قالب پیش‌نویس مجلهٔ مهندسی مکانیک دانشگاه تبریز (لطفاً این نوشته، در فایل ارسالی حذف نشود)

بررسی عددی رسوب‌گذاری واکنش شیمیایی آسفالتن در لوله سه‌موج مارپیچ

مهدی جمالی دانشجو دکتری، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه کاشان، کاشان، ایران

علی اکبر عباسیان آرانی استاد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه کاشان، کاشان، ایران

چکیده

در این مطالعه تأثیر استفاده از لوله سه موج مارپیچ به عنوان جایگزینی برای لوله‌های ساده‌ی به کار رفته در مبادله کن‌های پوسته و لوله، بر روی میزان تشکیل رسوب کک حاصل از واکنش شیمیایی سطحی آسفالتن، به صورت عددی بررسی شده است. جریان نفت خام، سه بعدی، گذرا و آشفته بوده و مدت زمان شبیه‌سازی جهت بررسی تشکیل رسوب ۱۸۰۰ ساعت در نظر گرفته شده است. معادلات حاکم با استفاده از روش حجم محدود و با به کارگیری نسخه انتقال تنش برشی از مدل آشفتگی $k-\omega$ حل شده‌اند. نتایج نشان داد لوله سه‌موج مارپیچ، میزان رسوب کمتری تجربه خواهد نمود. برای لوله موج‌دار، غلظت بیشینه رسوب و سرعت در خروجی لوله در مقایسه با لوله ساده، به ترتیب ۴۲ و ۲۹ درصد کاهش یافته است. توزیع غیریکنواخت رسوب بر روی دیواره لوله مارپیچ به دلیل نقش تنش برشی و جریان‌های ثانویه و چرخشی ایجاد شد نقاط دارای غلظت رسوب کمتر، دارای تنش برشی بیشتری بوده‌اند، به نحوی که افزایش تنش بیشینه به میزان ۱۵۸ درصد، در برخی نقاط لوله موجدار مارپیچ نسبت به لوله ساده مشاهده گردید.

واژه‌های کلیدی: آسفالتن، مبادله‌کن گرمایی، لوله سه موج مارپیچ، رسوب واکنش شیمیایی، روش‌های کاهش رسوب‌گذاری، شبیه‌سازی عددی رسوب

Numerical Investigation of Asphaltene Chemical Reaction Fouling Inside Twisted Trilobe Tube

Mahdi Jamali Mechanical Engineering Faculty, University of Kashan, Kashan, Iran

Ali´ Akbar Abbasian Aran Mechanical Engineering Faculty, University of Kashan, Kashan, Iran

Abstract

This study has numerically investigated the effect of employing a trilobe twisted tube as a substitute for conventional smooth tubes in shell-and-tube heat exchangers on coke deposition caused by the surface chemical reaction of asphaltenes. The flow was assumed to be three-dimensional, transient, and turbulent, with an operational period of 1800 hours. The governing equations were solved using the finite volume method, employing the shear stress transport (SST) version of the k-ω turbulence model. Simulation results showed that the trilobe twisted tube significantly reduced fouling compared to the smooth tube under identical conditions. The maximum coke concentration and outlet velocity decreased by 42% and 29%, respectively. Moreover, Deposition was found to be non-uniform along the tube wall due to the role of wall shear stress and formed secondary flows in tubes, where regions of higher shear stress experienced lower grade of fouling. Wall shear stress in the trilobe tube was up to 158% higher than in the smooth tube in these locations. Collectively, these findings highlight the potential of trilobe twisted tubes in mitigating fouling and improving the operational efficiency of heat exchangers.

Keywords: Asphaltene, Heat Exchanger, Trilobe Twisted Tube, Chemical Reaction Fouling, Fouling Reduction Methods, Numerical Simulation of Fouling

۱- مقدمه

مبادله کن‌های گرمایی به صورت گسترده در پالایشگاه‌ها، پتروشیمی‌ها، نیروگاه‌های تولید الکتریسیته و سایر زمینه‌های صنعتی مورد استفاده قرار می‌گیرند. بهبود عملکرد کلی مبادله کن‌های گرمایی، برای استفاده بهینه از انرژی و کاهش مصرف آن اهمیت زیادی دارد. عملکرد کلی این تجهیزات، به وسیله راندمان انتقال گرما لوله‌های تشکیل دهنده آن، که واحد اصلی انتقال گرما در مبادله کن هستند، مشخص می‌شود.

به صورت کلی روش‌های بهبود انتقال گرما به سه دسته روش‌های فعال، غیر فعال و ترکیبی تقسیم می‌شود. روش‌های فعال، برای اثرگذاری به منبع انرژی خارجی و تمهیدات بیشتری نیاز داشته که باعث می‌گردد در عمل استفاده از آنها نسبت به روش‌های غیرفعال کمتر باشد. دلیل این امر، وابستگی کمتر روش‌های بهبود غیرفعال به تأمین انرژی از خارج از مبادله کن گرمایی می‌باشد. از میان روش‌های غیرفعال بهبود انتقال گرما، لوله‌های تغییر شکل یافته، به دلیل ویژگی‌های خود، محبوبیت فراوانی داشته اند.

با پیشرفت فناوری‌های تقویت انتقال گرما در سال‌های اخیر لوله‌های بهبودیافته جدید، به‌منظور افزایش بازدهی انتقال گرما مبادله کن‌ها معرفی شده‌اند[۲-۱]. در میان تمام لوله‌های بهبود یافته، لوله‌های موجدار (کُرُوگیت) برای بهبود انتقال گرما از اهمیت ویژه‌ای برخوردار هستند[۳]، زیرا جایگزینی لوله‌های صاف با لوله‌های موجدار می‌تواند به‌طور قابل‌توجهی ابعاد مبادله کن‌ها را کاهش دهد[۴]. همچنین، لوله‌های موجدار در مقایسه با سایر سطوح، دارای بهترین بازدهی میانگین انرژی و ویژگی‌های ضد رسوب هستند[۵]. همچنین این لوله‌ها، در مقایسه با سایر روش‌های تغییر بهبود غیرفعال، انتقال گرما را با کمترین افزایش مقاومت هیدرولیکی (اثر منفی افزایش پسا)

* نویسندهٔ مکاتبه‌کننده، آدرس پست الکترونیکی: abbasian@kashanu.ac.ir

In Press

بهبود می‌بخشند[۶].

لوله موجدار مارپیچ، یک لوله مبادله کن گرمایی بسیار کارآمد است که با اکسترود مستقیم یک لوله دایره‌ای شکل می‌گیرد. به‌دلیل مزایایی مانند تولید ساده، تقویت دوطرفه انتقال گرما و افت فشار کم، این لوله‌ها به‌طور گسترده مورد مطالعه قرار گرفته‌اند[۷]. بر اساس تعداد موج‌های به کار رفته در لوله موجدار مارپیچ، این لوله‌ها به تک‌موج و چندموج طبقه‌بندی می‌شوند.

لوله موجدار تک موج نخستین نوعی بود که معرفی شد و تأثیر هندسه این لوله بر میدان جریان، انتقال گرما و گاها رسوب، به صورت عددی و آزمایشگاهی مورد بررسی و مطالعه قرار گرفته است. دیابس و همکاران[۸] در مطالعه‌ای عددی، خصوصیات جریان سیال و انتقال گرما یک لوله چهار موج برای سیال آب را بررسی نموده‌اند. در محدوده اعداد رینولدز بررسی شده، لوله چهار موج انتقال گرما و افت فشار را در بهترین حالت به ترتیب ۲۸/۷۸ و ۱۷/۳۵ درصد افزایش داد. نتایج نشان داد نیروی گریز از مرکز ایجاد شده توسط دیواره لوله موجدار عامل اصلی افزایش انتقال گرما بوده است. شیخی عزیزی و همکاران[۹] با ترکیب روش دینامیک سیالات محاسباتی، هوش مصنوعی و یک الگوریتم ژنتیک، به دنبال یافتن رابطه میان پارامترهایی مانند نسبت و جهش پیچش با ضریب کلی عملکرد در مبادله کن دو لوله‌ای با لوله سه‌موج مارپیچ بوده‌اند. در نهایت مشخص گردید مقدار ضریب کلی عملکرد برای مبادله کن با این لوله و در محدوده پارامترهای مورد بررسی، ۱/۱۶ بوده است. همچنین الگوریتم بهینه‌سازی مشخص نمود بهترین ضریب عملکرد با افزایش نسبت پیچش لوله بیرونی و کاهش آن برای لوله داخلی به دست خواهد آمد. پان و دای[۱۰] خصوصیات انتقال گرما و افت فشار لوله‌های دارای تعداد موج مختلف(۸-۱) را به صورت عددی بررسی نموده‌اند. آنها قطر داخلی معادل لوله مدل شده را ۲۰ میلی‌متر در نظر گرفته و تأثیر پارامترهای هندسی مانند عمق موج و پیچش لوله بر ضریب عملکرد کلی را مورد بررسی قرار داده‌اند. نتایج نشان داد با افزایش عمق موج و کاهش گام پیچش، ضریب کلی عملکرد افزایش خواهد یافت به گونه‌ای که در حالت بهینه مقدار آن ۱/۷۶۴ گزارش شده است. لیو و همکاران[۱۱] خصوصیات انتقال گرما همرفتی و مقاومت جریان را در یک لوله سه‌موج مارپیچ و برای سیال آب به صورت عددی بررسی نموده‌اند. نتایج نشان داد عدد ناسلت در این لوله در مقایسه با لوله ساده ۳۰ درصد افزایش یافته است، این در حالی است که افت فشار نیز همزمان ۳۹ درصد نسبت به لوله ساده بیشتر شده است. با بررسی نقش برخی پارامترهای هندسی، نتایج نشان از نقش مثبت کاهش گام پیچش در بهبود عملکرد گرمایی این لوله‌ها داشته است به گونه‌ای که ضریب عملکرد کلی در حالت بهینه ۱/۳۷ گزارش شده است. در همین حال، این افزایش به ساختار غیرمعمول لوله سه‌موج و جریان چرخشی و ثانویه ایجاد شده ناشی از آن نسبت داده شده است.

در حالی که اکثر مطالعات، به بحث بهبود انتقال گرما و افت فشار احتمالی، در صورت استفاده از لوله‌های بهبودیافته موجدار پرداخته‌اند، حتی بعد از گذشت یک قرن از ارائه اولین روش‌های بهبود انتقال گرما، سازوکار تعامل میان دینامیک رسوب‌گذاری و این روش‌ها مانند موجدار کردن لوله، ناشناخته بوده و به خوبی تعریف نشده است. مطالعاتی که به صورت عددی و آزمایشگاهی به بحث رسوب در زمان استفاده از روش‌های بهبود انتقال گرما پرداخته اند با مطالعه‌ای که سامرزکل و برگلس[۱۳-۱۲] برای اولین بار و با مرور جامعی که در این زمینه ارائه دادند آغاز گردید. در نمونه‌ای از جدیدترین نوع این مطالعات، ایشی‌یاما و همکاران[۱۴]، نمونه‌ای از تأثیرات متقابل رسوب‌گذاری و روش‌های بهبود انتقال گرما را ارائه نموده‌اند. این تست‌های آزمایشگاهی، مشاهدات صنعتی و مطالعات عددی، با سیالات مختلف و به منظور درک اثر هندسه مجرای عبور جریان بر روی رسوب‌گذاری و تحت مکانیزم‌های مختلف تشکیل رسوب مانند ته‌نشینی و واکنش شیمیایی انجام پذیرفته است. نتایج مطالعات مرور شده، ترکیبی از کاهش و افزایش در نرخ رسوب‌گذاری برای سیال‌های گوناگون، با استفاده از وسایل بهبود دهنده مختلف برای سیستم‌های متفاوت و در محدوده وسیعی از شرایط عملیاتی را گزارش داده است[۱۴].

فوکوموتو و همکاران[۱۵] در مطالعه‌ای عددی و به منظور غلبه بر مشکل زمان طولانی شبیه‌سازی فرآیند زمانبر رسوب، الگوریتم جدیدی توسعه داده که در آن میدان‌های مومنتوم، فشار، آنتالپی و کسر جرمی به طور جداگانه حل شده‌اند. نتایج حاصل از این مدل، نشان داد که مقاومت رسوب با افزایش دمای دیواره، کاهش سرعت نفت خام و افزایش غلظت گونه‌های رسوب‌گذار افزایش یافت. کرائویی و همکاران[۱۶]، رفتار رسوب‌گذاری درون مبادله کن‌های پیش‌گرمکن پالایشگاهی در الجزایر را با استفاده از ابزار دینامیک سیالات محاسباتی و یک مدل دو بعدی مورد مطالعه قرار داده‌اند. مدل آنها شامل یک مکانیزم مفصل سینتیکی جهت توصیف رسوب‌گذاری بوده است. دو مدل برای رسوب مواد آلی و غیرآلی مورد بررسی قرار گرفت و نتایج نشان داد در حالیکه که سرعت جریان نقش قابل ملاحظه‌ای در تشکیل و نشست مواد چسبنده آلی نا محلول ندارد، رسوب گونه‌های غیرآلی مانند فریک اکسید با افزایش سرعت زیاد می‌شود. یانگ[۱۷] در مطالعه‌ای عددی به بررسی مراحل اولیه تشکیل رسوب(تا سه ثانیه)، با استفاده از یک مدل دینامیک سیالات محاسباتی برای جریان آشفته سه بعدی درون یک لوله مبادله کن گرمایی پرداخته است. در این پژوهش، تشکیل و پیر شدن رسوب از طریق دو مسیر واکنش شیمیایی و ته‌نشینی ذرات مدل شده است. مطابق انتظار افزایش دمای سطح نرخ تشکیل رسوب و غلظت آن را افزایش داده، در حالیکه افزایش سرعت منجر به افزایش نرخ برداشت رسوب و در نتیجه کاهش غلظت رسوب در مبادله کن گردید. چمبون و همکاران[۱۸] در کاری آزمایشگاهی، به مطالعه تأثیر هندسه مبادله کن‌های گرمایی پوسته و لوله بر میزان رسوب‌گذاری نفت خام پرداخته‌اند. نتایج نشان داد که لوله‌های دارای پره‌های مارپیچ، کمتر در معرض رسوب کردن قرار دارند به نحوی که در شرایط کاری یکسان، میزان رسوب در این لوله‌ها نسبت به لوله‌های معمولی تا یک مرتبه بزرگی کاهش یافت. دلیل احتمالی این ویژگی لوله‌های پره‌دار، ناشی از افزایش تنش برشی محلی بر دیواره به دلیل بهبود آشفتگی محلی بیان شد. پاز و همکاران[۱۹] روشی محاسباتی برای شبیه‌سازی فرآیند رسوب‌گذاری با استفاده از مدل شبکه متحرک جهت بررسی رسوب درون لوله‌های پره‌دار مارپیچ توسعه داده‌اند. نتایج نشان داد که نواحی با تنش برشی دیواره کم و گرادیان‌های دمایی زیاد بیشترین ضخامت رسوب را دارا بوده‌اند. در یکی از معدود مطالعات پرداخته به رسوب‌گذاری لوله‌های موجدار، کیان و همکاران[۲۰] یک مطالعه پارامتری روی عملکرد رسوب‌گذاری ذرات جامد درون لوله

In Press

موج‌دار مارپیچ با استفاده از مدل دوفاز مایع-جامد انجام داده‌اند. نتایج نشان داد توزیع ذرات جامد در این لوله‌ها علاوه بر جاذبه، تحت تأثیر نیروی گزیر از مرکز، ایجاد شده ناشی از جریان‌های پیچشی بوده است. بررسی پارامترهای هندسی لوله نشان داد افزایش عمق موج، می‌تواند تأثیر نیروهای گریز از مرکز را تقویت نموده و موجب افزایش رسوب گردد. مطالعات اخیر [۲۱-۲۲] نشان می دهد سطح مقطع لوله اثر زیاد روی رفتار سیال دارد.

بررسی مطالعات عددی و تجربی نشان می‌دهد پارامترهایی که موجب تغییر در میزان رسوب‌گذاری در لوله‌های مبادله کن گرمایی می‌گردند، را می‌توان در سه دسته پارامترهای جریان سیال، پارامترهای هندسی لوله‌های مبادله کن گرمایی و سیال مورد استفاده طبقه‌بندی نمود. تمام پارامترهای فوق ممکن است دارای اثرات جداگانه منفی یا مثبت و مستقیم یا غیر مستقیم بر میزان تشکیل رسوب در مبادله کن گرمایی باشند و وجود این تعداد زیاد از پارامترها و اثرات متقابل آنها بر یکدیگر، بررسی و تحلیل آزمایشگاهی و یا در مقیاس واقعی پدیده رسوب‌گذاری را امری پیچیده می‌سازد. با توجه به قابلیت‌های روش‌های شبیه‌سازی عددی و چالش‌های کمتر در مقایسه با مطالعات صنعتی و آزمایشگاهی در شبیه‌سازی رسوب، استفاده از این روش‌ها مورد توجه قرار گرفته است.

با توجه به بررسی مراجع، مشخص گردید اکثر تحقیقات در خصوص لوله‌های چندموج محدود به بررسی اثر آنها بر انتقال گرما یا افت فشار در این لوله‌ها بوده و مقالات در مورد تحلیل رسوب در لوله‌های موجدار مارپیچی نادر است. لذا، بررسی‌های آزمایشگاهی و عددی بسیاری نیاز است تا پتانسیل رسوب‌گذاری این لوله‌ها برای سیالات و مکانیزم‌های مختلف تشکیل رسوب مورد فهم واقع گردد. در نتیجه و با توجه به خلاء موجود در این میان، در پژوهش حاضر سعی شده است رفتار رسوب آسفالتن و تبدیل آن به کک، در لوله سه‌موج مارپیچ به عنوان یکی از این لوله‌های جدید و مورد توجه، و با کمک گرفتن از نقاط قوت شبیه‌سازی عددی، مورد بررسی قرار گیرد.

۲- شرح مسئله

تشکیل رسوب در مبادله کن‌های گرمایی زنجیره پیش‌گرمکن نفت خام در پالایشگاه‌ها، یکی از معضلات قدیمی، همیشگی و قابل توجه در بهره‌برداری از این دستگاه‌ها و کاهش بازده پالایشگاه‌ها بوده است[۲۳]. با توجه به اثرات منفی این پدیده، بررسی و ابداع روش‌های نوین به منظور کاهش میزان رسوب، همواره مورد توجه محققان بوده است. با توجه به پتانسیل لوله‌های موجدار مارپیچی در مقایسه با لوله‌های صاف در ضد رسوب بودن، در مطالعه حاضر، تغییرات تشکیل رسوب واکنش شیمیایی آسفالتن در لوله موجدار مارپیچ سه موج، به صورت عددی بررسی شده است تا از تأثیرات احتمالی استفاده از این لوله بر میزان تشکیل کک حاصل از واکنش شیمیایی آگاهی به دست آید.

دلیل انتخاب سطح مقطع با سه موج برای لوله مارپیچ، عملکرد برتر آنها در مقایسه با سطح مقطع بیضوی و چند-موج در بهبود انتقال گرما همراه با افت فشار کمتر بوده است[۹]. در این پژوهش تمرکز بر روی بررسی پتانسیل رسوب‌گذاری لوله مارپیچ در مقایسه با لوله ساده بوده، لذا عملکرد کلی یک مبادله کن گرمایی صنعتی، مطابق با مدل یک لوله‌ای بیات و همکاران[۲۴] در نظر گرفته شده است.

هندسه لوله سه‌موج مارپیچ به همراه تعاریف ابعاد هندسی آن، در شکل ۱ نشان داده شده است. D_b و D_e به ترتیب قطر بزرگترین دایره‌ای که می‌تواند درون هسته لوله قرار گیرد و قطر کوچکترین دایره‌ای که می‌تواند محیط سطح مقطع لوله را در برگیرد، نشان می‌دهند. هندسه در نرم افزار طراحی مدل Ansys برای مش‌بندی و حل ترسیم گردیده است. قطر اسمی لوله سه‌موج توسط معادله‌ی (۱) محاسبه می‌شود.

$$D_n = \frac{D_e + D_b}{2} \quad (۱)$$

جهت مقایسه نتیجه پژوهش حاضر با نتایج حاصل از شبیه‌سازی موجود برای لوله با سطح مقطع دایروی[۲۴]، طول لوله به صورت مشابه ۰/۵ متر در نظر گرفته شده است. گام پیچش لوله سه‌موج، طول محوری یک دور پیچش ۱ موج و متناسب با تعداد دورهای پیچش کامل لوله بوده که در این پژوهش، مقدار آن برای ۱/۵ دور تابیدگی برابر 2/3L در نظر گرفته شده که در محدوده متداول($0.25L \leq P \leq L$) مورد استفاده در مطالعات مربوط به لوله‌های مارپیچ می‌باشد[۲۵]. عمق برآمدگی حاصل از ایجاد موج در دیواره لوله نیز در معادله‌ی (۲) به صورت زیر تعریف گردیده است:

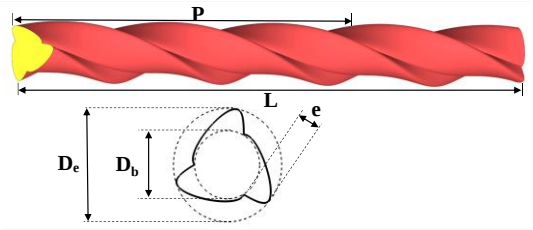
$$e = \frac{D_e - D_b}{2} \quad (۲)$$

در ابتدای فرآیند طراحی هندسه لوله سه‌موج و به عنوان فرضی اساسی، سطح مقطع این لوله به منظور رسیدن به دو هدف زیر، برابر با لوله ساده (۴۹۱ میلی‌متر مربع)، مورد استفاده در کار بیات و همکاران[۲۴] در نظر گرفته شده است.

۱- تضمین اینکه که در سرعت ورودی یکسان(۰/۷۹ متر بر ثانیه)، هر دو لوله با دبی حجمی مشابهی کار کنند. در نتیجه و به دلیل برابر بودن دبی، جایگزین کردن یک لوله صاف متداول با یک لوله تابیده‌شده سه‌موج، بدون نیاز به تغییر تنظیمات پمپ یا کنترل‌کننده جریان امکان‌پذیر شده که این امر نتایج را مستقیماً برای بازسازی‌های صنعتی قابل استفاده می‌سازد.

۲- ترکیب سرعت ورودی و سطح مقطع جریان برابر، استفاده از سرعت خروجی را به عنوان یک شاخص کمی برای رسوب‌گذاری امکان‌پذیر می‌سازد. لذا در ادامه و پس از بررسی مطالعات پرداخته به بررسی نقش شکل موج در رفتار ترموهیدرولیکی لوله‌ها، و رصد محدوده وسیع مقادیر پارامترهای هندسی مورد استفاده آنها، در این پژوهش D_b برای لوله سه‌موج، مشابه کار یان و همکاران [۲۶] ۲۰/۱۶ میلی‌متر که نزدیک‌ترین عدد به قطر لوله ساده در مطالعه بیات(۲۵ میلی‌متر) بوده در نظر گرفته شده است. پس از آن و با توجه به فرض ثابت بودن سطح مقطع، مقدار e، که در مطالعات دیگر مانند پژوهش کونگکایتپابون[۲۷] بین ۱ تا ۸ میلی‌متر نیز برای بررسی عمق موج گزارش شده مورد استفاده قرار گرفته تا سطح مقطع ۴۹۱ میلی‌متر مربع به دست آید. در نتیجه بررسی مشخص گردید مقدار e برابر ۶ میلی‌متر نتیجه مد نظر را به دست خواهد داد. در نتیجه D_e برابر با ۳۲/۱۶ میلی‌متر خواهد بود.

In Press



شکل ۱- هندسه یک لوله سه‌موج مارپیچ

جدول ۱- خواص ترموفیزیکی نفت و سایر اجزا مخلوط نفت خام

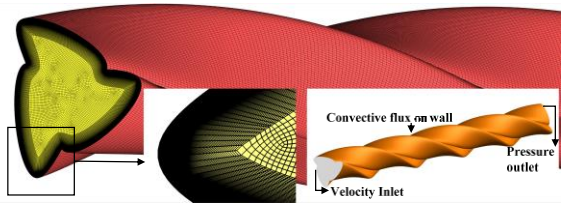
	چگالی ($kg\ m^{-3}$)	لزجت ($kg\ m^{-1}s^{-1}$)	رسانایی گرمایی ($Wm^{-1}K^{-1}$)	گرمای ویژه ($J\ kg^{-1}K^{-1}$)
نفت	$۸۳۴/۴ - ۰/T_b ۲۷۶$	$c \times exp(d/33.28)^*$	$۰/۱۴۵ - ۰/T_b ۰۰۰۱$	$۱۶۷۱ + ۴/T_b ۴۵۶$
آسفالتن	۸۵۰	۰/۰۰۶	۰/۱۲۳	۱۵۰۰
کک	۹۰۰	۱۵۰۰۰۰	۱/۵	۱۵۰۰

۳- مدلسازی عددی

در این پژوهش خواص ترکیب نفت خام بر اساس اینکه که ترکیب نفت خام و رسوب، از سه شبه جزء نفت، آسفالتن و کک تشکیل شده، در نظر گرفته شده است. به صورت کلی خواص ترموفیزیکی نفت‌های مختلف، به صورت گسترده‌ای متغیر و وابستگی زیادی به ترکیب آنها دارد. خواص در نظر گرفته شده برای ترکیب نفت خام در جدول ۱ نشان داده شده است[۲۴]. در مدل پیشنهادی بیات، مقدار لزجت کک نقش مهمی در شبیه‌سازی رسوب ایفا می‌نماید، چرا که احتمال چسبیدن گونه‌های رسوب(کک) به دیواره، بر اساس رقابت میان لزجت ظاهری زیاد آنها و تنش برشی روی دیواره تعیین می‌شود. دامنه محاسباتی و شبکه

در شبیه‌سازی‌های عددی بر پایه الگوریتم گسسته کردن دامنه محاسباتی، تولید شبکه مناسب امری حیاتی است. شبکه سلول‌های تشکیل دهنده اگر از کمیت و کیفیت مناسبی برخوردار نباشند، سرعت همگرایی حلگر و نیز دقت جواب نهایی را تحت تأثیر منفی قرار خواهند داد. شبیه‌سازی رسوب واکنش سطحی، پدیده‌ای وابسته به کمیت‌های مجاور دیواره می‌باشد، لذا اهمیت شبکه مناسب دو چندان بوده و می‌بایست از تراکم مناسبی از سلول‌های با کیفیت در مجاورت دیواره لوله برخوردار بوده تا بتوان تغییرات کمیت‌های موثر بر رسوب را به خوبی رصد نمود.

همچنین، با توجه به احتمال رشد رسوب، فشرده‌سازی شبکه تا فاصله مناسبی از دیواره لوله می‌بایست ادامه پیدا کند تا در صورت رشد رسوب بتوان لایه‌های آن را به خوبی مدل نمود. علاوه بر این مدل آشفتگی انتخاب شده و محدودیت‌های حاصل از آن ($y^+ = 1$)، عامل دیگری است که تولید شبکه‌ای متراکم از سلول‌های محاسباتی کناره دیواره، مانند شکل ۲ را ضروری می‌نماید. پارامترهای کیفی نسبت منظری (<۱۰۰)، متعامد بودن(=۱) و همچنین اعوجاج سلول‌ها(<۱) در تولید شبکه در پژوهش حاضر بررسی و مد نظر قرار گرفته اند. شبکه تولید شده، دارای المان‌های شش وجهی و در راستای جریان(محور لوله) سازمان یافته و در سطح مقطع لوله بدون سازمان می‌باشد.



شکل ۲- شرایط مرزی و شبکه تولید شده برای حل عددی

۳-۱- معادلات حاکم و شرایط مرزی

به منظور انجام حل عددی، فرض‌های زیر در نظر گرفته شده‌اند:

۱- جریان درون لوله، آشفته، سه بعدی و گذرا بوده است.

۲- خصوصیات نفت خام، متغیر با دما در نظر گرفته شده‌اند.

معادلات مشتق جزئی حاکم بر جریان آشفته درون لوله، در فرم برداری و دستگاه مختصات دکارتی می‌تواند به صورت زیر نوشته شود:

معادله‌ی بقای جرم:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho \bar{u}}{\partial \bar{x}} = 0 \qquad (۳)$$

معادله‌ی بقای مونتوم:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \bar{u}) + \frac{\partial}{\partial \bar{x}}(\rho \bar{u}\bar{u}) = -\frac{\partial p}{\partial \bar{x}} + \frac{\partial}{\partial \bar{x}}\left[(\mu + \mu_t)\frac{\partial \bar{u}}{\partial \bar{x}}\right] + \rho g \qquad (۴)$$

معادله‌ی انتقال گونه‌ها:

با استفاده از قانون فیک برای پخش، معادله‌ی انتقال گونه‌ها برای گونه‌ی j به صورت زیر است:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho Y_j) + \frac{\partial}{\partial \bar{x}}(\rho Y_j \bar{u}) = \frac{\partial}{\partial \bar{x}}\left(\rho D_j \frac{\partial Y_j}{\partial \bar{x}}\right) - r_j \qquad (۵)$$

که در معادله‌ی بالا D_j ضریب پخش جرمی و r_j نرخ خالص واکنش گونه‌ی j می‌باشد که به صورت زیر محاسبه شده است:

$$r_j = M_{w,j} \sum_{k=1}^{N_r} r_{j,k} \qquad (۶)$$

در معادله‌ی (۶)، r_j، جمع نرخ‌های واکنش برای N_r واکنشی که گونه‌ی j در آنها شرکت دارد را نمایش می‌دهد. $M_{w,j}$ وزن مولکولی گونه‌ی j و $r_{j,k}$ نرخ آرنیوسی تولید یا مصرف گونه‌ی j در واکنش k است.

معادله‌ی بقای انرژی:

In Press

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho E)+\frac{\partial}{\partial \bar{x}}(\rho E\bar{u})=-\frac{\partial p}{\partial \bar{x}}+\frac{\partial}{\partial \bar{x}}\left(k_{eff}\frac{\partial T}{\partial \bar{x}}-\sum_j h_j\left(D_j\frac{\partial Y_j}{\partial \bar{x}}\right)\right) \quad (۷)$$

۲ جمله قسمت دوم سمت راست معادله‌ی (۷)، به ترتیب بیانگر انتقال انرژی به دلیل هدایت و پخش گونه‌ها است.

مدلسازی آشفتگی:

جمله لزجت آشفته μ_t، بر اساس نسخه انتقال تنش برشی (SST) از مدل $k-\omega$ محاسبه خواهد شد[۲۸]. این نسخه از مدل $k-\varepsilon$ برای نواحی دور از دیواره‌ها و از مدل استاندارد $k-\omega$ برای نواحی نزدیک به دیوار استفاده می‌کند. انرژی جنبشی آشفته k و فرکانس آشفتگی ω با استفاده از معادله‌های زیر محاسبه خواهند شد:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k)+\frac{\partial}{\partial \bar{x}}(\rho \bar{u} k)=G_k-Y_k+\frac{\partial}{\partial \bar{x}}\left[\left(\mu+\frac{\mu_t}{\sigma_k}\right)\frac{\partial k}{\partial \bar{x}}\right] \quad (۸)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \omega)+\frac{\partial}{\partial \bar{x}}(\rho \bar{u} \omega)=G_\omega-Y_\omega+\frac{\partial}{\partial \bar{x}}\left[\left(\mu+\frac{\mu_t}{\sigma_\omega}\right)\frac{\partial \omega}{\partial \bar{x}}\right] \quad (۹)$$

در معادله‌های بالا، G_k و G_ω جمله‌های تولید k و ω و Y_k و Y_ω جمله‌های اضمحلال می‌باشند. σ_k و σ_ω نیز به ترتیب اعداد پرانتل آشفته برای k و ω هستند. در این مدل لزجت آشفته به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$\mu_t=\rho\alpha^*\frac{k^2}{\omega} \quad (۱۰)$$

که ضریب α^* لزجت آشفتگی را محدود کرده و منجر به یک اصلاح عدد رینولدز پایین می‌گردد. جزئیات به دست آوردن مقادیر این ضرایب در مرجع اصلی آمده است[۲۸].

مدلسازی تشکیل رسوب:

بخش بسیار مهم مدل دینامیک سیالات محاسباتی حاضر، مشارکت واکنش‌های شیمیایی است که منجر به تشکیل رسوب بر روی سطوح انتقال گرما می‌شود. تشکیل رسوب بر اساس واکنش تجمیع شده سطحی به صورت زیر مدل شده است:

$$2\ \text{asphaltene} \rightarrow \text{coke} \quad (۱۱)$$

نرخ واکنش در معادله‌ی (۱۱)، با مقایسه پیش‌بینی‌های مدل و داده‌های آزمایشگاهی به صورت زیر دست آمده، که در آن ثابت نرخ واکنش توسط رابطه آرنیوس مدل شده است :

$$-r_{asph.}=8\times10^{20}e^{-2e8/RT}[asph.]^{0.5} \quad (۱۲)$$

. در معادله‌ی (۱۲)، 8×10^{20} و $2e8$ به ترتیب ضرایب پیش نمایی و انرژی فعال‌سازی بوده، که بر اساس ضرایب نفوذ مولکولی مرتبطی که در ادامه می‌آید توسط بیات و همکاران تنظیم شده‌اند[۲۴].

در این روش، فرآیند نفوذ مولکولی گونه‌ها از توده آشفته به زیر لایه لزج و ته‌نشست آنها روی دیواره، با استفاده از یک استراتژی جدید مبنی بر ضرایب پخش مولکولی و خواص ترموفیزیکی متفاوت برای اجزای مختلف موجود در محلول مدل شده است. ضریب پخش آسفالتن در نفت خام توسط بیات و همکاران در حدود ۱e-۷ متر مربع بر ثانیه در نظر گرفته شده است. علاوه بر ضریب نفوذ آسفالتن در نفت، ضرایب نفوذ مولکولی برای سایر جفت‌های گونه‌های شیمیایی، شامل نفوذ کک در نفت خام و نفوذ آسفالتن در کک بر اساس گروه‌بندی پیشنهادی بیات و همکاران در نظر گرفته شده و بدون تغییر مورد استفاده قرار گرفته‌اند [۲۴].

۳-۲- شرایط مرزی

با توجه به هدف این پژوهش که بررسی نقش هندسه لوله بر روی پتانسیل رسوبگذاری از طریق مقایسه لوله موجدار مارپیچ و ساده بوده است، شرایط عملیاتی شامل متغیرهای داخل و خارج از لوله، جهت شبیه‌سازی در هر دو لوله یکسان فرض شده‌اند. این فرض کمک می‌کند تا اطمینان حاصل شود تغییرات عملکردی مانند میزان تشکیل رسوب، تغییرات تنش برشی و ضرایب انتقال گرما، میان دو لوله ساده و موجدار، تنها ناشی از تغییرات هندسه لوله‌ها و نه سایر متغیرها بوده است.

در ورودی لوله، پروفیل‌های یکنواخت سرعت، دما و ترکیب مخلوط، و در مرز خروجی احتمال وقوع جریان برگشتی در طول فرآیند حل منظور گردیده است. شار تمامی کمیت‌ها از میان دیواره صفر در نظر گرفته شده و یک شار گرمای همرفتی ثابت مرتبط با دمای متوسط و ضریب انتقال گرما سیال سمت پوسته، به عنوان شرط مرزی بر دیواره لوله اعمال گردیده است. جهت بررسی تشکیل رسوب، یک واکنش شیمیایی سطحی به منظور تولید گونه‌های شیمیایی مورد نظر، بر روی دیواره لوله منظور شده است. شرایط کاری نرمال مبادله کن گرمایی در نظر گرفته شده جهت حل عددی، در جدول ۲ و نوع شرایط مرزی اعمال شده در نرم افزار، در جدول ۲ نشان داده شده است.

جدول ۲- شرایط مرزی استفاده شده در شبیه‌سازی

شرایط عملیاتی	مقدار
دمای متوسط نفت خام ورودی	۴۹۰ کلوین
دمای متوسط ورودی سمت پوسته	۵۳۸ کلوین
سرعت متوسط نفت خام	۰/۷۹ متر بر ثانیه
متوسط ضریب انتقال گرما سمت پوسته	۴۵۵ وات/مترمربع کلوین
درصد جرمی ورودی آسفالتن	۰/۰۲

۳-۳- روند حل

معادلات غیرپایای متوسط‌گیری شده رینولدز ناویر-استوکس(RANS)، به روش حجم محدود، و برای جریان آشفته تراکم ناپذیر سه بعدی با استفاده از نسخه انتقال تنش برشی مدل $(k-\omega)$ حل شده اند. عدم استفاده از توابع دیواره در این مدل و حل کردن معادلات حاکم تا لبه دیواره لوله، کمک می‌کند لایه مرزی را به صورت دقیق مدل نمود. از آنجا که پدیده رسوب‌گذاری به صورت کلی در لایه مرزی و نواحی مجاور آن در نزدیک دیواره اتفاق می‌افتد و شکل و ضخامت لایه مرزی تأثیر به سزایی بر رفتار رسوب‌گذاری دارد، لذا به خاطر توانایی مدل مذکور در شبیه‌سازی رسوب‌گذاری و جریان در هندسه‌های پیچیده، از این مدل در پژوهش حاضر استفاده شده است.

به هم پیوستگی فشار-سرعت با استفاده از الگوریتم سیمپل(SIMPLE)، و جمله‌های جابجایی با استفاده از طرح آپ-وینـد(UPWIND) مرتبه دوم گسسته شده‌اند[۲۹]. به دلیل ماهیت ۳

In Press

بعدی مسئله و خواص متغیر در نظر گرفته شده جهت نفت خام که نیازمند استفاده از توابع تعریف شده توسط کاربر(UDF) می‌باشد، و همچنین تعداد بالای معادلات شامل مدلسازی آشفتگی، تعادل گونه‌ها، محاسبات واکنش‌های شیمیایی و به هم پیوستگی این معادلات و همچنین تعداد بالای سلول‌های محاسباتی، روند حل نیاز به دقت بسیار داشته و ضرایب زیر تخفیف مناسب جهت جلوگیری از واگرایی و ناپایداری در هر مرحله انتخاب شده‌اند.

با توجه به روند پیشنهادی توسعه‌دهنده نرم‌افزار Fluent جهت انجام شبیه‌سازی‌های حاوی فرآیندهای شیمیایی، حل طی دو مرحله غیرواکنشی و واکنشی صورت پذیرفته است. ابتدا معادلات جریان آشفته گذرا، در یک لوله سه موج مارپیچ بدون واکنش‌های شیمیایی تا رسیدن باقیمانده‌های سرعت به ۱e-۷ حل شده و نتایج آن به عنوان نقطه شروع(حدس اولیه) در روند حل معادلات تعادل گونه‌ها، در حالت واکنشی استفاده شده است.

گام زمانی انتخاب شده، متناسب با این روش دو مرحله‌ای بودن فرآیند حل انتخاب گردیده است. در گام اول شبیه‌سازی جریان غیرواکنشی، از گام زمانی کوچک‌تر و در مرحله دوم با توجه به مدت زمان کلی فرآیند رسوبگذاری ۱۸۰۰ ساعت در پژوهش، و بعد زمانی حاکم بر فیزیک مسئله که در آن رشد رسوب تا مرحله نهایی ممکن است بین ماه‌ها زمان ببرد، گام زمانی رصد رشد رسوب، بزرگ‌تر در نظر گرفته شده است.

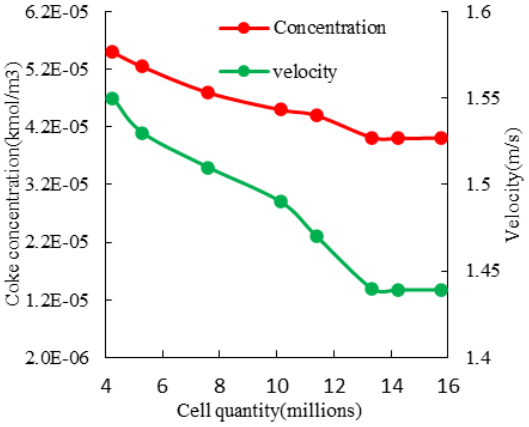
سیستم مورد استفاده جهت شبیه‌سازی، رایانه رومیزی دارای پردازنده Corei5 نسل سیزدهم اینتل مدل ۱۳۴۰۰، به همراه ۳۲ گیگابایت حافظه DDR4 بوده است. مدت زمان لازم جهت شبیه‌سازی، در حالت پردازش موازی با ۱۶ نود محاسباتی، ۳۲۳ ساعت بوده است.

۳-۴- استقلال شبکه

به منظور کاهش دادن تأثیر شبکه بر نتایج محاسبات و بهبود دقت شبیه‌سازی عددی، شبکه‌هایی با تراکم متفاوت روی هندسه لوله سه موج مارپیچ تولید شده و بیشینه غلظت کک و سرعت در خروجی لوله، به عنوان متغیرهای مناسب جهت رصد نقش تراکم شبکه بر روی دقت شبیه‌سازی مورد ارزیابی قرار گرفته، و نتایج آن در شکل ۳، نشان داده شده است.

تولید شبکه در ۸ مرحله و از تراکم سلول خیلی درشت تا خیلی زیر انجام پذیرفته است. با توجه به احتمال توزیع محلی رسوب، ریز کردن شبکه در تمامی جهت‌های هندسی اعمال شده است. بدین معنی که ابعاد سلول‌ها در راستای محور لوله به منظور رصد توزیع طولی رسوب و در جهت شعاعی به منظور رصد رشد رسوب به سمت مرکز لوله در نظر گرفته شده است.

بر اساس نتایج شکل ۳، ریزتر کردن شبکه از مرحله ۶ به بعد و تولید سلول بیش از ۱۳۳۱۴۰۰۰ عدد، تأثیری روی علظت کک و سرعت در خروجی لوله نداشته است، لذا تراکم مذکور جهت تولید شبکه مناسب شبیه‌سازی انتخاب گردیده است. کاهشی بودن روند متغیرها با ریز کردن سلول‌های شبکه، به دلیل این است که در صورت بزرگ بودن سلول‌ها در کنار دیواره و امتداد یافتن این سلول‌ها به سمت مرکز لوله، باعث می‌گردد مقدار و ضخامت رسوب درون لوله بیشتر از مقدار واقعی محاسبه گردد. در این حالت، سرعت جریان و غلظت کک در خروجی افزایش خواهد یافت و با ریز تر کردن شبکه، دقت حلگر در تعیین سلول‌هایی که واقعا میزبان رسوب کک خواهند بود افزایش می‌یابد.



شکل ۳- بررسی تراکم شبکه و مستقل بودن نتایج از شبکه

۳-۵- اعتبارسنجی

پس از بررسی پژوهش‌های پیشین، شیوه‌های مختلف اعتبارسنجی نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی رسوب‌گذاری استخراج گردید که شامل سه روش می‌باشد:

۱- شبیه‌سازی عددی یک تست آزمایشگاهی از رسوب نفت خام و مقایسه خروجی حاصل از آن با داده‌های آزمایشگاهی موجود

۲- اتکا به اعتبارسنجی در یک مطالعه قبلی در صورت به‌کارگیری یک مدل معتبرشده بدون ایجاد تغییر در آن: لوپاتا و اوکلون[۳۰]

۳- اعتبارسنجی با مقایسه مقادیر آزمایشگاهی و عددی متغیرهای جریان و انتقال گرما مانند ضریب اصطکاک و عدد ناسلت: کیان و همکاران[۲۰] و بالدراس و همکاران[۳۱]

بیات و همکاران[۲۴] در مطالعه خود به وضوح اعلام نموده‌اند که مقادیر پارامترهای به دست آمده در مدلشان، مانند انرژی فعال‌سازی، پارامترهای معادله نرخ آرنیوس و ضرایب پخش مولکولی، برای یک نوع نفت خام مورد استفاده در پالایشگاه تهران و با استفاده از نتایج آزمایشگاهی موجود برای آن نفت خاص حاصل شده است. سپس در ادامه اشاره نموده‌اند که در صورت تغییر یکی از این پارامترها به دلیل تغییر نفت خام، بازنگری در سایر متغیرها بر اساس داده‌های مخصوص به آن نفت ضروری می‌باشد. لذا، با توجه به نبود اطلاعات مورد نیاز برای این کار در غالب مطالعات آزمایشگاهی، و ماهیت این امر که به نوعی توسعه و تنظیم مجدد یک مدل رسوب‌گذاری می‌باشد که جزء اهداف این پژوهش نبوده، روش اول برای اعتبارسنجی نتایج مورد استفاده قرار نگرفته و از روش‌های دوم و سوم در این پژوهش بهره برده شده است.

مطابق با روش دوم و از آنجا که در پژوهش حاضر، عیناً از همان مدل و فرضیات استفاده شده، و تنها مسئله از دو بعد به سه بعد و هندسه از لوله ساده به لوله مارپیچ تغییر یافته، و با توجه به اعتبارسنجی مثبت نتایج مدل توسط توسعه دهنده آن، نتایج این

In Press

پژوهش در درجه اول از اعتبار لازم برخوردار خواهد بود. علاوه بر این و به منظور حصول اطمینان بیشتر، و با به کارگیری روش سوم، انتقال گرما همرفتی نفت خام درون یک لوله دایروی شبیه‌سازی شده و نتایج آن شامل عدد ناسلت و ضریب اصطکاک با روابط تجربی موجود مقایسه گردیده است.

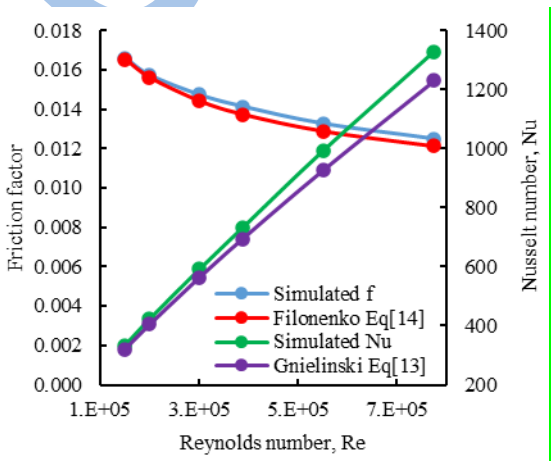
جامی‌الاحمدی و همکاران[۳۲] پس از بررسی آزمایشگاهی رسوب نفت خام، نتیجه گرفتند که برای انتقال گرما همرفتی اجباری نفت خام، رابطه گنیلینسکی برای محاسبه عدد ناسلت، بالاترین میزان تطابق با داده‌های آزمایشگاهی را نشان می‌دهد، لذا در این پژوهش از این رابطه استفاده شده است:

$$\mathrm{Nu}=\frac{\left(\frac{f}{8}\right)(\mathrm{Re_D}-1000)\mathrm{Pr}}{1+12.7\left(\frac{f}{8}\right)^{0.5}\left(\mathrm{Pr}^{\frac{2}{3}}-1\right)} \qquad (۱۳)$$

ضریب اصطکاک در رابطه (۱۳)، از معادله فیلوننکو که به شکل زیر می‌باشد حاصل می‌گردد:

$$f=(1.82\,log\,Re_D-1.64)^{-2} \qquad (۱۴)$$

جریان آشفته و توسعه‌یافته نفت خام به همراه انتقال گرما همرفتی با شرط مرزی دمای ثابت مشابه شرایط عملیاتی در جدول ۲، در یک لوله ساده به قطر ۰/۲۵ میلی‌متر و به صورت پایا شبیه‌سازی شده و نتایج آن جهت بررسی میزان تطابق با رابطه‌ی (۱۳) و (۱۴) در شکل ۴ ارائه شده است.



شکل ۴- اعتبارسنجی نتایج انتقال گرما همرفتی نفت خام در لوله ساده با روابط تجربی موجود

همانگونه که مشخص است تطابق کاملا مناسبی میان نتایج شبیه‌سازی و روابط تجربی موجود بوده، به نحوی که میزان بیشترین خطای نسبی برای عدد ناسلت و ضریب اصطکاک به ترتیب ۸ و ۲/۹ درصد و در عدد رینولدز ۷۷۵۰۰۰ بوده است.

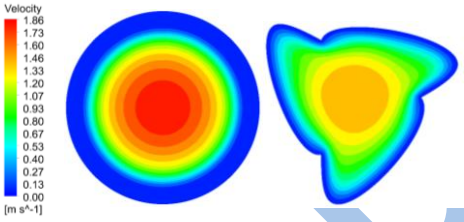
از آنجا که تمام مدل‌های رسوب‌گذاری در دینامیک سیالات محاسباتی به میدان‌های دقیق سرعت و دمای نزدیک دیواره وابسته هستند، معتبرسازی هیدرودینامیکی و گرمایی این مدل‌ها، صحت خروجی آنها را تضمین خواهد نمود. به عبارت دیگر و بر اساس آنالوژی رینولدز، شبیه‌سازی دقیق لایه مرزی گرمایی که دقت عدد ناسلت نشانه آن است، منتج به حل دقیق لایه مرزی غلظت خواهد شد. یک لایه مرزی غلظت دقیق، خود پیش نیاز برآورد صحیح انتقال جرم گونه‌های پیش‌ساز رسوب می‌باشد. همچنین، با توجه به وابستگی برداشت ذرات رسوب از کنار دیواره به تنش برشی، ضریب اصطکاک صحیح باعث خواهد شد جمله حذف رسوبات به درستی مدل گردد. لذا، مجموع دقت برآورد در این دو عامل، دقت نهایی مدل رسوب‌گذاری را تضمین خواهد نمود که نتایج این بخش دقت مدل پژوهش حاضر را تأیید می‌نماید.

۴- تحلیل نتایج

نتایج حاصل از شبیه‌سازی در چند بخش مورد بررسی قرار گرفته است. دما و تنش برشی دیواره به عنوان متغیرهای اثرگذار بر رسوب مورد بررسی قرار گرفته، و تغییر توزیع سرعت در خروجی ناشی از تشکیل رسوب به همراه غلظت کک به عنوان نتیجه واکنش، در قالب کانتور و نمودار نشان داده و تحلیل شده‌اند.

۴-۱- کانتور سرعت در خروجی لوله

کانتور سرعت جهت مقایسه تأثیر رسوب در کاهش سطح مقطع جریان، در لوله ساده و سه‌موج مارپیچ در شکل ۵ به تصویر کشیده شده است.



شکل ۵- سرعت در خروجی لوله ساده و سه‌موج مارپیچ بعد از ۷۴ روز کار مبادله کن

با توجه به یکسان در نظر گرفتن دبی جرمی درون لوله، هرگونه افزایش و یا کاهش سرعت نشانگر مستقیمی از تغییر سطح مقطع لوله به دلیل تغییر ضخامت رسوب می‌باشد. با توجه به شکل ۵، سرعت جریان عبوری از مرکز لوله، از بیشینه ۱/۸۶ متر بر ثانیه در حالت لوله ساده به ۱/۴۴ متر بر ثانیه برای لوله سه‌موج مارپیچ، (معادل ۲۹ درصد کاهش) تغییر یافته است که نشانگر کاهش رشد رسوب و اثر آن بر روی مسدود نمودن سطح مقطع عبور جریان می‌باشد.

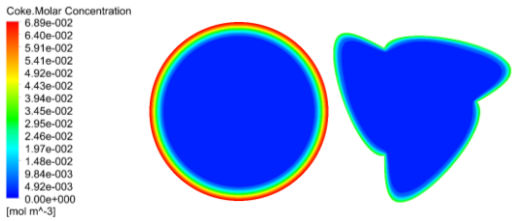
همچنین از مقایسه ضخامت کانتورهای آبی رنگ که مربوط به سیال با سرعت صفر در مجاورت دیواره می‌باشد، به خوبی مشخص است که ضخامت رسوب در حالت استفاده از لوله سه موج مارپیچ کاهش یافته است. این امر ناشی از ایجاد جریان ثانویه و گردشی در لوله موجدار به دلیل انحنای فیزیکی و پیچش دیواره لوله بوده که در نهایت منجر به افزایش تنش برشی در کناره دیواره که محل تشکیل هسته‌های اولیه رسوب بوده گردیده و بدین ترتیب با بهبود مکانیزم برداشت رسوب که وابسته به تنش برشی است، نرخ جدایش رسوبات در لوله سه‌موج مارپیچ تقویت گردیده است.

۴-۲- کانتور غلظت کک در خروجی لوله

در شکل ۶، کانتور غلظت کک در خروجی لوله برای لوله سه‌موج

In Press

مارپیچ و لوله ساده نشان داده شده است.

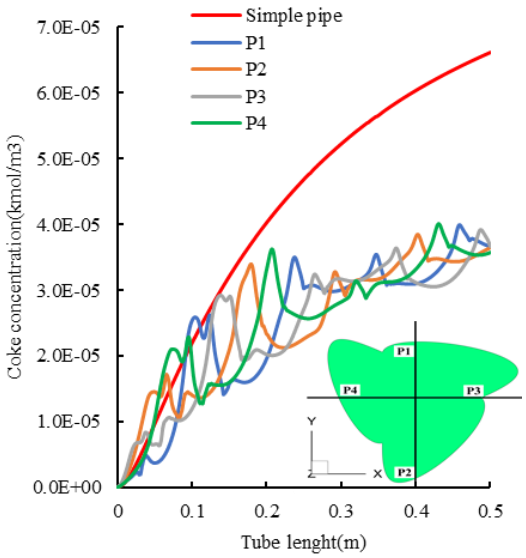


شکل ۶- غلظت کک در خروجی لوله ساده و سه‌موج مارپیچ بعد از ۷۴ روز کار مبادله کن

با مقایسه کانتورهای غلظت کک در خروجی لوله، مشخص است که استفاده از لوله موجدار مارپیچ، بیشینه غلظت کک در خروجی که در مجاورت دیواه اتفاق خواهد افتاد را نسبت به لوله ساده به میزان تقریبی ۴۲ درصد کاهش داده است. از آنجا که غلظت رسوبات در مجاورت دیواره تابع ۲ فرآیند تشکیل و برداشت رسوب می‌باشد، این کاهش غلظت ناشی از تقابل اثرات این دو پدیده در ناحیه مذکور می‌باشد. جریان چرخشی ایجاد شده در طول لوله ناشی از دیواره مارپیچ لوله موجدار، باعث بر هم خوردن لایه مرزی و بهبود انتقال گرما در مجاورت دیواره و کاهش دمای دیواره و دمای فیلم می‌گردد که پیش از این و در مطالعات گذشته تأثیر مثبت این هندسه بر بهبود انتقال گرما تأیید گشته است. این تغییرات دمایی، از طریق معادله‌ی (۱۲) و با توجه به وابستگی نرخ تشکیل رسوب ناشی از واکنش شیمیایی به دمای سطح یا فیلم، بر میزان تبدیل آسفالتن به کک تأثیر گذاشته و تشکیل رسوب را تضعیف می‌نماید. همچنین افزایش ضریب اصطکاک با تغییر هندسه لوله ساده به موجدار مارپیچ پیش از این اثبات شده است. به دلیل این افزایش در ضریب اصطکاک و به تبع آن افزایش تنش برشی، نیروی وارد شده بر ذرات آسفالتن در مجاورت دیواره که در حال تبدیل به کک بوده و یا تبدیل شده‌اند افزایش یافته و فرآیند جداشدن آنها از کنار دیواره را تسهیل می‌نماید. نتیجه همراهی این دو اثر متأثر از لوله موجدار مارپیچ(کاهش دمای دیواره به دلیل بهبود انتقال گرما و افزایش تنش برشی به دلیل افزایش ضریب اصطکاک) در نهایت سبب کاهش میزان رسوب واکنش شیمیایی، در صورت به کارگیری این لوله خواهد.

۴-۳- توزیع رسوب در طول لوله

جهت بررسی نحوه تشکیل رسوب در طول لوله، میزان غلظت کک تشکیل شده روی دیواره، در امتداد محور لوله و روی ۴ خط حاصل از تقاطع دیواره لوله و صفحات متعامد $y=0$ و $x=0$، در شکل ۷ نمایش داده شده است.



شکل ۷- غلظت کک در لوله ساده و سه موج مارپیچ بعد از ۷۴ روز کارکرد مبادله کن در امتداد چهار خط طولی از دیواره

اولین و مهمترین نکته، به وجود آمدن نوسان و تغییرات موضعی غلظت و شدت رسوب روی دیواره لوله سه‌موج مارپیچ نسبت به لوله ساده در امتداد محور آنها است. به عبارت دیگر روند یکنواخت افزایش غلظت رسوب در لوله ساده از ورودی به خروجی در تمام محیط داخل لوله، به رسوب نوسانی در لوله سه‌موج مارپیچ در تمامی وجوه تغییر یافته است. با توجه به حساسیت رسوب واکنش شیمیایی به دمای نزدیک دیواره و تنش برشی، هرگونه تغییر موضعی این کمیت‌ها بر روی نرخ تشکیل رسوب اثرگذار بوده و باعث ایجاد توزیع محلی غلظت رسوب در مقایسه با لوله ساده خواهد شد. این تغییرات محلی دما و تنش برشی که خود ناشی از تعامل میان اثرات هندسه لوله و جریان های ثانویه و گردابه‌های ایجاد شده‌اند در شکل ۸ و ۹ بررسی شده‌اند.

همچنین با مقایسه نمودار قرمز رنگ مربوط به لوله ساده با سایر نمودارها در شکل ۷، مربوط به لوله مارپیچ، می‌توان کاهش شدت رسوب روی دیواره را به خوبی تأیید نمود. گرچه در ابتدای لوله (تا ۲۰ سانتی متر پس از ورودی) سقف غلظت کک روی دیواره لوله مارپیچ نزدیک به لوله ساده بوده است، پس از آن با کاهش قابل ملاحظه، میزان کک در وجوه مختلف لوله مارپیچ نسبت به لوله ساده کاهش یافته است(از اواسط لوله تا خروجی). این امر ناشی از افزایش تنش برشی در امتداد لوله است که این توزیع تنش برشی را می‌توان در شکل ۸ مشاهده کرد. همچنین، در برخی نقاط، میزان غلظت کک در لوله مارپیچ بیشتر از مقدار متناظر آن در لوله ساده بوده است، که با دقت در شکل ۸ می‌توان دریافت این نقاط منطبق بر محل‌هایی است که تنش برشی در لوله موجدار نسبت به لوله ساده کاهش یافته است.

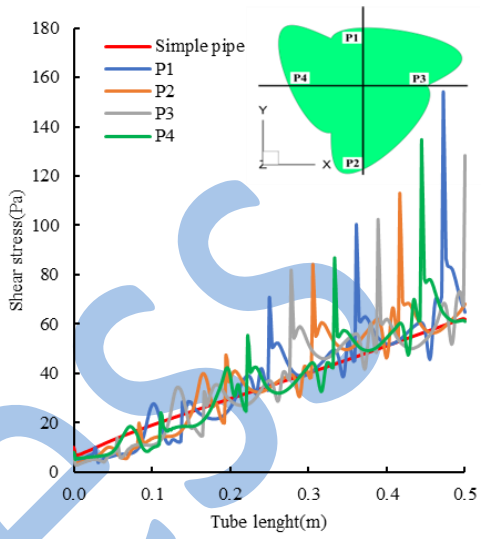
۴-۴- توزیع تنش برشی در طول لوله

در نبود اطلاعات دقیق در خصوص مکانیزم برداشت رسوب از کنار دیواره، تنش برشی همانگونه که در معادله‌ی نیمه تجربی آستانه رسوب‌گذاری، که توسط ابرت و پانچال[۳۳] ارائه شده است، نماینده مکانیزم‌های مختلف موثر بر جدایش رسوب در نظر گرفته می‌شود.

In Press

$$\frac{dR_f}{dt} = \alpha Re^{\beta} \exp\left(\frac{-E}{RT_f}\right) - \gamma \tau_w \qquad (۱۳)$$

در این مدل R_f مقاومت رسوب‌گذاری، Re عدد رینولدز جریان سیال انتخاب شده، R ثابت گازها، T_f دمای فیلم، τ_w تنش برشی دیواره، E انرژی فعال‌سازی واکنش شیمیایی و α ، β ، γ پارامترهای مدل می‌باشند و از رگرسیون داده‌های تجربی به دست می‌آیند.

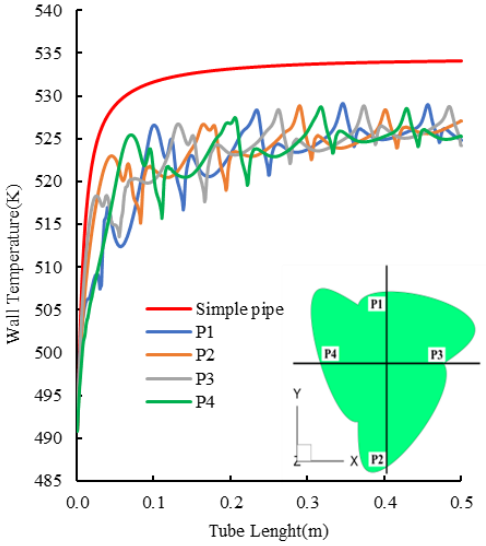


شکل ۸- تنش برشی در لوله ساده و سه موج مارپیچ بعد از ۷۴ روز کارکرد مبادله کن در امتداد چهار خط طولی از دیواره

نتایج ارائه شده در شکل ۸، میزان تنش برشی دیواره برای لوله ساده و موجدار را نشان می‌دهد. بیشینه تنش برشی در لوله موجدار نسبت به لوله ساده تقریباً ۱۵۸ درصد افزایش یافته است. لذا، این افزایش قابل ملاحظه در تنش برشی یکی از عوامل موثر بر کاهش میزان تشکیل کک در مجاورت دیواره، هنگام استفاده از لوله موجدار می‌باشد. این نتیجه کاملاً همسو با نتایج مطالعات پیشین می‌باشد که در صورت استفاده از روش‌های بهبود انتقال گرما که سبب افزایش تنش برشی می‌شوند، رسوب در نفت خام کاهش خواهش یافت.

۴-۵- توزیع دما در طول لوله

یکی از متغیرهای تأثیرگذار بر نرخ تشکیل رسوب مطابق با رابطه ۱۲، دمای سیال نفت خام می‌باشد. با توجه به در نظر گرفتن واکنش سطحی تشکیل کک روی دیواره در پژوهش حاضر، در شکل ۹ تغییرات دمای دیواره در امتداد طولی ۴ نقطه از لوله بررسی شده است. مطابق با نمودار قرمز رنگ در شکل ۹ و در لوله ساده، دمای دیواره در امتداد محور به صورت غیر نوسانی افزایش یافته است. این امر به دلیل عدم وجود تغییرات محلی در آهنگ انتقال گرما همرفتی و تنش برشی، و در نتیجه رشد یکنواخت رسوب از ابتدا تا انتهای لوله ساده است، که نتیجه آن تشکیل رسوب با ضخامت ثابت و بدون نوسان‌های موضعی در برش‌های عرضی سطح مقطع لوله است. اما در حالت استفاده از لوله موجدار به عنوان مجرای عبور جریان، تغییرات محلی دمای دیواره که بیانگر نوسان در آهنگ انتقال گرما همرفتی و مقاومت(ضخامت) رسوب است مشاهده می‌گردد.



شکل ۹- دمای دیواره در لوله ساده و سه موج مارپیچ بعد از ۷۴ روز کارکرد مبادله کن در امتداد چهار خط طولی از دیواره

موقعیت‌های دارای دمای بیشینه، بیانگر وجود نقاط داغ در دیواره لوله می‌باشند که ضخامت و غلظت رسوب در این محل‌ها بیشتر از باقی نقاط می‌باشد. با توجه به پایین‌تر بودن ضریب انتقال گرما همرفتی در لوله ساده، دمای سطح در این لوله نسبت به لوله موجدار بالاتر خواهد بود، در نتیجه، نرخ تشکیل واکنش شیمیایی بالاتر بوده و مقاومت رسوب(ضخامت رسوب) در این لوله نسبت به لوله موجدار بیشتر خواهد بود. این در حالی است که به دلیل وجود جریان چرخشی و برهم خوردن لایه مرزی، و شکسته شدن آن به صورت متناوب در طول لوله موجدار، انتقال گرما بهبود یافته و دمای سطح لوله کمتر خواهد بود. در ادامه، این دمای سطح کمتر، میزان رسوب کمتری تولید خواهد کرد، و رسوب کمتر خود باعث افزایش کمتر دمای سطح خواهد شد.

۵- نتیجه گیری

در پژوهش حاضر رسوب واکنش شیمیایی آسفالتن و تبدیل آن به کک در لوله سه‌موج مارپیچ به عنوان یک هندسه بهبود یافته جهت استفاده در مبادله کن‌های گرمایی بررسی شده و نتایج زیر حاصل گردیده است:

۱- سرعت در مرکز خروجی لوله سه‌موج مارپیچ به میزان ۲۹ درصد نسبت به لوله ساده کاهش یافت که نشانگر کاهش انسداد سطح مقطع لوله ناشی از افزایش ضخامت رسوب است.

۲- در مقایسه غلظت کک در خروجی لوله ساده و سه‌موج مارپیچ، کاهشی به میزان ۴۲ درصد در متغیر مذکور مشاهده گردید. همچنین قیاس کانتورهای غلظت کک، نتیجه بند اول مبنی بر کاهش ضخامت رسوب در خروجی لوله در صورت استفاده از لوله موجدار مارپیچ را تأیید نمود.

۳- نمودار تغییرات غلظت کک روی دیواره لوله، به عنوان شاخصی از تییرات محلی رسوب در طول لوله مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد غلظت رسوب به صورت محلی و

In Press

در نقاط مختلف دیواره لوله موجدار، بر خلاف لوله ساده متغیر بوده و مقدار آن از مقدار مرتبط با حالت رشد یکنواخت در لوله ساده کمتر خواهد بود.

۴- با همپوشانی نمودارهای شکل ۷، ۸ و ۹ (غلظت رسوب، تنش برشی و دمای سطح)، می‌توان دریافت نتایج پژوهش حاضر منطبق بر روابط نیمه تجربی تشکیل رسوب واکنش شیمیایی در نفت خام، مانند رابط ابرت و پانچال(معادله‌ی ۱۳) است که در این روابط آهنگ زمانی تغییرات ضخامت رسوب، به صورت معکوس با تنش برشی و به صورت مستقیم با دمای سطح در ارتباط است.

۵- با توجه به نمودارهای شکل‌های ۷، ۸ و ۹، می‌توان دریافت کنترل رسوبگذاری در لوله سه‌موج مارپیچ بیشتر تحت تأثیر تنش برشی می‌باشد. به نحوی که در نیمه انتهایی لوله و با افزایش قابل ملاحظه تنش برشی(افزایش ۱۵۸ درصدی)، به دلیل کاهش سطح مقطع و افزایش سرعت و تأثیرات جریان چرخشی ایجاد شده غلظت رسوب به حد نهایی خود متمایل گردیده است.

۶- با توجه به تغییرات مشاهده شده در متغیرهای اثرگذار بر رسوب واکنش شیمیایی مانند افزایش تنش برشی و کاهش دمای سطح، می‌توان پتانسیل لوله‌های بهبود یافته در کاهش میزان رسوب را مثبت ارزیابی نمود.

۶- فهرست علائم

C_p	گرمای ویژه $(J\ kg^{-1}K^{-1})$
D_j	ضریب پخش جرم گونه J (m^2s^{-1})
D_b	قطر دایره محاط در لوله سه‌موج
D_e	قطر دایره محیط بر لوله سه‌موج
D_n	قطر اسمی لوله سه‌موج
E_a	انرژی فعالسازی
G_k	نرخ تشکیل k
G_ω	نرخ تشکیل ω
k	نرخ تشکیل انرژی جنبشی آشفته
L	طول لوله (m)
m	جرم گونه رسوب یافته (kg)
M_w	وزن مولکولی $(kg\ kmol^{-1})$
p	فشار (Pa)
P	گام پیچش
r_j	نرخ واکنش ذاتی گونه j
R	ثابت جهانی گاز $(J\ kmol^{-1}K^{-1})$
R_f	مقاومت رسوب (m^2KkW^{-1})
Re	عدد رینولدز
SST	انتقال تنش برشی
t	زمان (s)
T	دما (K)
TET	لوله سه‌موج مارپیچ
$\bar{u}$	بردار سرعت (ms^{-1})
$\bar{x}$	بردار مکان (m)
Y_j	جزء جرمی گونه j
Y_k	نرخ اضمحلال k
Y_ω	نرخ اضمحلال ω

زیرنویس:

b	توده(دمای توده)
f	فیلم(دمای فیلم)

حروف یونانی:

α	ثابت در معادله پانچال
β	ثابت در معادله پانچال
γ	ثابت در معادله پانچال
ε	نرخ اتلاف انرژی جنبشی آشفته
μ	لزجت دینامیکی $(\mathrm{Kg}\ m^{-1}s^{-1})$
μ_t	لزجت دینامیکی آشفته $(kg\ m^{-1}s^{-1})$
ρ	چگالی $(kg\ m^{-3})$
σ	پرانتل آشفته
τ	تنش برشی
ω	نرخ اتلاف انرژی جنبی آشفته

۷- مراجع

[1] Jin Z-j, Liu B-z, Chen F-q, Gao Z-x, Gao X-f, Qian J-y. CFD analysis on flow resistance characteristics of six-start spirally corrugated tube. International Journal of Heat and Mass Transfer. 2016; 103:1198-207.

[2] Liaw KL, Kurnia JC, Putra ZA, Aziz M, Sasmito AP. Enhanced turbulent convective heat transfer in helical twisted multilobe tubes. International Journal of Heat and Mass Transfer. 2023 Mar 1;202:123687.

[3] Pethkool S, Eiamsa-Ard S, Kwankaomeng S, Promvonge P. Turbulent heat transfer enhancement in a heat exchanger using helically corrugated tube. International Communications in Heat and Mass Transfer. 2011;38(3):340-7.

[4] Laohalertdecha S, Wongwises S. The effects of corrugation pitch on the condensation heat transfer coefficient and pressure drop of R-134a inside horizontal corrugated tube. International Journal of Heat and Mass Transfer. 2010;53(13-14):2924-31.

[5] Xu Z, Zhang Z-B. Experimental investigation of the applied performance of several typical enhanced tubes. Journal of Enhanced Heat Transfer. 2010;17(4).

[6] García A, Solano J, Vicente P, Viedma A. The influence of artificial roughness shape on heat transfer enhancement: Corrugated tubes, dimpled tubes and wire coils. Applied Thermal Engineering. 2012; 35:196-201.

[7] Qian J-y, Yang C, Chen M-r, Jin Z-j. Thermohydraulic performance evaluation of multi-start spirally corrugated tubes. International Journal of Heat and Mass Transfer. 2020; 156:119876.

[8] Diabis FA, Mazlan N, Supeni EE. An experimental study on the effect of lobe swirl device and its transition parts on thermal performance using Graphene-CuO/water nanohybrid. Case Studies in Thermal Engineering. 2025; 68:105925.

[9] Azizi AS, Razbin M, Mousavi SM, Li M, Darzi AAR. Enhancing thermal efficiency in twisted tri-lobe double pipe heat exchangers via integrated CFD and AI approaches. International Journal of Thermal Sciences. 2024; 206:109331

In Press

قالب پیش‌نویس مجلهٔ مهندسی مکانیک دانشگاه تبریز (لطفاً این نوشته، در فایل ارسالی حذف نشود)

swirl generator. Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics. 2020 Jan 1;14(1):1198-214.

[10] Pan C, Dai Y. Flow and Heat Transfer Mechanism and Optimization Design of Spirally Corrugated Tubes. Journal of Thermal Science and Engineering Applications. 2024;16(10):101001.

[11] Liu K, Che X, Li Q, Cai W. Numerical study on convective heat transfer and flow characteristics in twisted tri-lobed tubes. Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects. 2023 Aug 1;45(3):7560-77.

[12] Somerscales EF, Bergles A. Fouling characteristics of enhanced surfaces. Fouling Mitigation of Industrial Heat-Exchange Equipment Panchal, Bott, Somerscales and Toyama (eds), Begell House, New York. 1997:73-99.

[13] Somerscales EF, Bergles AE. Enhancement of heat transfer and fouling mitigation. Advances in heat transfer. 1997; 30:197-253.

[14] Ishiyama EM, Pugh SJ, Watkinson AP. Interaction of heat transfer enhancement and fouling in operating heat exchangers. Heat Transfer Engineering. 2024;45(15):1327-37.

[15] Fukumoto K, Zhang W, Choi C, Tang F, Machida H, Norinaga K. CFD simulation of crude oil fouling from laboratory-to industrial-scale heat exchangers using a weak coupling approach. Applied Thermal Engineering. 2025 Jan 1;258:124614.

[16] Kerraoui I, Mahdi Y, Mouheb A. CFD investigation of fouling mechanisms in the crude oil preheat network. Heat and Mass Transfer. 2021;57(9):1411-24.

[17] Yang J. Computational fluid dynamics studies on the induction period of crude oil fouling in a heat exchanger tube. International Journal of Heat and Mass Transfer. 2020; 159:120129.

[18] Chambon A, Anxionnaz-Minvielle Z, Cwicklinski G, Guintrand N, Buffet A, Vinet B. Shell-and-tube heat exchanger geometry modification: An efficient way to mitigate fouling. Heat Transfer Engineering. 2020;41(2):170-7.

[19] Paz C, Suárez E, Conde M, Vence J. Development of a computational fluid dynamics model for predicting fouling process using dynamic mesh model. Heat Transfer Engineering. 2020;41(2):199-207.

[20] Qian J-y, Yang C, Wu Z, Liu X-l, Gao X-f, Jin Z-j, et al. Analysis of fouling in six-start spirally corrugated tubes. Heat Transfer Engineering. 2020;41(22):1885-900

[21] Estaji, E., Shabanian S.R., Numerical study of forced convection heat transfer and pressure drop of AlN and Al2O3 hybrid nanofluids inside the tube with different geometric sections, Mechanical Engineering Journal, University of Tabriz. 1404; 55(4), 33-41. 10.22034/jmeut.2025.64638.3488

[22] Amini Ahour S., Jafar M., Ranjbar, S.F., Hassannejhad R., Experimental and numerical investigation of heat transfer of flat plate using channels with different cross-sections, Mechanical Engineering Journal, University of Tabriz 1404; in press. 10.22034/jmeut.2025.67470.3563.

[23] Ujević Andrijić Ž, Rimac N. Data-driven fouling detection in refinery preheat train heat exchangers using neural networks and gradient boosting. Sensors. 2025 Aug 9;25(16):4936.

[24] Bayat M, Aminian J, Bazmi M, Shahhosseini S, Sharifi K. CFD modeling of fouling in crude oil pre-heaters. Energy Conversion and Management. 2012; 64:344-50.

[25] Azizi AS, Mousavi SM, Vafai K, Darzi AA. Comprehensive review of heat transfer and fluid flow characteristics of elliptical/oval twisted tubes. International Journal of Heat and Fluid Flow. 2025 Mar 1;112:109639.

[26] Yan T, Qu J, Sun X, Chen Y, Hu Q, Li W. Numerical evaluation on the decaying swirling flow in a multi-lobed

In Press

[27] Kongkaitpaiboon V, Promthaisong P, Chuwattanakul V, Wongcharee K, Eiamsa-Ard S. Effects of spiral start number and depth ratio of corrugated tube on flow and heat transfer characteristics in turbulent flow region. Journal of Mechanical Science and Technology. 2019;33(8):4005-12.

[28] Menter F, Esch T, Kubacki S. Transition modelling based on local variables. Engineering turbulence modelling and experiments 5: Elsevier; 2002. p. 555-64.

[29] Patankar S. Numerical heat transfer and fluid flow: CRC press; 2018

[30] Łopata S, Ocłoń P. Numerical study of the effect of fouling on local heat transfer conditions in a high-temperature fin-and-tube heat exchanger. Energy. 2015 Dec 1;92:100-16.

[31] Flores-Balderas JN, Alfaro-Ayala JA, Ramirez-Minguela JJ, Uribe-Ramirez AR, Lopez-Nunez OA. A new approach to predict fouling using a transient CFD model and dynamic mesh. Thermal Science. 2022;26(6 part B):5001-13.

[32] Jamialahmadi M, Soltani B, Müller-Steinhagen H, Rashtchian D. Measurement and prediction of the rate of deposition of flocculated asphaltene particles from oil. International Journal of Heat and Mass Transfer. 2009 Sep 1;52(19-20):4624-34.

[33] Ebert W, Panchal CB. Analysis of Exxon crude-oil-slip stream coking data. Argonne National Lab., IL (United States); 1995 Dec 30.

In Press