

مدل سازی عددی افزایش بازده حرارتی نانوسیال در کلکتور خورشیدی صفحه تخت مجهز به نوار پیچشی

سید علی فرشاد^۱ و محسن شیخ الاسلامی^{۲*}

اطلاعات مقاله	چکیده
دریافت مقاله: ۹۷/۰۷/۱۷	
پذیرش مقاله: ۹۷/۱۰/۱۸	
واژگان کلیدی: نوار پیچشی، نانوسیال، جریان آشفته، کلکتور خورشیدی صفحه تخت، جابه جایی اجباری.	هدف از این مطالعه افزایش عملکرد حرارتی کلکتور خورشیدی صفحه تخت با قرار دادن نوار پیچشی در داخل لوله آن و استفاده از نانوسیال آب آلومینیوم-اکسید است. استفاده از نوار پیچشی سطح برخورد سیال با دیواره را افزایش می دهد و باعث ایجاد جریان چرخشی می شود. در این بررسی عددی حاضر، نوار پیچشی با ابعاد مختلف، به همراه نانو سیال آب آلومینیوم-اکسید، تحت تاثیر یک شار حرارتی ثابت و در بازه عدد رینولدز ۴۰۰۰ تا ۲۰۰۰۰ مورد ارزیابی قرار گرفته شده است. برای حل عددی این مقاله از نرم افزار تجاری فلوئنت که در آن از مدل توربولانسی k-ε تحقیق پذیر استفاده شده است. با توجه به تست های انجام شده نتایج عددی به این گونه است که قرار دادن نوار پیچشی در کلکتور خورشیدی صفحه تخت باعث ایجاد جریان چرخشی شده و اختلاط سیال را بهبود می بخشد. در نتیجه افزایش نسبت قطر و نسبت پیچش نوار، نرخ انتقال حرارت را بیشتر می کند و از طرفی دیگر افت فشار و به تبع آن ضریب اصطکاک را نیز افزایش می دهد. ضریب عملکرد حرارتی در اعداد رینولدز پایین تر، مقدار بیشتری دارد به طوری که بیشترین مقدار ضریب عملکرد ۱/۰۸ در نسبت قطر ۰/۱۴، نسبت پیچش ۷ و کمترین عدد رینولدز یعنی ۴۰۰۰ است.

۱-مقدمه

منابع انرژی در جهان به دو دسته اصلی انرژی های تجدیدپذیر و ناپذیر تقسیم می شوند. اما بدیهی است که منابع تجدید ناپذیر انرژی علاوه بر مساله اتمامشان، مسائل زیست محیطی بسیاری را ایجاد می کنند. از این رو، روز به روز مساله استفاده از انرژی های نو و پاک بیشتر مطرح و مورد بررسی قرار می گیرند. حال آن که انرژی خورشیدی یکی از پاک ترین و در دسترس ترین انواع انرژی نو می باشد و کلکتورهای خورشیدی راحت ترین روش استفاده از این انرژی پاک می باشد. در کشور ما نیز که از نظر جغرافیایی در مکان مناسبی برای استفاده از انرژی خورشید قرار گرفته نیز مساله استفاده از انرژی خورشیدی روز به روز از اهمیت

بیشتر برخوردار می گردد. بدین جهت تامین بخشی از انرژی گرمایشی خانه ها به وسیله انرژی خورشید، باعث شده که طراحی کلکتورهای خورشیدی با عملکرد بالاتر مورد مطالعه این مقاله قرار گیرد [۱].

امروزه در طراحی مبدل های حرارتی توجه ویژه ای به روش های بهبود انتقال حرارت و بازده حرارتی می شود. این روش ها در زمینه های مختلف مانند تبرید، خودرو، مهندسی هواپیما و فضا، موتورهای احتراق داخلی، پالایش نفت و صنایع غذایی و غیره مورد استفاده قرار گرفته است. هدف از استفاده ی روش های بهبود انتقال حرارت در مبدل های حرارتی، کاهش وزن مبدل، کاهش هزینه، نصب آسان و بیشترین بازده است. یکی از این روش های بهبود انتقال

* پست الکترونیک نویسنده مسئول: Mohsen.sheikholeslami@nit.ac.ir

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل

۲. استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل

پایه افزایش یافت و همچنین این مقادیر با افزایش غلظت ذرات و عدد رینولدز بیشتر شد [۶].

در زمینه آبرگرمکن خورشیدی شبیه‌سازی و تحلیل فنی توسط گزانه و بهشتی نیا در سال (۱۳۹۴) صورت گرفت. آن‌ها با در نظر گرفتن پارامترهای جغرافیایی، طراحی و اقتصادی به شبیه‌سازی و انتخاب مدل مناسب آبرگرمکن خورشیدی کردند و زاویه مناسب برای قرارگیری کلکتور خورشیدی را ارائه نمودند [۷]. همچنین رجبی خانقاهی و همکاران در سال (۱۳۹۶) پارامترهای طراحی آبرگرمکن خورشیدی از جمله زوایای کلکتورها، سطح آنها و حجم مخزن ذخیره را با در نظر گرفتن الگوی مصرف به طور همزمان بهینه‌سازی کردند [۸].

پژوهش‌های عددی و آزمایشگاهی مختلفی در زمینه نوار پیچشی صورت گرفته است. ایمنسا و کیاتکتیپانگ در سال (۲۰۱۴) مطالعه تجربی و عددی افزایش انتقال حرارت با قرار دادن نوار پیچشی چندگانه در جریان نانوسیال آب و نانو ذرات دی‌اکسیدتیتانیوم انجام دادند. این مطالعه در کسر حجمی‌های مختلف صورت گرفت. افزایش تعداد نوار-ها، باعث افزایش عملکرد حرارتی سیستم شد. نویسندگان علت بهبود عملکرد را جریان چرخشی و گردابه‌های طولی ایجاد شده به وسیله نوار پیچشی می‌دانند [۹]. سها و همکاران در سال (۲۰۱۱) از نوار پیچشی به صورت یکپارچه و با فاصله برای بهبود انتقال حرارت استفاده کردند. آن‌ها این‌گونه نتیجه گرفتند که اگر نوار با فاصله در داخل لوله قرار گیرد انتقال حرارت و ضریب اصطکاک کاهش می‌یابد [۱۰]. ریوس‌ایریبل و همکاران در سال (۲۰۱۵) با مطالعه بر روی نوار پیچشی در رینولدزهای پایین به این نتیجه دست یافتند که نوار جریان چرخشی ایجاد می‌کند و این عامل باعث افزایش گرادیان سرعت در اطراف دیواره لوله می‌شود که انتقال حرارت را بهبود می‌بخشد [۱۱]. جیسانکار و همکاران در سال (۲۰۰۹) انتقال حرارت یک آبرگرمکن خورشیدی با قرار دادن نوار پیچشی را مورد آزمایش قرار دادند. دو نوع نوار در این پژوهش آزمایشگاهی بررسی شد؛ نوار با فاصله از زانویی لوله و نوار به همراه یک زانوده میله‌ای. نتیجه نشان داد نوار پیچشی با میله ضریب عملکرد بهتری دارد [۱۲]. ایمنسا و همکاران در سال (۲۰۱۵) انتقال حرارت را در نوار پیچشی دوگانه با گام‌های مختلف به صورت عددی و آزمایشگاهی مورد مطالعه قرار دادند. نتایج نشان داد که هرچه مقدار گام کمتر باشد، شدت

حرارت، قرار دادن نوار پیچشی در داخل لوله است. اما باید به این نکته توجه داشت که معمولاً این روش ضریب اصطکاک را تا حد زیادی افزایش می‌دهد. بنابراین یکی از محدودیت‌ها، افت فشار است که باید مورد ارزیابی قرار گیرد. نوار پیچشی که برای کاربرد عملی مناسب است، باید بین افزایش انتقال حرارت و افزایش افت فشار سازش خوبی داشته باشد. بنابراین طراحی نوار پیچشی از این حیث حائز اهمیت است [۲].

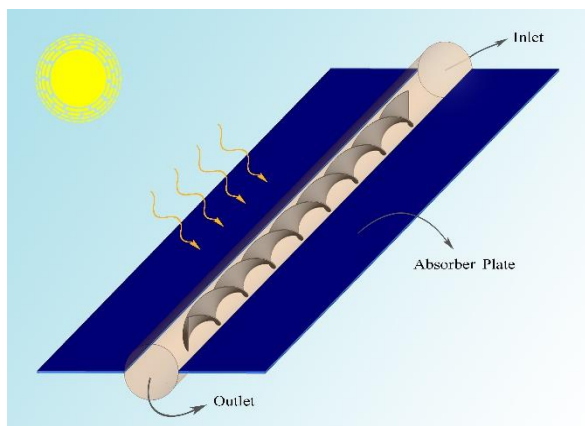
یکی دیگر از توسعه‌های مهم در زمینه افزایش انتقال حرارت در دهه گذشته، افزودن ذرات نانو به سیال است. اصطلاح "نانوسیال" مخلوطی از یک سیال پایه و نانوذره است که توسط چوی در سال (۱۹۹۵) معرفی شد. نانوذرات Cu ، Al ، SiO_2 ، CuO ، TiO_2 ، Al_2O_3 (فلزات) معمولاً در کاربردهای صنعتی مورد استفاده قرار می‌گیرند. این نانوذرات توسط یکی از دو فرآیند، شیمیایی و فیزیکی تهیه می‌شود. سیال پایه حاوی نانوذرات، آب خالص، اتیلن گلیکول-آب و آب-روغن موتور است. کسر حجمی نانوسیال‌ها به طور معمول از ۱٪ تا ۵٪ برای رسیدن به خواص موثر هدایت حرارتی و ویسکوزیته می‌باشد [۳]. مدل ریاضی برای حل این سیال دو نوع می‌باشد: مدل تک فاز و دو فاز که در ادامه به مدل تک فاز اشاره خواهد شد. ضیائی راد و بیگی هرچگانی در سال (۱۳۹۶) مطالعه عددی در زمینه انتقال حرارت و افت فشار بر در جریان اجباری نانوسیال داخل لوله دندانه‌دار انجام دادند. آن‌ها به این نتیجه دست یافتند که اگر میزان نانوذرات در سیال پایه افزایش یابد توسعه یافتگی حرارتی سریع‌تر اتفاق افتاده و در نتیجه انتقال حرارت افزایش می‌یابد [۴]. گورکی و بیگی در سال (۱۳۹۷) مطالعه عددی بر روی یک کانال حاوی ذرات کروی شکل برای انتقال حرارت جابجایی اجباری نانوسیال انجام دادند. نتایج حاصله به این صورت بود که استفاده از نانوسیالات موجب بهبود انتقال حرارت در کانال می‌شود و با افزایش عدد رینولدز از میزان تأثیر نانوسیالات بر میزان انتقال حرارت کاسته می‌شود [۵]. شریفی اصل و همکاران در سال (۱۳۹۷) شبیه‌سازی عددی بر روی یک جریان مغشوش غیرنیوتنی نانوسیال را در یک لوله افقی مدور انجام دادند. در این مطالعه اثر استفاده از نانوذرات بر ضریب انتقال حرارت در عدد رینولدزهای مختلف بررسی شد. نتایج به این صورت بود که ضریب انتقال حرارت و عدد ناسلت با افزودن ذرات نانو به سیال

دارد [۲۰-۲۲]. آزمایشی توسط هنگ و همکاران در سال (۲۰۱۷) جهت بررسی انتقال حرارت و جریان سیال در لوله مارپیچی به همراه نوار پیچشی در نسبت‌های مختلف صورت گرفت. آن‌ها به این نتیجه دست یافتند که بیشترین ضریب عملکرد حرارتی ۱/۰۷ است و در بیشترین نسبت پیچشی حاصل می‌شود [۲۳]. فرنام و همکاران در سال (۲۰۱۸) مطالعه آزمایشگاهی بر روی لوله و نوار مارپیچی انجام دادند. با پیچشی کردن نوار و لوله میزان عدد ناسلت و ضریب اصطکاک افزایش یافت. بیشترین مقدار ضریب عملکرد در حالتی به وجود آمد که عدد رینولدز در پایین‌ترین مقدار است [۲۴]. عابد و همکاران در سال (۲۰۱۸) مطالعه عددی بر روی یک لوله تحت شار حرارتی ثابت به همراه نوار پیچشی معمولی و برشی وی شکل انجام دادند. نوار پیچشی برشی انتقال حرارت بیشتری نسبت به حالت معمولی دارد و به طور کلی افزودن نوار پیچشی به لوله، انتقال حرارت را افزایش می‌دهد و عملکرد حرارتی را بهبود می‌بخشد [۲۵]. کنگ کی و همکاران در سال (۲۰۱۸) تاثیرات نوار پیچشی در داخل لوله مثلی شکل و نانوسیال را مورد بررسی آزمایشگاهی قرار دادند. افزودن نانوسیال و قرار دادن نوار پیچشی در داخل لوله منجر به افزایش نرخ انتقال حرارت شد [۲۶]. جعفریار و همکاران در سال ۲۰۱۸ با افزودن ذرات نانو اکسید مس و مجهز کردن مبدل حرارتی به نوار پیچشی، نشان دادند که میزان انتقال حرارت افزایش می‌یابد و با افزایش مقدار قطر نوار و کاهش گام بر این میزان افزوده می‌شود [۲۷].

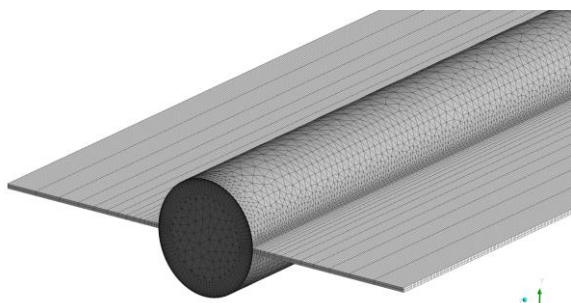
همان‌طور که مطالعات پیشین نشان داد نتایج عددی، مورد تایید بررسی‌های آزمایشگاهی در زمینه استفاده از نوارهای پیچشی است و نوار پیچشی یکی از ابزارهای مفیدی است که در زمینه افزایش انتقال حرارت می‌توان از آن استفاده کرد. در سال‌های اخیر، با توجه به نیاز استفاده از انرژی‌های پاک خصوصاً انرژی‌های خورشیدی، پژوهش‌هایی در این زمینه در حال انجام است. هدف از این مطالعه، تاثیر نوارهای پیچشی با نسبت‌های هندسی مختلف یعنی نسبت پیچش و قطر در کلکتور خورشیدی صفحه تخت است. در این مطالعه، نوار پیچشی به صورت کامل بدون ساده‌سازی با شرط تکراری^۱ و همچنین صفحات جاذب نیز به منظور بررسی دقیق‌تر کلکتور نسبت به حالت واقعی در نظر گرفته

جریان چرخشی و انرژی جنبشی آشفته‌تری بیشتر شده و در نتیجه انتقال حرارت افزایش می‌یابد. افزودن نانو ذرات و افزایش کسرحجمی باعث افزایش ضریب انتقال حرارت هدایتی می‌شود که در مجموع انتقال حرارت و بازده بیشتر می‌شود [۱۳]. ایسما و پرومونگ در سال (۲۰۱۰) افزایش انتقال حرارت در سه مدل مختلف نوار پیچشی با زوایای پیچیده شده ۳۰، ۶۰ و ۹۰ درجه، به صورت ساعت‌گرد و پادساعت‌گرد مورد آزمایش قرار دادند. نتایج نشان می‌دهد با افزایش زاویه پیچش، انتقال حرارت بیشتر می‌شود و همچنین چرخش ساعت‌گرد و پادساعت‌گرد نسبت به حالت معمولی عملکرد بهتری دارد [۱۴]. موروگسان و همکاران در سال (۲۰۱۱) آزمایشی بر روی نوار پیچشی با برش‌های مربعی انجام دادند. برش‌های مربعی باعث شد که این مدل از نوار، نسبت به حالت نرمال خود کارآمدتر باشد [۱۵]. نوار پیچشی معمولی و لبه پیچشی مورد مطالعه آزمایشگاهی ژانگ و چنگ در سال (۲۰۱۲) قرار گرفت. آن‌ها دریافتند که اگر لبه پیچشی باشد انتقال حرارت و افت فشار افزایش می‌یابد [۱۶]. راثو و راجینی در سال (۲۰۱۶) بر روی نوار پیچشی به همراه دیسک آزمایش کردند. پهنا، گام، طول مختلف نوار، قطر و فاصله دیسک مورد ارزیابی آن‌ها قرار گرفت. کاهش فاصله دیسک و گام نوار، افزایش طول نوار و پهنا و قطر دیسک عواملی هستند که باعث افزایش انتقال حرارت در آزمایش شده‌اند [۱۷]. آزمایش تجربی بر روی یک مبدل حرارتی به همراه نوار پیچشی در جریان آرام توسط لیم و همکاران در سال (۲۰۱۷) صورت گرفت. آن‌ها جریان ثانویه ایجاد شده توسط نوار پیچشی را علت افزایش عملکرد حرارتی می‌دانند [۱۸]. با قرار دادن نوار پیچشی در لوله‌ی آبگرمکن خورشیدی آزمایشی را ساروانان و همکاران در سال (۲۰۱۶) انجام دادند. نویسندگان این مطالعه تجربی به جای استفاده از نوار پیچشی عادی، از نواری با برش مربعی و وی شکل استفاده نمودند. نتایج ارائه شده نشان می‌دهد که انتقال گرما در نوار بریده شده وی شکل، بیشتر از برش مربعی است [۱۹]. سلمان و همکاران در سال (۲۰۱۳) مطالعه عددی بر روی لوله با نوار پیچشی بافل دار، برش وی شکل و برش مربعی انجام دادند. نتیجه آزمایش‌های مختلف به این صورت بود که در تمامی حالات، نوار پیچشی نسبت به حالت نرمال خود انتقال حرارت بیشتری

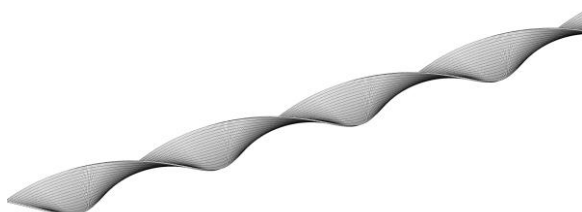
¹ Periodic



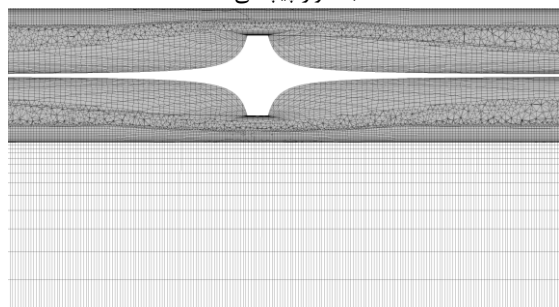
شکل ۱- هندسه مسئله و شرایط مرزی



الف- نمای کلی



ب- نوار پیچشی



ج- برش عرضی لوله و صفحه جاذب (نمای بالا)

شکل ۲- نمونه‌ای از شبکه بندی مسئله حاضر

۲-۱- شبکه بندی هندسه

شکل (۲) شبکه بندی محاسباتی را برای هندسه مورد مطالعه نمایش می‌دهد. برای مش بندی از نرم افزار Meshing انسیس استفاده گردید. برای صفحات جاذب و نوار پیچشی از مش های سازمان یافته و برای دامنه محاسباتی سیال به دلیل هندسه استوانه ای شکل از مش

شده است. شبیه سازی به صورت ۳ بعدی است تا حل جریان آشفته بیشتر به واقعیت نزدیک باشد. کانتورهای خطوط جریان، بردار سرعت، دما و انرژی جنبشی آشفتگی برای درک بهتر انتقال حرارت و تفسیر نتایج گزارش شده است.

۲- هندسه مورد مطالعه و شرایط مرزی

در شکل (۱) هندسه مسئله مشاهده می‌شود. طول لوله در کلکتورهای خورشیدی صفحه تخت ۲ متر و قطر لوله متناسب با استانداردهای موجود ۱ اینچ معادل ۲۵ میلی متر فرض می‌شود. در این مطالعه عدد رینولدز بین بازه ۴۰۰۰ الی ۲۰۰۰۰ مورد بررسی قرار می‌گیرد. نوار پیچشی به طول ۱/۵ متر و ضخامت ۰/۵ میلی متر در داخل لوله قرار گرفته شده است. نوار پیچشی با نسبت پیچش (N) ۴، ۵، ۶ و ۷، نسبت قطر (D^*) ۰/۰۱، ۰/۰۱۲ و ۰/۰۱۴ مورد شبیه سازی قرار گرفت. متغیرهای بی بعد هندسی به صورت زیر تعریف شده اند:

نسبت پیچش، نسبت طول نوار پیچشی به گام پیشروی و نسبت قطر همان نسبت قطر نوار به طول آن است که به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$N = \frac{L_t}{P_i t} \quad (1)$$

$$D^* = \frac{D_t}{L_t} \quad (2)$$

ورودی و خروجی لوله در شکل (۱) مشخص شده است. ورودی لوله سرعت و دمای یکنواخت برای نانوسیال و خروجی لوله فشار نسبی صفر اعمال شده است. بدیهی است که شار ساطع شده از خورشید در هر ساعات مختلف متغیر است اما به خاطر کاهش حجم محاسبات و بررسی عملکرد نوار پیچشی، برای صفحات جاذب و قسمت بالای لوله شرط مرزی توزیع یکنواخت شار حرارتی در نظر گرفته شده است. میزان شار در نظر گرفته شده برای حل 900 w/m^2 می‌باشد که این عدد با توجه به متوسط تابش خورشید در نظر گرفته شده است. سطح لوله و نوار پیچشی دارای شرط عدم لغزش می‌باشند. همچنین برای سطح نوار پیچشی شرط مرزی کوپل در نظر گرفته شده است تا انتقال حرارت بین سیال و نوار پیچشی و طرفی دیگر از انتقال حرارت هدایتی در جسم جامد صرف نظر نشود. سیال غیرقابل تراکم و پایا فرض می‌شود. سیال پایه مورد استفاده در این مقاله آب و از ذرات نانو آلومینیم-اکسید و جنس لوله و نوار پیچشی آلومینیوم می‌باشند.

به همین ترتیب رابطه نرخ اضمحلال (ε) نیز نوشته می‌شود:

$$\nabla \cdot (\rho_{eff} \mathbf{u} \varepsilon) = \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \nabla \varepsilon \right] \quad (6)$$

$+C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} G_k - C_{2\varepsilon} \rho_{eff} \frac{\varepsilon^2}{k}$
 $\rho \varepsilon$ نرخ اضمحلال و G_k نرخ تولید انرژی جنبشی آشفتگی است و به این صورت حاصل می‌شود:

$$G_k = \tau \nabla \mathbf{u}^T \quad (7)$$

ضرایب ثابت $C_{1\varepsilon} = 1.44$, $C_{2\varepsilon} = 0.09$, $C_\mu = 0.09$, $\sigma_k = 1.0$, $\sigma_\varepsilon = 1.3$ در معادلات انتقال جریان آشفتگی قرار دارند.

معادلات حاکم به منظور شبیه سازی عددی برای کلکتور خورشیدی صفحه تخت و قرار دادن نوار پیچشی در لوله آن با استفاده از روش حجم محدود گسسته سازی و الگوریتم سیمپل حل می‌شود. در شبیه سازی عددی فشار استاندارد و از طرح بالادست مرتبه اول برای معادلات حرکت و انرژی استفاده می‌شود. کوپلینگ فشار و سرعت با استفاده از الگوریتم سیمپل صورت می‌گیرد. معیار همگرایی برای تمامی معادلات به جز انرژی 10^{-5} و معادله انرژی 10^{-9} می‌باشد.

۳-۳- معادلات حاکم بر خواص نانو سیال تک فاز

در سال‌های گذشته، در مباحث مربوط به انتقال حرارت توجه ویژه‌ای به نانوذرات شده است. در روش تک فاز تغییری در معادلات بقا ایجاد نمی‌شود و از لغزش بین نانوذرات و سیال پایه صرف نظر می‌شود اما خواص ظاهری سیال دستخوش تغییر می‌شود. خواص ترموفیزیکی نانو سیال‌ها عمدتاً به خواص سیال پایه و ذرات جامد نانو، مقدار کسر حجمی در تعلیق و شکل ذرات بستگی دارد. در این مطالعه از وابستگی خواص به دما صرف نظر می‌شود. خواص نانوسیال‌ها را می‌توان با استفاده از روابط موجود محاسبه کرد [۳۰]:

$$k_{nf} = k_f \left[\frac{k_p + (SH - 1)k_f}{k_p + (SH - 1)k_f + \phi(k_f - k_p)} \right] \quad (8)$$

$$\frac{(SH - 1)\phi(k_f - k_p)}{k_p + (SH - 1)k_f + \phi(k_f - k_p)}$$

$$\mu_{nf} = \mu_f (1 + 2.5\phi) \quad (9)$$

$$\rho_{nf} = \rho_f (1 - \phi) + \rho_p \phi \quad (10)$$

بی‌سازمان استفاده شد. با توجه به آشفتگی بودن جریان، در نزدیکی به دیواره لوله و نوار پیچشی از مش لایه مرزی استفاده شده است تا بتوان با دقت بیشتری این نواحی را مدل سازی نمود. بدین منظور برای بدست آوردن مقادیر مرزی نزدیک دیواره از تابع بهبود یافته دیواره استفاده شده است در نتیجه شبکه بندی اطراف دیواره باید به گونه‌ای باشد که $y+$ تقریباً برابر ۱ باشد.

۳- معادلات حاکم

۳-۱- معادلات حاکم بر سیال

شبیه سازی عددی به صورت سه بعدی از جریان سیال و انتقال حرارت و اثرات نوار پیچشی بر روی پارامترهای مختلف مورد بررسی قرار گرفت. برای حل معادلات حاکم بر جریان چرخشی سیال و لایه مرزی فرضیاتی در نظر گرفته شد: (۱) جریان پایا؛ (۲) جریان آشفتگی و تراکم ناپذیر؛ (۳) خواص سیال ثابت و (۴) از عبارات‌های جابه‌جایی آزاد و تشعشع صرف نظر شده است. بر اساس فرضیات ذکر شده، معادلات پیوستگی، بقای ممنتوم و انرژی برای سیال لزج و غیر قابل تراکم در غیاب نیروهای خارجی به ترتیب در معادلات (۱)، (۲) و (۳) آورده شده است [۲۸].

$$\nabla \cdot (\rho_{eff} \mathbf{u}) = 0 \quad (1)$$

$$\nabla \cdot (\rho_{eff} \mathbf{u} \mathbf{u}) = -\nabla p + \nabla \cdot (\tau) \quad (2)$$

$$\nabla \cdot (\mathbf{u} \rho_{eff} c_{p,eff} T) = \nabla \cdot (k_{eff} \nabla T + \tau \cdot \mathbf{u}) \quad (3)$$

در معادلات بالا، \mathbf{u} بردار سرعت، ρ_{eff} چگالی موثر سیال، p فشار، $c_{p,eff}$ گرمای ویژه موثر سیال، k_{eff} ضریب هدایت حرارتی موثر، τ تانسور تنش برشی و T دما است. تانسور تنش برشی از معادله (۴) بدست می‌آید:

$$\tau = \mu_{eff} \left(\nabla \mathbf{u} + \nabla \mathbf{u}^T - \frac{2}{3} \nabla \cdot \mathbf{u} \mathbf{I} \right) \quad (4)$$

که μ_{eff} لزجت موثر و \mathbf{I} تانسور واحد است.

۳-۲- معادلات حاکم بر سیال

در این مطالعه از مدل جریان آشفتگی $k-\varepsilon$ تحقق پذیر استفاده شده است. برای این مدل از شبیه‌سازی، انرژی جنبشی آشفتگی (k) به این صورت نوشته می‌شود [۲۹]:

$$\nabla \cdot (\rho_{eff} \mathbf{u} K) = \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \nabla k \right] \quad (5)$$

$$+G_k - \rho \varepsilon$$

قانون نیوتن $h = \dot{q}/(T_w - T_b)$ استفاده می شود. روابط ضریب عملکرد حرارتی برای لوله با نوار پیچشی، با استناد بر مطالعات انجام شده توسط وب به صورت رابطه ۱۶ نوشته می شود [۳۱]:

$$\eta = \frac{(Nu / Nu_p)}{(f / f_p)^{1/3}} \quad (16)$$

۴- بحث و نتایج

۴-۱- استقلال از شبکه محاسباتی

برای بررسی استقلال از شبکه، بحرانی ترین حالت هندسی یعنی $D^* = 0.14$ و نسبت پیچش ۷، در عدد رینولدز ۲۰۰۰۰ و با نانوسیال آب آلومینیوم-اکسید در کسر حجمی ۳٪ مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج استقلال از شبکه در جدول ۲ آورده شده است. R_{Nu} نشان دهنده اختلاف نسبی است و به این صورت بیان می گردد: $R_{Nu} = (Nu - Nu_{baseline}) / Nu_{baseline}$ و به طور مشابه نیز برای f تعریف می شود. با توجه به جدول شماره ۲ و بررسی خطای نسبی، از مش نوع ریز که حدوداً ۷ میلیون سلول برای تمامی حالات هندسی مختلف دارد استفاده می شود.

جدول ۲- نتایج استقلال از شبکه محاسباتی

نوع مش	تعداد شبکه	ناسلت (Nu)	ضریب اصطکاک (f)	R_{Nu}	R_f
درشت	۱,۵۷۴,۱۹۵	۲۴۸/۷۸	۰/۰۶۱۸۴۷	۴۴/۱۰	۸/۱۹
متوسط	۴,۵۴۰,۸۸۳	۲۱۶/۶۸	۰/۰۵۸۵۸۶	۲۴/۳۵	۲/۴۸
ریز	۶,۹۳۵,۱۵۰	۱۷۲/۷۲	۰/۰۵۸۰۳۰	۰/۰۰۴	۰/۵۱
بسیار ریز	۹,۸۴۷,۸۷۵	۱۷۲/۶۹	۰/۰۵۷۸۷۴	۰/۰۰۲	۱/۲۴
حالات پایه	۱۲,۹۸۹,۴۴۰	۱۷۲/۶۴	۰/۰۵۷۱۶۴	-	-

۴-۲- اعتبارسنجی

به منظور اعتبارسنجی از مقاله ای که توسط کیم و همکاران در سال ۲۰۰۹ منتشر گردیده و برای حالت جریان آشسته عدد رینولدز ۴۶۰۰ با نانوسیال آب آلومینیوم-اکسید در کسر حجمی ۳ درصد استفاده شده است. لوله تحت شار حرارتی ثابت قرار داشت. همان طور که در شکل (۳) پیداست اختلاف قابل قبولی برای حل عددی حاضر در مقایسه با نتایج آزمایشگاهی دارد [۳۲].

۴-۳- صحت روش عددی

پیش از شبیه سازی کلکتور خورشیدی صفحه تخت مجهز

$$(\rho C_p)_{nf} = (\rho C_p)_f (1 - \phi) + (\rho C_p)_p \phi \quad (11)$$

SH نیز فاکتور شکل ذره ی جامد نانو است و به این صورت تعریف می شود:

$$SH = \frac{3}{\psi} \quad (12)$$

که ψ حالت کروی به عنوان نسبت مساحت یک کره به حجمی برابر با ذره به سطح ذره تعریف شده و برای ذرات کروی $SH = 3$ است. ϕ کسر حجمی، اندیس p ، f و nf به ترتیب برای نانوذرات، سیال پایه و نانوسیال به کار می رود. در این مقاله از نانوسیال آلومینیوم اکسید با کسر حجمی ۳٪ برای حل استفاده شده که در جدول ۱ خواص مربوط به سیال پایه و نانوذرات آلومینیوم اکسید در دمای ۲۰ درجه سانتیگراد گردآوری شده است.

جدول ۱- خواص ترموفیزیکی آب و نانوذره [۳۰]

مشخصات فیزیکی	آب (فاز مایع)	Al_2O_3
Cp (J/KgK)	۴۱۸۱/۸	۷۶۵
ρ (kg/m ³)	۹۹۸/۲	۳۹۰۰
k (W/mK)	۰/۶۰	۳۰
μ (kg/ms)	۰/۰۰۱۰۰۳	-

۳-۳- پارامترهای شبیه سازی

ارزیابی افزایش انتقال حرارت شامل پارامترهای بی بعد؛ عدد رینولدز، ضریب اصطکاک، عدد ناسلت و ضریب عملکرد حرارتی است. عدد رینولدز (Re) را به صورت زیر می توان بیان نمود:

$$Re = \frac{\rho u D}{\mu} \quad (13)$$

که در آن u سرعت ورودی لوله است. معادله ضریب اصطکاک را نیز می توان به صورت زیر تعریف کرد:

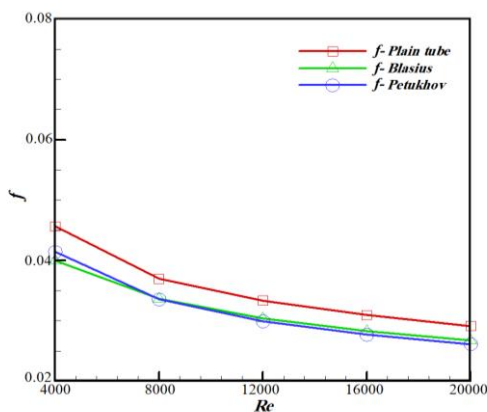
$$f = \frac{2D \Delta P}{\rho L u^2} \quad (14)$$

L و D به ترتیب طول و قطر لوله و ΔP اختلاف فشار ورودی و خروجی لوله می باشد. عدد ناسلت را می توان با استفاده از رابطه ۱۵ بدست آورد:

$$Nu = \frac{hD}{k_{nf}} \quad (15)$$

در مطالعه حاضر، لوله تحت تاثیر شار حرارتی ثابت قرار دارد. برای بدست آوردن مقدار ضریب انتقال حرارت از

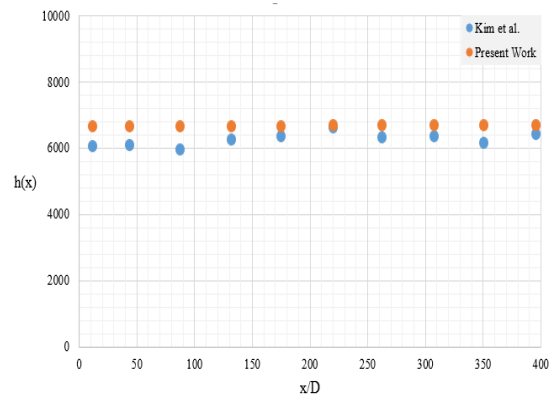
نرسیده است، فقط جریان محوری در سیال وجود دارد. اما به محض برخورد با نوار پیچشی، ساختار جریان به صورت محوری و چرخشی در می‌آید.



شکل ۳-ب) ضریب اصطکاک

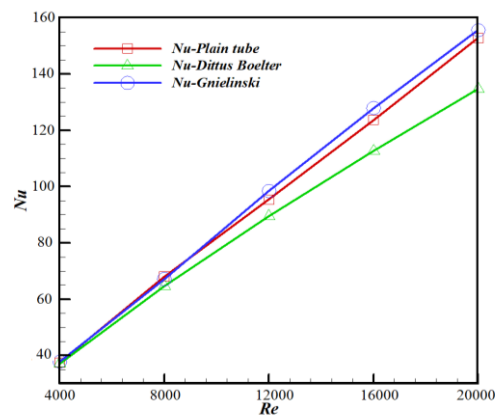
شکل ۴- اختلاف عدد ناسلت و ضریب اصطکاک برای لوله خالی بر حسب عدد رینولدز در روش‌های مختلف بنابراین، جریان‌های چرخشی ایجاد شده سیال را به مناطق نزدیک دیواره منتقل می‌کند و منجر به اختلال شدید لایه مرزی حرارتی می‌شود. پس از طی کردن مسیر در انتهای لوله، سیال همچنان حالت چرخشی خود را تا حدودی حفظ می‌کند. در شکل‌های (۵) و (۶) علاوه بر بردار سرعت، توزیع سرعت مماسی برای مقاطع طولی مختلف را نیز نشان داده است. به دلیل اعمال شرط عدم لغزش، در فاصله بسیار نزدیک دیواره سرعت برابر صفر و با حرکت به سمت دیواره سرعت افزایش می‌یابد. در اعداد رینولدز بالا، قسمت‌های بیشتری از مقطع، دارای سرعت مماسی بالاتری هستند. با کاهش مقدار D^* سرعت مماسی کاهش می‌یابد که نشان دهنده نقش نوار پیچشی در ایجاد سرعت مماسی است. همان طور که پیداست با حرکت به سمت جلو یعنی در ناحیه‌های دورتر از ورودی سیال، بیشتر مناطق دارای مناطق کم سرعت است. انرژی جنبشی آشفتگی در مقاطع و حالت‌های مختلف در شکل‌های (۷) و (۸) مشاهده می‌شود. واضح است که با افزایش عدد رینولدز این انرژی بیشتر می‌شود. هرچه مقدار D^* بیشتر یعنی فضای خالی بین نوار پیچشی و دیواره لوله کمتر باشد، جریان ثانویه و چرخشی بیشتری تشکیل می‌شود که این عامل بیانگر افزایش مقدار انرژی جنبشی آشفتگی است.

به نوار پیچشی، نتایج برای لوله خالی با روابط استاندارد بدست آمده توسط اینکروپرا و همکاران در سال (۲۰۰۶) مقایسه می‌شود.



شکل ۳- مقایسه نتایج بین شبیه‌سازی عددی و داده- آزمایشگاهی

شکل (۴) عدد ناسلت با رابطه گنیلیسکی^۱ و دیتوس-بولتر^۲ برای بازه رینولدز از ۴۰۰۰ تا ۲۰۰۰۰ نشان داده شده است که به ترتیب میانگین ۰.۲٪ و ۰.۶٪ با روش عددی حاضر اختلاف دارد. علاوه بر این، ضریب اصطکاک بدست آمده در روش عددی با معادلات بلازیوس^۳ و پتوخوف^۴ مقایسه شده که هر دو حدوداً ۰.۹٪ تفاوت دارند [۳۳].



شکل ۴-الف) عدد ناسلت

۴-۴ ساختار جریان، توزیع انرژی جنبشی آشفتگی و دما

شکل‌های (۵) و (۶) به ترتیب ساختار و خطوط جریان را در عدد رینولدز ۴۰۰۰ و ۲۰۰۰۰ برای نسبت پیچش ۴ و ۷، نسبت قطر ۰/۰۱ و ۰/۰۱۴ نمایش می‌دهند. زمانی که جریان سیال هنوز به نوار پیچشی

¹ Gnielinski

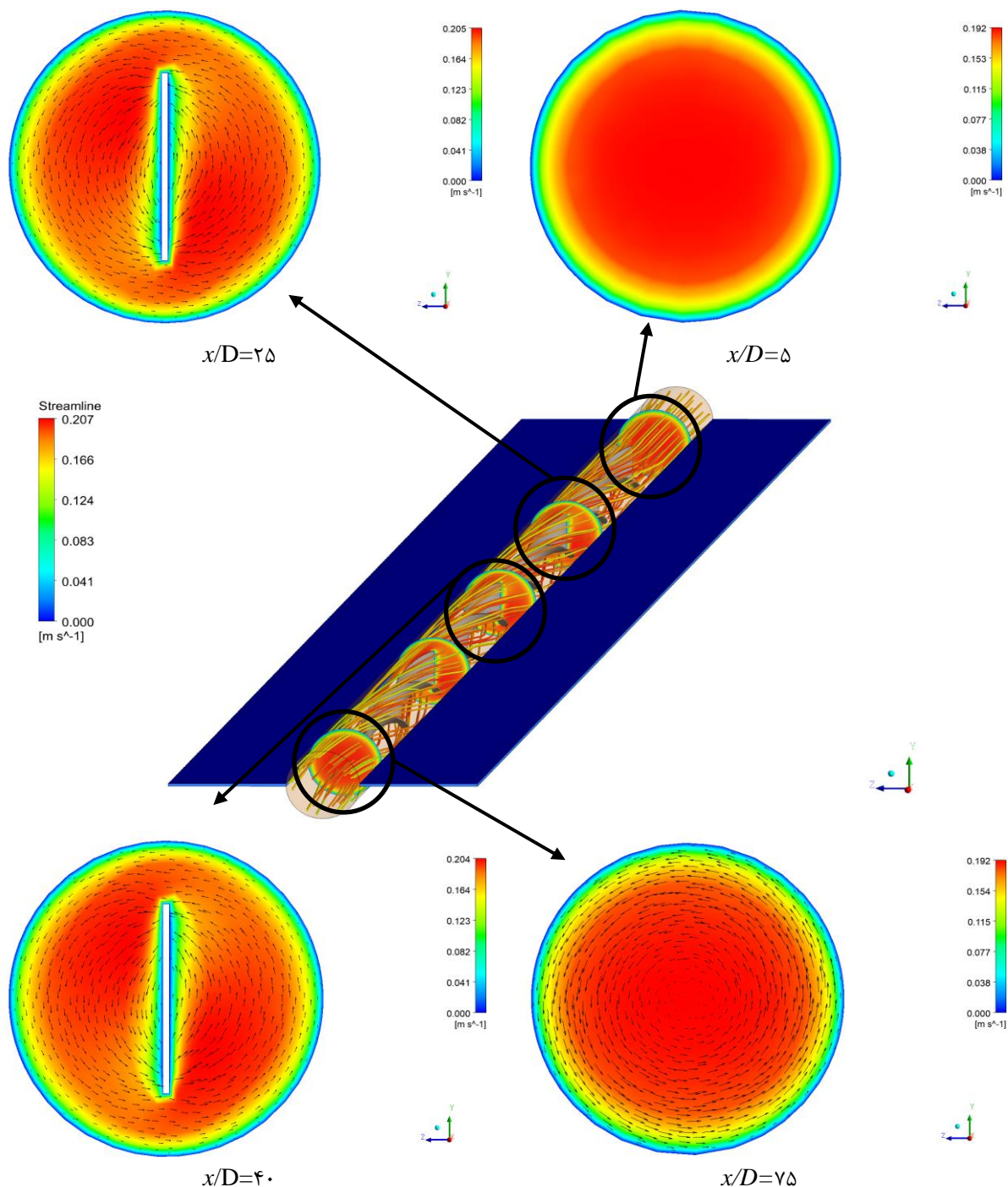
² Dittus-Boelter

³ Blasius

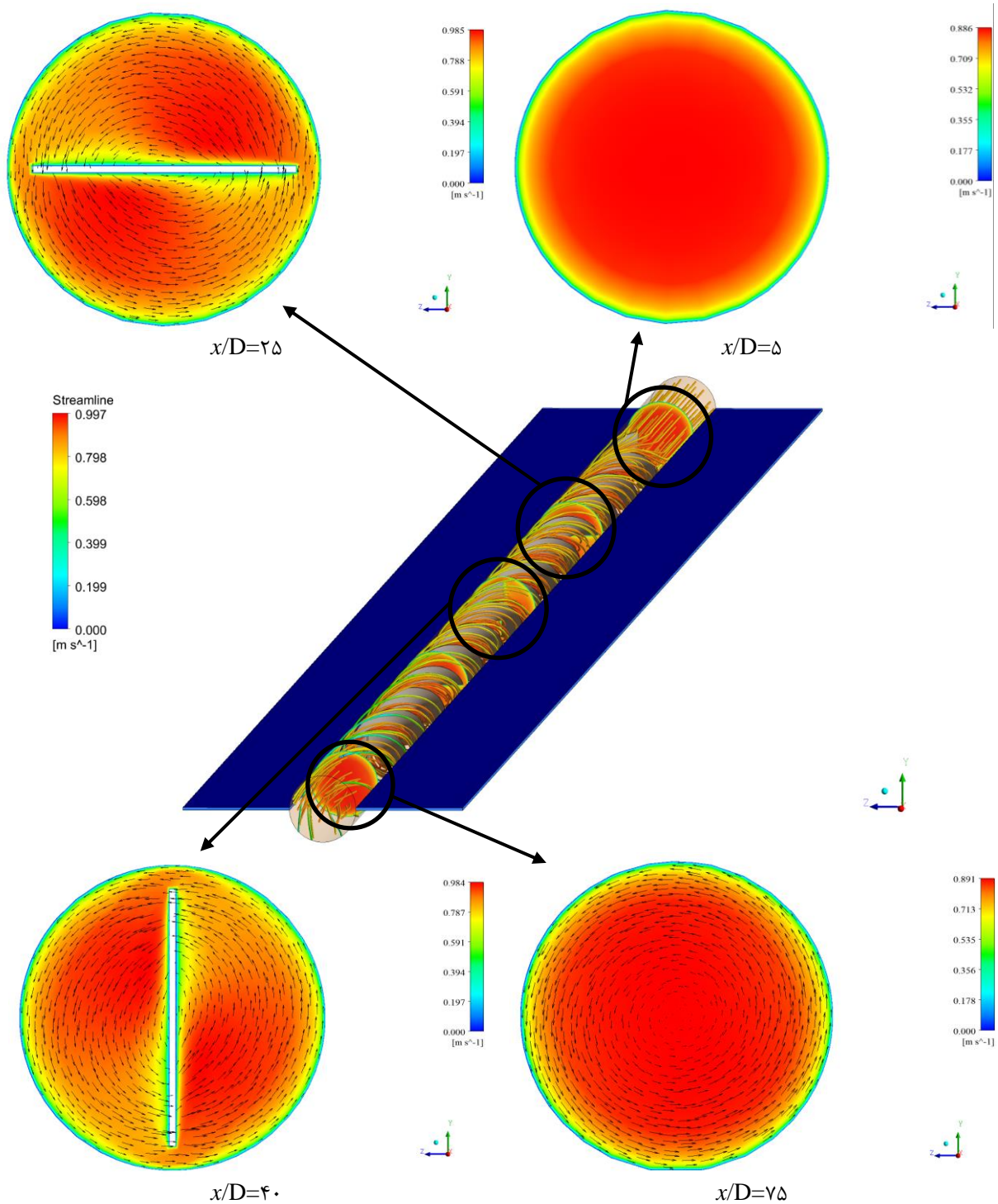
⁴ Petukhov

همان طور که در شکل‌های (۹) و (۱۰) مشاهده می‌شود انرژی جنبشی در اطراف دیواره‌ها مقدار بیشتر و در فواصل بسیار نزدیک کمتر است.

بنابراین هر عاملی در ایجاد اغتشاش در جریان سبب افزایش انرژی جنبشی آشفته می‌شود که این انرژی بر روی لایه مرزی حرارتی و هیدرودینامیکی تاثیر می‌گذارد.



شکل ۵- توزیع سرعت و بردارمماسی محلی برای نسبت پیچش ۴ و $D^*=0.1$ و عدد رینولدز ۴۰۰۰



شکل ۶- توزیع سرعت و بردارمماسی محلی برای نسبت پیچش ۷ و $D^* = 0.14$ و عدد رینولدز ۲۰۰۰۰

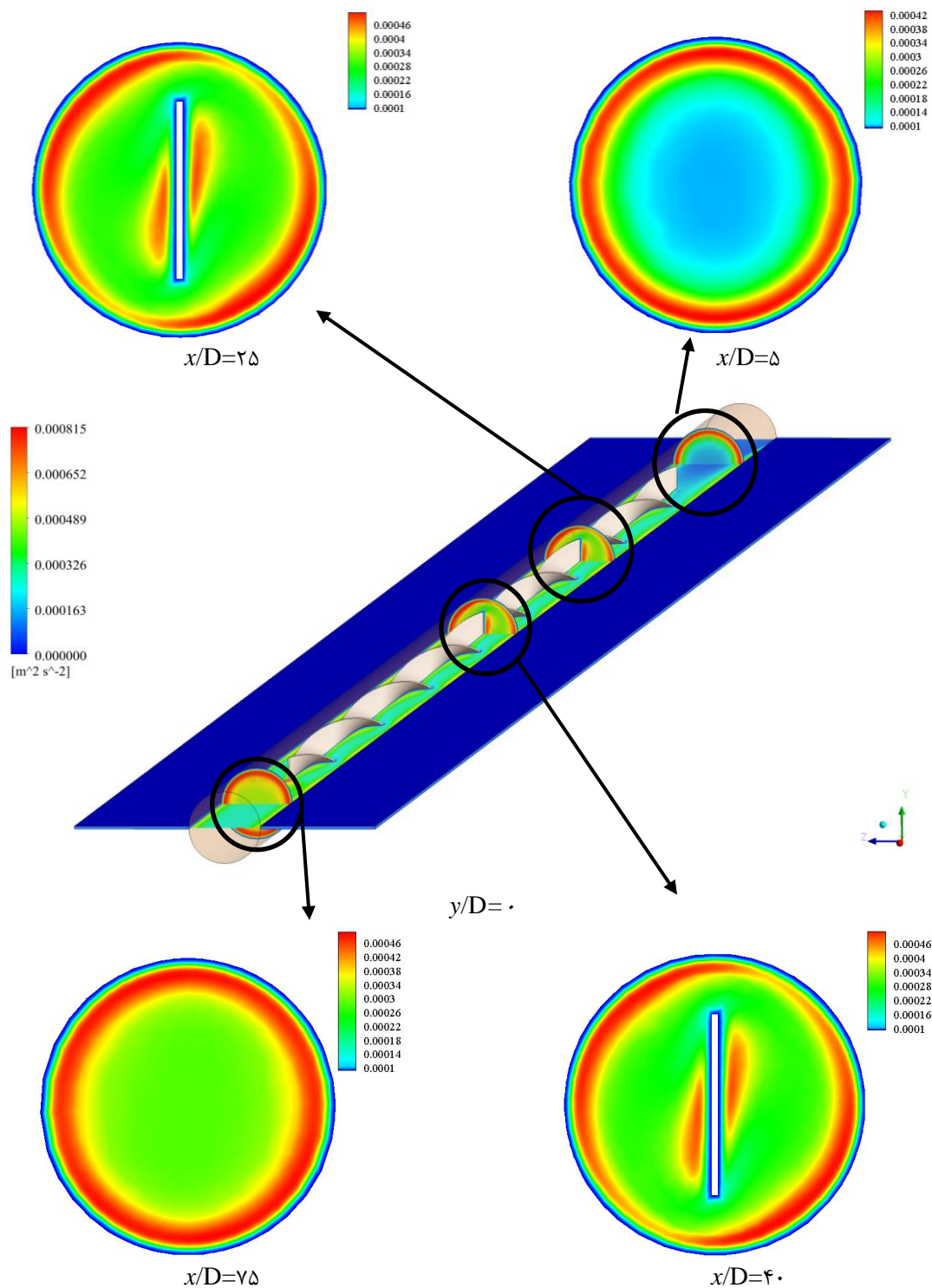
نوار پیچشی به دلیل افزایش سطح تماس بین سیال و دیواره، باعث افزایش ضریب اصطکاک می‌شود زیرا نیروی اینرسی افزایش می‌یابد تا نیروی فشاری را ثابت نگه دارد. بدیهی است که هرچه نسبت پیچش بیشتر باشد، سیال بیشتر در معرض تماس با دیواره‌ی نوار پیچشی قرار می‌گیرد و در نتیجه باعث افزایش ضریب اصطکاک می‌شود.

در شکل‌های (۹) و (۱۰) توزیع سطحی دما نشان داده شده است. همان گونه که انتظار می‌رود با افزایش مقدار D^* و نسبت پیچش، آشفتگی رژیم جریان بیشتر می‌شود و اختلاط مایع بهتر صورت می‌گیرد و در نتیجه ضخامت لایه مرزی حرارتی کمتر می‌شود.

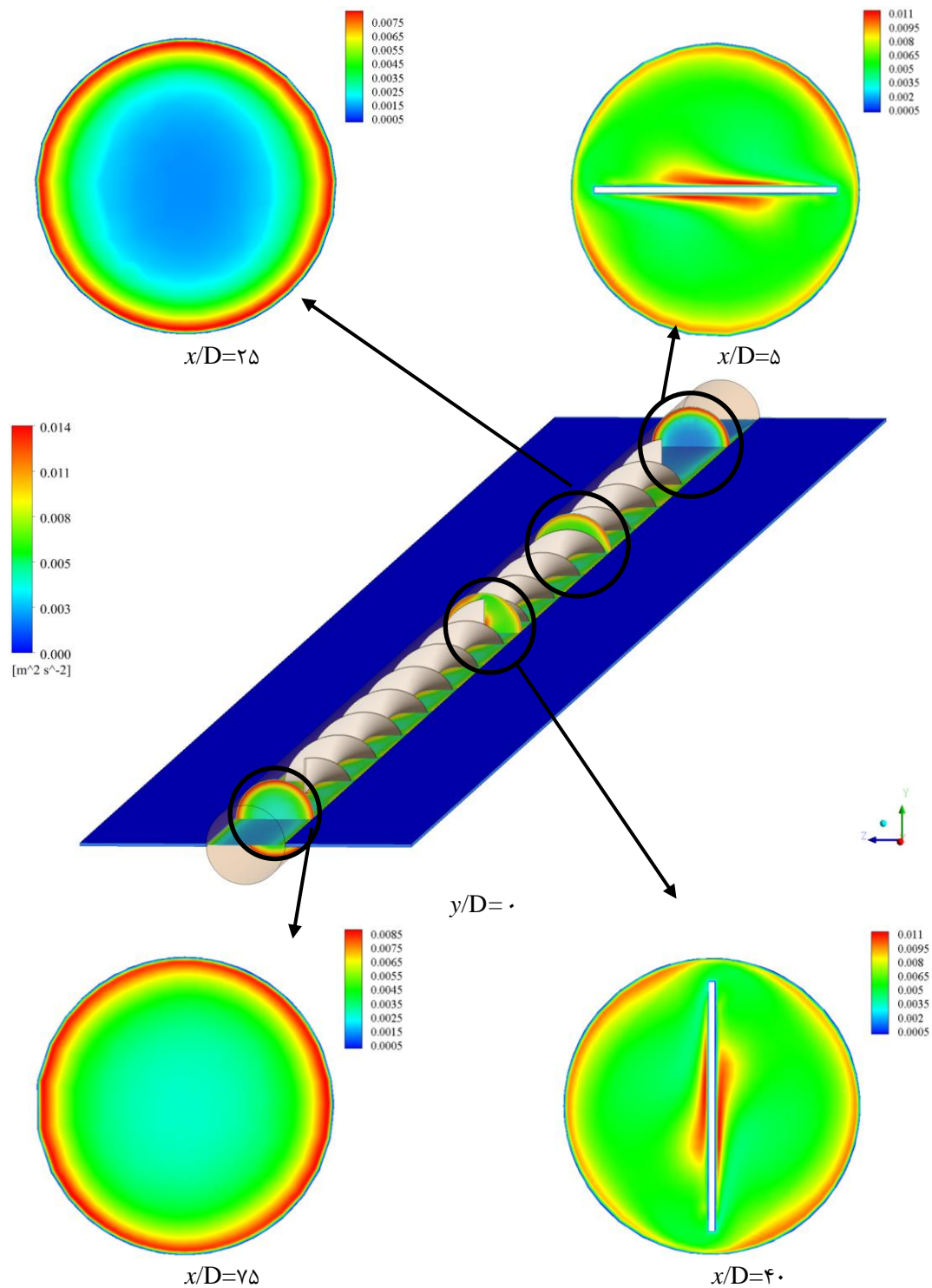
۴-۵- تأثیرات نسبت قطر و پیچش بر اصطکاک

افزایش نسبت قطر، نوار پیچشی مانند یک مانع در مسیر سیال عمل می‌کند و باعث افزایش ضریب اصطکاک می‌شود.

در یک نسبت قطر ثابت $D^* = 0.14$ با کاهش نسبت پیچش از ۷ به ۴، برای دو عدد رینولدز ۴۰۰۰ و ۲۰۰۰۰ به مقدار ۱۲ درصد ضریب اصطکاک کاهش می‌یابد.



شکل ۷- توزیع انرژی جنبشی آشفتگی (m^2/s^2) برای نسبت پیچش ۴ و $D^* = 0.1$ و عدد رینولدز ۴۰۰۰

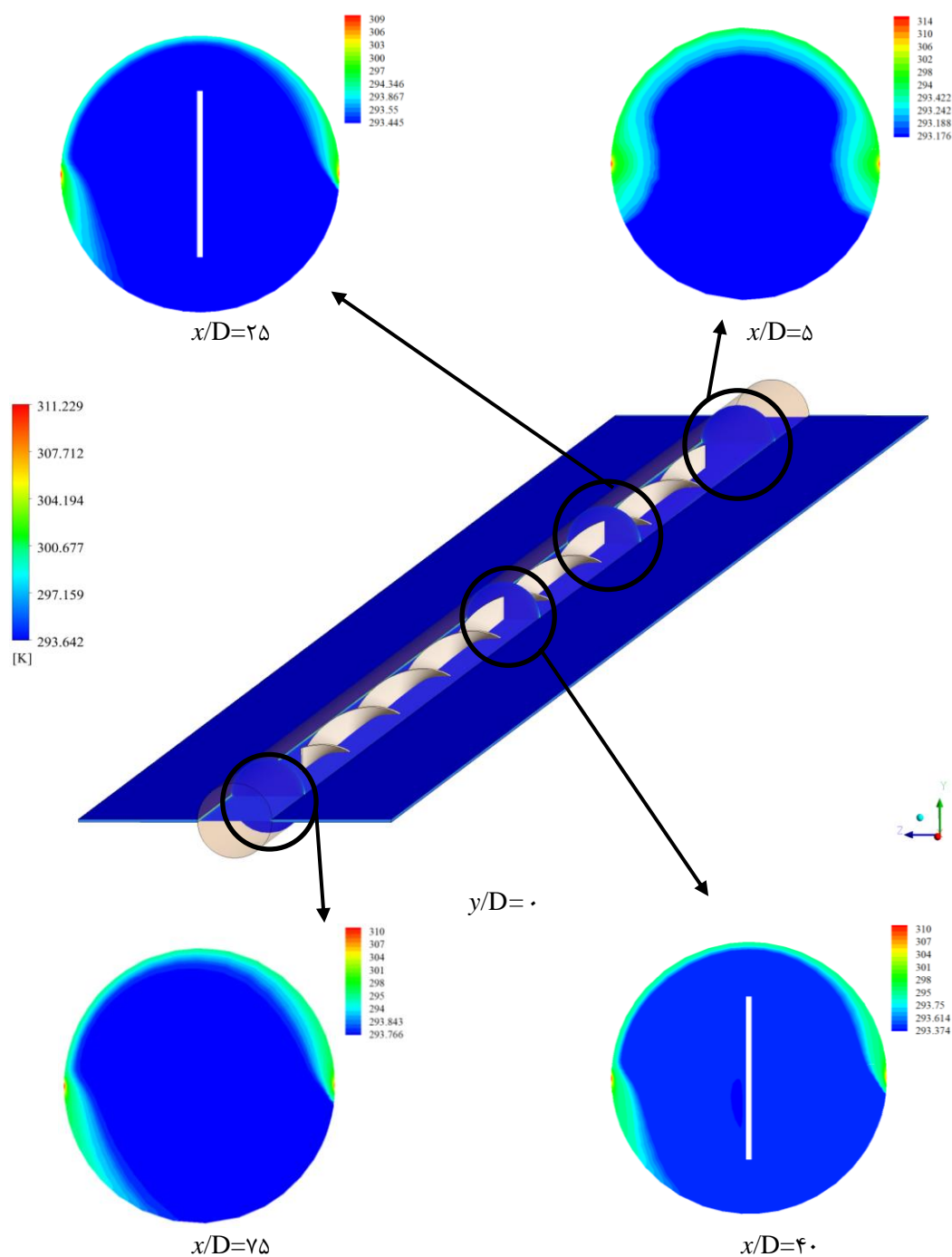


شکل ۸- توزیع انرژی جنبشی آشفتهگی (m^2/s^2) برای نسبت پیچش ۷ و $D^* = 0.14$ و عدد رینولدز ۲۰۰۰۰

و افزایش افت فشار می‌شود. با توجه به رابطه ۱۳ در مخرج کسر سرعت سیال و در صورت اختلاف فشار بیشتر می‌شود اما چون سرعت بر اختلاف فشار غالب است ضریب اصطکاک کاهش می‌یابد. با تغییر عدد رینولدز از ۴۰۰۰ به ۲۰۰۰۰ برای نسبت پیچش ۷ و نسبت قطر ۰/۰۱۴، ۴۱

در اعداد رینولدز ۴۰۰۰ و ۲۰۰۰۰ و یک نسبت ثابت پیچش $N=7$ ، با افزایش نسبت قطر از ۰/۰۱ به ۰/۰۱۴ مقدار ضریب اصطکاک به ترتیب ۲۲ و ۲۰ درصد افزایش می‌یابد. همان طور که در شکل (۱۱) مشاهده می‌شود افزایش عدد رینولدز باعث کاهش ضریب اصطکاک، افزایش سرعت سیال

درصد ضریب اصطکاک کاهش می‌یابد.



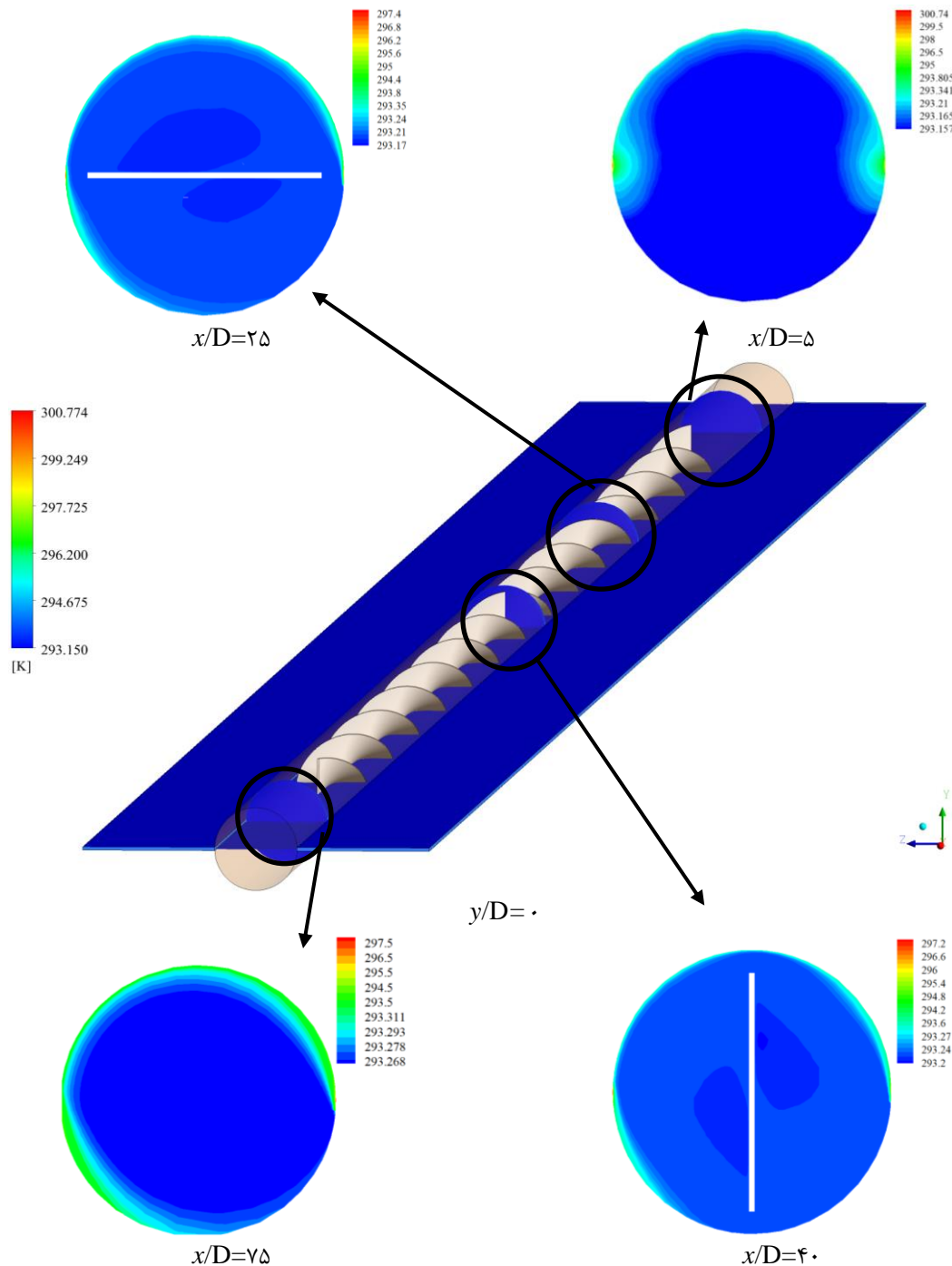
شکل ۹- توزیع دمای محلی (K) برای نسبت پیچش ۴ و $D^* = 0.1$ و عدد رینولدز ۴۰۰۰

نتیجه عدد ناسلت افزایش می‌یابد. در یک نسبت پیچش ثابت $N=7$ ، برای دو عدد رینولدز ۴۰۰۰ و ۲۰۰۰۰، با افزایش نسبت قطر از ۰/۰۱ تا ۰/۱۴ به اندازه ۱۵ و ۷ درصد بر مقدار عدد ناسلت افزوده می‌شود. افزایش نسبت پیچش باعث می‌شود که سیال مسیر چرخشی بیشتری را طی کند و به همین سبب عدد ناسلت بیشتر می‌شود.

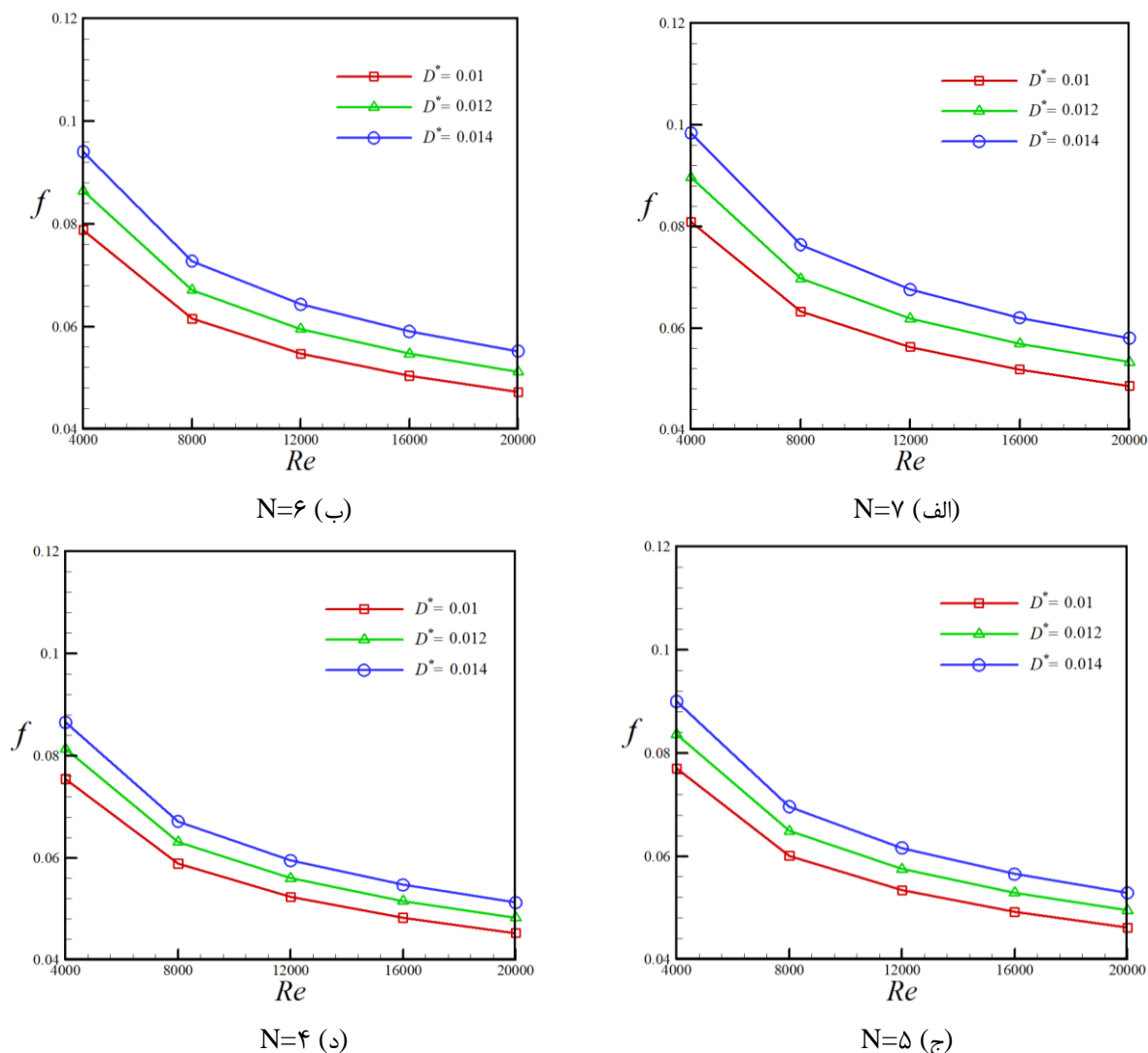
۴-۶- تاثیرات نسبت قطر و پیچش بر انتقال حرارت
شکل (۱۲) نشان‌دهنده تغییرات عدد ناسلت بر حسب عدد رینولدز است. همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزایش نسبت قطر و پیچش اختلاط جریان سیال بیشتر شده و همچنین میزان شدت چرخشی شدن سیال را افزایش می‌دهد. بنابراین ضریب انتقال حرارت بیشتر شده و در

بیشتر می‌شود، به عبارت دیگر عدد ناسلت سیر صعودی را طی می‌نماید. افزایش عدد رینولدز از ۴۰۰۰ به ۲۰۰۰۰ برای نسبت پیچش ۷ و نسبت قطر ۰/۱۴ حدوداً ۲/۵ برابر مقدار عدد ناسلت را بیشتر می‌کند.

افزایش نسبت پیچش از ۴ به ۷ برای اعداد رینولدز ۴۰۰۰ و ۲۰۰۰۰ در یک نسبت قطر ثابت $D^* = 0.14$ عدد ناسلت به ترتیب حدود ۸/۵ و ۵ درصد افزایش می‌یابد. با افزایش عدد رینولدز شدت آشفتگی سیال بیشتر می‌شود. در نتیجه مقدار انتقال حرارت جابه‌جایی نسبت به هدایت



شکل ۱۰- توزیع دمای محلی (K) برای نسبت پیچش ۷ و $D^* = 0.14$ و عدد رینولدز ۲۰۰۰۰

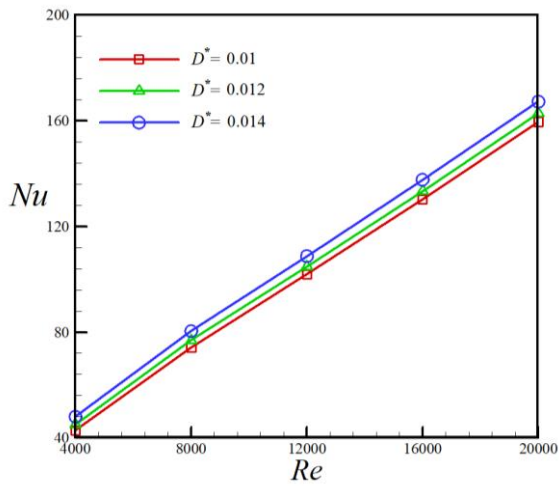


شکل ۱۱- تغییرات ضریب اصطکاک در نسبت‌های متفاوت پیچش و قطر و در اعداد رینولدز مختلف

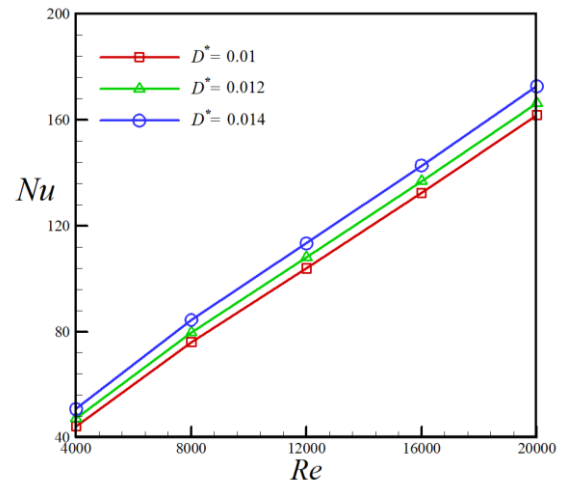
۷-۴- تاثیرات نسبت قطر و پیچش بر ضریب عملکرد حرارتی

افزایش مقدار ضریب عملکرد حرارتی به معنای قدرت گرفتن بیشتر مکانیزم‌های حرارتی در مقابل مکانیزم‌های هیدرودینامیکی فرساینده انرژی رانشی است. همان طور که در شکل ۱۳ مشاهده می‌شود، مقدار ضریب عملکرد در اعداد رینولدز بالا کوچکتر از واحد می‌شود. به عبارت دیگر مکانیزم‌های اصطکاکی نسبت به حرارتی قدرتمندتر عمل می‌کنند. افزایش عدد رینولدز منجر به کاهش نسبت عدد ناسلت و افزایش نسبت ضریب اصطکاک می‌شود که در مجموع ضریب عملکرد را کاهش می‌دهند. در نسبت پیچش ۷ و نسبت قطر ثابت $D^* = 0.014$ ، افزایش

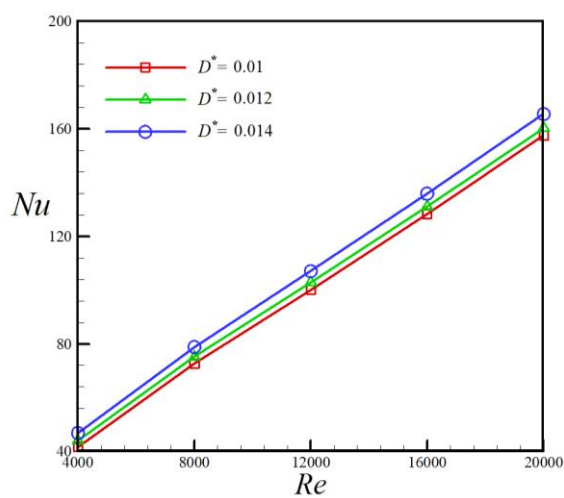
عدد رینولدز موجب کاهش ۱۴ درصدی ضریب عملکرد می‌شود. با افزایش نسبت قطر همان طور که از شکل پیداست در تمامی مقادیر عدد رینولدز و همچنین در نسبت پیچش مختلف، مقدار ضریب عملکرد روند افزایشی داشته است. برای نسبت‌های مختلف قطر و در نسبت پیچش $N=7$ ، در اعداد رینولدز ۴۰۰۰ و ۲۰۰۰۰ به ترتیب ۸ و ۱/۵ درصد ضریب عملکرد افزایش پیدا می‌کند. اگرچه افزایش نسبت قطر بر مقدار ضریب اصطکاک می‌افزاید اما ضریب عملکرد حرارتی نشان می‌دهد که از لحاظ اقتصادی به صرفه‌تر است. افزایش نسبت پیچش در اعداد رینولدز ۴۰۰۰ و ۲۰۰۰۰، در یک نسبت قطر ثابت $D^* = 0.014$ ، بر مقدار ضریب عملکرد به میزان ۴ و ۲ درصد می‌افزاید.



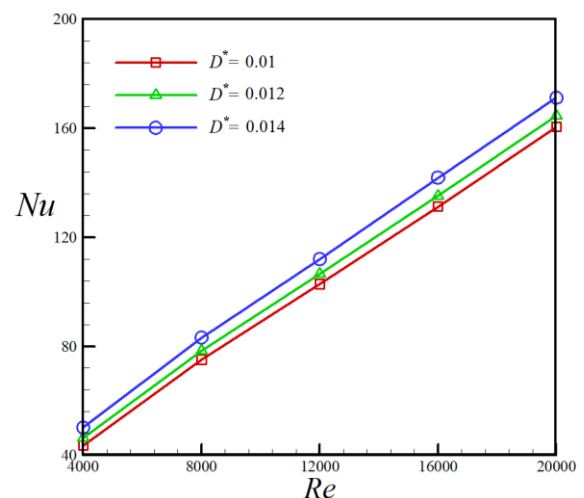
N=۶ (ب)



N=۷ (الف)

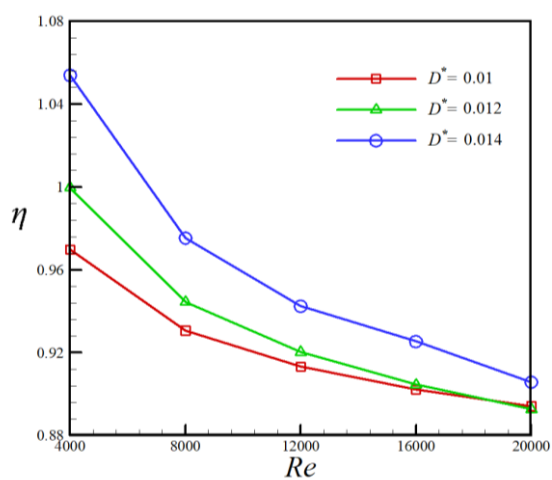


N=۴ (د)

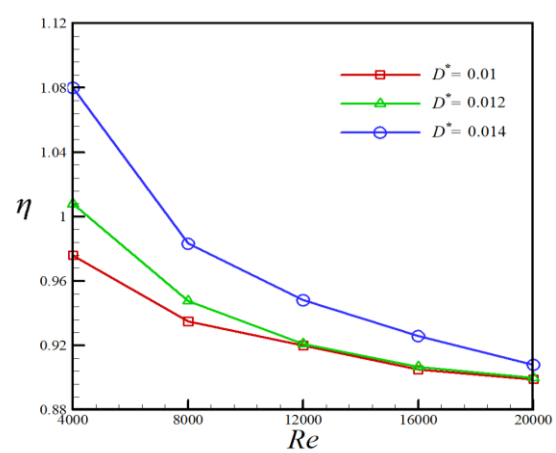


N=۵ (ج)

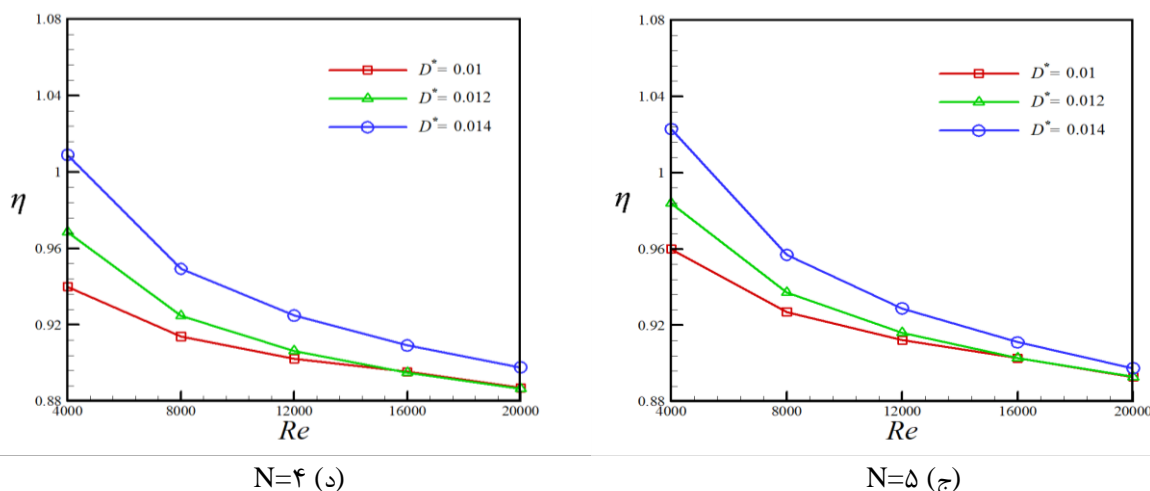
شکل ۱۲- تغییرات عدد ناسلت در نسبت‌های متفاوت پیکش و قطر و در اعداد رینولدز مختلف



N=۶ (ب)



N=۷ (الف)



شکل ۱۳- تغییرات ضریب عملکرد حرارتی در نسبت‌های متفاوت پیچش و قطر و در اعداد رینولدز مختلف

۵- نتیجه‌گیری

از میان روش‌های غیر فعال افزایش انتقال حرارت در مدل‌های حرارتی، نوار پیچشی از نظر اقتصادی و عملکردی نسبت به سایر روش‌ها به صرفه‌تر می‌باشد. انتقال حرارت، افت فشار و عملکرد حرارتی کلکتور خورشیدی صفحه تخت مجهز به نوار پیچشی با نسبت‌های مختلف هندسی، به همراه نانوسیال آب آلومینیوم-اکسید، در بازه عدد رینولدز بین ۴۰۰۰ تا ۲۰۰۰۰ در این مطالعه عددی مورد ارزیابی قرار گرفت. نکات مهم این مطالعه به شرح زیر است:

- نتایج عددی برای لوله بدون نوار پیچشی با روابطی که در این حالت بدست آمده، تطابق خوبی دارد. عدد ناسلت و ضریب اصطکاک کمتر از ۱۰٪ با نتایج بدست آمده از طریق روش عددی خطا دارد.
- بیشترین و کمترین مقدار عدد ناسلت به ترتیب برابر با ۱۷۳ و ۴۱/۶۵ که در بیشترین و کمترین نسبت پیچش، نسبت قطر و عدد رینولدز حاصل می‌شود.
- در نسبت قطر ۰/۰۱۴، نسبت پیچش ۷ و عدد رینولدز ۴۰۰۰ بیشترین مقدار ضریب اصطکاک برابر با ۰/۹۸ حاصل می‌شود حال آنکه در نسبت پیچش ۴، نسبت قطر ۰/۰۱ و عدد رینولدز ۲۰۰۰۰ کمترین مقدار ضریب اصطکاک که برابر با ۰/۰۴۵ است، بدست می‌آید.
- مقدار ضریب عملکرد حرارتی با افزایش عدد رینولدز کاهش و با افزایش نسبت قطر و پیچش، افزایش می‌یابد. بیشتر شدن نسبت قطر در مقابل نسبت

پیچش، به میزان بیشتری ضریب عملکرد حرارتی را افزایش می‌دهد. حداکثر مقدار ضریب عملکرد ۱/۰۸ در بیشترین نسبت قطر ۰/۰۱۴، پیچش $N=7$ و کمترین عدد رینولدز $Re=4000$ است.

تقدیر و تشکر

نویسندگان مقاله مراتب قدردانی خود را از حمایت دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل از طریق اعتبار پژوهشی شماره ۹۹ / 390051 / BNUT اعلام می‌دارند.

فهرست علائم

C_p	گرمای ویژه ($Jkg^{-1}K^{-1}$)
D	قطر لوله (m)
D^*	نسبت قطر
f	ضریب اصطکاک
G	نرخ تولید انرژی جنبشی آشفته ($kgm^{-2}s^{-2}$)
h	ضریب انتقال حرارت ($Wm^{-2}K^{-1}$)
k	ضریب هدایت حرارتی ($Wm^{-1}K^{-1}$)
K	انرژی جنبشی آشفته ($Wm^{-1}K^{-1}$)
L	طول لوله (m)
N	نسبت پیچش
Nu	عدد ناسلت
p	فشار (Pa)
ΔP	اختلاف فشار (Pa)
\dot{q}	شار حرارتی (Wm^{-2})
Re	عدد رینولدز

لزجت موثر ($\text{kgm}^{-1}\text{s}^{-1}$)	μ_{eff}	دما (K)	T
لزجت آشفتگی ($\text{kgm}^{-1}\text{s}^{-1}$)	μ_t	بردار سرعت (ms^{-1})	\vec{u}
تانسور تنش (Pa)	τ	سرعت (ms^{-1})	u
ضریب عملکرد حرارتی	η	فاصله از مبدا مختصات در راستای محور x	x
	زیر نویس‌ها	(m)	
توده سیال	b	فاصله از مبدا مختصات در راستای محور y	y
سیال پایه	f	(m)	
نانو سیال	nf		علائم یونانی
نانوذرات	p	نرخ اضمحلال (m^2s^{-3})	ε
لوله خالی	P	چگالی (kgm^{-3})	ρ
دیواره	w	لزجت ($\text{kgm}^{-1}\text{s}^{-1}$)	μ

مراجع

- [1] D. Herranz, "Design of a Solar Water Heating System in a Residential Building", Master's Thesis in Energy Systems, Department of Technology and Built Environment University of Gavle, 2009.
- [2] T. Sonawane, P. Patil, A. Chavhan, and B. M. Dusane, "A REVIEW ON HEAT TRANSFER ENHANCEMENT BY PASSIVE METHODS", International Research Journal of Engineering and Technology, Vol. 3, 2016, pp. 1567-1574.
- [3] S. Choi, "Developments and Applications of Non-Newtonian Flows", D.A. Siginer, H.P. Wang (Eds.), ASME, 66, 1995, pp. 99-105.
- [4] مسعود ضیائی راد و مریم بیگی هرچگانی، "مطالعه عددی انتقال حرارت و افت فشار در جریان اجباری نانوسیال داخل لوله دنداندار"، نشریه مدل‌سازی در مهندسی، دوره ۱۵، شماره ۴۹، تابستان ۱۳۹۶، صفحه ۷۶-۶۵.
- [5] رضا گورکی و حسین بیگی، "بررسی CFD انتقال حرارت جابجایی اجباری نانوسیالات در یک کانال حاوی ذرات کروی شکل"، نشریه مدل‌سازی در مهندسی، دوره ۱۶، شماره ۵۲، بهار ۱۳۹۷، صفحه ۲۸-۲۸.
- [6] محمد شریفی اصل؛ داود طغرای؛ احمد رضا عظیمیان، "شبیه‌سازی عددی انتقال حرارت جابه‌جایی در جریان مغشوش غیرنیوتنی نانوسیال در یک لوله افقی مدور"، نشریه مدل‌سازی در مهندسی، دوره ۱۶، شماره ۵۳، تابستان ۱۳۹۷، صفحه ۱۰-۱۰.
- [7] امید گزانه؛ محمد علی بهشتی نیا، "شبیه‌سازی و تحلیل فنی اقتصادی آبگرمکن خورشیدی برای کاربری مسکونی"، نشریه مدل‌سازی در مهندسی، دوره ۱۳، شماره ۴۳، زمستان ۱۳۹۴، صفحه ۱۱۹-۱۰۷.
- [8] عباس رجیبی خانقاهی؛ علی عباس نژاد؛ مجید عمیدپور، "بهینه‌سازی همزمان پارامترهای طراحی آبگرمکن خورشیدی با در نظر گرفتن الگوی مصرف"، نشریه مدل‌سازی در مهندسی، دوره ۱۵، شماره ۴۸، بهار ۱۳۹۶، صفحه ۱۲۳-۱۱۱.
- [9] S. Eiamsa-ard, and K. Kiatkittipong, "Heat transfer enhancement by multiple twisted tape inserts and TiO₂/water nanofluid", Applied Thermal Engineering, Vol. 70, No. 1, 2014, pp. 896-924.
- [10] S. K. Saha, A. Dutta, S. K. Dhal, "Friction and heat transfer characteristics of laminar swirl flow through a circular tube fitted with regularly spaced twisted-tape elements", International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 44, No. 22, 2001, pp. 4211-4223.
- [11] E. Y. Rios-Irube, M. E. Cervantes-Gaxiola, E. Rubio-Castro, J. M. Ponce-Ortega, M. D. González-Llanes, C. Reyes-Moreno, and O. M. Hernández-Calderón, "Heat transfer analysis of a non-Newtonian fluid flowing through a circular tube with twisted tape inserts", Applied Thermal Engineering, Vol. 84, 2015, pp. 225-236.

- [12] S. Jaisankar, T. K. Radhakrishnan, and K. N. Sheeba, "Experimental studies on heat transfer and friction factor characteristics of thermosyphon solar water heater system fitted with spacer at the trailing edge of twisted tapes", *Applied Thermal Engineering*, Vol. 29, No. 5, 2009, pp. 1224-1231.
- [13] S. Eiamsa-ard, K. Kiatkittipong, and W. Jedsadaratanachai, "Heat transfer enhancement of TiO₂/water nanofluid in a heat exchanger tube equipped with overlapped dual twisted-tapes", *Engineering Science and Technology, an International Journal*, Vol. 18, No. 3, 2015, pp. 336-350.
- [14] S. Eiamsa-ard, and P. Promvonge, "Performance assessment in a heat exchanger tube with alternate clockwise and counter-clockwise twisted-tape inserts", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 53, No. 7, 2010, pp. 1364-1372.
- [15] P. Murugesan, K. Mayilsamy, S. Suresh, and P. S. S. Srinivasan, "Heat transfer and pressure drop characteristics in a circular tube fitted with and without V-cut twisted tape insert", *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 38, No. 3, 2011, pp. 329-334.
- [16] X. Zhang, Z. Liu, and W. Liu, "Numerical studies on heat transfer and flow characteristics for laminar flow in a tube with multiple regularly spaced twisted tapes", *International Journal of Thermal Sciences*, Vol. 58, 2012, pp. 157-167.
- [17] V. N. Rao, and M. N. Rajini, "Mass transfer in circular conduit with coaxially placed twisted tape-disc assembly as turbulence promoter", *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, Vol. 105, 2016, pp. 64-72.
- [18] K. Y. Lim, Y. M. Hung, and B. T. Tan, "Performance evaluation of twisted-tape insert induced swirl flow in a laminar thermally developing heat exchanger", *Applied Thermal Engineering*, Vol. 121, 2017, pp. 652-661.
- [19] A. Saravanan, J. S. Senthilkumaar, and S. Jaisankar, "Performance assessment in V-trough solar water heater fitted with square and V-cut twisted tape inserts", *Applied Thermal Engineering*, Vol. 102, 2016, pp. 476-486.
- [20] S. D. Salman, A. A. H. Kadhum, M. S. Takriff, and A. B. Mohamad, "CFD simulation of heat transfer augmentation in constant heat-fluxed tube fitted with baffled twisted tape inserts", *Aust Journal Basic Applied Science*, Vol. 7, 2013, pp. 488-496.
- [21] S. D. Salman, A. A. H. Kadhum, M. S. Takriff, and A. B. Mohamad, "Numerical investigation of heat transfer and friction factor characteristics in a circular tube fitted with v-cut twisted tape inserts", *The Scientific World Journal*, ID 492762, 2013, pp. 1-8.
- [22] S. D. Salman, A. A. H. Kadhum, M. S. Takriff, and A. B. Mohamad, "CFD analysis of heat transfer and friction factor characteristics in a circular tube fitted with quadrant-cut twisted tape inserts", *The Scientific World Journal*, ID 273764, 2013, pp. 1-8.
- [23] Y. Hong, J. Du, and S. Wang, "Experimental heat transfer and flow characteristics in a spiral grooved tube with overlapped large/small twin twisted tapes", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 106, 2017, pp. 1178-1190.
- [24] M. Farnam, M. Khoshvaght-Aliabadi, and M. J. Asadollahzadeh, "Heat transfer intensification of agitated U-tube heat exchanger using twisted-tube and twisted-tape as passive techniques", *Chemical Engineering and Processing - Process Intensification*, Vol. 133, 2018, pp. 137-147.
- [25] A. M. Abed, H. Sh. Majdi, Z. Hussein, D. Fadhil, and A. Abdulkadhim, "Numerical analysis of flow and heat transfer enhancement in a horizontal pipe with P-TT and V-Cut twisted tape", *Case Studies in Thermal Engineering*, Vol. 12, 2018, pp. 749-758.
- [26] C. Qi, M. Liu, T. Luo, Y. Pan, and Z. Rao, "Effects of twisted tape structures on thermo-hydraulic performances of nanofluids in a triangular tube", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 127, 2018, pp. 146-159.
- [27] M. Jafaryar, M. Sheikholeslami, and Z. Li, "CuO-water nanofluid flow and heat transfer in a heat exchanger tube with twisted tape turbulator", *Powder Technology*, Vol. 336, 2018, pp. 131-143.
- [28] A. Bejan, "Turbulent Boundary Layer Flow", *Convection Heat Transfer*, Eds., 2013, pp. 320-368: John Wiley & Sons, Inc.

- [29] F. R. Menter, "Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications", AIAA journal, Vol. 32, No. 8, 1994, pp. 1598-1605.
- [30] M. I. Hasan, A. M. A. Rageb, and M. Yaghoubi, "Investigation of a Counter Flow Microchannel Heat Exchanger Performance with Using Nanofluid as a Coolant", Journal of Electronics Cooling and Thermal Control, 2012, Vol.2 No. 3, pp. 35-43.
- [31] R. L. Webb, "Performance evaluation criteria for use of enhanced heat transfer surfaces in heat exchanger design", International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 24, No. 4, 1981, pp. 715-726.
- [32] D. Kim, Y. Kwon, Y. Cho, C. Li, S. Cheong, Y. Hwang, J. Lee, D. Hong, and S. Moon, "Convective heat transfer characteristics of nanofluids under laminar and turbulent flow conditions", Current Applied Physics, Vol. 9, No. 2, Supplement, 2009, pp. 119-123.
- [33] F. P. Incropera, P. D. Dewitt, T. L. Bergman, and A. S. Lavine, "Fundamentals of heat and mass transfer", 2006, pp. 468-478:John Wiley & Sons.