

# بررسی تأثیر فناوری‌های جدید بهبود انتقال گرما در طراحی مبدل‌های گرمایی پوسته-لوله‌ای

محمدرضا جعفری نصر<sup>۱\*</sup>، احسان شکاریان<sup>۲</sup>، امیرحسین طریقی‌الاسلامی<sup>۳</sup>، فرتاش خداوردی<sup>۴</sup>، مجید بادینی پورآذر<sup>۵</sup>

۱- استاد مهندسی شیمی، پژوهشگاه صنعت نفت

۲- دانشجوی دکتری مهندسی شیمی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات تهران

۳- دانشجوی دکتری مهندسی شیمی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد ماهشهر

تاریخ دریافت: ۹۳/۰۶/۲۷ تاریخ پذیرش: ۹۳/۰۹/۲۵

پیام نگار: [nasrmrj@ripi.ir](mailto:nasrmrj@ripi.ir)

## چکیده

با وجود مزایای مبدل‌های پوسته-لوله‌ای، پائین بودن بازده گرمایی، از بزرگترین مشکلات این دستگاه‌های تبادل گرمایی محسوب می‌شود. در این مقاله تلاش می‌شود تا با ارائه الگوریتمی ساده به صورت کمی تأثیر فناوری‌های جدید بهبود انتقال گرما در طراحی مبدل‌های گرمایی پوسته-لوله‌ای بررسی شود. برای این منظور، ابتدا خواص گرمایی (ناسلت) و ضریب اصطکاک سیال خالص، نانوسیال آب-آلومینیم اکسید و لوله در حالت استفاده از آشفته‌ساز، از نوع نوار پیچ‌خورده تعیین و سپس از روش طراحی مبدل گرمایی به روش الگوریتم سریع و از طریق رمزنویسی در محیط نرم‌افزار MATLAB، یک مبدل گرمایی طراحی و پارامترهای آن بررسی شده است. در این مطالعه، تأثیر کاربرد این فناوری به صورت مجزا، تلفیقی و افزایش غلظت نانوذرات در نانوسیال بر روی پارامترهای طراحی نیز بررسی شده است. نتایج نشان می‌دهند که استفاده از آشفته‌ساز به تنهایی و استفاده هم‌زمان از آشفته‌ساز و نانوسیال چگونه و به چه میزان می‌تواند موجب تغییر در پارامترهای طراحی مبدل نمونه و سرانجام کاهش در سطح مورد نیاز مبدل شود.

**کلیدواژه‌ها:** مبدل پوسته-لوله‌ای، تکنیک‌های افزایش انتقال حرارت (HTE)، آشفته‌ساز نوار پیچ‌خورده، نانوسیال آب-آلومینیم اکسید، الگوریتم طراحی سریع

## ۱- مقدمه

جدید در طراحی یا افزایش بهره‌وری این مبدل‌ها هستند. یکی از روش‌های طراحی مبدل‌ها رسیدن به بار گرمایی متناظر با افت فشار مجاز جریان‌های سرد و گرم است [۱،۲]. در روش‌های رایج، طراحی مبدل معمولاً از فرایندهای طولانی حدس و خطا برای رسیدن به بار گرمایی مورد نیاز و افت فشارهای مجاز بهره گرفته می‌شود. به طور کلی، در این روش‌ها به منظور اطمینان از رعایت افت فشار مجاز، مبدل را از اندازه مورد نیاز بزرگ‌تر طراحی می‌کنند.

مبدل‌های گرمایی پوسته-لوله‌ای بیشترین کاربرد را در صنایع مختلف شیمیایی اعم از نفت، گاز، پتروشیمی و نیروگاهی دارند. با وجود افزایش کاربرد انواع دیگر مبدل‌ها و کارایی بهتر آن‌ها، هنوز فراگیری مبدل‌های پوسته-لوله‌ای در برابر دیگر مبدل‌ها قابل قیاس نیست. بنابراین، هنوز پژوهشگران بسیاری در پی ارائه روش‌های

\* تهران، پژوهشگاه صنعت نفت

افزایش می‌دهند. علی‌رغم افزایش افت فشار در لوله‌ها به دلیل استفاده از آشفته‌سازها، به سبب افزایش چشمگیر بار گرمایی مبدل‌ها طی دو دهه اخیر توجه بسیاری به این تجهیزات شده است [۸]. هرچند، همواره انعطاف‌پذیری در کاهش تعداد گذرهای سمت لوله و بهره‌گیری همزمان از آشفته‌سازها این فرصت را در اختیار مهندسان طراح قرار می‌دهد تا بدون نگرانی از مواجه شدن با افت فشارهای بالاتر از مقادیر مجاز، همچنان به طراحی مبدلی با همان افت فشار مجاز داده شده و با سطح انتقال گرمای کمتر دست یابند. از انواع آشفته‌سازهای به کار رفته در لوله مبدل‌های گرمایی می‌توان به دستگاه‌های اختلاط ایستا<sup>۶</sup> [۹] و آشفته‌ساز نوار پیچ خورده<sup>۷</sup> [۱۰، ۱۱] اشاره کرد.

نوع آشفته‌ساز نوار پیچ خورده، به دلیل برهم زدن لایه مرزی و افزایش گردابه‌ها و ایجاد افت فشار کمتر، به نسبت سایر انواع آشفته‌سازها از اهمیت بیشتری برخوردار است. در این نوع آشفته‌سازها نسبت  $H/D$  معادل یک گام از آشفته‌ساز است. بلندی و کوتاهی این گام‌ها در عملکرد آشفته‌ساز در افزایش شدت انتقال گرما تأثیر دارند [۱۰، ۱۱].

نانوسیالات از توزیع نانوذرات جامد در یک سیال پایه مانند آب، روغن و یا اتیلن گلیکول تولید می‌شوند. در این روش، افزایش ضریب رسانایی گرمایی ایده اصلی در بهبود مشخصه‌های انتقال گرمای سیالات است. از دیدگاه فیزیکی، رسانش گرمایی به خاصیتی از ماده اطلاق می‌شود که نمایان‌گر توانایی آن ماده در هدایت گرماست. ضریب رسانایی گرمایی ذرات جامد معمولاً خیلی بزرگ‌تر از سیالات است، مثلاً، هدایت گرمایی مس در دمای محیط حدود ۷۰۰ برابر آب و ۳۰۰۰ برابر روغن موتور است. از سوی دیگر، رسانش گرمایی مواد فلزی نیز بسیار بیشتر از رسانش گرمایی مواد غیرفلزی است. به همین دلیل، انتظار می‌رود سیالات حاوی ذرات جامد معلق فلزی یا اکسید فلزی دارای رسانش گرمایی بیشتری نسبت به سیالات خالص باشند [۱۲ و ۱۳].

نانو مواد معلق خواص حرکتی و گرمایی سیال پایه را به شدت تحت تأثیر قرار می‌دهند. تحقیقات گسترده‌ای در حوزه مشخصه‌های گرمایی نانو سیالات صورت گرفته که تقریباً همه آن‌ها موید بهبود چشمگیر این خواص است. مثلاً، تحقیقات بر روی نانو سیالات آب و

پلی و همکارانش [۳، ۴] روش جدیدی برای الگوریتم طراحی مبدل ارائه کردند که به صورت همزمان بیشترین بار گرمایی را در محدوده افت فشارهای مجاز با در نظر گرفتن کمترین سطح مورد نیاز محاسبه می‌کند، به طوری که در نتیجه به کمترین میزان هزینه سرمایه‌گذاری منجر خواهد شد. این روش را روش الگوریتم طراحی سریع<sup>۱</sup> (RDA) نامیده‌اند.

آنان معادلات ساده‌ای برای هر جریان بر اساس روش کرن ارائه دادند که بین افت فشار و ضریب انتقال گرمای سیال و سطح مبدل رابطه برقرار می‌کند. ترکیب روابط افت فشار با روابط اصلی مبدل‌های گرمایی این امکان را می‌دهد که الگوریتم طراحی چنان تنظیم شود که از تکرار مداوم برای به دست آوردن نتایج جلوگیری شود. با این حال، استفاده از رابطه کرن به دلیل استفاده از روابط ساده در بخش پوسته، امکان ایجاد خطا را افزایش می‌دهد. آنان بعدها در الگوریتم پیشنهادی خود از روابط بل-دلور<sup>۲</sup> برای تصحیح الگوی جریان در بخش پوسته بهره بردند و توانستند نتایج نزدیک‌تری از تحلیل گرمایی-هیدرولیکی مبدل‌های پوسته-لوله‌ای با نتایج تجربی ارائه کنند [۳، ۵]. در این مدل، آنان مقادیر نشتی سیال در کناره بفل‌ها و جریان‌های عبوری کنارگذاره<sup>۳</sup> ارائه شده است.

همانگونه که گفته شد، از آنجا که مبدل‌های گرمایی پوسته-لوله‌ای هنوز از پرکاربردترین مبدل‌ها محسوب می‌شوند، روش‌های نوینی برای افزایش انتقال گرما در آن‌ها و سایر تجهیزات تبادل گرمایی ارائه شده است. این روش‌ها به فناوری بهبود انتقال گرما<sup>۴</sup> (HTE) مشهور است [۶].

در مبدل‌های پوسته-لوله‌ای می‌توان از فناوری HTE هم در بخش پوسته و هم در بخش لوله استفاده کرد. در بخش پوسته، عمده‌ترین راه استفاده از بفل‌های مارپیچی است. نصر و شفقت [۷] ترکیب استفاده از فناوری HTE و روش RDA را ارائه کردند. در بخش لوله نیز از نانو سیالات، انواع آشفته‌سازها و ... به عنوان روش‌هایی از فناوری HTE می‌توان کمک گرفت.

آشفته‌سازها از روش‌های غیر فعال<sup>۵</sup> فناوری HTE به‌شمار می‌آیند که بدون نیاز به انرژی خارجی آهنگ انتقال گرما را

1. Rapid Design Algorithm (RDA)
2. Bell- Delaware
3. By Pass
4. Heat Transfer Enhancement
5. Passive

6. Static Mixer  
7. Twisted Tape Insert

روغن موتور در حضور تنها ۵٪ حجمی از نانوذرات اکسید مس، افزایش حدود ۶۰ درصدی در رسانش گرمایی را نشان داد و یا می‌توان به استفاده مقدار کمی (کمتر از ۱٪ حجمی) از نانوذرات مس (Cu) یا نانولوله‌های کربنی در آب و روغن موتور اشاره کرد که موجب افزایش ۷۴ و ۱۵۰ درصدی رسانش گرمایی شد. حضور نانوذرات در سیال پایه موجب افزایش رسانش گرمایی، ضریب رسانایی گرمایی جابه‌جایی و همچنین گرانش می‌شود [۱۲ و ۱۳].

تأثیرات افزایش بار گرمایی توسط آشفته سازهای نوار پیچ خورده توسط ساندر و شارما [۱۰، ۱۱] برای جریان‌های آرام و آشفته بررسی شد. آنان از آشفته ساز نوار پیچ خورده در حضور نانوسیال آلومینیم اکسید استفاده کردند. آنان در مطالعاتشان روابطی برای ضریب اصطکاک و ناسلت برای حالتی که در لوله، هم از نانوسیال آلومینیم اکسید و هم از آشفته ساز نوار پیچ خورده استفاده شده بود، گزارش کردند [۱۰، ۱۱].

## ۱-۲ الگوریتم طراحی مبدل گرمایی و روابط سمت لوله و پوسته

الگوریتمی که در این مقاله به کمک برنامه MATLAB و روش RDA برای طراحی مبدل‌های گرمایی به کار رفته است، در شکل (۱) نشان داده شده است؛ که در این الگوریتم، ضریب تصحیح دمایی مبدل است و به P و R وابستگی دارد که در قسمت علائم تعریف آن‌ها ارائه شده‌اند.

روابط سمت پوسته: در این مقاله، از روابط بیان شده توسط کرن برای بدست آوردن رابطه بین ضریب انتقال گرما و افت فشار در پوسته استفاده شده است. روابط پیشنهاد شده توسط کرن برای سمت پوسته از این قرار است [۹].

$$\Delta P_s = K_s \cdot A \cdot h_s^{5.1} \quad (2)$$

$$K_s = \frac{67 L_{tp} \cdot (L_{tp} - D_t) \cdot D_e^{1.1} \cdot \mu_s^{1.3}}{D_t \cdot M_s \cdot \rho_s \cdot k_s^{3.4} \cdot C_{ps}^{1.7}}$$

در این مقاله، در ۴ حالت مختلف (حالت‌های متفاوت لوله و پوسته در همه حالات یکسان است) برای یک مثال خاص، مبدل گرمایی طراحی شده که در زیر به حالت‌های مختلف و روابط حاکم بر آن اشاره شده است. همچنین، تأثیر افزایش غلظت نانوذرات در نانوسیال نیز بررسی شده است.

حالت ۱. استفاده از سیال آب در لوله خالی: در این حالت، تنها از آب خالص به عنوان سیال سمت لوله استفاده شده و روابط عدد ناسلت و ضریب اصطکاک از این قرار است [۱۵].

$$Nu = 0.023 Re^{0.8} Pr^{1/3} \quad (3)$$

$$f = 0.184 Re^{-0.2}$$

در مقاله حاضر تأثیر استفاده از نانوسیال آب-آلومینیم اکسید، آشفته‌ساز (از نوع نوار پیچ خورده) و استفاده همزمان از این دو که همگی به عنوان روش‌های جدید افزایش انتقال گرما محسوب می‌شوند، بر میزان سطح انتقال گرمایی لازم و دیگر پارامترهای طراحی مبدل‌های گرمایی پوسته و لوله مورد بررسی کمی قرار گرفته است.

۱-۱ روابط بنیادی روش RDA

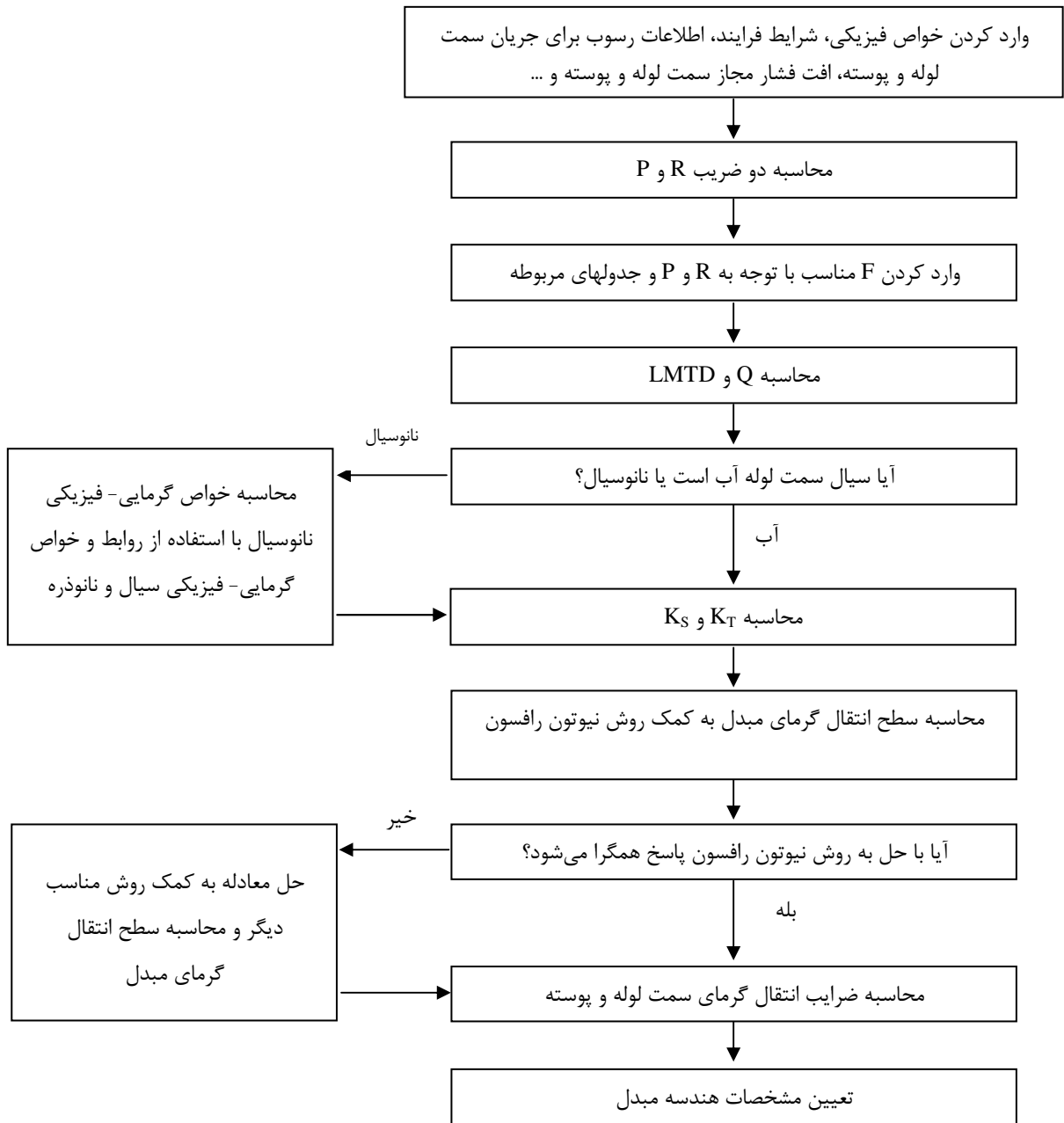
الگوریتم طراحی سریع مبدل، یکی از شیوه‌های طراحی مبدل‌های گرمایی به شمار می‌رود که در آن علاوه بر حذف هرگونه حدس و خطا و تکرار و تغییر در هندسه مبدل، منجر به دستیابی سریع به نتایج بهینه طراحی نیز می‌شود. محاسبه ضریب انتقال گرما و افت فشار، جزء اصلی‌ترین بخش‌های طراحی به شمار می‌روند [۹]. در روش RDA سطح مبدل براساس بیشترین افت فشار مجاز در پوسته و لوله و حل دستگاه معادلات زیر به دست می‌آید [۱۴].

## ۱-۱ روابط بنیادی روش RDA

که در آن تمامی علائم در بخش فهرست نشان‌ها و اختصارات تعریف شده‌اند.  $\Delta P_t$  و  $\Delta P_s$ ، به ترتیب، افت فشار مجاز برای پوسته و لوله، و

$$\left\{ \begin{array}{l} A = \frac{Q}{F_T \Delta T_{LM}} \left( \frac{1}{h_s} + \frac{1}{h_t} + \sum R \right) \\ \Delta P_t = K_T \cdot A \cdot h_t^n \\ \Delta P_s = K_S \cdot A \cdot h_s^m \end{array} \right. \quad (1)$$

شماره هشتاد (۱۳۹۴) - سال چهاردهم - نشریه مهندسی شیمی ایران -



شکل ۱. الگوریتم طراحی مبدل‌های گرمایی.

$$k_1 = 0.092 \left( \frac{\rho_t}{D_i} \right) \left( \frac{\rho_t D_i}{\mu_t} \right)^{-0.2}$$

$$k_2 = 0.023 Pr^{1/3} \left( \frac{k_t}{D_i} \right) \left( \frac{\rho_t D_i}{\mu_t} \right)^{0.8}$$

حالت ۲. استفاده از نانوسیال  $Al_2O_3$ -آب در لوله خالی: در این حالت در لوله بدون آشفته ساز از نانوسیال استفاده شده و هدف

در نتیجه رابطه‌ی بین افت فشار و ضریب انتقال گرما به این قرار به دست می‌آید:

$$\Delta P_t = K_T \cdot A \cdot h^{3.5} \quad (4)$$

$$K_T = k_1 \frac{\rho_t D_i^2}{4 M_t D_t} \left( \frac{1}{k_2} \right)^{3.5}$$

حالت ۴. استفاده از نانوسیال  $Al_2O_3$ -آب در لوله حاوی آشفته ساز نوار پیچ خورده: در این حالت تاثیر استفاده همزمان آشفته ساز و نانوسیال بررسی می شود. برای این حالت نیز از روابط ارائه شده توسط ساندار و شارما [۱۱] را به کار می گیرند.

$$Nu = 0.03666Re^{0.8204}Pr^{0.4}(0.001 + \phi)^{0.04704}(0.001 + \frac{H}{D})^{0.06281}$$

$$f = 2.068Re^{-0.4330}(1 + \phi)^{0.01}(1 + \frac{H}{D})^{0.004815} \quad (۹)$$

در نتیجه، رابطه بین افت فشار و ضریب انتقال گرما به این صورت درمی آید:

$$\Delta P_t = K_T \cdot A \cdot h^{3.1290} \quad (۱۰)$$

$$K_T = k_1 \frac{\rho_t D_i^2}{4M_t D_t} \left(\frac{1}{k_2}\right)^{3.1290}$$

$$k_1 = 4.136(1 + \phi)^{0.01} \left(1 + \frac{H}{D}\right)^{0.004815} \left(\frac{\rho_t}{D_i}\right) \left(\frac{\rho_t D_i}{\mu_t}\right)^{-0.4330}$$

$$k_2 = 0.03666(0.001 + \phi)^{0.04704} (0.001 + \frac{H}{D})^{0.06281} Pr^{0.4} \left(\frac{k_t}{D_i}\right) \left(\frac{\rho_t D_i}{\mu_t}\right)^{0.8204}$$

## ۲- بررسی یک مورد پژوهی

به منظور بررسی واقعی تأثیر استفاده از تکنیک های افزایش انتقال گرما، در این بخش یک مثال با ۴ حالت ذکر شده در مرحله قبل، بررسی می شود. افت فشار مجاز سمت لوله و پوسته، به ترتیب، ۴۲۰۰۰ و ۷۰۰۰ پاسکال، و مبدل دارای ۱ پوسته و ۶ گذر لوله تماماً از جنس کربن استیل است. شدت جریان سمت پوسته برابر با ۱۴/۹۰ kg/s است. خواص فیزیکی و دیگر اطلاعات سیال سمت لوله (آب) و پوسته در جدول (۱) درج شده است [۱۵].

باید گفت، در صورتی که در سمت لوله سیال آب باشد (حالات ۱ و ۳) از خواص فیزیکی آب به عنوان سیال سمت لوله استفاده شده است و در صورتی که نانوسیال باشد (حالات ۲ و ۴)، به کمک خواص گرمایی- فیزیکی آب و نانوذره که در جدولهای (۱) و (۲) موجود است، و با استفاده از روابط (۱۱) تا (۱۴) [۱۶]، خواص گرمایی- فیزیکی نانوسیال محاسبه شده و از این مقادیر به عنوان خواص سیال سمت لوله استفاده شده است.

بررسی تاثیر استفاده از نانوسیال بر پارامترهای طراحی مبدل است. در این حالت، برای عدد ناسلت و ضریب اصطکاک از روابط پیشنهاد شده [۱۶] زیر استفاده شده است.

$$Nu = 0.021Re^{0.8}Pr^{0.5} \quad (۵)$$

$$f = 0.316Re^{-0.2}$$

در نتیجه، روابط ارائه شده برای ناسلت و ضریب اصطکاک، رابطه زیر بیانگر ارتباط بین افت فشار و ضریب انتقال گرما می شود.

$$\Delta P_t = K_T \cdot A \cdot h^{3.5} \quad (۶)$$

$$K_T = k_1 \frac{\rho_t D_i^2}{4M_t D_t} \left(\frac{1}{k_2}\right)^{3.5}$$

$$k_1 = 0.632 \left(\frac{\rho_t}{D_i}\right) \left(\frac{\rho_t D_i}{\mu_t}\right)^{-0.2}$$

$$k_2 = 0.021Pr^{0.5} \left(\frac{k_t}{D_i}\right) \left(\frac{\rho_t D_i}{\mu_t}\right)^{0.8}$$

حالت ۳. استفاده از سیال آب در لوله حاوی آشفته ساز نوار پیچ خورده: در این حالت تأثیر استفاده از آشفته ساز بر پارامترهای طراحی مبدل بررسی می شود. برای این حالت از روابط ارائه شده توسط ساندار و شارما [۱۱] استفاده می شود که حاصل خطی سازی از نتایج تجربی است:

$$Nu = 0.02649Re^{0.8204}Pr^{0.4}(0.001 + \frac{H}{D})^{0.06281} \quad (۷)$$

$$f = 2.068Re^{-0.4330}(1 + \frac{H}{D})^{0.004815}$$

با بهره گیری از این روابط، برای افت فشار و ضریب انتقال گرما به این رابطه می رسیم:

$$\Delta P_t = K_T \cdot A \cdot h^{3.1290} \quad (۸)$$

$$K_T = k_1 \frac{\rho_t D_i^2}{4M_t D_t} \left(\frac{1}{k_2}\right)^{3.1290}$$

$$k_1 = 4.136(1 + \frac{H}{D})^{0.004815} \left(\frac{\rho_t}{D_i}\right) \left(\frac{\rho_t D_i}{\mu_t}\right)^{-0.4330}$$

$$k_2 = 0.02649(0.001 + \frac{H}{D})^{0.06281} Pr^{0.4} \left(\frac{k_t}{D_i}\right) \left(\frac{\rho_t D_i}{\mu_t}\right)^{0.8204}$$

جدول ۱. اطلاعات مربوط به سیالات سمت لوله و پوسته.

$T_{out}$ (°C)	$T_{in}$ (°C)	فاکتور رسوب ( $m^2K/W$ )	$\mu$ (kg/m.s)	$k$ (W/m.K)	$C_p$ ( $\frac{J}{kgK}$ )	$\rho$ ( $kg/m^3$ )	(سیال / مسیر)
۲۵	۱۵	۰/۰۰۰۱۵	۰/۰۰۱	۰/۶۰	۴۱۸۰	۹۹۸	آب (سرد/لوله)
۶۵	۹۸	۰/۰۰۰۱۵	۰/۰۰۰۲۳	۰/۱۱	۲۶۸۴	۷۷۷	سیال (گرم/پوسته)

جدول ۲. خواص گرمایی- فیزیکی نانوذره.

$C_p$ (J/kgK)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	
۸۸۰	۳۹۷۰	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>

## ۳- نتایج و بحث

$$\rho_{nf} = \rho_f(1 - \phi) + \phi\rho_s \quad (11)$$

## ۳-۱ اعتبارسنجی

$$C_{p_{nf}} = C_{p_f}(1 - \phi) + \phi C_{p_s} \quad (12)$$

به منظور بررسی صحت نتایج ناشی از طراحی به روش الگوریتم سریع، ابتدا نتایج حاصل از طراحی به کمک این روش با نتایج حاصل از روش کرن و روش بل- دلاور مقایسه می‌شود. در جدول (۳) نتایج طراحی مثال بالا به ۳ روش کرن، بل دلاور و روش الگوریتم طراحی سریع با یکدیگر مقایسه شده است. همانطور که در این جدول قابل مشاهده است، تطابق خوبی بین نتایج برقرار است. بنابراین محاسبات تکراری حدس و خطا، مقادیر افت فشار در روش کرن و بل دلاور متناسب با حداکثر افت فشار مجاز نیست که همین امر حاکی از ارجحیت روش طراحی سریع است.

$$\mu_{nf} = \mu_f(1 + 39.11\phi + 533.9\phi^2) \quad (13)$$

$$k_{nf} = (1 + 7.47\phi)k_f \quad (14)$$

## ۲-۱ ثابتها و فرضها

- نوع مبدل، پوسته و لوله فرض شده است.
- فرآیند در حالت پایا (Steady-State) است.
- خواص فیزیکی سیال ثابت است.
- همه خواص فیزیکی برای میانگین دمای پوسته و لوله گزارش شده است.
- سمت پوسته از روابط کرن برای طراحی استفاده شده است.
- مبدل ناهمسو و تعداد پوسته ثابت و معادل ۱ در نظر گرفته شده است.
- زاویه لوله‌ها در پوسته ۹۰ درجه در نظر گرفته شده است.
- با توجه به سرعت، قطر لوله و دبی، جریان در لوله و پوسته متلاطم است.
- H/D آشفته ساز، ثابت و برابر ۱۰ در نظر گرفته شده است.

## ۳-۲ تأثیر بهره‌گیری از نانوسیال و افزایش غلظت نانوسیال

در جدول (۴) تأثیر بهره‌گیری از نانوسیال و افزایش غلظت نانوسیال با حالت سیال آب خالص مقایسه شده است. همانگونه که از نتایج این جدول برمی‌آید، استفاده از نانوسیال موجب کاهش سطح انتقال گرمای مورد نیاز در مبدل شده است که این موضوع به نوبه خود یک مزیت است و در نتیجه آن، هزینه سرمایه گذاری اولیه نسبت به حالت سیال آب خالص کاهش می‌یابد. البته با توجه به جدول (۴) می‌توان گفت که استفاده از نانوذرات تا غلظت معینی موجب بهبود، و استفاده بیشتر از آن موجب بدتر شدن پارامترهای طراحی

جدول ۳. مقایسه نتایج حاصل از روش طراحی سریع (RDA) با روش‌های کرن و بل-دلور.

پارامترها (ضرایب)	RDA	کرن [۱۵]	بل-دلور [۱۵]
مساحت (m <sup>2</sup> )	۲۸/۴	۲۸/۴	۲۸/۴
h <sub>t</sub> (W/m <sup>2</sup> .°C)	۸۶۴۹/۵	۸۶۴۲/۳	-
h <sub>s</sub> (W/m <sup>2</sup> .°C)	۱۲۳۵/۸	۱۲۷۰/۷	۱۱۶۸/۵
Re <sub>t</sub>	۴۲۵۷۳	۴۲۵۶۸	-
Re <sub>s</sub>	۵۸۹۴۱	۶۱۸۳۲	۴۲۷۸۹
N <sub>t</sub>	۳۶۸	۳۶۸	۳۶۸
L (m)	۱/۲۸۶۰	۱/۲۸۶۰	۱/۲۸۶۰
D <sub>s</sub> (m)	۰/۵۴۹۸	۰/۵۴۹۸	۰/۵۴۹۸
L <sub>bc</sub> (m)	۰/۱۹۲۷	۰/۱۸۳۷	۰/۱۸۳۷
ΔP <sub>t</sub> (kPa)	۴۲/۰	۴۱/۹	-
ΔP <sub>s</sub> (kPa)	۷/۰	۸/۱	۲/۹

گرمایی کاهش می‌یابد. در نتیجه، بین این دو پارامتر رقابتی برقرار است که یکی سبب افزایش ضریب انتقال گرمای جابه‌جایی و دیگری سبب کاهش آن می‌شود. پس، با توجه به جدول (۴) می‌توان گفت که تا ۰/۱٪ استفاده از نانوذرات ضریب انتقال گرمای رسانش بر ظرفیت گرمایی چیره می‌شود و موجب افزایش ضریب انتقال گرمای جابه‌جایی می‌شود و در استفاده بیشتر از نانوذرات، روال برعکس می‌شود که در نتیجه کاهش ضریب انتقال گرمای جابه‌جایی در لوله، سطح افزایش می‌یابد.

نکته دیگری که با توجه به این جدول می‌توان به آن اشاره کرد، این نکته است که حتی در حالت استفاده بهینه از نانوذرات (۰/۱٪) نیز میزان کاهش در سطح مبدل، ناچیز است.

(که مهم‌ترین آن‌ها سطح مبدل است) می‌شود. علت این پدیده را می‌توان از این قرار تحلیل کرد: خواص فیزیکی نانوسیال، از جمله چگالی، ظرفیت گرمایی، گرانشی و رسانش گرمایی کاملاً با خواص فیزیکی سیال پایه متفاوت است (این موضوع به وضوح در جدول (۴) قابل مشاهده است). ضریب انتقال گرمای جابه‌جایی اجباری نانوسیال به هدایت گرمایی و ظرفیت گرمایی سیال پایه و نانوذرات، الگوی جریان، عدد رینولدز و پراتل، دما، غلظت حجمی نانوذرات در نانوسیال، ابعاد نانوذرات و شکل نانوذرات وابسته است [۱۷]. برای افزایش ضریب انتقال گرمای جابه‌جایی باید ضریب انتقال گرمای رسانشی و ظرفیت گرمایی، هر دو افزایش یابند. اما همانطور که در جدول (۴) مشاهده می‌شود، با افزایش غلظت نانوذرات در سیال پایه، ضریب انتقال گرمای رسانشی افزایش، اما ظرفیت

جدول ۴. تأثیر بهره‌گیری از نانوسیال و افزایش غلظت نانوسیال بر روی پارامترهای طراحی مبدل.

پارامترها (واحد)	ساده	NF-%۰/۱	NF-%۰/۲	NF-%۰/۳	NF-%۰/۴	NF-%۰/۵	NF-%۰/۱۰
k <sub>NF</sub> (W/m.°C)	۰/۶۰۰۰	۰/۶۰۴۵	۰/۶۰۹۶	۰/۶۱۳۴	۰/۶۱۷۹	۰/۶۲۲۴	۰/۶۲۸۲
C <sub>PNF</sub> (J/kg.°C)	۴۱۸۰	۴۱۷۶/۷	۴۱۷۳/۴	۴۱۷۰/۱	۴۱۶۶/۸	۴۱۶۳/۵	۳۸۵۰
ρ <sub>NF</sub> (kg/m <sup>3</sup> )	۹۹۸	۱۰۰۱/۰	۱۰۰۳/۹	۱۰۰۶/۹	۱۰۰۹/۹	۱۰۱۲/۹	۱۲۹۵/۲
μ <sub>NF</sub> (kg/m.s)	۰/۰۰۱۰	۰/۰۰۱۰	۰/۰۰۱۱	۰/۰۰۱۱	۰/۰۰۱۲	۰/۰۰۱۲	۰/۰۱۰۳
Area (m <sup>2</sup> )	۲۸/۴۰۰۰	۲۷/۹۷۶۹	۲۸/۰۰۹۵	۲۸/۰۴۲۰	۲۸/۰۷۴۳	۲۸/۱۰۶۳	۳۰/۱۸۵۳
h <sub>t</sub> (W/m <sup>2</sup> .°C)	۸۶۴۹/۵	۹۳۰۳/۲	۹۲۱۳/۶	۹۱۲۶/۱	۹۰۴۰/۷	۸۹۵۷/۴	۵۶۰۰/۰
h <sub>s</sub> (W/m <sup>2</sup> .°C)	۱۲۳۵/۸	۱۲۵۰/۸	۱۲۵۰/۶	۱۲۵۰/۳	۱۲۵۰/۰	۱۲۴۹/۷	۱۲۳۲/۳
V <sub>t</sub> (m/s)	۲/۷۷۰۰	۲/۲۸۷۸	۲/۲۷۶۹	۲/۲۶۶۱	۲/۲۵۵۵	۲/۲۴۵۰	۱/۶۴۹۴
V <sub>s</sub> (m/s)	۰/۷۳۰۰	۰/۷۴۴۰	۰/۷۴۳۷	۰/۷۴۳۴	۰/۷۴۳۱	۰/۷۴۲۸	۰/۷۲۴۱
Re <sub>t</sub>	۴۲۵۷۳	۳۳۹۲۲	۳۲۵۸۴	۳۱۳۱۵	۳۰۱۱۱	۲۸۹۶۷	۳۲۰۹/۷
N <sub>t</sub>	۳۶۸	۴۴۴	۴۴۶	۴۴۶	۴۴۸	۴۵۰	۵۱۶
L (m)	۱/۲۸۶۰	۱/۰۵۰۱	۱/۰۴۶۶	۱/۰۴۵۸	۱/۰۴۴۴	۱/۰۴۰۹	۰/۹۷۴۹
D <sub>s</sub> (m)	۰/۵۴۹۸	۰/۶۰۳۹	۰/۶۰۵۳	۰/۶۰۵۳	۰/۶۰۶۶	۰/۶۰۸۰	۰/۶۵۱۰
L <sub>bc</sub> (m)	۰/۱۹۲۷	۰/۱۷۲۱	۰/۱۷۱۸	۰/۱۷۱۸	۰/۱۷۱۵	۰/۱۷۱۲	۰/۱۶۴۰
N <sub>b</sub>	۶	۶	۶	۶	۶	۶	۵

نتایج نشان می‌دهند که در صورت استفاده از این نوع آشفته‌ساز برای مثال یادشده در این مقاله، حدود ۵٪ سطح مورد نیاز مبدل کاهش می‌یابد. همچنین، در تعداد بافل‌ها و قطر پوسته نیز بهبود حاصل می‌شود. به سبب بهره‌گیری از آشفته‌ساز لایه مرزی تخریب<sup>۱</sup> و به علت تغییر سازوکار انتقال تکانه در زیر لایه آرام لایه مرزی، از گرانبه‌ای، اختلاط بیشتری در جریان درون لوله به وجود می‌آید. از سوی دیگر، سرعت سیال سمت لوله به میزان کمی افزایش می‌یابد (به دلیل کاهش در سطح مقطع عبور جریان به واسطه حضور آشفته‌ساز و ثابت بودن دبی جریان) که مجموعه تغییرات ذکر شده به افزایش در ضریب انتقال گرمای جابه‌جایی و در نتیجه کاهش سطح مورد نیاز مبدل می‌انجامد. البته باید گفت که جریان سمت لوله در این مقاله آشفته است و با توجه به سازوکار عملکرد آشفته‌سازها (افزایش تلاطم، تخریب لایه مرزی و ...) امکان تأثیرگذاری آنها در صورت استفاده برای حالتی که جریان آرام باشد، به صورت موثرتری محتمل است.

### ۳-۴ تأثیر استفاده هم‌زمان از آشفته‌ساز و نانوسیال

در حالت بعدی، تأثیر استفاده هم‌زمان از آشفته‌ساز و نانوسیال بر پارامترهای طراحی مبدل بررسی شد. نتایج این بررسی در جدول (۶) درج شده است.

جدول ۶. تأثیر استفاده هم‌زمان از آشفته‌ساز و نانوسیال با غلظت‌های مختلف بر روی پارامترهای طراحی مبدل.

پارامترها	ساده	Insert+NF (0.1%)	Insert+NF (0.2%)	Insert+NF (0.3%)	Insert+NF (0.4%)	Insert+NF (0.5%)	Insert+NF (10%)
$k_{NF}$ (W/m <sup>2</sup> .°C)	۰/۶۰۰۰	۰/۶۰۴۵	۰/۶۰۹۰	۰/۶۱۳۴	۰/۶۱۷۹	۰/۶۲۲۴	۱/۰۴۸۲
$C_{pNF}$ (J/kg.°C)	۴۱۸۰/۰	۴۱۷۶/۷	۴۱۷۳/۴	۴۱۷۰/۱	۴۱۶۶/۸	۴۱۶۳/۵	۳۸۵۰/۰
$\rho_{NF}$ (kg/m <sup>3</sup> )	۹۹۸/۰	۱۰۰۱/۰	۱۰۰۳/۹	۱۰۰۶/۹	۱۰۰۹/۹	۱۰۱۲/۹	۱۲۹۵/۲
$\mu_{NF}$ (kg/m.s)	۰/۰۰۱۰	۰/۰۰۱۰	۰/۰۰۱۱	۰/۰۰۱۱	۰/۰۰۱۲	۰/۰۰۱۲	۰/۰۱۰۳
Area (m <sup>2</sup> )	۲۸/۴۰۰۰	۲۶/۴۲۹۴	۲۶/۴۲۴۰	۲۶/۴۲۸۴	۲۶/۴۳۸۱	۲۶/۴۵۱۱	۲۸/۳۰۸۷
$h_t$ (W/m <sup>2</sup> .°C)	۸۶۴۹/۵	۱۷۲۲۵	۱۷۲۷۷	۱۷۲۳۴	۱۷۱۴۳	۱۷۰۲۳	۸۶۴۵/۲
$h_s$ (W/m <sup>2</sup> .°C)	۱۲۳۵/۸	۱۲۶۴/۹	۱۲۶۴/۹	۱۲۶۴/۹	۱۲۶۴/۸	۱۲۶۴/۷	۱۲۴۷/۹
$V_t$ (m/s)	۲/۷۷۰۰	۲/۸۸۷۳	۲/۸۶۴۵	۲/۸۴۱۸	۲/۸۱۹۳	۲/۷۹۷۰	۱/۶۸۴۷
$V_s$ (m/s)	۰/۷۳۰۰	۰/۷۵۹۲	۰/۷۵۹۲	۰/۷۵۹۲	۰/۷۵۹۱	۰/۷۵۹۰	۰/۷۴۰۹
$Re_t$	۴۲۵۷۳	۴۲۸۱۰	۴۰۹۹۴	۳۹۲۷۰	۳۷۶۳۷	۳۶۰۸۹	۳۲۷۸/۴
$N_t$	۳۶۸	۳۵۲	۳۵۴	۳۵۶	۳۵۸	۳۶۰	۵۰۶
L (m)	۱/۲۸۶۰	۱/۲۵۱۳	۱/۲۴۴۰	۱/۲۳۷۲	۱/۲۳۰۷	۱/۲۲۴۵	۰/۹۳۲۴
$D_s$ (m)	۰/۵۴۹۸	۰/۵۳۷۷	۰/۵۳۹۳	۰/۵۴۰۸	۰/۵۴۲۳	۰/۵۴۳۸	۰/۶۴۴۷
$L_{bc}$ (m)	۰/۱۹۲۷	۰/۱۸۹۴	۰/۱۸۸۸	۰/۱۸۸۳	۰/۱۸۷۸	۰/۱۸۷۳	۰/۱۶۱۹
$N_b$	۶	۶	۶	۶	۶	۶	۵

1. Boundary Layer Disruption

### ۳-۳ تأثیر استفاده از آشفته‌ساز نوار پیچ‌خورده

به منظور بررسی میزان تأثیرگذاری کاربرد آشفته‌ساز نوار پیچ‌خورده بر روی پارامترهای طراحی مبدل، نتایج طراحی در این حالت با حالت لوله خالی (در هر دو حالت، سیال آب خالص است) مقایسه شد. نتایج این دو حالت در جدول (۵) درج شده است.

جدول ۵. تأثیر استفاده از آشفته‌ساز نوار پیچ‌خورده بر روی پارامترهای طراحی مبدل.

پارامترها	ساده	آشفته‌ساز
مساحت (m <sup>2</sup> )	۲۸/۴۰۰۰	۲۶/۴۵۹۹
$h_t$ (W/m <sup>2</sup> .°C)	۸۶۴۹/۵	۱۶۹۴۲
$h_s$ (W/m <sup>2</sup> .°C)	۱۲۳۵/۸	۱۲۶۴/۶
$V_t$ (m/s)	۲/۷۷۰۰	۲/۹۰۹۴
$V_s$ (m/s)	۰/۷۳۰۰	۰/۷۵۸۹
$Re_t$	۴۲۵۷۳	۴۴۷۱۴
$N_t$	۳۶۸	۳۵۰
L (m)	۱/۲۸۶۰	۱/۲۵۹۹
$D_s$ (m)	۰/۵۴۹۸	۰/۵۳۶۲
$L_{bc}$ (m)	۰/۱۹۲۷	۰/۱۹۰۰
$N_b$	۶	۶



در غلظت بهینه ۰/۲٪ است. البته، میزان بهبود در کاهش سطح مبدل در این حالت نسبت به حالت بهره‌گیری از آشفته‌ساز به تنهایی، بسیار ناچیز است به طوری که شاید از لحاظ اقتصادی، استفاده از آشفته‌ساز به تنهایی توجیه بیشتری داشته باشد.

**۳-۶ تأثیر دبی بر مساحت مبدل**

تأثیر تغییرات دبی بر مساحت مبدل‌ها برای بهترین نتایج حاصل از حالت مختلف بررسی شد. در شکل (۲) نتایج حاصل از این بررسی را مشاهده می‌کنید. همانطور که در این نمودار مشاهده می‌شود، با افزایش دبی جریان داخل لوله، مساحت مبدل افزایش می‌یابد. علت این امر را می‌توان با افزایش بار گرمایی مبدل در ارتباط دانست.

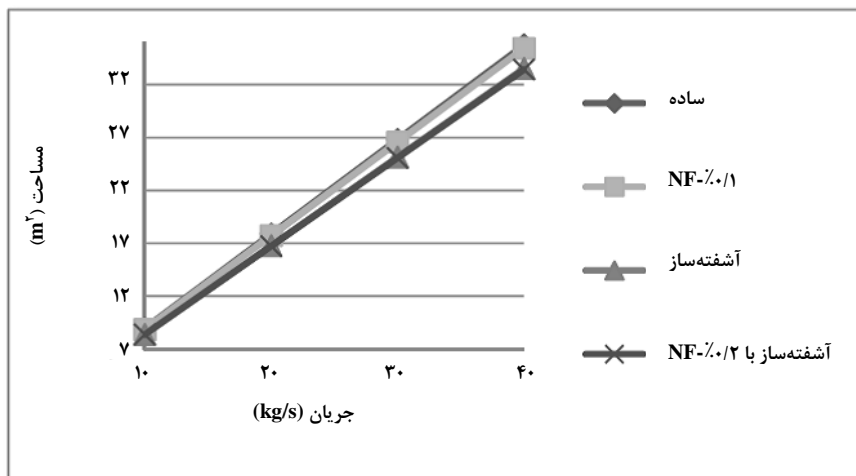
همانگونه که در جدول (۶) نیز مشاهده می‌شود، در صورت استفاده هم‌زمان از نانوسیال و آشفته‌ساز، نیز سطح مورد نیاز مبدل کاهش می‌یابد. در این حالت نیز برای غلظت نانوذرات یک غلظت بهینه مشاهده می‌شود که برابر با ۰/۲٪ است و در صورت استفاده بیشتر از نانوذرات نتایج معکوس حاصل می‌شود. علت مشاهدات در این بخش نیز مانند علت تغییرات در دو بخش گذشته است.

**۳-۵ مقایسه نتایج حالت‌های مختلف**

در این بخش، بهترین نتایج حاصل از ۴ حالت مختلف طراحی در این مقاله با یکدیگر مقایسه شده‌اند. همانگونه که در جدول (۷) مشاهده می‌شود، بهترین نتیجه مربوط به حالت کاربرد هم‌زمان از آشفته‌ساز نوار پیچ‌خورده و نانوسیال آب-آلومینیم اکسید

**جدول ۷. مقایسه بهترین نتایج طراحی حالات مختلف.**

پارامترها	ساده	NF-۰/۱	آشفته‌ساز	Insert+NF (۰/۲٪)
مساحت (m <sup>2</sup> )	۲۸/۴۰۰۰	۲۷/۹۷۶۹	۲۶/۴۵۹۹	۲۶/۴۲۴۰
h <sub>t</sub> (W/m <sup>2</sup> . °C)	۸۶۴۹.۵	۹۳۰۳/۲	۱۶۹۴۲	۱۷۲۷۷
h <sub>s</sub> (W/m <sup>2</sup> . °C)	۱۲۳۵/۸	۱۲۵۰/۸	۱۲۶۴/۶	۱۲۶۴/۹
V <sub>t</sub> (m/s)	۲/۷۷۰۰	۲/۲۸۷۸	۲/۹۰۹۴	۲/۸۶۴۵
V <sub>s</sub> (m/s)	۰/۷۳۰۰	۰/۷۴۴۰	۰/۷۵۸۹	۰/۷۵۹۳
Re <sub>t</sub>	۴۲۵۷۳	۳۳۹۲۲	۴۴۷۱۴	۴۰۹۹۴
N <sub>t</sub>	۳۶۸	۴۴۴	۳۵۰	۳۵۴
L (m)	۱/۲۸۶۰	۱/۰۵۰۱	۱/۲۵۹۹	۱/۲۴۴۰
D <sub>s</sub> (m)	۰/۵۴۹۸	۰/۶۰۳۹	۰/۵۳۶۲	۰/۵۳۹۳
L <sub>bc</sub> (m)	۰/۱۹۲۷	۰/۱۷۲۱	۰/۱۹۰۰	۰/۱۸۸۸
N <sub>b</sub>	۶	۶	۶	۶



شکل ۲. تأثیر تغییرات دبی بر مساحت مبدل.

عدد بدون بعد پراانتل ( $\mu C/k$ )	Pr
عدد بدون بعد رینولدز ( $4M/(\pi D\mu)$ )	Re
دما ( $^{\circ}C$ )	T
$R = \frac{T_{s,in} - T_{s,out}}{T_{t,out} - T_{t,in}}$	
$P = \frac{T_{t,out} - T_{t,in}}{T_{s,in} - T_{t,in}}$	
سرعت ( $m/s$ )	V

## حروف یونانی

اختلاف فشار (Pa)	$\Delta P$
اختلاف دما ( $^{\circ}C$ )	$\Delta T$
غلظت حجمی نانوذرات (%)	$\Phi$
لزجیت ( $kg/m^2 s$ )	$\mu$
چگالی ( $kg/m^3$ )	$\rho$
مجموع مقاومت ها	$\Sigma R$

## زیروندها

بغل	B
سیال پایه	bf
داخلی	i
خارجی	o
متوسط لگاریتمی	LM
نانوسیال	nf
نانوذره	p
پوسته	s
سمت پوسته	S
مرکز تا مرکز لوله ها	tp
لوله	t
سمت لوله	T

## مراجع

- [1] Kern, D. Q., "Process Heat Transfer", McGraw-Hill, New York, (1950).
- [2] Saunders, E. A. D., "Heat Exchangers: Selection, Design and Construction", Longman Scientific & Technical, New York, (1988).
- [3] Polley, G. T., Panjeh Shahi, M. H., Pic'onN' u'nez, M., "RapidDesign Algorithms for Shell-and-Tube and Compact Heat Exchangers", Trans IChemE, Vol. 69, Part A, pp. 435-444, (1991).

## ۴- نتیجه‌گیری کلی

در این مقاله، روشی را برای ارزیابی کمی تأثیر کاربرد نانوسیال آب-آلومینیم اکسید، آشفته‌ساز نوار پیچ خورده و استفاده همزمان از این دو، که به عنوان روش‌های جدید افزایش انتقال گرما محسوب می‌شوند، بر مساحت و دیگر پارامترهای طراحی مبدل‌های گرمایی پوسته-لوله به کمک روش الگوریتم طراحی سریع بررسی شد. نتایج نشان داد که افزایش نانوسیال موجب کاهش سطح مورد نیاز مبدل در بار گرمایی یکسان می‌شود، که این خود باعث کاهش هزینه سرمایه‌گذاری خواهد شد. از سوی دیگر، افزایش بیش از حد غلظت نانوسیال موجب افزایش سطح انتقال گرما خواهد شد. بهره‌گیری از آشفته‌ساز نوار پیچ خورده تا حدود ۵٪، مساحت مورد نیاز مبدل را کاهش می‌دهد. استفاده همزمان از آشفته‌ساز و نانوسیال نیز موجب کاهش مساحت مبدل می‌شود. در این حالت غلظت بهینه نانوسیال ۰.۰۲٪ تعیین شده است. همچنین، مشاهده شد که غلظت‌های بیشتر نانوسیال نتایج معکوس در پی خواهد داشت.

## علائم و نشان‌ها

A	مساحت انتقال گرما ( $m^2$ )
$C_p$	گرمای ویژه در فشار ثابت ( $J/kg K$ )
D	قطر داخلی لوله (m)
f	ضریب اصطکاک
F	ضریب تصحیح دمایی مبدل پوسته و لوله
h:	ضریب انتقال گرمای جابه‌جایی ( $W/m^2 K$ )
H/D	نسبت پیچش در آشفته‌ساز نوار پیچ خورده
k	ضریب انتقال گرمای رسانشی ( $W/m K$ )
K	ثابت الگوریتم طراحی سریع
L	طول لوله (m)
$L_{tp}$	فاصله مرکز تا مرکز لوله‌ها (m)
M	دبی جرمی ( $kg/s$ )
N	تعداد بغل
NF	نانوسیال
Nu	عدد بدون بعد ناسلت ( $hD/k$ )
Q	شدت انتقال گرما (W)

- [4] Jegede, F. O., Polley, G. T., "Optimum Heat Exchanger Design", Trans IChemE, vol. 70, Part A, pp. 133-141, (1992).
- [5] Serna, M., Jimenez, A., "A Compact Formulation of the Bell-Delaware Method for Heat Exchanger Design Method for Heat Exchanger Design", Chemical Engineering Research and Design, 83(A5): 539-550, (2005).
- [6] J. Nasr, M. R., "Heat Exchanger Enhancement", 1st ed. RIPI Publisher, (2011).
- [7] Nasr, M. R. J., Shafeghat, A., "Fluid flow analysis and extension of rapid design algorithm for helical baffle heat exchangers", Applied Thermal Engineering 28 1324-1332, (2008).
- [8] J. Nasr, M. R., Polley, G. T., "Should You Use Enhanced Tubes?", Chemical Engineering Progress Journal, page 44-50, April (2002).
- [۹] جعفری نصر محمدرضا، لطفی نژاد هاله، "طراحی مبدل‌های حرارتی پوسته-لوله مجهز به دستگاه‌های اختلاط ایستا"، نشریه مهندسی شیمی ایران، ۱۲-۷۴-۷۰-۸۳-۱۳۹۲).
- [10] Sharma, K. V., Syam Sundar, L., Sarma, P. K., "Estimation of heat transfer coefficient and friction factor in the transition flow with low volume concentration of  $Al_2O_3$  nanofluid flowing in a circular tube and with twisted tape insert", International Communications in Heat and Mass Transfer, 36, 503-507, (2009).
- [11] Syam Sundar, L., Sharma, K. V., "Turbulent heat transfer and friction factor of  $Al_2O_3$  Nanofluid in circular tube with twisted tape inserts", International Journal of Heat and Mass Transfer, 53, 1409-1416, (2010).
- [12] K. Moraveji, M., Darabi, M., Hadad, M. H., Davarnejad, R., "Modeling of convective heat transfer of a nanofluid in the developing region of tube flow with computational fluid dynamics", International Communications in Heat and Mass Transfer, 38(9): p. 1291-1295, (2011).
- [۱۳] اعتماد، غ.، نصرتی، م.، "نانوسیال: محیط جدید انتقال حرارت"، ایران، اصفهان: ارکان دانش، ۱۳۸۶.
- [14] Serna, M., Jimenez, A., "An Efficient Method for the Design of Shell and Tube Heat Exchangers", Heat Transfer Engineering, 25(2):5-16, (2004).
- [15] Uday V. Shenoy, "Heat Exchanger Network Synthesis: Process Optimization by Energy and Resource Analysis", Gulf Professional Publishing, (1995).
- [16] Pak, B. C., Cho, Y. I., "Hydrodynamic and heat transfer study of dispersed fluids with submicron metallic oxide particles", Exp. Heat Transfer, 11, 151-170, (1998).
- [17] Kakac, S., Pramuanjaroenkij, A., "Review of convective heat transfer enhancement with nanofluids", International Journal of Heat and Mass Transfer, 52, 3187-3196, (2009).