



مقایسه شبیه‌سازی عددی انتقال حرارت در مبدل حرارتی لوله‌ای مجهز به میله گردابه‌ای با لوله ساده

محمد نیمافر^{۱*}، صابر فرخی^۲، رضا آزادی^۳

۱- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد، تهران مرکز

۲- کارشناس ارشد، مهندسی مکانیک، گرایش تبدیل انرژی

۳- دانشجوی دکتری، مهندسی مکانیک، نوشیروانی، بابل

*moh.nimafar@iauctb.ac.ir

ارسال: دی ماه ۹۷ پذیرش: بهمن ماه ۹۷

چکیده

در این مطالعه، انتقال حرارت در لوله ساده و بدون میله گرداب را، با میزان تغییرات انتقال حرارت در لوله مجهز به میله گرداب در زاویه‌های مختلف میله گرداب و رینولدزهای متفاوت بررسی شده و مقادیر بهینه‌ی آن‌ها جهت بدست آوردن بیشترین میزان افزایش انتقال حرارت بدست خواهد آمد. بدین منظور زاویه‌های میله گرداب در ۵ جهت ۱۵، ۳۰، ۴۵، ۶۰ و ۷۵ درجه و در رینولدزهای ۳۰۰، ۹۰۰، ۱۸۰۰ مورد بررسی قرار گرفته و نیز برای بررسی تاثیر نانوذرات در میزان افزایش انتقال حرارت آب، نانو ذره آلومینا با ۳ درصد حجمی به سیال آب اضافه گردیده است. میله گرداب درون لوله در ۳ ردیف با زاویه ۱۲۰ درجه از هم قرار دارند، که هر ردیف دارای ۱۱ میله گردابه می‌باشد. دمای افزایش یافته درون این لوله حاصل ایجاد جریان چرخشی و گردابه‌ای در اثر برخورد سیال به میله‌های گرداب می‌باشد. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که وجود میله گرداب درون لوله باعث ایجاد جریان متلاطم کرده و دمای سیال درون لوله افزایش پیدا می‌کند و هر چه عدد رینولدز بالاتر باشد، میزان افزایش انتقال حرارت بالاتر است و انتقال حرارت در لوله مجهز به میله گرداب بیشتر از لوله بدون میله گرداب است. و همچنین وجود نانو ذره آلومینا با ۳٪ حجمی، باعث افزایش انتقال حرارت سیال می‌گردد. در انتها مشاهده گردید که بیشترین میزان انتقال حرارت مربوط به زاویه ۳۰ درجه میله گرداب و رینولدز ۱۸۰۰ می‌باشد.

کلید واژگان: مبدل حرارتی، انتقال حرارت، میله گرداب، نانو سیال آلومینا

۱- مقدمه

انتخاب مبدل حرارتی مناسب، وابسته به کاربرد مورد نیاز می‌باشد. افزایش انتقال حرارت از طریق میله گرداب درون لوله، موضوع بروز و کاربردی می‌باشد که استفاده زیادی در صنایع مختلفی مثل صنایع تبرید، تهویه مطبوع، نیروگاه‌ها و صنایع پتروشیمی و شیمیایی می‌شود. برای افزایش انتقال حرارت در لوله‌ای که درون آن میله‌ی گردابه‌ای شکل است، راه‌های مختلفی مثل تغییر در قطر میله گرداب، تغییر

در زاویه میله گرداب و همچنین تغییر در فاصله‌ی بین میله گرداب وجود دارد، که در این تحقیق زاویه‌ی میله گرداب تغییر داده شده است. یکی از روش‌های موثر برای افزایش انتقال حرارت در سیستم‌های حرارتی، استفاده از تولید کننده گردابه درون لوله می‌باشد. تولید کننده‌های گردابه باعث تشکیل گردابه‌های طولی درون لوله شده و با ایجاد حرکت‌های ۳ بعدی مارپیچی، جریان‌های چرخشی قدرتمندی در جریان سیال ایجاد می‌کنند. این حرکت‌های چرخشی باعث افزایش اغتشاش در سیال و همچنین باعث افزایش دما، سرعت، فشار سیال می‌شود. در حالت کلی موانع تولید گردابه به ۳ طریق در انتقال حرارت تاثیر می‌گذارند، عبارت‌اند از افزایش لایه‌مرزی روی هر طرف از مانع، چرخش جریان و ناپایداری جریان. مبدل‌های حرارتی را می‌توان با توجه به رفتار سیال بررسی نمود. این کار به روش‌های مختلفی صورت می‌گیرد که عبارت‌اند از: روش تجربی، روش تحلیلی و روش عددی. در سال‌های اخیر با پیشرفت علوم کامپیوتر روش‌های عددی رشد قابل توجهی در حل معادلات داشته‌اند و به لحاظ صرف هزینه و زمان قابل قبول، توجه اکثر محققین را به خود جلب نموده‌اند. در سال‌های اخیر محققان بسیاری به بررسی روش‌های نوین جهت افزایش میزان انتقال حرارت مبدل‌های حرارتی پرداخته‌اند. از جمله: ماکسول اولین بار در سال ۱۸۷۳ مفهوم توزیع ذرات جامد در سیال پایه را به منظور کاهش محدودیت انتقال حرارت برای سیالات با هدایت حرارتی پایین مطرح کرد. ایده فناوری مهندسی مولکولی یا نانو تکنولوژی، اولین بار توسط ریچارد فایمن در سال ۱۹۵۹ مطرح شد. وی در آن سال در سخنرانی مشهور خود در انجمن فیزیک آمریکا، دانشمندان را به کار روی مواد در مقیاس اتمی دعوت کرد. این سخنرانی را میتوان اولین بحث در زمینه‌ی فناوری نانو دانست. استفاده از ذرات در ابعاد نانومتری برای اولین بار در یک سری مطالعات در آزمایشگاه ملی آرگون توسط چوی در سال ۱۹۹۵ مطرح شد. او اولین کسی بود که از لفظ نانو سیال برای سوسپانسیون‌های نانو ذرات در مایع استفاده نموده و ادعا کرد که چنین سیالاتی در مقایسه با سوسپانسیون‌های معمولی جامد در مایع خواص رئولوژیکی و پایداری بهتری دارند و می‌توانند به طرز چشمگیری هدایت حرارتی، نفوذ گرمایی و ضریب انتقال حرارت جابجایی سیال را افزایش دهند. ایستمن و همکارانش در تحقیقات خود مشاهده کردند که رسانایی حرارتی نانوسیال حاوی نانو ذرات مس با کسر حجمی ۰.۳٪ و اتیلن گلیکول، در مقایسه با سیال پایه، حدود ۴۰٪ افزایش یافته است. ژوان و همکاران بطور تجربی خصوصیات انتقال حرارت جابجایی و عملکرد جریان نانوسیال آب و مس را در یک لوله با شار حرارتی ثابت روی دیواره بررسی کرده و مشاهده کرده‌اند که خصوصیات انتقال حرارت نانو سیالات با افزایش کسر حجمی نانو ذرات، بیشتر می‌شود. ونگ و یوز و همکاران اثر خواص ترموفیزیکی نانوسیال Water/TiO_2 را به عنوان خنک کننده با غلظت ۰.۲٪، در مبدل‌های دو لوله‌ای بررسی کردند. نتایج بررسی این محققان نشان داده است که ضریب انتقال حرارت نانو سیالات ۶-۱۱٪ بیشتر از آب خالص بوده است. همچنین دریافتند که ضریب انتقال حرارت جابجایی با افزایش عدد رینولدز، نرخ جریان جرمی آب داغ و نانوسیال و نیز کاهش دمای نانوسیال، افزایش می‌یابد. کیهانی و همکاران به بررسی انتقال حرارت و افت فشار نانوسیال آب/ Al_2O_3 در یک لوله افقی با جریان متلاطم پرداختند. نتایج حاکی از افزایش ضریب انتقال حرارت با افزایش کسر حجمی نانوسیال می‌باشد. افزایش بیشتر انتقال حرارت با نانوسیال Fe_3O_4 در لوله‌ای با نوار پیچ خورده داخلی بصورت آزمایشگاهی توسط سیام ساندر و همکاران بررسی شده است. تحقیقات آن‌ها نشان داده است که افزایش انتقال حرارت برای نانوسیال با درصد حجمی ۰.۶٪، در یک لوله معمولی به اندازه‌ی ۳۰.۹۶٪ بوده در حالیکه با نوار پیچ خورده، این میزان ۱۸.۴۹٪، افزایش یافته است. این آزمایش با گام ۵ و در محدوده عدد رینولدز ۳۰۰۰-۲۲۰۰۰ انجام شده است. شارما و همکاران با استفاده از نانوسیال Al_2O_3 با کسر حجمی ۰.۵ درصد در یک لوله معمولی ۳۰.۳۰ درصد افزایش انتقال حرارت را مشاهده کردند. آن‌ها این آزمایش را در لوله‌ای با نوار پیچ خورده داخلی با گام ۵ نیز انجام داده و ۴۲.۱۷ درصد افزایش در انتقال حرارت نسبت به آب را بدست آوردند. چینگ سونگ و همکاران در سال ۲۰۱۷ بر روی ویژگی انتقال حرارت و جریان در یک لوله با حلقه‌های V شکل کار کرده‌اند. که آن‌ها دریافتند که حلقه‌های V شکل باعث افزایش کارایی حرارت تا ۵۸ برابر یک لوله صاف و در نتیجه افت فشار ۸۲ برابر می‌شود.

در این مطالعه، شبیه‌سازی عددی انتقال حرارت در مبدل حرارتی توسط نرم افزار ۱۸ FLUENT ANSYS انجام شده است. طراحی و شبکه‌بندی لوله مجهز به میله گرداب، به ترتیب توسط نرم افزار CATIA و ANSYS MESHING انجام شده است.

۲- شرح مسئله، شبکه‌بندی و شرایط مرزی

مدل هندسی در این تحقیق، تاثیر افزایش انتقال حرارت در لوله مجهز به میله گرداب، با تغییر زاویه میله گرداب و تغییر در سرعت ورودی سیال و همچنین تغییر در نوع سیال ورودی بررسی شده است. آرایش لوله مجهز به میله گرداب، مکان میله گرداب و هندسه تولید کننده گرداب و به طور کلی هندسه یک لوله مجهز به میله گرداب در شکل ۱ نشان داده شده است. ابعاد هندسی مدل به صورت $L=0.5\text{ m}$ (طول لوله) و $D=0.02\text{ m}$ (قطر لوله) و $E=0.008\text{ m}$ (طول میله گرداب) و $P=0.02\text{ m}$ (فاصله بین میله گرداب) و $d=0.002\text{ m}$ (قطر میله گرداب) و $\alpha=15,30,45,60,75$ (زاویه میله گرداب) در نظر گرفته شده است. در این تحقیق، میله گرداب درون لوله در ۳ ردیف با زاویه ۱۲۰ درجه از هم قرار دارند، که هر ردیف دارای ۱۱ میله گرداب می‌باشد. میله‌های گرداب درون لوله، در شکل ۲ نشان داده است. جنس لوله و میله گرداب آلومینیوم می‌باشد. با تغییر زاویه میله گرداب، میزان افزایش انتقال حرارت در لوله مجهز به میله گرداب، بررسی شده است. از این لوله مجهز به میله گرداب یک بار سیال آب و بار دیگر نانوسیال آلومینا با ۳ درصد حجمی عبور کرده است. این پژوهش در ۳ رینولدز ۳۰۰ و ۹۰۰ و ۱۸۰۰ انجام شده است که بررسی شود در کدام عدد رینولدز، میزان انتقال حرارت بیشتری است.

شبکه‌بندی در نرم‌افزار ANSYS و در بخش workbench به صورت ۳ بعدی انجام شده است. به منظور تولید شبکه سازمان یافته دامنه حل به بخش‌های مجزا تبدیل شده است. در شکل ۵ و ۶ و ۷ شبکه‌بندی برای یک مدل نمونه از لوله مجهز به میله گرداب نشان داده شده است. برای دقت و افزایش صحت نتیجه از مش ترکیبی استفاده شده است. همان‌طور که در شکل ۶ مشاهده می‌شود، بر روی میله گرداب از مش ریزتری نسبت به لوله اصلی استفاده شده است. به‌طور کلی هر چه از میله گردابه‌ای شکل درون لوله فاصله گرفته شود از مش درشت‌تر استفاده می‌شود. در این پروژه برای شبکه‌بندی لوله مجهز به میله گرداب، از مش غیر یکنواخت مثلثی (tetrahedron) استفاده شده و برای شبکه‌بندی لوله بدون میله گرداب، از مش یکنواخت مربعی استفاده شده است. تعداد کل المان در لوله مجهز به میله گرداب ۱۵ درجه ۲۱۳۷۴۴۶ می‌باشد و تعداد المان در لوله مجهز به میله گرداب ۳۰ درجه ۲۲۱۷۵۵۳ می‌باشد و تعداد المان در لوله مجهز به میله گرداب ۴۵ درجه ۲۵۲۸۹۹۲ می‌باشد و تعداد المان در لوله مجهز به میله گرداب ۶۰ درجه ۲۱۶۹۵۱۰ می‌باشد و تعداد المان در لوله مجهز به میله گرداب ۷۵ درجه ۲۲۶۶۳۰۶ می‌باشد. تعداد کل المان در لوله بدون میله گرداب ۶۵۷۲۹ می‌باشد.

جدول ۱- مشخصات شبکه‌بندی در لوله مجهز به میله گرداب

زاویه میله گرداب	۱۵	۳۰	۴۵	۶۰	۷۵
تعداد المان	۲۱۳۷۴۴۶	۲۲۱۷۵۵۳	۲۵۲۸۹۹۲	۲۱۶۹۵۱۰	۲۲۶۶۳۰۶

جدول ۲- مشخصات شبکه بندی در لوله بدون میله گرداب

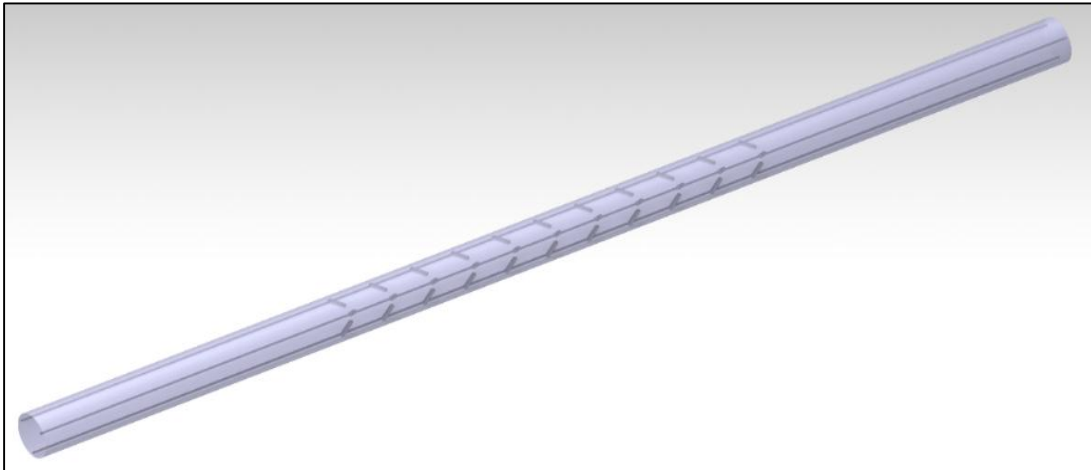
تعداد المان در لوله بدون میله گرداب	۶۵۷۲۹
-------------------------------------	-------

در این مطالعه، جداره دیوار در معرض شار حرارتی ثابت 5000 w/m^2 قرار گرفته شده است و سرعت ورودی با توجه به عدد رینولدز می‌باشد که در ۳ رینولدز ۳۰۰ و ۹۰۰ و ۱۸۰۰ مورد بررسی قرار گرفته است. دمای ورودی در این پروژه 300 K می‌باشد. در قسمت ورودی جریان از شرط مرزی Velocity Inlet و در خروجی جریان از شرط مرزی Pressure outlet استفاده شده است.

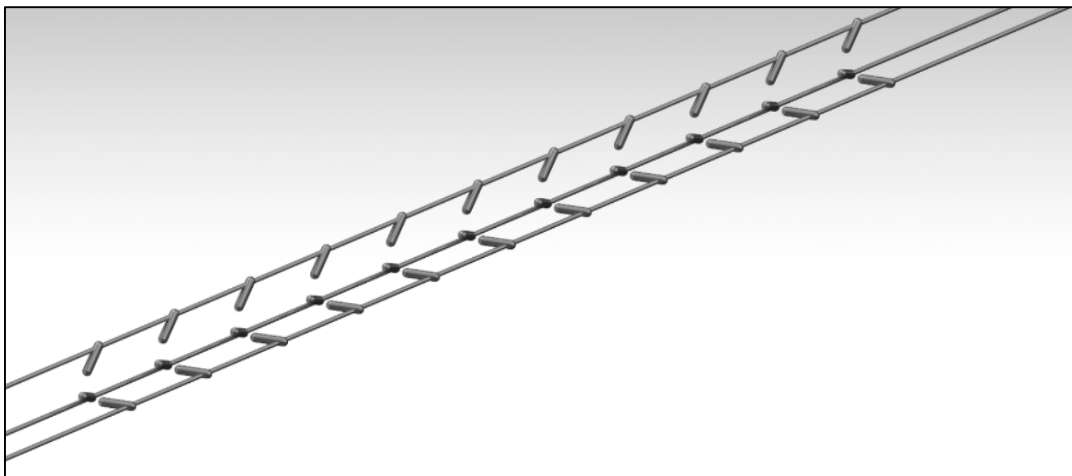
جدول ۳ - مشخصات شرایط مرزی در لوله

شرط مرزی	نوع شرط مرزی
ورودی	Velocity Inlet سرعت ورودی با توجه به عدد رینولدز و دمای ورودی ۳۰۰ کلوین و در قسمت ورودی جریان از شرط مرزی Velocity Inlet
خروجی	Pressure outlet در خروجی جریان از شرط مرزی Pressure outlet
دیواره لوله	جداره دیوار در معرض شارحرارتی ثابت $5000 \frac{W}{m^2}$

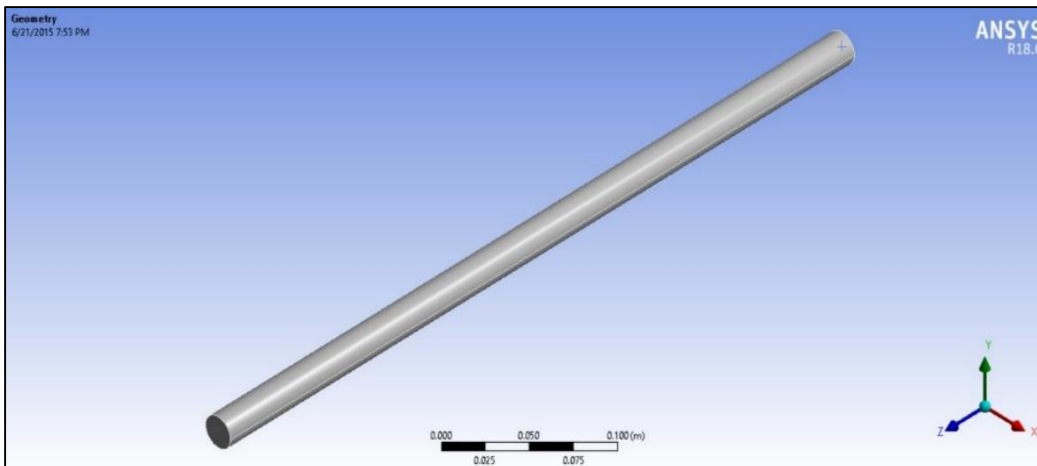
۳- شبیه‌سازی و بررسی اشکال هندسی مسأله



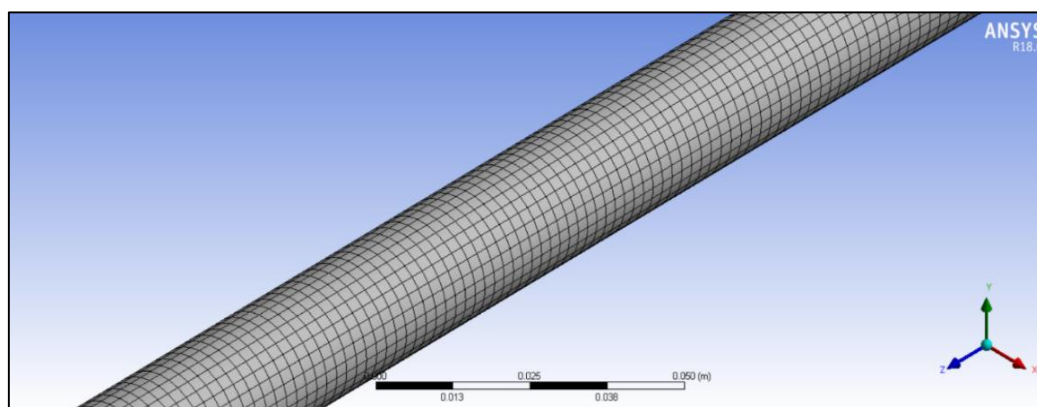
شکل ۱- لوله مجهز به میله گرداب



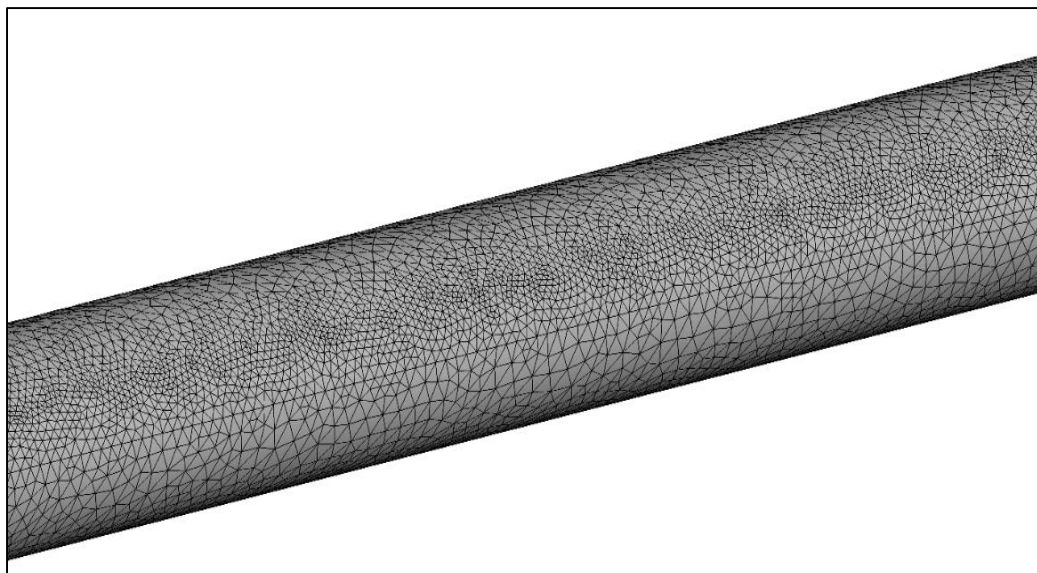
شکل ۲- میله گرداب



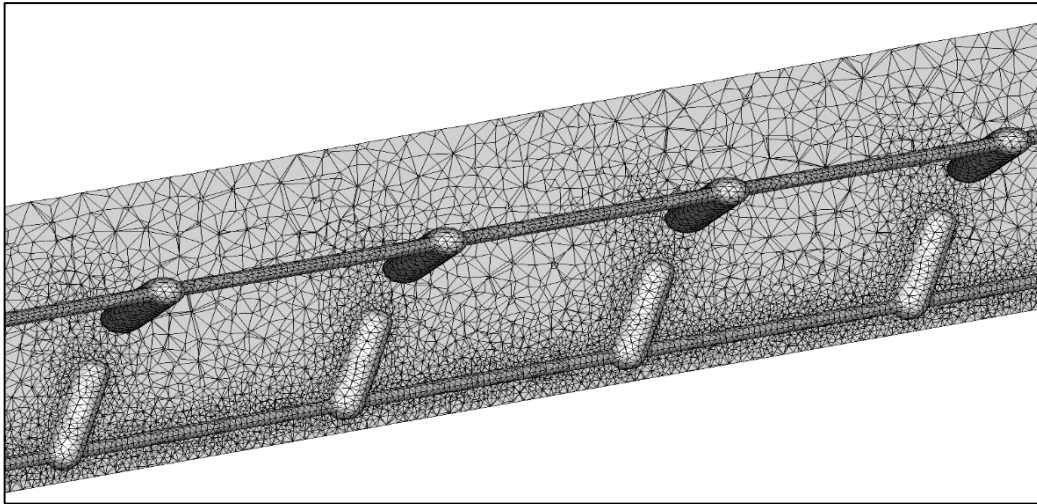
شکل ۳- لوله بدون میله گرداب



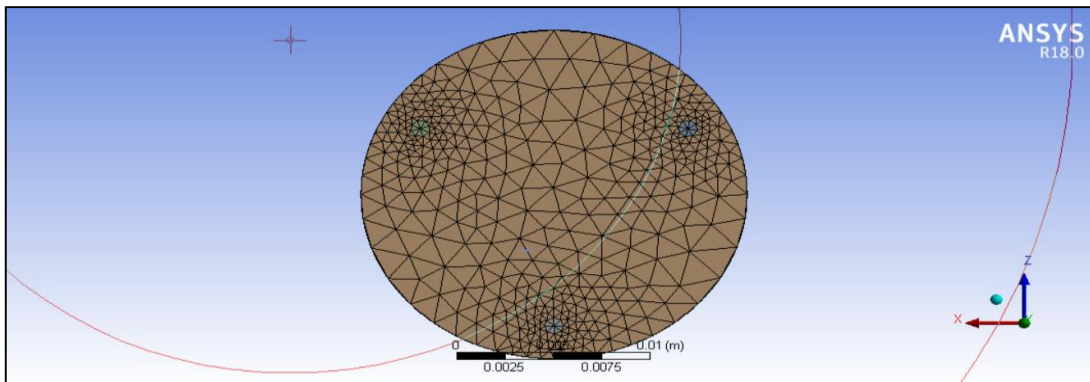
شکل ۴- شبکه بندی لوله بدون میله گرداب



شکل ۵- شبکه بندی لوله مجهز به میله گرداب

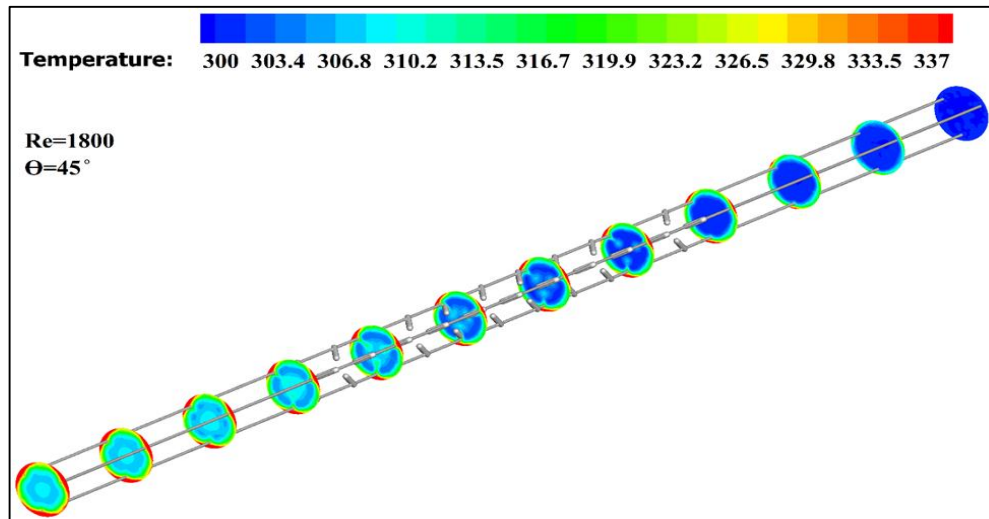


شکل ۶- شبکه بندی میله گرداب

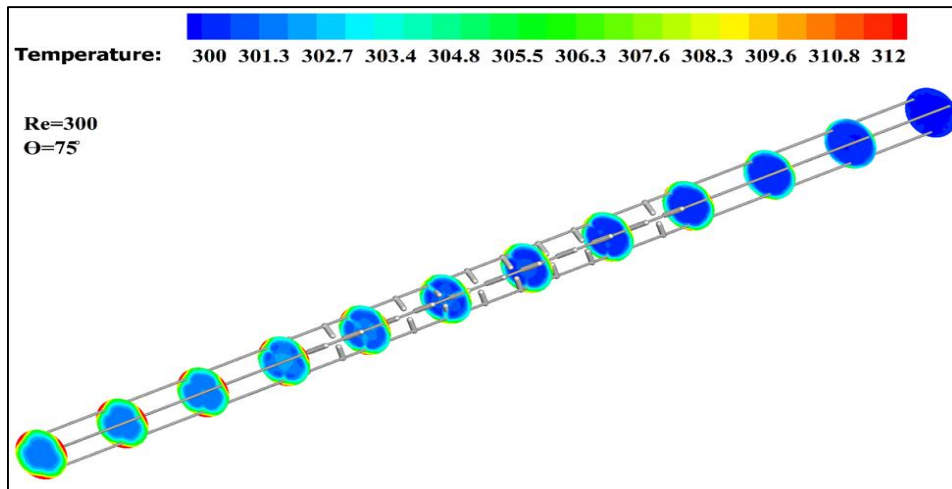


شکل ۷- شبکه بندی لوله مجهز به میله گرداب در نرم افزار ANSYS

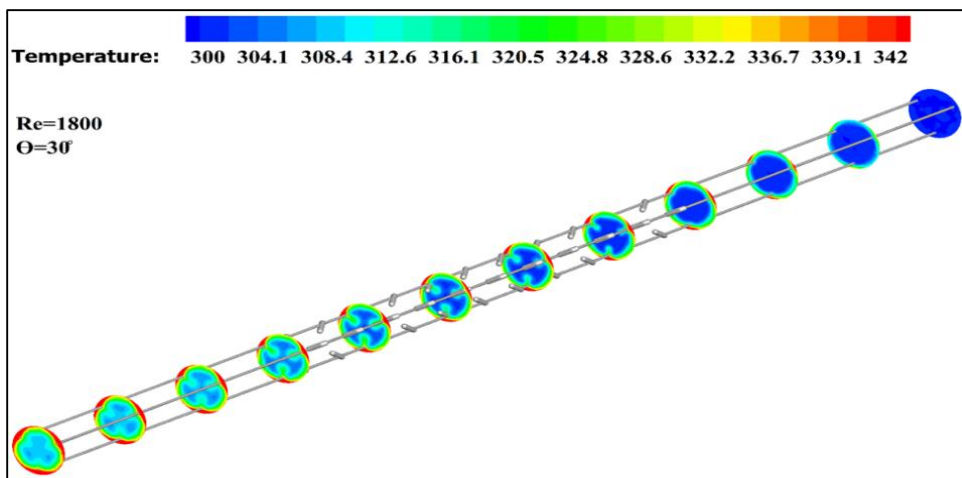
۴- کانتورها



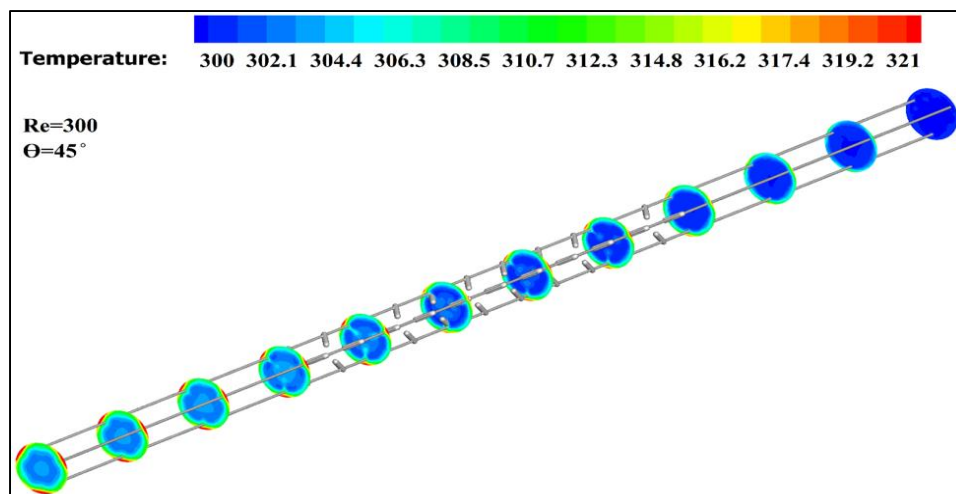
شکل ۸- کانتور دما نانوسیمال آاومینا در زاویه ۴۵ و رینولدز ۱۸۰۰



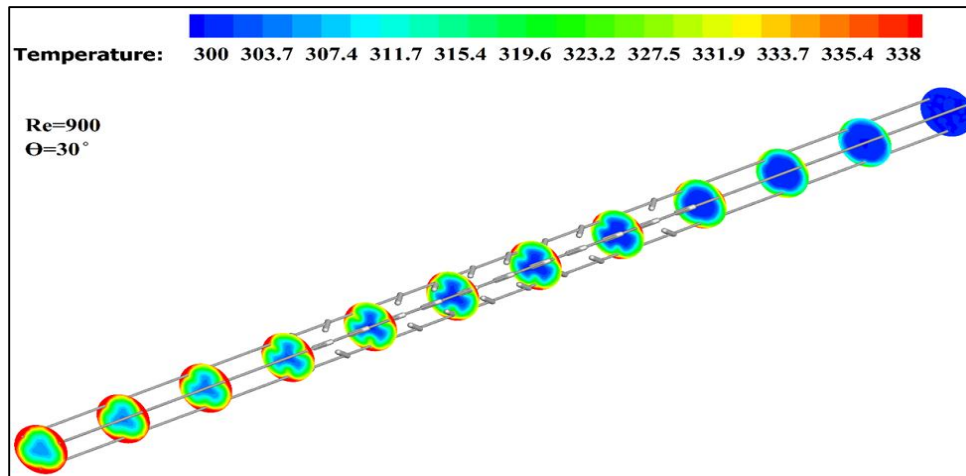
شکل ۹- کانتور دما سیال آب در زاویه ۷۵ درجه و در رینولدز ۳۰۰



شکل ۱۰- کانتور دما نانوسیال آلومینا در زاویه ۳۰ درجه و رینولدز ۱۸۰۰



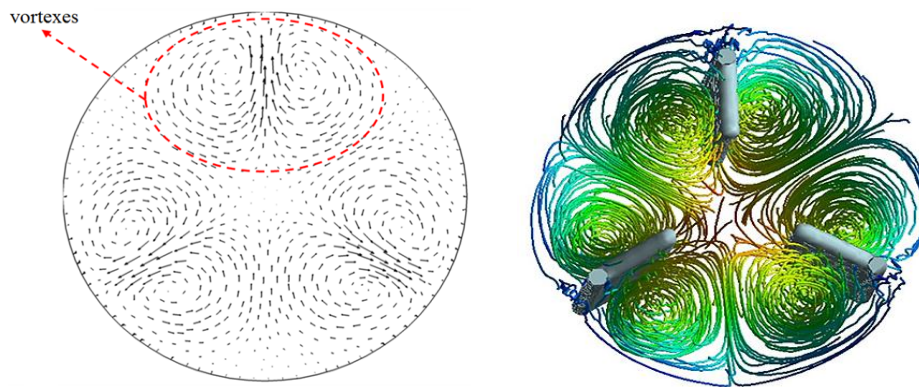
شکل ۱۱- کانتور دما سیال آب در زاویه ۴۵ درجه و رینولدز ۳۰۰



شکل ۱۲- کانتور دما نانوسیال آلومینا در زاویه ۳۰ درجه و رینولدز ۹۰۰

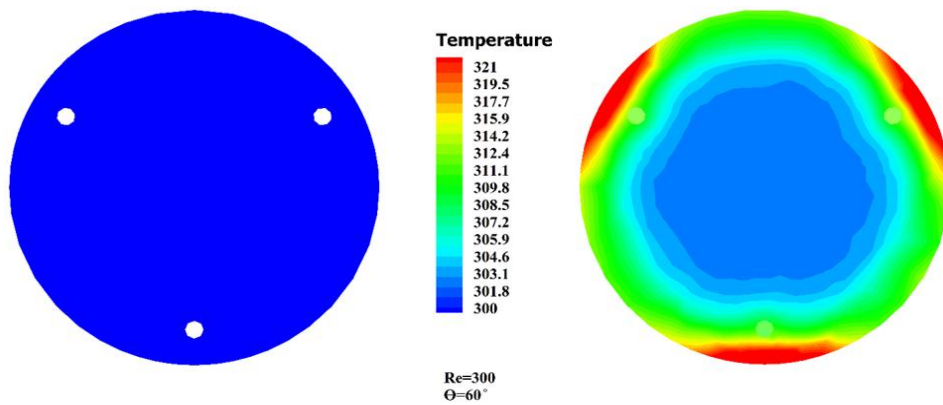
۵- بحث و بررسی نتایج

تغییرات دما در سیال آب و نانوسیال آلومینا در شکل های ۸ تا ۱۲ نشان داده شده است. همان طور که در شکل ها مشخص است، سیال پس از ورود به لوله و طی کردن مسافتی به میله های گرداب برخورد می کند. سیال پس از برخورد به میله گرداب، جریان چرخشی پیدا کرده است. وجود میله گرداب درون لوله و همچنین وجود شار حرارتی ثابت در جداره ی لوله باعث افزایش دما سیال می شود. با توجه به شکل های بالا، در همه رینولدزها و زاویه ها، بیشترین دما سیال نزدیک به جداره لوله می باشد و در مرکز لوله، دما کمتر می باشد. بیشترین میزان افزایش دما با توجه به شکل ۱۰، مربوط به میله گرداب ۳۰ درجه و رینولدز ۱۸۰۰ در نانوسیال آلومینا می باشد.

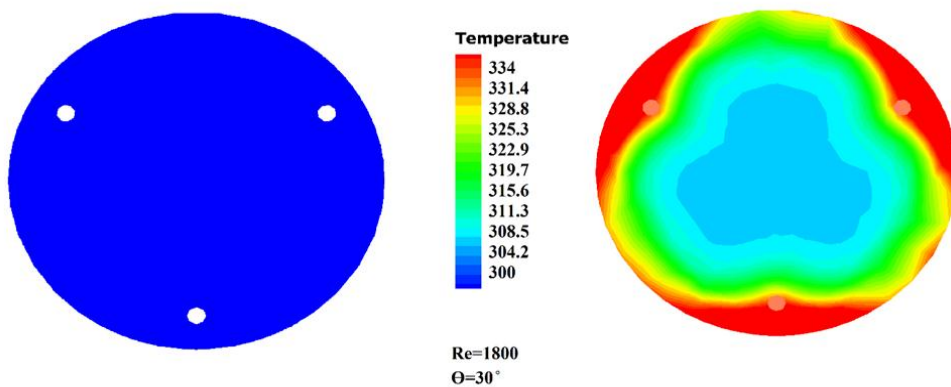


شکل ۱۳- جهت جریان سیال پس از برخورد به میله گرداب

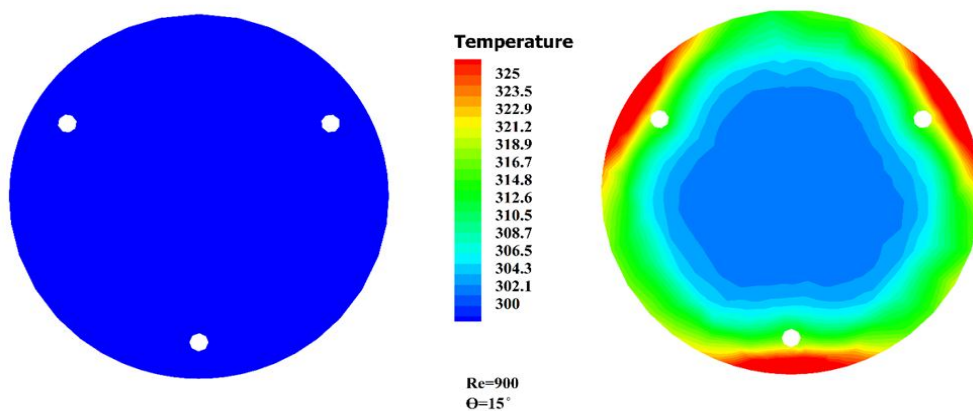
در شکل ۱۳ جهت جریان سیال پس از برخورد به میله گرداب، نشان داده شده است. سیال با جریانی آرام وارد لوله می شود، سیال پس از پیمودن مسافتی به میله گرداب برخورد کرده که سیال پس از برخورد به میله گرداب جریان چرخشی و گردابه ای پیدا می کند که جریان متلاطم شده است و همین طور که در شکل قابل مشاهده است، جهت جریان به سمت جداره های لوله در حرکت می باشد و از آنجایی که جداره ی لوله دارای شار حرارتی می باشد، دمای سیال پس از برخورد به میله گرداب و تولید جریان چرخشی و متلاطم افزایش می یابد.



شکل ۱۴- مقایسه دمای ورودی و خروجی نانوسیال آلومینا در زاویه ۶۰ درجه و رینولدز ۳۰۰

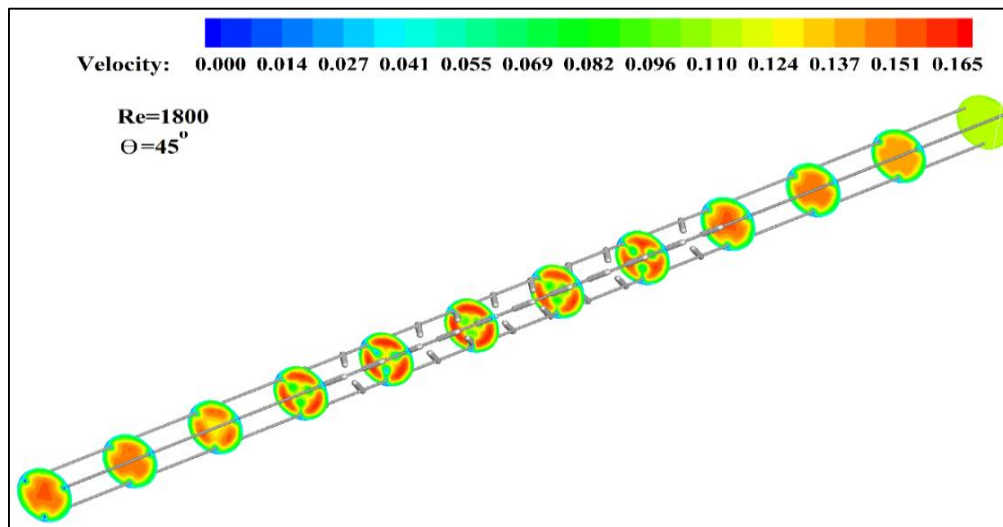


شکل ۱۵- مقایسه دمای ورودی و خروجی سیال آب در زاویه ۳۰ درجه و رینولدز ۱۸۰۰



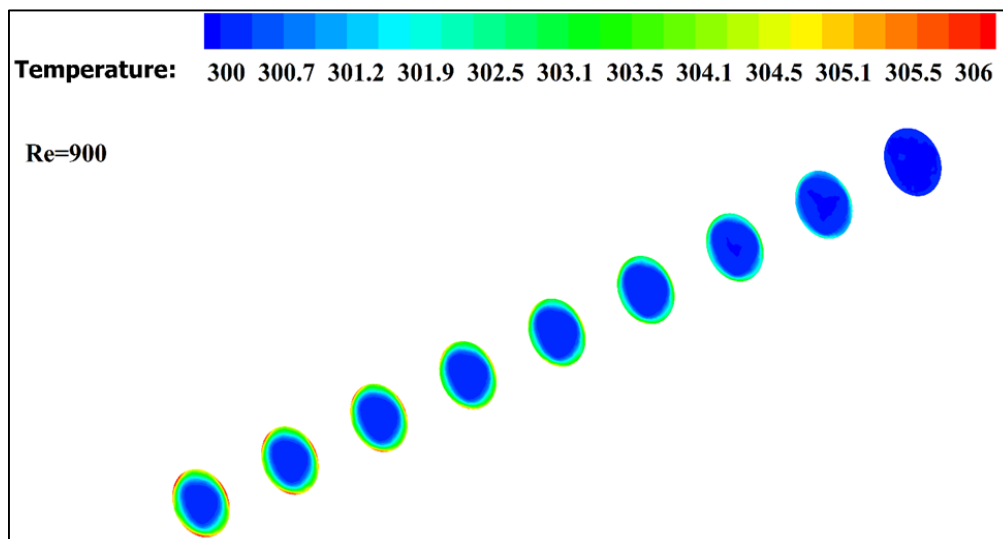
شکل ۱۶- مقایسه دمای ورودی و خروجی سیال آب در زاویه ۱۵ درجه و رینولدز ۹۰۰

با توجه به شکل ۱۴، ۱۵، ۱۶ دمای سیال ورودی ۳۰۰ کلون می‌باشد. پس از برخورد سیال به میله گرداب و پدیدار شدن جریان چرخشی و با توجه به وجود شار حرارتی در جداره لوله، دمای خروجی سیال افزایش چشمگیری پیدا کرده است. در شکل‌های ۱۴ و ۱۵ و ۱۶ مقایسه‌ی دمای ورودی و خروجی سیال آب یا نانوسیال آلومینا را نشان می‌دهد.

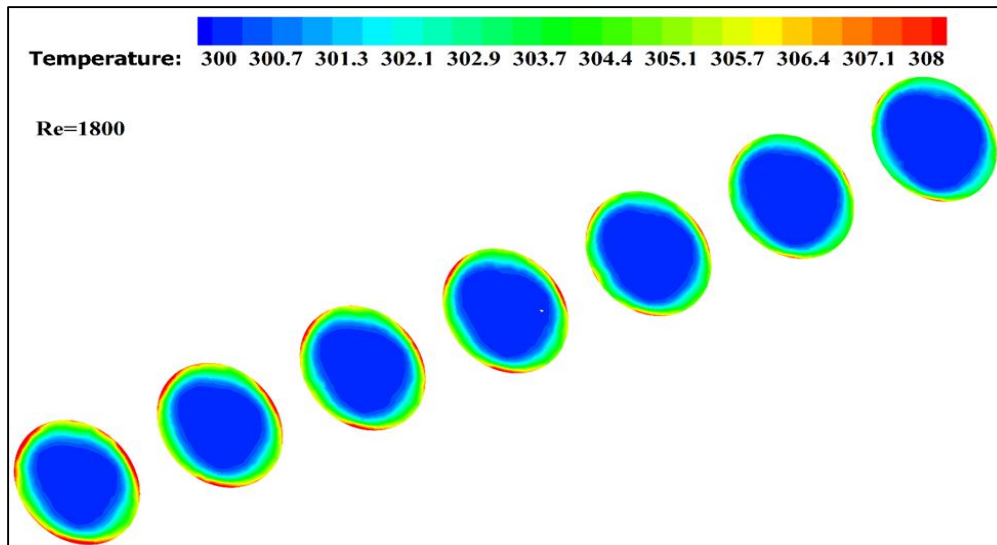


شکل ۱۷- کانتور سرعت نانوسیال آلومینا در زاویه ۴۵ درجه و رینولدز ۱۸۰۰

تغییرات سرعت سیال در شکل ۱۷ نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل مشخص است، سیال با سرعتی وارد لوله شده و پس از پیمودن مسافتی، سرعت سیال در مرکز بیشتر از جداره‌ها شده و پس از برخورد سیال به میله‌های گرداب و تولید جریان چرخشی و گردابه‌ای، سرعت بیشینه در مرکز نمی‌باشد و سیال در حال چرخش می‌باشد و بیشینه سرعت در ناحیه جداره‌ی دیوار می‌باشد و پس از عبور سیال از میله گرداب و پیمودن مسافتی، بیشینه سرعت از سمت جداره‌ی لوله به مرکز لوله منتقل می‌شود و در جداره‌ی دیوار، سرعت سیال بسیار کم می‌شود.



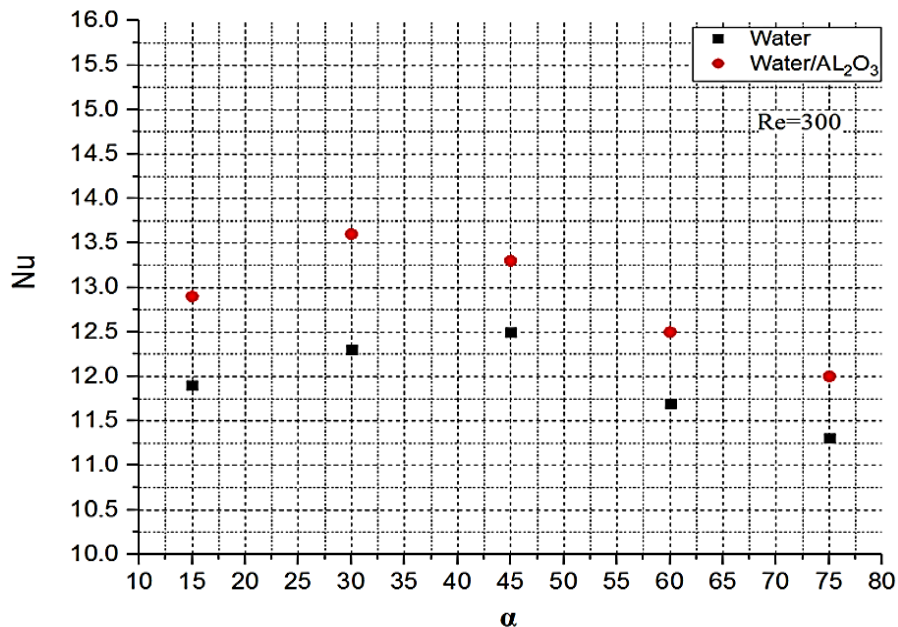
شکل ۱۸- کانتور دما سیال آب در لوله بدون میله گرداب رینولدز ۹۰۰



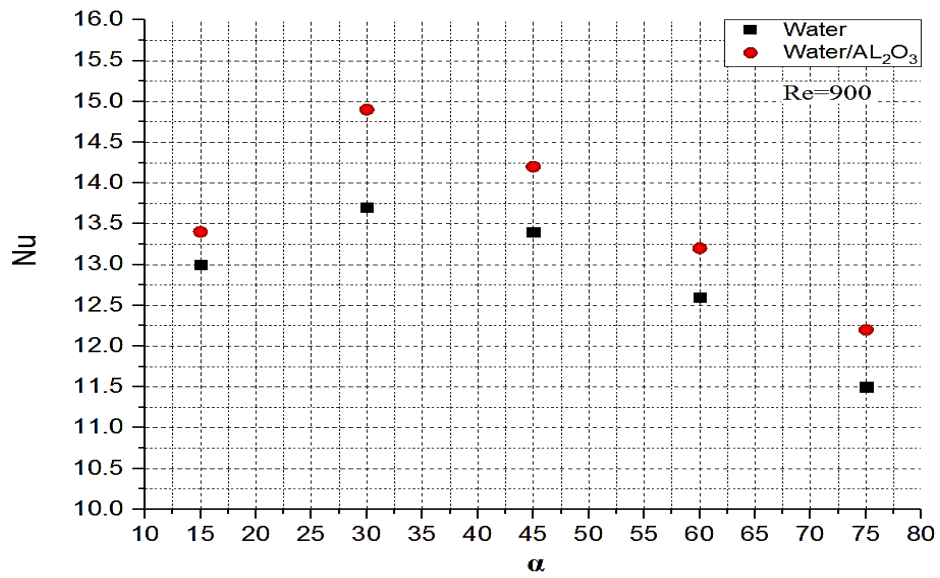
شکل ۱۹- کانتور دما سیال آب در لوله بدون میله گرداب رینولدز ۱۸۰۰

شکل های ۱۸ و ۱۹ بیانگر کانتور دما سیال آب در لوله بدون میله گرداب می باشد. در این لوله به دلیل نبود میله گرداب، جریان چرخشی و متلاطم نمی شود همین علت باعث جریان کمتری به سمت جداره ها برود. همان طور که در شکل ۱۸ و ۱۹ قبل مشاهده است، دمای خروجی سیال در این حالت نسبت به دمای خروجی سیال لوله مجهز به میله گرداب، کمتر است. در این شکل دمای سیال فقط با توجه به شار حرارتی جداره لوله افزایش پیدا می کند.

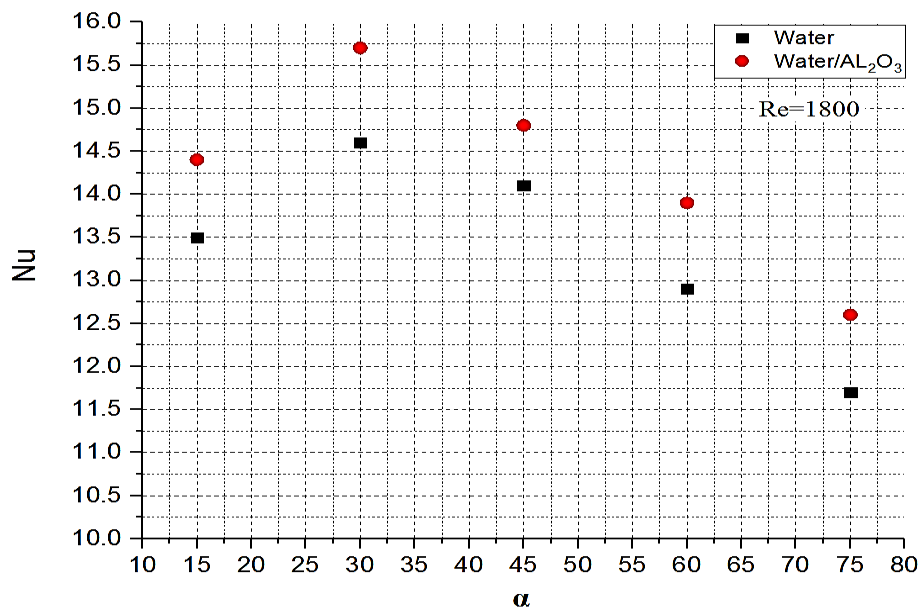
۶- نمودارها



شکل ۲۰- ناسلت بر حسب زاویه در رینولدز ۳۰۰

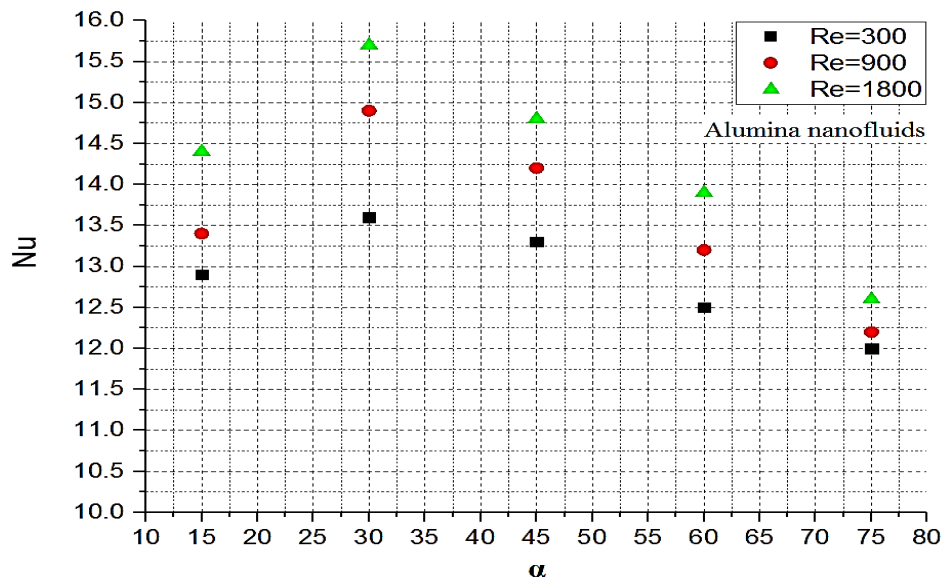


شکل ۲۱- ناسلت بر حسب زاویه در رینولدز ۹۰۰

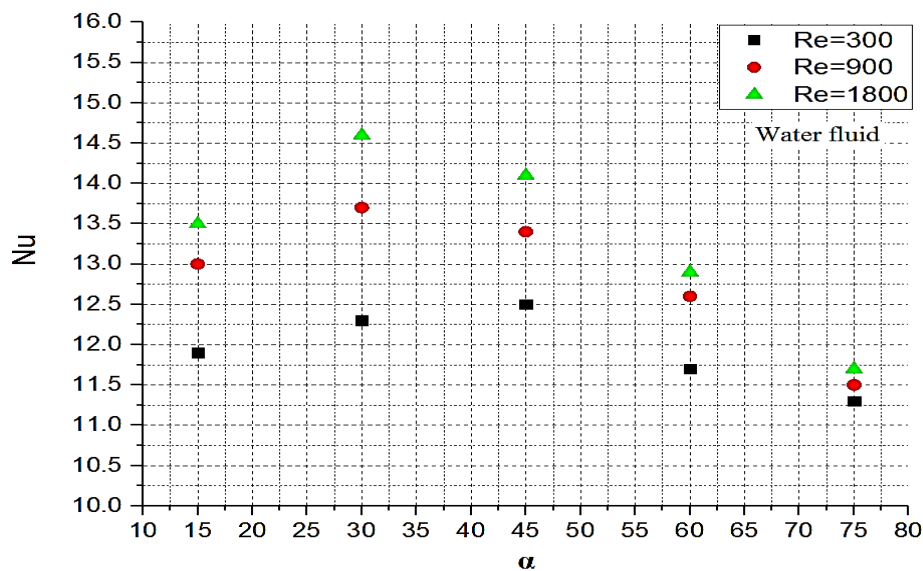


شکل ۲۲- ناسلت بر حسب زاویه در رینولدز ۱۸۰۰

شکل‌های ۲۰، ۲۱ و ۲۲ مقایسه انتقال حرارت بین سیال آب و نانوسیال آلومینا می‌باشد. این شکل‌ها بیانگر این است که در رینولدزهای ۳۰۰، ۹۰۰، ۱۸۰۰ انتقال حرارت نانوسیال آلومینا در زاویه‌های ۳۰، ۴۵، ۶۰، ۷۵ نسبت به سیال آب، بیشتر است. با توجه به این شکل‌ها، بیشترین میزان انتقال حرارت در سیال مشخص می‌شود.

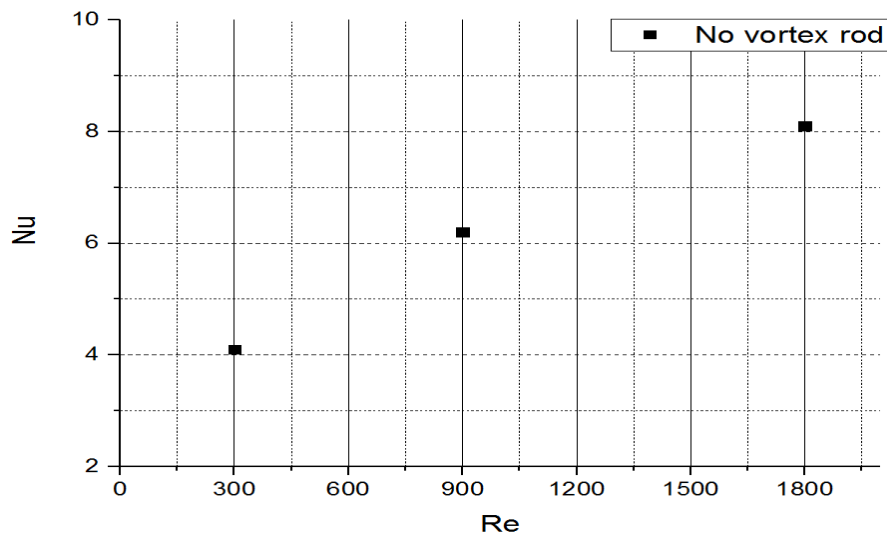


شکل ۲۳- ناسلت بر حسب زاویه برای نانوسیال آلومینا



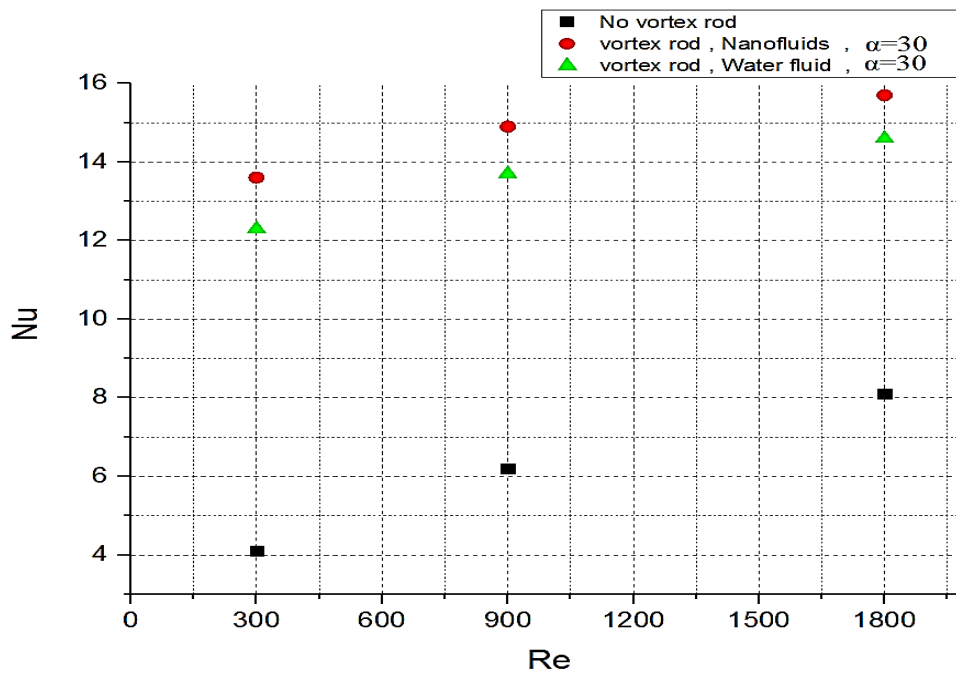
شکل ۲۴- ناسلت بر حسب زاویه برای سیال آب

در شکل‌های ۲۳ و ۲۴، تاثیر زاویه‌ی میله گرداب و همچنین تاثیر تغییر رینولدز نشان داده شده است. این شکل بیانگر این است که انتقال حرارت در رینولدز ۱۸۰۰ از رینولدزهای ۹۰۰ و ۳۰۰ بیشتر می‌باشد همچنین در زاویه ۳۰ درجه بیشترین انتقال حرارت نسبت به زاویه‌های ۱۵، ۴۵، ۶۰ و ۷۵ وجود دارد. هرچه زاویه میله گرداب بیشتر شود، انتقال حرارت کاهش می‌یابد و عمل گرم کردن سیال کندتر می‌شود. هر چه عدد رینولدز افزایش یابد، انتقال حرارت افزایش پیدا می‌کند. همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود بهترین انتقال حرارت چه در نمودار سیال آب و چه در نمودار نانوسیال آلومینا، مربوط به زاویه‌ی ۳۰ درجه و رینولدز ۱۸۰۰ می‌باشد.

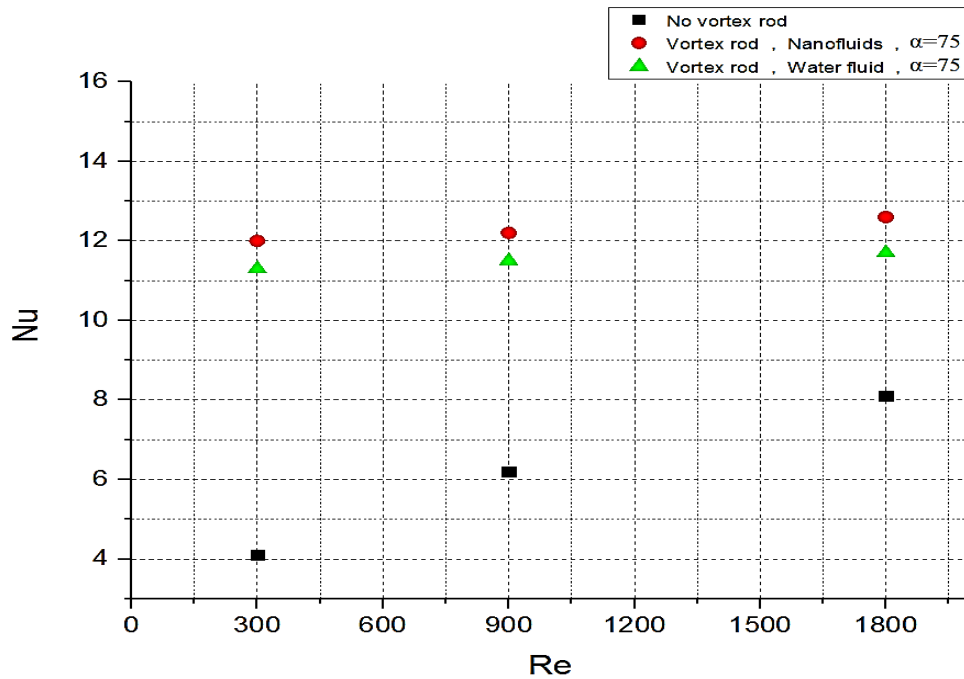


شکل ۲۵- ناسلت بر حسب رینولدز در لوله بدون میله گرداب

شکل ۲۵ بیانگر، ناسلت بر حسب رینولدز در لوله بدون میله گرداب می‌باشد. همان‌طور که در شکل فوق مشاهده می‌شود انتقال حرارت در لوله بدون میله‌ی گرداب کمتر از انتقال حرارت در لوله مجهز به میله گرداب می‌باشد. طبق نمودار، با افزایش رینولدز انتقال حرارت افزایش پیدا می‌کند.



شکل ۲۶- مقایسه ناسلت بر حسب رینولدز لوله بدون میله گرداب با لوله مجهز به میله گرداب در زاویه ۳۰



شکل ۲۷- مقایسه ناسلت بر حسب رینولدز لوله بدون میله گرداب با لوله مجهز به میله گرداب در زاویه ۷۵

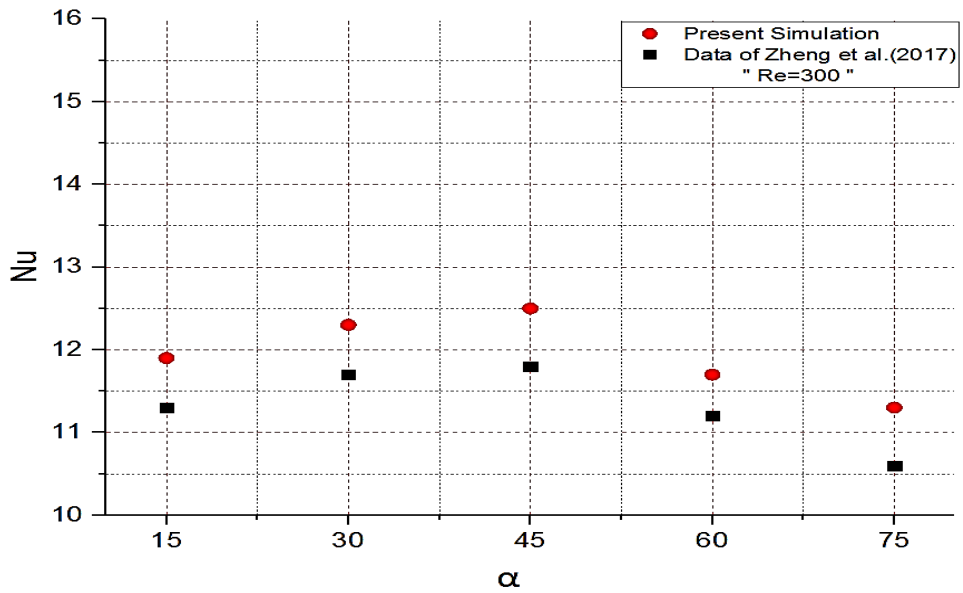
شکل های ۲۶ و ۲۷ بیانگر مقایسه ناسلت بر حسب رینولدز لوله بدون میله گرداب با لوله مجهز به میله گرداب در زاویه ۳۰ و ۷۵ درجه می باشد. همان طور که در شکل ۲۶ و ۲۷ قابل مشاهده است، انتقال حرارت در لوله مجهز به میله گرداب بیشتر از انتقال حرارت در لوله بدون میله گرداب است. طبق شکل ها انتقال حرارت در سیال آب کمتر از نانوسیال آلومینا می باشد و انتقال حرارت در لوله مجهز به میله گرداب در زاویه ی ۳۰ درجه از زاویه ی ۷۵ درجه بیشتر می باشد و انتقال حرارت در لوله بدون میله گرداب کم می باشد.

۷- صحت سنجی

برای صحت سنجی، تمامی داده های خروجی از برنامه ANSYS FLUENT 18 در برنامه ORIGIN اجرا گردیده و نمودار خروجی بر نمودار ناسلت بر حسب زاویه مقاله آقای ژنگ منطبق گردید و در نهایت نتیجه زیر حاصل گردد.

جدول ۴- جدول صحت سنجی و درصد خطا در رینولدز ۳۰۰

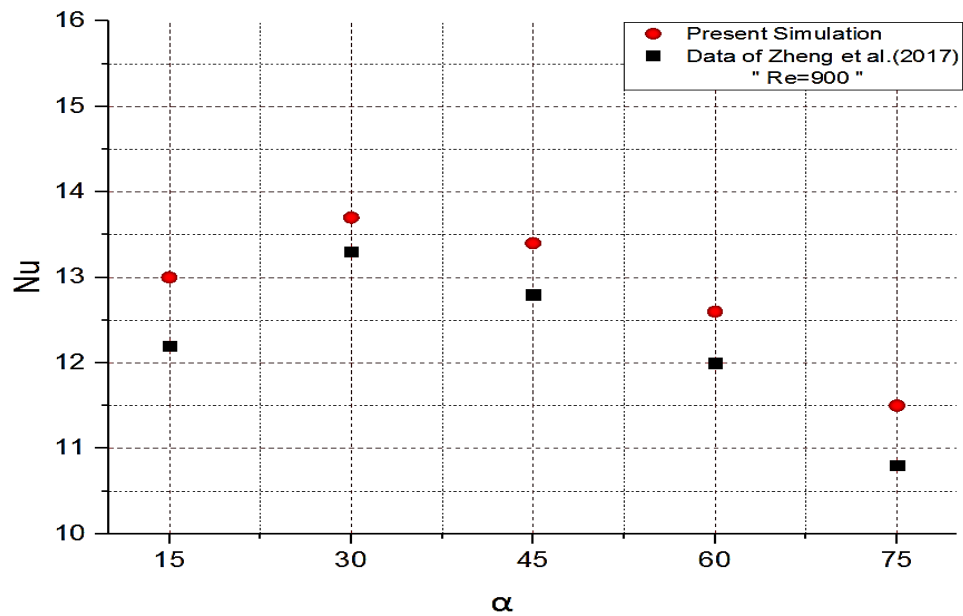
Reynolds Number	α	Present Simulation	Data of Zhang et al.(2017)	Error Function (%)
300	15	11.9	11.3	5.3
300	30	12.3	11.7	5.12
300	45	12.5	11.8	6
300	60	11.7	11.2	4.5
300	75	11.3	10.6	6.6



شکل ۲۸- صحت سنجی برای رینولدز ۳۰۰

جدول ۵- جدول صحت سنجی و درصد خطا در رینولدز ۹۰۰

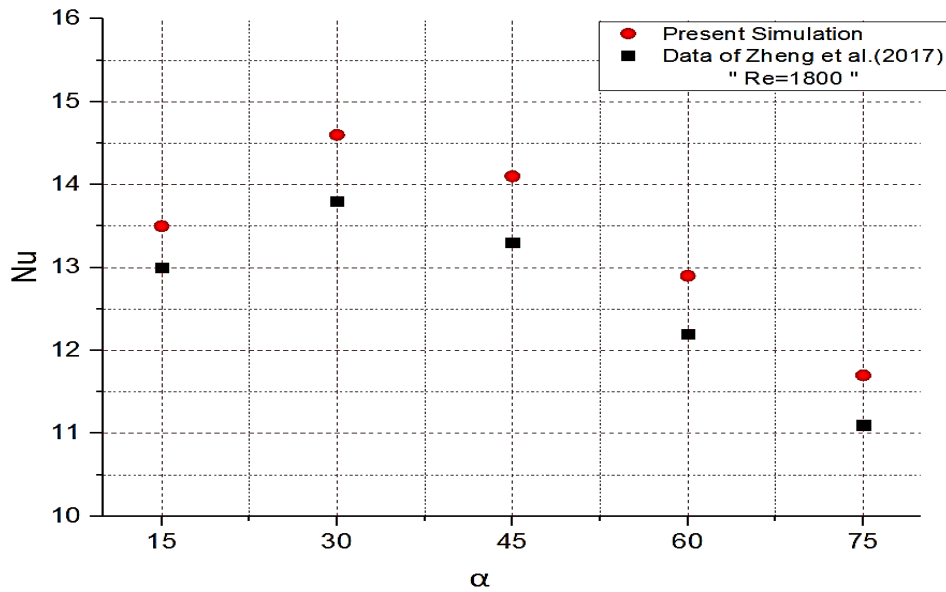
Reynolds Number	α	Present Simulation	Data of Zhang et al.(2017)	Error Function (%)
900	15	13	12.2	6.6
900	30	13.7	13.3	3
900	45	13.4	12.8	4.7
900	60	12.6	12	5
900	75	11.5	10.8	6.5



شکل ۲۹- صحت سنجی برای رینولدز ۹۰۰

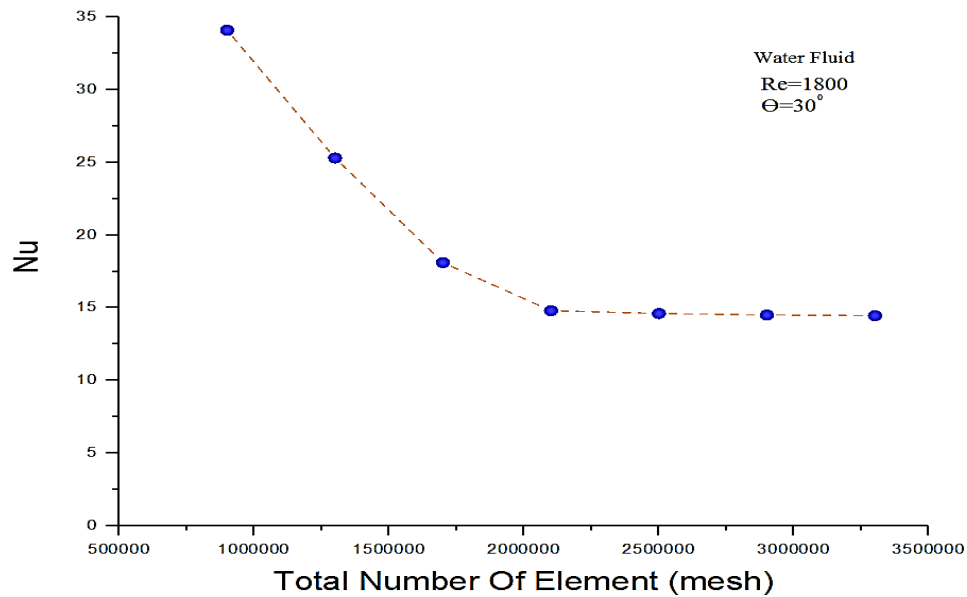
جدول ۶- جدول صحت‌سنجی و درصد خطا در رینولدز ۹۰۰

Reynolds Number	α	Present Simulation	Data of Zhang et al.(2017)	Error Function (%)
1800	15	13.5	13.1	3
1800	30	14.6	13.8	5.8
1800	45	14.1	13.3	6.6
1800	60	12.9	12.2	5.7
1800	75	11.7	11.1	5.4



شکل ۳۰- صحت‌سنجی برای رینولدز ۱۸۰۰

۷-۱- تعیین مش‌بندی مناسب و استقلال از شبکه



شکل ۳۱- ناسلت بر روی تعداد مش برای استقلال از شبکه

در پروژه‌های شبیه‌سازی، تعداد مش نقش مهمی در صحت کار دارد. نمودار ۱۲ بر حسب اعداد ناسلت بر تعداد مش می‌باشد که این نمودار برای سیال آب در رینولدز ۱۸۰۰ و زاویه ۳۰ درجه می‌باشد. برای اطمینان از صحت شبیه‌سازی، ۷ بار با تعداد مش‌های متفاوت، ران گرفته شده است. همان‌طور که در این نمودار مشخص است، بهترین مش برای لوله مجهز به میله گرداب در زاویه ۳۰ درجه تقریباً ۲۲۱۷۵۵۳ می‌باشد. تعداد مش کمتر از ۲۲۱۷۵۵۳ باعث ایجاد خطای بیشتر در شبیه‌سازی عددی می‌شود و در این پروژه تا مش ۳۳۱۶۳۸۴، ران گرفته شده است که طبق بررسی‌های انجام شده از تعداد مش ۲۲۱۷۵۵۳ تا ۳۳۱۶۳۸۴ عدد ناسلت تغییر چندانی نمی‌کند و برای صرفه‌جویی در زمان و همچنین با توجه به سیستم‌های موجود برای شبیه‌سازی، از مش ۲۲۱۷۵۵۳ برای شبیه‌سازی لوله مجهز به میله گرداب در زاویه ۳۰ درجه استفاده شده است.

۸- روابط و معادلات حاکم بر مسأله

در این تحقیق، آب و نانوسیال آلومینا به عنوان سیال ورودی مورد بررسی قرار گرفته‌اند. همچنین اثر جاذبه و ویسکوزیته تلف شده مورد بررسی قرار نگرفته است. سیال ما به صورت جریان آرام و پایدار است. بنابراین معادلات حاکم پیوستگی و مومنتوم و انرژی به صورت زیر می‌باشد.

۸-۱- معادله پیوستگی:

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

۸-۲- معادله مومنتوم:

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] \quad (2)$$

۸-۳- معادله انرژی:

$$\frac{\partial}{\partial x_j} \left(\rho u_i c_p T - K \frac{\partial T}{\partial x_j} \right) = 0 \quad (3)$$

با توجه به معادلات پیوستگی و مومنتوم و انرژی، ρ بیانگر چگالی سیال و p بیانگر فشار و μ بیانگر ویسکوزیته آب و c_p بیانگر ظرفیت گرمایی ویژه و K بیانگر ضریب هدایت حرارتی می‌باشد. شرایط بدون لغزش در سطح جداره‌ی لوله و میله‌های گرداب فرض شده است. جداره دیوار در معرض شارحرارتی ثابت $5000 \frac{W}{m^2}$ قرار گرفته شده است. دمای ورودی در این پروژه، ۳۰۰ کلوین می‌باشد. با توجه به فرمول رینولدز، سرعت‌های ورودی مشخص شده است.

$$Re = \frac{\rho u D}{\mu} \quad (4)$$

در این رابطه، μ بیانگر ویسکوزیته آب و ρ بیانگر چگالی سیال و u بیانگر سرعت سیال در لوله و D بیانگر قطر لوله می‌باشد. بعد از محاسبه کردن سرعت از طریق رابطه رینولدز و مشخص بودن دما، متوسط ضریب انتقال حرارت (h) طبق فرمول زیر محاسبه شده است.

$$h = \frac{q}{T_w - T_m} \quad (5)$$

در رابطه بالا q بیانگر شار حرارتی و T_w بیانگر دمای دیواره و T_m بیانگر دمای متوسط سیال می‌باشد. عدد ناسلت طبق رابطه‌ی زیر به دست می‌آید.

$$Nu = \frac{hD}{K} \quad (6)$$

که در این رابطه h بیانگر متوسط ضریب انتقال حرارت و D بیانگر قطر لوله و K بیانگر ضریب هدایت حرارتی می‌باشد. خواص ترمو فیزیکی نانوسیال طبق معادلات زیر بدست می‌آید.

۴-۸- رابطه چگالی نانوسیال :

$$\rho_{nf} = (1 - \phi)\rho_f + \phi \rho_p \quad (7)$$

در رابطه بالا، ρ_{nf} بیانگر چگالی نانوسیال و ϕ بیانگر کسر حجمی و ρ_p بیانگر چگالی نانوذره و ρ_f بیانگر چگالی سیال پایه می‌باشد.

۵-۸- رابطه ویسکوزیته سیال پایه :

$$A\mu_f = \mu_0 \times e^{-1.704 - 5.306 \times \frac{T_{ref}}{tt} + 7.003 \times \left(\frac{T_{ref}}{tt}\right)^2} \quad (8)$$

در رابطه بالا، μ_f بیانگر ویسکوزیته سیال پایه و e بیانگر عدد نپر و T_{ref} بیانگر دمای مرجع و tt بیانگر دمای سیال ورودی می‌باشد.

۶-۸- رابطه ویسکوزیته نانوسیال:

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

در رابطه بالا، μ_{nf} بیانگر ویسکوزیته نانوسیال و ϕ بیانگر کسر حجمی و μ_f بیانگر ویسکوزیته سیال پایه می‌باشد.

۷-۸- رابطه ظرفیت گرمایی ویژه نانوسیال:

$$(C_p)_{nf} = \frac{(1 - \phi)(\rho c_p)_f + \phi (\rho c_p)_p}{\rho_{nf}} \quad (10)$$

در رابطه بالا، $(C_p)_{nf}$ بیانگر ظرفیت گرمایی ویژه نانوسیال و $(C_p)_f$ بیانگر ظرفیت گرمایی ویژه سیال پایه و $(C_p)_p$ بیانگر ظرفیت گرمایی ویژه نانوذره و ϕ بیانگر کسر حجمی و ρ_{nf} بیانگر چگالی نانوسیال می‌باشد.

۹- نتیجه گیری

در این تحقیق، شبیه‌سازی عددی برای بررسی انتقال حرارت در یک لوله مجهز به میله گرداب در جریان آرام انجام شده است. سیال پایه در نظر گرفته شده آب و از نانوذرات اکسید آلومینیوم (Al_2O_3) جهت بهبود انتقال حرارت استفاده شده است. این تحقیق در اعداد رینولدز ۳۰۰، ۹۰۰، ۱۸۰۰ و در زاویه‌های ۱۵، ۳۰، ۴۵، ۶۰، ۷۵ هم برای سیال پایه و هم برای نانوسیال آلومینا مورد بررسی قرار گرفت. در نهایت، از بررسی و مقایسه جداول و کانتورها چنین برداشت می‌شود که، وجود میله گرداب درون لوله باعث تغییر ساختار جریان و ایجاد جریان گردابه‌ای و چرخشی در لوله شده و در نهایت باعث افزایش انتقال حرارت شده است. وجود شار حرارتی ثابت بر جداره لوله و وجود میله گرداب درون لوله باعث افزایش دما سیال شده است. با افزایش رینولدز، انتقال حرارت در سیال افزایش یافته است. با کاهش زاویه میله گرداب از ۷۵ درجه تا ۳۰ درجه، انتقال حرارت در سیال افزایش یافته است و از زاویه ۳۰ درجه تا ۱۵ درجه، انتقال حرارت سیال کاهش یافته است. بیشترین میزان انتقال حرارت در سیال بررسی شده، زاویه ۳۰ درجه و در رینولدز ۱۸۰۰ می‌باشد. وجود نانو ذره آلومینا با ۳ درصد حجمی در سیال آب، باعث افزایش انتقال حرارت محسوسی شده است.

۱۰- مراجع

1. J.C. Maxwell, A Treatise on Electricity and Magnetism, 2nd ed, Vol.1, Clarendon Press, Oxford, U.K, 1881.
2. S. Choi, Enhancing thermal conductivity of fluids with nanoparticles, ASME-Publications-Fed, Vol. 231, pp 99-106, 1995.
3. J.A. Eastman, S. Choi, S. Li, Anomalously increased effective thermal conductivities of ethylene glycol-based nanofluids containing copper nanoparticles, Applied Physical Letter, Vol.78, pp 718-720, 2001
4. Y. Xuan, Q. Li, Investigation on Convective Heat Transfer and Flow Features of Nanofluids, Journal of Heat Transfer, Vol. 125, pp 151-155, 2003.

5. W. Duangthongsuk, S. Wongwises, Heat transfer enhancement and pressure drop characteristics of TiO₂-water nanofluid in a double-tube counter flow heat exchanger, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 52, pp 2059-2067, 2009.
6. M. Kayhani, M. Nazari, H. Soltanzadeh, M. Heyhat, F. Kowsary, Experimental analysis of turbulent convective heat transfer and pressure drop of Al₂O₃/water nanofluid in horizontal tube, *Micro & Nano Letters*, pp 223-227, 2012.
7. R. Saidur, K.Y. Leong, H.A. Mohammad, A review on applications and challenges of nanofluids, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 15, pp 1646-1668, 2012.
8. L. Syam Sundar, K.V. Sharma, Turbulent heat transfer and friction factor of Al₂O₃ Nanofluid in circular tube with twisted tape inserts, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 53, pp 1409-1416, 2010.
9. W. Chingtuaythong, P. Promvonge, C. Thianpong, M. Pimsarn, Heat transfer characterization in a tubular heat exchanger with V-shaped rings, *Applied Thermal Engineering*, pp 1164-1171, 2017.
10. M. Pourramezan, H. Ajam, Modeling for thermal augmentation of turbulent flow in a circular tube fitted with twisted conical strip inserts, *Applied Thermal Engineering*, pp 509-518, 2016.
11. W. Tu, Y. Wang, Y. Tang, A numerical study on thermal-hydraulic characteristics of turbulent flow through a circular tube fitted with pipe inserts, *Applied Thermal Engineering*, pp 413-421, 2016.
12. S. Skullong, P. Promvonge, C. Thianpong, M. Pimsarn, Heat transfer and turbulent flow friction in a round tube with staggered-winglet perforated-tapes, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, pp 230-242, 2016.
13. H. Safikhani, A. Abbassi, A. Khalkhali, M. Kalteh, Multi-objective optimization of nanofluid flow in flat tubes using CFD, Artificial Neural Networks and genetic algorithms, *Advanced Powder Technology*, pp 1608-1617, 2014.
14. S. Eiamsa-ard, K. Yongsiri, K. Nanan, C. Thianpong, Heat transfer augmentation by helically twisted tapes as swirl and turbulence promoters, *Chemical Engineering and Processing, Process Intensification*, pp 42-48, 2012.
15. P. Promvonge, Thermal performance in square-duct heat exchanger with quadruple V-finned twisted tapes, *Applied Thermal Engineering*, pp 298-307, 2015.
16. C. Vashistha, A.K. Patil, M. Kumar, Experimental investigation of heat transfer and pressure drop in a circular tube with multiple inserts, *Applied Thermal Engineering*, pp 117-129, 2016.
17. P. Liu, N. Zheng, F. Shan, Z. Liu, W. Liu, Numerical study on characteristics of heat transfer and friction factor in a circular tube with central slant rods, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, pp 268-282, 2016.
18. M. Darvish Damavandi, M. Forouzanmehr, H. Safikhani, Modeling and Pareto based multi-objective optimization of wavy fin-and-elliptical tube heat exchangers using CFD and NSGA-II algorithm, *Applied Thermal Engineering*, pp 325-339, 2017
19. R.S. Jadhav, C. Balaji, Fluid flow and heat transfer characteristics of a vertical channel with detached pin-fin arrays arranged in staggered manner on two opposite endwalls, *International Journal of Thermal Sciences*, pp 57-74, 2016.
20. R. Shanthi, Sh. Sundaram, Heat Transfer Enhancement Using Nanofluids An Overview, *Thermal Science*, Vol. 16, No. 2, pp. 423-444, 2012.

21. D. Kim, Y. Kwon, Y. Cho, C. Li, S. Cheong, Y. Hwang, J. Lee, D. Hong, S. Moon, Convective heat transfer characteristics of nanofluids under laminar and turbulent flow conditions, *Current Applied Physics*, Vol. 9, No.2, Supplement, pp. e119-e123, 3, 2009.
22. H. Masuda, A. Ebata, K. Teramae, N. Hishinuma, Alternation of thermal conductivity and viscosity of liquid by dispersing ultra-fine particles (dispersion of Al_2O_3 , SiO_2 and TiO_2 ultra-fine particles), *Netsu Bussei (japan)*, 277-233, 1993.
23. M. Sheikholeslami, M. Nimafar, D.D. Ganji, Mohammad Pouyandehmehr, CuOeH₂O nanofluid hydrothermal analysis in a complex shaped cavity, *international journal of hydrogen energy xxx*, 1-9, 2016.
24. I.C. Bang, S. Heung Chang, Boiling heat transfer performance and phenomena of AL_2O_3 -Water nanofluid from a plain surface in a pool, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 48(12), 2407-2419, 2005.
25. A. Ghadimi, R. Saidur, H.S.C. Metselaar, A review of nanofluid stability properties and characterization in stationary conditions, *Int.J. Heat and Mass Transfer*, Vol 54, pp.4051-4068, 2011.
26. H. Safikhani, A. Abbassi, A. Khalkhali, M. Kalteh, Multi-objective optimization of nanofluid flow in flat tubes using CFD, Artificial Neural Networks and genetic algorithms, *Advanced Powder Technology*, pp 1608-1617, 2014.
27. Wang, X.Q. and Mujumdar, A.S., "Heat transfer characteristics of nanofluids" , a review, *International Journal of Thermal Sciences*, 46(1) 1-19. (2007)
28. Y. Li, J. Zhou, S. Tung, E. Schaneider, S. Xi, A review on development of nanofluid preparation and characterization, *Powder Technology*, Vol 196, pp.89-101, 2009.

Comparison of Numerical Simulation of Heat Transfer in a Tube Heat Exchanger Equipped with a Vortex Simple Tube

M. Nimafar^{1*}, S. Farrokhi², R. Azadi³

1- Department of Mechanical Engineering, Azad University, Tehran, Iran.

2- Master of Science in Mechanical Engineering, Energy conversion

3- Department of Mechanical Engineering, Noshirvani, Babol, Iran

* m.nimafar@gmail.com

Abstract

In this study, the variations in heat transfer at different angles of vortex rod and different Reynold numbers are investigated in order to obtain the optimal value of heat transfer. For this purpose, the angles of the vortex rod in 5 orientation of 15, 30, 45, 60 and 75 degrees were investigated in Reynolds 300, 900, 1800. Also, alumina nanoparticles (3% volume fraction) is added to the fluid and the results are compared with the non-nanoparticle state. The vortex bars in the tube are in 3 rows at 120 degrees angle and each row contains 11 rods. The increased temperature inside the tube results from the formation of a rotating flow and a vortex due to the collision of the fluid with the vortex rods. The results of this study show that the vortex rod in the tube causes turbulent flow and the temperature of the fluid inside the tube increases, and the higher Reynolds number cause to higher heat transfer rate, and also, the heat transfer in the tube equipped with a vortex rod is higher than the tube without the vortex rod. Also, presence of nanoscale alumina with a volume of 3% increases the heat transfer significantly. And finally, it was observed that the highest heat transfer rate is related to the angle of 30 degrees of the vortex rod and the Reynolds of 1800.

Keywords: Heat Exchanger, Heat Transfer, Vortex Rod, Alumina Nanofluids