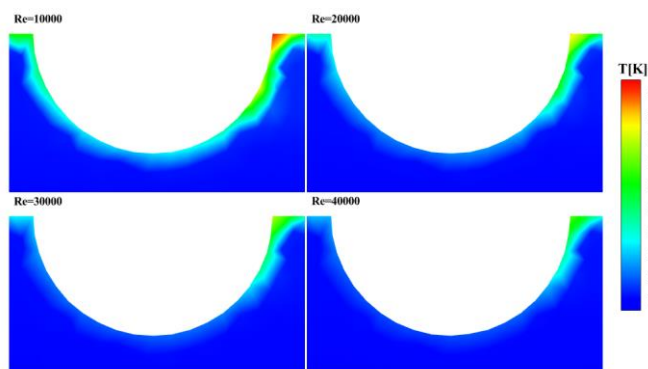
شکل ۱۷- خطوط جریان برای رینولدزهای مختلف در  $a/b=10000$  و  $FI=2\%$



شکل ۱۸- کانتور سرعت محوری در رینولدزهای مختلف برای  $a/b=10000$  و  $FI=2\%$



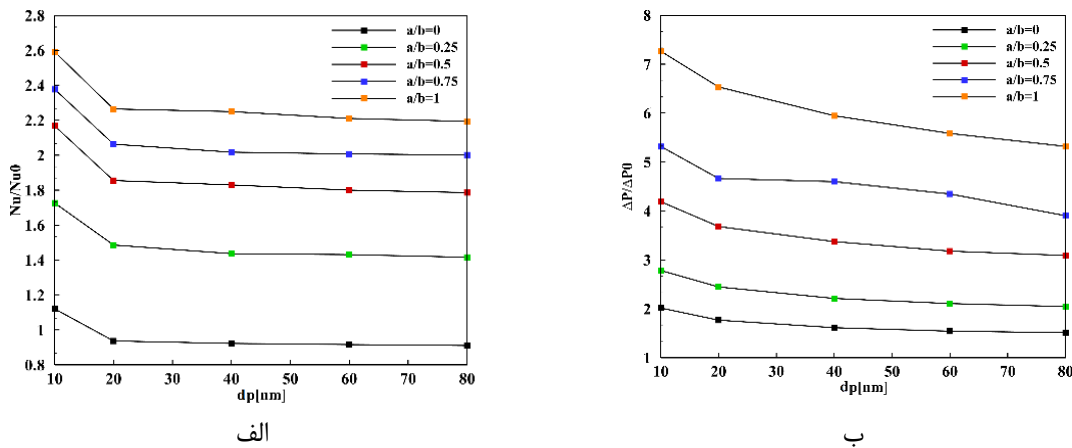
شکل ۱۹- کانتور شدت جریان توربولانسی در رینولدزهای مختلف برای  $a/b=10000$  و  $FI=2\%$



شکل ۲۰- کانتور میدان دما در رینولدزهای مختلف برای  $a/b=10000$  و  $FI=2\%$

### ۶-۷- تاثیر قطر نانوذرات بر میزان انتقال حرارت و افت فشار

در این قسمت تاثیر قطر نانوذرات در نسبت‌های قطری مختلف، کسر حجمی  $FI=2\%$  و  $Re=10000$  بر انتقال حرارت و افت فشار بررسی شده است. با توجه به اینکه، در یک کسر حجمی مشخص با افزایش قطر، تماس و تعداد نانوذرات کاهش می‌یابد لذا، با توجه رابطه ۱۹ ویسکوزیته سیال و همچنین سطح تبادل گرما نیز کاهش می‌یابد و در نتیجه باعث کاهش افت فشار و انتقال حرارت می‌شود. در شکل (۲۱) تغییرات عدد ناسلت و افت فشار برای نسبت‌های قطری مختلف، بر اساس قطر نانوذرات آورده شده است.



شکل ۲۱- الف) تاثیر قطر نانوذرات بر میزان انتقال حرارت ب) تاثیر قطر نانوذرات بر میزان افت فشار

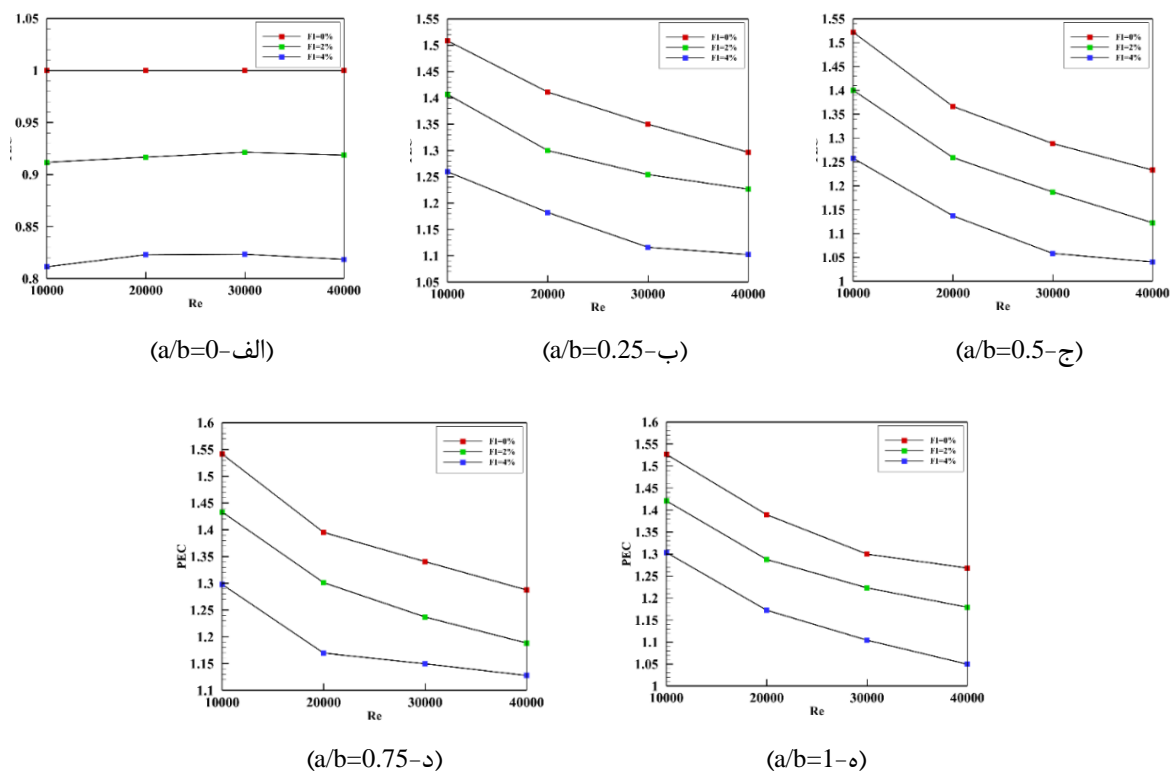


### ۸- مطالعه ضریب عملکرد (PEC)

در شکل (۲۲) می‌توان تغییرات مربوط به ضریب عملکرد را برای هر هندسه در کسر حجمی‌های متفاوت مشاهده نمود. بر اساس رابطه ۱۲، ضریب عملکرد نسبت بهبود انتقال حرارت به افزایش افت فشار می‌باشد. با توجه به شکل (۲۲)، افزایش کسر حجمی باعث کاهش ضریب عملکرد، به دلیل تاثیرگذاری بیشتر افت فشار ناشی از افزایش ویسکوزیته نسبت به بهبود انتقال حرارت ناشی از افزایش ضریب رسانش، شده است. همچنین میزان بهبود انتقال حرارت نسبت به افزایش افت فشار، در یک کسر حجمی معین، از شکل (۲۲-ب) الی (۲۲-ه) با کاهش روبه‌رو شده است. در شکل (۲۲-الف) تغییرات ضریب عملکرد برای  $FI=4\%$  از  $Re=10000$  تا  $Re=20000$  روند صعودی داشته و از  $Re=20000$  تا  $Re=40000$  با کاهش مواجه شده است. این افزایش و کاهش بدلیل این می‌باشد که، از  $Re=10000$  تا  $Re=20000$  بهبود انتقال حرارت نسبت به افزایش افت فشار موثرتر بوده و از  $Re=20000$  تا  $Re=40000$  میزان افزایش افت فشار نسبت به بهبود انتقال حرارت غالب‌تر بوده است.

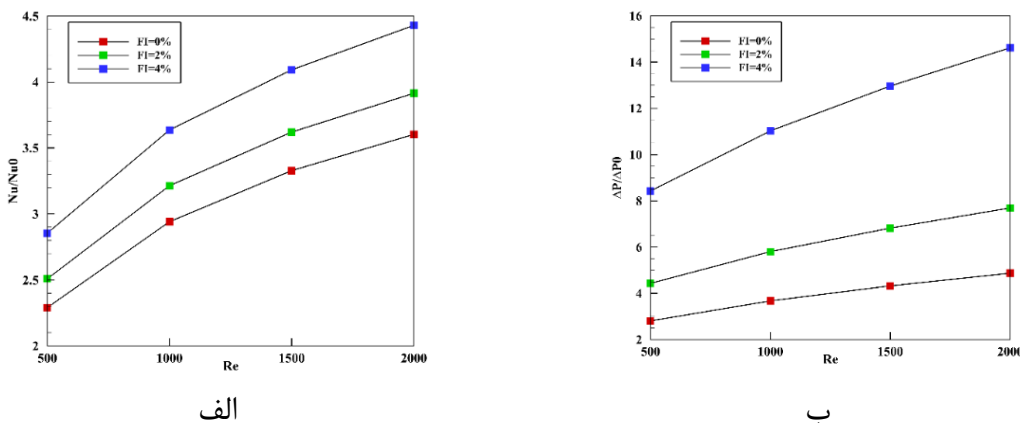
### ۹- مقایسه رژیم جریان آرام و آشفته

در این قسمت تاثیر جریان آرام و آشفته بر انتقال حرارت مقایسه شده است. بررسی انتقال حرارت جریان آرام برای رینولدزهای ۵۰۰، ۱۰۰۰، ۱۵۰۰ و ۲۰۰۰ در کسر حجمی‌های صفر، ۲ و ۴ درصد و برای نسبت قطری  $a/b=1$  انجام شده است. نتایج نشان داده که با افزایش عدد رینولدز در یک کسر حجمی ثابت میزان انتقال حرارت و افت فشار نسبت به مدل پایه ( $a/b=0, FI=0\%$ ) افزایش یافته است. تغییرات نرخ انتقال حرارت و افت فشار جریان آرام در شکل (۲۳) نشان داده شده است.

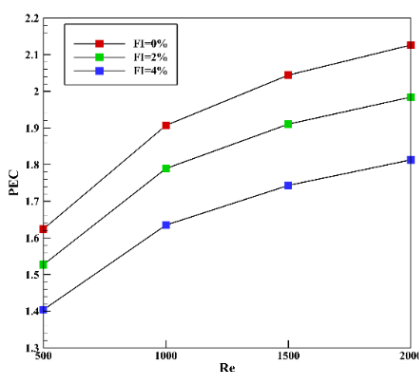


شکل ۲۲- تغییرات ضریب عملکرد برحسب کسر حجمی نانوذرات در یک نسبت قطری مشخص

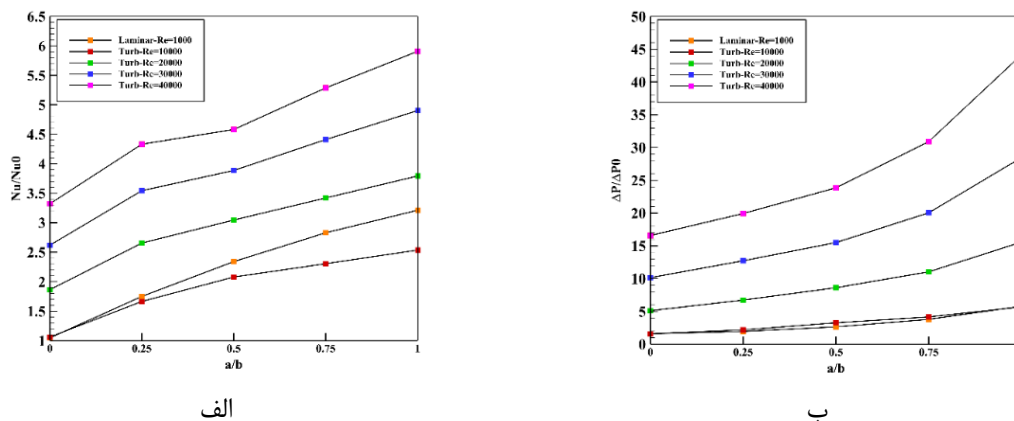
همچنین ضریب عملکرد کانال نیز در این حالت بررسی شده است. نتایج بدست آمده نشان می‌دهد که با افزودن کسر حجمی، در یک رینولدز ثابت، بدلیل اینکه بهبود انتقال حرارت نسبت به افزایش افت فشار کاهش یافته، ضریب عملکرد دچار کاهش شده است. ولی میزان ضریب عملکرد در یک کسر حجمی ثابت با افزایش عدد رینولدز افزایش می‌یابد. در شکل (۲۴) تغییرات ضریب عملکرد برای کسر حجمی‌های گوناگون آورده شده است.



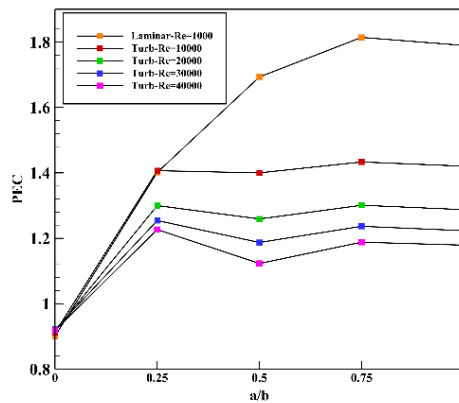
شکل ۲۳- الف) تغییرات عدد ناسلت نسبت به مدل پایه ب) تغییرات افت فشار نسبت به مدل پایه



شکل ۲۴- تغییرات ضریب عملکرد برای مدل  $a/b=1$



شکل ۲۵- الف) تغییرات عدد ناسلت نسبت به مدل پایه برای رژیم جریان آرام و آشسته ب) تغییرات افت فشار نسبت به مدل پایه برای رژیم جریان آرام و آشسته



شکل ۲۶- تغییرات ضریب عملکرد کانال بر حسب نسبت قطری در رژیم جریان آرام و آشفته

نرخ انتقال حرارت و افت فشار، در رژیم جریان آرام، برای کسر حجمی  $FI=2\%$  و  $Re=1000$ ، با رژیم جریان آشفته در کسر حجمی  $FI=2\%$  و در رینولدزهای مختلف مقایسه شده است. باتوجه به شکل (۲۵-الف) و نتایج بدست آمده نشان داده شده که، بکار بردن جریان آرام در  $Re=1000$  در مقایسه با جریان آشفته در  $Re=10000$ ، نرخ انتقال حرارت بالاتری نسبت به مدل پایه (کانال ساده و با کسر حجمی صفر) داشته و در بیشترین حالت، ۲۰ درصد بهبود انتقال حرارت را برای نسبت قطری  $a/b=1$  ثبت کرده است. شکل (۲۵-ب) تغییرات افت فشار نسبت به مدل پایه را نشان می‌دهد. مشخص است که بطور کلی با افزایش نسبت قطری، افت فشار نیز افزایش می‌یابد.

در شکل (۲۶) تغییرات ضریب عملکرد کانال بر حسب نسبت قطری، در رژیم جریان آرام و آشفته آورده شده است. نکته جالب توجه این است که ضریب عملکرد کانال در نسبت‌های قطری  $a/b > 0.25$  برای جریان آرام مقادیر بزرگتری را ثبت کرده است. بدین معنی که استفاده از جریان آرام برای کانال‌هایی با نسبت قطری  $a/b > 0.25$  مناسب‌تر می‌باشد. همچنین با توجه به تغییرات ضریب عملکرد مربوط به جریان آشفته در حداصل  $a/b=0.25$  تا  $a/b=0.5$ ، ضریب عملکرد بدلیل کاهش نسبت بهبود انتقال حرارت به افزایش افت فشار، کاهش یافته و مجدداً تا  $a/b=0.75$  رشد نسبی را تجربه کرده و نهایتاً از  $a/b=0.75$  به بعد دچار کاهش شده است.

## ۱۰- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

همان‌طور که مشاهده شد، این مطالعه اثرات ترکیبی همزمان نانوسیال و انحنای سطح را در رژیم جریان آشفته بصورت جزئی برای متغیرهای مختلفی همچون عدد رینولدز، کسر حجمی، انحنای سطح و قطر نانوذرات بررسی نمود و همچنین نتایج را با رژیم جریان آرام مقایسه کرد. در مطالعات گذشته عموماً بررسی انتقال حرارت سیالات خالص در رژیم‌های آرام و آشفته بصورت جداگانه بررسی شده است. در مواردی نیز مطالعات حول انتقال حرارت نانوسیالات برای پارامترهایی همچون نوع نانوسیال، کسر حجمی و عدد رینولدز بررسی شده است. برجستگی مطالعه حاضر از بابت بررسی و مقایسه جزئی انتقال حرارت جریان آشفته و مقایسه آن با جریان آرام بوده است. هدف از این مطالعه مشخص کردن اینکه در کدام رژیم جریان عملکرد مطلوب‌تری حاصل می‌شود، می‌باشد. مطابق نتایج بدست آمده بطور کلی استفاده از جریان آرام در محدوده رینولدز بالای

۱۰۰۰ می‌تواند عملکرد مطلوب‌تری نسبت به جریان آشفته داشته باشد. در همین راستا نتایج حاصل از این مطالعه عبارتند از:

- (۱) استفاده از دیواره موجی شکل در یک کسرحجمی ثابت باعث افزایش عدد ناسلت و نرخ انتقال حرارت از طریق ایجاد گردابه، افزایش اختلاط و جلوگیری از رشد لایه مرزی در جریان شده است. این میزان افزایش در ماکزیمم حالت ۲/۱ برابر مدل پایه و مربوط به کانال دارای نسبت قطری واحد بوده است.
- (۲) برای نسبت‌های قطری مشخص، نرخ انتقال حرارت با افزایش کسرحجمی نانوسیال رابطه مستقیم داشته و در بالاترین نرخ انتقال حرارت ثبت شده برای مدل‌های متفاوت، مدل  $a/b=1$  در کسرحجمی  $FI=4\%$  دارای بالاترین نرخ انتقال حرارت بوده است.
- (۳) استفاده از دیواره‌های موجی شکل و نانوسیال بترتیب با افزایش تنش برشی روی دیواره و افزایش ویسکوزته و نهایتاً افزایش توان مصرفی پمپ، باعث رشد افت فشار شده‌اند. ماکزیمم افزایش افت فشار ثبت شده برای مدل  $a/b=1$  و به مقدار ۸/۱ برابر مدل پایه بوده است.
- (۴) نتایج مقایسه قطرهای مختلف نانوذرات نشان داده که، هر چقدر در یک کسرحجمی ثابت قطر نانوذرات کمتر شود و یا در واقع مساحت سطح انتقال حرارت افزایش یابد عدد ناسلت رشد می‌کند. در بهترین حالت استفاده از نانوذرات با قطر ۱۰ نانومتر در رینولدز ۱۰۰۰۰ و کسرحجمی ۲ درصد ضریب عملکرد را برای مدل  $a/b=0.75$  در حدود ۳۶ درصد بهبود داده است.
- (۵) باتوجه به شکل (۲۵-الف)، نرخ انتقال حرارت جریان آرام در  $Re=1000$  نسبت جریان آشفته در  $Re=10000$  بالاتر بوده است. در نتیجه استفاده از رژیم جریان آرام در محدوده  $Re=1000$  نسبت جریان آشفته در محدود  $Re=10000$  می‌تواند انتقال حرارت بیشتری فراهم کند.
- (۶) باتوجه به شکل (۲۶) مشخص شد که استفاده از جریان آرام در  $Re=1000$  برای نسبت‌های قطری  $a/b>0.25$ ، نسبت به جریان آشفته در تمامی رینولدزها ضریب عملکرد بالاتری داشته است.

## مراجع

- [1] Peyghambarzadeh, S.M., Hashemabadi, S.H., Seifi Jamnani, M., and Hoseini, S.M., "Improving the Cooling Performance of Automobile Radiator with Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/water Nanofluid", Applied Thermal Engineering, Vol. 31(10), pp. 1833-1838, (2011).
- [2] Ajeel, R.K., Salim, W.-I., and Hasnan, K., "Thermal and Hydraulic Characteristics of Turbulent Nanofluids Flow in Trapezoidal-corrugated Channel: Symmetry and Zigzag Shaped", Case Studies in Thermal Engineering, Vol. 12, pp. 620-635, (2018).
- [3] Reddy, M.C.S., and Rao, V.V., "Experimental Investigation of Heat Transfer Coefficient and Friction Factor of Ethylene Glycol Water based TiO<sub>2</sub> Nanofluid in Double Pipe Heat Exchanger with and without Helical Coil Inserts", International Communications in Heat and Mass Transfer, Vol. 50, pp. 68-76, (2014).
- [4] Naraki, M., Peyghambarzadeh, S.M., Hashemabadi, S.H., and Vermahmoudi, Y., "Parametric Study of Overall Heat Transfer Coefficient of CuO/water Nanofluids in a Car Radiator", International Journal of Thermal Sciences, Vol. 66, pp. 82-90, (2013).

- [5] Peyghambarzadeh, S.M., Hashemabadi, S.H., Naraki, M., and Vermahmoudi, Y., "Experimental Study of Overall Heat Transfer Coefficient in the Application of Dilute Nanofluids in the Car Radiator", *Applied Thermal Engineering*, Vol. 52(1), pp. 8-16, (2013).
- [6] Hussein, Adnan M., Bakar, R.A., Kadirgama, K., and Sharma, K.V., "Heat Transfer Enhancement using Nanofluids in an Automotive Cooling System", *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 53, pp. 195-202, (2014).
- [7] Ali, Hafiz Muhammad, Hassan Ali, Hassan Liaquat, Hafiz Talha Bin Maqsood, and Malik Ahmed Nadir, "Experimental Investigation of Convective Heat Transfer Augmentation for Car Radiator Using ZnO-water Nanofluids", *Energy*, Vol. 84, pp. 317-324, (2015).
- [8] Elias, M.M., Mahbubul, I.M., Saidur, R., Sohel, M.R., Shahrul, I.M., Khaleduzzaman, S.S., and Sadeghipour, S., "Experimental Investigation on the Thermo-physical Properties of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Nanoparticles Suspended in Car Radiator Coolant", *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 54, pp. 48-53, (2014).
- [9] Jalayeri Gharahghonlou, A. and Rezazadeh, S., "Numerical Study of the Effect of Longitudinally Finned Pipes on Heat Exchangers for Heat Transfer and Flow Pattern", *Journal of Mechanical Engineering*, Vol. 51(4), No. 97, pp. 585-592, (2022).
- [10] Hussein, Adnan M., Bakar, R.A., Kadirgama, K., and Sharma, K.V., "Heat Transfer Augmentation of a Car Radiator using Nanofluids", *Heat and Mass Transfer*, Vol. 50(11), pp. 1553-1561, (2014).
- [11] M., Ibrahim, Saeed, T., Bani, F.R., Sedeh, S.N., Chu, Y.-M., and Toghraie, D., "Two-phase Analysis of Heat Transfer and Entropy Generation of Water-based Magnetite Nanofluid Flow in a Circular Microtube with Twisted Porous Blocks under a Uniform Magnetic Field", *Powder Technology*, Vol. 384, pp. 522-541, (2021).
- [12] Izadi, A., Siavashi, M., Rasam, H., and Xiong, Q., "MHD Enhanced Nanofluid Mediated Heat Transfer in Porous Metal for CPU Cooling", *Applied Thermal Engineering*, Vol. 168, pp. 114843, (2020).
- [13] Erdem, M., and Varol, Y., "Numerical Investigation of Heat Transfer and Flow Characteristics of MHD Nano-fluid Forced Convection in a Pipe", *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, Vol. 139(6), pp. 3897-3909, (2020).
- [14] Abdollahi, A., and Shams, M., "Optimization of Shape and Angle of Attack of Winglet Vortex Generator in a Rectangular Channel for Heat Transfer Enhancement", *Applied Thermal Engineering*, Vol. 81, pp. 376-387, (2015).
- [15] Kwak, K., Torii, K., and Nishino, K., "Simultaneous Heat Transfer Enhancement and Pressure Loss Reduction for Finned-tube Bundles with the First or Two Transverse Rows of Built-in Winglets", *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 29(5), pp. 625-632, (2005).

- [16] Joardar, A., and Jacobi, A.M., "Heat Transfer Enhancement by Winglet-type Vortex Generator Arrays in Compact Plain-fin-and-tube Heat Exchangers", *International Journal of Refrigeration*, Vol. 31(1), pp. 87-97, (2008).
- [17] Harikrishnan, S., and Tiwari, S., "Effect of Skewness on Flow and Heat Transfer Characteristics of a Wavy Channel", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 120, pp. 956-969, (2018).
- [18] Mills, Z.G., Warey, A., and Alexeev, A., "Heat Transfer Enhancement and Thermal-hydraulic Performance in Laminar Flows through Asymmetric Wavy Walled Channels", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 97, pp. 450-460, (2016).
- [19] Bailon-Cuba, J., Leonardi, S., and Castillo, L., "Turbulent Channel Flow with 2D Wedges of Random Height on One Wall", *International Journal of Heat and Fluid Flow*, Vol. 30(5), pp. 1007-1015, (2009).
- [20] Chen, X., Lu, J., and Tryggvason, G., "Finding Closure Terms Directly from Coarse Data for 2D Turbulent Flow", *ArXiv Preprint ArXiv*, Department of Mechanical Engineering Johns Hopkins University, MD, USA (2021).
- [21] Figuérez, J.A., Galán, Á., and González, J., "An Enhanced Treatment of Boundary Conditions for 2D RANS Streamwise Velocity Models in Open Channel Flow", *Water*, Vol. 13(7), pp. 1001, (2021).
- [22] Li, H., Pourquie, M.J.B.M., Ooms, G., and Henkes, R.A.W.M., "Simulation of Turbulent Horizontal Oil-water Core-annular Flow with a Low-reynolds Number  $K-\epsilon$  Model", *International Journal of Multiphase Flow*, Vol. 142, pp. 103744, (2021).
- [23] Khanafer, K., Vafai, K., and Lightstone, M., "Buoyancy-driven Heat Transfer Enhancement in a Two-dimensional Enclosure Utilizing Nanofluids", *International Journal of Heat and Mass transfer*, Vol. 46(19), pp. 3639-3653, (2003).
- [24] Corcione, M., "Empirical Correlating Equations for Predicting the Effective Thermal Conductivity and Dynamic Viscosity of Nanofluids", *Energy Conversion and Management*, Vol. 52(1), pp. 789-793, (2011).
- [25] Adibi, O., Rashidi, S., and Esfahani, J.A., "Effects of Perforated Anchors on Heat Transfer Intensification of Turbulence Nanofluid Flow in a Pipe", *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, Vol. 141(5), pp. 2047-2059, (2020).
- [26] Hinnawi, H., Al-abadi, A., and Al-Huniti, N.S., "Effect of Aspect Ratio on Overall Thermal Performance of Forced Convective Heat Transfer Utilizing Turbulent Nanofluid Flow", *Journal of Thermal Science and Engineering Applications*, Vol. 13(4), pp. 041014, (2021).
- [27] Nakhchi, M., and Esfahani, J., "CFD Approach for Two-phase CuO Nanofluid Flow through Heat Exchangers Enhanced by Double Perforated Louvered Strip Insert", *Powder Technology*, Vol. 367, pp. 877-888, (2020).

- [28] Khalil, E.E., and Kaood, A., "Numerical Investigation of Thermal-hydraulic Characteristics for Turbulent Nanofluid Flow in Various Conical Double Pipe Heat Exchangers", AIAA Scitech 2021 Forum, 11–15 & 19–21 January, (2021).
- [29] Incropera, F.P., DeWitt, D.P., Bergman, T.L., and Lavine, A.S., "Fundamentals of Heat and Mass Transfer", Vol. 6, Wiley, New York, (1996).

### فهرست نمادهای انگلیسی

a	فاصله مرکز بخش موجی تا نقطه ماکزیمم انحنای آن (متغیر)
b	طول شعاع بزرگ بخش موجی شکل (ثابت)
c	فاصله دو موج متوالی
$C_f$	ضریب فشار
$C_p$	گرمای ویژه
d	قطر نانوذرات
$D_h$	قطر هیدرولیکی
FI	غلظت نانوسیال
H	ارتفاع کانال
h	ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی
k	ضریب رسانش
L	طول کانال
M	وزن مولکولی سیال پایه
N	عدد آووگادرو
N	عدد ناسلت
u	
P	فشار
Pr	عدد پرنتل
$P^*$	فشار بی بعد
R	عدد رینولدز
e	
T	دما
T	شدت جریان توربولانسی
I	
u	سرعت در راستای x
v	سرعت در راستای y
$q''$	شار حرارتی

**نمادهای یونانی** $\rho$  چگالی $\mu$  ویسکوزیته $\alpha$  ثابت بولتزمن $\tau$  تنش برشی**زیرنویس‌ها**

bf سیال پایه

i, in ورودی

m میانگین

nf نانوسیال

o حالت پایه

out خروجی

p نانوذره

t توربولانسی



**Abstract**

Numerical study of turbulent and laminar flow is investigated for an incompressible nanofluid in a wavy channel by using finite volume method (FVM). The results of the Nusselt number, pressure drop and thermal performance has obtained for diameter ratios, volume concentration and nanoparticle diameters in four Reynolds number. The validation was compared with analytical and numerical studies and shown good convergence. The results showed that using wavy part caused to increasing heat transfer rate and pressure drop by 1.78 and 8.1 times respectively. Additionally, by augmentation of the volume concentration increased the heat transfer rate and pressure drop by 2.1 and 3 times respectively. The use of laminar flow also had a higher thermal performance compared to turbulent flow within the Reynolds 1000 range.