

# تحلیل دینامیک سیالات محاسباتی در مبدل‌های حرارتی با لوله‌های تابدار (پیچشی)

محمدرضا جعفری نصر<sup>۱\*</sup>، مهتاب شفیقی<sup>۲</sup>

۱- استاد مهندسی شیمی، گروه مهندسی شیمی، دانشکده نفت و مهندسی شیمی، واحد علوم و تحقیقات دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

۲- کارشناسی ارشد مهندسی شیمی، گروه مهندسی شیمی، دانشکده نفت و مهندسی شیمی،

واحد علوم و تحقیقات دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۹۶/۱۲/۱۴ تاریخ پذیرش: ۹۷/۱۱/۰۷

پیام‌نگار: drnasr50@yahoo.ca

## چکیده

یکی از شیوه‌های مؤثر برای افزایش انتقال حرارت بین دو سیال سرد و گرم، کاربرد لوله‌های تابدار (پیچشی) بجای طراحی مبدل با لوله‌های معمولی است. در این مقاله، با بررسی نتایج مطالعات پیشین، تأثیر پارامترهایی چون نسبت قطرهای مقطع بیضی شکل و طول گام لوله در بازه رینولدز ۱۰۰۰ تا ۱۵۰۰۰ با بهره‌گیری از دینامیک سیالات محاسباتی بررسی شد. نسبت قطرهای مقطع ۱ الی ۲/۵ و تعداد پیچش برای طول لوله ثابت بین ۰ الی ۳ در بازه رینولدز مشخص شده تحلیل شده است. بر این اساس، افزایش عدد رینولدز، افزایش نسبت قطر مقطع و نیز افزایش تعداد پیچش به افزایش عدد ناسلت می‌انجامد و متقابلاً افت فشار را نیز افزایش می‌دهد. در این مقاله، با انجام موردپژوهی، نسبت قطرهای مقطع بیضی ۱/۶۷ و نیز تعداد پیچش ۳ (۰/۶ متر)، به بهترین عملکرد همراه با مقادیر بهینه افت فشار و عدد ناسلت دست یافته است.

**کلیدواژه‌ها:** مبدل‌های حرارتی، لوله پیچشی، دینامیک سیالات محاسباتی، افت فشار، ضریب انتقال حرارت.

## ۱. مقدمه

افزایش عملکرد حرارتی مبدل، کاهش رسوب گذاری در هر دو طرف لوله و پوسته و نیز بهبود صرفه اقتصادی و بالا بردن طول عمر آن است. با توجه به کار کرد پیوسته اکثر واحدهای صنعتی و نیز دشواری‌های پیش رو در زمینه انجام تغییرات در ادوات فرایندی، افزایش کاربرد این نوع مبدل‌ها به انجام مدل‌سازی‌های دقیق و اقتصادی، برای تحلیل عملکرد این نوع مبدل‌ها، قبل از نصب موکول می‌شود. به دلیل ضعف روش‌های حل تحلیلی در مدل‌سازی این مسائل، بهترین روش بهره‌گیری از مدل‌سازی دینامیک

مبدل‌های حرارتی یکی از مهم‌ترین تجهیزات در صنایع مختلف به‌شمار می‌آیند. تاکنون تحقیقات زیادی در زمینه راه‌های افزایش بازدهی این تجهیزات انجام شده است. نسل جدیدی از این مبدل‌ها به بازار صنعتی وارد شده‌اند که متأسفانه بخش کارایی آنها برای مهندسان چندان روشن نیست. کاربرد لوله‌های پیچشی در ساخت مبدل‌های حرارتی از جدیدترین روش‌های به‌کار گرفته برای

\* تهران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم تحقیقات، دانشکده نفت و مهندسی شیمی، گروه مهندسی شیمی

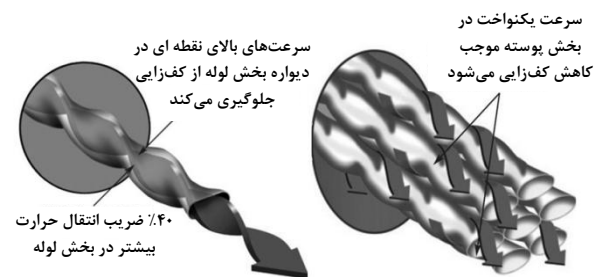
در سال ۲۰۱۳، وانديتا و همکاران<sup>۴</sup> بر کاربرد لوله‌های پیچشی در مبدل‌های با چند گذر لوله تحقیق کردند. آنان کارهای آزمایشگاهی و مدل‌سازی عددی روی مبدل لوله پیچشی با چهار گذر لوله انجام دادند و نتایج را با مبدل صفحه‌ای مقایسه کردند. نتایج کار آنان نشان داد که در جریان‌هایی با رینولدز پایین، عملکرد مبدل‌های صفحه‌ای بهتر از مبدل‌های لوله پیچشی است و در اعداد رینولدز بالا عملکرد مبدل‌های لوله پیچشی بالاتر خواهد بود [۷]. در سال ۲۰۱۵ تاوکار و همکاران<sup>۵</sup> به مدل‌سازی CFD و مطالعه تجربی مبدل لوله پیچشی چند گذر برای بررسی ضریب کلی انتقال حرارت و نیز ضریب اصطکاک در این نوع مبدل‌ها پرداختند. آنان پی بردند که در شدت جریان‌های پایین، اغتشاش در لوله‌های پیچشی بیشتر است و علاوه بر آن به دلیل حرکت چرخشی سیال، تحت تأثیر هندسه لوله‌های تابدار، توزیع سرعت‌های مناسبی برقرار می‌شود. این امر به ایجاد هم‌افزایی مناسب بین توزیع دما و سرعت می‌انجامد و در نتیجه به افزایش انتقال حرارت منجر خواهد شد [۸].

یانگ<sup>۶</sup> و همکاران در سال ۲۰۱۱ مطالعه‌ای تجربی روی عملکرد لوله‌های پیچشی با مقطع بیضوی انجام دادند. اثر تغییرات در نسبت ابعاد<sup>۷</sup> و مقدار پیچش<sup>۸</sup> بر عملکرد سیستم بررسی شد که در نتیجه افزایش نسبت ابعادی و کاهش مقدار پیچش به افت فشار بیشتر و در عین حال انتقال حرارت بالاتر، بخصوص در رینولدزهای پایین منجر می‌شود. نیز ملاحظه کردند که افزایش طول گردابه بهبود زاویه هم‌افزایی بین بردار سرعت و گرادیان دما را در پی دارد و در نتیجه عملکرد حرارتی سیستم بهبود می‌یابد. آنان به این هم پی بردند که عدد ناسلت و عوامل اصطکاک را می‌توان به صورت یک معادله واحد بیان کرد که تمامی دامنه‌های عدد رینولدز را دربر گیرد [۹].

ال-عباسی<sup>۹</sup> در سال ۲۰۱۴ به منظور شبیه‌سازی لوله‌های حرارتی دایروی و آشفته سازهای داخلی از نرم افزار ICEM برای تهیه هندسه و شبکه‌بندی، و نیز از نرم افزار فلوئنت به منظور شبیه‌سازی در رینولدزهای بالا سود جست [۱۰]. در مقاله‌ای دیگر، در سال

سیالات محاسباتی<sup>۱</sup> است. به کمک این مدل‌سازی، رفتار دقیق جریان سیال پیش‌بینی و کلیه اصلاحات مربوط به طراحی، قبل از نصب این ادوات، انجام خواهد بود [۳-۱].

بر کاربردترین مبدل‌های حرارتی در صنایع مختلف، مبدل حرارتی پوسته-لوله‌ای است که علیرغم کاربرد گسترده، دارای مشکلات عملیاتی و تعمیر و نگهداری فراوانی است. در سال‌های اخیر، برای رفع این مشکلات از مبدل‌های لوله تابیده بهره می‌گیرند. با استفاده از این لوله‌ها دیگر به بافل نیاز نیست و لرزش لوله‌ها کمتر می‌شود. از سوی دیگر، شکل بیضوی لوله‌ها تماس آنها به یکدیگر را فراهم می‌آورد و می‌توان به جای حایل، از خود آنها استفاده کرد؛ این امر موجب حذف نیاز به نصب بافل‌ها خواهد شد. در شکل (۱)، لوله پیچشی و نیز آرایش دسته لوله پیچشی را مشاهده می‌کنید. کاهش میزان رسوب‌گذاری، افت فشار کمتر و بازده تبادل حرارتی بالاتر از این نوع مبدل‌ها از مزایای قطعی آنها به‌شمار می‌رود [۴ و ۵].



شکل ۱. نحوه عبور جریان بر روی و داخل لوله‌های پیچشی.

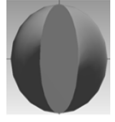
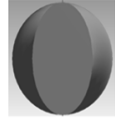
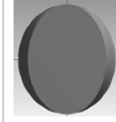
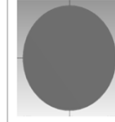
مطالعات گسترده‌ای در زمینه مبدل‌های پیچشی صورت گرفته که در ادامه به برخی نتایج آنها خواهیم پرداخت. تن و همکاران<sup>۲</sup> در سال ۲۰۱۲ به تأثیر پارامترهای هندسی بر عملکرد مبدل‌های لوله پیچشی بیضوی پرداختند. نتایج کار آنان نشان داد که ضریب انتقال حرارت و ضریب اصطکاک هر دو با افزایش نسبت محوری (a/b) افزایش می‌یابد در حالی که با افزایش طول گام پیچش، این ضرائب کاهش پیدا می‌کنند. آنان، همچنین بیان کردند که درون لوله‌های پیچشی یک جریان ثانویه<sup>۳</sup> شکل می‌گیرد. جریانی که برای نسبت‌های بالای محوری (a/b) به شکل چرخشی و برای نسبت پایین محوری به صورت بالا-پایین است [۶].

4. Vandita et al.  
5. Thawkar et al.  
6. Yang et al.  
7. Aspect Ratio  
8. Twist Pitch  
9. Al - Abbasi et al.





1. Computational Fluid Dynamics (CFD)  
2. Tan et al.  
3. Secondary Flow

نسبت قطرهای بیضی‌های مقطع، در بازه ۲/۵ الی ۱ و نیز تعداد پیچش لوله در طول مشخص، در بازه صفر الی ۳ قرار می‌گیرد. این مقادیر را در جدول (۱) و (۲) درج کرده‌ایم.

جدول ۱. مقادیر متغیر اصلی در نسبت قطرهای مقطع لوله.

$\alpha=A/B$				Re
۲/۵	۱/۶۷	۱/۲۵	۱	۱۰۰۰
				۵۰۰۰
				۱۰۰۰۰
				۱۲۰۰۰
				۱۵۰۰۰

جدول ۲. مقادیر متغیر اصلی در تعداد پیچش لوله.

$\lambda=L/S$				Re
۳	۲	۱	۰	۱۰۰۰
				۵۰۰۰
				۱۰۰۰۰
				۱۲۰۰۰
				۱۵۰۰۰

به طور کلی، به دلیل فقدان راه‌حل تحلیلی معادله ناویر استوکس، مجموعه معادلات جزئی پدیده‌های انتقال مختلف به کمک روش‌های عددی حل می‌شوند. متداول‌ترین روش حل عددی موجود، بهره‌گیری از مدل حجم محدود است که در آن از جمله‌های مشتق جزئی، روی حجم عنصر انتگرال‌گیری و با این گسسته‌سازی، دستگاه معادلات دیفرانسیل پاره‌ای به دستگاه معادلات خطی تبدیل و سپس به کمک روش‌های حل دستگاه معادلات خطی حل می‌شود. اقدام عمده این مدل بهره‌گیری از انتگرال‌گیری روی معادلات بقاست، به نحوی که مشتقات حذف و معادله به شکل ساده‌تری حاصل شود. انتگرال‌گیری روی حجم عنصر صورت می‌گیرد.

۲۰۱۳ به قلم تانتارات و زودپه<sup>۱</sup>، به مطالعه تجربی و شبیه‌سازی لوله‌های پیچشی و مقایسه عملکرد آن‌ها با لوله‌های ساده پرداخته شده است. مورد پژوهی یک لوله چهار گذر ساده و پیچشی با طول ۰/۳ متر و جریان‌های ۰/۱، ۵/۱، ۳۷/۵ و ۰/۲۴ لیتر در دقیقه انجام شده است که بازه رینولدز ۶۲۵ تا ۷۰۰۰ را بررسی می‌کند. نتایج این مقاله، علاوه بر تحلیل‌های تجربی، به صورت شبیه‌سازی نیز به کمک نرم افزارهای کتیا<sup>۲</sup>، نرم افزار آیسیم و در نهایت فلوئنت بررسی شده است [۷]. در مطالعه سال ۲۰۱۶ کیم و همکاران<sup>۳</sup>، به مدل‌سازی عددی یک شاخه لوله پیچشی در نسبت قطر و طول پیچ‌های مختلف پرداختند. این مجموعه با به‌کارگیری مدل k-ε و نیز معادلات RANS توانستند توزیع سرعت‌ها و تغییرات دمایی را مدل‌سازی کنند. سرانجام، مقادیر ضریب اصطکاک و عدد ناسلت در مقادیر محدود عدد رینولدز تعیین شده است. این مقاله به کمک مجموعه انسیس فلوئنت ۱۴ صورت گرفته و با نتایج یانگ و همکاران<sup>۴</sup> (که در سال ۲۰۱۱ صورت گرفته) مقایسه شده است [۱۱].

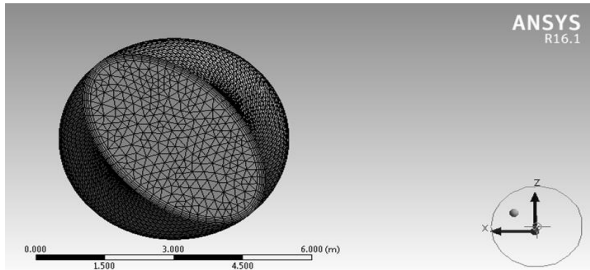
با در نظر گرفتن مطالعات پیشین، در این مقاله، بررسی انتقال حرارت در لوله‌های پیچشی ناشی از تغییر گام پیچش و سطح مقطع لوله (با بازه تغییرات بزرگتر) به کمک دینامیک سیالات محاسباتی در بازه بزرگتر تغییرات عدد رینولدز هدف قرار گرفته و مقادیر بهینه پارامترهای مشخص شده در این بازه تعیین می‌شود. برای تشخیص عملکرد لوله پیچشی، دو پارامتر هدف عدد ناسلت و ضریب اصطکاک لوله به عنوان تعیین کننده ترین شاخصه لوله بررسی می‌شود.

## ۲. شبیه‌سازی و حل مسئله

از مطالعه کیم و همکاران برای شبیه‌سازی یک شاخه لوله پیچشی بهره گرفته و صحت سنجی شبیه‌سازی بر اساس این مطالعه انجام یافته است. پس از تعیین پارامترهای مورد نیاز به منظور صحت‌سنجی، پارامترهای اصلی این مقاله تعیین می‌شود. برای بررسی کامل‌تر مسئله، از بازه عدد رینولدز ۱۰۰۰ تا ۱۵۰۰۰ برای کلیه مطالعات استفاده شده است. دو پارامتر متغیر اصلی مسئله

1. Thantharate and Zodpe
2. CATIA
3. Kim et al.
4. Yang et al.

شبکه از نوع شش ضلعی و ساختاری معمولی در دامنه محاسباتی با تعداد نقاط شبکه در محدوده ۲ میلیون تولید شده است و به منظور بررسی دقیق دیواره‌ها، از شبکه‌های لایه مرزی بهره برده شده است.



شکل ۲. شبکه تولیدی و شبکه بندی دیواره‌ها.

### ۳. نتایج شبیه‌سازی

به منظور صحت سنجی شبیه‌سازی، با در نظر گرفتن شرایط مرزی مشابه مقاله کیم و همکاران، شبیه‌سازی اولیه صورت گرفته و نتایج در جدول (۴) درج شده است. نتایج شبیه‌سازی، با نتایج مطالعات پیشین اختلاف ناچیزی را نشان می‌دهد. نتایج حاصل، نسبت به شبیه‌سازی کیم و همکاران نسبت به داده‌های تجربی یانگ و همکاران دقت بیشتری را نشان می‌دهد. بر این اساس، شبیه‌سازی در بازه بزرگتر رینولدز و نیز تغییرات بیشتر هندسه مقطع صورت می‌گیرد.

جدول ۴. صحت سنجی شبیه‌سازی با نتایج مطالعات گذشته [۱۱].

عدد ناسلت (Nu)			عامل اصطکاک (f)			Re
یانگ و همکاران	کیم و همکاران	این مقاله	یانگ و همکاران	کیم و همکاران	این مقاله	
۱۳/۴۰۵	۱۲/۱۶۱	۱۲/۱	۰/۳۰۸۴	۰/۱۸۱۹	۰/۱۸	۱۰۰
۱۷/۵۵۱	۱۷/۰۳۶	۱۷/۵	۰/۱۱۳۲	۰/۰۹۹۴	۰/۱۰	۵۰۰۰
۳۰/۴۷۸	۳۰/۴۷۸	۳۲/۵	۰/۰۷۷۱	۰/۰۷۰۵	۰/۰۷	۱۰۰۰۰

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\phi) + \text{div}(\rho\vec{V}\phi) = \text{div}(\Gamma\overline{\text{grad}}\phi) + S \quad (1)$$

$$\int_{CV} \frac{\partial}{\partial t}(\rho\phi)dV + \int_{CV} \text{div}(\rho\vec{V}\phi)dV = \int_{CV} \text{div}(\Gamma\overline{\text{grad}}\phi)dV + \int_{CV} SdV \quad (2)$$

دستگاه معادلات دیفرانسیل پاره‌ای پدیده‌ها در حالی که حرکت جریان آرام باشد، دارای درجه آزادی صفر است و به صورت عددی قابل حل خواهد بود. اگر در معادلات ناویر استوکس، عبارت گردابه و جریان آشفته نیز وارد شود، حل دستگاه معادله با مشکل روبرو خواهد شد. علت این امر، ایجاد دو متغیر جدید در مجموعه معادلات است که به تشکیل دو معادله جدید نیاز می‌شود. پس از بررسی‌های گسترده توسط دانشمندان مختلف، مدل‌هایی برای مدل‌سازی جریان آشفته ارائه شده است. معادلات انرژی جنبشی و نیز معادلات k-ε و k-ω از معروف‌ترین مدل‌های موجود به‌شمار می‌آیند. در این شبیه‌سازی، طیف عدد رینولدز در بازه آرام و آشفته قرار دارد که معادلات k-ε برای جریان آشفته به کار می‌رود. همچنین، از مدل‌های گسسته‌سازی درجه دو بالادست، دستگاه جوابها بر پایه فشار به‌صورت سه بعدی و پایا به‌کار رفته و معادله انرژی نیز فعال می‌شود. پارامترهای به‌کار رفته در شبیه‌سازی در جدول (۳) درج شده است.

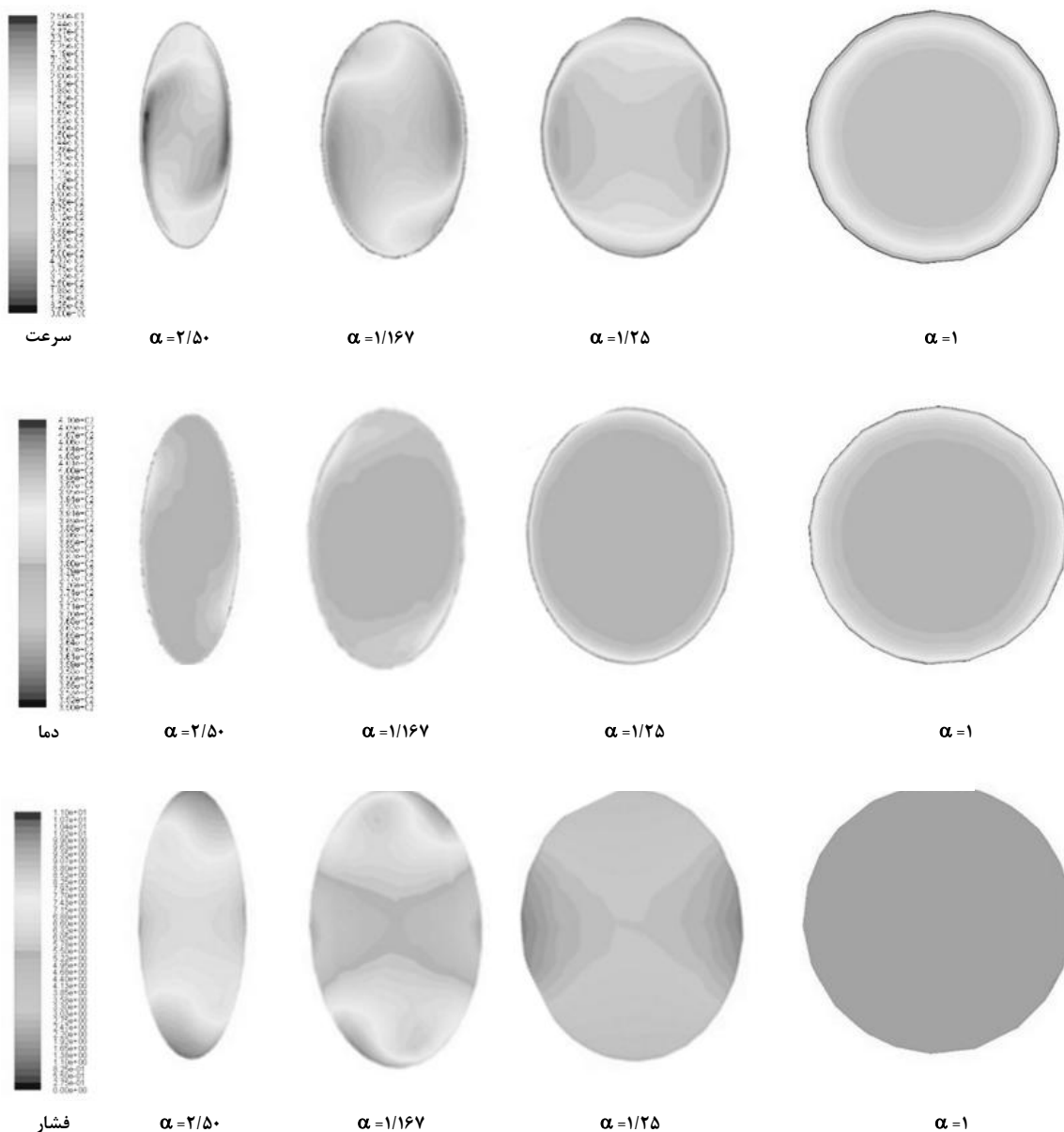
جدول ۳. پارامترهای به‌کار رفته در شبیه‌سازی.

پارامتر	یکا	مقدار
سیال انتقال حرارت		آب (H <sub>2</sub> O liq)
طول لوله پایه	Cm	۱۸۰
دمای سیال ورودی	K	۴۰۰
دمای سیال بیرون لوله	K	۳۰۰
قطر لوله پایه	Cm	۵
بزرگترین ابعاد شبکه تولیدی	m	۰/۰۰۰۵

به منظور حصول اطمینان از مؤثر نبودن ابعاد شبکه در نتایج شبیه‌سازی، از شبیه‌سازی با نصف کردن کل شبکه و مقایسه نتایج بهره بردیم که اختلاف بسیار ناچیزی با حالت قبل مشاهده شد. شبکه مورد بررسی در این مقاله مطابق شکل (۲) است. ساختار

تعداد پیچش لوله مطالعه شد. نتایج مقایسه را در شکل‌های (۲) و (۳) مشاهده می‌کنید.

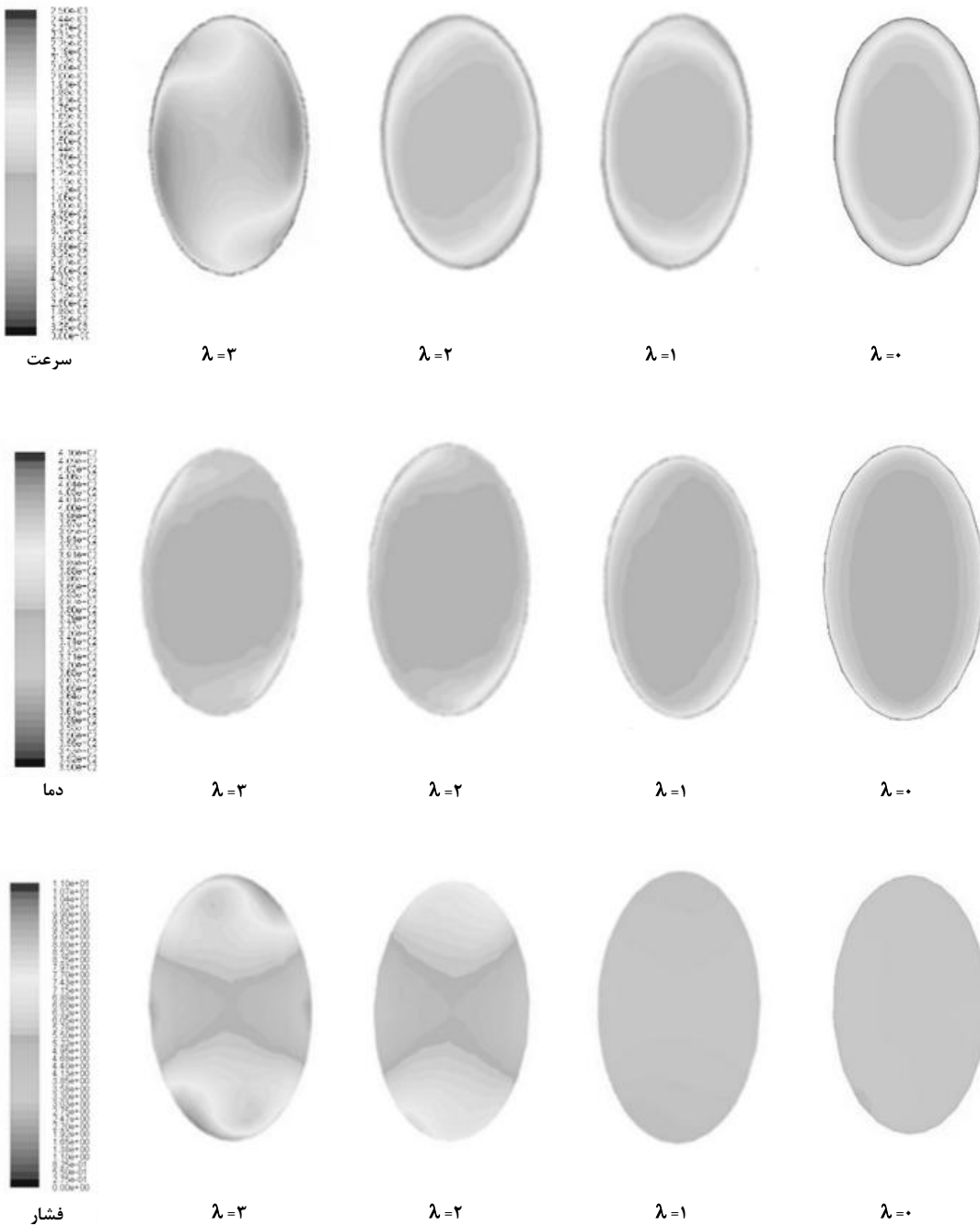
بر اساس پارامترهای مشخص شده و نیز مورد پژوهی، شبیه‌سازی لوله پیچشی در شرایط مختلف بررسی شد. ابتدا در تعداد پیچش مشخص، سطح مقطع‌های مختلف بررسی و سپس در مقطع بهینه،



شکل ۳. مقایسه هندسه با نسبت قطرهای ۱/۲۵، ۱/۶۷ و ۲/۵ در پربندهای سرعت، دما و فشار در عدد رینولدز ۱۵۰۰ و  $\lambda=3$ .

سیال در تمام توزیع پارامترهای ترمودینامیکی مورد مطالعه مشاهده می‌شود. سیال عبوری، مسیری چرخشی مشابه هندسه لوله را طی می‌کند و موجب افزایش سرعت و متقابلاً کاهش فشار در بخش‌هایی از لوله می‌شود. به دلیل سرعت و آشفتگی بیشتر، امکان انتقال حرارت بیشتر نیز در لوله تابدار فراهم شده است.

برای مقایسه نتایج بررسی‌ها می‌توان از شکل (۳) استفاده کرد که در آن تغییرات سرعت، دما و فشار در یک مقطع مشخص لوله پیچشی نسبت به قطرهای اقطار ۱/۲۵، ۱/۶۷ و ۲/۵ نمایش داده و کلیه شرایط و بازه تغییرات، ثابت در نظر گرفته شده است. همان‌گونه که در شکل (۲) مشاهده می‌کنید، با افزایش ضریب  $\alpha$ ، افزایش چرخش

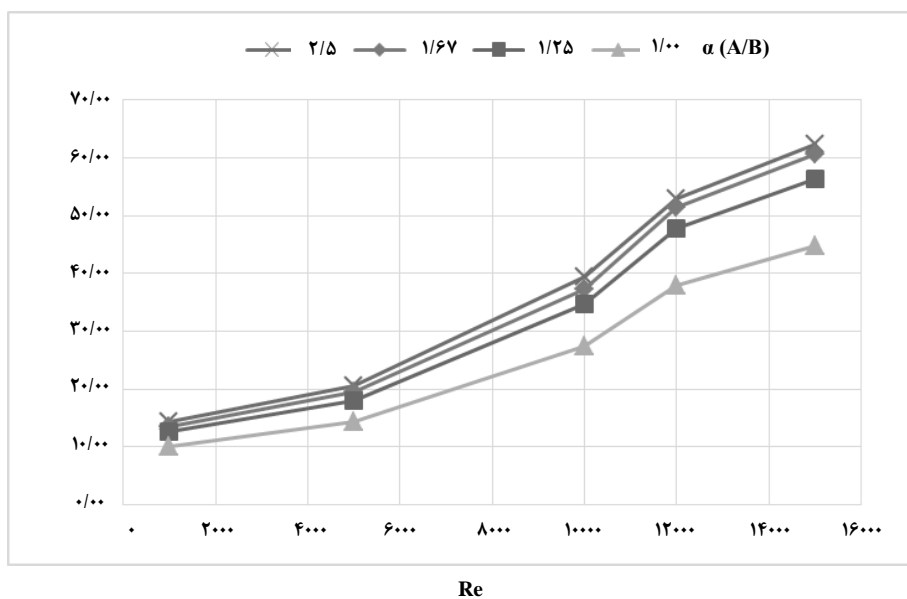


شکل ۴. مقایسه هندسه با تعداد پیچش ۰، ۱، ۲ و ۳ در پُربندهای سرعت، دما و فشار در عدد رینولدز ۱۵۰۰۰ و  $\alpha = 1/67$ .

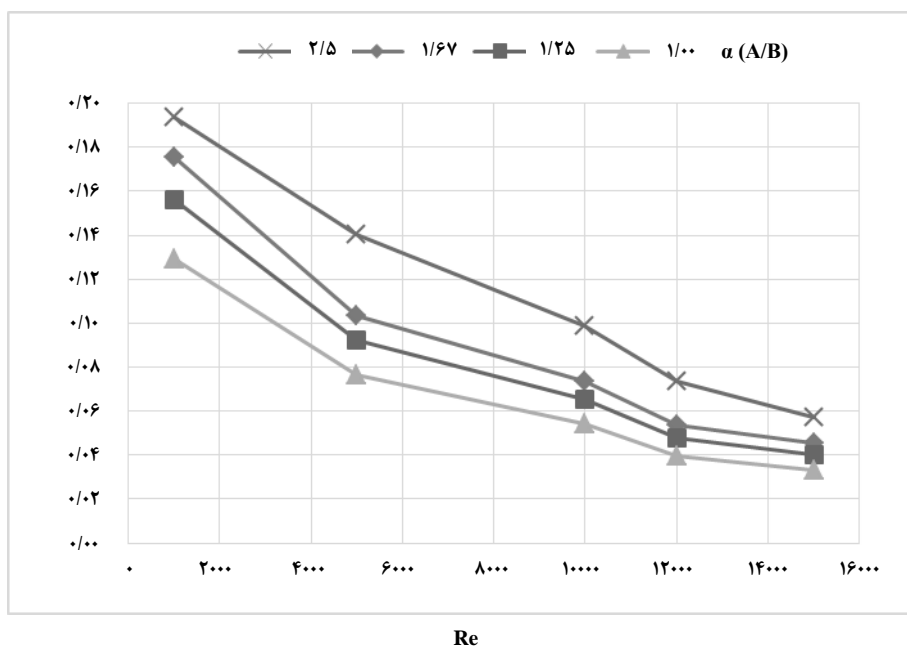
توزیع پارامترهای ترمودینامیکی مورد مطالعه را دستخوش تغییر می‌کند. افزایش سرعت سیال در بخش‌هایی از لوله به کاهش فشار در آن بخش انجامیده است. همچنین، به دلیل آشفته‌گی‌های ایجاد شده در سیال، انتقال کلی حرارت افزایش یافته است. سرانجام، نتایج انتقال حرارت و افت فشار مسئله به شکل‌های (۵) و

برای مقایسه نتایج بررسی‌ها می‌توان از شکل (۴) بهره گرفت که در آن منحنی تغییرات سرعت، دما و فشار در یک مقطع مشخص لوله پیچشی نسبت به تعداد پیچش ۰، ۱، ۲ و ۳ مشاهده می‌شود و کلیه شرایط و بازه تغییرات ثابت در نظر گرفته شده است. افزایش ضریب  $\lambda$  با مقطع ثابت، موجب افزایش چرخشی سیال درون لوله شده و

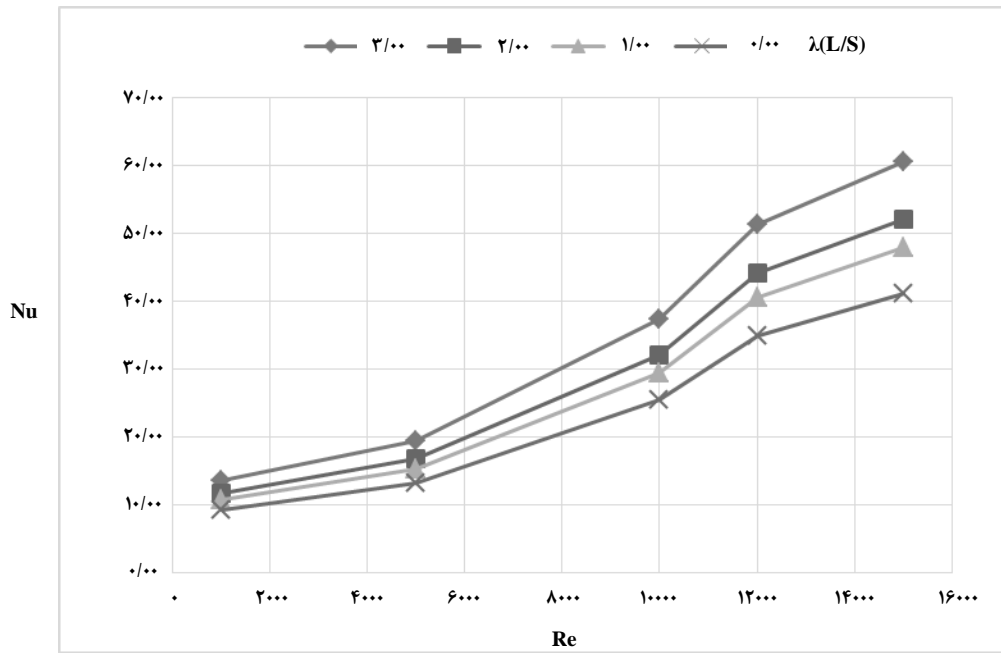
(۶) ارائه می‌شود. این نتایج می‌تواند حاکی از شرایط عملکردی متفاوت در هندسه، طول تعداد پیچش و تغییر مقادیر عدد رینولدز باشد. نتایج بررسی تأثیر تعداد پیچش نیز، به همین ترتیب، در شکل‌های (۷) و (۸) مشاهده می‌شود. بازه مورد بررسی از لوله با مقطع بیضی با قطر  $1/67$  بدون پیچش تا  $3$  پیچش  $360$  درجه است.



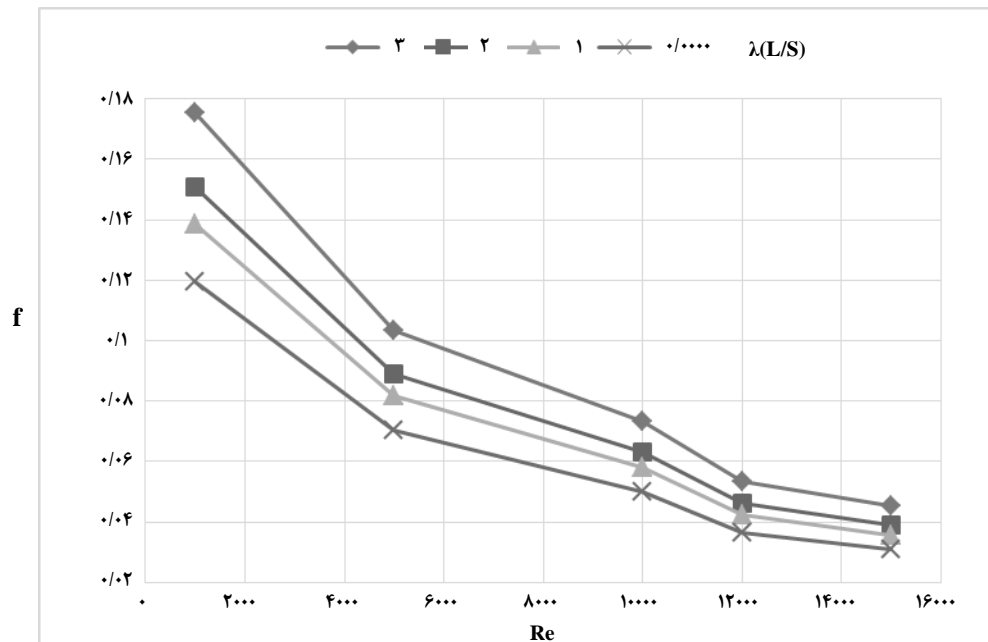
شکل ۵. نتایج تغییرات عدد ناسلت در نسبت قطرهای مختلف لوله پیچشی.



شکل ۶. نتایج تغییرات ضریب اصطکاک در نسبت قطرهای مختلف لوله پیچشی.



شکل ۷. نتایج تغییرات انتقال حرارت در تعداد پیچش لوله.



شکل ۸. نتایج تغییرات ضریب اصطکاک در تعداد پیچش لوله.

دیواره بسیار بالاتر خواهد بود. در بررسی گرادیان سرعت در مقطع لوله، می‌توان دریافت که با افزایش نسبت قطر مقطع و بیضوی تر شدن آن، سرعت محوری لوله کاهش پیدا می‌کند و موجب افزایش اصطکاک و به صورت متقابل افزایش ضریب انتقال حرارت جابجایی موضعی می‌شود.

بنابر نتایج شبیه‌سازی، تغییرات فشار در محور لوله پیچشی به صورت خطی کاهش می‌یابد. این افت فشار به دلیل سرعت‌های غیر محوری ایجاد شده از هندسه پیچشی مسئله خواهد بود. گرادیان دمایی در مقطع لوله به عدد رینولدز جریان و تعداد پیچش بسیار وابسته است. به دلیل برخوردهای متوالی جریان لوله به دیواره، انتقال حرارت نقطه‌ای لوله بالا می‌رود و گرادیان دمایی در



- with horizontal baffles twisted tape inserts". in IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, (2013).
- [3] Kaliakatos, D., Cucumo, M., Ferraro, V., Mele, M. "CFD analysis of a pipe equipped with twisted tape". International Journal of Heat and Technology, 34(2): p. 172-180. (2016).
- [4] جعفری نصر، م.، ابریشمی، ا. ح.، "به کارگیری مبدل‌های پوسته لوله‌ای (با لوله‌های پیچشی) جهت صرفه‌جویی مصرف انرژی واحدهای پالایشگاهی"، دانشگاه آزاد واحد علوم و تحقیقات، (۱۳۹۱).
- [5] جعفری نصر، م.، همت، آ.، سالم، ا.، "الگوریتم طراحی سریع و بررسی شاخص‌های کارکرد فناوری جدید مبدل‌های حرارتی با لوله‌های پیچشی در صنایع نفت (بخش اول)"، پژوهشگاه صنعت نفت، شماره ۶۷، صفحه ۹۸ - ۸۳ (۱۳۹۰).
- [6] Tan, X., Zhu D., Zhou, G., Yang, L., "3D numerical simulation on the shell side heat transfer and pressure drop performances of twisted oval tube heat exchanger". International Journal of Heat and Mass Transfer, 65 : p. 244-253, (2013).
- [7] Thantharate, V., Zudpe, D. B., "Experimental and Numerical Comparison of Heat Transfer Performance of Twisted Tube and Plain Tube Heat Exchangers". International Journal of Scientific & Engineering Research, 4(7): p. 1107-1113, (2013).
- [8] Thawkar, V. P., Farkade, H. S., "Experimental and CFD Analysis of Twisted Tube Heat Exchanger under Forced Convection", in International Journal of Science and Research.(2013).
- [9] Yang, SH., Xu, H., "Experimental study on convective heat transfer and flow resistance characteristics of water flow in twisted elliptical tubes". Applied Thermal Engineering, 31: p. 2981- 2991, (2011).
- [10] Abbasi, S. H., "CFD analysis of enhancement of turbulent flow heat transfer in a horizontal circular tube with different inserts". European Scientific Journal, 10(15): p. 1857- 7431, (2014).
- [11] Kim, H. R., Kim, M., Park, S. H., Min, J. K., Ha, M. Y., "Numerical study of fluid flow and convective heat transfer characteristics in a twisted elliptic tube". Journal of Mechanical Science and Technology, 30(2): p. 719-732, (2016).
- در بررسی تغییرات مقطع لوله پیچشی، تغییرات سرعت سیال در مقطع لوله پیچشی در نسبت قطرهای معادل ۱/۲۵، یکنواخت‌تر است و سپس در نسبت قطرهای معادل ۲/۵ کاملاً آشفته و چرخش سیال به خوبی در کل لوله مشاهده می‌شود. این چرخش سیال در گرادیان دمایی، موجب انتقال حرارت بیشتر و توزیع دمایی در سیستم در نسبت قطرهای معادل ۲/۵ نامتقارن شده است. این چرخش همچنین، به بالا رفتن فشار در گوشه‌های بیضی منجر می‌شود که با افزایش نسبت قطرها تشدید خواهد شد. افزایش نسبت قطر لوله‌ها موجب افزایش عدد ناسلت نیز می‌شود؛ با این حال سرعت رشد این تغییرات در حال کاهش است و به نظر می‌رسد با افزایش شدید این مقدار، تأثیر زیادی در انتقال حرارت مشاهده نشود. این نکته نیز قابل توجه است که ضریب اصطکاک در افزایش نسبت قطرها افزایش می‌یابد. این افزایش فزاینده و موجب افت فشار چشمگیری خواهد شد.

#### ۴. نتیجه‌گیری کلی

نتایج بررسی اثر تعداد پیچش نیز به این صورت است که افزایش تعداد پیچش در رینولدزهای پایین اثر مثبت اندک و در رینولدزهای بالا اثر فزاینده تری خواهد داشت. از سوی دیگر، در صورت نیاز به سرعت بالاتر در لوله‌ها، افزایش تعداد پیچش بتواند تأثیر کارسازی بر انتقال حرارت سیستم بگذارد. مقدار ضریب اصطکاک نیز در مقادیر رینولدز پایین، حساسیت بیشتری به تعداد پیچش لوله دارد. این موضوع در عدد رینولدز بالاتر اهمیت خود را از دست می‌دهد. بر این اساس می‌توان نتیجه گرفت که در رینولدزهای بالا می‌تواند با اعمال پیچش بیشتر در لوله پیچشی به انتقال حرارت بیشتر کمک کرد. به طور کلی، در این مورد پژوهی، نسبت قطرهای مقطع بیضی ۱/۶۷ و طول پیچش ۳ (۰/۶ متر)، بهترین عملکرد را در لوله پیچشی دارد و مقادیر افت فشار و عدد ناسلت بهینه را ارائه می‌دهد.

#### مراجع

- [۱] جعفری نصر، م.، علایی، ه.، "فناوری‌های نوین در بهبود عملکرد مبدل‌های حرارتی"، تهران: پژوهشگاه صنعت نفت، (۱۳۸۹).
- [2] Salman, S. D., Kadhum, A. A., Takriff, M. S., Mojamad, A. B. "CFD analysis of heat transfer and friction factor charaterstics in a circular tube fitted