

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

محمد نیمافر^{1*}، صابر فرخی²، رضا آزادی³

- 1- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد، تهران مرکز
- 2- کارشناس ارشد، مهندسی مکانیک، گرایش تبدیل انرژی
- 3- دانشجوی دکتری، مهندسی مکانیک، نوشیروانی، بابل

*moh.nimafar@iauctb.ac.ir

ارسال: دی ماه 97 پذیرش: بهمن ماه 97

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 5 جهت 15، 30، 45، 60 و 75 درجه و در رینولدزهای 300، 900، 1800 مورد بررسی قرار گرفته و نیز برای بررسی تاثیر نانوذرات در میزان افزایش انتقال حرارت آب، نانو ذره آلومینا با 3 درصد حجمی به سیال آب اضافه گردیده است. میله گرداب درون لوله در 3 ردیف با زاویه 120 درجه از هم قرار دارند، که هر ردیف دارای 11 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 3٪ حجمی، باعث افزایش انتقال حرارت سیال می‌گردد. در انتها مشاهده گردید که بیشترین میزان انتقال حرارت مربوط به زاویه 30 درجه میله گرداب و رینولدز 1800 می‌باشد.

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

1- 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 3 بعدی ماریچی، 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 3 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 1873 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 1959 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 1995 مطرح شد. او اولین کسی بود که از لفظ نانوسیال برای سوسپانسیون‌های نانوذرات 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 نانوذرات مس با کسر حجمی 0.3% و اتیلن گلیکول، در مقایسه با سیال پایه، حدود 40% 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 نانوذرات، بیشتر می‌شود. ونگ و ییز و همکاران اثر خواص ترمو-فیزیکی نانوسیال Water/TiO_2 را به عنوان خنک کننده با غلظت 0.2%، در مبدل حرارتی دو لوله‌ای بررسی کردند. نتایج بررسی این محققان نشان داده است که ضریب انتقال حرارت نانو سیالات 6-11% 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 0.6%، در یک لوله معمولی به اندازه‌ی 30.96% بوده در حالیکه با نوار پیچ خورده، این میزان 18.49%، افزایش یافته است. این آزمایش با گام 5 و در محدوده عدد رینولدز 3000_22000 انجام شده است. شارما و همکاران با استفاده از نانوسیال Al_2O_3 با کسر حجمی 0.5 درصد در یک لوله معمولی 30.30 درصد افزایش انتقال حرارت را مشاهده کردند. آن‌ها این آزمایش را در لوله‌ای با نوار پیچ خورده داخلی با گام 5 نیز انجام داده و 42.17 درصد افزایش در انتقال حرارت نسبت به آب را بدست آوردند. چینگ سونگ و همکاران در سال 2017 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 5.8 برابر یک لوله صاف و در نتیجه افت فشار 82 برابر می‌شود.

در این مطالعه، شبیه‌سازی عددی انتقال حرارت در مبدل حرارتی توسط نرم افزار FLUENT ANSYS 18 انجام شده است. طراحی و شبکه‌بندی لوله مجهز به میله گرداب، به ترتیب توسط نرم افزار CATIA و ANSYS MESHING انجام شده است.

2- 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 1 نشان داده شده است. ابعاد هندسی مدل به صورت $L=0.5$ m (طول لوله) و $D=0.02$ m (قطر لوله) و $E=0.008$ m (طول میله گرداب) و $P=0.02$ m (فاصله بین میله گرداب) و $d=0.002$ 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 3 ردیف با زاویه 120 درجه از هم قرار دارند، که هر ردیف دارای 11 میله گرداب می‌باشد. میله‌های گرداب درون لوله، در شکل 2 نشان داده شده 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 3 درصد حجمی عبور کرده است. این پژوهش در 3 رینولدز 300 و 900 و 1800 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 3 بعدی انجام شده است. به منظور تولید شبکه سازمان یافته دامنه حل به بخش‌های مجزا تبدیل شده است. در شکل 5 و 6 و 7 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 6 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 15 درجه 2137446 می‌باشد و تعداد المان در لوله مجهز به میله گرداب 30 درجه 2217553 می‌باشد و تعداد المان در لوله مجهز به میله گرداب 45 درجه 2528992 می‌باشد و تعداد المان در لوله مجهز به میله گرداب 60 درجه 2169510 می‌باشد و تعداد المان در لوله مجهز به میله گرداب 75 درجه 2266306 می‌باشد. تعداد کل المان در لوله بدون میله گرداب 65729 می‌باشد.

جدول 1- مشخصات شبکه‌بندی در لوله مجهز به میله گرداب

زاویه میله گرداب	15	30	45	60	75
تعداد المان	2137446	2217553	2528992	2169510	2266306

جدول 2- مشخصات شبکه بندی در لوله بدون میله گرداب

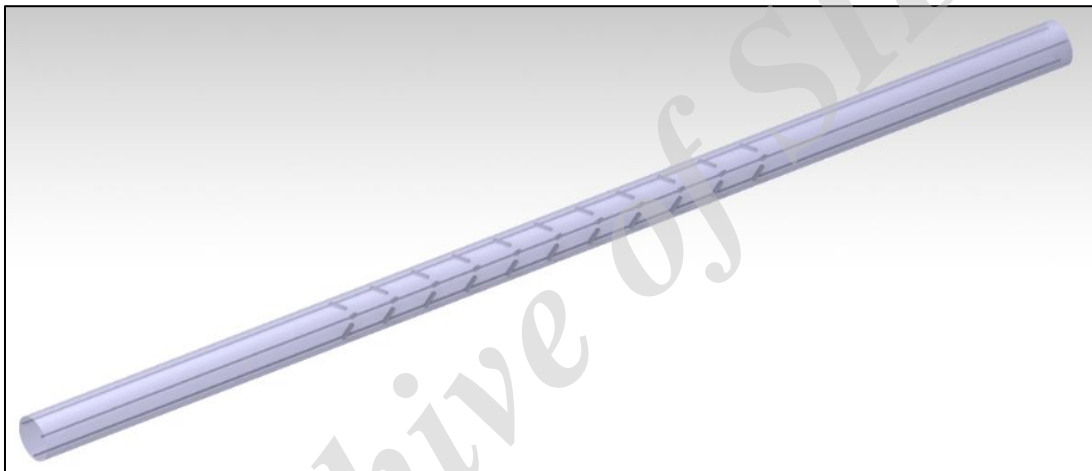
تعداد المان در لوله بدون میله گرداب	65729
-------------------------------------	-------

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 می باشد که در 3 رینولدز 300 و 900 و 1800 مورد بررسی قرار گرفته است. دمای ورودی در این پروژه 300 K می باشد. در قسمت ورودی جریان از شرط مرزی Velocity Inlet و در خروجی جریان از شرط مرزی Pressure outlet استفاده شده است.

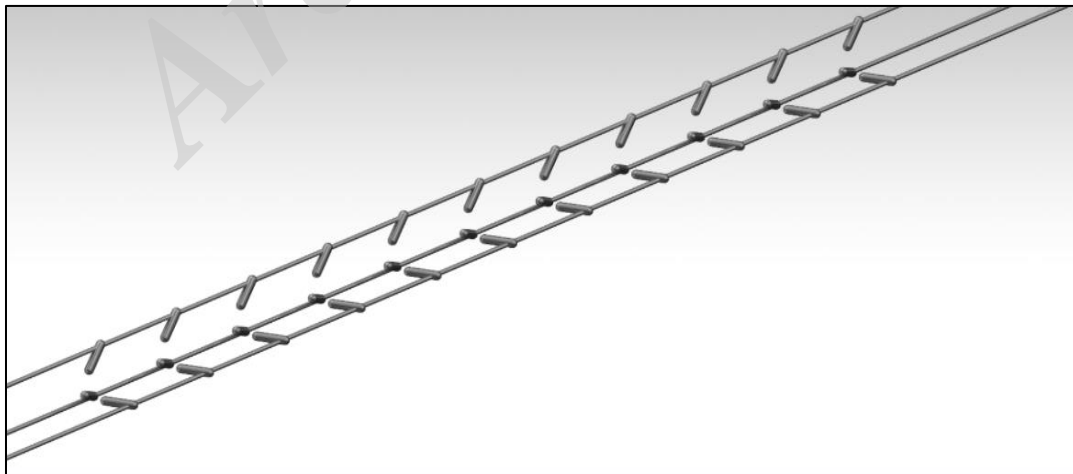
جدول ۳ - مشخصات شرایط مرزی در لوله

شرط مرزی	نوع شرط مرزی
ورودی	سرعت ورودی با توجه به عدد رینولدز و دمای ورودی 300 کلوین و در قسمت ورودی جریان از شرط مرزی Velocity Inlet
خروجی	در خروجی جریان از شرط مرزی Pressure outlet
دیواره لوله	جداره دیوار در معرض شارحرارتی ثابت $5000 \frac{\text{w}}{\text{m}^2}$

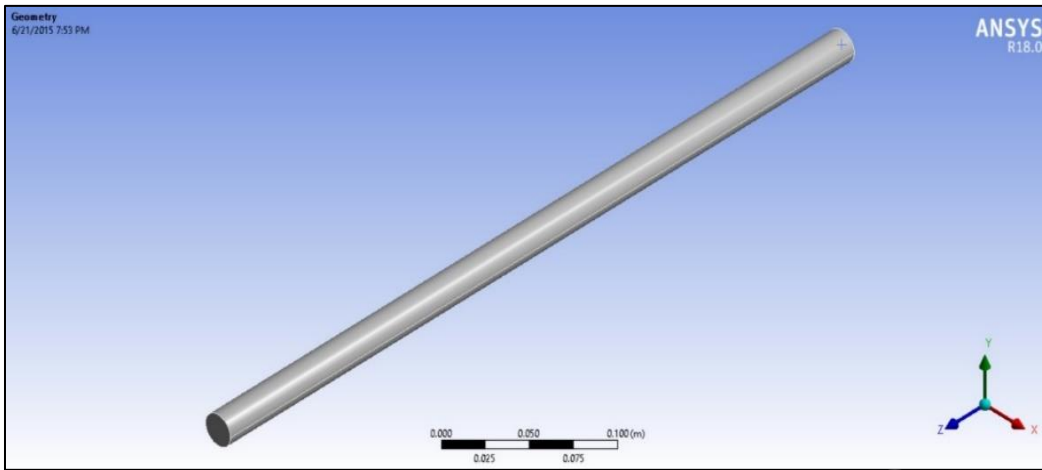
3- شبیه سازی و بررسی اشکال هندسی مسأله



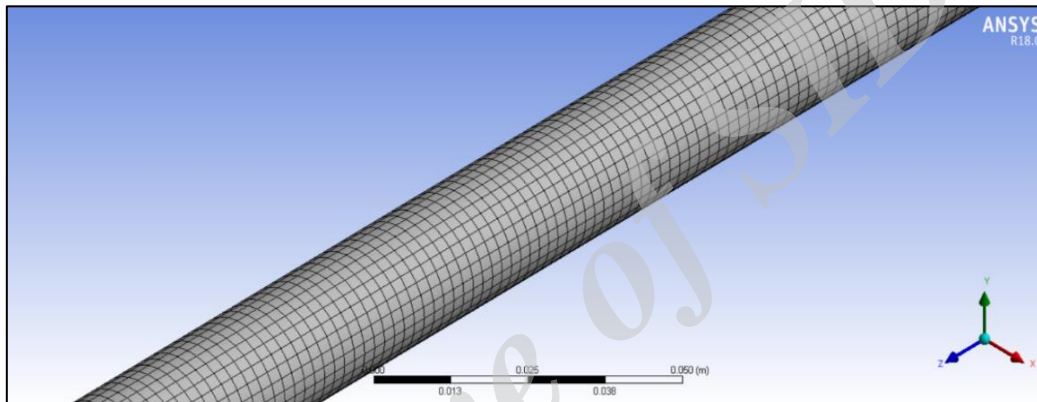
شکل ۱- لوله مجهز به میله گرداب



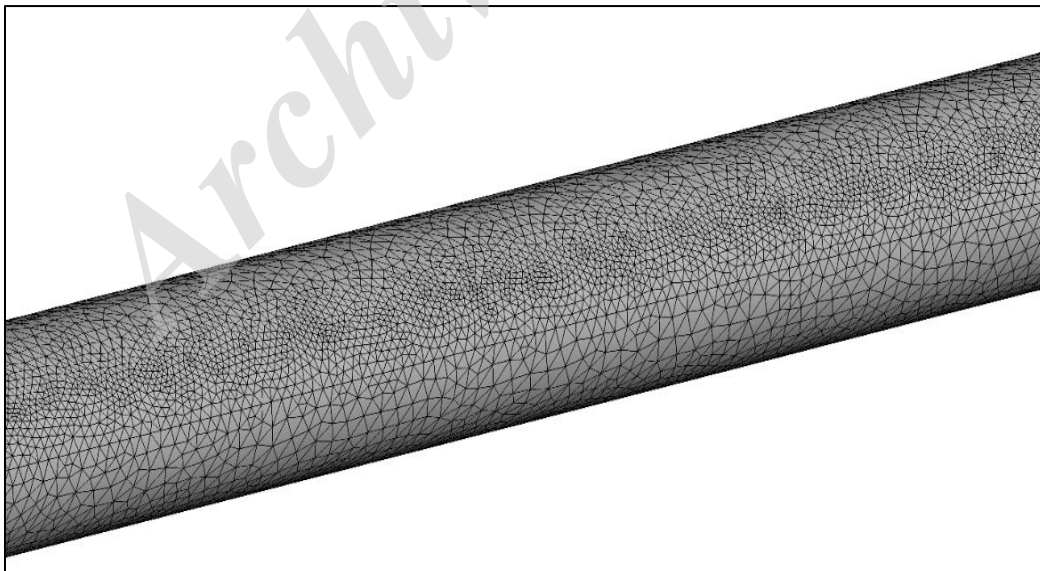
شکل ۲- میله گرداب



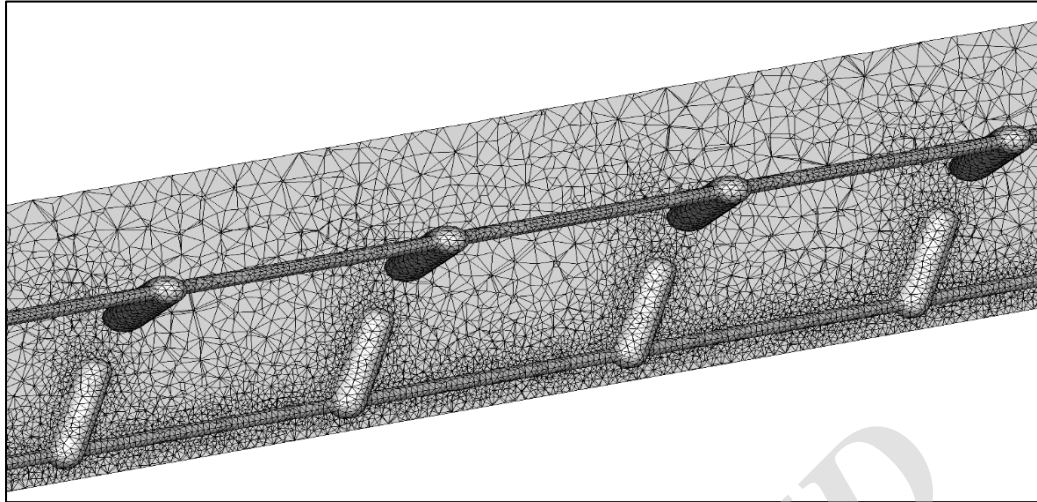
شکل ۳- لوله بدون میله گرداب



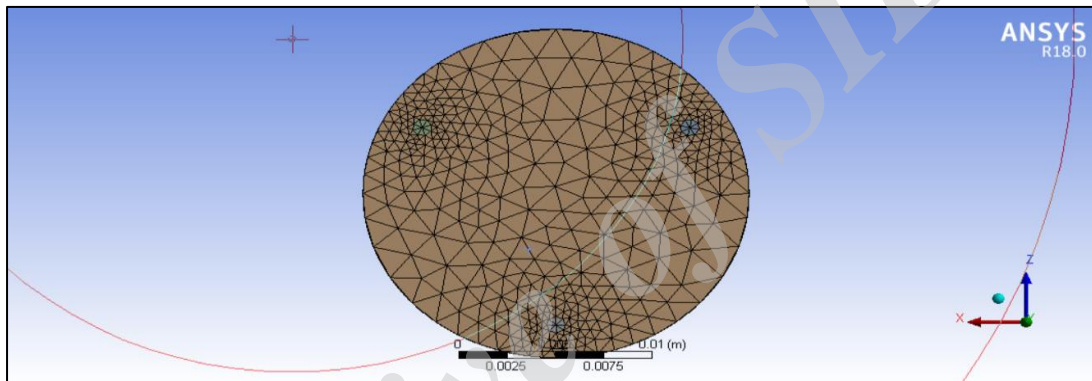
شکل ۴- شبکه بندی لوله بدون میله گرداب



شکل ۵- شبکه بندی لوله مجهز به میله گرداب

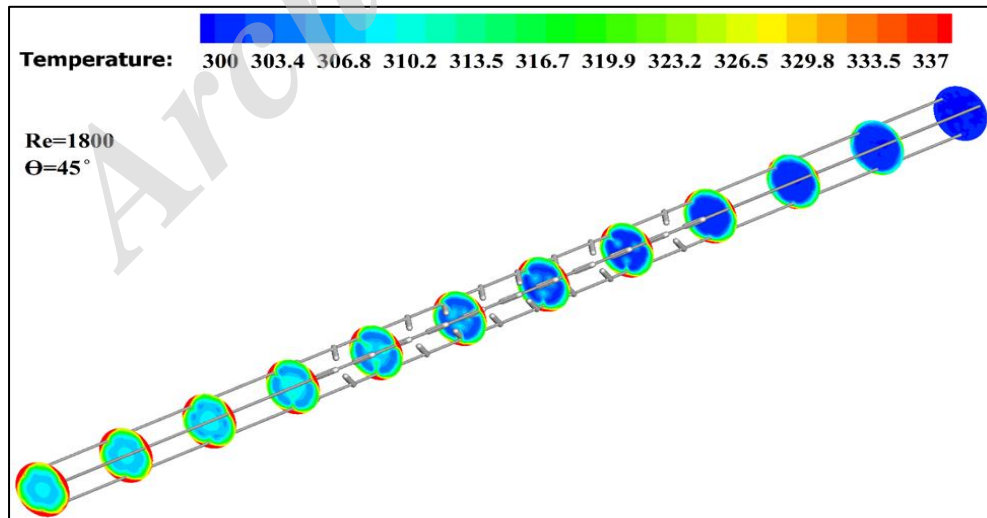


شکل ۶- شبکه بندی میله گرداب

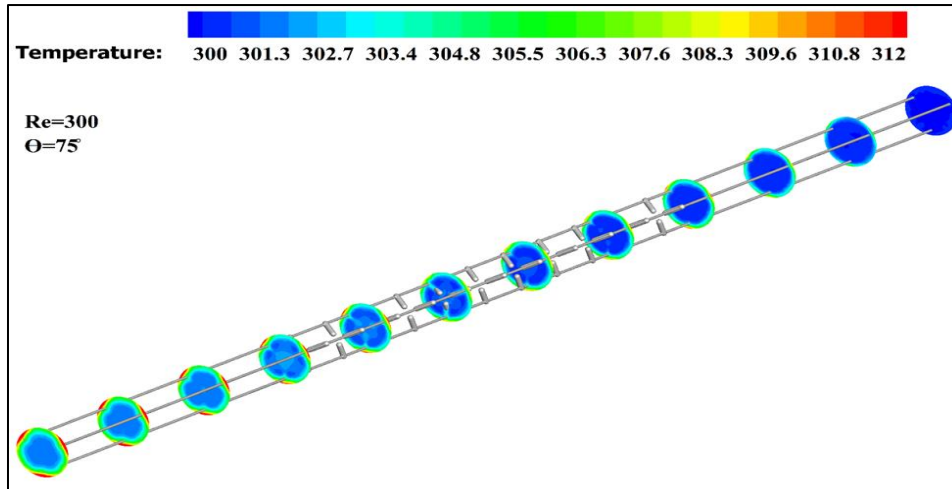


شکل ۷- شبکه بندی لوله مجهز به میله گرداب در نرم افزار ANSYS

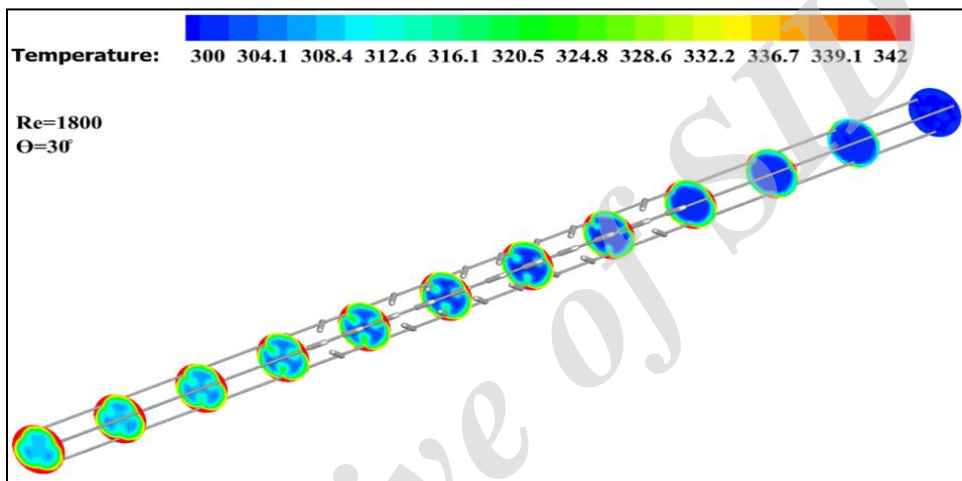
۴- کانتورها



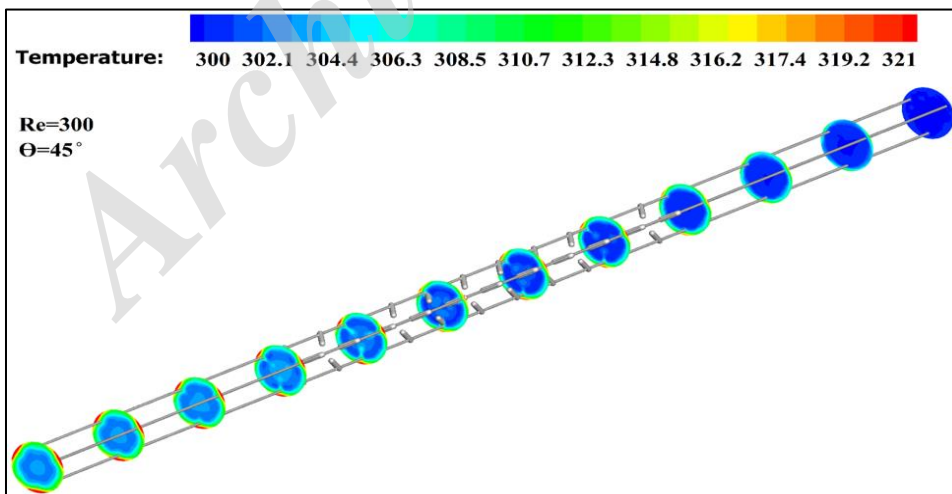
شکل ۸- کانتور دما نانوسیال آومینا در زاویه ۴۵ و رینولدز ۱۸۰۰



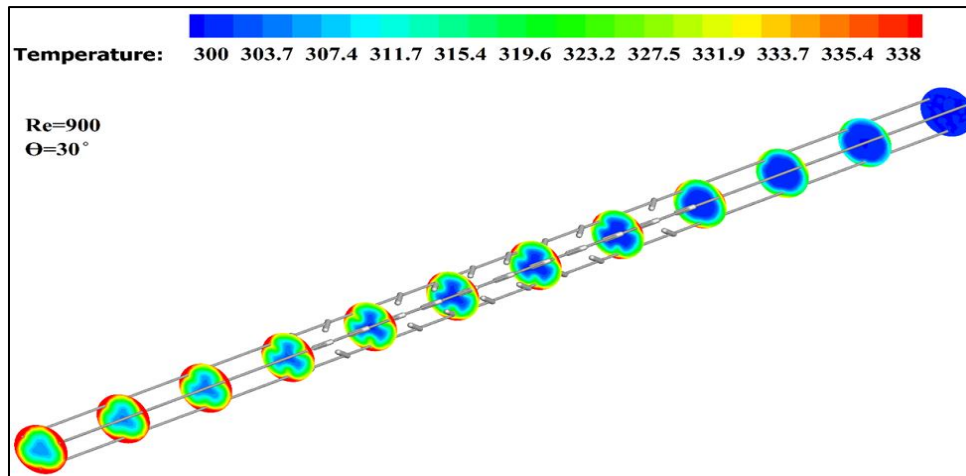
شکل ۹- کانطور دما سیال آب در زاویه ۷۵ درجه و در رینولدز ۳۰۰



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



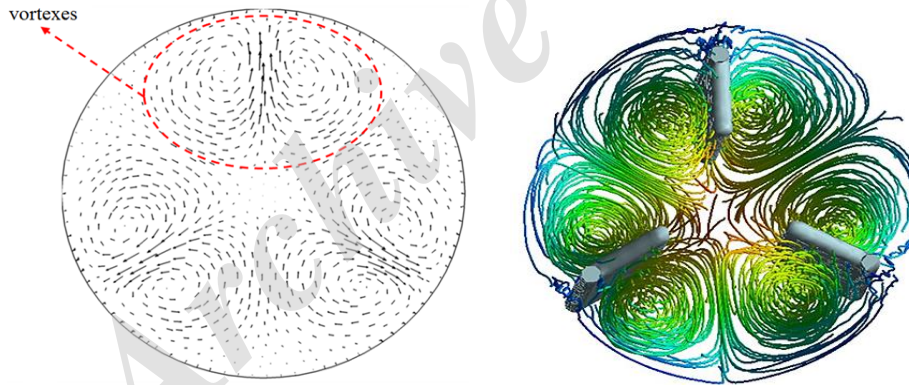
شکل ۱۱- کانطور دما سیال آب در زاویه ۴۵ درجه و رینولدز ۳۰۰



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

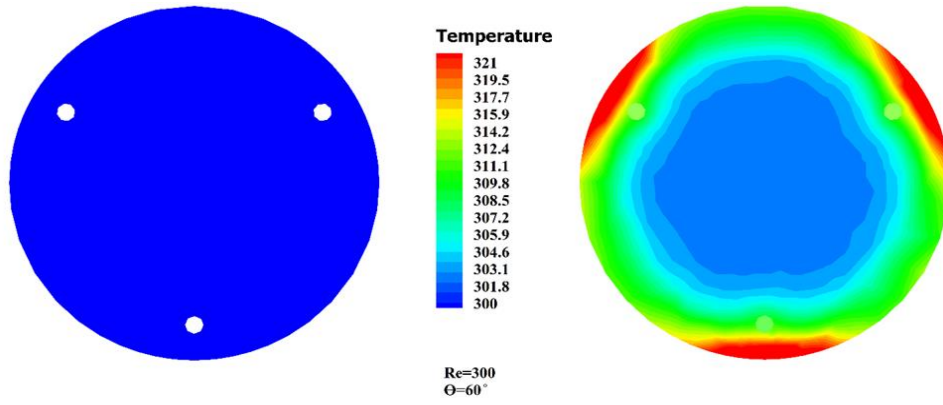
۵- بحث و بررسی نتایج

تغییرات دما در سیال آب و نانوسیال آلومینا در شکل‌های ۸ تا ۱۲ نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل‌ها مشخص است، سیال پس از ورود به لوله و طی کردن مسافتی به میله‌های گرداب برخورد می‌کند. سیال پس از برخورد به میله گرداب، جریان چرخشی پیدا کرده است. وجود میله گرداب درون لوله و همچنین وجود شار حرارتی ثابت در جداره‌ی لوله باعث افزایش دما سیال می‌شود. با توجه به شکل‌های بالا، در همه رینولدزها و زاویه‌ها، بیشترین دما سیال نزدیک به جداره لوله می‌باشد و در مرکز لوله، دما کمتر می‌باشد. بیشترین میزان افزایش دما با توجه به شکل ۱۰، مربوط به میله گرداب ۳۰ درجه و رینولدز ۱۸۰۰ در نانوسیال آلومینا می‌باشد.

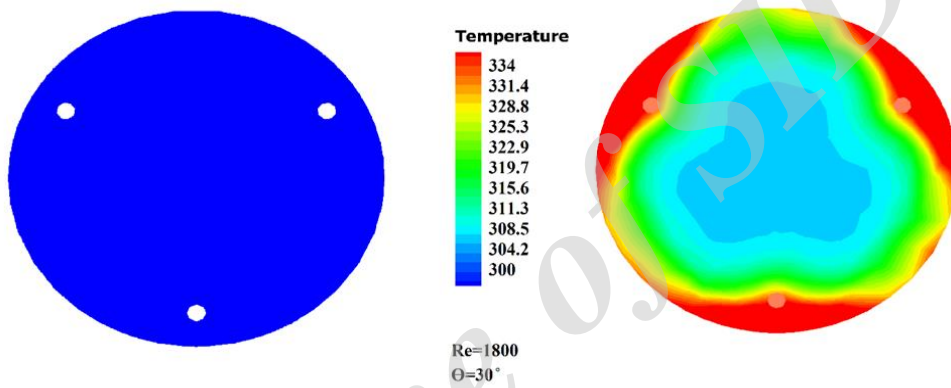


شکل ۱۳- جهت جریان سیال پس از برخورد به میله گرداب

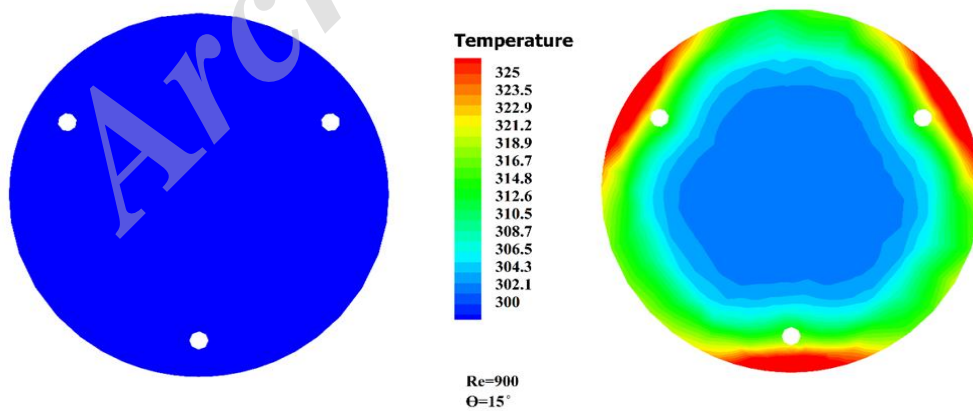
در شکل ۱۳ جهت جریان سیال پس از برخورد به میله گرداب، نشان داده شده است. سیال با جریانی آرام وارد لوله می‌شود، سیال پس از پیمودن مسافتی به میله گرداب برخورد کرده که سیال پس از برخورد به میله گرداب جریان چرخشی و گردابه‌ای پیدا می‌کند که جریان متلاطم شده است و همین‌طور که در شکل قابل مشاهده است، جهت جریان به سمت جداره‌های لوله در حرکت می‌باشد و از آنجایی که جداره‌ی لوله دارای شار حرارتی می‌باشد، دمای سیال پس از برخورد به میله گرداب و تولید جریان چرخشی و متلاطم افزایش می‌یابد.



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

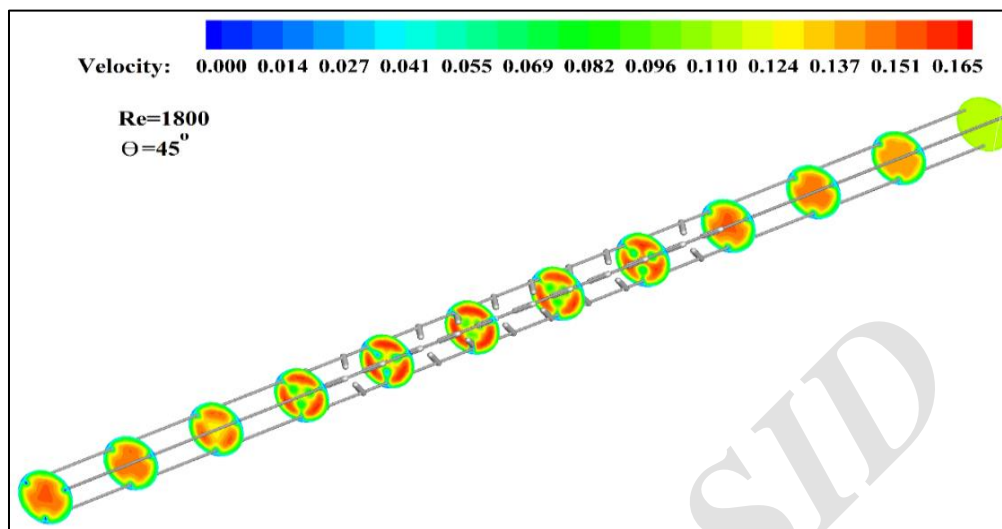


شکل ۱۵- مقایسه دمای ورودی و خروجی سیال آب در زاویه ۳۰ درجه و رینولدز ۱۸۰۰



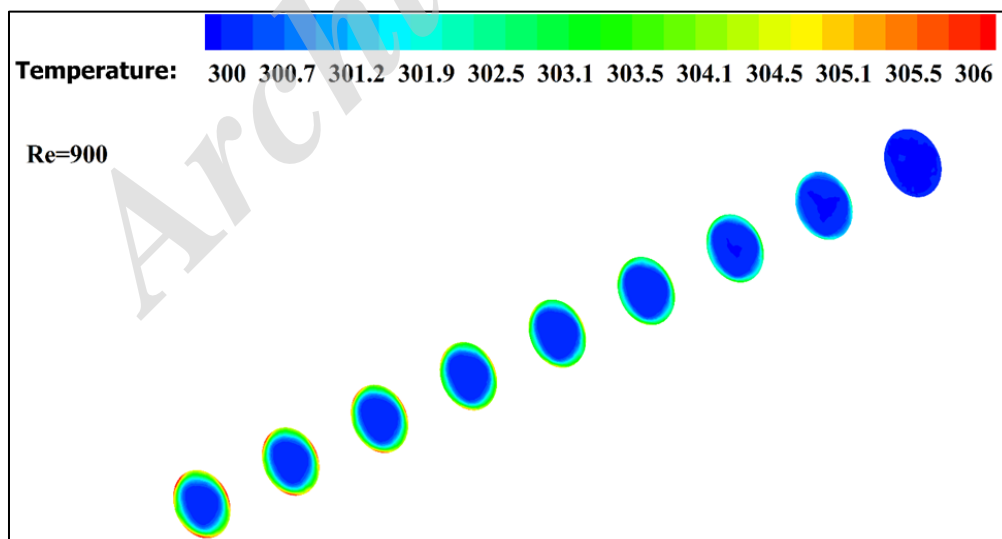
شکل ۱۶- مقایسه دمای ورودی و خروجی سیال آب در زاویه ۱۵ درجه و رینولدز ۹۰۰

با توجه به شکل 14، 15، 16 دمای سیال ورودی 300 کلوین 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 14 و 15 و 16، مقایسه‌ی دمای ورودی و خروجی سیال آب یا نانوسیال آلومینا را نشان می‌دهد.

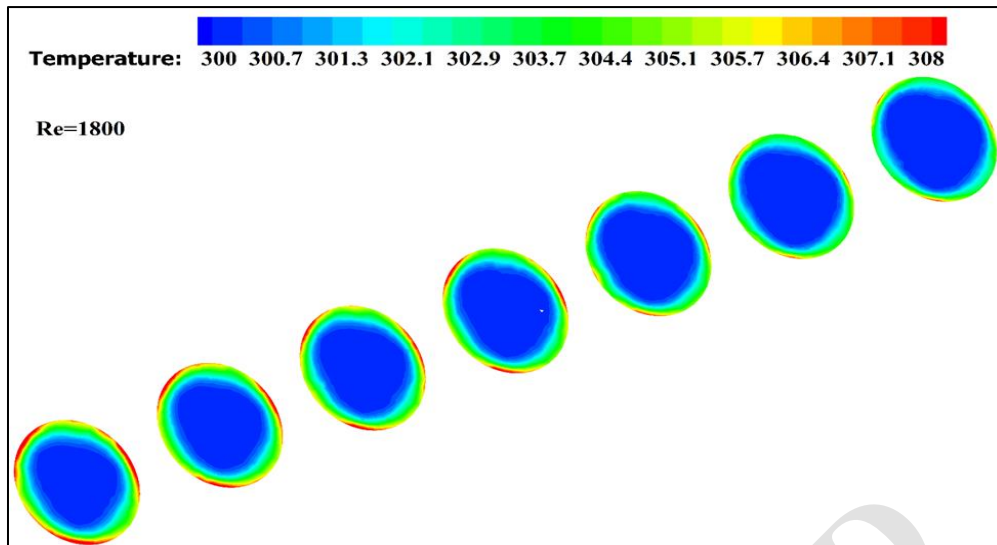


شکل ۱۷- کانتور سرعت نانوسیال آلومینا در زاویه ۴۵ درجه و رینولدز ۱۸۰۰

تغییرات سرعت سیال در شکل 17 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.



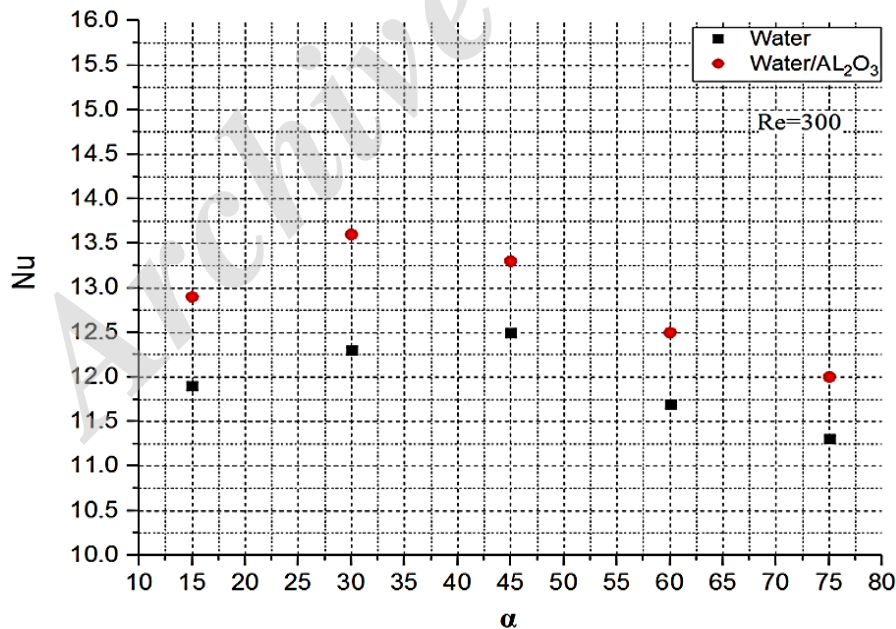
شکل ۱۸- کانتور دما سیال آب در لوله بدون میله گرداب رینولدز ۹۰۰



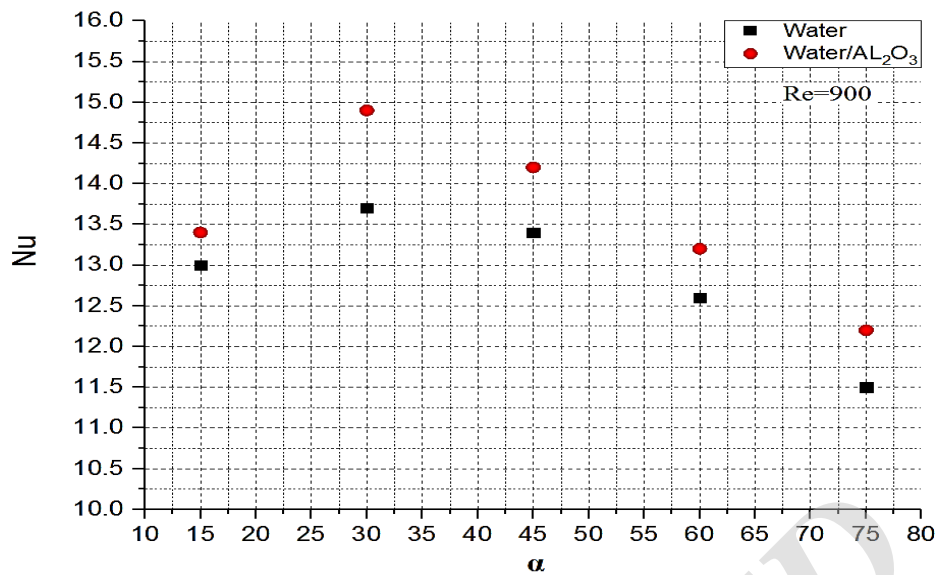
شکل ۱۹- کانتور دما سیال آب در لوله بدون میله گرداب رینولدز ۱۸۰۰

شکل‌های ۱۸ و ۱۹ بیانگر کانتور دما سیال آب در لوله بدون میله گرداب می‌باشد. در این لوله به دلیل نبود میله گرداب، جریان چرخشی و متلاطم نمی‌شود همین علت باعث جریان کمتری به سمت جداره‌ها برود. همان‌طور 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 ۲ شکل دمای سیال فقط با توجه به شار حرارتی جداره لوله افزایش پیدا می‌کند.

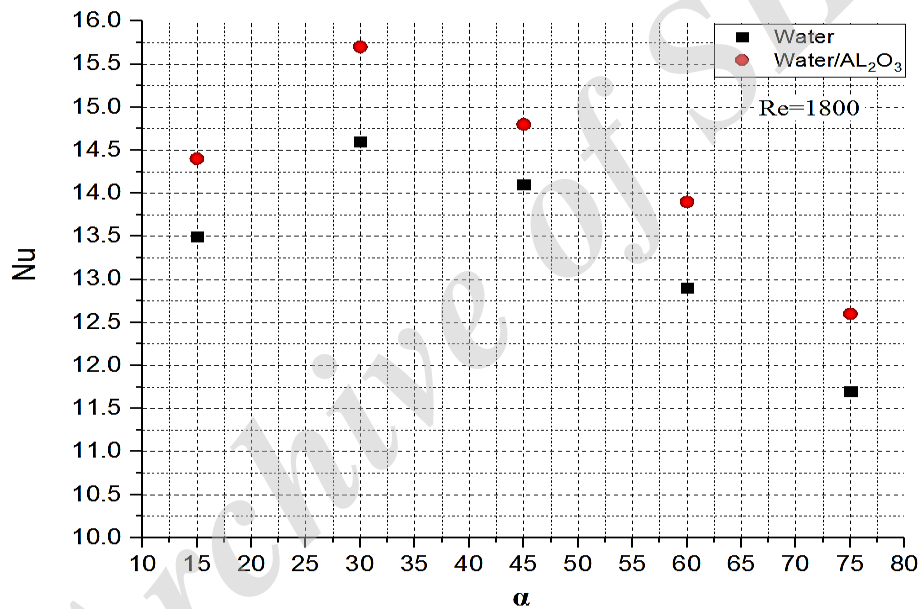
۶- نمودارها



شکل ۲۰- ناسلت بر حسب زاویه در رینولدز ۳۰۰

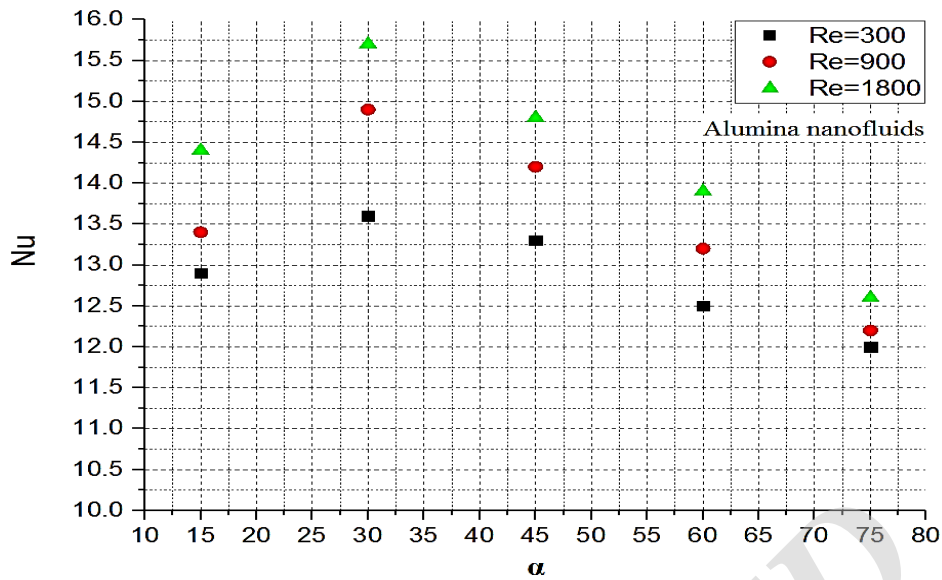


شکل ۲۱- ناسلت بر حسب زاویه در رینولدز ۹۰۰

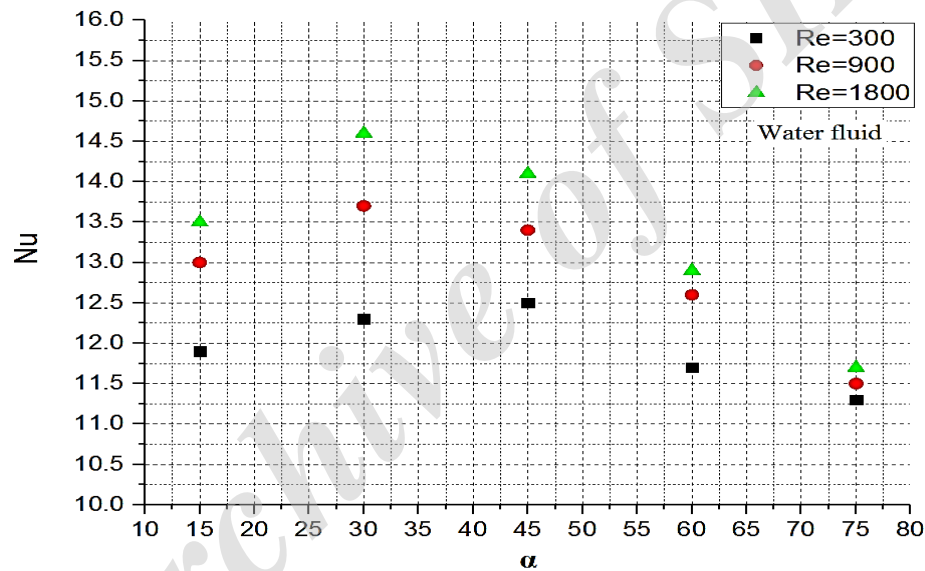


شکل ۲۲- ناسلت بر حسب زاویه در رینولدز ۱۸۰۰

شکل های 20، 21 و 22 مقایسه انتقال حرارت بین سیال آب و نانوسیال آلومینا می باشد. این شکل ها بیانگر این است که در رینولدزهای 300، 900، 1800 انتقال حرارت نانوسیال آلومینا در زاویه های 30، 45، 60، 75 نسبت به سیال آب، بیشتر است. با توجه به این - شکل ها، بیشترین میزان انتقال حرارت در سیال مشخص می شود.

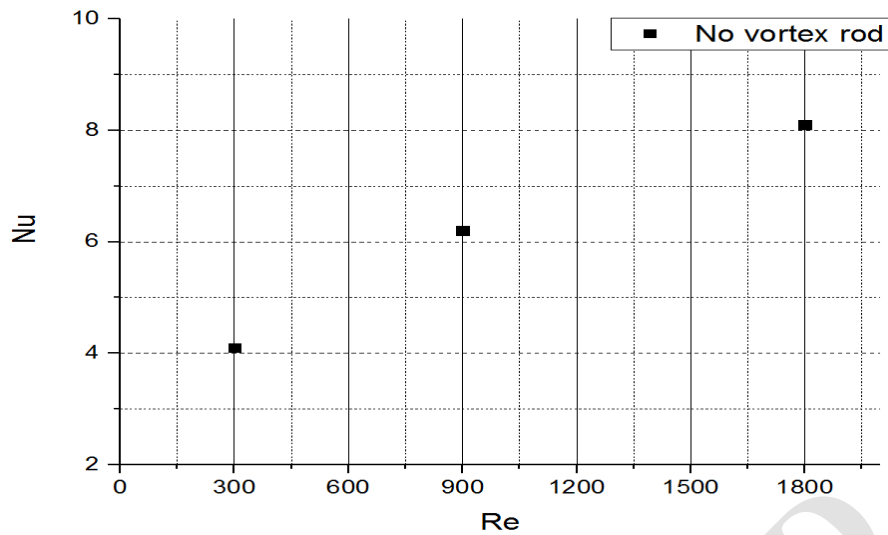


شکل ۲۳- ناسلت بر حسب زاویه برای نانوسیال آلومینا



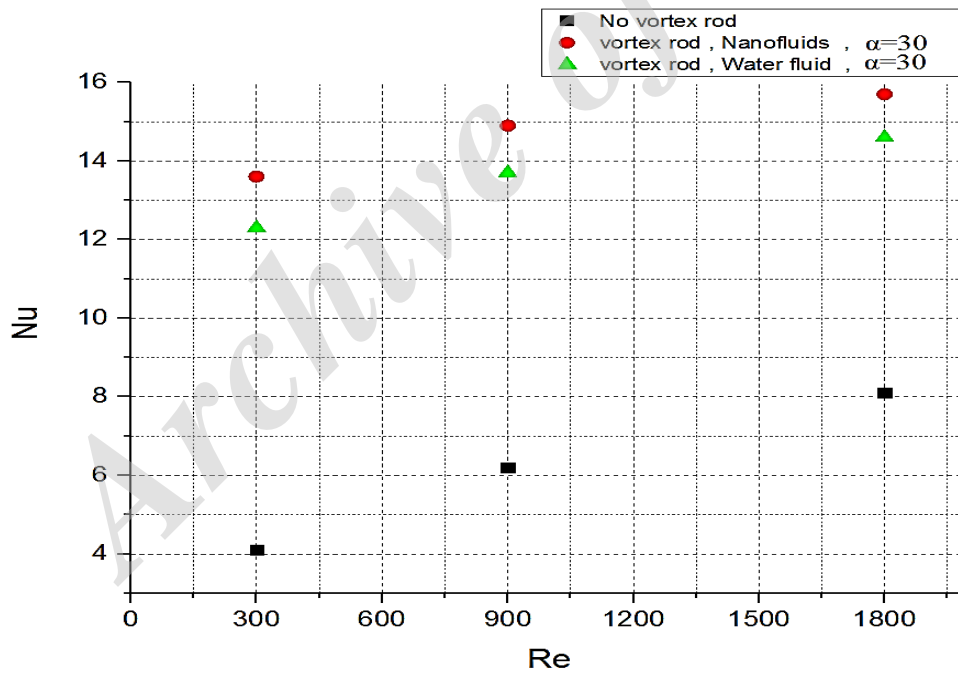
شکل ۲۴- ناسلت بر حسب زاویه برای سیال آب

در شکل‌های 23 و 24، تاثیر زاویه میله گرداب و همچنین تاثیر تغییر رینولدز نشان داده شده است. این 2 شکل بیانگر این است که انتقال حرارت در رینولدز 1800 از رینولدزهای 900 و 300 بیشتر می‌باشد همچنین در زاویه 30 درجه بیشترین انتقال حرارت نسبت به زاویه‌های 15، 45، 60 و 75 وجود دارد. هر چه 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 30 درجه و رینولدز 1800 می‌باشد.

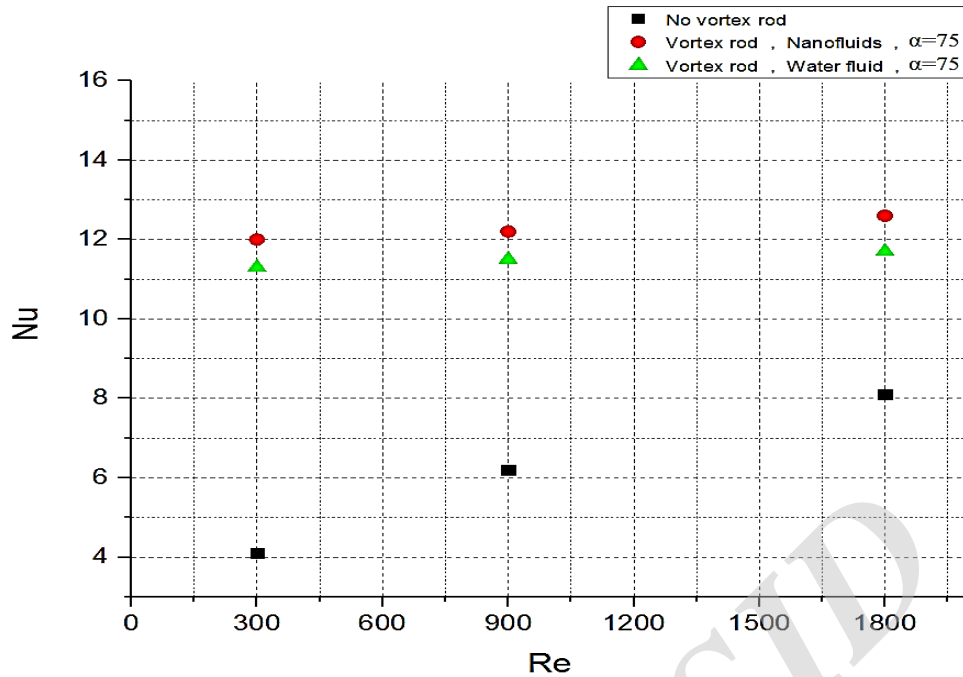


شکل ۲۵- ناسلت بر حسب رینولدز در لوله بدون میله گرداب

شکل 25 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

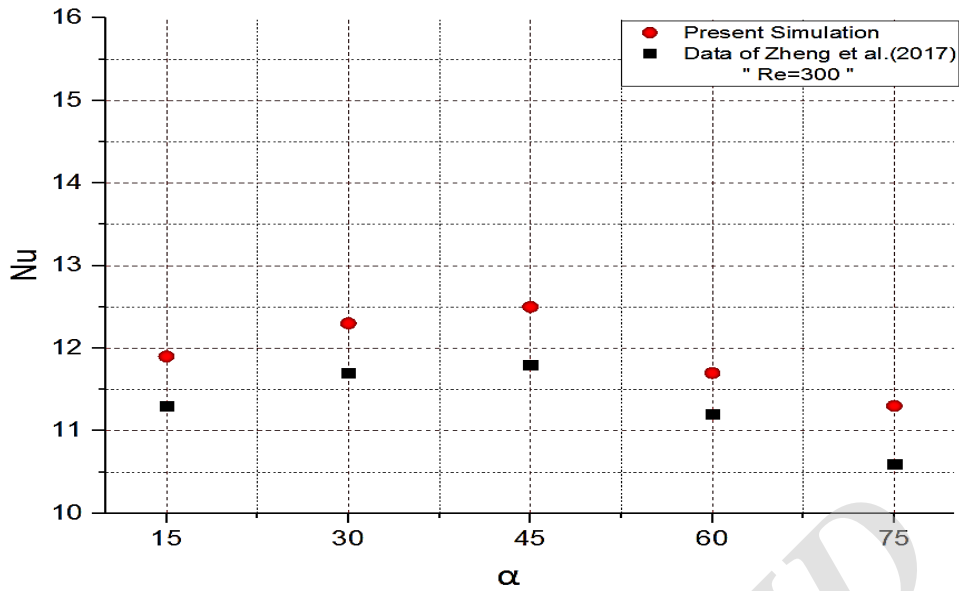
شکل های 26 و 27 بیانگر مقایسه ناسلت بر حسب رینولدز لوله بدون میله گرداب با لوله مجهز به میله گرداب در زاویه 30 و 75 درجه می باشد. همان طور که در شکل 26 و 27 قابل مشاهده است، انتقال حرارت در لوله مجهز به میله گرداب بیشتر از انتقال حرارت در لوله بدون میله گرداب است. طبق شکل ها انتقال حرارت در سیال آب کمتر از نانوسیال آلومینا می باشد و انتقال حرارت در لوله مجهز به میله گرداب در زاویه 30 درجه از زاویه 75 درجه بیشتر می باشد و انتقال حرارت در لوله بدون میله گرداب کم می باشد.

7- 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

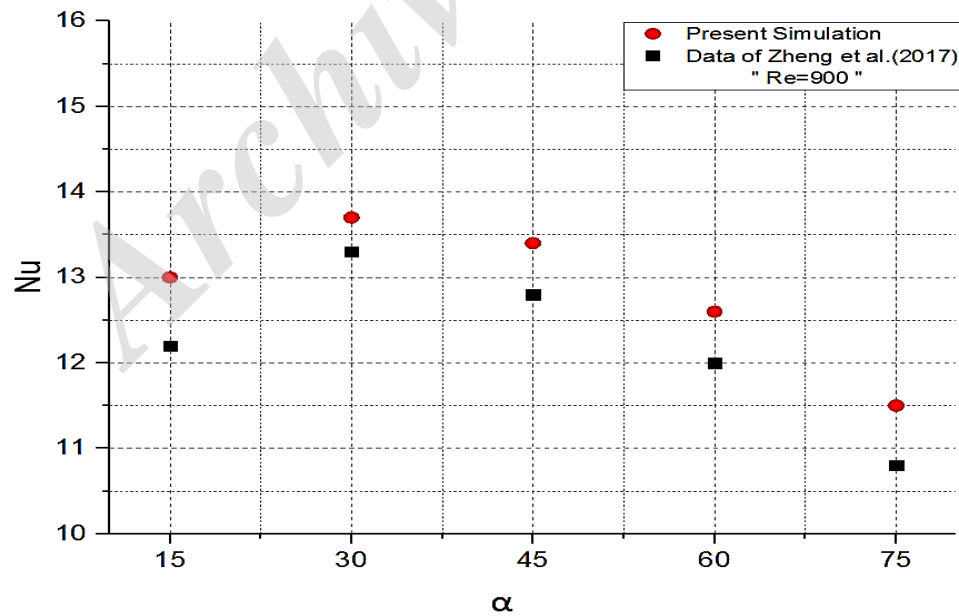
Reynolds Number	α	Present Simulation	Data of Zhang et al.(2017)	Error Function (%)
300	15	11.9	11.3	5.3
300	30	12.3	11.7	5.12
300	45	12.5	11.8	6
300	60	11.7	11.2	4.5
300	75	11.3	10.6	6.6



شکل ۲۸- صحت سنجی برای رینولدز ۳۰۰

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

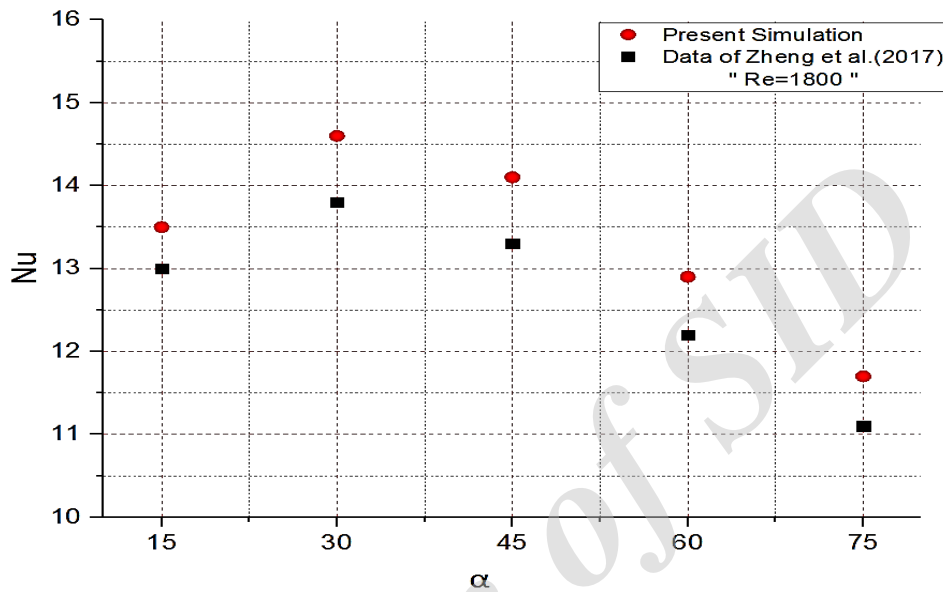
Reynolds Number	α	Present Simulation	Data of Zhang et al.(2017)	Error Function (%)
900	15	13	12.2	6.6
900	30	13.7	13.3	3
900	45	13.4	12.8	4.7
900	60	12.6	12	5
900	75	11.5	10.8	6.5



شکل ۲۹- صحت سنجی برای رینولدز ۹۰۰

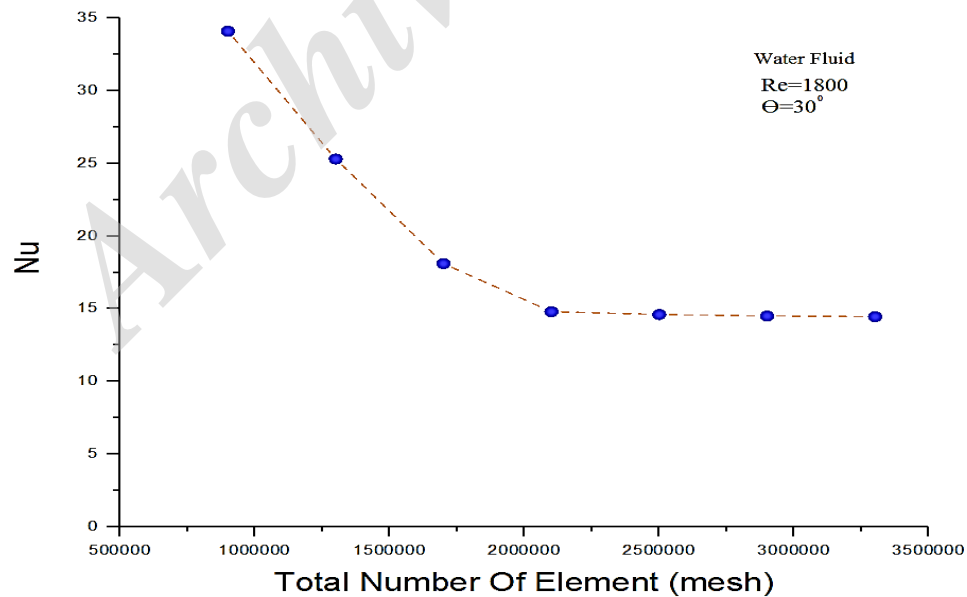
جدول ۶- جدول صحت‌سنجی و درصد خطا در رینولدز ۹۰۰

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

۱-۷- 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 12 بر حسب اعداد ناسلت بر تعداد مش می‌باشد که این نمودار برای سیال آب در رینولدز 1800 و زاویه 30 درجه می‌باشد. برای اطمینان از صحت شبیه‌سازی، 7 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 30 درجه تقریباً 2217553 می‌باشد. تعداد مش کمتر از 2217553 باعث ایجاد خطای بیشتر در شبیه‌سازی عددی می‌شود و در این پروژه تا مش 3316384، ران گرفته شده است که طبق بررسی‌های انجام شده از تعداد مش 2217553 تا 3316384 عدد ناسلت تغییر چندانی نمی‌کند و برای صرفه‌جویی در زمان و همچنین با توجه به سیستم‌های موجود برای شبیه‌سازی، از مش 2217553 برای شبیه‌سازی لوله مجهز به میله گرداب در زاویه 30 درجه استفاده شده است.

8- 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.

8-1- معادله پیوستگی:

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

8-2- معادله مومنتوم:

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

8-3- معادله انرژی:

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

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، 300 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 ترموفیزیکی نانوسیال طبق معادلات زیر بدست می‌آید.

8-4- 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 نانو ذره و ρ_f بیانگر چگالی سیال پایه می‌باشد.

8-5- 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.

8-6- 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.

8-7- 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 نانو ذره و ϕ بیانگر کسر حجمی و ρ_{nf} بیانگر چگالی نانوسیال می‌باشد.

9- نتیجه گیری

در این تحقیق، شبیه سازی 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 300، 900، 1800 و در زاویه های 15، 30، 45، 60، 75 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 گردابه ای 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 75 درجه تا 30 درجه، انتقال حرارت در سیال افزایش یافته است و از زاویه ی 30 درجه تا 15 درجه، انتقال حرارت سیال کاهش یافته است. بیشترین میزان انتقال حرارت در سیال بررسی شده، زاویه 30 درجه و در رینولدز 1800 می‌باشد. وجود نانو ذره آلومینا با 3 درصد حجمی در سیال آب، باعث افزایش انتقال حرارت محسوسی شده است.

10- 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, $CuOeH_2O$ 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