



دانشگاه آزاد اسلامی واحد اهر
فصلنامه‌ی کاربرد شیمی در محیط زیست

سال هشتم، شماره‌ی ۳۱
تابستان ۱۳۹۶، صفحات ۶۵-۵۷

بررسی بهبود شاخص‌های عملکردی مبدل‌های حرارتی با استفاده از ترکیب نانوسیالات و نوارهای تاییده به کمک الگوریتم طراحی سریع

محمد فلاحی یکتا

گروه مهندسی شیمی، واحد بروجرد، دانشگاه آزاد اسلامی، بروجرد، ایران
fallahiyekta@gmail.com

داود دادوند

گروه مهندسی شیمی، واحد بروجرد، دانشگاه آزاد اسلامی، بروجرد، ایران
dadvand.davod.1985@gmail.com

ارسلان پرواره

گروه مهندسی شیمی، واحد بروجرد، دانشگاه آزاد اسلامی، بروجرد، ایران
arsalanparvareh@yahoo.com

چکیده

در این مقاله آنالیز حرارتی عملکرد یک مبدل حرارتی به وسیله استفاده هم‌زمان از نوارهای پیچشی و نانوسیال بهبود پیدا کرد. نتایج این کار با استفاده از الگوریتم طراحی سریع ارزیابی شد و با مبدل حرارتی پوسته و لوله معمولی و سایر مبدل‌هایی که تنها حاوی نانوسیال و یا نوار پیچشی بودند، مقایسه شد. براساس الگوریتم طراحی سریع رابطه بین ضرایب انتقال حرارت، افت فشارها و سطح انتقال حرارت به دست آمد. با استفاده از ماکزیمم افت فشار مجاز در الگوریتم، حداقل سطح مورد نیاز انتقال حرارت قابل حصول خواهد بود. این الگوریتم با استفاده از روش عددی نیوتن رافسون حل شد. نتایج نشان داد که مبدل حرارتی حاوی نانوسیال و نوار پیچشی طراحی شده عملکرد حرارتی موثرتری نسبت به مبدل‌های پوسته و لوله معمولی دارد، به طوری که سطح انتقال حرارت کم‌تری در مقدار مشخص بار حرارتی مدنظر حاصل خواهد شد.

کلید واژه: طراحی الگوریتم سریع، مبدل حرارتی، نوارهای تاییده، نانوسیالات.

مقدمه

سیال داخل لوله، از بین بردن لایه مرزی حرارتی داخل لوله و افزایش اختلاط سیال درون لوله از مکانیزم‌های انتقال حرارت این وسایل می‌باشند [۹]. هزینه ساخت وسایل افزایش یافته انتقال حرارت داخل لوله بسیار پایین می‌باشد و نصب آن‌ها در داخل لوله‌های مبدل‌های حرارتی به آسانی صورت می‌گیرد. این وسایل برای افزایش توان عملکردی مبدل‌هایی که جریان سمت لوله در آن‌ها احتیاج به عملکرد حرارتی بالاتری دارند می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد [۹-۱۰]. علاوه بر آن، در مواقعی که تمیز کردن لوله‌های مبدل حرارتی مد نظر باشد، این نوع وسایل را می‌توان به راحتی از لوله‌های مبدل خارج نمود. مبدل‌های حرارتی جدیدی که به همراه وسایل افزایش یافته انتقال حرارت داخل لوله طراحی می‌شوند، فشرده‌تر از مبدل‌های حرارتی ساده می‌باشند [۱۱]. وجود لوله‌های کوتاه‌تر در مبدل‌هایی که در لوله‌های آن‌ها از این وسایل استفاده شده است، می‌تواند سبب گردد که هزینه افزایش افت فشار ناشی از به کار بردن این وسایل جبران گردد [۱۲]. عمده‌ترین فایده استفاده از وسایل افزایش یافته انتقال حرارت داخل لوله، کاهش هزینه اولیه ساخت مبدل‌ها می‌باشد، زیرا استفاده از این وسایل سبب کاهش سطح انتقال حرارت در مبدل‌ها می‌گردد [۱۲-۱۴]. این وسایل همچنین می‌توانند سبب استفاده کامل‌تر از افت فشار مجاز به سمت لوله‌های مبدل‌های حرارتی گردند. از فواید دیگر استفاده از این وسایل می‌توان به افزایش توان عملکردی مبدل‌های حرارتی، کاهش میزان رسوب‌گیری در سمت لوله‌های مبدل‌ها، افزایش بازیافت حرارتی مبدل‌ها و بهبود توزیع جریان سیال در داخل لوله‌های مبدل اشاره نمود [۱۴]. یکی دیگر از عوامل افزایش یافته و بهبود کننده عملکرد حرارتی مبدل‌ها استفاده از نانو سیالات است [۱۵]. از آنجا که ضریب هدایت حرارتی عموم سیالات به مراتب کم‌تر از فلزات جامد می‌باشد، ثابت شده است که افزودن ذرات جامد به سیالات انتقالی، می‌تواند باعث افزایش عملکرد حرارتی

بی‌شک مبدل‌های حرارتی اجزای جدایی ناپذیر و پرکاربرد صنعت می‌باشند. این تجهیزات به طور گسترده در صنایع تهویه مطبوع، صنایع غذایی، الکترونیک، خودرو، نفت و گاز، فرآیندهای شیمیایی و بسیاری از صنایع دیگر استفاده می‌شوند [۱]. بنابراین مبدل‌ها را می‌توان از اصلی‌ترین ارکان صنعت دانست. در مبدل‌های حرارتی هر چه انتقال حرارت بهتر صورت پذیرد، مبدل راندمان بالاتری خواهد داشت و در نتیجه باعث کاهش مصرف انرژی و از طرفی کاهش هزینه‌های اقتصادی می‌گردد [۱-۲]. از سوی دیگر ثابت شده است که تغییر در پروفایل حرارتی سیالات نیز می‌تواند عاملی موثر برای بهبود ضریب حرارت جابجایی سیالات به کار گرفته شده باشد [۳-۵]. روش‌های متنوعی برای افزایش انتقال حرارت جابه‌جایی سیالی که در داخل لوله جریان دارد توسعه یافته است. این روش‌ها به دو گروه عمده غیرفعال و فعال تقسیم‌بندی می‌شوند. یکی از مهم‌ترین این روش‌ها، استفاده از وسایل افزایش یافته سطح است [۶-۸]. انواع مختلفی از وسایل افزایش یافته انتقال حرارت که در داخل لوله نصب می‌شوند وجود دارد که هر یک از آن‌ها عملکرد مخصوص به خودشان را دارند. این وسایل عبارت از نوارهای پیچشی^۱ که سبب چرخش جریان داخل لوله گشته و سرعت سیال در تماس با دیواره را افزایش می‌دهند، مفتول‌های پیچشی^۲ که این وسایل نیز به صورت حلقوی بر روی جداره داخلی لوله‌ها قرار گرفته است و سبب از بین رفتن لایه مرزی حرارتی شده و در نتیجه منجر به افزایش ضریب انتقال حرارت داخل لوله می‌گردند و شبکه‌های سیمی^۳ که به دور یک هسته مرکزی بافته شده‌اند، می‌باشند [۹-۱۰]. این وسایل چندین مکانیزم بهبود انتقال حرارتی ایجاد می‌کنند و برای جریان‌های آرام داخل لوله پیشنهاد می‌گردد [۱۰]. ایجاد دمای یکنواخت برای

1- Twisted tape insert

2- Helically Coiled Wire Insert

3- Wire Matrix Insert (Mesh Insert)

ذرات افزایش می‌یابد. علاوه بر این آن‌ها دریافته‌اند که با افزایش عدد رینولدز و غلظت نانو ذرات در سیال، انتقال حرارت بهبود می‌یابد. شارما^۶ و همکاران [۱۹] یک مطالعه آزمایشگاهی برای بررسی تاثیر نانو ذرات Al_2O_3 و نوارهای پیچشی بر روی انتقال حرارت و افت فشار در یک لوله انجام دادند. نتایج آن‌ها نشان داد که با افزودن نانو ذرات به سیال آب درون لوله ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی افزایش می‌یابد. آن‌ها هم‌چنین در نهایت موفق به ارائه روابطی جهت محاسبه عدد ناسلت شدند. ونگچاره و ایامسا^۷ [۲۰] نیز به بررسی تاثیر حضور نانو ذرات اکسید مس (CuO) در آب و نوارهای پیچشی درون یک لوله استوانه‌ای بر روی انتقال حرارت و ضریب اصطکاک پرداختند. در مطالعه آن‌ها گستره تغییراتی رینولدز از ۸۳۰ تا ۱۹۹۰ و غلظت نانو ذرات در محدوده ۰/۳ تا ۰/۷ بود. نتایج آن‌ها نشان داد که با افزایش رینولدز و غلظت نانو ذرات، عدد ناسلت افزایش می‌یابد. هم‌چنین استفاده هم‌زمان از نانو ذرات و نوارهای پیچشی باعث افزایش ۱۳/۸ برابری عدد ناسلت می‌شود. آن‌ها نشان دادند که بیش‌ترین بهبود انتقال حرارت برای شرایطی می‌باشد که در آن غلظت نانو ذرات ۰/۷ و رینولدز برابر با ۱۹۹۰ می‌باشد. محمد^۸ و همکاران [۲۱] به مطالعه عددی برای بررسی تاثیر انواع مختلفی از نانو ذرات در یک مبدل حرارتی بر روی انتقال حرارت ترتیب دادند. آن‌ها عدد رینولدز را در گستره ۱۰۰۰۰ تا ۵۰۰۰۰ تغییر دادند. هم‌چنین از چهار نوع نانو ذرات با قطرهای متفاوت از ۲۰ نانومتر تا ۵۰ نانومتر استفاده نمودند. این نانو ذرات عبارت از Al_2O_3 ، CuO، ZnO و SiO_2 هستند. در مطالعه آن‌ها غلظت نانو ذرات از ۱٪ تا ۴٪ متغیر بود. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد که بیش‌ترین میزان ناسلت به ترتیب مربوط به نانو ذرات SiO_2 ، Al_2O_3 ، ZnO و CuO می‌باشد. هم‌چنین مشخص شد که با افزایش

آن‌ها گردد. با این وجود در حال حاضر استفاده از سوسپانسیون‌هایی^۱ حاوی ذرات جامد در ابعاد میکرو و یا بزرگتر در سیال پایه جهت کاربرد در فناوری‌هایی چون سرمایش میکروالکترونیک‌ها، پایگاه‌های داده^۲، کانال‌های میکرو^۳ و نیز مبدل‌ها انتخاب موثری نمی‌باشد [۱۵-۱۷]. بنابراین، برای رفع این مشکل چوی^۴ در سال ۱۹۹۵ با استفاده از فناوری نانو راه حل جدیدی را با معرفی نانو سیال ارائه نمود [۱۵]. سیالی که قادر به افزایش عملکرد حرارتی سیالات انتقالی، بخصوص در فناوری‌های نوین می‌باشد. هدف نانو سیالات دستیابی به بالاترین خواص حرارتی ممکن در غلظت‌های امکان‌پذیر از نانو ذرات، با توزیع یکنواخت و پایدار آن‌ها در سیال پایه است. پر واضح است که افزایش میزان غلظت نانو ذراتی که ضریب هدایت حرارتی بالاتری نسبت به سیال پایه دارند، باعث افزایش ضریب هدایت حرارتی نانو سیال بدست آمده و در نتیجه عملکرد مبدل حرارتی خواهد شد [۱۶-۱۷]. مطالعات تجربی و آزمایشگاهی متعددی در رابطه با تاثیر استفاده از نوارهای پیچشی و نانو سیالات بر روی انتقال حرارت صورت گرفته است. اما موارد اندکی از این مطالعات به مطالعه تاثیر هم‌زمان این دو عامل پرداخته‌اند. راجا سخار^۵ [۱۸] یک مطالعه آزمایشگاهی را به منظور بررسی تاثیر حضور ذرات فلزی Al_2O_3 بر انتقال حرارت و ضریب اصطکاک در یک لوله دارای نوارهای پیچشی انجام داد. این آزمایش در اعداد رینولدز پایین در محدوده ۸۰۰ تا ۲۲۰۰ انجام شد. نتایج به دست آمده نشان دادند که ضریب انتقال حرارت برای حالتی که از نانو ذرات در آب استفاده می‌شود بیش‌تر از حالتی می‌باشد که در آب این نانو ذرات وجود ندارند. هم‌چنین علاوه بر افزایش انتقال حرارت، ضریب اصطکاک نیز در قیاس با آب بدون نانو

1- suspensions
2- data centers
3- micro-channels
4- Choi SUS
5- Sekhar, Y Raja

6- Sharma

7- Sundar, L Syam-Singh, Manoj K

8- Mohammed

یک ارتباط بین افت فشار، ضریب انتقال حرارت و سطح حرارت در هر دو سمت لوله و پوسته است. با این رابطه، طراحی بهینه برای استفاده حداکثر از افت فشار مجاز به شیوه مستقیم و بدون آزمون و خطا به دست می‌آید [۲۲]. همچنین این رابطه به عنوان پلی برای دخالت دادن طراحی دقیق مبدل‌های حرارتی در بهینه‌سازی و رفع گلوگاه در شبکه مبدل‌های حرارتی مطرح است. برای یک مبدل حرارتی پوسته و لوله معمولی، براساس عدد ناسلت در سمت لوله مقدار ضریب جابجایی برحسب سرعت سیال (V_t) بصورت رابطه (۱) است:

$$NU = 0.023 Re^{0.8} Pr^{0.3} = \frac{hd}{K} \rightarrow h_i = \frac{K}{d} (0.023) \left(\frac{\rho V_t d}{\mu} \right)^{0.8} Pr^{\frac{1}{3}} \quad (1)$$

بنابراین می‌توان ضریب انتقال حرارتی جابجایی سمت لوله را برحسب ثابت K_h مطابق رابطه (۲) بیان کرد:

$$\begin{cases} h_t = K_h V_t^{0.8} \\ K_h = 0.023 \left(\frac{k}{d} \right) Pr^{\frac{1}{3}} \left(\frac{\rho d}{\mu} \right)^{0.8} \end{cases} \quad (2)$$

هم‌چنین با انجام کاری مشابه، رابطه بین افت فشار و سرعت سیال سمت لوله مطابق رابطه (۳) به دست خواهد آمد که وابستگی آن به سرعت برحسب ثابت K_p در رابطه (۴) بیان شده است:

$$\begin{cases} \Delta P_t = 2f \frac{1}{d} \rho V_t^2 n_{pass} \\ f = 0.046 Re^{-0.2} = 0.046 \left(\frac{\rho V_t d}{\mu} \right)^{-0.2} \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} \Delta P_t = K_p V_t^{1.8} n_{pass} \\ K_p = 0.092 \frac{\rho}{d} \left(\frac{\rho d}{\mu} \right) \end{cases} \quad (4)$$

که در این روابط n_{pass} بیان‌کننده تعداد گذرها سمت پوسته است و براساس رابطه (۵) قابل محاسبه خواهد بود:

$$N_t = \frac{4V_o n_{pass}}{\pi V_t d_i^2} \quad (5)$$

که V_o معرف دبی حجمی ورودی و d_i قطر داخلی سمت لوله است. بنابراین رابطه بین افت فشار و سرعت سیال سمت لوله به صورت رابطه (۶) بیان خواهد شد:

غلظت نانو ذرات، عدد ناسلت نیز افزایش می‌یابد [۲۱]. همان‌طوری که بیان شد لزوم افزایش و بهبود عملکرد مبدل‌های حرارتی پوسته و لوله بسیار حائز اهمیت است. پر واضح است که استفاده هم‌زمان از نوارهای پیچشی و نانوسیالات به عنوان بهترین و مؤثرترین روش افزایش این عملکرد خواهد بود. در پژوهش حاضر ضمن بررسی تاثیر استفاده هم‌زمان از این دو روش، تاثیر استفاده از نانوسیالات مختلف بر عملکرد حرارتی در مبدل‌های پوسته و لوله با استفاده از الگوریتم طراحی سریع^۱ مورد بررسی قرار خواهد گرفت. این روش به عنوان آخرین و جدیدترین متد طراحی مبدل‌های حرارتی به شمار می‌رود. باتوجه به اینکه محاسبه ضریب انتقال حرارت و افت فشار، جزء اصلی‌ترین بخش‌های طراحی به شمار می‌رود در طراحی یک مبدل به روش طراحی سریع، افت فشار مجاز^۲ را برای مبدل تعریف می‌کنند که اگر میزان این افت فشار بیش از حد معمول باشد دستگاه مرتعش شده و اگر این افت فشار خیلی پایین‌تر از حد مجاز طراحی باشد با کاهش ضریب انتقال حرارت روبرو خواهیم بود. لذا با ایجاد رابطه‌ای میان ضریب انتقال حرارت جابجایی و افت فشار مجاز برای هر دو سمت پوسته و لوله، کم‌ترین مقدار سطح مورد نیاز در مبدل حرارتی به دست خواهد آمد. به این ترتیب سایر پارامترهای مورد نیاز طراحی یک مبدل قابل حصول خواهد بود.

مواد و روش‌ها

در روش طراحی سریع یک مبدل حرارتی، ارتباط بین ضریب انتقال حرارت با افت فشار مجاز در پوسته و لوله یک مبدل به طور دقیق بیان می‌شود. این الگوریتم براساس روش‌های مختلفی مانند روش کرن پیاده‌سازی می‌شود [۲۲]. در این روش با انتخاب روابط حاکم بر افت فشار و انتقال حرارت، الگوریتم طراحی سریع برای مبدل مورد نظر توسعه داده می‌شود. هدف اصلی در این روش، برقراری

1- Rapid Design Algorithm
2- Allowable Pressure Drop

که در این رابطه L_{tp} طول گام لوله، M_s نرخ جریان سیال گرم سمت پوسته، k_s ضریب هدایت حرارتی سیال پوسته و μ_{sw} ویسکوزیته سیال گرم در جداره دیواره است. هم-چنین در هر دو رابطه ذکر شده پارامترهای a, b, c, ω, u ثوابتی هستند که برای هر نانوسیال متفاوت می-باشند. بنابراین با توجه به روابط ارائه شده و به کمک معادلات موجود در رابطه (۱۳) می توان به یک معادله غیرخطی (رابطه ۱۴) دست یافت که تنها مجهول آن سطح مورد نیاز مبدل است.

$$\frac{Q}{U} = UA F_T \frac{\Delta T}{L.M} \quad (13)$$

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{h_s} + \frac{1}{h_t} + R_D$$

$$\Delta P_t = K_t A h_t^{\frac{\omega}{3+b}}$$

$$\Delta P_s = K_s A h_s^{5.1}$$

$$K_1 A^{1/5.1} + K_2 A^{\frac{3+b}{\omega}} + K_3 A + K_4 = 0 \quad (14)$$

$$K_1 = \left(\frac{K_s}{\Delta P_s} \right)^{1/5.1}$$

$$K_2 = \left(\frac{K_t}{\Delta P_t} \right)^{\frac{3+b}{\omega}} \left(\frac{d_o}{d_i} \right)$$

$$K_3 = \frac{-F \times LMTD}{Q}$$

$$K_4 = R_{ds} + R_{dt} \left(\frac{d_o}{d_i} \right) + \frac{d_o}{2k} \ln \left(\frac{d_o}{d_i} \right)$$

در روابط فوق R_{dt} و R_{ds} معرف رسوب گرفتگی سمت پوسته و لوله می باشد.

پس از محاسبه سطح حرارتی مورد نیاز از روابط ذکر شده ضرایب انتقال حرارت و مقدار سرعت سیال با استفاده از معادلات ارائه شده در رابطه (۱۵) قابل محاسبه خواهند بود:

$$\Delta P_t = K_t A h_t^{\frac{\omega}{3+b}} \rightarrow h_t$$

$$h_t \rightarrow Nu_t = \frac{h_t \times d_o}{k_t} \quad (15)$$

$$Nu_t = c \text{Re}^\omega \text{Pr}^u \times \left(\frac{\mu_t}{\mu_{tw}} \right) \rightarrow V_t$$

هم چنین برای سمت پوسته نیز رابطه (۱۶) در این زمینه موجود است:

$$\Delta P_t = K_p A \left(\frac{d_i^2}{4V_o d_o} \right) V_t^{2.8} \quad (6)$$

با توجه به اینکه وجه اشتراک دو رابطه (۲) و (۶) سرعت سیال سمت لوله است، می توان به رابطه (۷) دست یافت که رابطه بین افت فشار و ضریب جابجایی را بیان می کند (K_{pt} یک عدد ثابت است).

$$\Delta P_t = K_{pt} A h_t^{3.5} \quad (7)$$

$$K_{pt} = K_p \left(\frac{d_i^2}{4V_o d_o} \right) \left(\frac{1}{K_h^{3.5}} \right)$$

با انجام کاری مشابه نیز می توان وابستگی افت فشار مجاز سمت پوسته به ضریب جابجایی آن را مطابق رابطه (۸) به دست آورد:

$$\Delta P_s = K_{sf} A h_s^{5.1} \quad (8)$$

که K_{sf} یک ضریب ثابت بوده و بصورت رابطه (۹) خواهد بود:

$$K_{sf} = \frac{K_2}{K_s^{5.1}} \rightarrow \begin{cases} K_1 = 0.895 \left(\frac{\rho_s}{D_e} \right) \left(\frac{\rho_s D_e}{\mu} \right)^{-0.2} \\ K_2 = K_1 \frac{4L_{tp}^2 \rho_s (L_{tp} - d_i) d_o}{\pi^2 D_s^2 L_{tp} M_s} \end{cases} \quad (9)$$

بنابراین با توجه به روش طراحی سریع به روش کرن فقط با d_i و d_o معلوم بودن خصوصیات فیزیکی و ترمودینامیکی سیال می توان مبدل حرارتی مورد نظر را طراحی کرد. به همین ترتیب می توان برای مبدل حرارتی حاوی نانوسیال و نوارپیشی نیز روابط لازم را به دست آورد که در رابطه (۱۰) ارائه شده اند:

$$\Delta P_t = K_t A_t h_t^{\frac{\omega}{3+b}} \quad (10)$$

$$\Delta P_s = K_s A h_s^{5.1}$$

که ضریب K_t از رابطه کلی زیر محاسبه می شود:

$$K_t = a \times d_i^{\frac{3+b-2\omega}{\omega}} \mu_t^3 \times c k^{\frac{-3-b}{\omega}} \text{Pr}^{\frac{-u(1+b)}{\omega}} \quad (11)$$

و برای K_s نیز داریم:

$$K_s = 67 \times L_{tp} \left(\frac{L_{tp} - d_o}{d_o} \right) D_e^{1.1} \mu_s^{1.3} \left[\left(\frac{\mu_s}{\mu_{sw}} \right)^{-0.14} \right]^{6.1} \quad (12)$$

با مشخص شدن معادلات و روابط لازم برای طراحی مبدل، ابتدا یک مبدل حرارتی که سیالات سرد و گرم آن و پارامترهای مورد نظر برای طراحی آن مشخص بودند از منابع انتخاب شد. اطلاعات مربوط به این مبدل و طراحی اولیه انجام شده بر روی آن در قسمت نتایج مقاله حاضر آورده شده است. پس از انجام طراحی به کمک الگوریتم طراحی سریع براساس روش طراحی کرن، مبدل حرارتی در دو حالت استفاده از نانوسیال و نوار پیچشی طراحی و پارامترهای آن محاسبه شد. برای این منظور و انجام کلیه محاسبات از نرم افزار متلب^۳ نسخه ۲۰۱۶ استفاده شد.

یافته‌ها و بحث

مشخصات مبدل حرارتی پوسته و لوله‌ای که به عنوان مرجع محاسبات در نظر گرفته شده است در جدول (۱) موجود است.

جدول ۱- پارامترهای طراحی مورد استفاده براساس مبدل مرجع [۲۳]

پارامتر	سیال سرد (Tube Side)	سیال گرم (Shell Side)
دبی جرمی	----	$m = 53650 \frac{kg}{hr}$
دما	$15^\circ c \rightarrow 25^\circ c$	$98 \rightarrow 65^\circ c$
ظرفیت حرارتی	$c_p = 4180 \frac{j}{kg.K}$	$c_p = 2684 \frac{j}{kg.K}$
ویسکوزیته	$\mu = 0.001 \frac{kg}{m.s}$	$\mu = 0.00023 \frac{kg}{m.s}$
ضریب هدایت حرارتی	$K = 0.6 \frac{W}{m.K}$	$K = 0.11 \frac{W}{m.K}$
دانسیته	$\rho = 998 \frac{kg}{m^3}$	$\rho = 777 \frac{kg}{m^3}$
ضریب رسوب گرفتگی	$R_{f,i} = 0.00015 (\frac{W}{m^2.K})^{-1}$	$R_{f,o} = 0.00015$
افت فشار مجاز	$\Delta P_i = 42000 Pa$	$\Delta P_o = 7000 Pa$
مقاومت دیواره لوله	$r_w = 0.00004 (\frac{W}{m.K})^{-1}$	----

غلظت نانوسیال مورد استفاده ۰/۷ درصد انتخاب شد. تغییرات عدد ناسلت برای دو نوع نوار پیچشی به صورت شکل (۲) می‌باشد. همان‌طور که مشاهده می‌شود در قسمت

$$\Delta P_s = K_s A h_s^{5.1} \rightarrow h_s \quad (16)$$

$$h_s \rightarrow Nu_s = \frac{h_s \times D_e}{k_s}$$

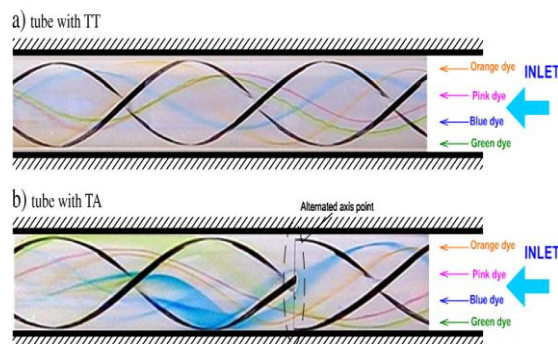
همان‌طوری که مشخص است برای هر مبدل حرارتی باید روابط مربوط به عدد ناسلت و افت فشار برای پوسته و لوله مشخص باشد تا بتوان به کمک آن محاسباتی به مانند آنچه که ذکر شد انجام شود. به همین جهت در مبدل حرارتی مورد نظر در پژوهش حاضر که حاوی نانوسیال آب اکسید آلومینیوم و دو نوع نوار پیچشی است معادلات موجود در روابط (۱۷) مربوط به نوار پیچشی نوع TT^1 و (۱۸) مربوط به نوار پیچشی TA^2 ارائه شده است. در این روابط، نسبت H/D مربوط به ساختار هندسی نوار پیچشی و ϕ بیانگر غلظت نانوسیال مورد استفاده است. تفاوت دو نوع نوار پیچشی استفاده شده در مقاله حاضر، محوریت آن‌هاست که در شکل (۱) نشان داده شده است.

$$Nu = 0.026 Re^{0.768} Pr^{0.4} (0.001 + \phi)^{0.052} \left(0.001 + \frac{H}{D} \right)^{0.1} \quad (17)$$

$$f = 3.134 Re^{-0.308} (1 + \phi)^{0.082} \left(1 + \frac{H}{D} \right)^{0.012}$$

$$Nu = 0.036 Re^{0.8204} Pr^{0.4} (0.001 + \phi)^{0.04} \left(0.001 + \frac{H}{D} \right)^{0.0628}$$

$$f = 2.068 Re^{-0.433} (1 + \phi)^{0.01} \left(1 + \frac{H}{D} \right)^{0.004815} \quad (18)$$



شکل ۱: شماتیک نوارهای پیچشی مورد استفاده (a) نوع TT و (b) نوع TA.

- 1- Typical twisted tape
- 2- Modified twisted tape with alternate axis

با توجه به توضیحاتی که ارائه شد نتایج به دست آمده از مبدل حرارتی برای دو نوع نوار پیچشی در جدول (۲) و جدول (۳) با مبدل مرجع مقایسه شده است.

جدول ۲- نتایج به دست آمده برای مبدل پوسته لوله‌حالی نانو سیال

آب-اکسید آلومینیوم و نوار پیچشی نوع TA

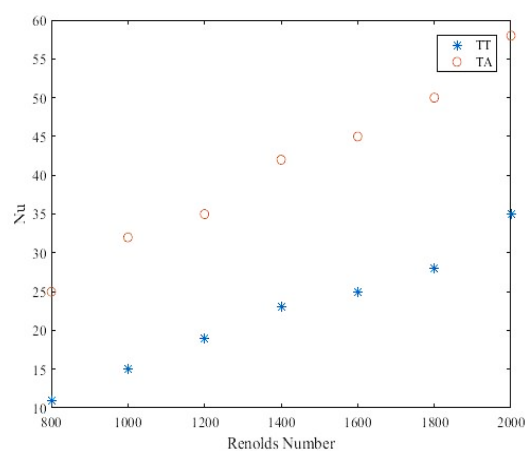
پارامتر	آب-اکسید آلومینیوم و نوار پیچشی TA	آب [۲۳]
سطح مبدل	۱۹/۶۳	۲۸/۴
ضریب کلی حرارت	۱۱۲۳/۵	۸۶۰/۳
ضریب جابجایی لوله	۱۶۸۳۱	۸۶۴۹/۵
ضریب جابجایی پوسته	۲۰۶۱/۹	۱۲۳۵/۸
سرعت سیال سمت لوله	۵/۷۴	۲/۷۷
سرعت سیال سمت پوسته	۱/۰۹	۰/۷۳
تعداد لوله ها	۹۸	۳۶۸
طول لوله	۴/۵۴	۱/۲۸۶
تعداد بافل ها	۱۲	۶

جدول ۳- نتایج به دست آمده برای مبدل پوسته لوله‌حالی نانو سیال

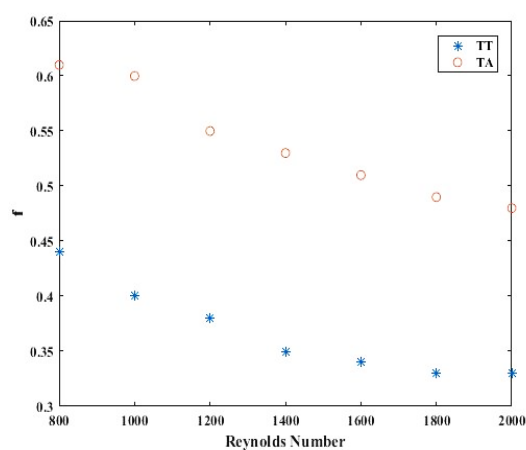
آب-اکسید آلومینیوم و نوار پیچشی نوع TT

پارامتر	آب-اکسید آلومینیوم و نوار پیچشی TT	آب [۲۳]
سطح مبدل	۲۰/۵۵	۲۸/۴
ضریب کلی حرارت	۱۰۷۳	۸۶۰/۳
ضریب جابجایی لوله	۱۵۳۵۱	۸۶۴۹/۵
ضریب جابجایی پوسته	۲۰۴۴	۱۲۳۵/۸
سرعت سیال سمت لوله	۳/۷۲	۲/۷۷
سرعت سیال سمت پوسته	۱/۰۷	۰/۷۳
تعداد لوله ها	۱۱۹	۳۶۸
طول لوله	۳/۴۵	۱/۲۸۶
تعداد بافل ها	۱۰	۶

الف شکل، با افزایش عدد رینولدز، عدد ناسلت که معرف ضریب جابجایی حرارت بوده نیز افزایش می‌یابد. این بدین معنی است که استفاده هم زمان از نوار پیچشی و نانو سیال طبق رابطه تجربی ارائه شده نه تنها مشکلی برای مبدل‌های حرارتی ایجاد نمی‌کند بلکه باعث افزایش عملکرد مبدل و کاهش هزینه‌های انرژی و ساخت آن‌ها نیز می‌شود. هم-چنین تغییرات ضریب افت فشار نیز نشان می‌دهد که استفاده از نوار پیچشی نوع اصلاح شده (TA) به مراتب بهتر از نوع معمولی آن (TT) می‌باشد.

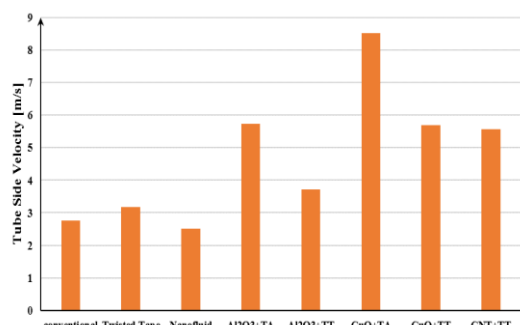


الف

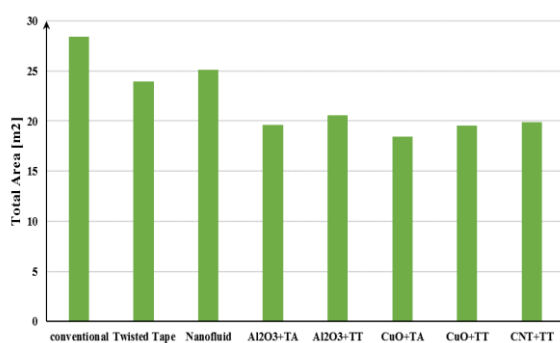


ب

شکل ۲: تغییرات عدد ناسلت برحسب رینولدز برای نوار پیچشی (الف) و تغییرات ضریب افت فشار (ب)



شکل ۵: مقایسه عملکرد مبدل‌های حرارتی براساس سرعت سیال سمت لوله

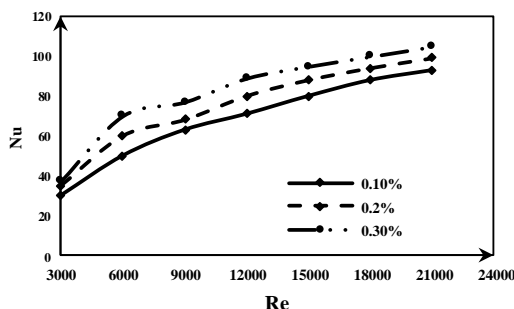


شکل ۶: مقایسه عملکرد مبدل‌های حرارتی براساس سطح حرارتی مورد نیاز

نتیجه‌گیری

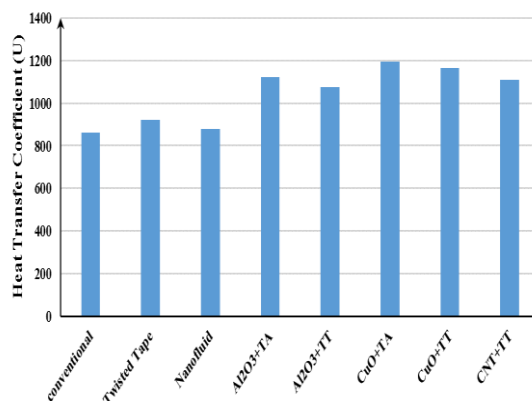
با توجه به نتایج به دست آمده مشخص شده است که با افزایش غلظت نانوسیال و استفاده از نوارهای پیچشی به طور هم زمان، می‌توان شاهد افزایش کارایی مبدل حرارتی و کاهش هزینه‌های ساخت آن بود. چرا که استفاده از نانوسیال باعث افزایش ضریب هدایت حرارتی و جابجایی سیال می‌شود و افزایش غلظت نانوذرات نیز این روند صعودی را تشدید می‌کند. اما به دلیل مشکلات مربوط به ته‌نشینی و افت فشار ایجاد شده در مبدل حرارتی، این روش پیشنهاد نمی‌گردد. از سوی دیگر استفاده از نوارهای پیچشی به دلیل ایجاد جریان آشفته درون مبدل افزایش ضریب جابجایی را در پی خواهد داشت. بنابراین استفاده هم زمان از هر دو روش افزاینده در مبدل، به صورت هم زمان، باعث افزایش بیش‌تر شده و در نتیجه حجم و اندازه مبدل حرارتی کاهش می‌یابد که به تبع آن هزینه ساخت نیز

شکل (۳) نشان می‌دهد که با افزایش غلظت نانوسیال عدد ناسلت نیز افزایش می‌یابد که به تبع آن افزایش عملکرد مبدل و کاهش سطح محاسباتی آن را در پی خواهد داشت.



شکل ۳: تغییرات عدد ناسلت با رینولدز برای غلظت‌های مختلفی از نانوسیال آب-اکسید آلومینیوم

با توجه به نتایج به دست آمده مدلی که عملکرد بهتری نسبت به دیگری دارد، باید مشخص گردد. برای این امر با مقایسه ضرایب کلی انتقال حرارت جابجایی، سطح حرارتی مورد نیاز و سرعت سیال سمت لوله می‌توان دریافت که عملکرد مبدل حرارتی که دارای نوار پیچشی نوع TA است، نسبت به سایر موارد بهتر می‌باشد. بدین منظور برای نانوسیالات مختلفی مانند اکسید مس، نانو لوله کربنی نیز محاسبات مورد نظر انجام شد و با مبدل‌هایی که تنها حاوی نانوسیال و نوار پیچشی بودند نیز مقایسه انجام شد. این امر در شکل‌های ۴، ۵ و ۶ نشان داده شده است.



شکل ۴: مقایسه عملکرد مبدل‌های حرارتی براساس ضریب کلی انتقال حرارت به دست آمده

imperialist competitive algorithm. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 38: p. 195-200.

[12] Liao, Q. and Xin, M.D., 2000, Augmentation of convective heat transfer inside tubes with three-dimensional internal extended surfaces and twisted-tape inserts. *Chemical Engineering Journal*, 78(2-3): p. 95-105.

[13] Al-Fahed, S., Chamra, L.M., and Chakroun, W., 1998, Pressure drop and heat transfer comparison for both microfin tube and twisted-tape inserts in laminar flow. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 18(4): p. 323-333.

[14] Elias M.M., Mahbulul, I.M.S., Saidur, R., Rahim, N.A., 2014, Effect of different nanoparticle shapes on shell and tube heat exchanger using different baffle angles and operated with nanofluid. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 70: p. 289-297.

[15] Heydar Maddah, M.R., Maghsoudi, M., and NasiriKokhdan, S., 2013, The effect of silver and aluminum oxide nanoparticles on thermophysical properties of nanofluids. *Journal Of Nanostructure in Chemistry*, p. 3-28.

[16] ANGUE MINTSA, C.TAM, G.R., 2009, NGUYEN, New Temperature Dependent Thermal Conductivity Data of Water Based Nanofluids. *International Journal of Thermal Sciences*, 48, p. 363-371.

[17] Sreelakshmy K.R, A.S.N., Vidhya K.M, Saranya T.R, Sreeja C Nair., 2014, An Overview of Recent Nanofluid Research. *International Research Journal of Pharmacy*, p. 239-24.

[18] Sekhar, Y.R., 2013, et al., Heat transfer enhancement with Al 2 O 3 nanofluids and twisted tapes in a pipe for solar thermal applications. *Procedia Engineering*, 64: p. 1474-1484.

[19] Sharma, K., L.S. Sundar, and P. Sarma., 2009, Estimation of heat transfer coefficient and friction factor in the transition flow with low volume concentration of Al₂O₃ nanofluid flowing in a circular tube and with twisted tape insert. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 36(5): p. 503-507.

[20] Wongcharee, K. and S. Eiamsa-Ard., 2011, Enhancement of heat transfer using CuO/water nanofluid and twisted tape with alternate axis. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 38(6): p. 742-748.

[21] Mohammed, H., H.A. Hasan, and M. Wahid., 2013, Heat transfer enhancement of nanofluids in a double pipe heat exchanger with louvered strip inserts. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 40: p. 36-46.

[22] M.A. Akhavan-Behabadi, Mohamad Shahidi, M.R. Aligoodarz., 2015, An experimental study on heat transfer and pressure drop of MWCNT-water nano-fluid inside horizontal coiled wire inserted tube, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 63: p. 62-72.

[۲۳] صبوری شیرازی، ا.ح.، ۱۳۸۶، الگوریتم طراحی سریع در مبدل

های گرمایی پوسته و لوله، مجله مبدل گرمایی.

کاهش می‌یابد. هم‌چنین مطالعه حاضر نشان داد که با استفاده از روش‌ها و متدهای جدید طراحی مانند الگوریتم طراحی سریع می‌توان به نتایج قابل توجهی دست یافت که پیش از انجام مطالعات عملی و آزمایشگاهی می‌تواند اطلاعات مناسبی در اختیار محققان قرار دهد.

منابع

[1] Promvonge, P., 2008, Thermal augmentation in circular tube with twisted tape and wirecoil turbulators. *Energy Conversion and Management*, 49(11): p. 2949-2955.

[2] Murugesan, P., Mayilsamy, K. and Suresh, S., 2010, Heat transfer and friction factor studies in a circular tube fitted with twisted tape consisting of wire-nails. *Chinese J. Chemical Engineering*, 18(6): p. 1038-1042.

[3] Nagarajan, P., Mukkamala, Y., Sivashanmugam, P., 2010, Studies on heat transfer and friction factor characteristics of turbulent flow through a micro-finned tube fitted with left-right inserts. *Applied Thermal Engineering*, 30(13): p. 1666-1672.

[4] Chang, S.W., Lees, A.W., and Chang, H. T., 2009, Influence of spiky twisted tape insert on thermal fluid performances of tubular air-water bubbly flow. *International J. Thermal Sciences*, 48(12): p. 2341-2354.

[5] Sivashanmugam, P. and Suresh, S., 2007, Experimental studies on heat transfer and friction factor characteristics of turbulent flow through a circular tube fitted with regularly spaced helical screw-tape inserts. *Applied Thermal Engineering*, 27(8): p. 1311-1319.

[6] Eiamsa-ard, S. and Promvonge, P., 2005, Enhancement of heat transfer in a tube with regularly-spaced helical tape swirl generators. *Solar Energy*, 78(4): p. 483-494.

[7] Saha, S. and Saha, S.K., 2013, Enhancement of heat transfer of laminar flow of viscous oil through a circular tube having integral helical rib roughness and fitted with helical screw-tapes. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 47: p. 81-89.

[8] Chang, S.W., Jan, Y.J., and Liou, J.S., 2007, Turbulent heat transfer and pressure drop in tube fitted with serrated twisted tape. *International Journal of Thermal Sciences*, 46(5): p. 506-518.

[9] Gül, H. and Evin, D., 2007, Heat transfer enhancement in circular tubes using helical swirl generator insert at the entrance. *International J. Thermal Sciences*, 46(12): p. 1297-1303.

[10] Saha, S., Dutta, A., and Dhal, S., 2001, Friction and heat transfer characteristics of laminar swirl flow through a circular tube fitted with regularly spaced twisted-tape elements. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 44(22): p. 4211-4223.

[11] Karami, A., 2012, et al., Optimization of heat transfer in an air cooler equipped with classic twisted tape inserts using