

## شبیه سازی عددی تأثیر تغییرات میدان مغناطیسی، گام و زاویه پیچ لوله مارپیچی بر افزایش انتقال حرارت

در پژوهش حاضر تأثیر زاویه قرارگیری و اندازه گام لوله مارپیچی بر روی آهنگ انتقال حرارت از طریق دیواره لوله به سیال عبوری از آن، در جریان های آرام، گذار و آشفتنه مورد مطالعه قرار گرفته و در ادامه کار تغییرات عدد ناسلت در اثر اضافه کردن نانو ذرات  $TiO_2$  بررسی شده است و در نهایت تأثیر اعمال میدان مغناطیسی با شدت ۱ تسلا بر روی میزان انتقال حرارت در حالات مختلف، بررسی شده است. برای این کار لوله مارپیچی در سه گام متفاوت ۱۰، ۱۲/۵ و ۱۵ سانتی متر و سه زاویه ۰، ۴۵ و ۹۰ درجه در نظر گرفته شده است. طبق نتایج بدست آمده عدد ناسلت با کاهش گام افزایش می یابد و در رینولدزهای مختلف، عدد ناسلت در گام ۱۰ سانتی متر به بالاترین مقدار خود می رسد. این عدد با تغییر زاویه نیز تغییر کرده و به ترتیب در زاویه ۴۵ و ۹۰ درجه بیشترین و کمترین مقدار را دارد. سپس نانو ذرات  $TiO_2$  با درصد های جرمی ۱/۰، ۳/۰ و ۵/۰ به سیال اضافه شدند که این امر باعث افزایش عدد ناسلت شد. ملاحظه گردید که افزایش غلظت نانوذرات باعث بالا رفتن بیشتر عدد ناسلت می شود. این عدد در کوئل با گام ۱۰ سانتی متر، زاویه ۴۵ درجه، رینولدز ۱۵۰۰ و در غلظت ۰/۵ درصد  $TiO_2$  به بالاترین مقدار خود ۱۶۴/۵۳ می رسد و برای این حالت عدد معیار ارزیابی عملکرد PEC برابر ۱/۱۱۵۴ محاسبه گردید. در ادامه کار، میدان مغناطیسی با شدت یک تسلا در جهت محور اصلی کوئل اعمال شد و ملاحظه گردید که عدد ناسلت افزایش پیدا می کند و در گام ۱۰ سانتی متر، زاویه ۴۵ درجه، رینولدز ۱۵۰۰ و غلظت ۰/۵ درصد ذرات  $TiO_2$  به بیشترین مقدار خود ۱۶۶/۶ می رسد. در نهایت برای لوله مارپیچی عدد هارتمن محاسبه شد که بیشترین مقدار آن در گام ۱۵ سانتی متر و غلظت ۰/۵ درصد  $TiO_2$  برابر ۴۳/۸۳ بدست آمد.

امین اعلامی نیا<sup>۱</sup>  
استادیار

مهدی ملکی زاده<sup>۲</sup>  
کارشناسی ارشد

واژه های راهنما: انتقال حرارت، لوله مارپیچ، میدان مغناطیسی، شبیه سازی عددی، گام پیچ، زاویه پیچ

<sup>۱</sup> نویسنده مسئول، استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه شهید مدنی آذربایجان، تبریز، ایران [amin.alam@azaruniv.ac.ir](mailto:amin.alam@azaruniv.ac.ir)

<sup>۲</sup> کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه شهید مدنی آذربایجان، تبریز، ایران [m.malekizade@gmail.com](mailto:m.malekizade@gmail.com)

## ۱- مقدمه

در دوران کنونی بالا بردن کارایی روش‌های افزایش انتقال حرارت در سامانه‌های مذکور از جهات مختلفی مورد توجه می‌باشد که اولاً از نظر محدود بودن منابع مختلف انرژی در جهان و پایان‌پذیر بودن آنها، ثانیاً محافظت از محیط زیست و جلوگیری از آلودگی آن، استفاده از روش‌های مختلف بهینه‌سازی مصرف انرژی در دستور کار سازمان‌های دولتی و ... قرار گرفته است و محققان را به انجام مطالعات بیشتر و روزافزون در این موضوع واداشته است. همین مسئله باعث رشد روزافزون علم انتقال حرارت بعنوان یکی از شاخه‌های بزرگ علم مکانیک شده است. در همین راستا نیاز به دستیابی به ضریب انتقال حرارت بالای مورد نیاز در کاربردهایی مانند مدارهای الکترونیکی با اندازه بسیار کوچک که مقدار زیادی گرما در واحد سطح و یا واحد حجم تولید می‌کنند دستیابی به ضرایب انتقال حرارت بالا حتی یکی از نیازهای اساسی و بنیادی در رشد علم و صنعت شده است. امروزه تمامی تجهیزات موجود در خانه‌ها و صنایع مختلف دارای مدارهای الکترونیکی هستند که از المان‌های بسیار ریزی ساخته شده‌اند. این المان‌ها مقدار قابل توجهی حرارت تولید می‌کنند و خنک‌کاری اصلی این عناصر با ایجاد جریان هوای خنک از روی آنها از میان کانال‌های تعبیه شده روی آنها باعث انتقال گرمای ایجاد شده بوسیله روش اجباری و یا طبیعی انجام می‌شود. حتی سیالات دیگری با اعمال نیروی محرکه و ایجاد همرفت اجباری جهت خنک‌کاری این قطعات کاربرد پیدا کرده است. در عصر کنونی با توجه به اهمیت به کارگیری المان‌های مختلف و فراوان در مدارهای الکترونیکی و نیاز به بالا بردن تراکم این المان‌ها برای کاهش دادن ابعاد تجهیز و همچنین بالا بردن کیفیت تولیدات الکترونیکی، مسئله خنک‌کاری این تجهیزات فرآیندی حیاتی در تولید شده است.

باید اذعان نمود همیشه روش‌های مختلفی برای ارتقاء ضریب انتقال حرارت در یک سیستم مشخص وجود دارد ولی مطمئناً راندمان همه روش‌ها به یک اندازه نخواهد بود. برخی از روش‌ها حتی با داشتن بازدهی بالا به دلیل داشتن اثر نامطلوب بر تجهیز، نمی‌توانند روش مناسبی باشند. به همین علت استفاده از سیستم و روش خنک‌کاری مطلوب از جمله فعال یا غیر فعال باید با در نظر گرفتن معیار ارزیابی عملکرد بالا به همراه توجه دقیق به مسئله آسیب نرساندن این روش به تجهیز مورد نظر، انتخاب گردد. اصولاً معیار ارزیابی از منظر علم انتقال حرارت بر پایه انرژی مصرفی برای رسیدن به هدف مورد نظر و یا همان آنتروپی تولید شده تعریف می‌شود ولی در صنعت شاخص‌های دیگری نیز به‌ویژه در تکنولوژی ساخت تجهیزات به‌صورت انبوه، تعریف شده و مد نظر قرار می‌گیرد.

در مورد روش‌های فعال و غیرفعال افزایش انتقال حرارت که در بالا به آن اشاره شد باید گفت که در روش‌های فعال با اعمال نیرو از خارج سامانه گرمایشی و یا سرمایشی نظیر بکار گرفتن میدان‌های الکتریکی<sup>۱</sup> و مغناطیسی<sup>۲</sup>، ارتعاش سطح سیال و حجم سیال و یا حتی مکش و تزریق به داخل سیال عامل استفاده می‌شود ولی در روش‌های غیر فعال بدون اعمال نیروی خارجی و با روش‌هایی از جمله افزایش دادن سطوحی که تبادل حرارت بین آنها صورت می‌گیرد، ایجاد ریب‌ها و زبری‌هایی در مسیر جریان، وارد کردن قطعات مختلف در داخل مجرای جریان و ایجاد چرخش اولیه در سیال ورودی و اضافه کردن نانوذرات با ضریب انتقال حرارت بالا

<sup>۱</sup> Electrohydrodynamics

<sup>۲</sup> Magnetichydrodynamics

به سیال عامل و غیره برای افزایش انتقال گرما استفاده می‌شود. در این میان کاربرد میدان‌های الکترومغناطیسی به‌علت سهولت ساخت تجهیزات، عدم محدودیت در سرعت سیال، عدم دستکاری فیزیکی مسیر جریان که معمولاً در روش‌های غیرفعال کاربرد دارد و همچنین کارایی بالای آن، از سال‌ها پیش مورد توجه محققان قرار گرفته و تحقیقات بسیاری نیز در این زمینه در سال‌های (۲۰۱۹) تا (۲۰۲۱) صورت پذیرفته است [۵-۱].

در سال (۲۰۱۷) بررسی افزایش انتقال حرارت محلول  $Fe_3O_4$  در حضور میدان مغناطیسی توسط فدائی و همکارانش انجام شده است که در این مقاله، انتقال حرارت جابجایی اجباری سه بعدی نانوسیال مغناطیسی در لوله‌ای که در دیواره ثابت آن شار حرارتی وجود داشت، در حضور آهنربا یا سیم حامل جریان بررسی و مقایسه شده است. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که با اعمال میدان مغناطیسی، اختلاط سیال افزایش می‌یابد و باعث افزایش مقدار عدد ناسلت موضعی در طول لوله می‌شود [۶].

همچنین توسط ردی شری و همکارش در سال (۲۰۱۸) یک مطالعه عددی جامع از افزایش انتقال حرارت در جریان همرفت آزاد MHD بر روی یک صفحه عمودی با استفاده از نانوسیالات انجام شده است. مسئله با استفاده از مدل کسر حجمی نانوسیال با در نظر گرفتن نانوسیالات مبتنی بر آب حاوی ذرات مس و اکسید آلومینیوم فرموله شده است. تأثیر پارامترهای فیزیکی مربوطه بر پروفیل‌های سرعت و دما با کمک نمودارها مورد بحث قرار گرفته و در نهایت، مقادیر عددی اصطکاک دیواره و عدد ناسلت در رژیم جریان منتشر شده است [۷].

مطالعه عددی که توسط هوسام و همکارانش در سال (۲۰۱۸) در مورد اثر تشکیل گردابه بر انتقال حرارت در جریان سیال با حضور میدان مغناطیسی محوری صورت گرفته نیز از دیگر پژوهش‌های موجود در این زمینه می‌باشد. آنها در این تحقیق انتقال حرارت از دیواره جانبی یک مجرا که از طریق آن یک سیال رسانای الکتریکی در یک میدان مغناطیسی عرضی قوی جریان می‌یابد، به صورت عددی با استفاده از شبیه‌سازی عددی با دقت بالا بررسی کرده‌اند [۸].

بررسی عددی انتقال حرارت جریان آرام در حضور میدان مغناطیسی غیر یکنواخت در یک کانال، که در سال (۲۰۱۹) توسط اسدی و همکارانش صورت گرفته است را می‌توان به‌عنوان نمونه دیگری از این پژوهش‌ها معرفی کرد. در این پژوهش به مطالعه عددی انتقال حرارت همرفتی اجباری دو بعدی فروسیال (آب و  $Fe_3O_4$ ) در حضور میدان مغناطیسی غیریکنواخت در کانالی با دیواره موج‌دار سینوسی پرداخته شده است. عملکرد حرارتی و هیدرودینامیکی فروسیال با استفاده از روش ترکیبی و روش حجم محدود بررسی شده و اثرات افزایش دامنه کانال موجی، کسر حجمی، عدد رینولدز و گرادیان میدان مغناطیسی منفی بر رفتارهای هیدرودینامیکی و حرارتی بررسی و مورد بحث قرار گرفته است. مشاهده می‌شود که با افزایش دامنه موج، کسر حجمی نانوذرات، عدد رینولدز یا گرادیان میدان مغناطیسی منفی، عدد ناسلت افزایش می‌یابد [۹].

مقاله‌ای تجربی برای بررسی اثر گام‌های پیچ و زوایای چرخش بر خصوصیات جریان و انتقال حرارت نانوسیال در لوله‌های مارپیچ برخورد در سال (۲۰۱۹) توسط ژای و همکارانش انجام گرفته است.

در این مقاله ویژگی‌های جریان و انتقال حرارت نانوسیال‌ها را در لوله‌های مارپیچی به صورت تجربی مورد مطالعه قرار داده است. اثرات گام‌های پیچ مختلف و کسر جرمی نانوذرات متفاوت در جریان و عملکرد انتقال حرارت تجزیه و تحلیل شده است. نتایج نشان می‌دهد که عدد ناسلت با کاهش گام پیچ و افزایش کسر جرمی

نانوذرات افزایش می‌یابد [۱۰]. این مقاله معتبر بعنوان مرجع در نظر گرفته شده و نتایج تحقیق با آن راستی آزمایی خواهد شد.

بهادوری<sup>۱</sup> و همکاران به شیوه آزمایشگاهی جریان هوا را در یک مبدل دو لوله‌ای با مقطع مربعی پیچ خورده مورد مطالعه قرار دادند. مطالعه ایشان در هر دو محدوده آرام و آشفته و در اعداد رینولدز ۶۰۰۰۰ - ۴۰۰ بود. ایشان بهترین نتایج را برای مشخصات هندسی داکت داخلی و عدد رینولدز مرتبط به دست آوردند [۱۱].

تانگ<sup>۲</sup> و همکاران در مطالعه‌ای تجربی انتقال حرارت در یک تیوپ سه گوشه‌ای پیچ‌خورده را با انتقال حرارت در یک تیوپ بیضوی پیچ‌خورده مورد مقایسه قرار دادند. مطالعه ایشان در محدوده آشفته عدد رینولدز بود. نتایج کار ایشان نشان داد که استفاده از تیوپ سه گوشه‌ای پیچ‌خورده افزایش انتقال حرارت بهتری را در مقایسه با تیوپ بیضوی پیچ‌خورده نتیجه می‌دهد [۱۲].

وانگ<sup>۳</sup> و همکاران تأثیر پارامترهای هندسی را بر روی جریان آشفته و نیز مشخصات انتقال حرارتی در لوله‌های موج‌دار مورد مطالعه قرار دادند. نتایج کار ایشان نشان می‌داد که به کارگیری لوله‌های موج‌دار پارامترهای انتقال حرارتی را بهبود می‌بخشد. همچنین ایشان گزارش دادند که بیشترین مقدار عدد ناسلت موضعی و ضریب اصطکاک موضعی در اتصال موج‌ها به لوله‌ی اصلی اتفاق می‌افتد در حالی که کم‌ترین مقدار پارامترهای فوق در هسته‌ی جریان پیچشی دیده می‌شود [۱۳].

وانگ و همکاران در کاری دیگر اثر موج‌های عرضی را بر روی پارامترهای انتقال حرارت و ضریب اصطکاک در جریان آشفته مورد بررسی قرار دادند. در تحلیل حرکت سیال در موج‌ها مشاهده کردند که جت‌های شدید سیال و گردابه‌های شدید آشفته‌گی در محدوده‌ی موج‌ها عاملی برای افزایش انتقال حرارت در لوله‌های موج‌دار به شمار می‌رود. ایشان گزارش نمودند که بیشترین افزایش در عدد ناسلت و کارایی انتقال حرارتی در لوله مورد مطالعه ایشان به ترتیب ۱/۷۷ و ۱/۴۰ است [۱۴].

کی<sup>۴</sup> و همکاران به صورت عددی و تجربی اثر نانوسیال‌های حاوی دی‌اکسید تیتانیوم را بر روی رفتارهای انتقال حرارتی و اصطکاک لوله‌های موج‌دار مطالعه نمودند. نتایج کار ایشان نشان داد که استفاده همزمان از نانوسیال و لوله موج‌دار می‌تواند مقدار انتقال حرارت را تا ۵۴ درصد بیافزاید [۱۵].

در بحث استفاده از روش‌های فعال در افزایش انتقال حرارت علم‌قلیلو (اعلمی‌نیا) و اسماعیل‌زاده به مطالعه تجربی خنک‌کاری ریب‌های مستطیلی شکل که درون یک کانال مستطیلی جازنی شده بود پرداختند و اثر استفاده از میدان‌های الکتریکی را مطالعه نمودند. بررسی آزمایشگاهی ایشان در هر دو رژیم جریانی آرام و آشفته انجام پذیرفت. محققان این کار چهار حالت برای ریب‌های مذکور در نظر گرفتند. حالت ساده با ریب‌های در کنار هم، حالت ریب‌ها در کنار هم با سوراخ‌های ایجاد شده در فضای بین ریب‌ها، حالت سوم مربوط به استفاده از الکترودهای ولتاژ بالا در بین ریب‌ها و استفاده از تکنیک الکترویدرودینامیکی برای افزایش انتقال حرارت و حالت چهارم ترکیبی از دو حالت دوم و سوم بود. نتایج کار ایشان نشان داد که حالت ترکیبی چهارم تأثیر به‌سزایی در افزایش انتقال حرارت از ریب‌ها دارد [۱۶].

<sup>1</sup> Bhadouriya

<sup>2</sup> Tang

<sup>3</sup> Wang

<sup>4</sup> Qi

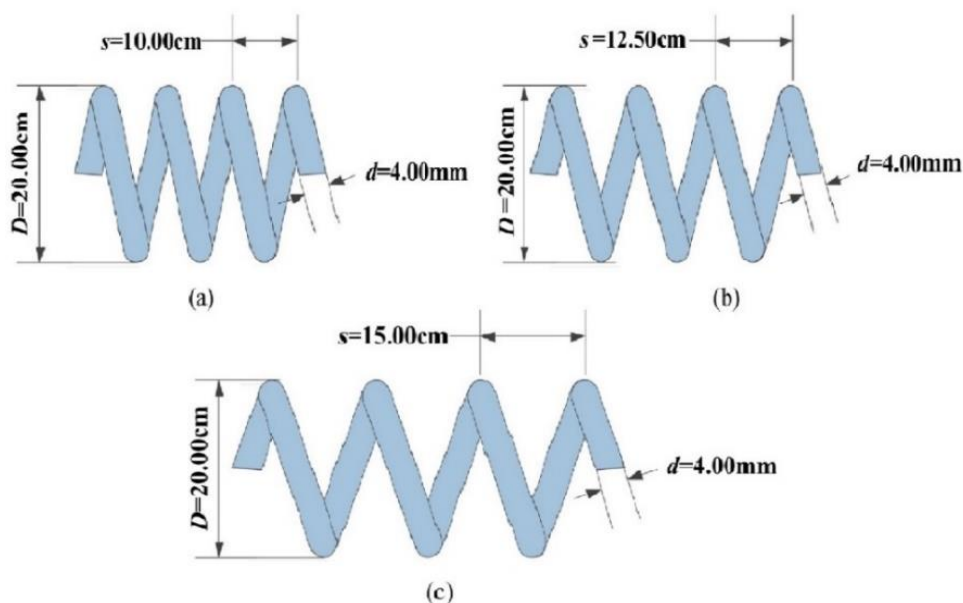
در زمینه استفاده از روش‌های فعال، اعلمی‌نیا و کمپو<sup>۱</sup> در کار تجربی خود خنک‌کاری نوارهای نازک منبع-حرارتی واقع بر روی کف کانال مستطیلی شکل را مورد مطالعه قرار دادند که الکترودهای ولتاژ بالا در بین نوارها جازنی شده بود. ایشان تأثیر آرایش این الکترودها را بر روی افزایش انتقال حرارت بررسی نمودند و نتایج قابل توجهی گزارش نمودند [۱۷].

در یکی از جدیدترین کارها در این زمینه، اعلمی‌نیا استفاده از بلوک‌های ذوزنقه‌ای شکل به عنوان منابع حرارتی را مورد مطالعه تجربی قرار داده است و مشابه با استفاده از میدان‌های مغناطیسی، از الکترودهای ولتاژ بالا و میدان الکتریکی حاصل، به عنوان عامل افزایش انتقال حرارت استفاده نموده است. وی دو چینش متفاوت از الکترودها را مورد بررسی قرار داده و شکل مناسب‌تر را برای انتقال حرارت بهتر برگزیده است [۱۸].

نوآوری کار حاضر اعمال میدان مغناطیسی و محاسبه معیار ارزیابی عملکرد برای لوله مارپیچی با گام‌ها و زاویه‌های پیچ متفاوت در حضور نانوسیال می‌باشد. معیار ارزیابی عملکرد با توجه به اثرات افت فشار و انتقال حرارت تعریف و مورد بررسی قرار می‌گیرد و برآیند بین دو پدیده انتقال مومنتوم و انتقال حرارت محاسبه می‌شود. توازن و بهینه‌سازی بین این دو پدیده انتقال مومنتوم و انتقال حرارت در کاهش افت فشار و افزایش انتقال حرارت تأثیر زیادی دارد. در ضمن اثرات میدان مغناطیسی و کنترل جهت مؤثر آن با حضور نانوسیال می‌تواند در افزایش انتقال حرارت بسیار مفید باشد.

## ۲- هندسه مسئله و معادلات حاکم

در تحقیق حاضر نیز، ابتدا لوله‌ای به طول ثابت ۲/۲ متر و به قطر ۴ میلی‌متر در نظر گرفته شده است و از این لوله کوپل‌هایی به قطر ۲۰ سانتی‌متر و گام‌های ۱۰ و ۱۲/۵ و ۱۵ سانتی‌متر همانند طرحواره شکل (۱)، توسط نرم‌افزار Solid works ایجاد شده است.



شکل ۱- طرحواره مدل‌های تحقیق با گام‌های مختلف [۱۰]

<sup>1</sup> Campo

مدل‌های ایجاد شده در محیط نرم‌افزار Ansys Workbench فراخوانی شده و ابتدا جهت شبیه‌سازی جریان و در ادامه حل معادلات مربوطه توسط نرم‌افزار Ansys Meshing پیکربندی می‌شوند. سپس مدل‌های فوق با مش‌بندی مناسب وارد نرم‌افزار انسیس فلونت می‌شود. بعد از چک کردن شبکه، تمامی مراحل حل که در بالا به آنها اشاره شد را انجام می‌دهیم. سپس شرایط مرزی، خواص متغیر سیال و نیروهای ناشی از اعمال میدان مغناطیسی را توسط توابع UDF وارد نرم‌افزار می‌کنیم. مدل آشفتگی K-Epsilon RNG را برای حل مسئله در جریان‌های آشفته انتخاب شده و دقت ۰/۰۰۱ را برای باقیمانده‌ها در نظر گرفته شده است که این مقدار پیش‌فرض نرم‌افزار فلونت نیز می‌باشد. پس از اجرای نرم‌افزار و اتمام حل، جواب‌ها برای تحلیل نهایی در یک فایل اکسل ذخیره می‌شود.

## ۲-۱- معادلات حاکم بر جریان با اعمال میدان مغناطیسی

معادلات حاکم بر جریان با روابط زیر قابل ارائه است [۱۹ و ۲۰]:

معادله پیوستگی:

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

معادله مومنتوم:

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho_{nf}u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \mu_{nf} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial x_j} (-\rho_{nf} \overline{u'_i u'_j}) + \sigma_{nf} (\vec{V} \times \vec{B}) \times \vec{B} \quad (2)$$

معادله انرژی:

$$\frac{\partial}{\partial x_i} ((\rho c_p)_{nf} u_i T) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \left( k_{nf} + \left( \frac{c_p \mu_t}{Pr_t} \right)_{nf} \right) \frac{\partial T}{\partial x_j} + \mu_{nf} u_i \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] \quad (3)$$

در معادلات فوق  $\rho_{nf}$ ،  $\mu_{nf}$ ،  $\sigma_{nf}$  و  $c_{p_{nf}}$  به ترتیب چگالی، لزجت دینامیکی، رسانایی الکتریکی، ظرفیت حرارتی مخصوص و رسانایی حرارتی نانو سیال است در حالی که  $B_0$  مقدار میدان مغناطیسی وارد شده است. مقادیر مشخصات نانوسیال با معادلات (۴) تا (۸) قابل محاسبه است [۲۱ و ۲۲]:

$$\rho_{nf} = \varphi \rho_s + (1 - \varphi) \rho_f \quad (4)$$

$$\mu_{nf} = (123\varphi^2 + 7.3\varphi + 1) \mu_f \quad (5)$$

$$(c_p)_{nf} = \left[ \frac{\varphi(\rho c_p)_s + (1 - \varphi)(\rho c_p)_f}{\varphi\rho_s + (1 - \varphi)\rho_f} \right] \quad (6)$$

$$k_{nf} = \left[ \frac{k_s + 2k_f - 2\varphi(k_f - k_s)}{k_s + 2k_f + \varphi(k_f - k_s)} \right] \quad (7)$$

$$\sigma_{nf} = \left[ 1 + \frac{3\varphi(\sigma_s/\sigma_f - 1)}{(\sigma_s/\sigma_f + 2) - \varphi(\sigma_s/\sigma_f - 1)} \right] \sigma_f \quad (8)$$

که اندیس‌های S و f برای به ترتیب ذرات جامد نانو و سیال پایه استفاده می‌شود و  $\varphi$  معرف درصد حجمی ذرات نانو در سیال است. توجه شود که ترم  $-\rho_{nf}\overline{u_i' u_j'}$  مربوط به تنش رینولدز است که با معادله (۹) بیان می‌شود [۲۳ و ۲۴]:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho_{nf}\overline{u_i' u_j'}) + C_{ij} = D_{T,ij} + C_{L,ij} + P_{ij} + \Phi_{ij} + \varepsilon_{ij} \quad (9)$$

در رابطه (۹) معرف ترم جابجایی و ترم‌های سمت راست معادله به ترتیب ترم پخشی توربولانس، ترم پخشی ویسکوزیته‌ی مولکولی، ترم تولید تنش برشی، ترم تنش کرنش و ترم اتلاف ویسکوزیته هستند. ترم  $-\sigma_{nf} B_0^2 u_i$  نیز که به نام ترم کلون شناخته می‌شود، تأثیر میدان مغناطیسی را بر روی حرکت نانوسیال نشان می‌دهد. فرم کلی این ترم به صورت رابطه (۱۰) قابل بیان است [۲۲]:

$$Kelvin \text{ term: } \sigma_{nf} (\vec{V} \times \vec{B}) \times \vec{B} \quad (10)$$

ترم کلون در معادلات پیش فرض فلونت موجود نیست. لذا با توسعه کد مرتبط با این ترم در زبان برنامه‌نویسی C++ و اعمال آن به صورت UDF تأثیر میدان مغناطیسی در جریان نانوسیال داخل مبدل لحاظ می‌گردد.

## ۲-۲- محاسبه عدد ناسلت و رینولدز

در حالت کلی عدد ناسلت را می‌توان از رابطه (۱۱) بدست آورد ولی به دلیل اینکه مقدار  $h$  یعنی ضریب رسانش در دست نمی‌باشد، نحوه محاسبه عدد ناسلت با توجه به داده‌های موجود، به طریق زیر خواهد بود:

$$Nu = \frac{hd}{k} \quad (11)$$

از طرفی طبق قانون انتقال حرارت جابجایی داریم:

$$q'' = h(T_s - T_\infty) \quad (12)$$

با معادل قرار دادن  $T_{\infty}$  با  $T_{bulk}$  یا همان دمای حجمی و  $T_s$  با  $T_w$  یا همان دمای دیواره و جایگذاری مقدار  $h$  با استفاده از رابطه (۱۲)، معادله (۱۱) به صورت رابطه (۱۳) در خواهد آمد که با استفاده از آن و با دانستن مشخصات قطر هیدرولیکی ( $d$ )، شار گرمای وارده از دیواره ( $q''$ )، دمای دیواره ( $T_w$ )، دمای حجمی ( $T_{bulk}$ ) و ضریب رسانش سیال ( $K$ ) می‌توان عدد ناسلت را محاسبه کرد:

$$Nu = \frac{q'' d}{(T_w - T_{bulk})K} \quad (13)$$

عدد رینولدز را می‌توان از معادله (۱۴) بدست آورد:

$$Re = \rho u d / \mu_f \quad (14)$$

در این رابطه  $\rho$  چگالی سیال،  $u$  سرعت سیال،  $d$  قطر لوله و  $\mu$  ویسکوزیته سیال می‌باشد.

### ۲-۳- شرایط مرزی

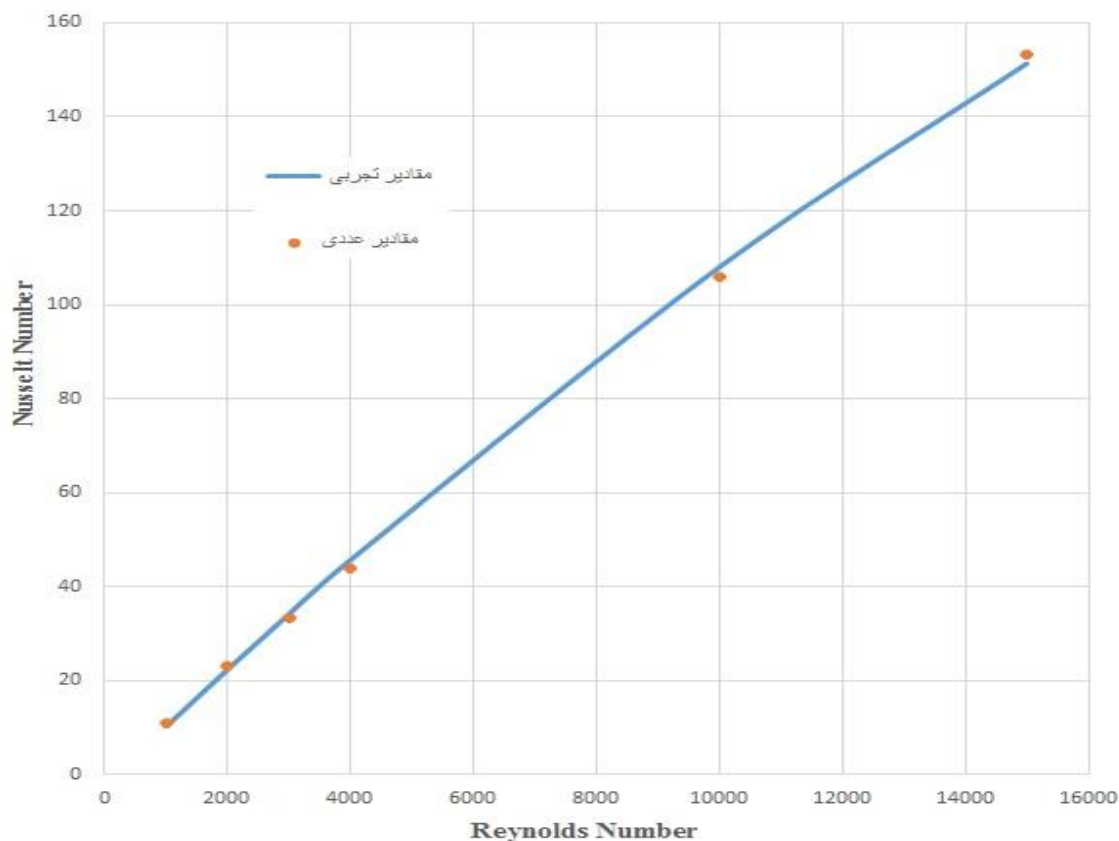
شرایط مرزی برای حل معادلات پیوستگی، مومنتوم و انرژی به صورت زیر و با توجه به مرجع [۱۰] به صورت زیر می‌باشد:

- برای سمت ورودی لوله شرط مرزی دبی جرمی  $\dot{m}$  ورودی ثابت در نظر گرفته شده است. این شرط مرزی با توجه به جریان ورودی و معادله پیوستگی اعمال شده است.
- برای ورودی شرط مرزی جریان کاملاً توسعه یافته و شدت توربولانس ۵٪ ( $I_{in}=5\%$ ) در نظر گرفته شده است. این شرط مرزی برای توسعه یافتگی کامل جریان از لحاظ هیدرودینامیکی و حرارتی در کوئل اعمال شده است.
- برای سمت خروجی لوله شرط مرزی فشار خروجی با شدت توربولانس جریان برگشتی ثابت ۵٪ ( $I_{out}=5\%$ ) در نظر گرفته شده است. این شرط مرزی با توجه به مقطع خروجی کوئل لوله‌ای و ارتباط آن با فشار محیط اعمال شده است.
- برای دیواره لوله کوئل شرط شار حرارتی ثابت و شرط عدم لغزش در نظر گرفته شده است. این شرط مرزی با توجه به گرمایش دیواره کوئل لوله‌ای با شار حرارتی ثابت اعمال شده است.
- نسبت لزجت توربولانس جریان برگشتی ( $\frac{\mu_t}{\mu_{lam}}$ ) برابر ۰/۰۵ در نظر گرفته شده است. این شرط مرزی با توجه لزجت‌های دینامیکی جریان آشفته و آرام اعمال شده است.

### ۳- صحت‌سنجی

در قدم دوم و قبل از اینکه روی داده‌های بدست از حل مسئله توسط نرم‌افزار Ansys Fluent تحلیلی انجام گردد، لازم است از صحت نتایج اطمینان حاصل شود. برای صحت‌سنجی از مرجع [۱۰] که یک مطالعه تجربی ویژگی‌های جریان و انتقال حرارت نانوسیال‌ها در لوله‌های مارپیچی توسط ژای و همکارانش در سال (۲۰۱۹)

می‌باشد، استفاده خواهد شد. در این قسمت نتایج بدست آمده برای کویل با گام  $12/5$  cm، زاویه  $45^\circ$  و  $0/1$  نانوسیال با نتایج ارائه شده در مقاله تجربی فوق مقایسه می‌شوند که در شکل (۲) مشخص شده است. ملاحظه می‌شود که نتایج عددی بدست آمده با مقادیر تجربی بسیار نزدیک می‌باشند. در ادامه میزان خطای موجود بین این نتایج محاسبه خواهد شد تا میزان دقیق خطا مشخص شود. درصد خطای محاسبه شده بین مرجع [۱۰] و نتایج کار حاضر در جدول (۱) نشان داده شده است. ملاحظه می‌شود که بیشترین خطای موجود  $3/83$  درصد و مربوط به ناسلت بدست آمده برای حالت رینولدز  $4000$  می‌باشد که این خطا برای کارهای تحقیقاتی مورد قبول می‌باشد.



شکل ۲- مقایسه نتایج عددی بدست آمده با نتایج تجربی

جدول ۱- درصد خطای نسبی نتایج حاصل با مرجع [۱۰]

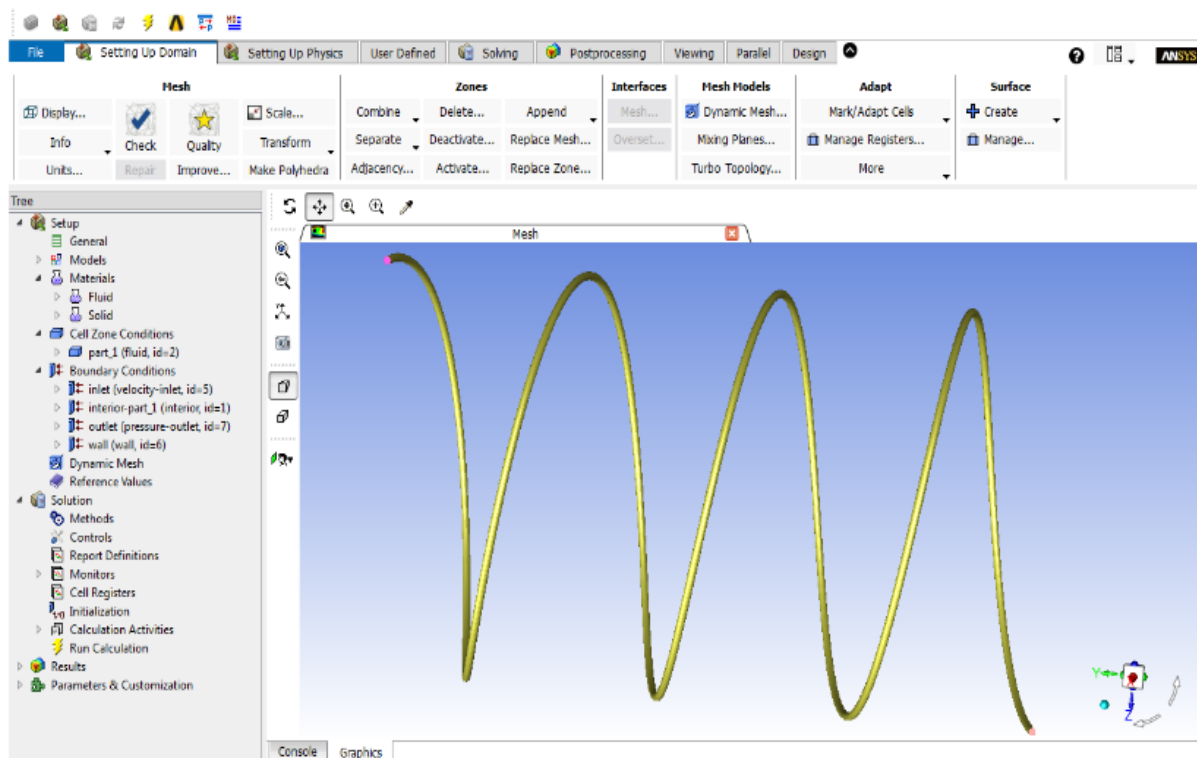
عدد رینولدز	ناسلت مرجع [۱۱]	ناسلت محاسبه شده	درصد خطای نسبی
۱۰۰۰	۱۰/۷۳	۱۱/۱۳	۳/۷۳
۲۰۰۰	۲۲/۰۸	۲۲/۷۱	۲/۸۵
۳۰۰۰	۳۴/۶۲	۳۳/۴۲	۳/۴۷
۴۰۰۰	۴۶/۱۸	۴۴/۴۱	۳/۸۳
۱۰۰۰۰	۱۰۹/۵	۱۰۷/۴۲	۱/۹۰
۱۵۰۰۰	۱۵۳/۳	۱۵۵/۱۶	۱/۲۱

#### ۴- استقلال از شبکه

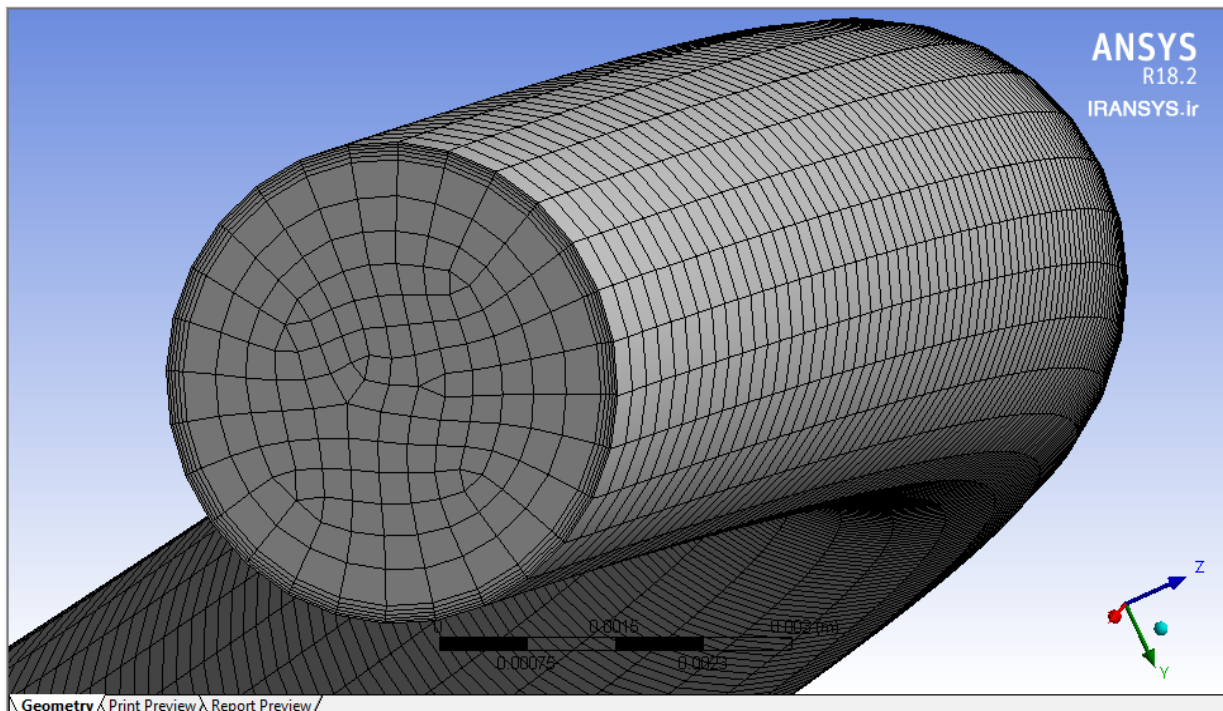
ابتدا هندسه مدل‌های مد نظر که لوله‌های مارپیچ با قطر ۲۰ سانتی‌متر و گام‌های ۱۰، ۱۲/۵ و ۱۵ سانتی‌متر، ساخته شده از لوله دایروی به قطر مقطع ۴ میلی‌متر و طول ۲/۲ متر هستند را توسط نرم افزار Solid Works ایجاد کرده و سپس آنها را در محیط نرم افزار Ansys Fluent فراخوانی شده است. در شکل (۳) هندسه کوئل با گام ۱۰ سانتی‌متر که در محیط انسیس فلونت فراخوانی شده، نشان داده شده است.

مدل ساخته شده را جهت انجام شبیه‌سازی جریان و حل معادلات مربوطه، توسط نرم‌افزار Ansys Meshing شبکه‌بندی می‌کنیم که در شکل (۴) کیفیت شبکه‌بندی آن نشان داده شده است. در ناحیه نزدیک دیواره (به علت گرادیان بالای دما) شبکه‌بندی را ریزتر کرده و تعداد المان‌ها را بیشتر از سایر قسمت‌ها در نظر می‌گیریم. در ورودی کوئل بعلت عدم وجود گرادیان‌های بالای دما نیازی به ریزتر کردن شبکه نیست. برای اطمینان در ورودی از شبکه ریزتر استفاده و مورد بررسی قرار گرفت. با توجه به نتایج شبیه‌سازی عددی با ریزتر کردن شبکه در ورودی کوئل تغییرات محسوسی ایجاد نمی‌شود.

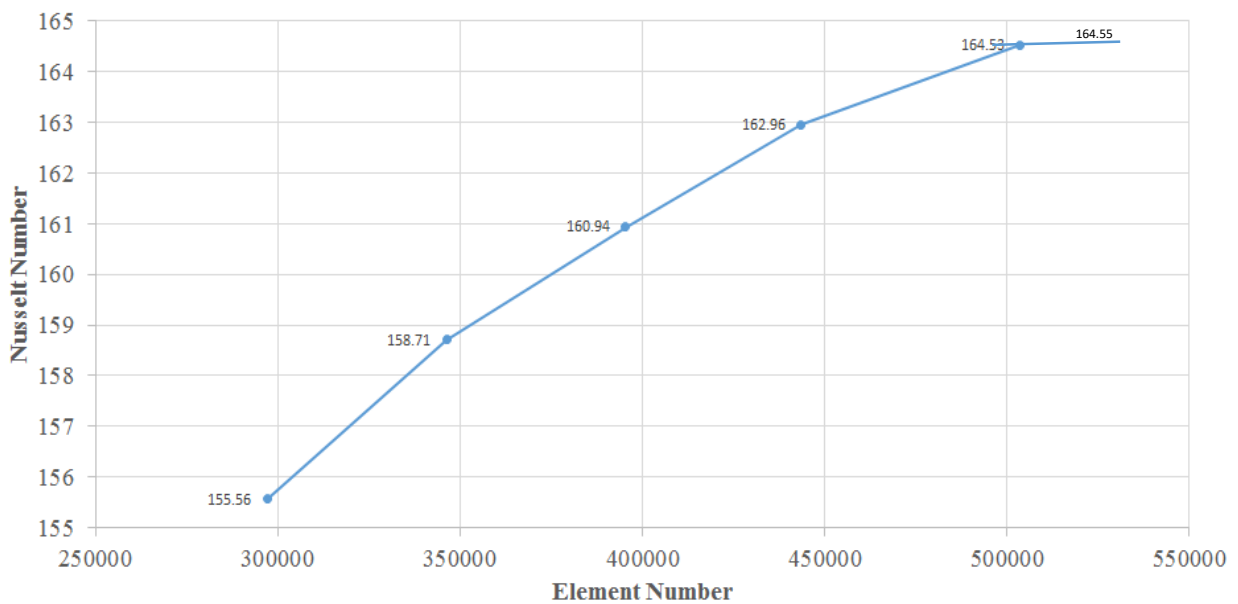
بعد از انجام شبکه‌بندی و قبل از اینکه بخواهیم جریان عبوری از میان آن را مورد مطالعه قراردهیم باید کیفیت شبکه بوجود آمده را بسنجیم و از مستقل بودن نتایج بدست آمده از شبکه مطمئن شویم. به عبارتی اگر شبکه ایجاد شده روی مدل دارای کیفیت خوبی نباشد و به اندازه کافی المان‌های مطلوب جهت حل دقیق مسئله ایجاد نکرده باشیم، نتایج بدست آمده مطمئن نبوده و حتما همراه با خطا خواهد بود. بنابراین باید کیفیت شبکه را آنقدر بالا ببریم که در نتایج به یک همگرایی منطقی دست پیدا کنیم. مطابق شکل ۵ با افزایش تعداد المان‌های شبکه ایجاد شده از همگرایی عدد ناسلت که یکی از معیارهای اصلی تحلیل انتقال حرارت در مدل‌ها خواهد بود، مطمئن می‌شویم.



شکل ۳- هندسه کوئل با گام ۱۰ سانتی‌متر در محیط انسیس فلونت



شکل ۴- کیفیت شبکه‌بندی کویل



شکل ۵- بررسی استقلال جواب‌ها از مش‌بندی

باید توجه داشت در صورتی که شبکه‌بندی بیش از حد لازم ریز شود زمان انجام محاسبات بالاتر خواهد رفت و ممکن است با افزایش بیشتر المان‌های شبکه حتی پردازنده کامپیوترهای خانگی توان انجام محاسبات را نداشته باشند. با افزایش تعداد المان‌های شبکه‌بندی ایجاد شده و حل و محاسبه عدد ناسلت، مشاهده می‌شود که در هر مرحله درصد خطای عدد ناسلت نسبت به عدد ناسلت مرحله قبلی کاهش می‌یابد. مطابق جدول (۲) افزایش کیفیت شبکه را تا جایی ادامه می‌دهیم که مقدار تغییرات عدد ناسلت به کمتر از ۱٪ برسد.

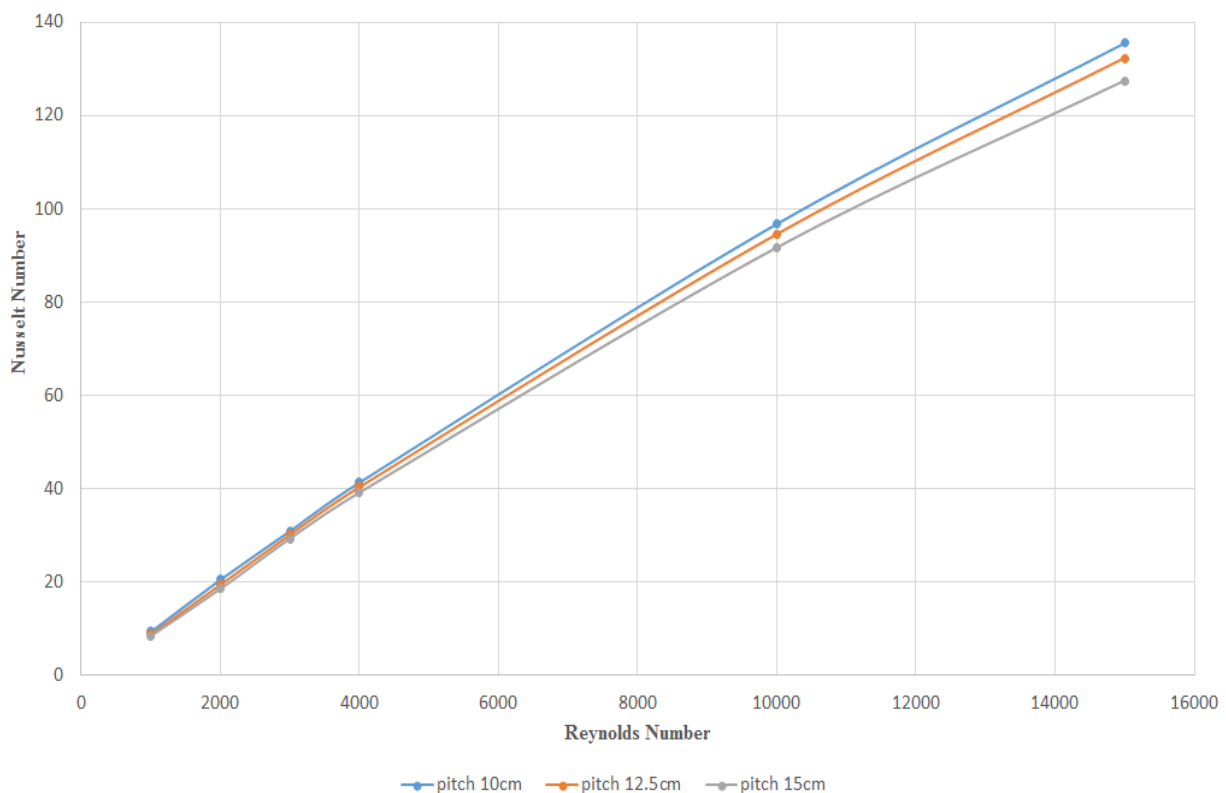
جدول ۲- محاسبه درصد خطای عدد ناسلت

مرحله	تعداد المان‌های موجود در مش‌بندی	عدد ناسلت	درصد خطای نسبی عدد ناسلت نسبت به مش‌بندی مرحله قبل
۱	۲۹۷۰۳۲	۱۵۵/۵۶	-
۲	۳۴۶۲۷۴	۱۵۸/۷۱	۲/۰۲
۳	۳۹۵۳۷۱	۱۶۰/۹۴	۱/۴۱
۴	۴۴۳۶۲۲	۱۶۲/۹۶	۱/۲۶
۵	۵۰۳۶۷۸	۱۶۴/۵۳	۰/۹۶
۶	۵۵۰۰۰۰	۱۶۴/۵۵	۰/۰۱۲

## ۵- نتایج حاصل از شبيه‌سازی عددی

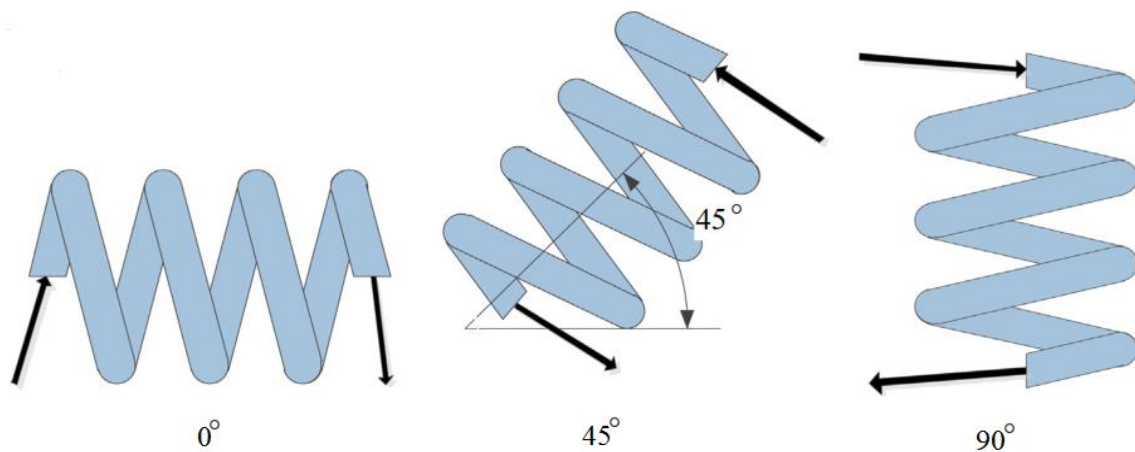
### ۵-۱- بررسی تأثیر تغییر گام و زاویه مارپیچ در میزان انتقال حرارت

سیال آب خالص با سرعت‌های ورودی متفاوت و با توجه به رابطه (۱۴) وارد لوله مارپیچ شده و رینولدزهای ۱۰۰۰، ۲۰۰۰، ۳۰۰۰، ۴۰۰۰، ۱۰۰۰۰ و ۱۵۰۰۰ ایجاد می‌شوند. سپس با اعمال شار حرارتی ثابت از طریق دیواره کویل و انجام تنظیمات مورد نیاز و کدنویسی خواص متغیر آب مانند ویسکوزیته، چگالی، ضریب رسانایی گرمایی و همچنین پروفیل سرعت ورودی و سپس وارد کردن آنها به نرم افزار فلونت، مسائل حل می‌شوند. نتایج بدست آمده در شکل (۶) ارائه شده است.

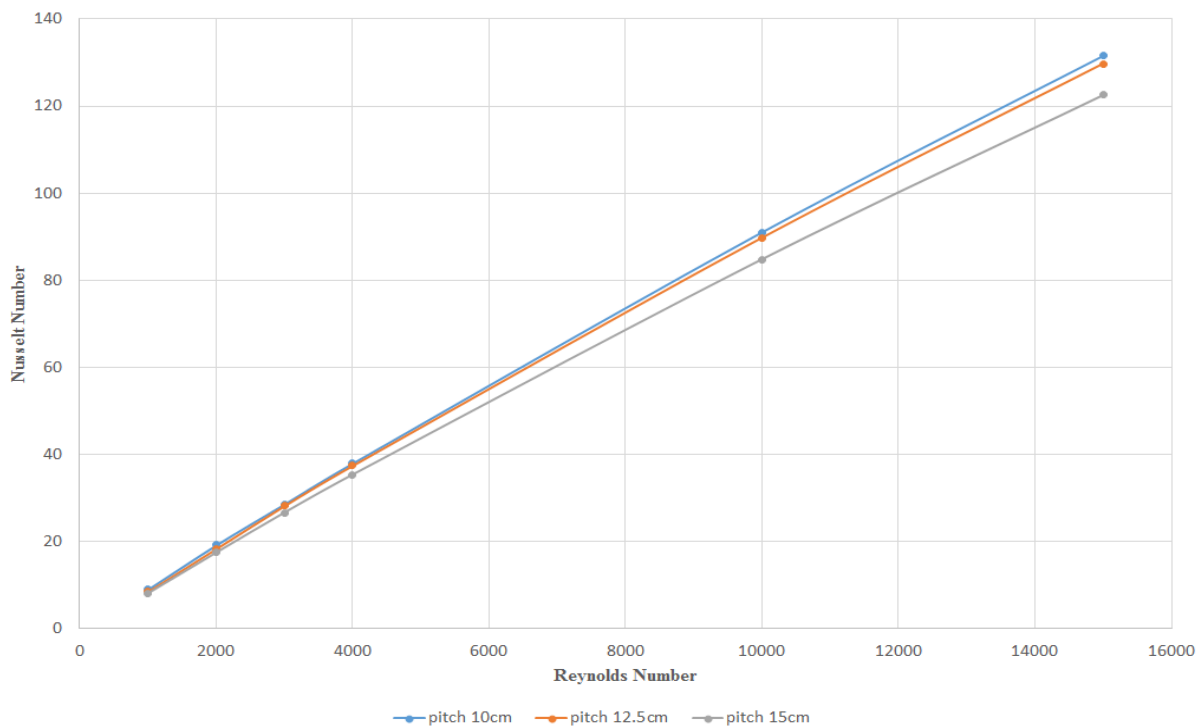


شکل ۶- تأثیر گام روی عدد ناسلت کویل با زاویه صفر درجه

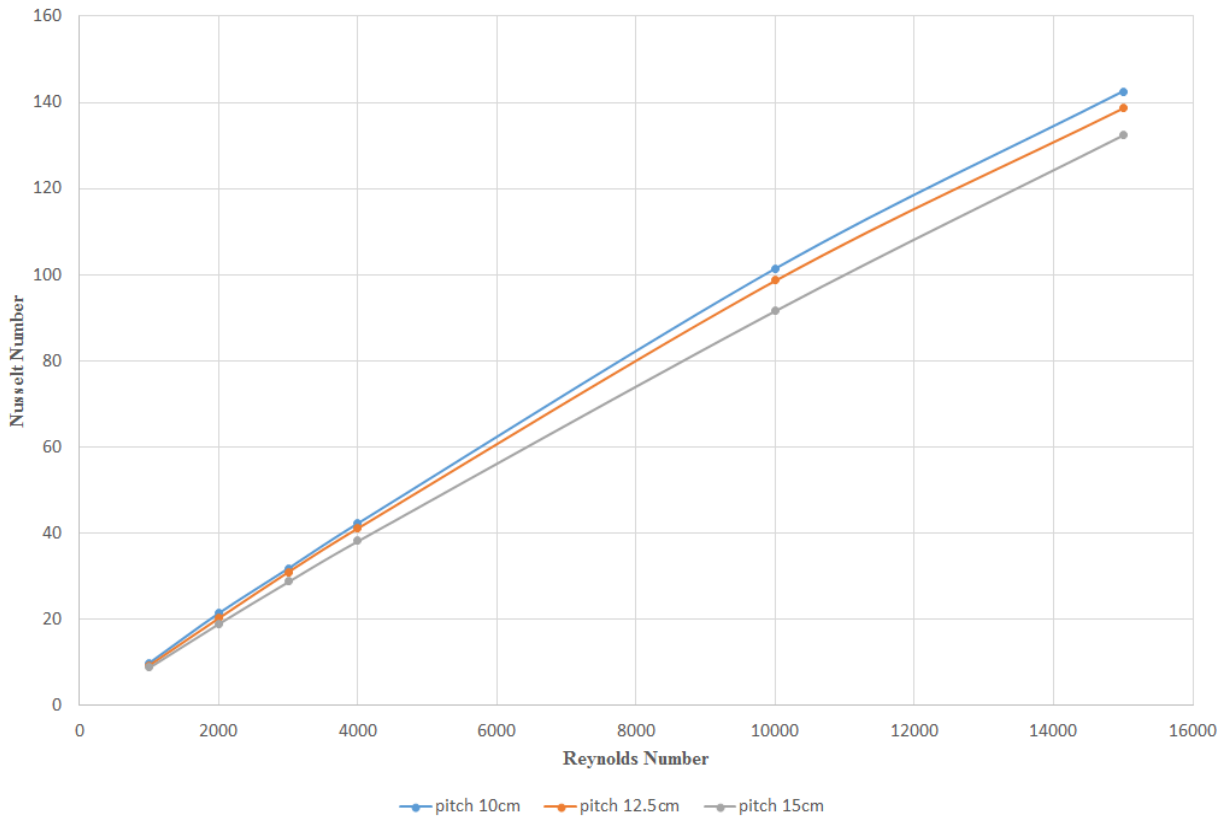
همانطور که ملاحظه می‌شود در تمامی رژیم‌های جریان آرام (اعداد رینولدز ۱۰۰۰ و ۲۰۰۰)، گذرا (اعداد رینولدز ۳۰۰۰ و ۴۰۰۰) و آشفته (اعداد رینولدز ۱۰۰۰۰ و ۱۵۰۰۰) مقدار عدد ناسلت در لوله مارپیچ با گام ۱۰ سانتی‌متر بیشتر از عدد ناسلت لوله مارپیچ با گام ۱۲/۵ سانتی‌متر بوده و در این بین کمترین مقدار ناسلت مربوط به لوله مارپیچ با گام ۱۵ سانتی‌متر است. می‌توان گفت گام پیچ کوچکتر باعث افزایش نیروی گریز از مرکز و فراوانی وقوع جریان ثانویه می‌شود و باعث اختلال بسیار بیشتری در مقایسه با گام پیچ بزرگتر می‌شود. بنابراین افزایش ناسلت با کاهش گام لوله مارپیچ امری قابل قبول است. در ادامه همانند شکل (۷) کوئل نسبت به افق تحت زاویه‌های ۹۰، ۴۵ و صفر درجه قرار گرفته و در رینولدزهای مختلف مسائل حل و نتایج لازم ثبت می‌شوند.



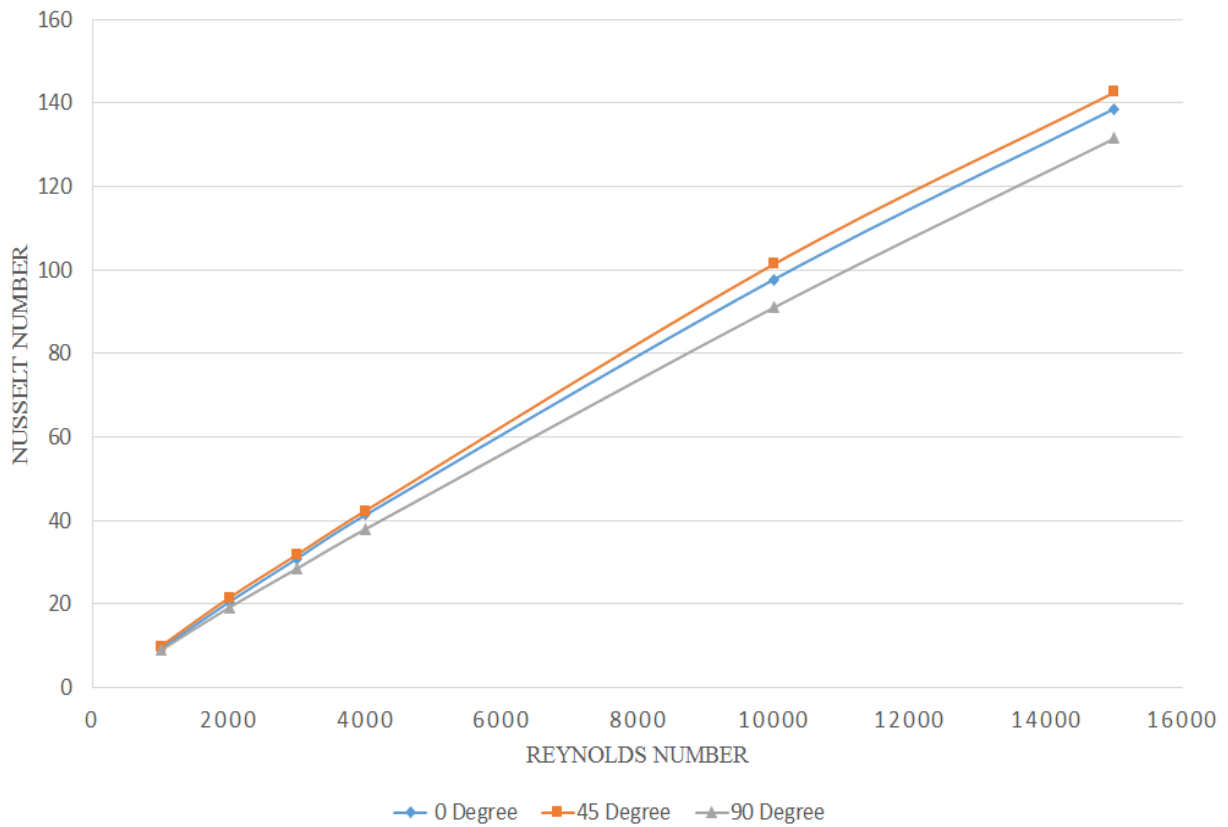
شکل ۷- طرحواره تغییر زاویه کوئل نسبت به افق [۱۰]



شکل ۸- تأثیر گام روی عدد ناسلت کوئل با زاویه ۹۰°



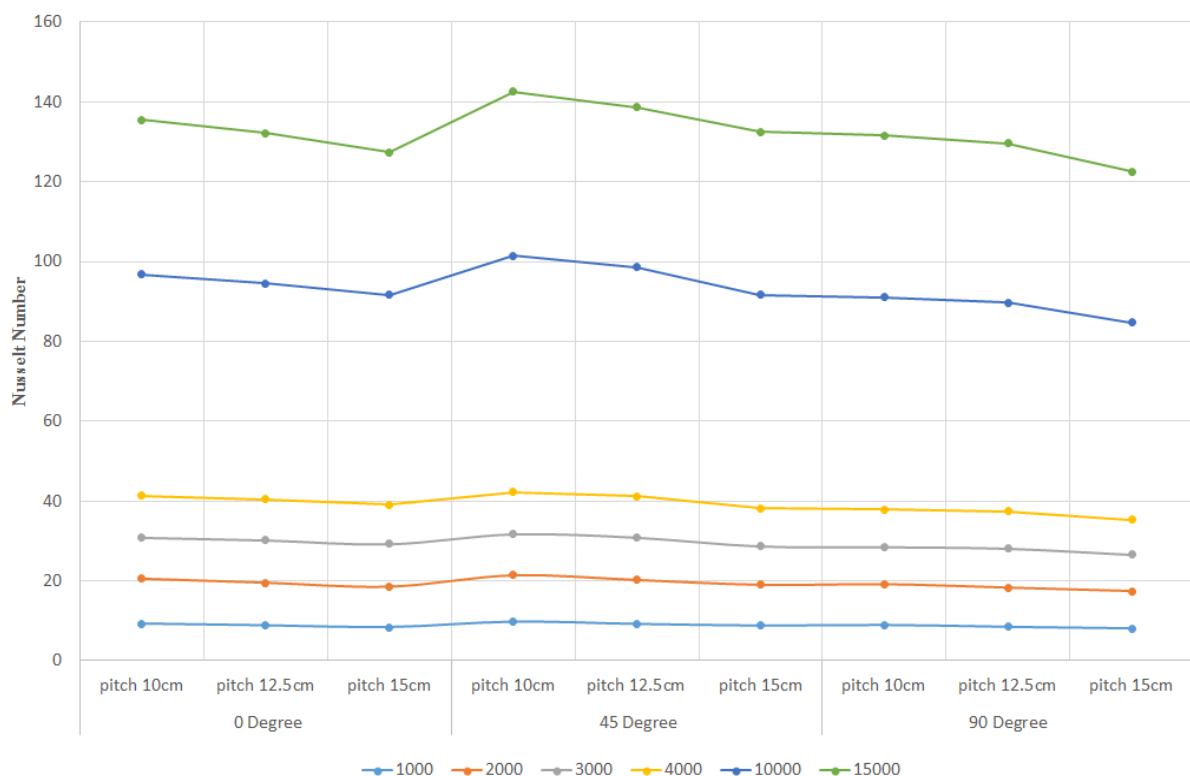
شکل ۹- تأثیر گام روی عدد ناسلت کویل با زاویه ۴۵°



شکل ۱۰- تأثیر زاویه روی کویل با گام ۱۰ سانتی‌متر

نتایج بدست آمده برای کویل ۴۵ و ۹۰ درجه در شکل‌های (۸) و (۹) نشان داده شده است. این شکل‌ها نشان می‌دهند که همچنان مقدار عدد ناسلت برای کویل با گام ۱۰ سانتی‌متر بیشترین مقدار است و کمترین مقدار ناسلت به کویل با گام ۱۵ سانتی‌متر تعلق دارد؛ ولی نکته جالب توجه این است که تغییر زاویه کویل نسبت به افق باعث ایجاد تغییر در عدد ناسلت شده است. ملاحظه می‌شود عدد ناسلت مربوط به لوله مارپیچ با گام ۱۰ سانتی‌متر و زاویه ۴۵ درجه در رینولدز ۱۵۰۰۰ دارای بیشترین مقدار و برابر ۱۴۲/۵۷ می‌باشد. برای بررسی بیشتر، نتایج بدست آمده برای زوایای مختلف کویل با گام ۱۰ سانتی‌متر، در شکل (۱۰) نشان داده شده است.

ملاحظه می‌شود که بزرگترین عدد ناسلت در تمامی رژیم‌های جریان به مارپیچ ۴۵ درجه اختصاص دارد و کمترین عدد ناسلت نیز به مارپیچ ۹۰ درجه تعلق دارد. بطوریکه در بهترین حالت عدد ناسلت ۹/۷ درصد افزایش می‌یابد و این مقدار در جریان آرام و رینولدز ۱۰۰۰ اتفاق می‌افتد. علت افزایش عدد ناسلت در حالت ۴۵ درجه را می‌توان اینگونه تفسیر کرد که در این حالت شکل‌گیری جریان ثانویه داخل کویل بهتر اتفاق می‌افتد و علت بالا بودن این رشد در رینولدز ۱۰۰۰ نیز به این دلیل می‌تواند باشد که در جریان آرام به علت نیروی گریز از مرکز کمتر جریان‌های ثانویه کمتر شکل می‌گیرد و زاویه مناسب می‌تواند تأثیر بیشتری از خود روی افزایش انتقال حرارت همرفتی نشان دهد. در صورتی که در جریان‌های آشفته، این اثرات ( اثرات ناشی از تغییر زاویه کویل ) در مقابل حرکت‌های شدیدتر و متلاطم‌تر جریان کمتر می‌تواند خود را نشان دهد. برای پیدا کردن دید کلی از تغییرات بوجود آمده و به عبارتی ملاحظه تأثیر زاویه و گام پیچ روی انتقال حرارت بطور همزمان، تمامی نتایج بدست آمده را در قالب شکل (۱۱) در یکجا جمع شده است.

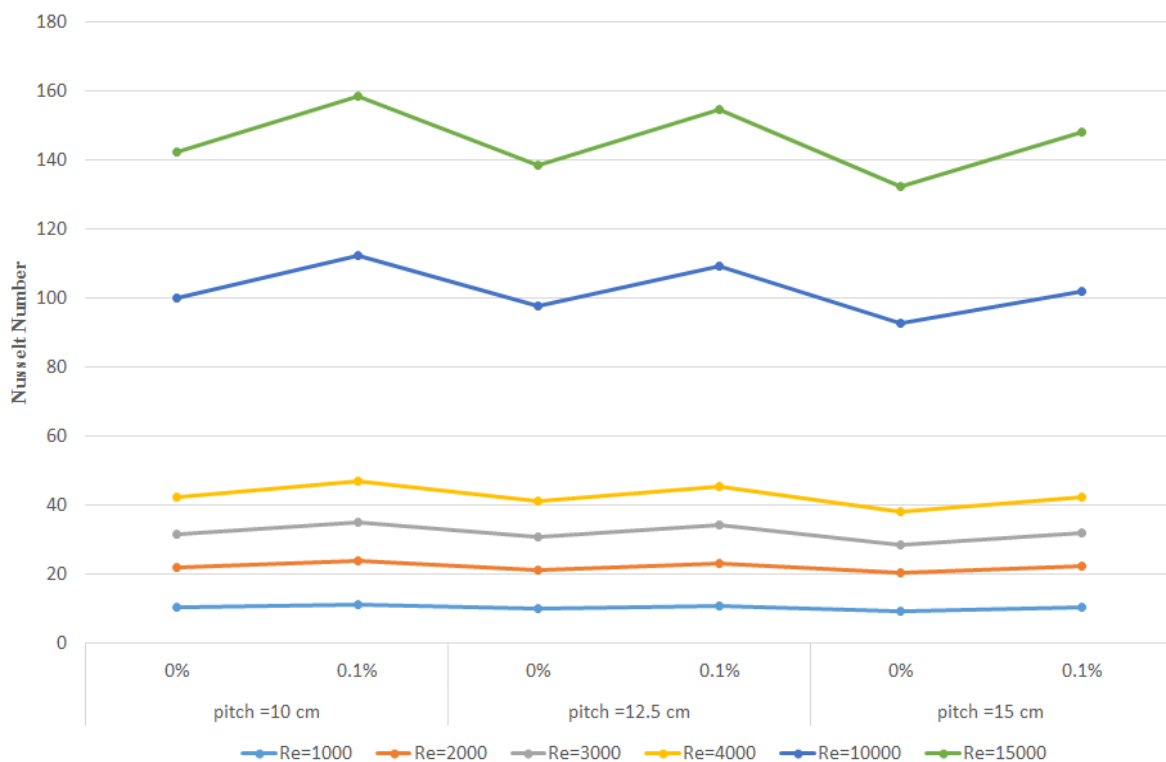


شکل ۱۱- تأثیر گام و زاویه پیچ روی عدد ناسلت

با دقت نظر در شکل (۱۱) همچنان کاهش عدد ناسلت در تمامی رینولدزها با افزایش گام کویل مشهود است و همچنین تغییر زاویه کویل نیز باعث شیفت نمودار شده است که مؤید تأثیر این فاکتور می‌باشد. به عبارتی با حرکت روی خطوط نمودار از سمت چپ به راست روی یک رینولدز بخصوص، مشاهده می‌شود که با افزایش گام و در اثر کاهش جریان‌های ثانویه که قبلاً مورد بحث قرار گرفت، عدد ناسلت شروع به کاهش می‌کند و سپس با تغییر زاویه از صفر درجه به ۴۵ درجه با افزایش قدرت جریان‌های ثانویه انتقال حرارت افزایش یافته و تغییرات عدد ناسلت به سمت بالا شیفت پیدا می‌کند. دو بار با ادامه مسیر به سمت راست و با کاهش گام عدد ناسلت سیر نزولی به خود می‌گیرد و انتقال حرارت کاهش می‌یابد و با تغییر زاویه از ۴۵ درجه به ۹۰ درجه، شیفت اندکی به سمت پایین در شکل بوجود می‌آید. در نهایت روند تغییرات به ناسلت کویل ۹۰ درجه با گام ۱۵ سانتی‌متر می‌رسد که کمترین مقدار ناسلت در سرعت‌های مختلف می‌باشد. با توجه به شکل (۱۱) بیشترین مقدار افزایش انتقال حرارت در عدد رینولدز ۱۵۰۰۰ و گام پیچ ۱۰ سانتی‌متر و زاویه پیچ ۴۵ درجه با توجه به جریان‌های ثانویه قوی‌تر ایجاد شده می‌شود و کمترین مقدار انتقال حرارت در عدد رینولدز ۱۰۰۰ مشهود است.

### ۵-۲- بررسی تأثیر افزودن نانوذرات $TiO_2$ بر میزان انتقال حرارت

برای مطالعه تأثیر نانو ذرات روی انتقال حرارت در کویل با گام‌ها و زوایای مختلف، ابتدا به مقدار ۰/۱ درصد جرمی سیال، نانوذره  $TiO_2$  وارد جریان می‌شود. ملاحظه می‌گردد که افزایش نانوذرات باعث افزایش میزان انتقال حرارت همرفتی می‌شود. مقادیر عدد ناسلت برای لوله مارپیچ ۴۵ درجه در دو حالت آب خالص و نانوسیال ۰/۱ درصد  $TiO_2$  برای مطالعه بیشتر به صورت نمودار در شکل (۱۲) آورده شده است.



شکل ۱۲- تأثیر افزودن ۰/۱ درصد نانوذره روی عدد ناسلت کویل ۴۵°

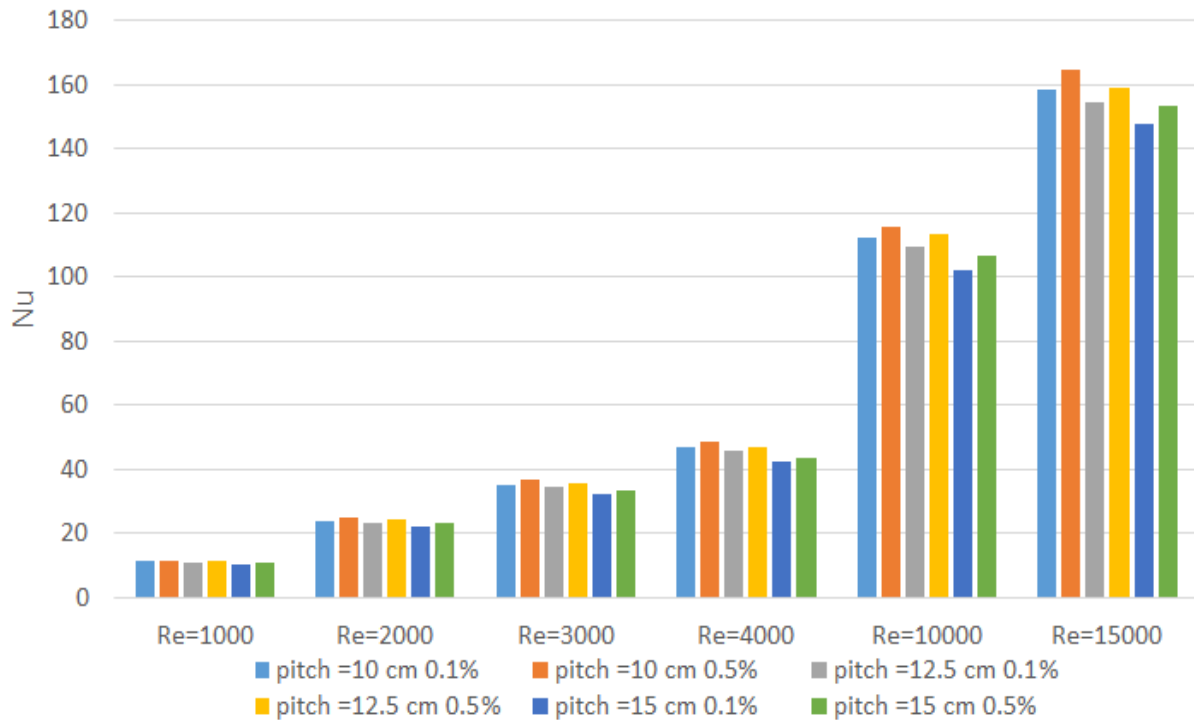
همانطور که مشاهده می‌شود در تمامی رژیم‌های جریان افزودن نانوذرات به سیال باعث بهبود انتقال حرارت همرفتی می‌شود؛ ولی همچنان تأثیر گام در روی عدد ناسلت با وجود ذرات نانو هم وجود دارد. با توجه به شکل (۱۲) بیشترین مقدار افزایش انتقال حرارت در عدد رینولدز ۱۵۰۰۰ و گام ۱۰ سانتی‌متر و ۰/۱ درصد نانو ذره با توجه به جریان‌های ثانویه قوی‌تر ایجاد می‌شود و کمترین مقدار انتقال حرارت در عدد رینولدز ۱۰۰۰ مشهود است. در هنگام اضافه کردن نانوذرات به یک سیال عمدتاً دو عامل باعث افزایش انتقال حرارت می‌شود که یکی از آنها هدایت حرارتی بالای نانوذرات می‌باشد. نانوذرات به میزان حجم موجود در سیال طبق رابطه (۱۵) باعث افزایش ضریب هدایت گرمایی سیال شده و با تغییر ضریب رسانش سیال از  $k_f$  به  $k_{eff}$  آهنگ انتقال حرارت را افزایش می‌دهند.

$$k_{eff} = k_f \frac{k_p + 2k_f + 2\phi(k_p - k_f)}{k_p + 2k_f - \phi(k_p - k_f)} \quad (15)$$

ولی همانطور که در رابطه (۱۵) مشاهده می‌شود افزایش سهم ضریب هدایت اصولاً باعث کاهش عدد ناسلت خواهد شد که در اینجا برعکس این اتفاق رخ داده است؟! این امر نشان می‌دهد اتفاق دیگری نیز با افزودن نانو ذرات در رفتار سیال رخ می‌دهد که ما آثار آن پدیده را در تغییرات مثبت عدد ناسلت مشاهده می‌کنیم. عامل دوم که در اضافه کردن نانوذرات به سیال باعث افزایش انتقال حرارت می‌شود، حرکت شدید براونی نانوذرات می‌باشد. نانوذرات با ابعاد در حد نانو و جرم بالا دارای حرکت براونی یا کاتوره‌ای شدیدی هستند و مرتبه بزرگی این نیرو بسیار بزرگتر از سایر نیروها (نیروی جاذبه و نیروی شناوری، نیروی درگ، نیروی پتانسیل متقابل) است، و می‌تواند به طور مؤثری انتقال حرارت همرفتی را بیشتر کند. توجه به این خصوصیت نانوذرات، ما را به پاسخ سؤال بوجود آمده در پاراگراف قبلی می‌رساند. به عبارتی حرکت شدید براونی ذرات نانو باعث بهبود جریان‌های همرفتی داخل سیال شده و ضریب همرفت سیال را به میزان بیشتری نسبت به ضریب هدایت آن بالاتر می‌برد و این مسئله طبق رابطه (۱۱) باعث افزایش عدد ناسلت می‌شود و انتقال حرارت همرفتی در اثر افزودن نانوذرات به سیال آب خالص افزایش می‌یابد.

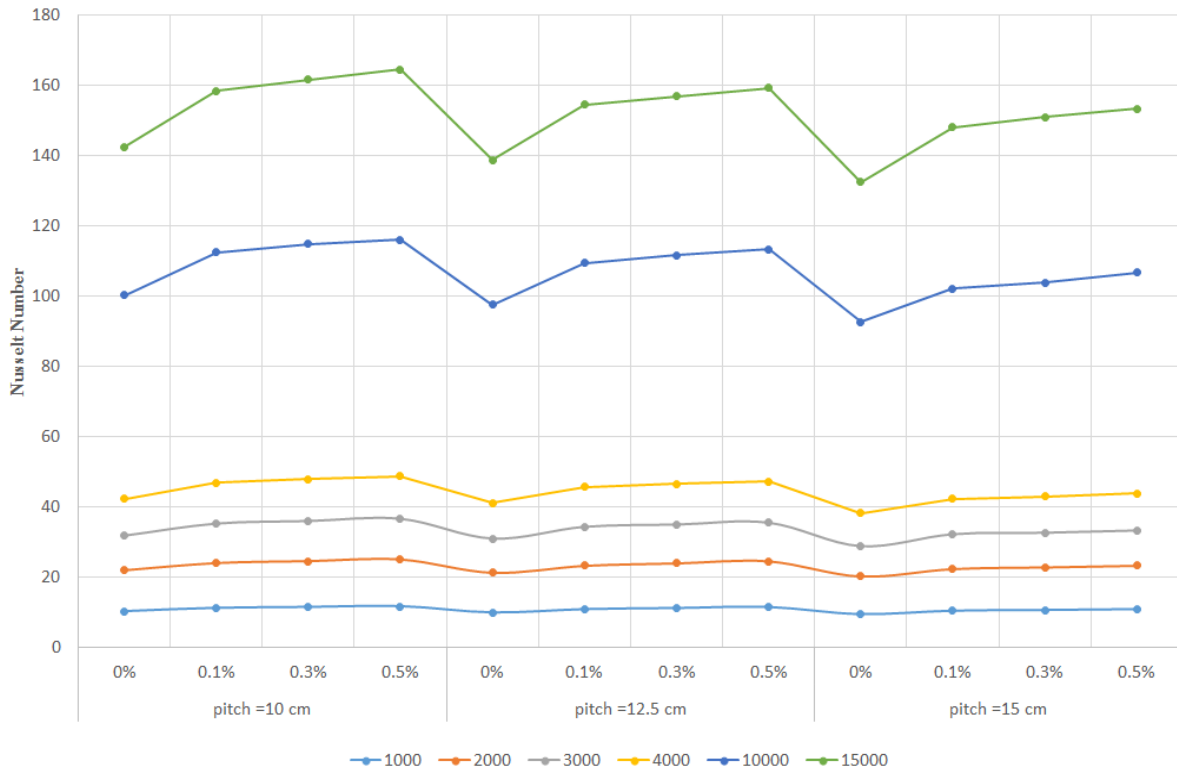
### ۵-۳- بررسی تأثیر افزایش غلظت نانوذرات $TiO_2$ بر میزان انتقال حرارت

در ادامه کار برای بررسی تأثیر افزایش غلظت نانو ذرات، مقدار  $TiO_2$  به ترتیب به ۰/۳ و ۰/۵ درصد جرمی افزایش می‌یابد. برای تعریف خواص سیال جدید که با بالا رفتن درصد نانوذرات تغییر کرده است، UDFهای ورودی به نرم‌افزار اصلاح می‌شوند و سپس برای تمامی حالات یعنی گام‌های مختلف و زاویه‌های مختلف این مسئله با انجام تنظیمات لازم حل و نتایج ثبت می‌شوند. نتایج بدست آمده نشان می‌دهد که در کلیه حالات با افزایش غلظت نانو ذرات، عدد ناسلت افزایش می‌یابد. به عبارتی عدد ناسلت در یک حالت بخصوص برای سیال ۰/۵ درصد بزرگتر از سیال ۰/۳ درصد بوده و کمترین مقدار ناسلت هم مربوط به نانوسیال ۰/۱ درصد می‌باشد. اثر تغییر زاویه کویل و گام مارپیچ همچنان در نتایج مشهود است. برای مطالعه بیشتر به عنوان نمونه اعداد ناسلت در غلظت‌های ۰/۱ درصد و ۰/۵ درصد مربوط به لوله مارپیچ  $45^\circ$  (که طبق نتایج محاسبات بهترین زاویه برای انتقال حرارت همرفتی می‌باشد)، در شکل (۱۳) ارائه شده است.



شکل ۱۳- تغییرات عدد ناسلت کویل  $45^\circ$  با افزایش غلظت از ۰/۱ به ۰/۵ درصد  $TiO_2$

همانطور که در شکل (۱۳) مشخص است بزرگترین عدد ناسلت برابر  $164/53$  بوده و مربوط به حالت رینولدز  $15000$ ، گام  $10$  سانتی‌متر و غلظت  $0/5$  درصد نانوذره می‌باشد. در حالت استفاده از آب خالص این مقدار برای کویل مشابه  $142/57$  محاسبه شده است. با یک محاسبه ساده مشخص می‌شود که رشد عدد ناسلت در این حالت به میزان  $15/4$  درصد بوده است. بعد از تعیین درصد رشد عدد ناسلت در تمامی حالات، متوسط این رشد برای جریان‌های آرام حدود  $14/2$  درصد و برای جریان‌های آشفته حدود  $15$  درصد بدست می‌آید. این تفاوت نشان می‌دهد سرعت بالا و اغتشاش بیشتر باعث افزایش کارایی نانوذرات می‌شود. برای بررسی بیشتر و دقیق‌تر، نتایج بدست آمده در یک نمودار و با تفکیک گام، ثبت شده‌اند که در شکل (۱۴) قابل مشاهده است. با دقت نظر در این نمودار علاوه بر نکات ذکر شده قبلی، نکته جدیدی در خصوص نحوه تغییرات عدد ناسلت و شرایط حاکم بر جریان حین افزایش غلظت نانوذرات نمایان می‌سازد که در ادامه به آن پرداخته خواهد شد. ملاحظه می‌شود با افزودن  $0/1$  درصد نانوذره به سیال عدد ناسلت با شیب نسبتاً تندی شروع به افزایش می‌کند ولی در ادامه، افزایش غلظت نانوذرات و استفاده از سیال  $0/3$  درصد و  $0/5$  درصد نانو، هرچند رشد عدد ناسلت را سبب می‌شود ولی این رشد شیب کمتری (نسبت به رشد از حالت آب خالص تا  $0/1$  درصد نانو) دارد. این کاهش شیب در نتایج هر سه گام مختلف مشاهده می‌شود. باید گفت کارایی که نانوذرات در افزایش تلاطم و حرکت کاتوره‌ای در سیال دارند با افزایش تعداد ذرات نانو بعد از حدی دچار افت می‌شود. به عبارتی بالا رفتن تعداد ذرات باعث می‌شود این ذرات اثر همدیگر را خنثی کنند و به کلام ساده‌تر مزاحم فعالیت یکدیگر شوند. در حالی که ضریب رسانش سیال بدون هیچ مشکلی با افزایش غلظت نانوذرات رشد می‌کند و باعث کاهش عدد ناسلت می‌شود. از طرف دیگر افزایش فشاری که در حین بالا رفتن غلظت نانوذرات اتفاق می‌افتد نیز مزاحم حرکت آزادانه ذرات شده و تأثیر منفی روی نقش  $TiO_2$  در بهبود انتقال حرارت می‌گذارد.



شکل ۱۴- تغییرات عدد ناسلت کویل  $45^\circ$  با افزایش غلظت نانوذرات و به تفکیک گام کویل

#### ۴-۵- بررسی تأثیر افزایش غلظت نانوذرات $TiO_2$ روی عدد PEC

افزایش فشاری که حین بالا رفتن غلظت نانوذرات بوجود می‌آید علاوه بر اینکه بهبود انتقال حرارت را کندتر می‌کند، میزان انرژی لازم برای به حرکت درآوردن سیال را بالاتر می‌برد. به عبارت ساده‌تر وقتی غلظت سیال بالاتر رفت، مصرف انرژی پمپ محرک سیال نیز بالاتر می‌رود و چه بسا با ادامه این کار پمپ موجود دیگر توان ایجاد نیروی محرکه لازم را نخواهد داشت و ما به یک پمپ با مشخصات بهتر که قطعاً گران قیمت‌تر خواهد بود نیاز پیدا خواهیم کرد و این یعنی افزایش هزینه! که با توجه به مطالب مطرح شده با اهداف ما در این تحقیق تناقض دارد.

اکنون قرار گرفتن مقدار افزایش هزینه‌های ناشی از بالا رفتن فشار در کفه اول ترازو و ارزش افزایش انتقال حرارت بوجود آمده در کفه دوم، باید سنگینی کفه دوم را سبب شود تا کارایی این روش اثبات شود. برای این کار یک معیار سنجش کارایی نیاز است که آن معیار ارزیابی عملکرد PEC نام دارد. عدد PEC یک عدد بی‌بعد بوده و مقدار آن طبق رابطه (۱۶) بدست می‌آید [۱]:

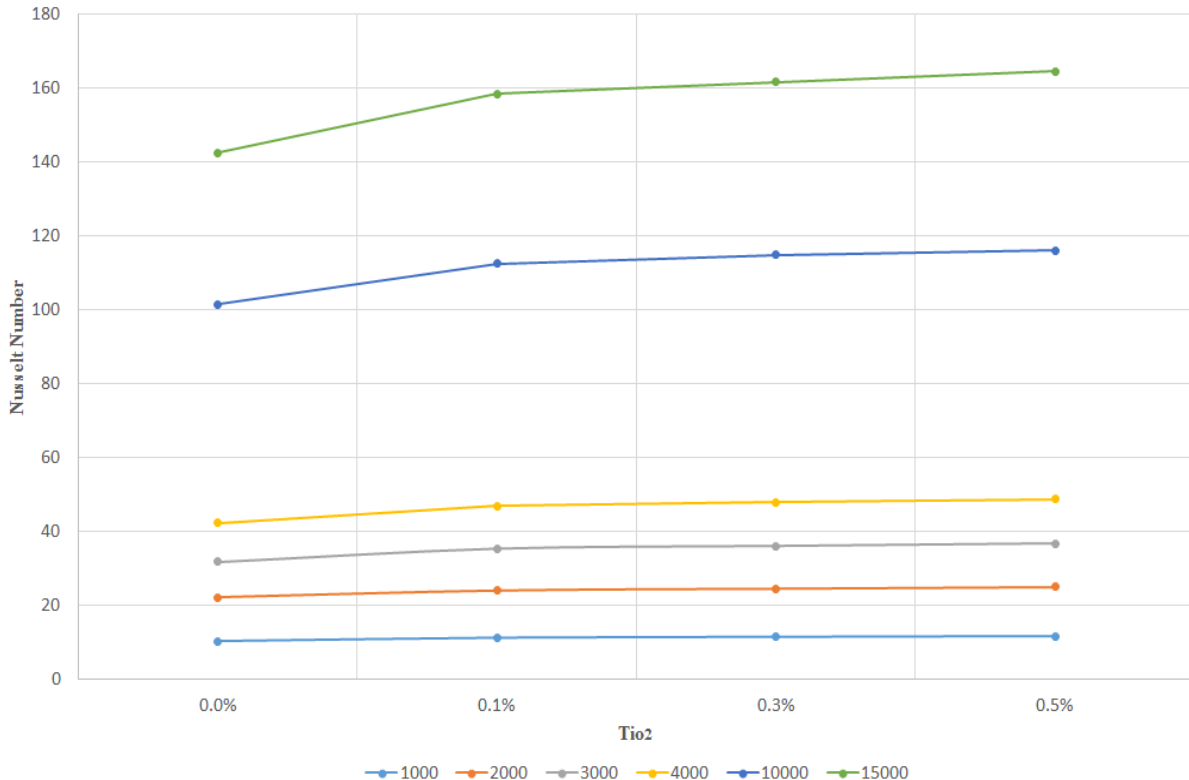
$$PEC = \frac{Nu}{Nu_s} \left( \frac{\Delta P}{\Delta P_s} \right)^{-1/3} \quad (13)$$

برای محاسبه هم‌زمان افزایش انتقال حرارت و افت فشار و بررسی کارایی کلی سیستم‌های فزاینده انتقال حرارت از ضریب PEC استفاده می‌شود که نسبت افزایش انتقال حرارت را به افت فشار افزایش یافته بیان

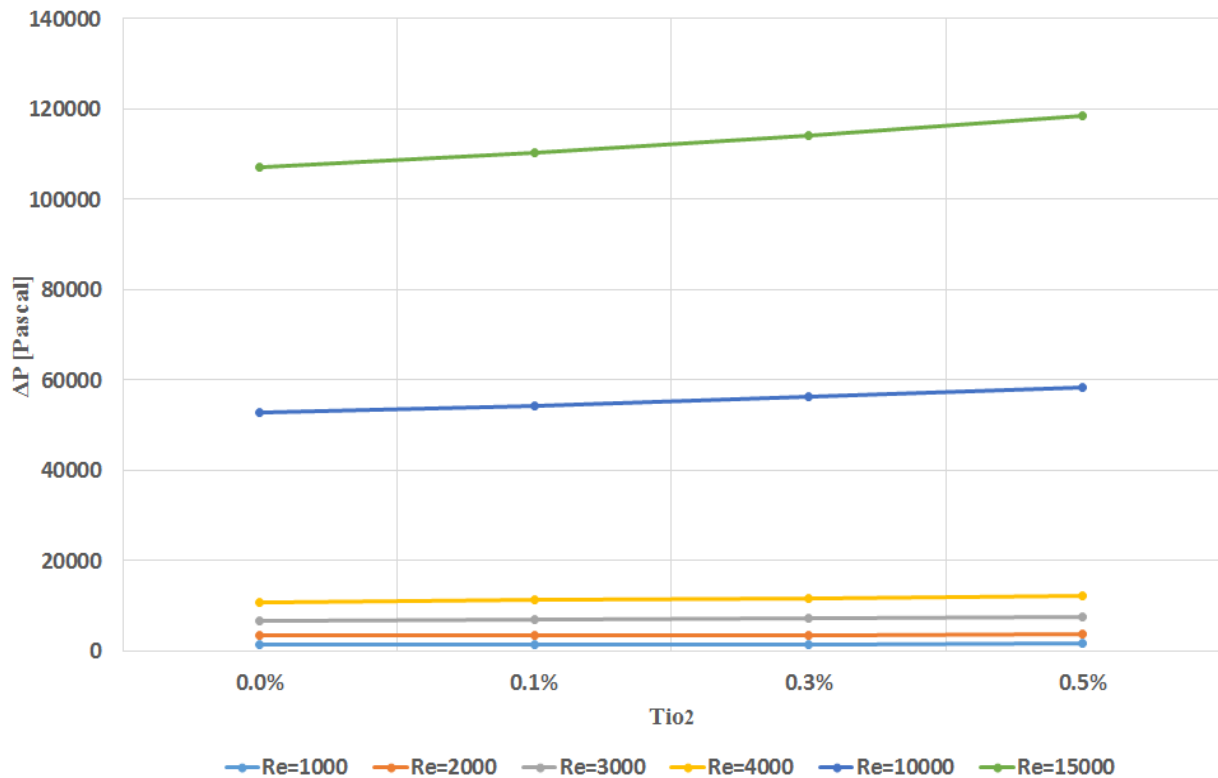
می‌کند و برای نسبت‌های PEC بزرگ‌تر از ۱ می‌توان نتیجه گرفت که سیستم مورد مطالعه از لحاظ عملکردی قابل ارائه و بهره‌ور است. همچنین برای تأیید کارایی روش بکار رفته و توجیه‌پذیری آن، مقدار این عدد باید بالاتر از یک بدست آید. در اینجا به‌عنوان نمونه کوپل  $45^\circ$  با گام  $10\text{ cm}$  که طبق نتایج بدست آمده، بهترین هندسه برای انتقال حرارت جابجایی محسوب می‌شود) برای محاسبه ضریب PEC انتخاب شده است. تغییرات عدد ناسلت برای این حالت با دقت بیشتری در شکل (۱۵) رسم شده است.

برای محاسبه ضریب PEC مقادیر اختلاف فشار ( $\Delta P$ ) بین مقطع ورودی و خروجی کوپل نیز باید در دست باشد که هنگام حل مسائل با انتگرال‌گیری سطحی، محاسبه گردیده است و نتایج در شکل (۱۶) قابل مشاهده می‌باشد. با توجه به شکل (۱۶) مشخص می‌شود که اختلاف فشار با افزایش غلظت نانوذرات رشد یکنواختی داشته است. مورد دیگر بالا بودن مقادیر اختلاف فشار مربوط به جریان متلاطم نسبت بقیه رژیم‌ها می‌باشد که علت آن سرعت بالای سیال در حالت متلاطم می‌باشد. افت فشار در سیال داخل لوله طبق معادله داریسی - وایسباخ<sup>۱</sup> با توان دوم سرعت رابطه مستقیم دارد و به همین دلیل است که در شکل فوق (شکل (۱۶))، این مقادیر با افزایش رینولدز (که مؤلفه سرعت را در خود مستتر دارد) به‌صورت توانی رشد کرده‌اند. قابل ذکر است که بیشترین این مقادیر مربوط به رینولدز  $15000$  و غلظت  $0.5\%$  درصد نانوذرات و برابر  $118/558$  کیلوپاسکال می‌باشد.

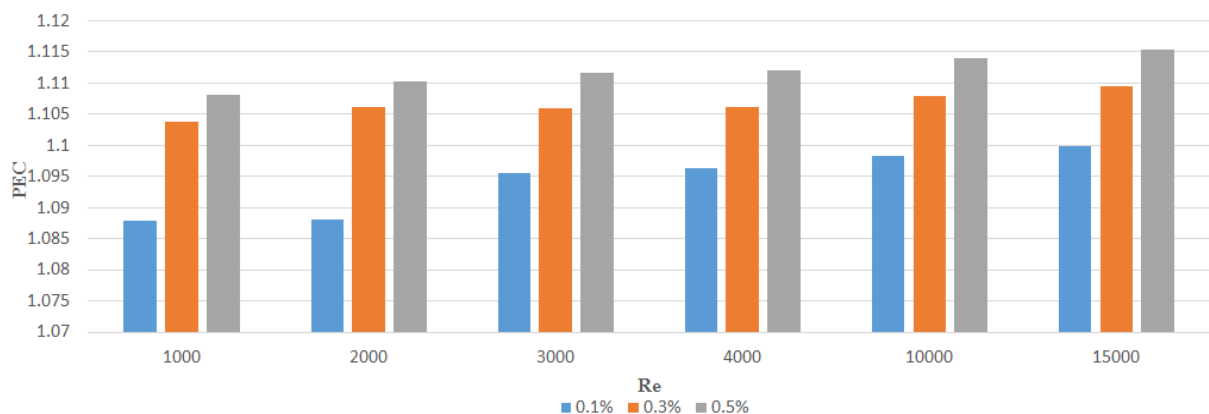
اکنون با در دست بودن تغییرات عدد ناسلت و اختلاف فشار، طبق رابطه (۱۶) عدد PEC برای حالات مختلف محاسبه گردیده و در شکل (۱۷) رسم شده است.



شکل ۱۵- تأثیر افزودن نانوذرات  $\text{TiO}_2$  بر عدد ناسلت کوپل  $45^\circ$  با گام  $10\text{ cm}$



شکل ۱۶- تأثیر افزودن نانوذرات  $TiO_2$  بر تغییرات فشار کویل  $45^\circ$  با گام  $10\text{ cm}$



شکل ۱۷- محاسبه عدد PEC برای کویل  $45^\circ$  با گام  $10\text{ cm}$

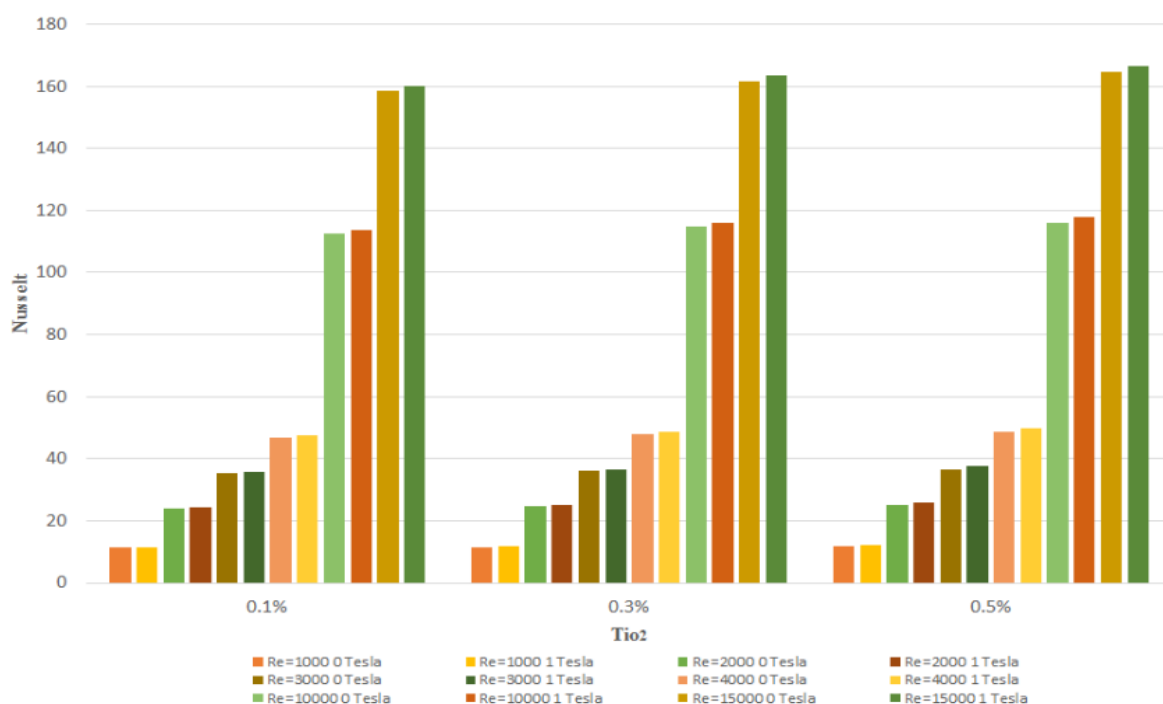
تمامی اعداد مطابق با شکل (۱۷) بالای عدد یک قرار دارند و این یعنی کارایی روش‌های بکارگرفته شده مورد تایید می‌باشد. اما نمودارهای میله‌ای رسم شده گویای این مطلب هستند که رشد عدد PEC هرچند با افزایش غلظت وجود دارد ولی رفته رفته شیب این نمودار کمتر می‌شود. این رشد به دلایلی که مطرح گردید با رسیدن به یک غلظت بحرانی متوقف خواهد شد و سپس حالت منفی به خود خواهد گرفت. در نهایت در یک نقطه هزینه‌های ناشی از افزایش فشار، آنقدر بالاتر خواهد رفت که آثار مثبت حضور ذرات نانو را از بین خواهد برد. در نهایت عدد PEC به زیر عدد یک خواهد رسید. محل این نقطه را با بررسی بیشتر می‌توان پیدا کرد که می‌تواند موضوع یک تحقیق دیگر باشد و نتایج ارزشمندی را بدست دهد.

مطابق با نتایج بدست آمده بزرگترین عدد PEC مربوط به رینولدز ۱۵۰۰۰ و غلظت ۰/۵ درصد و برابر ۱/۱۱۵۴ می‌باشد. کمترین این مقادیر نیز به رینولدز ۱۰۰۰ و غلظت ۰/۱ درصد تعلق دارد که برابر ۱/۰۸۸ می‌باشد. علت کوچکتر بودن این عدد در جریان‌های آرام تأثیر کمتر نانو ذرات در سرعت‌های پایین می‌باشد؛ یعنی سرعت بیشتر باعث می‌شود ذرات سنگین  $TiO_2$  حرکت براونی بیشتری در سیال ایجاد کنند.

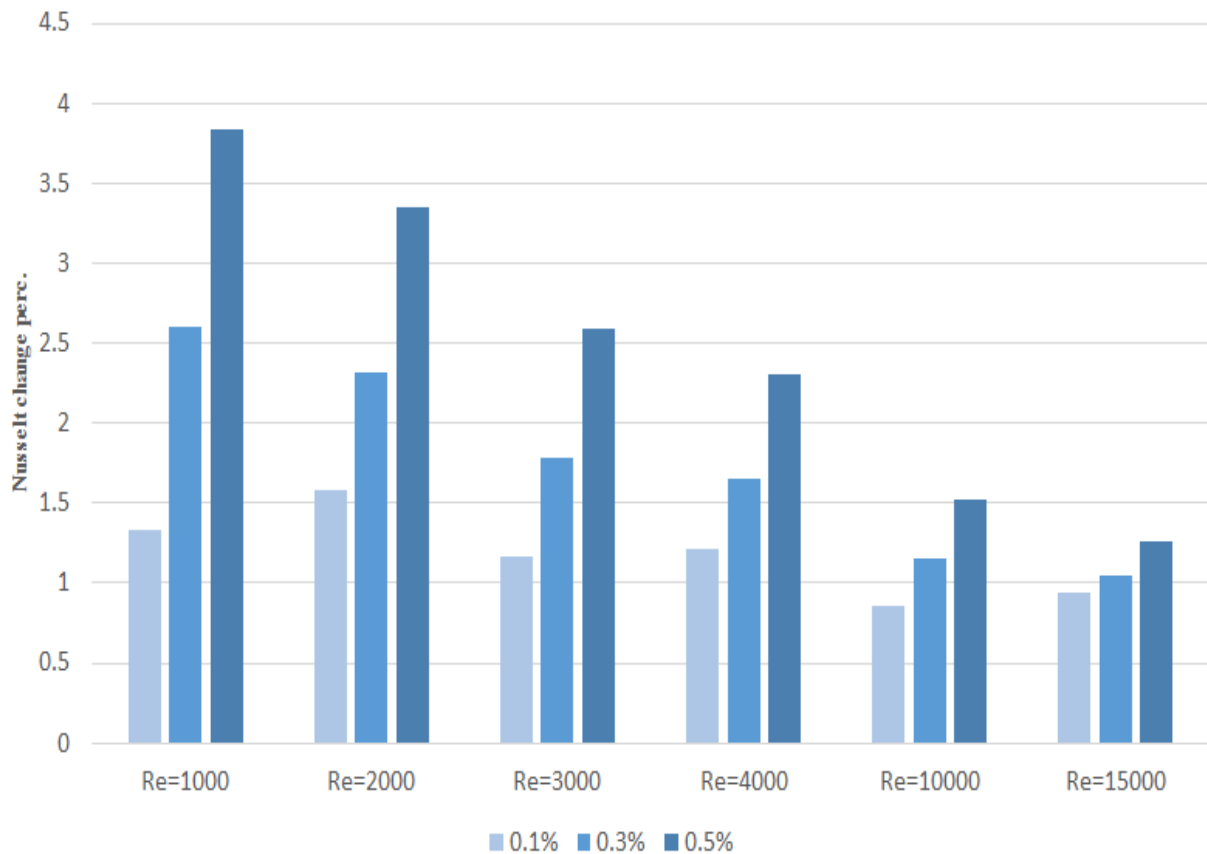
### ۵-۵- بررسی تأثیر میدان مغناطیسی بر بهبود انتقال حرارت

یکی از نوآوری‌های موجود در این پژوهش اعمال میدان مغناطیسی به لوله مارپیچ و بررسی اثر آن روی آهنگ انتقال حرارت می‌باشد. در ادامه میدان یک تسلا روی مدل‌های مختلف (با انجام UDF نویسی و در نظر گرفتن روابط موجود)، در جهت محور کوئل، اعمال شده و تأثیر آن بررسی خواهد شد. نتایج حاصل از حل معادلات نشان می‌دهند اعمال میدان مغناطیسی به جریان داخل کوئل باعث رشد عدد ناسلت می‌شود. در شکل (۱۸) نتایج مربوط به کوئل ۴۵ درجه با گام ۱۰ سانتی‌متر قابل مشاهده است.

با توجه به شکل (۱۸) اعمال میدان مغناطیسی عدد ناسلت را افزایش داده است. بیشترین عدد ناسلت برابر ۱۶۶/۶ بوده و در حالت غلظت ۰/۵ درصد نانوذره و رینولدز ۱۵۰۰۰ بدست آمده است. علت افزایش عدد ناسلت در حضور میدان مغناطیسی، مومنتوم اعمال شده روی ذرات نانو می‌باشد. با شتاب گرفتن بیشتر این ذرات در اثر نیروی میدان تلاطم بیشتری در سیال بوجود می‌آید و جریان‌های ثانویه تشدید می‌شوند. این نیرو همواره در خلاف جهت سرعت ذرات به آنها وارد می‌شود و اندازه آن با توجه به تغییر دائمی زاویه بین سرعت و خطوط میدان، متغیر خواهد بود. این تغییر دائمی نیروی وارده به ذرات، باعث ایجاد شوک و بی‌نظمی بیشتر در سیال شده و انتقال حرارت را بهبود می‌بخشد. در ادامه برای ارائه یک تحلیل بهتر از میزان افزایش انتقال حرارت، درصد رشد عدد ناسلت برای رینولدزهای ۱۰۰۰ تا ۱۵۰۰۰ در شکل (۱۹) رسم شده است.



شکل ۱۸- تأثیر میدان مغناطیسی روی عدد ناسلت کوئل ۴۵° با گام ۱۰ cm

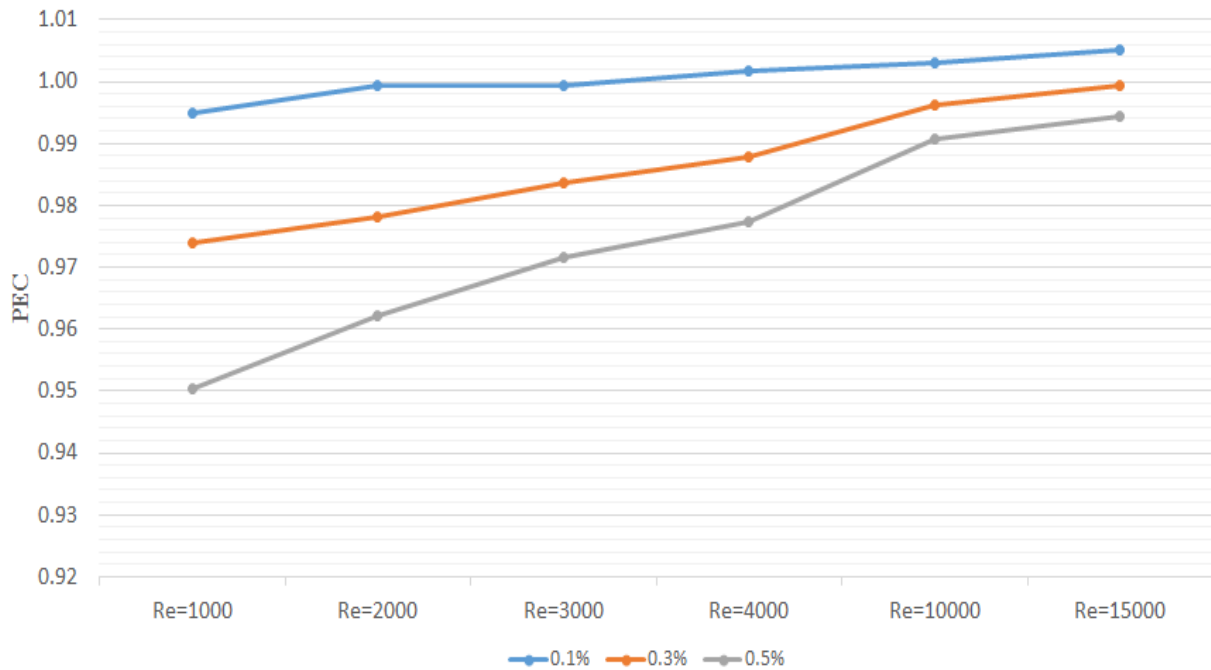


شکل ۱۹- درصد افزایش عدد ناسلت کوپل  $45^\circ$  با گام  $10\text{ cm}$  در اثر میدان یک تسلا

همانطور که در شکل (۱۹) مشاهده می‌شود، با افزایش عدد رینولدز درصد افزایش عدد ناسلت کاهش می‌یابد. بیشترین مقدار مربوط به رینولدز  $1000$  و غلظت  $0/5$  درصد نانوذره و کمترین مقدار مربوط به رینولدز  $15000$  و غلظت  $0/1$  درصد نانوذره می‌باشد که به ترتیب  $3/84$  و  $0/94$  می‌باشند.

#### ۵-۶- بررسی ضریب PEC در حضور میدان مغناطیسی

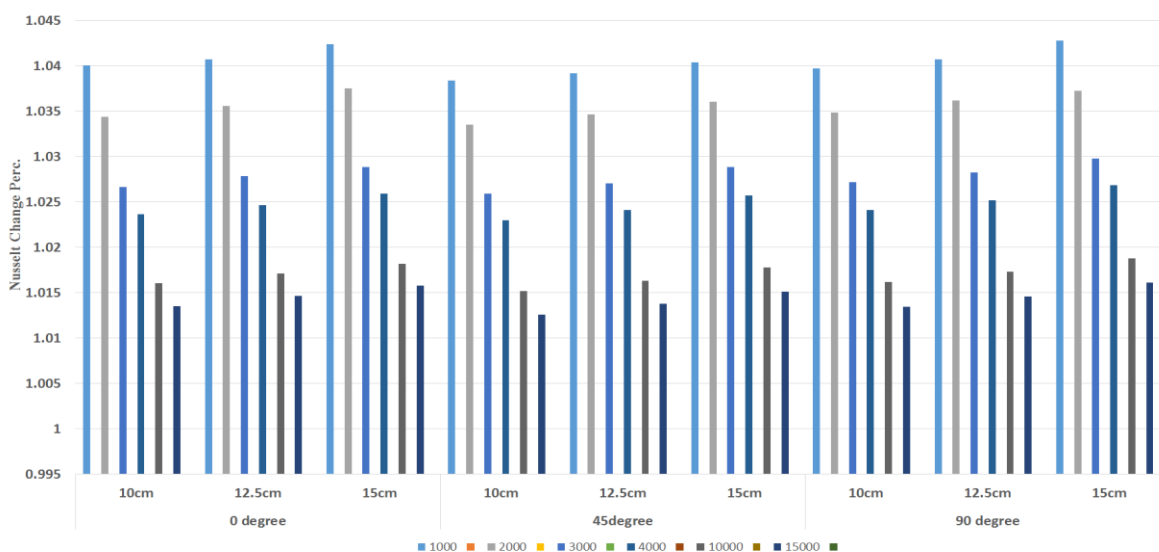
اکنون باید با محاسبه ضریب PEC و بررسی آن در حالات مختلف مشخص گردد که افزایش عدد ناسلت در اثر حضور میدان مغناطیسی چه تغییری در کارایی سیستم ایجاد کرده است. به عبارتی آیا ایجاد میدان مغناطیسی (که علاوه بر تجهیزات لازم برای تولید آن، مصرف انرژی را نیز در پی خواهد داشت) و اعمال آن به سیستم توانسته است آهنگ انتقال حرارت را به میزان توجیه‌پذیری در مقایسه با افزایش فشار سیستم بالاتر ببرد یا نه؟ برای این منظور مقادیر PEC برای غلظت‌های مختلف نانوسیال در کوپل  $45$  درجه و با گام پیچ  $10$  سانتی‌متر محاسبه شده و در شکل (۲۰) قابل مشاهده است. در شکل (۲۰) ملاحظه می‌گردد که نانوسیال با غلظت  $0/1$  درصد ضریب PEC بالاتری نسبت به غلظت‌های دیگر دارد و ضریب PEC برای نانوسیال با غلظت  $0/5$  کمترین مقدار محسوب می‌شود. در کل این ضریب برای درصدهای  $0/3$  و  $0/5$  کمتر از یک می‌باشد و این مسئله بدین معنی است که کارایی سیستم در این حالات کاهش پیدا کرده و افزایش فشار ایجاد شده در اثر حضور میدان در حدی بوده که اثر مثبت رشد عدد ناسلت را از بین برده است.



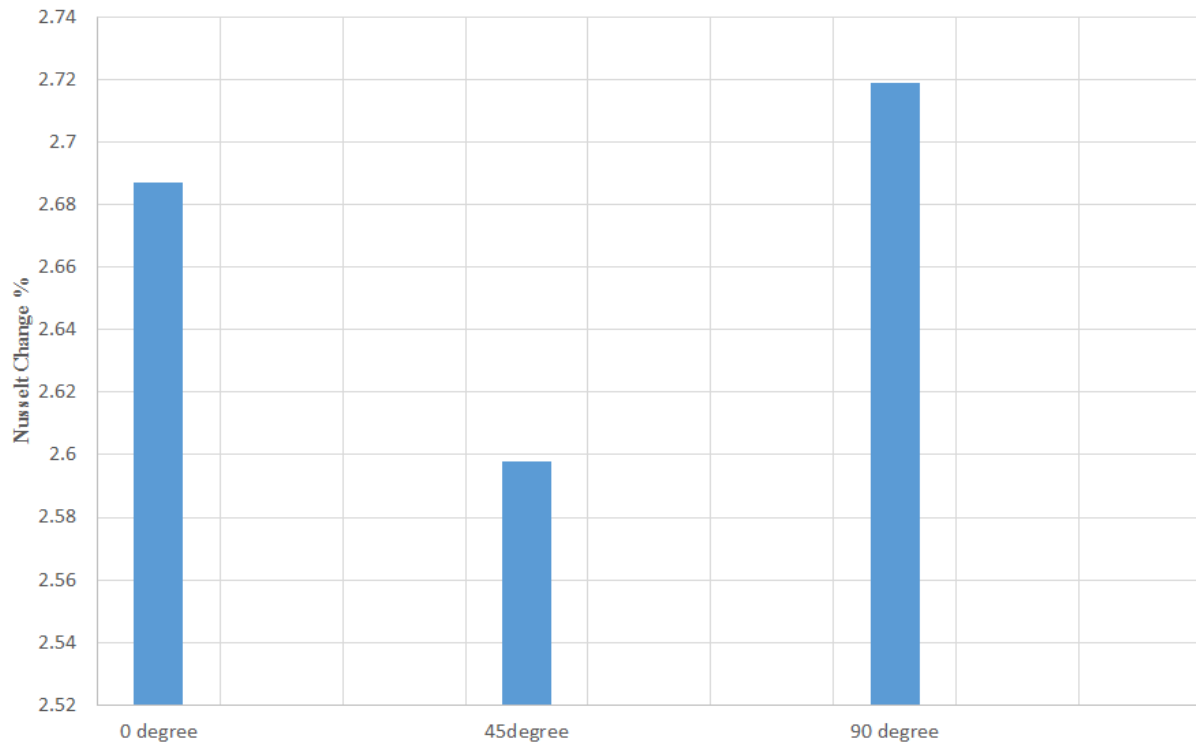
شکل ۲۰- عدد PEC کویل  $45^\circ$  با گام ۱۰cm در حضور میدان مغناطیسی ۱ تسلا

#### ۵-۷- بررسی تغییرات اثر میدان مغناطیسی با تغییر زاویه کویل

برای بررسی اثر تغییر زاویه کویل بر میزان اثر میدان مغناطیسی، درصد افزایش عدد ناسلت (که با حضور میدان مغناطیسی ایجاد شده است) محاسبه شده و در شکل (۲۱) نشان داده شده است. این شکل نشان می‌دهد که در هر سه زاویه کویل (صفر،  $45^\circ$  و  $90^\circ$  درجه) با افزایش عدد رینولدز، درصد افزایش عدد ناسلت کاهش یافته است. علت این امر همانگونه که در تحلیل لوله مارپیچ با زاویه  $45^\circ$  درجه مطرح گردید، تغییر شکل بیشتر پروفیل جریان آرام در اثر نیروی میدان می‌باشد. اما برای مقایسه میزان این تغییرات در زاویه‌های مختلف کویل، میانگین آنها به صورت مجزا برای سه زاویه مذکور محاسبه و در شکل (۲۲) ارائه شده است.



شکل ۲۱- تأثیر میدان مغناطیسی روی درصد افزایش عدد ناسلت با  $0.5\% \text{ TiO}_2$

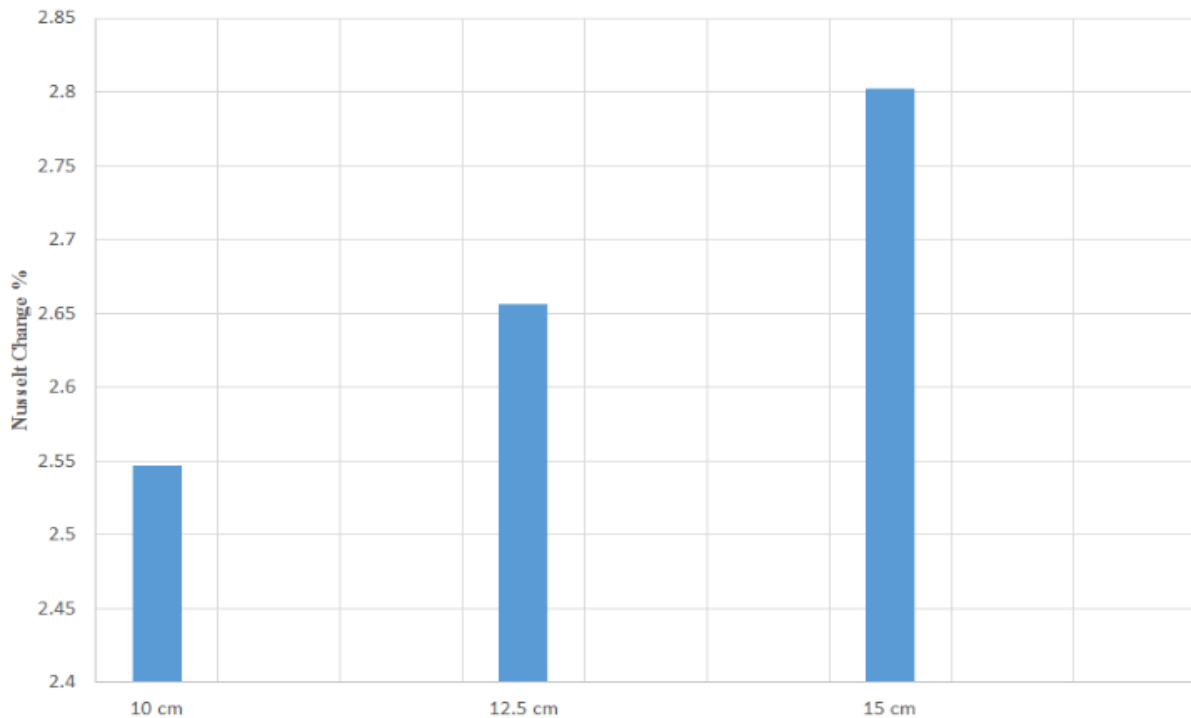


شکل ۲۲- تأثیر زاویه کویل روی درصد افزایش عدد ناسلت در حضور میدان ۱ تسلا

شکل (۲۲) نشان می‌دهد که بیشترین درصد تغییر برای حالت  $90^\circ$  بوده است که برابر  $2.718\%$  می‌باشد و حالت کویل  $45^\circ$  با مقدار  $2.598\%$  کمترین درصد تغییر را داشته است. دلیل اختلاف موجود بین مقادیر بدست آمده در ادامه این بخش مورد بررسی قرار گرفته است. با توجه به اینکه میدان مغناطیسی همواره در جهت محور دوران لوله مارپیچ در نظر گرفته شده است، بنابراین با چرخاندن کویل و تغییر زاویه آن، موقعیت میدان نسبت به کویل تغییری نخواهد کرد. بنابراین علت را باید در تغییرات بوجود آمده در شرایط جریان در اثر چرخش جستجو کرد. با توجه به اشکال (۱۰) و (۱۱) تغییر زاویه برای سیال آب خالص، باعث تغییر در عدد ناسلت شده و به ترتیب زاویه‌های  $45^\circ$ ،  $90^\circ$  و  $0^\circ$  درجه بیشترین تا کمترین مقدار ناسلت را داشتند. یعنی دقیقاً برعکس درصد تغییرات ناسلت در اثر اعمال میدان می‌باشد. به عبارتی در زاویه‌هایی که در آنها با سیال آب خالص مقدار کمتری برای عدد ناسلت بدست آمده بود در اینجا درصد رشد بیشتری را از خود برای عدد ناسلت نشان داده‌اند. می‌توان چنین تحلیل کرد که در جایی که عدد ناسلت کمتر می‌باشد و جریان‌های ثانویه و اغتشاشات سیال به نسبت کمتر شکل گرفته‌اند، اثرگذاری میدان مغناطیسی بیشتر شده و در حالتی که عدد ناسلت بالا است، بطور منطقی مقاومت بیشتری برای افزایش آن وجود دارد و اثر نیروی میدان روی آن کمتر است.

#### ۵-۸- بررسی تغییرات اثر میدان مغناطیسی با تغییر گام کویل

برای تحلیل بیشتر چگونگی اثر میدان بر آهنگ انتقال حرارت، درصد تغییرات عدد ناسلت برای گام‌های مختلف کویل محاسبه شده است. این نتایج که در شکل (۲۳) نشان داده شده است، رشد تغییرات عدد ناسلت در ازای افزایش گام را نشان می‌دهند.



شکل ۲۳- تأثیر گام کوپل روی درصد افزایش عدد ناسلت در حضور میدان ۱ تسلا

مطابق با شکل (۲۳) بیشترین مقدار در گام ۱۵ سانتی‌متر برابر ۲/۸٪ می‌باشد. این نتایج را نیز می‌توان همانند بخش قبلی تحلیل کرد و اینگونه بیان کرد که کمتر بودن عدد ناسلت و در پی آن کمتر بودن اغتشاشات داخل سیال باعث می‌شود نیروی میدان بتواند تأثیر بیشتری روی آن بگذارد. از طرف دیگر افزایش عدد هارتمن با افزایش گام نیز این پدیده را توجیه می‌کند و نشان می‌دهد که اندازه نیروی الکترومغناطیس به نیروی ویسکوزیته با افزایش گام بیشتر می‌شود و همین مسئله سبب بیشتر بودن درصد رشد عدد ناسلت، در گام‌های بزرگتر می‌باشد.

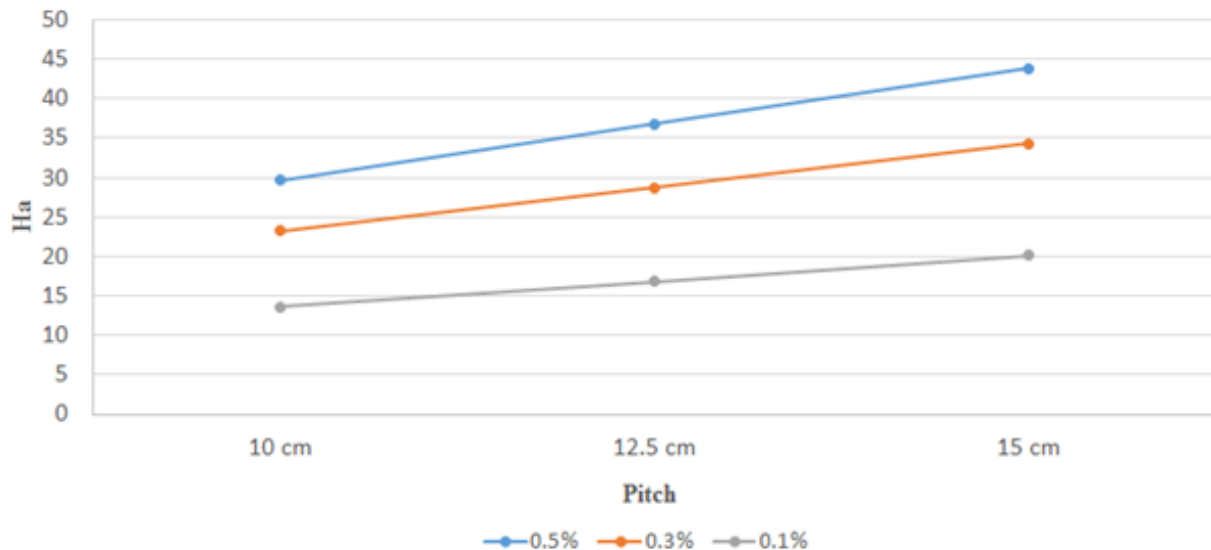
#### ۵-۹- بررسی عدد هارتمن<sup>۱</sup>

عدد هارتمن یک کمیت بدون بعد است که به صورت نسبت نیروی الکترومغناطیس به نیروی لزجت تعریف می‌شود. این کمیت که با نماد  $Ha$  نشان داده می‌شود، نخستین بار توسط هارتمن تعریف شد:

$$Ha = Bl \sqrt{\frac{\sigma}{\mu}} \quad (17)$$

در رابطه بالا  $B$  میدان مغناطیسی،  $l$  طول مشخصه،  $\sigma$  ضریب رسانایی الکتریکی سیال و  $\mu$  ویسکوزیته سیال می‌باشند. در شکل (۲۴) این عدد برای گام‌های مختلف کوپل و در غلظت‌های مختلف نانوذرات  $TiO_2$ ، ارائه شده است.

1-Hartmann Number

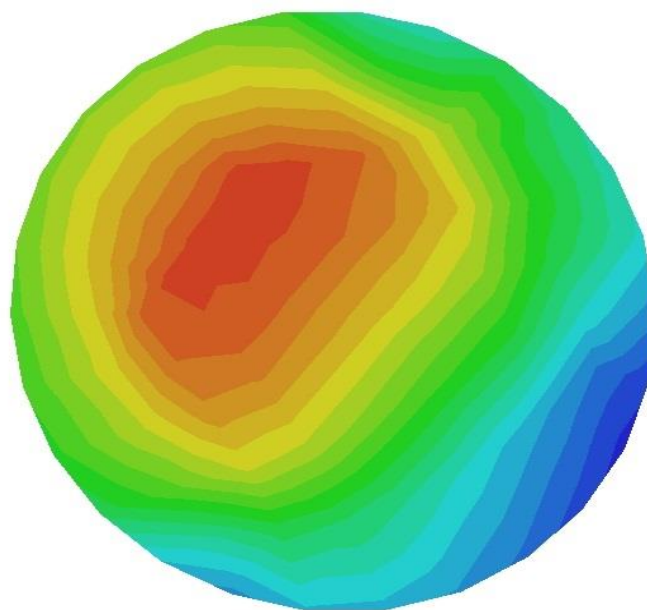
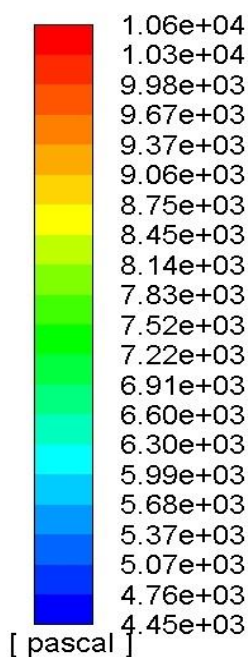


شکل ۲۴- بررسی تغییرات عدد هارتمن (Ha) با تغییرات گام و درصد نانو ذره

شکل (۲۴) نشان می‌دهد که مقدار عدد هارتمن با افزایش گام و غلظت نانوذرات، افزایش یافته و بیشترین مقدار آن ۴۳/۸۳ در گام ۱۵ سانتی‌متر و غلظت ۰/۵ درصد می‌باشد. بالا رفتن عدد هارتمن نشانگر بیشتر شدن سهم نیروی مغناطیسی در مقابل نیروهای لزجت بوده و به همین دلیل هم میدان مغناطیسی بر لوله با گام بزرگتر که عدد هارتمن بالاتری داشت، تأثیر بیشتری می‌گذارد.

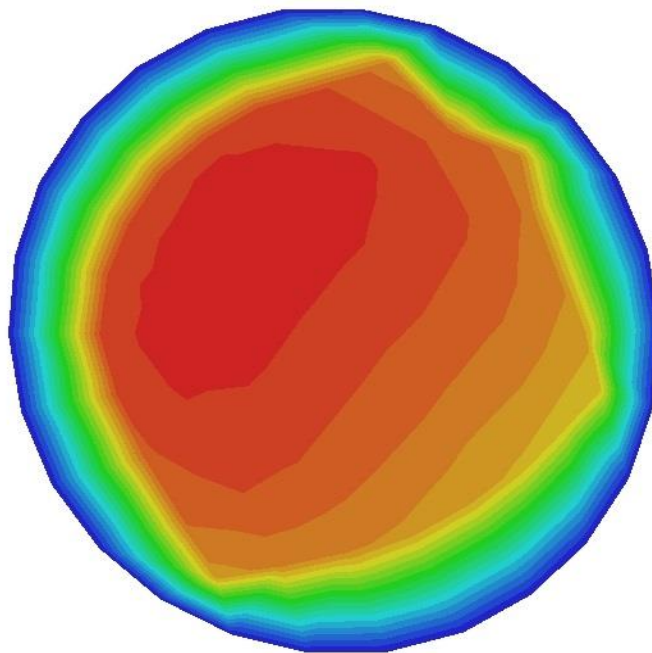
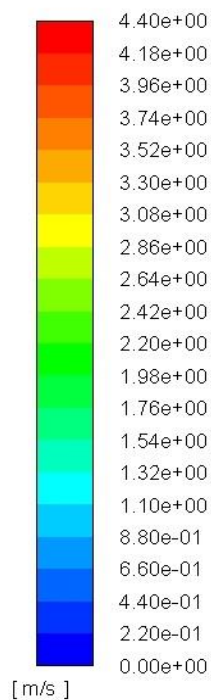
### ۵-۱۰- کانتورهای فشار، سرعت و دما

contour  
Dynamic Pressure (mixture)



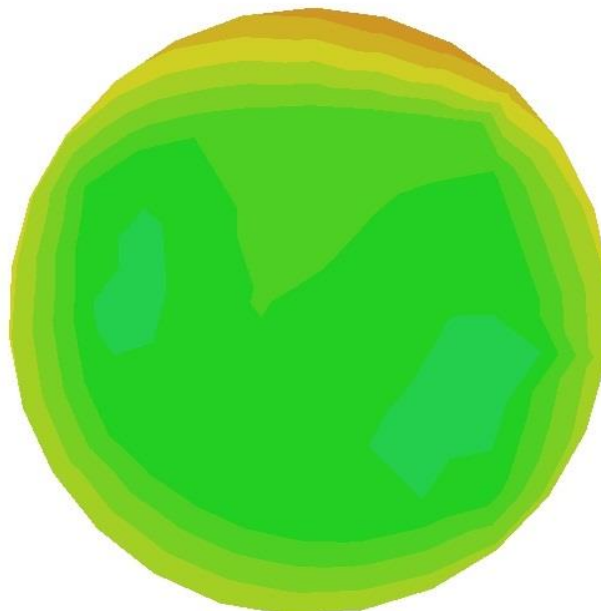
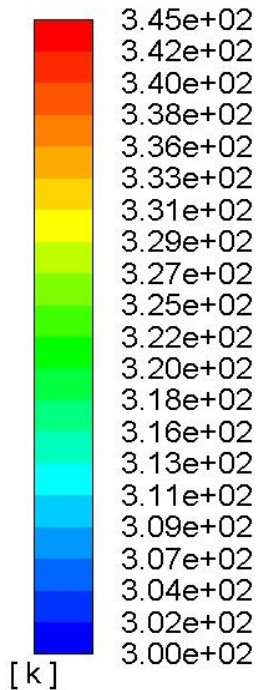
(الف) کانتورهای فشار دینامیکی

contour  
Velocity Magnitude (mixture)



(ب) کانتورهای سرعت

contour  
Static Temperature (mixture)



(ج) کانتورهای دمای استاتیکی

شکل ۲۵- کانتورهای (الف) فشار دینامیکی، (ب) سرعت و (ج) دمای استاتیکی در کوئل مورد نظر

در شکل (۲۵) کانتورهای فشار دینامیکی، سرعت و دمای استاتیکی در مقطع عمودی برش داده شده دقیقاً در وسط کوپل به فاصله ۱۱۰ سانتی‌متری (نصف ۲۲۰ سانتی‌متر) نشان داده شده است. با توجه به این کانتورها تغییرات فشار دینامیکی (الف)، سرعت (ب) و دمای استاتیکی (ج) از مرکز کوپل لوله‌ای تا دیواره آن دیده می‌شود.

## ۶- نتیجه‌گیری

در این تحقیق ابتدا تأثیر زاویه قرارگیری و اندازه گام لوله مارپیچ (کوپل) بر روی آهنگ انتقال حرارت از طریق دیواره لوله به سیال آب خالص عبوری از آن، مورد بررسی قرار گرفت. در طول تحقیق عدد ناسلت، معیار اصلی ارزیابی انتقال حرارت در کوپل مورد نظر بود. نتایج بدست آمده نشان دادند که کاهش گام باعث می‌شود که انتقال حرارت بهتر صورت پذیرد و بالا رفتن عدد ناسلت در ازای کاهش گام این مطلب را برای ما اثبات کرد. کوچکترین گام یعنی گام ۱۰ سانتی متر بالاترین عدد ناسلت را برای رینولدزهای مختلف نشان داد. در ادامه زاویه کوپل تغییر کرده و اثر آن روی آهنگ انتقال حرارت در سه موقعیت صفر، ۴۵ و ۹۰ درجه بررسی شد که نتایج حاصل نشان دادند که حالت ۴۵ درجه بهترین حالت برای انتقال حرارت در کوپل می‌باشد. حالت ۹۰ درجه نیز بدترین حالت بود و کوچکترین عدد ناسلت را بدست می‌داد. نتایج نشان داد عدد ناسلت مربوط به لوله مارپیچ با گام ۱۰ سانتی متر و زاویه ۴۵ درجه در رینولدز ۱۵۰۰۰ دارای بیشترین مقدار ۱۴۲/۵۷ می‌باشد. با اضافه شدن ذرات نانو  $TiO_2$  با درصدهای جرمی ۰/۱، ۰/۳ و ۰/۵ درصد به سیال اثرات نانوذرات بر آهنگ انتقال حرارت در حالات مختلف لوله مارپیچی بررسی شد. نتایج حاصل بیانگر این بود که افزودن نانوذرات انتقال حرارت را افزایش می‌دهد. نتایج عددی نشان داد که افزایش غلظت نانوذرات تا حدی نیز باعث بالا رفتن بیشتر عدد ناسلت می‌شود. با توجه به نتایج بدست آمده بیشترین عدد ناسلت برابر ۱۶۴/۵۳ می‌باشد که در حالت غلظت ۰/۵ درصد نانوذره برای کوپل با گام ۱۰ سانتی‌متر و زاویه ۴۵ درجه بدست آمده است. در نهایت عدد PEC برای کوپل ۴۵ درجه با گام ۱۰ سانتی‌متر بعنوان بهترین هندسه محاسبه گردید و طبق نتایج بدست آمده بالاترین عدد PEC برابر ۱/۱۱۵۴ و مربوط به غلظت ۰/۵ درصد و رینولدز ۱۵۰۰۰ می‌باشد.

با اعمال میدان مغناطیسی با شدت یک تسلا به ذرات نانو داخل سیال اثر آن روی عدد ناسلت بررسی گردید. نتایج نشان دادند عدد ناسلت با حضور میدان مغناطیسی افزایش پیدا می‌کند و در بیشترین مقدار خود به ۱۶۶/۶ می‌رسد. این عدد در حالت غلظت ۰/۵ درصد نانوذره و رینولدز ۱۵۰۰۰ کوپل با زاویه ۴۵ درجه و گام ۱۰ سانتی‌متر بدست آمد. در انتها عدد PEC برای غلظت‌های مختلف نانوسیال در کوپل ۴۵ درجه و با گام پیچ ۱۰ سانتی‌متر، محاسبه شد که بیشترین مقادیر این عدد در رینولدزهای مختلف برای غلظت ۰/۱ درصد بدست آمدند.

نتایج تأثیر تغییر گام و زاویه کوپل بر میزان اثر میدان مغناطیسی روی عدد ناسلت نشان می‌دهد که بالا رفتن اندازه گام کوپل باعث افزایش درصد رشد عدد ناسلت در اثر میدان مغناطیسی می‌شود. به عبارت ساده‌تر میدان مغناطیسی روی کوپل با گام بزرگتر تأثیر بیشتری می‌گذارد و طبق نتایج بیشترین مقدار آن در گام ۱۵ سانتی‌متر و برابر ۲/۸ درصد بود. همچنین زاویه ۹۰، صفر و ۴۵ درجه به ترتیب بیشترین تا کمترین درصد رشد عدد ناسلت، با حضور میدان یک تسلا را از خود نشان دادند که بیشترین درصد تغییرات برای حالت ۹۰ درجه و برابر ۲/۷۲٪ بود. در نهایت عدد هارتمن کوپل‌ها مورد بررسی قرار گرفت و بیشترین مقدار آن ۴۳/۸۳ بود که در گام ۱۵ سانتی‌متر و غلظت ۰/۵ درصد بدست آمد.

## مراجع

- [1] R. L. Webb, and N. H. Kim, "Principles of Enhanced Heat Transfer", Second Edition Taylor & Francis, New York, 2005, [https://www.routledge.com/Principles-of-Enhanced-Heat-Transfer/Webb-Kim-Webb/p/book/9781591690146?srsId=AfmBOorucqSiHgLYePBE-2BOX4Je51B6g4WOiLiXvW\\_N4WTIMtNpcLXZ](https://www.routledge.com/Principles-of-Enhanced-Heat-Transfer/Webb-Kim-Webb/p/book/9781591690146?srsId=AfmBOorucqSiHgLYePBE-2BOX4Je51B6g4WOiLiXvW_N4WTIMtNpcLXZ).
- [2] Y. Xuan, and Q. Li, "Heat Transfer Enhancement of Nanofluids", International Journal of Heat and Fluid Flow, Vol. 21, No. 1, pp. 58-64, 2000, [https://doi.org/10.1016/S0142-727X\(99\)00067-3](https://doi.org/10.1016/S0142-727X(99)00067-3).
- [3] W. Wang, Y. Zhang, K. S. Lee, and B. Li, "Optimal Design of a Double Pipe Heat Exchanger Based on the Outward Helically Corrugated Tube", International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 135, pp. 706-716, 2019, <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.01.115>.
- [4] M. Gabir, and D. Alkhafaji, "Comprehensive Review on Double Pipe Heat Exchanger Techniques", Journal of Physics, Vol. 1973, pp. 1-20, 2021, <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1973/1/012013>.
- [5] M. Goodarzi, and Q.V. Bach, "Turbulent Flows in a Spiral Double-pipe Heat Exchanger Optimal Performance Conditions using an Enhanced Genetic Algorithm", International Journal of Numerical Methods for Heat & Fluid Flow, Vol. 30, No. 1, pp. 39-53, 2020, <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1973/1/012013>.
- [6] F. Fadaei, M. Shahrokhi, and A. Molaei Dehkordi, "Heat Transfer Enhancement of  $Fe_3O_4$  Ferrofluids in the Presence of Magnetic Field", Journal of Magnetism and Magnetic Materials, Vol. 429, pp. 314-323, 2017, <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2017.01.046>.
- [7] S. Reddy Sheri, and T. Thumma, "Numerical Study of Heat Transfer Enhancement in MHD Free Convection Flow over Vertical Plate Utilizing Nanofluids", Ain Shams Engineering Journal, Vol. 9, pp. 1169-1180, 2018, <https://doi.org/10.1016/j.asej.2016.06.015>.
- [8] K. Wisam Hussam, H. A. Ahmad Hamid, Y. Zhi Ng, and J. S. Gregory, "Effect of Vortex Promoter Shape on Heat Transfer in MHD Duct Flow with Axial Magnetic Field", International Journal of Thermal Sciences, Vol. 134, pp. 453-464, 2018, <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2018.06.012>.
- [9] A. Asadi, A. Hossein Nezhad, F. Sarhaddi, and T. Keykha, "Laminar Ferrofluid Heat Transfer in Presence of Non-uniform Magnetic Field in a Channel with Sinusoidal Wall", Journal of Magnetism and Magnetic Materials, Vol. 471, pp. 56-63, 2019, <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2018.09.045>.
- [10] X. Zhai, C. Qi, Y. Pan, T. Luo, and L. Liang, "Effects of Screw Pitches and Rotation Angles on Flow and Heat Transfer Characteristics of Nanofluids in Spiral Tubes", International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 130, pp. 989-1003, 2019, <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.10.131>.
- [11] R. Bhadouriya, A. Agrawal, and S. Prabhu, "Experimental and Numerical Study of Fluid Flow and Heat Transfer in an Annulus of Inner Twisted Square Duct and Outer Circular Pipe",

International Journal of Thermal Sciences, Vol. 94, pp. 96–109, (2015), <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2015.02.019>.

[12] X. Tang, X. Dai, and D. Zhu, "Experimental and Numerical Investigation of Convective Heat Transfer and Fluid Flow in Twisted Spiral Tube", International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 90, pp. 523–541, 2015, <https://doi.org/10.1016/J.IJHEATMASSTRANSFER.2015.06.068>.

[13] W. Wang, Y. Zhang, B. Li, H. Han, and X. Gao, "Influence of Geometrical Parameters on Turbulent Flow and Heat Transfer Characteristics in Outward Helically Corrugated Tubes", Energy Conversion and Management, Vol. 136, pp. 294–306, 2017, <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.01.029>.

[14] W. Wang, Y. Zhang, B. Li, and Y. Li, "Numerical Investigation of Tube-side Fully Developed Turbulent Flow and Heat Transfer in Outward Corrugated Tubes", International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 116 pp. 115–126, 2018, <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2017.09.003>.

[15] C. Qi, Y.L. Wan, C.Y. Li, D.T. Han, and Z.H. Rao, "Experimental and Numerical Research on the Flow and Heat Transfer Characteristics of TiO<sub>2</sub>-water Nanofluids in a Corrugated Tube", International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 115, pp. 1072–1084, 2017, <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2017.08.098>.

[16] A. Alamgholilou (A. Alami nia) and E. Esmailzadeh, "Experimental Investigation on Hydrodynamics and Heat Transfer of Fluid Flow into Channel for Cooling of Rectangular Ribs by Passive and EHD Active Enhancement Methods," Experimental Thermal and Fluid Science, Vol. 38, pp. 61-73, 2012, <https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2011.11.008>.

[17] A. Alami nia and A. Campo, "Experimental Study on EHD Heat Transfer Enhancement from Flush-mounted Ribbons with Different Arrangements of Wire Electrodes in a Channel," Heat and Mass Transfer, Vol. 52, pp. 2823-2831, 2016, <https://doi.org/10.1007/s00231-016-1786-5>.

[18] A. Alami nia, "Experimental Investigation on Effects of Trapezoidal Ribs on Heat Transfer Enhancement with Electrohydrodynamics Active Method into Duct," AUT Journal of Mechanical Engineering, Vol. 4, No. 4, pp. 493-504, 2020, <https://doi.org/10.22060/AJME.2020.16725.5840>.

[19] Fluent, "Ansys Fluent Theory Guide", ANSYS Inc, USA 15317, pp. 724–746, 2011, <https://pdfcoffee.com/ansys-fluent-140-theory-guide-pdf-free.html>.

[20] D. Choudhury, "Introduction to the Renormalization Group Method and Turbulence Modelling", Fluent Incorporated, 1993, <https://www.cfd-online.com/Forums/fluent/50455-d-choudhury-introduction-renormalization.html>.

[21] M. Sheikholeslami, and K. Vajravelu, "Nanofluid Flow and Heat Transfer in a Cavity with Variable Magnetic Field, Applied Mathematics and Computation", Vol. 298, pp. 272-282, 2017, <https://doi.org/10.1016/j.amc.2016.11.025>.

[22] J. Choi, and Y. Zhang, "Numerical Simulation of Laminar Forced Convection Heat Transfer of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-water nanofluid in a Pipe with Return Bend", International Journal of Thermal Sciences, Vol. 55, pp. 90-102, 2012, <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2011.12.017>.

[23] F.S. Lien, and M.A. Leschziner, "Assessment of Turbulence-transport Models Including Non-linear RNJ Eddy-viscosity Formulation and Second-moment Closure for Flow over a Backward-facing Step", Computers & Fluids, Vol. 23, pp. 983– 1004, 1994, [https://doi.org/10.1016/0045-7930\(94\)90001-9](https://doi.org/10.1016/0045-7930(94)90001-9).

[24] M.M. Gibson, and B. Launder, "Ground Effects on Pressure Fluctuations in the Atmospheric Boundary Layer", Journal of Fluid Mechanics, Vol. 86, pp. 491–511, 1978, <https://doi.org/10.1017/S0022112078001251>.

### فهرست نمادهای انگلیسی

B, B <sub>0</sub>	میدان مغناطیسی (Tesla)
C <sub>p</sub>	ظرفیت حرارتی ویژه در فشار ثابت (J/kgK)
D, d	قطر (mm)
D	ضریب انتقال حرارت جابجایی (W/m <sup>2</sup> K)
Ha	عدد هارتمن
I	شدت توبولانس (%)
k	ضریب رسانایی حرارتی (W/mK)
l	طول مشخصه (mm)
$\dot{m}$	دبی جرمی (kg/s)
Nu	عدد ناسلت
P	فشار (Pa)
PEC	معیار ارزیابی عملکرد یا ضریب عملکرد
Pr	عدد پرانتل
q'	شار حرارتی متوسط (W/m <sup>2</sup> )
Re	عدد رینولدز
T	دما (K)
V	سرعت (m/s)
x	جهت، موقعیت

### نمادهای یونانی

$\rho$	چگالی ( $\text{kg/m}^3$ )
$\mu$	لزجت دینامیکی (Pa.s)
$\sigma$	ضریب رسانایی الکتریکی (S/m)
$\varphi$	درصد حجمی (%)
$\varepsilon$	اتلاف لزجت

### زیرنویس‌ها

bulk	مربوط به دمای حجمی
i, j, k	جهات سیستم مختصاتی
lam	جریان آرام
nf	نانوسیال
s	لوله صاف
t	جریان آشفته
w	دیواره
$\infty$	سیال

## Numerical Simulation on the Effect of Magnetic Field Changes, Screw Pitch and Angle of the Spiral Tube on Heat Transfer Enhancement

\*Corresponding author: **Amin Alami nia**

Assistant Professor, Department of Mechanical Engineering, Azarbaijan Shahid Madani University,  
Tabriz, 53751-71379, Iran  
[amin.alam@azaruniv.ac.ir](mailto:amin.alam@azaruniv.ac.ir)

**Mehdi Malekizadeh**

MS.c., Department of Mechanical Engineering, Azarbaijan Shahid Madani University,  
Tabriz, 53751-71379, Iran  
[m.malekizade@gmail.com](mailto:m.malekizade@gmail.com)

### Abstract

In the present study, the effect of the angle and pitch of the spiral pipe on the rate of heat transfer through the wall of the pipe to the fluid passing through it in quiet, transition and turbulent flows has been studied. Next the changes in Nusselt number due to the addition of nanoparticles  $\text{TiO}_2$  were investigated. Finally, the effect of applying a magnetic field with an intensity of 1 Tesla on the rate of heat transfer in different situations has been investigated. To do this, the spiral tube is considered in three different pitches of 10, 12.5 and 15 cm and three angles of 0, 45 and 90 degrees. According to the results, the Nusselt number increases with decreasing pitch and in different Reynolds, the Nusselt number reaches its highest value in 10 cm pitch. This number also changes with changing angle and has the highest and lowest values at 45° and 90° angles, respectively. Then  $\text{TiO}_2$  nanoparticles with mass percentages of 0.1%, 0.3% and 0.5% were added to the fluid, which increased the Nusselt number.

It was observed that increasing the concentration of nanoparticles causes a higher Nusselt number. This number reaches its highest value in the coil with a pitch of 10 cm, angle of 45 degrees, Reynolds 15000 and in a concentration of 0.5%  $\text{TiO}_2$ , and for this case the PEC number was calculated to be 1.1154. Next, a magnetic field with an intensity of one Tesla was applied in the direction of the main axis of the coil and it was observed that the Nusselt number increased and in a pitch of 10 cm, an angle of 45 degrees, Reynolds 15000 and a concentration of 0.5%  $\text{TiO}_2$  reaches its maximum value of 166.6. Finally, Hartmann number was calculated for the spiral tube, the maximum value of which was obtained in pitch of 15 cm and a concentration of 0.5%  $\text{TiO}_2$  and was equal to 43.83.

*Keywords:* Heat transfer, Spiral tube, Magnetic field, Numerical simulation, Screw pitch, Screw angle