

Numerical Study to Enhance the Thermal Performance of Vertical Thermosyphon Reboilers and Reduce Sediment Using Various Turbulators

Yaser Bakhshoudehnia¹, Hadi Soltani^{2,*}, Behnaz MemarMaher³, Mahmoud Bayat⁴

¹Ph.D. student, Department of chemical engineering, Ah.C., Islamic Azad University, Ahar, Iran

²Assistant Professor, Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering, University of Maragheh, Maragheh, Iran

³Assistant Professor, Department of chemical engineering, Ah.C., Islamic Azad University, Ahar, Iran

⁴Research Institute of Petroleum Industry (RIPI), West Blvd. Azadi Sport Complex, Tehran, Iran

Email: h.soltani@maragheh.ac.ir

Abstract

This study numerically investigates the effects of spring wire and twisted tape turbulators on the thermo-hydraulic performance and fouling behavior of vertical thermosyphon reboilers using validated computational fluid dynamics (CFD). Spring wire inserts with pitch spacings of 50, 76, and 95 mm and twisted tape inserts with pitch spacings of 150, 190, and 225 mm were evaluated over Reynolds numbers of 7000–20,000. Key performance indicators, including the heat transfer coefficient, subcooled length, pressure drop, friction factor, thermal performance factor (TPF), and fouling thickness, were analyzed. The primary objective of this study is to provide an efficient numerical approach for identifying the optimum turbulence promoter based on thermo-hydraulic performance and fouling mitigation in vertical thermosyphon reboilers. The key finding of this research is the identification of the 50 mm helical wire insert as the most effective configuration, offering the highest thermal performance factor together with approximately 52% fouling reduction. These findings provide practical guidance for the optimal design and performance enhancement of industrial heat exchangers in petrochemical and refinery units.

Keywords: Vertical thermosyphon reboilers; Computational Fluid Dynamics; Convective heat transfer; Turbulence promoters; Thermal performance factor; Fouling.

مطالعه عددی جهت بهبود عملکرد حرارتی جوش آورهای ترموسیفونی عمودی به همراه کاهش میزان رسوب با استفاده از آشفته سازه های مختلف

یاسر بخشوده نیا^۱، هادی سلطانی^{۲*}، بهناز معمارماهر^۳، محمد بیات^۴

^۱ دانشجوی دکتری، گروه مهندسی شیمی، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد اهر، اهر، ایران
(Bakhshoudehnia@iaui.ac.ir)

^۲ استادیار گروه مهندسی شیمی، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه مراغه، مراغه، ایران (h.soltani@maragheh.ac.ir)

^۳ استادیار گروه مهندسی شیمی، واحد اهر، دانشگاه آزاد اسلامی، اهر، ایران (be.maher@iaui.ac.ir)

^۴ پژوهشگاه صنعت نفت (RIPI)، بلوار غربی، مجموعه ورزشی آزادی، تهران، ایران (bayatm@ripi.ir)

Email: h.soltani@maragheh.ac.ir

چکیده: در این پژوهش، اثر آشفته سازه های سیم فنی و نوار پیچ خورده بر عملکرد حرارتی و رسوب گذاری در جوش آورنده های ترموسیفونی عمودی با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی بررسی شد. آشفته سازه های سیم فنی با گام های ۵۰، ۷۶ و ۹۵ میلی متر و نوارهای پیچ خورده با گام های ۱۵۰، ۱۹۰ و ۲۲۵ میلی متر در محدوده اعداد رینولدز ۷۰۰۰ تا ۲۰۰۰۰ شبیه سازی شدند. ضریب انتقال حرارت جابجایی، طول ناحیه زیرسرد، افت فشار، ضریب اصطکاک، ضریب عملکرد حرارتی و ضخامت رسوب با استفاده از یک مدل عددی اعتبارسنجی شده ارزیابی شد. هدف نهایی این پژوهش، ارائه یک رویکرد عددی کارآمد برای شناسایی بهینه ترین آشفته ساز از نظر عملکرد حرارتی- هیدرولیکی و کاهش رسوب در جوش آورنده های ترموسیفونی عمودی است. دست آورد کلیدی پژوهش، معرفی سیم فنی با گام ۵۰ میلی متر به عنوان موثرترین گزینه با بیشترین کاهش رسوب (۵۲٪) و بالاترین ضریب عملکرد حرارتی است که می تواند به عنوان راهنمایی برای طراحی بهینه مبدل های حرارتی صنعتی در واحدهای پتروشیمی و پالایشگاهی، مورد استفاده قرار گیرد.

واژگان کلیدی: جوش آورنده های ترموسیفونی عمودی، دینامیک سیالات محاسباتی، انتقال حرارت جابجایی، آشفته سازه ها، ضریب عملکرد حرارتی، رسوب گذاری.

۱- مقدمه

در سال‌های اخیر، فناوری افزایش انتقال حرارت به‌عنوان یکی از راهبردهای اصلی کاهش سطح تبادل، هزینه سرمایه‌گذاری و مصرف انرژی در مبدل‌های حرارتی مورد توجه قرار گرفته است [۱ و ۲]. جوش‌آور ترموسیفون عمودی، یکی از تجهیزات متداول انتقال حرارت در صنایع پالایشگاهی، پتروشیمی و فرآیندهای شیمیایی است. جریان در این واحدها به‌شناوری ایجاد شده در اثر تبخیر وابسته است؛ بنابراین، سرعت جریان نه تنها به نرخ انتقال حرارت، بلکه به میزان تبخیر، اصطکاک و افت فشار استاتیکی نیز بستگی دارد. فشار هیدرواستاتیکی موجود در پایه یک جوش‌آور ترموسیفون عمودی، مانع از جوشش می‌شود و ناحیه زیرسرد^۱ را در قسمت ورودی صفحه لوله‌ها پدید می‌آورد. طول این ناحیه گاهی به درصد قابل توجهی از طول لوله نزدیک می‌شود. از سویی، امروزه تلاش می‌شود تا با به‌کارگیری فناوری نوین، از طول این منطقه کاسته شود. از آنجایی که انتقال حرارت همرفتی تک فاز، مکانیزم غالب در این ناحیه است، ضریب انتقال حرارت متوسط در سمت لوله به‌طور محسوسی کاهش می‌یابد. برای بهبود انتقال حرارت، می‌توان از آشفته‌سازها، بدون ایجاد انسداد در جریان استفاده کرد [۳]. آشفته‌سازها تجهیزاتی هستند که درون مجاری جریان قرار می‌گیرند تا با ایجاد جریان‌های چرخشی در سیال، نرخ انتقال حرارت را افزایش دهند [۴]. آشفته‌سازهایی نظیر نوارهای پیچ‌خورده، بال‌ها، ژنراتورهای چرخشی، بافل‌ها و غیره، یکی از موثرترین تکنیک‌های غیرفعال انتقال حرارت در سیستم‌های مختلف محسوب می‌شوند. نوارهای پیچ‌خورده از یک نوار فلزی که به‌صورت مارپیچ تابیده شده است، تشکیل می‌شوند. نتایج اثر تعداد پیچش نیز نشان داد که تعداد پیچش در رینولدز پائین اثر مثبت اندک و در رینولدزهای بالا اثر فرآیندها تری خواهد داشت [۵]. ایجاد جریان‌های ثانویه در جهت شعاعی، برهم‌خوردن لایه مرزی، افزایش آشفستگی، بهبود جابه‌جایی سیال در لوله و در نهایت افزایش ضریب انتقال حرارت از اثرات آن‌ها می‌باشد. لین و همکاران^۲ [۶] با بررسی چهار زاویه حمله^۳ و فاصله محوری مختلف برای نوار پیچ‌خورده، دریافتند که استفاده از این آشفته‌سازها می‌تواند نرخ انتقال حرارت را به‌طور قابل توجهی بهبود بخشد. ایامسارد و همکاران^۴ [۷] افزایش انتقال گرما نسبت داده شده به نوارهای پیچ‌خورده مارپیچی را مطالعه کردند. نتایج نشان‌دهنده افزایش نرخ انتقال گرما و ضریب اصطکاک با کاهش نسبت پیچ نوار و نسبت گام مارپیچی بود. سلام و همکاران^۵ [۸] یک لوله مدور مجهز به نوار پیچ‌خورده با برش مستطیلی را ارزیابی کردند و مشاهده کردند که راندمان افزایش انتقال حرارت در محدوده ۱/۹ تا ۲/۳ بوده که با افزایش عدد رینولدز افزایش می‌یابد. ایامسارد و همکاران [۹] یک مدل عددی سه بعدی از یک لوله پیچ‌خورده همراه با یک نوار پیچ‌خورده سه کاناله برای مطالعه افزایش انتقال حرارت، ایجاد کردند. مطالعات جدید نیز نشان می‌دهند که کاهش گام یا نسبت پیچش آشفته‌سازها معمولاً موجب افزایش عدد ناسلت و هم‌زمان افزایش افت فشار می‌شود. نخچی و همکاران [۱۰] در آزمایش نوارهای پیچ‌خورده دوبرشی، افزایش ۹۶ تا ۱۷۷ درصدی انتقال حرارت و ضریب عملکرد حرارتی تا ۱/۶۳ را گزارش کردند. غلامعلی‌زاده و همکاران [۱۱] به بررسی انتقال انرژی حرارتی و افزایش افت فشار در مبدل حرارتی لوله‌ای مارپیچی مجهز به آشفته‌ساز سیم فنی ساخته شده از مس از

^۱ Subcooled

^۲ Lin et al.

^۳ Attack angle

^۴ Eiamsa-Ard et al.

^۵ Salam et al.

طریق شبیه‌سازی و مدل‌سازی CFD پرداختند. یکی از معضلات انتقال حرارت و افت فشار وجود پدیده رسوب است که در ۹۰ درصد مبدل‌های حرارتی وجود دارد و منجر به کاهش عملکرد مبدل می‌شود [۱۲ و ۱۳]. همچنین سبب افزایش شدید گازهای گلخانه‌ای می‌شود [۱۴]. دنگ و وانگ [۱۵] نشان دادند که جریان ثانویه ایجادشده توسط سیم پیچیده‌شده، سازوکار اصلی تقویت اختلاط و انتقال حرارت است. کابل و همکاران [۱۶] در اعتبارسنجی CFD نوار پیچ‌خورده تأکید کردند که انتخاب روش دیواره و کنترل کمیت نزدیک دیواره می‌تواند به‌اندازه یا بیش از انتخاب مدل آشفتگی بر پیش‌بینی عدد ناسلت و ضریب اصطکاک اثرگذار باشد. چندین گزارش متناقض در مورد اثر سرعت سیال ارائه شده است. اکثر آن‌ها به این نتیجه رسیدند که سرعت جریان بالاتر، از ایجاد رسوب جلوگیری می‌کند [۱۷ و ۱۸] و برخی دریافتند که آن را تقویت می‌کند یا اثر متغیری دارد [۱۹ و ۲۰]. وانگ و همکاران^۱ [۲۱] اثرات سرعت جریان را بر رسوب CaCO_3 در لوله‌های صاف مورد مطالعه قرار دادند و مشاهده کردند که بسته به مکانیسم کنترل غالب، تأثیر سرعت جریان می‌تواند متفاوت باشد. مؤف و همکاران [۲۲] عملکرد حرارتی و افت فشار جریان دوفازی در لوله مارپیچ را تحت شار حرارتی ثابت بررسی کردند. زارع‌علی‌آبادی و همکاران [۲۳] عملکرد یک مبدل ترموسیفونی را به‌صورت تجربی و نظری ارزیابی کردند. لوو و کائو^۲ [۲۴] یک مدل کرن-سیتن اصلاح‌شده با درنظر گرفتن ضریب هم‌رسوبی روغن-گردوغبار و جمله رسوب شیمیایی بر اساس معادله آرنیوس ارائه دادند که با خطای کمتر از ۷/۳٪، رسوب را پیش‌بینی می‌کرد. جعفری‌نصر و مجیدی‌گیوی [۲۵] مدل آستانه را برای رسوب در پیش‌گرم‌کن‌های نفت خام با درنظر گرفتن دماهای مختلف دیواره لوله، ارائه کردند که شامل یک عبارت برای تشکیل رسوب و یک عبارت برای حذف رسوب ناشی از تنش برشی دیواره بود. حسن‌نژاد و همکاران [۲۶] به بررسی راهکارهای کاهش رسوب در مبدل‌های پالایشگاهی پرداخته و روش‌های نوینی را برای افزایش راندمان عملیاتی معرفی کردند. بیات و همکاران [۲۷]، مدل‌سازی CFD رسوب در پیش‌گرم‌کن‌های نفت خام را با تقسیم نفت خام به سه جزء پترولیوم، آسفالتین و نمک انجام دادند که در آن ضرایب نفوذ دوتایی به‌صورت گروه‌بندی‌شده مدل‌سازی شده بود.

تاکنون مطالعات زیادی بر روی تأثیر استفاده از آشفته‌سازها بر روی بهبود انتقال حرارت در انواع مختلف مبدل‌های حرارتی انجام شده است. بیش‌تر پژوهش‌های پیشین به‌صورت مجزا به انتقال حرارت یا رسوب‌گذاری پرداخته‌اند، در حالی که در پژوهش حاضر، تأثیر آشفته‌سازها بر هر دو پدیده به‌صورت هم‌زمان و با استفاده از مدل کرن-سیتن اعتبارسنجی‌شده، ارزیابی می‌شود. همچنین تاکنون مطالعه‌ای به‌طور خاص به تأثیر آشفته‌سازها بر کاهش طول منطقه زیرسرد در این نوع مبدل‌ها نپرداخته است. پژوهش حاضر مقایسه مستقیم و جامع سیم فنری و نوار پیچ‌خورده را با شش گام متفاوت در شرایط عملیاتی مشابه ارائه می‌دهد.

۲- بخش تجربی

۱-۲ هندسه مدل

برای تحلیل عددی جوش‌آور ترموسیفونی عمودی، با توجه به مطالعات کامل و همکاران^۳ [۲۸] لوله‌ای عمودی

^۱ Wang et al.

^۲ Lou and Cao

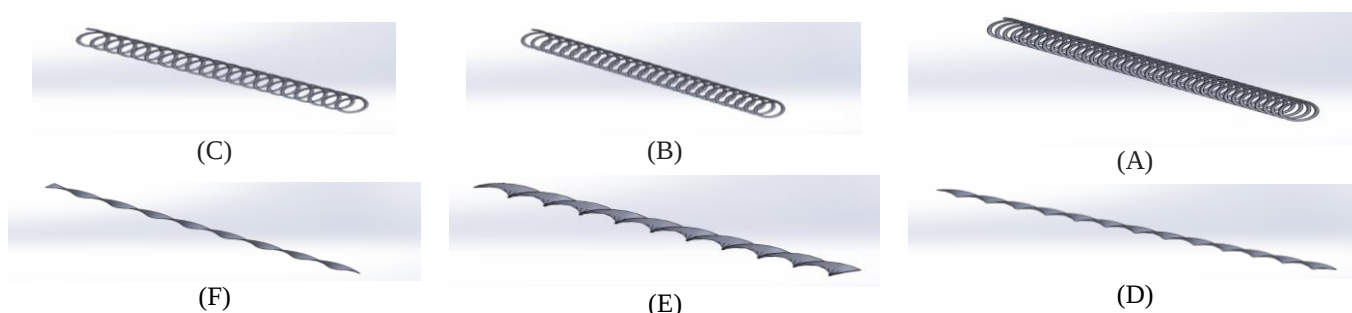
^۳ Kamil et al.

به قطر داخلی ۲۵/۵۶ mm و طول ۱/۹ m در نظر گرفته شد. دو نوع آشفته‌ساز سیم فنری با سیم به ضخامت ۲ mm و نوار پیچ خورده با ورقی به ضخامت ۱ mm برای مشخص شدن نحوه تأثیر آن‌ها مورد بررسی قرار گرفت. برای تحلیل دقیق‌تر تأثیر استفاده از آشفته‌سازهای انتخابی، هریک از آن‌ها در گام‌های چرخش متفاوت شبیه‌سازی و مدل‌سازی شد. به‌طور دقیق‌تر در جدول (۱) گام چرخش‌های مختلف انتخابی برای آشفته‌سازهای مورد بررسی، گزارش شده است. همچنین شکل (۱) هندسه آشفته‌سازهای شبیه‌سازی شده را نشان می‌دهد.

جدول ۱. گام چرخش‌های انتخابی برای آشفته‌سازها.

Table 1. Selected pitch spacings for turbulators.

Row	Wire Coil Twist Pitch (mm)	Twisted Tape Twist Pitch (mm)
1	50	150
2	76	190
3	95	225



شکل ۱. آشفته‌ساز سیم فنری و نوار پیچ خورده با گام چرخش‌های مختلف (A، B و C: آشفته‌ساز سیم‌فنری به ترتیب با گام چرخشی ۵۰mm، ۷۶mm و ۹۵mm، D، E و F آشفته‌ساز نوار پیچ‌خورده به ترتیب با گام چرخشی ۱۵۰mm، ۱۹۰mm و ۲۲۵mm).

Figure 1. Spring-wire and twisted-tape turbulators with various pitch spacings (A, B, and C denote spring-wire turbulators with pitch spacings of 50, 76, and 95 mm, respectively, whereas D, E, and F denote twisted-tape turbulators with pitch spacings of 150, 190, and 225 mm, respectively).

۲-۲ معادلات حاکم

یک رویکرد مبتنی بر میانگین رینولدز برای تجزیه و تحلیل یک جریان تراکم‌ناپذیر حالت پایدار سه بعدی اتخاذ شده است. معادلات پیوستگی، مومنتم و انرژی را می‌توان به‌صورت زیر بیان کرد:

معادله پیوستگی:

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

معادله مومنتم:

$$\frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial x_j} (-\rho \overline{u'_i u'_j}) \quad (2)$$

معادله انرژی:

$$\frac{\partial}{\partial x_i} [u_i (\rho E + p)] = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(-k_{eff} \frac{\partial T}{\partial x_i} \right) \quad (3)$$

که در آن E انرژی کل^۱ و به‌صورت معادله (۴) تعریف می‌شود:

$$E = h - \frac{p}{\rho} + \frac{u^2}{2} \quad (4)$$

¹ Total energy

رویکرد میانگین رینولدز برای مدل سازی آشفتگی نیاز به تنش رینولدز^۱ دارد. روش رایج، استفاده از فر ضیه بوسینسک^۲ است که تنش های رینولدز را به میانگین گرادیان سرعت مرتبط می سازد.

$$-\rho \overline{u'_i u'_j} = \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \left(\rho k + \mu_t \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right) \delta_{ij} \quad (5)$$

$$\mu_t = \rho C_\mu - \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (6)$$

در معادلات (۱) تا (۶)، μ بیانگر ویسکوزیته سینماتیکی، ρ دانسیته، p فشار استاتیکی، u میانگین سرعت، k_{eff} هدایت حرارتی موثر^۳، u'_i مولفه سرعت نوسان^۴، h آنتالپی، μ_t ویسکوزیته گردابه ای، ε نرخ پراکندگی جریان آشفته^۵، δ_{ij} دلتای کرونکر^۶ و C_μ ثابت جریان آشفته^۷ است [۲۹].

در این تحقیق از مدل KS برای مدل سازی رسوب استفاده شده است که اولین بار توسط کرن^۸ و سیتن^۹ معرفی شد [۱۰]. مدل سازی رسوب سطوح انتقال گرما بر اساس رویکرد کرن و سیتن، بدین صورت است که در آن جرم کلی رسوب شده بر روی سطح در زمان معین، از تفاوت بین میزان رسوب جرم به سطح و میزان حذف جرم از سطح به دست می آید [۱۲].

$$\frac{dm}{dt} = m_d - m_r \quad (7)$$

که در آن m جرم رسوب بر سطح است، t زمان، m_d میزان رسوب جرم و m_r نرخ حذف جرم از سطح است. سازو کار رسوب تبلوری در دو مرحله اصلی انجام می شود: انتقال یون ها از توده سیال به مجاورت سطح (معادله (۸)) و اتصال یون های جدا شده به سطح (معادله (۹)) [۳۰]:

$$m_d = \beta (C_b - C_i) \quad (8)$$

$$m_d = k_r (C_i - C_{sat})^n \quad (9)$$

که در آن β ضریب انتقال جرم، k_r ضریب نسبت واکنش از نوع آرنیوسی برای انتگرال گیری سطح، n درجه واکنش و C_b ، C_i و C_{sat} به ترتیب بیانگر غلظت توده، غلظت سطحی و غلظت اشباع می باشند. هریک از معادلات (۸) و (۹) و یا هر دو ممکن است بر مکانیسم رسوب تبلوری، کنترل کننده باشند. اگر اتصال یون های جدا شده از بالک سیال به سطح (معادله (۹)) رسوب را کنترل کند، غلظت واسط می تواند برابر با غلظت سیال ورودی باشد (یعنی نرخ انتقال جرم بسیار بالا است) و رسوب بالک را می توان با عبارت اتصال به سطح توصیف کرد.

انتقال جرم محلول یونی با استفاده از مدل Species و معادله بقای ذره مدل سازی می شود [۳۱]:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho Y_i) + \nabla (\rho \vec{v} Y_i) = -\nabla \cdot \vec{J}_i + S_i \quad (10)$$

که Y_i جز جرمی گونه های i و S_i عبارت منبع^{۱۰} است. عبارت منبع توسط مدل رسوب با استفاده از UDF به

¹ Reynolds stresses

² Boussinesq hypothesis

³ Effective thermal conductivity

⁴ Fluctuation velocity components,

⁵ Turbulent dissipation rate

⁶ Kronecker delta

⁷ Turbulence model constant

⁸ Kern

⁹ Seaton

¹⁰ Source term

نرم افزار Ansys Fluent وارد می شود.

۳-۲ مدل رسوب تبلوری

فرآیند کلی تبلور^۱ ممکن است به وسیله بخش انتقال یون ها^۲ یا بخش واکنش سطحی کنترل شود [۳۲]. با فرض کنترل کنندگی مرحله اتصال رسوب به سطح:

$$m_d = k'_r (C_i - C_{sat})^2 t_{sf} \quad (11)$$

$$K'_r = k'_o e^{-Ea/RT_i} \quad (12)$$

که در این معادلات k'_r بیانگر ثابت نسبت، t_{sf} بیانگر فاکتور زمانی رسوب و k'_o بیانگر عامل پیش نمایی، Ea نشان دهنده انرژی فعال سازی، R ثابت جهانی گازها و T_i دمای سطحی می باشد. همچنین فاکتور زمانی رسوب و سرعت اصطکاک به ترتیب مطابق معادلات (۱۳) و (۱۴) تعریف می شوند:

$$t_{sf} = \frac{\mu_l}{\rho_l V^2} \quad (13)$$

$$V = \sqrt{\tau_w / \rho_l} \quad (14)$$

که در آن V بیانگر سرعت اصطکاک، μ_l ویسکوزیته سیال و ρ_l دانسیته سیال و τ_w تنش برشی روی دیواره می باشد. مدل رسوب شامل دو بخش اتصال به سطح^۳ و فاکتور زمانی رسوب است. فرض بر این است که انتقال جرم از توده سیال به دیواره بی نهایت است و اتصال به سطح، کنترل رسوب را انجام می دهد. درجه واکنش نیز دو در نظر گرفته شده است [۳۱ و ۳۳]. با ترکیب معادلات (۱۱) الی (۱۴) معادله (۱۵) به دست می آید [۱۸]:

$$m_d = k'_o e^{-Ea/RT_i} (C_i - C_{sat})^2 \frac{\mu_l}{\rho_l V^2} \quad (15)$$

مقاومت حرارتی لایه رسوب $R_{f,t}$ در مرحله زمانی معینی (t) به صورت معادله (۱۶) مدل می شود:

$$R_{f,t} = \frac{m_d t}{\rho_f \lambda_f} \quad (16)$$

که در آن λ_f بیانگر ضریب انتقال حرارت هدایتی رسوب^۴ می باشد.

۴-۲ کالبراسیون مدل

پارامترهای مدل کرن-سیتن که در جدول (۲) آورده شده، بر اساس داده های تجربی کمیل و همکاران [۲۸] کالبره شده اند. در این فرآیند، انرژی فعال سازی (Ea) با استفاده از روش آرنیوس و با تطابق نتایج مدل با داده های تجربی مقاومت حرارتی رسوب تعیین شده است.

۵-۲ مقدار پارامتر بی بعد y^+

برای اطمینان از دقت مدل سازی جریان در نزدیکی دیواره، شبکه به گونه ای طراحی شد که مقدار y^+ در تمامی حالات (شامل سطوح آشفته سازها) کمتر از ۱ باشد. بیشینه y^+ در بحرانی ترین حالت (سیم فنری با گام ۵۰ میلی متر) برابر با ۰/۸۹ محاسبه شد که نشان دهنده استفاده از مدل دیواره پیشرفته است. برای دستیابی به این مقدار، ۲۰ لایه متراکم سازی در نزدیکی تمامی دیواره ها با نرخ رشد ۱/۲ اعمال گردید.

¹ Overall crystallization process

² Transport of ions

³ Surface integration term

⁴ Thermal conductivity of the fouling layer

جدول ۲. پارامترهای مدل رسوب کرن-سیتن مورد استفاده در پژوهش.

Table 2. Parameters of the Kern-Seaton fouling model used in this study.

Parameter	Symbol	Value	Unit	Reference
Pre-exponential factor	k'_0	1.2×10^{-4}	$\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} \cdot (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})^{-2}$	[31]
Universal gas constant	R	8.314	$\text{J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$	-
Reference velocity	V_{ref}	0.05	$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	[31]
Reaction order	N	2	-	-
Fouling thermal conductivity	λ_f	2.1	$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$	[12]
Density of fouling	ρ_f	2,700	$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	[12]
Effective diffusion coefficient	D_{eff}	1.2×10^{-9}	$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$	[31]

۲-۶ معیار همگرایی

جرم‌های باقیمانده برای معادلات پیوستگی، مومنتوم و انرژی به ترتیب تا 10^{-5} و 10^{-7} و 10^{-5} کاهش داده شدند. تعادل جرمی و حرارتی در خروجی و ورودی با دقت کم‌تر از ۱٪ کنترل گردید.

۲-۷ تحلیل عدم قطعیت مدل آشفستگی

شبیه‌سازی‌ها برای حالت بحرانی با دو مدل آشفستگی RNG k- ϵ و Realizable k- ϵ انجام شد که نتایج آن در جدول (۳) ارائه شده است.

جدول ۳: تحلیل عدم قطعیت مدل آشفستگی.

Table 3. Turbulence model uncertainty analysis.

Turbulence Model	Heat Transfer Coefficient ($\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$)	Pressure drop (Pa)
RNG k- ϵ	7,780	18,400
Realizable k- ϵ	7,530	17,650
Difference	3.2%	4.1%

۳- شبیه‌سازی عددی

در این مطالعه جهت شبیه‌سازی جریان دوفازی از روش اویلر-اویلر و زیر مدل جوشش استفاده شده است. همچنین از روش جوشش RPI Model جهت شبیه‌سازی رفتار سیال پس از جوشش استفاده شده است. در مدل‌های بررسی شده، در ورودی لوله از شرط مرزی با سرعت معلوم استفاده شده و سرعت ورودی جریان برابر با مقادیر ۰/۰۸۵، ۰/۱۲۵، ۰/۱۸۵ و ۰/۲۴۵ متر بر ثانیه در نظر گرفته شده است [۲۸]. برای خروجی لوله، شرط مرزی فشار خروجی^۱ و برای دیواره‌ها از شرط مرزی شار حرارتی ثابت استفاده شده است. با توجه به سرعت ورودی، سیال کاری و هندسه لوله، عدد رینولدز جریان در حالات مختلف برابر با ۷۰۰۰، ۱۰۰۰۰، ۱۵۰۰۰ و ۲۰۰۰۰ در نظر گرفته شد. لذا جریان درون لوله، آشفته بوده و برای شبیه‌سازی جریان از مدل K- ϵ RNG استفاده شد. در شبیه‌سازی‌های تک فازی، جریان پایدار فرض شد و با توجه به عمودی بودن جریان، اثر نیروی گرانش نیز در نظر گرفته شد. سیال مورد استفاده در شبیه‌سازی‌های عددی آب بوده و مشخصات ترموفیزیکی آن به صورت متغیر با دما در نظر گرفته شده است. مشخصات سیال کاری در دماهای مختلف در جدول (۴) گزارش شده است.

^۱ Pressure outlet

جدول ۴. مشخصات ترموفیزیکی سیال کاری.

Table 4. Thermophysical properties of the working fluid.

Properties	Measured at Temperature 353.15 K	Measured at Temperature 373.15 K
Density(kg/m ³)	971.8	958.4
Thermal Conductivity(W/m.K)	0.6562	0.6651
Specific Heat Capacity(J/g.K)	4190	4220
Viscosity(kg/m.s)	0.0003545	0.0002819

۳-۱ تولید مش

با توجه به اینکه شبکه‌بندی مدل باید به شکلی باشد که تمامی فضای محاسباتی مسئله را تحت پوشش قرار دهد، برای شبکه‌بندی از شبکه بی‌سازمان استفاده شد. تعداد المان‌های شبکه‌بندی نیز باید بهینه بوده و از دقت قابل قبولی برخوردار باشد. لذا بر اساس معیار تغییرات کمتر از ۰.۲٪، و با توجه به جداول (۵ و ۶) شبکه با ۱،۰۹۴،۸۹۴ سلول برای لوله ساده و شبکه با ۳،۶۵۲،۱۱۳ سلول برای هندسه‌های دارای آشفته‌ساز در بیش‌ترین حالت که مربوط به حالت لوله حاوی کویل سیمی با بیش‌ترین گام چرخش است، انتخاب شدند.

جدول ۵. مطالعه استقلال از شبکه برای لوله ساده.

Table 5. Grid independence study for a plain (smooth) pipe.

Cell	Heat Transfer Coefficient (W/m ² ·K)	Change Compared to the previous stage
450,000	5,210	-
750,000	5,380	3.26%
1,109,894	5,480	1.86%
1,500,000	5,510	0.55%
2,100,000	5,530	0.36%

جدول ۶. مطالعه استقلال از شبکه برای لوله با آشفته‌ساز سیم فنری (گام ۵۰ mm)

Table 6. Grid independence study for a pipe with a wire coil turbulator (pitch of 50 mm).

Cell	Heat Transfer Coefficient (W/m ² ·K)	Change Compared to the previous stage	Pressure Drop Changes
2,100,000	5,210	-	-
2,800,000	5,380	3.26%	3.1%
3,652,113	5,480	1.86%	1.9%
4,200,000	5,510	0.55%	0.8%

در هر شبکه، ابعاد المان‌های به‌کار رفته در نزدیکی دیواره لوله و نیز آشفته‌سازها به‌دلیل وجود گرادیان‌های میدان فشار و دما ریزتر از سایر نقاط در نظر گرفته شد. به‌منظور اطمینان از کیفیت شبکه، کیفیت شبکه به‌وسیله معیارهای چولگی^۱ و کیفیت تعامد^۲ بررسی شد. در جدول (۷) مقدار بیشینه، کمینه و میانگین دو معیار فوق برای شبکه‌بندی دارای ۳۶۵۲۱۱۳ سلول گزارش شده است. با توجه به این جدول، مقادیر گزارش شده در محدوده بسیار مناسبی قرار دارند که نشانگر کیفیت مطلوب شبکه ایجاد شده است. شکل (۲.۱) (A) نمایی از شبکه‌بندی فضای محاسباتی را نشان می‌دهد. همچنین به‌منظور بررسی استقلال نتایج از شبکه، هندسه لوله با پنج سائز المان مختلف شبکه‌بندی شد و نتایج ضریب انتقال حرارت در طول لوله برای هر پنج

¹ Skewness

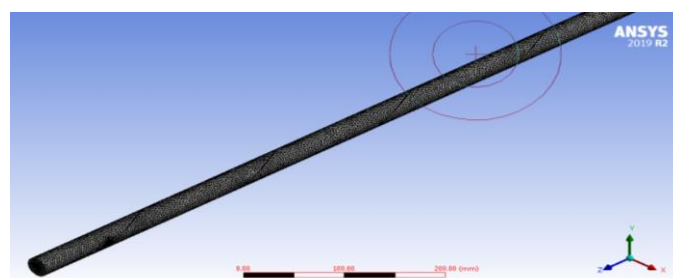
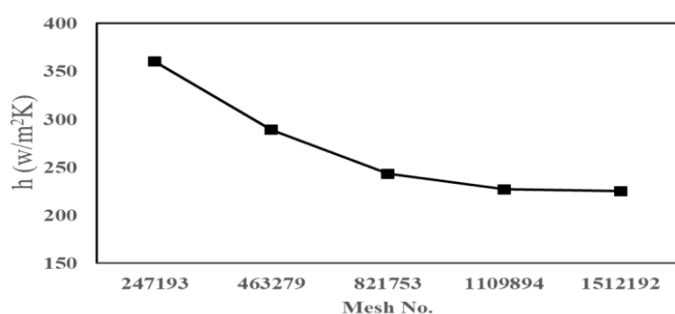
² Orthogonal quality

شبکه مورد بررسی قرار گرفت. نتایج در شکل (B.۲) نمایش داده شده است. طبق نتایج شکل (B.۲) می‌توان دریافت که افزایش تعداد سلول از ۱۱۰۹۸۹۴ به بعد، تأثیری در نتایج شبیه‌سازی ندارد که نشان از استقلال نتایج این مطالعه از تعداد شبکه است.

جدول ۷. مشخصات کیفیت شبکه با تعداد ۳۶۵۲۱۱۳ سلول.

Table 7. Mesh quality specifications for 3,652,113 cells.

Evaluation Metric	Minimum Value	Maximum Value	Mean
Skewness	0.00021	0.98	0.2298
Orthogonality Quality	0.306	0.9953	0.8577



(B)

(A)

شکل ۲. (A) شبکه‌بندی فضای محاسباتی و (B) ضریب انتقال حرارت در طول لوله برای سایز شبکه‌های مختلف.

Figure 2. (A) Computational domain mesh and (B) Heat transfer coefficient along tube for different mesh sizes.

۲-۳ اعتبارسنجی

برای اعتبارسنجی نتایج، طول زیرسرد درون لوله ساده شبیه‌سازی شده با نتایج مطالعه [۲۸] مقایسه شد. لوله عمودی مورد بررسی، به‌طور دقیق دارای قطر داخلی ۲۵/۵۶ mm و طول ۱/۹ m بود. سیال مورد استفاده آب، شار حرارتی اعمال شده بر لوله 5730 W/m^2 و اختلاف دمای ورودی و دمای تبخیر $3/3^\circ \text{C}$ بود [۲۸]. طول زیر سرد به‌دست آمده از شبیه‌سازی عددی برابر با ۰/۴۳۵ m بود که این مقدار در مطالعه [۲۸] برابر با m ۰/۴ گزارش شده بود. با توجه به اختلاف ناچیز بین این دو عدد (حدود ۸/۷ درصد) لذا می‌توان نتیجه گرفت شبیه‌سازی عددی استفاده شده در این تحقیق صحت و دقت قابل قبولی دارد. شکل (۳) نشان‌دهنده توزیع فاز بخار در جوشش جریان درون لوله با شرایط مطالعه کامل و همکاران [۲۸] است. مشاهده می‌شود که جریان پس از ورود به لوله، تحت اثر شار حرارتی وارده، به بخار تبدیل شده است. همچنین نتایج اعتبارسنجی مدل عددی با مقایسه ضریب انتقال حرارت و ضریب اصطکاک طبق جدول (۸) تکمیل شد.

۴- نتایج و بحث

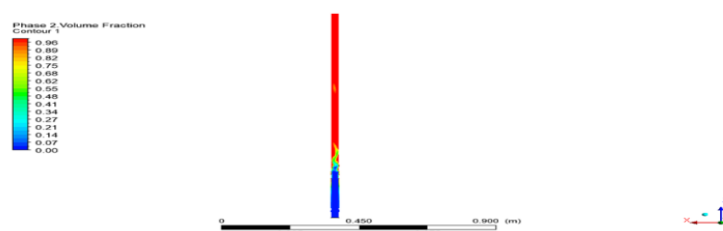
در این مطالعه در ابتدا شبیه‌سازی دوفازی لوله صاف سه بعدی سیال آب صورت گرفت. در ادامه طول زیرسرد، تغییرات ضریب انتقال حرارت و افت فشار در رینولدزهای ۷۰۰۰، ۱۰۰۰۰، ۱۵۰۰۰ و ۲۰۰۰۰ با استفاده از نرم‌افزار عددی محاسبه شد. سپس آشفته‌ساز نوار پیچ خورده در درون لوله و در قسمت زیرسرد تعبیه شده و شبیه‌سازی‌ها مجدداً در نرم‌افزار فلوئنت انجام شد تا نحوه اثرگذاری آشفته‌ساز نوار مارپیچی با گام‌های مختلف بر طول زیرسرد، ضریب انتقال حرارت و افت فشار مشخص گردد.

جدول ۸. نتایج اعتبارسنجی مدل عددی.

Table 8. Numerical model validation results.

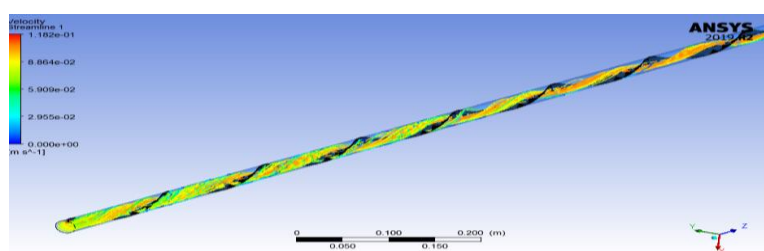
Quantity	Kamil et al. [28]	This work	Relative error
Subcooled length(m)	0.40	0.435	8.7%
Heat transfer coefficient (W/m ² ·K)	5.200	5.480	5.4%
Friction factor (f)	0.029	0.0275	5.2%

در شبیه‌سازی‌های تک فازی، جریان پایدار فرض شده و با توجه به عمودی بودن جریان، تأثیر گرانش نیز در نظر گرفته شده است. در ورودی لوله، سرعت جریان ورودی برابر با 0.085 m/s و دمای آن 95°C در نظر گرفته شد. در خروجی لوله، شرط مرزی خروجی فشار و در دیواره‌ها نیز شار حرارتی ثابت فرض شد [۲۸]. نحوه عبور جریان درون لوله دارای آشفته‌ساز در شکل (۴) نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل (۴) مشاهده می‌شود، با استفاده از آشفته‌ساز نوار پیچ خورده نوع A، جریان درون لوله چرخشی شده و به عبارت دیگر، آشفتگی جریان درون لوله افزایش پیدا کرده است. این موضوع در سایر آشفته‌سازها نیز صادق است.



شکل ۳. فاز بخار در جوشش جریان درون لوله با شرایط مطالعه کمیل و همکاران [۲۸].

Figure 3. Vapor phase in flow boiling within tube (Kamil et al. [28] conditions).

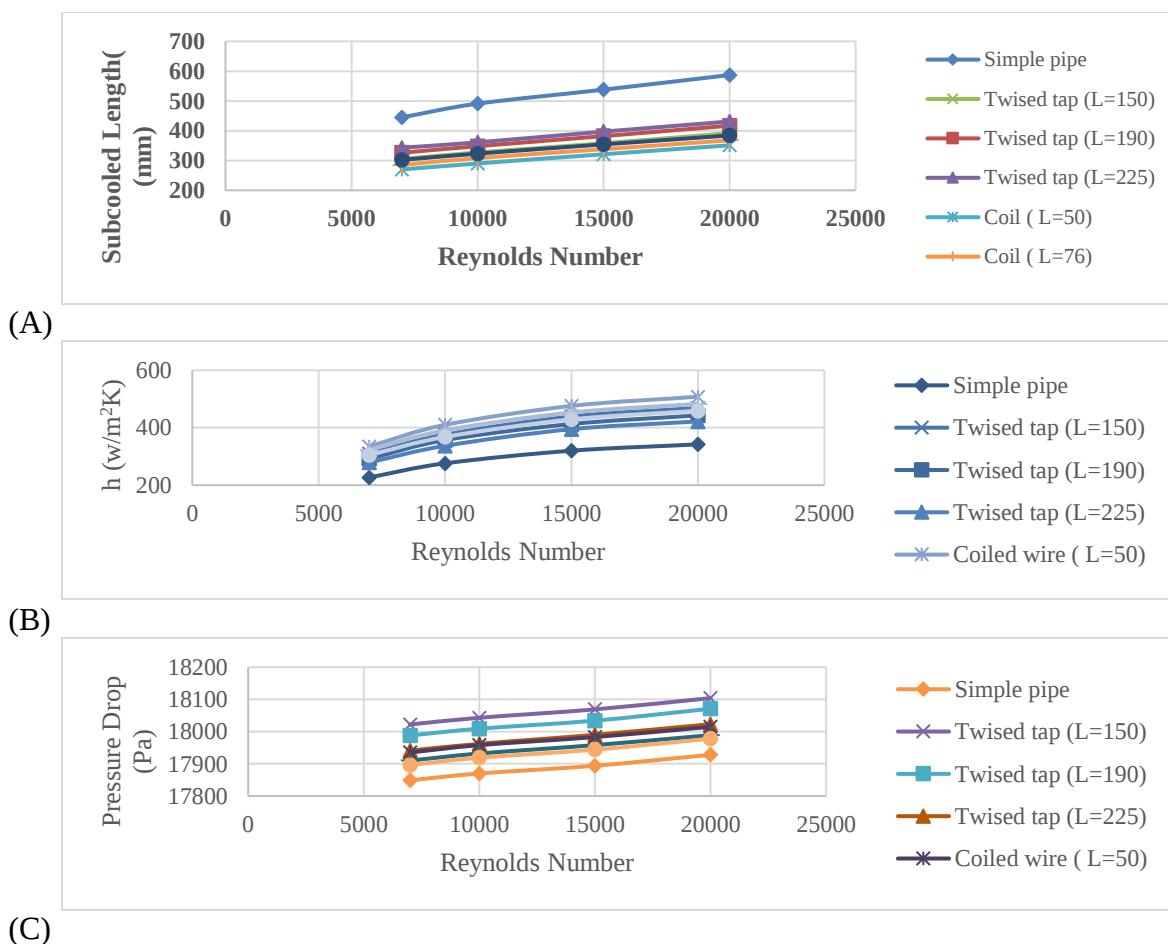


شکل ۴. نحوه عبور جریان درون لوله دارای آشفته‌ساز.

Figure 4. Flow pattern in tube with turbulator.

شکل (۵) نحوه اثرگذاری نوار پیچ خورده با گام‌های چرخش مختلف در رینولدزهای 7000 ، 10000 ، 15000 و 20000 بر روی طول زیرسرد، افت فشار و ضریب انتقال حرارت را نشان می‌دهد. شکل (A.۵) نحوه تأثیر استفاده از آشفته‌سازهای مختلف بر روی طول زیرسرد در جوش‌آور را نشان می‌دهد. با توجه به شکل (A.۵) مشخص است که با افزایش عدد رینولدز طول زیرسرد افزایش می‌یابد و استفاده از هر نوع آشفته‌ساز باعث کاهش قابل توجه طول زیرسرد می‌گردد. در بین آشفته‌سازهای مختلف در رینولدزهای 7000 ، 10000 ، 15000 و 20000 به‌طور میانگین، آشفته‌ساز سیم فنری با گام چرخش 50° و نوار پیچ خورده با گام چرخش 225° به ترتیب با 36% و 31% درصد بیش‌ترین و کم‌ترین تأثیر را بر روی طول زیرسرد داشتند. همچنین نتایج نشان داد به‌طور کلی سیم فنری در مقایسه با نوار پیچ خورده عملکرد بهتری در کاهش طول زیرسرد دارد. در عین حال برای سیم فنری و نوار پیچ خورده، کاهش گام چرخش باعث افزایش مقدار آشفتگی جریان شده و در نهایت باعث کاهش بیش‌تر طول زیرسرد گردیده است. شکل (B.۵) مقدار ضریب انتقال حرارت جابجایی کل لوله را در حالات مختلف نشان می‌دهد. طبق نتایج، استفاده از هر نوع آشفته‌ساز باعث بهبود عملکرد

انتقال حرارت لوله شده است. در بین آشفته‌سازهای بررسی شده در رینولدزهای ۷۰۰۰، ۱۰۰۰۰، ۱۵۰۰۰ و ۲۰۰۰۰ به‌طور میانگین، سیم فنری با گام چرخش ۵۰ mm با افزایش انتقال حرارت به مقدار ۴۲ درصد دارای بیش‌ترین تأثیر و نوار پیچ خورده با گام چرخش ۲۲۵ mm با ۲۶ درصد افزایش، کم‌ترین اثر را بر روی مقدار ضریب انتقال حرارت جابجایی دارد.



شکل ۵. تغییرات (A) طول زیرسرد، (B) ضریب انتقال حرارت و (C) افت فشار، هنگام تعبیه آشفته‌سازهای متفاوت در رینولدزهای ۷۰۰۰، ۱۰۰۰۰، ۱۵۰۰۰ و ۲۰۰۰۰.

Figure 5. Effects of different turbulators on (A) subcooled length, (B) heat transfer coefficient, and (C) pressure drop at Reynolds numbers of 7000, 10000, 15000, and 20000.

همچنین طبق نتایج برای این پارامتر می‌توان دریافت به‌طور کلی استفاده از سیم فنری در مقایسه با نوار پیچ خورده، عملکرد بهتری دارد. فقط در صورتی که گام چرخش نوار پیچ خورده ۲۲۵ mm باشد عملکرد بهتری نسبت به سیم فنری با گام چرخش ۹۵ mm دارد. شکل (C.۵) نتایج مربوط به پارامتر افت فشار در رینولدزهای ۷۰۰۰، ۱۰۰۰۰، ۱۵۰۰۰ و ۲۰۰۰۰ را نشان می‌دهد. با توجه به شکل (C.۵)، استفاده از آشفته‌سازهای مختلف باعث افزایش افت فشار شده است. در بین آشفته‌سازهای مورد بررسی، نوار پیچ خورده با گام چرخش ۲۲۵ mm بیش‌ترین مقدار افت فشار و بدترین عملکرد را دارد و در مقابل آشفته‌ساز سیم فنری با گام چرخش ۹۵ mm کم‌ترین مقدار افت فشار و بهترین عملکرد را از نظر این پارامتر دارا است.

تکنیک‌های افزایش انتقال حرارت معمولاً مقاومت حرارتی را با افزایش سطح مؤثر انتقال حرارت یا با ایجاد

تلاطم در سیال جاری در داخل دستگاه کاهش می‌دهند. سطوح ناهموار یا سطوح کشیده به‌منظور افزایش سطح موثر استفاده می‌شود؛ در حالی که آشفته‌سازها، بال‌ها، توربولاتورها و غیره برای ایجاد آشفتگی استفاده می‌شوند. این تغییرات معمولاً با تشدید قدرت پمپاژ همراه است که می‌تواند منجر به افزایش میزان انتقال حرارت گردد. اثربخشی یک تکنیک افزایش انتقال حرارت را می‌توان با ضریب عملکرد حرارتی^۱ (TPF) ارزیابی کرد که نشان‌دهنده نسبت اثر نسبی تغییر در نرخ انتقال حرارت به تغییر در ضریب اصطکاک است. این پارامتر با معادله زیر تعریف می‌شود [۳۴]:

$$\eta = \frac{Nu}{Nu_0} / \sqrt[3]{f/f_0} \quad (17)$$

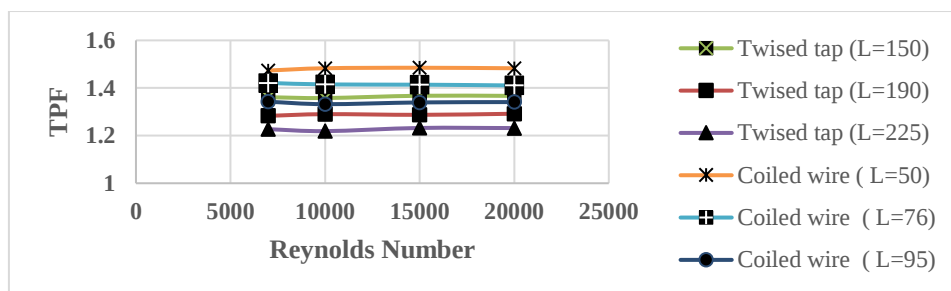
که در آن عدد ناسلت و ضریب اصطکاک بدین صورت به‌دست می‌آید:

$$Nu = \frac{hl}{k}, f = \frac{(\Delta P)}{(\rho u^2)(\frac{l}{D_h})} \quad (18)$$

که Nu و f به‌ترتیب عدد ناسلت و ضریب اصطکاک لوله ارتقایافته با آشفته‌ساز بوده و Nu_0 و f_0 به‌ترتیب بیانگر عدد ناسلت و ضریب اصطکاک لوله ساده می‌باشد. مطابق شکل (۶) نتایج حاکی از آن است که TPF در تمامی حالت‌های مورد بررسی (رینولدزهای ۷۰۰۰، ۱۰۰۰۰، ۱۵۰۰۰ و ۲۰۰۰۰) بزرگ‌تر از یک است و تمامی آشفته‌سازهای معرفی شده در این تحقیق می‌تواند در صنایع مورد استفاده قرار گیرد. از طرفی در بین مدل‌های بررسی شده سیم فنری با گام چرخش ۵۰ mm بهترین نوع آشفته‌ساز در بین موارد مورد بررسی می‌باشد. همچنین مشخص شد نوار پیچ خورده با گام چرخش ۲۲۵ mm ضعیف‌ترین حالت در بین دیگر مدل‌ها را دارد. بررسی روند رسوب کربنات کلسیم درون آب بر روی دیواره‌های داخلی لوله عمودی در حالت‌های مختلف و اثر آشفته‌سازها بر ضخامت رسوب تشکیل شده روی دیواره لوله در قسمت انتهایی آن در شکل (۷)، در رینولدزهای ۷۰۰۰، ۱۰۰۰۰، ۱۵۰۰۰ و ۲۰۰۰۰ نشان داده شده است. طبق انتظار نتایج نشان می‌دهد با افزایش رینولدز و به‌طبیع آن افزایش اغتشاش جریان، ضخامت رسوب در انتهای لوله کاهش یابد. مقایسه نتایج به‌دست آمده برای حالات مختلف نشان می‌دهد، استفاده از آشفته‌سازها به‌صورت قابل توجهی میزان ضخامت رسوب در انتهای لوله را کاهش داده است؛ به‌طوری‌که در هنگام استفاده از آشفته‌سازهای سیم فنری به‌صورت میانگین و با گام‌های چرخشی ۵۰، ۷۶ و ۹۵ به‌ترتیب ۵۳، ۴۲ و ۳۶ درصد ضخامت رسوب لوله کاهش یافته است. این در حالی است که استفاده از آشفته‌ساز نوار پیچ خورده با گام‌های چرخش ۱۵۰، ۱۹۰ و ۲۲۵ به‌صورت میانگین موجب کاهش ۴۱، ۳۰ و ۲۴ درصدی ضخامت رسوب شده است. لذا می‌توان نتیجه گرفت استفاده از آشفته‌ساز سیم فنری بهتر بوده و هر چقدر گام چرخش کم‌تر شود میزان ضخامت رسوب کم‌تر خواهد بود.

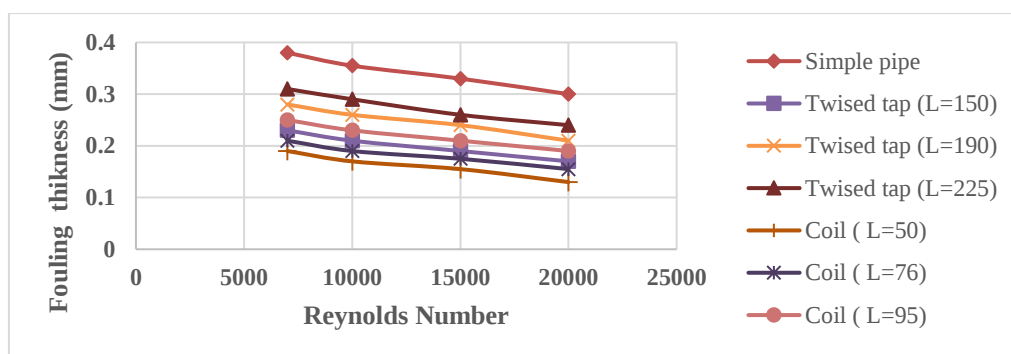
مطابق با جدول (۹)، نتایج حاصل از این پژوهش (کاهش ۵۳٪ رسوب) نسبت به یافته‌های لوو و کائو [۲۴] (کاهش ۴۹٪ با استفاده از NSGA-II)، نشان‌دهنده کارایی بالاتر روش پیشنهادی است. همچنین با یافته‌های جعفری‌نصر و طهماسبی [۳] در زمینه کاربرد آشفته‌سازها در جوش‌آورنده‌های ترموسیفونی همخوانی دارد.

¹ thermal performance factor



شکل ۶. تغییرات ضریب عملکرد حرارتی هنگام تعبیه آشفته‌سازهای متفاوت در رینولدزهای ۷۰۰۰، ۱۰۰۰۰، ۱۵۰۰۰ و ۲۰۰۰۰.

Figure 6. Variations of TPF at Reynolds numbers of 7000, 10000, 15000, and 20000 when various turbulence inducers are employed.



شکل ۷. تغییرات رسوب هنگام تعبیه آشفته‌سازهای متفاوت در رینولدزهای ۷۰۰۰، ۱۰۰۰۰، ۱۵۰۰۰ و ۲۰۰۰۰.

Figure 7. Changes in deposition when different turbulence inducers are embedded at Reynolds numbers of 7000, 10000, 15000, and 20000.

جدول ۹. مقایسه نتایج کاهش رسوب با پژوهش‌های مشابه.

Table 9. Comparison of fouling reduction results with similar studies.

Turbulator type/ model	Fouling reduction	Operating conditions	Reference
wire coil turbulator (pitch of 50 mm)	53%	Re=20000, Water, $q''= 5,730 \text{ W/m}^2$	This work
Pipe insert turbulator	Significant Reduction	VTR	[3]
Threshold model	-	Crude oil preheater	[25]
Fouling reduction methods	-	Refinery heat exchanger	[26]
CFD (modelling)	-	CaCO ₃ fouling	[31]
Twisted tape+ NSGA-II	49%	High- temperature exhaust gases	[24]

۵- نتیجه‌گیری

در این مطالعه، اثر نصب آشفته‌سازها در ریبویلرهای ترموسیفونی عمودی با استفاده از CFD تحلیل شد. در این راستا، تأثیر انواع آشفته‌سازها بر پارامترهای عملکرد حرارتی (شامل طول زیرسرد، ضریب انتقال حرارت، افت فشار و ضریب عملکرد) و به‌ویژه نرخ رسوب‌گذاری بررسی شد. اثر آشفته‌سازهای سیم‌فنی (به ضخامت ۲ mm و نوار پیچ‌خورده (به ضخامت ۱ mm) در گام‌های چرخش متفاوت، با استفاده از مدل دوفازی اوایلر-اوایلر و مدل κ - ε RNK شبیه‌سازی و اعتبارسنجی شد. نتایج پس از اعتبارسنجی با مطالعه کمیل [۲۸]، حاکی از آن بود که استفاده از انواع مختلف آشفته‌سازها می‌تواند منجر به بهبود عملکرد ریبویلرهای ترموسیفونی

گردد. نتایج نشان داد که آشفته‌سازهای سیم‌فبری عملکرد بهتری نسبت به نوار پیچ‌خورده دارند. با کاهش گام چرخش آشفته‌سازها، افزایش اغتشاش جریان منجر به بهبود انتقال حرارت و کاهش طول زیرسرد و نرخ رسوب‌گذاری شد؛ هرچند افت فشار نیز افزایش یافت. در نهایت، بر اساس ضریب عملکرد حرارتی، مدل بهینه انتخاب گردید. براساس نتایج حاصله، تمامی مدل‌های مورد بررسی دارای راندمان بالای ۱ بودند که نشان‌دهنده بیش‌تر بودن انتقال حرارت نسبت به افت فشار ناشی از تعبیه آشفته‌سازها است. نتایج نشان داد در بین مدل‌های بررسی شده سیم فبری با گام چرخش ۵۰ mm بهترین عملکرد را داشت. همچنین در بین پارامترهای مورد بررسی، آشفته‌سازها بیش‌ترین تأثیر را روی میزان ضخامت رسوب انتهای لوله داشتند؛ به‌طوری‌که در بهترین حالت ۵۳٪ با سیم فبری با گام چرخش ۵۰ mm و در بدترین حالت ۲۴٪ با استفاده از نوار پیچ‌خورده با گام چرخش ۲۲۵ mm، میزان ضخامت رسوب انتهای لوله کاهش می‌یافت.

۶- مراجع

- [1] Liu, S., Sakr, M. (2013). A comprehensive review on passive heat transfer enhancements in pipe exchangers. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*.19. 64–81. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.11.021>
- [2] Kapustenko, P. O., Kukulka, D. J., Arsenyeva, O. P. (2015). Intensification of heat transfer processes. *Chemical Engineering Transactions*.45. 1729–1734. <http://doi.org/10.3303/CET1545289>
- [3] Nasr, M. R. J., Tahmasbi, M. (2006). Application of heat transfer enhancement on vertical thermosyphon reboilers using tube inserts. *Heat Transfer Engineering*. 27(6). 58–65. <http://dx.doi.org/10.1080/01457630600674725>
- [4] Nasr, M. R. J., Shekarian, E., Tarighaleslami, A. H., Khodaverdi, F., Badini Pourazar, M. (2016). The Impact of Application of Heat Transfer Enhancement Technologies on Design of Shell and Tube Heat Exchangers. *Iranian Journal of Chemical Engineering*, 14(80), 64–74, In Persian. 20.1001.1.17355400.1394.14.80.8.9
- [5] Nasr, M. R. J., Shafighi, M. (2019). CFD Analysis of Twisted Tube Heat Exchangers. *Iranian Journal of Chemical Engineering*.17(100). 23–31, In Persian. 20.1001.1.17355400.1397.17.100.2.4
- [6] Lin, Z. M., Wang, L. B., Lin, M., Dang, W., & Zhang, Y. H. (2017). Numerical study of the laminar flow and heat transfer characteristics in a tube inserting a twisted tape having parallelogram winglet vortex generators. *Applied Thermal Engineering*, 115, 644–658. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.12.142>
- [7] Eiamsa-Ard, S., Yongsiri, K., Nanan, K., & Thianpong, C. (2012). Heat transfer augmentation by helically twisted tapes as swirl and turbulence promoters. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 60, 42–48. <https://doi.org/10.1016/j.cep.2012.06.001>
- [8] Salam, B., Biswas, S., Saha, S., & Bhuiya, M. M. K. (2013). Heat transfer enhancement in a tube using rectangular-cut twisted tape insert. *Procedia Engineering*, 56, 96–103. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2013.03.094>
- [9] Eiamsa-Ard, S., Promthaisong, P., Thianpong, C., Pimsarn, M., & Chuwattanakul, V. (2016). Influence of three-start spirally twisted tube combined with triple-channel twisted tape insert on heat transfer enhancement. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 102, 117–129. <https://doi.org/10.1016/j.cep.2016.01.012>
- [10] Nakhchi, M. E., Hatami, M., & Rahmati, M. (2020). Experimental investigation of heat transfer enhancement of a heat exchanger tube equipped with double-cut twisted tapes. *Applied Thermal Engineering*, 180, 115863. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2020.115863>
- [11] Gholamalizadeh, E., Hosseini, E., Jamnani, M. B., Amiri, A., & Alimoradi, A. (2019). Study of intensification of the heat transfer in helically coiled tube heat exchangers via coiled wire inserts. *International Journal of Thermal Sciences*, 141, 72–83. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2019.03.029>
- [12] Müller-Steinhagen, H. (2011). Heat transfer fouling: 50 years after the Kern and Seaton model. *Heat Transfer Engineering*, 32(1), 1–13. <https://doi.org/10.1080/01457632.2010.505127>
- [13] Nanva Kenari, N., Jafari Nasr, M. R. (2017). Investigation of Plate Heat Exchangers Fouling Used in Food Industries. *Iranian Journal of Chemical Engineering*.16(92). 25–35, In Persian. 20.1001.1.17355400.1396.16.92.2.1
- [14] Malayeri, M. R., Al-Janabi, A., & Müller-Steinhagen, H. (2009). Application of nano-modified surfaces for fouling mitigation. *International Journal of Energy Research*, 33, 1101–1113. <https://doi.org/10.1002/er.1599>
- [15] Dang, W., & Wang, L. B. (2021). Convective heat transfer enhancement mechanisms in circular tube inserted with a type of twined coil. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 169, 120960. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2021.120960>

- [16] Cabello, R., Plesu Popescu, A. E., Bonet-Ruiz, J., Curcó Cantarell, D., & Llorens, J. (2022). Heat transfer in pipes with twisted tapes: CFD simulations and validation. *Computers & Chemical Engineering*, 166, 107971. <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2022.107971>
- [17] Genić, S. B., Jaćimović, B. M., Mandić, D., & Petrović, D. (2012). Experimental determination of fouling factor on plate heat exchangers in district heating system. *Energy and Buildings*, 50, 204–211. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.03.039>
- [18] Pääkkönen, T. M., Riihimäki, M., Simonson, C. J., Muurinen, E., & Keiski, R. L. (2015). Modeling CaCO_3 crystallization fouling on a heat exchanger surface: Definition of fouling layer properties and model parameters. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 83, 84–98. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2014.11.073>
- [19] Hasan, B. O., Nathan, G. J., Ashman, P. J., Craig, R. A., & Kelso, R. M. (2012). The effects of temperature and hydrodynamics on the crystallization fouling under cross flow conditions. *Applied Thermal Engineering*, 36, 210–218. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2011.12.027>
- [20] Al-Gailani, A., Sanni, O., Charpentier, T. V., Crisp, R., Bruins, J. H., & Neville, A. (2021). Inorganic fouling of heat transfer surface from potable water during convective heat transfer. *Applied Thermal Engineering*, 184, 116271. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2020.116271>
- [21] Wang, L. C., Li, S. F., Wang, L. B., Cui, K., Zhang, Q. L., Liu, H. B., & Li, G. (2016). Relationships between the characteristics of CaCO_3 fouling and the flow velocity in smooth tube. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 74, 143–159. <https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2015.12.001>
- [22] Moaf, M., Alizadeh, O., & Pendashteh, A. R. (2022). Investigating the impact of air injection on the thermal performance of helical tube with varying helix diameters: Downward flow. *Iranian Journal of Chemical Engineering*, 19(2), 38–50. <https://doi.org/10.22034/ijche.2022.347150.1444>
- [23] Zare Aliabadi, H., Ateshi, H., Noei, S. H., & Khoram, M. (2009). An experimental and theoretical investigation on thermal performance of a gas-liquid thermosyphon heat pipe heat exchanger in a semi-industrial plant. *Iranian Journal of Chemical Engineering*, 6(3), 13–25. [20.1001.1.17355397.2009.6.3.2.0](https://doi.org/10.1016/j.ijche.2009.06.001)
- [24] Lou, H., Cao, X. (2025). Multi-field coupling fouling mechanism and optimization of heat exchangers in stenter exhaust systems. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 172, 110252. <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2025.110252>
- [25] Nasr, M. R. J., Majidi Givi, M. (2006). Modeling of crude oil fouling in preheat exchangers of refinery distillation units. *Applied Thermal Engineering*, 26(14–15), 1572–1577. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2005.12.001>
- [26] Hasannezhad, O., Sotudeh-Gharebagh, R., Bagherzadeh Homaei, E. (2023). Mitigation of Fouling in Refinery Heat Exchanger. *Iranian Chemical Engineering Journal*, 22(128), 97–19, In Persian. <https://doi.org/10.22034/ijche.2023.338876.1202>
- [27] Bayat, M., Aminian, J., Bazmi, M., Shahhosseini, S., Sharifi, K. (2012). CFD modeling of fouling in crude oil pre-heaters. *Energy Conversion and Management*, 64, 344–350. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2012.05.003>
- [28] Kamil, M., Ali, H., & Alam, S. S. (1995). Heat transfer to boiling liquids in a single vertical tube thermosyphon reboiler. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 10(1), 44–53. [https://doi.org/10.1016/0894-1777\(94\)00047-C](https://doi.org/10.1016/0894-1777(94)00047-C)
- [29] Eiamsa-Ard, S., Wongcharee, K., & Sripattanapipat, S. (2009). 3-D numerical simulation of swirling flow and convective heat transfer in a circular tube induced by means of loose-fit twisted tapes. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 36(9), 947–955. <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2009.06.014>
- [30] Pääkkönen, T. M., Riihimäki, M., Simonson, C. J., Muurinen, E., & Keiski, R. L. (2012). Crystallization fouling of CaCO_3 : Analysis of experimental thermal resistance and its uncertainty. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 55(23–24), 6927–6937. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2012.07.006>
- [31] Pääkkönen, T. M., Ojaniemi, U., Pättikangas, T., Manninen, M., Muurinen, E., Keiski, R. L., & Simonson, C. J. (2016). CFD modelling of CaCO_3 crystallization fouling on heat transfer surfaces. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 97, 618–630. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2015.11.099>
- [32] Mwaba, M. G., Golriz, M. R., & Gu, J. (2006). A semi-empirical correlation for crystallization fouling on heat exchange surfaces. *Applied Thermal Engineering*, 26(4), 440–447. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2005.05.021>
- [33] Helalizadeh, A., Müller-Steinhagen, H., & Jamialahmadi, M. (2005). Mathematical modelling of mixed salt precipitation during convective heat transfer and sub-cooled flow boiling. *Chemical Engineering Science*, 60(18), 5078–5088. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2005.03.040>
- [34] Fan, A., Deng, J., Guo, J., & Liu, W. (2011). A numerical study on thermo-hydraulic characteristics of turbulent flow in a circular tube fitted with conical strip inserts. *Applied Thermal Engineering*, 31(14–15), 2819–2828. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2011.05.007>