

بررسی عددی میدان جریان و انتقال حرارت در یک مبدل حرارتی دولوله‌ای با نوارهای تابیده

قنبر علی شیخ‌زاده*¹، سعید خندان سیر²، علی‌اکبر عباسیان آرانی¹، سید ابوالفضل حسینی جمکرانی³

¹ دانشیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه کاشان، کاشان، ایران

² کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه کاشان، کاشان، ایران

³ مدیریت هماهنگی و نظارت بر تولید، شرکت پالایش و پخش فرآورده‌های نفتی ایران

نوع مقاله: ترویجی

دریافت: 1398/03/26 پذیرش: 1398/10/07

چکیده

در این تحقیق، اثر استفاده از نوارهای تابیده بر میزان انتقال حرارت و افت فشار در مبدل دو لوله‌ای به صورت عددی مورد بررسی قرار گرفته است. بدین منظور، هندسه سه بعدی مبدل حرارتی در دو حالت بدون نوار تابیده و با نوار تابیده مدل‌سازی شده است. برای بررسی جزئیات اثر نوارها از دو نوع نوار تابیده با نسبت پیچش 3 و 5 استفاده شده است. به عنوان نمونه نتایج به دست آمده نشان داد که میزان رشد انتقال حرارت با نوارهای تابیده با نسبت پیچش 3 و 5 نسبت به حالت لوله خالی در عدد رینولدز 20000 به ترتیب حدود 28 و 14 درصد است. از نقطه نظر افت فشار هم بررسی‌های عددی ضریب اصطکاک متوسط آشکار کرد، در عدد رینولدز 20000، میزان افت فشار لوله‌های دارای نوار تابیده با نسبت پیچش 3 و 5 نسبت به لوله خالی، به ترتیب به میزان 58 درصد و 34 درصد است.

کلمات کلیدی: نوارهای تابیده، چگالش، انتقال حرارت، مبدل حرارتی

مقدمه

اهمیت مبدل‌های حرارتی و وسعت کاربردهای آن‌ها در صنعت به‌خصوص در صنایع نفت و گاز و پتروشیمی باعث شده است که روند تحقیقات و فعالیت‌های پژوهشی در این زمینه‌ها سرعت بیشتری بگیرد. به‌خصوص در صنایع نفتی که قسمت قابل توجهی از سرمایه‌گذاری، برای تجهیزاتی به‌طور خاص نظیر مبدل‌های حرارتی صرف می‌شود و بخش زیادی از هزینه‌های مصرف انرژی و بهره‌برداری، به این تجهیزات تعلق دارد. سیالات متداول در انتقال حرارت مانند آب، اتیلن گلیکول، روغن موتور و... که نقش حیاتی در فرآیند انتقال حرارت دارند، خواص انتقال حرارتی ضعیفی داشته که سبب مشکلات فراوان در طراحی مبدل‌های حرارتی و فشرده کردن و بهبود بازدهی آن‌ها می‌شود. مشکل رسوب از طرفی بر مشکلات قبلی افزوده است. این مشکل در مبدل‌های حرارتی نه تنها در زمینه‌ی انتقال حرارت طراحان را به چالش کشیده، بلکه در عرصه‌های وسیع‌تر اقتصادی مشکلات فراوانی را نیز در بر می‌گیرد. با توجه به نکات ذکر شده این‌گونه برمی‌آید که دستاوردها برای کاهش هزینه‌های سرمایه‌گذاری و رفع مشکلات در حین بهره‌برداری و تعمیرات و نگهداری مبدل‌های حرارتی موردتوجه صاحبان صنایع است. در این مقاله تلاش شده، در ابتدا به معرفی روش‌های متداول بهبود انتقال حرارت در مبدل‌های حرارتی پرداخته می‌شود و سپس شرایط عملیاتی مبدل حرارتی موردنظر بیان شده و راهکارها برای افزایش انتقال حرارت و افزایش دما و بهبود راندمان حرارتی مبدل هم به لحاظ اقتصادی و هم به لحاظ فرآیندی، مشخص می‌شود.

انواع روش‌های بهبود انتقال حرارت

روش‌های بهبود انتقال حرارت به دو دسته کلی تقسیم می‌شوند که در ادامه به معرفی آن‌ها پرداخته می‌شود:

1) روش‌های فعال¹: روش‌های فعال با انرژی خارجی الکتریکی یا مکانیکی سبب بالاتر رفتن انتقال حرارت می‌شوند که در این زمینه می‌توان به ایجاد میدان الکترواستاتیک برای اختلاط در نزدیکی سطوح جامد، ایجاد سطوح متخلخل و استفاده از روش‌های مکانیکی دهش² و مکش³ جریان سیال اشاره کرد که هر یک، لایه مرزی را دچار آشفتگی می‌کند و مقدار انتقال حرارت را افزوده می‌نماید.

2) روش‌های غیرفعال⁴: روش‌های غیرفعال به صرف انرژی از منبع خارجی نیازی ندارد و با تغییر هندسه‌ی جریان و تغییر در الگوی جریان باعث بهبود انتقال حرارت می‌گردد. این روش باوجود بازدهی بالا و هزینه کمتر در مقایسه با روش فعال، همواره مشکلاتی را برای استفاده از این‌گونه وسایل برای انجام انتقال حرارت بیشتر، پدید آورده است. یکی از این مسائل، افزایش مقدار افت فشار در به‌کارگیری این فناوری‌هاست. با توجه به شرایط اقتصادی و اهمیت صرفه‌جویی در صنایع، روش‌های غیرفعال بیش از فناوری‌های فعال مورد توجه است. در این مقاله، یکی از روش‌های غیرفعال معرفی و بررسی می‌شود.

1- Active methods

2- Discharge

3- Suction

4- Passive methods

روش نوارهای تابیده

این نوع تجهیزات از یک نوار فلزی به صورت تابیده شده، تشکیل شده است. شکل حلزونی این وسایل باعث چرخش جریان و ایجاد جریانات ثانویه در جهت شعاعی و در نتیجه اختلاط بهتر سیال و افزایش ضریب انتقال حرارت در لوله را به همراه دارد. در شکل 1 نمونه‌ای از نوارهای تابیده با گام‌های متغیر و انواع حالت‌ها نمایش داده شده است.



شکل 1. انواع نوارهای تابیده (از سمت راست به چپ: لوله تابیده و نوار تابیده هم‌زمان، نوارهای تابیده با میله نگه‌دارنده، نوار تابیده ساعت‌گرد، نوار تابیده پادساعت‌گرد با ضخامت کم) [1]

بسیاری از تحقیقات و بررسی‌ها درباره ایجاد بالاترین بازدهی حرارتی با کمترین میزان افت فشار بوده است. افزایش میزان بازدهی حرارتی و کاهش میزان افت فشار وابسته به گام و زاویه پیچش است. مقدار زاویه پیچش به نسبت میان گام نوار تابیده به قطر داخلی لوله گفته می‌شود که این نسبت، مقدار نسبت پیچش است. بهبود انتقال حرارت با استفاده از نوار تابیده به گام و نسبت پیچش نوار بستگی دارد. نسبت پیچش به صورت نسبت گام (W) به پهنای نوار تابیده درون لوله (y) محاسبه می‌شود. گام‌ها نیز به صورت فاصله بین دو نقطه متوالی مشابه در امتداد نوارها محاسبه می‌شوند.

در ادامه پیشینه‌ای از کارهای عددی و آزمایشگاهی انجام شده، ارائه و شرحی از نتایج برجسته آن‌ها بیان می‌شود.

پیشینه نوارهای تابیده

بیشتر تحقیقات ابتدایی در مورد استفاده از نوارهای تابیده با جریان‌های آشفته آب‌وهوا انجام شده است. در مقاله مروری در سال 1991، منگلیک [2] بیش از 30 مرجع که استفاده از نوارهای تابیده در جریان‌های آشفته را ذکر کرده بودند، مشخص نمود که گامی مهم، در بررسی روش‌های غیرفعال به شمار می‌رفت. بعدها اثر حضور نوارهای تابیده در جریان آرام نیز مورد مطالعه قرار گرفته است. همچنین روابط مختلفی برای عدد ناسلت و ضریب اصطکاک برای چنین جریان‌هایی در مراجع [2,3] گزارش شده است.

1) کارهای آزمایشگاهی

آیسمان و همکاران [4] تأثیر طول نوار تابیده بر عملکرد حرارتی را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها در ابتدا دریافتند که حضور نوار تابیده با طول کوتاه به میزان $1/29$ ، $1/43$ و $1/57$ برابر، سبب افزایش عدد ناسلت و ضریب اصطکاک به

ترتیب به مقدار 1/16، 1/22 و 1/27 برابر نسبت به حالت لوله خالی می‌شود که بیشترین مقدار انتقال حرارت و ضریب اصطکاک با استفاده از نوار تابیده با طول کامل حاصل می‌شود.

موروگسان و همکاران [5] مطالعه‌ای درباره ویژگی‌های انتقال حرارت و افت فشار جریان آشفته درون لوله با یک نوار تابیده با طول کامل به همراه برش‌های دوزنقه‌ای انجام دادند. نتایج نشان داد که برای نسبت پیچش 6، عدد ناسلت متوسط و ضریب اصطکاک برای نوار با برش‌های دوزنقه‌ای 1/37 و 1/97 برابر مقادیر مربوط به لوله خالی است، با کاهش نسبت پیچش به 4 عدد ناسلت و ضریب اصطکاک 1/72 و 2/85 برابر افزایش خواهند یافت.

اخوان بهابادی و همکاران [6] به بررسی اثر نوارهای تابیده بر روی افزایش نرخ انتقال حرارت در داخل کندانسور و تأثیر هم‌زمان آن بر میزان افت فشار چگالشی R-134 پرداختند. هدف از این آزمایش رسیدن به بالاترین میزان انتقال حرارت در افت فشار بهینه است. پس از جمع‌آوری کلیه داده‌های آزمایشگاهی مشاهده شد که نوارهای پیچیده در بهترین حالت میزان انتقال حرارت را تا 40 درصد نسبت به لوله صاف افزایش داده و میزان افت فشار هم در بدترین حالت تا 240 درصد نسبت به لوله صاف افزایش می‌یابد. بهترین عملکرد هم با نسبت پیچش 9 گزارش دادند.

سیوانگهانموگام و سورش [7] به بررسی مقدار انتقال حرارت و ضریب افت فشار در داخل تیوب دایروی حلزونی راست‌گرد با طول‌ها و نسبت پیچش متغیر پرداخت و نتایج وی نشان داد که ضریب افزایش انتقال حرارت نوارهای تابیده حلزونی راست‌گرد نسبت به نوارهای حلزونی ساده بالاتر بوده است.

2) کارهای عددی

آیسمه و همکاران [8] برای مطالعه جریان چرخشی و انتقال حرارت جابه‌جایی درون لوله، مدل عددی سه‌بعدی به همراه نوار تابیده با پهنای کمتر نسبت به لوله ارائه دادند. در این کار عملکرد 4 مدل مختلف آشفتگی نرم‌افزار فلونت مورد بررسی قرار دادند که مقایسه جواب‌های به‌دست‌آمده با کارهای تجربی حاکی از مناسب بودن مدل آشفتگی $k-\varepsilon$ برای مدل‌سازی جریان با حضور نوار تابیده بود. همچنین نتایج آن‌ها نشان داد که نوار تابیده با نسبت پیچش 2/5 و نسبت لقی 0، 0/1، 0/2 و 0/3 می‌تواند نرخ انتقال حرارت را تا مقادیر 20، 46، 73 و 17 درصد افزایش دهد.

چیو و جانگ [9]، ویژگی‌های گرمایی-هیدرولیکی جریان هوا درون لوله دایره‌ای با نوارهای مختلف را با استفاده از مدل عددی 3 بعدی برای نوار با 3 نسبت پیچش بررسی کرده و تطابق آن با نتایج آزمایشگاهی را ارزیابی کردند. در کار آن‌ها عملکرد انتقال حرارت و جریان سیال توسط یک مدل آشفتگی سه‌بعدی با در نظر گرفتن انتقال حرارت جابه‌جایی ترکیبی در میدان جریان و هدایت حرارت در نوار تابیده مورد بررسی قرار گرفت.

رحیمی و همکاران [10]، به مقایسه نتایج آزمایشگاهی با داده‌های به‌دست‌آمده از شبیه‌سازی عددی، اثرات چهار نوع نوار تابیده، بر میزان انتقال حرارت و افت فشار، در مبدل پوسته-لوله پرداختند. آن‌ها، نوارهای طراحی شده خود را

در نسبت‌های پیچش یکسان، با ساختارهای متفاوت کلاسیک⁵، سوراخ‌دار⁶، لبه‌دار⁷ و کنگره‌ای⁸ مورد آزمایش قرار دادند و در نهایت نوار پیچیده لبه‌دار را به‌عنوان بهترین گزینه معرفی نمودند.

ژانک و همکاران [11]، انتقال حرارت و جریان سیال درون یک لوله دایره‌ای با نوار تابیده سه‌گانه و چهارگانه را به‌صورت عددی بررسی کردند. نتایج عددی نشان داد که ضریب انتقال حرارت متوسط، برای نوارهای سه‌گانه از 162 تا 171 درصد و برای نوارهای چهارگانه از 180 تا 189 درصد نسبت به حالت لوله خالی افزایش خواهد داشت. ضریب اصطکاک برای نوارهای سه‌گانه 4 تا 5 برابر و برای نوارهای چهارگانه 5 تا 7 برابر حالت لوله خالی بیان شده است.

جی او و همکاران [12] به بررسی افت فشار و افزایش انتقال حرارت در جریان آرام در لوله‌های دایروی که به‌طور خاص میانه‌ی مجرای کانال فضای خالی وجود داشته باشد، پرداختند. نتایج آنان نشان داد که با کم کردن ضخامت ورق داخل لوله و افزایش فضای خالی در میانه‌ی مجرا می‌توان افت فشار را کاهش داد، ولی رفتار حرارتی در هر یک از حالت‌های مذکور بسیار متفاوت است. برای تیوب‌های با ضخامت نوار تابیده کم‌عرض، انتقال حرارت نوار دچار کاهش می‌گردد.

معرفی مبدل حرارتی

مبدل مورد بررسی در یکی از واحدهای پالایشگاهی در کشور قرار داشته و از نوع مبدل پوسته-لوله U شکل بوده که در قسمت پوسته آن بخار آب چگالش شده و در قسمت لوله‌های مبدل آب حرکت می‌کند. در شکل 2 نمایی از این مبدل حرارتی قابل مشاهده است.



شکل 2. مبدل حرارتی پوسته-لوله.

شرایط عملکردی مبدل حرارتی در واحد صنعتی پالایشگاهی، به شرح در جدول 1 درج شده است.

-
- 5- Classic twisted tape
 - 6- Perforated
 - 7- Jagged
 - 8- Notched

جدول 1. شرایط عملکردی مبذل حرارتی.

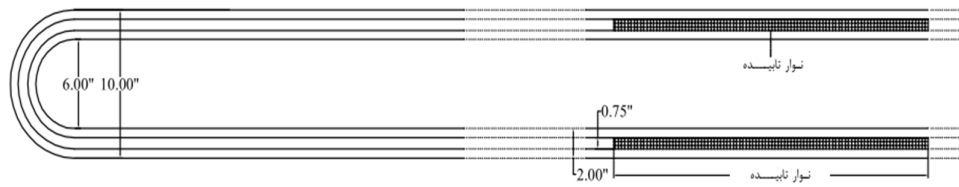
خواص	واحدها	لوله بیرونی	لوله درونی
سیال عامل	-	بخار آب	آب
دبی حجمی	m^3/s	3160	80000
چگالی	kg/m^3	1072	997
مقاومت رسوب	$ft^2.h.F/BTU$	0/0007	0/0006
دما (ورود - خروج)	$^{\circ}C$	125 - 146	15 - 25
رسانندگی حرارتی	$W/m.k$	0/385	0/615
جنس لوله‌ها	-	کربن استیل	SS340L

نحوه عملکرد مبذل حرارتی

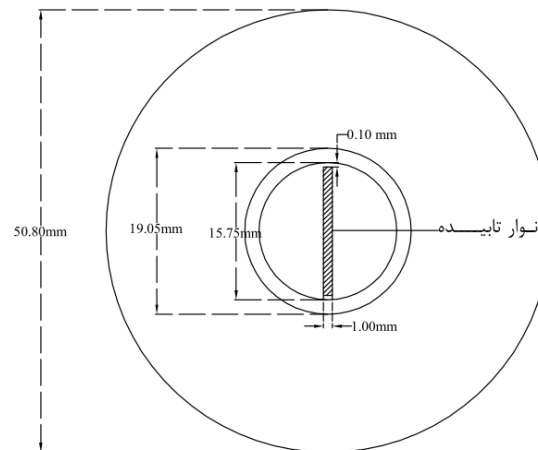
کارکرد این مبذل استفاده از اختلاف آنتالپی پدید آمده از تغییر فاز و دبی عبوری جریان بخار است؛ به گونه‌ای که از این اختلاف آنتالپی ناشی از تغییر فاز برای تبادل حرارتی گرما استفاده نماید. در طراحی انجام شده هدف استفاده از چگالش بخار است، به گونه‌ای که بخار پس از تبادل حرارتی به فاز مایع تبدیل شده و از طریق تله بخار موجود در امتداد لوله تخلیه شود. داده‌های ثبت شده در روزهای مختلف سال نشان می‌دهد، عمده مشکل افزایش دما برای ماه‌های سرد سال و در نیمه دوم سال رخ می‌دهد، به طوری که در فصول سرد دمای مخزن اصلی متصل به پمپ کاهش چشم‌گیری پیدا می‌کند و پس از پمپ شدن وارد خط لوله شده و شرایط موجود امکان رساندن آب به دمای مورد نیاز را ندارد. مبذل حرارتی مذکور دارای قطر خارجی 14 اینچی بوده که دارای 56 ردیف لوله در دو پاس است؛ به ازای هر پاس 28 لوله. در امتداد لوله بافل افقی جریان دو سمت را از هم مجزا می‌کند.

توصیف مسئله

با عنایت به اینکه هدف از کار حاضر، بررسی تأثیر به کارگیری نوار تابیده در لوله داخلی است که به صورت U شکل در مبذل واقعی وجود دارد و از سویی جریان سیال داخل پوسته، جریان بخار در حال تغییر فاز است، برای سادگی شبیه‌سازی، یک مبذل دو لوله‌ای U شکل که در لوله داخلی جریان آب و در حلقه جریان بخار برقرار است، به عنوان هندسه حل مورد بررسی قرار می‌گیرد. مشخصات و ابعاد مشابه مبذل موجود در صنعت بوده که به آن اشاره شد. در ادامه در شکل 3 شمای کلی هندسه لوله به همراه نوار تابیده مشاهده می‌شود. نواحی هاشور خورده در امتداد لوله محل حضور نوار تابیده است. به علت بلندی طول لوله مبذل حرارتی برای نمایش بهتر شکل شماتیک از خط‌چین، برای برش طرح شماتیک استفاده شده است. در این شکل، دو نما از روبرو در حالت دارای نوار تابیده و از امتداد لوله قابل مشاهده است.



(الف)



(ب)

شکل 3. الف - نمای شماتیک مبدل دولوله‌ای (امتداد لوله) ب - نمای جانبی شماتیک مبدل دولوله‌ای.

با انجام محاسبات لازم برای تعیین طول توسعه یافتگی حرارتی و سرعت در امتداد لوله، محل تعبیه نوارهای تابیده در امتداد لوله مشخص می‌شوند. در این مسئله نوارهای تابیده با نسبت‌های پیچش 3 و 5 بعد از طول ورودی در داخل لوله قرار داده شده‌اند. سیال پس از ورود به لوله داخلی مبدل حرارتی با سیال لوله بیرونی تبادل حرارتی انجام می‌دهد. این تبادل دارای شرط مرزی به‌صورت کوپل بوده، بدین معنی که در هر فاصله از ابتدای لوله، از روش دما ثابت یا شار ثابت به‌تنهایی استفاده نشده، بلکه میزان چگالش و تبادل حرارتی میان دو لوله به‌صورت کوپل انجام می‌شود. آب داخل لوله میانی، در تمام طول مسیر با سیال بخار اشباع در تبادل حرارتی بوده و به دلیل اینکه سیال در حالت اشباع وارد می‌شود، پس از طی مسافت کوتاهی شروع به چگالش می‌نماید.

روابط و معادلات حاکم

در ابتدا، لازم به توضیح است، فرضیات ساده‌کننده‌ای برای حل معادلات حاکم در نظر گرفته شده است، از جمله این که اثر تشعشع صرف نظر شده و خواص ترمو فیزیکی سیال مستقل از دماست. جریان سیال آشفته، تراکم‌ناپذیر و پایا است. روابط حاکم به‌صورت زیر ارائه می‌شود.

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

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

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

برای حالت دوفازی در مسئله هم، از روش Mixture از معادله 4 برای حل معادله انرژی در میان فازهای مختلف سیال استفاده می‌شود.

$$\frac{\partial}{\partial t} \sum_{k=1}^n (\alpha_k \rho_k E_k) + \nabla \cdot \sum_{k=1}^n (\alpha_k \vec{V}_k (\rho_k E_k + P)) = \nabla \cdot (k_{eff} \nabla T) + S_E \quad (4)$$

مدل اغتشاشی $k-\varepsilon$ استاندارد، یکی از بهترین مدل‌های مغشوش برای مسائل مهندسی پیچیده محسوب می‌شود. روابط و معادلات حاکم بر آن در رابطه‌های زیر ارائه شده است.

$$\mu_t = \frac{C_\mu \rho k^2}{\varepsilon} \quad (5)$$

$$\frac{\partial(\rho u_j k)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G - \rho \varepsilon + G_B \quad (6)$$

$$\rho \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \rho u_j \varepsilon_{,j} = \left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right)_{,j} + C_1 \frac{\varepsilon}{k} G + C_1 (1 - C_3) \frac{\varepsilon}{k} B - \quad (7)$$

$$C_2 \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + C_4 \frac{G^2}{\rho k}$$

باتوجه به اینکه برای حل از روش‌های پیش‌فرض در نرم‌افزار استفاده نشده و به‌طور مستقل با استفاده از UDF فرآیند چگالش انجام شده، لذا در این قسمت به ارائه روابط حل شده برای انجام چگالش پرداخته می‌شود. به‌طور کلی برای انجام فرآیند چگالش نیازمند بررسی شرایط مسئله و مشخص شدن جملات چشمه انرژی و انتقال جرم است. روابط 8 و 9 برای جمله چشمه در معادله انتقال انرژی و انتقال جرم در فرآیند چگالش ارائه شده است.

$$S_M = \dot{m}_{v \rightarrow l} = coeff \times \alpha_v \rho_v \frac{(T_v - T_{sat})}{T_{sat}} \quad (8)$$

$$S_E = coeff \times \alpha_v \rho_v \frac{(T_v - T_{sat})}{T_{sat}} L.H \quad (9)$$

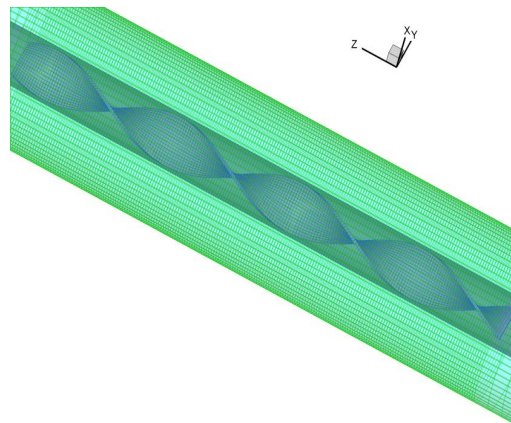
که در آن S_M و S_E به ترتیب نرخ چگالش بخار و انرژی آزاد شده بخار و α_v و ρ_v نیز به ترتیب میزان کسر حجمی و چگالی بخار است. در این رابطه $coeff$ نیز میزان تأثیر تدریجی این جمله در حل عددی را مشخص می‌کند که از مقدار کمی شروع و نهایتاً تا مقدار 1 افزایش داده می‌شود.

روش حل

برای شبیه‌سازی و ایجاد هندسه موردنظر از نرم‌افزار GAMBIT و برای حل معادلات حاکم از روش حجم محدود در نرم‌افزار FLUENT استفاده شده است. برای گسسته‌سازی معادلات حاکم از روش بالادست مرتبه دوم QUICK استفاده شده است و پیوند فشار و سرعت با استفاده از الگوریتم PISO برقرار شده است. روش استفاده شده در حل جریان دوفازی، روش Mixture بوده است. برای جلوگیری از واگرایی از ضرایب زیر تخفیف پیش‌فرض در نرم‌افزار استفاده شده است.

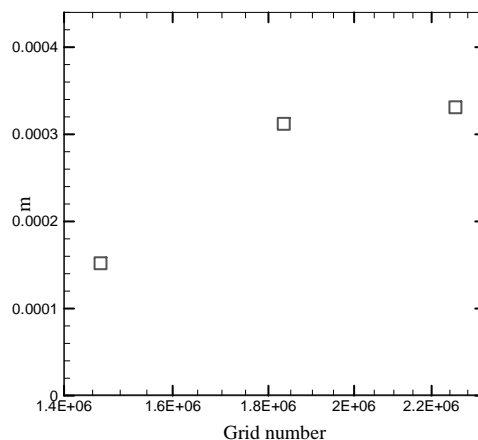
شبکه‌بندی مسئله

یکی از مهم‌ترین مراحل در روند حل، تولید شبکه مناسب است. شبکه بهینه با تعداد المان‌های کافی برای رسیدن به جواب درست و مستقل، مورد نیاز هر حل عددی است. در شکل 4 نمونه‌ای از شبکه‌بندی مسئله به همراه نوار تابیده قابل مشاهده است.



شکل 4. نمایش شبکه‌بندی مبدل حرارتی و نوار تابیده با جریان سیال در نرم‌افزار گمبیت.

هندسه مربوط به لوله‌های دارای نوارهای تابیده به دلیل اینکه فاصله میان لبه نوار و دیواره داخلی لوله کم بوده عملاً اندکی محدودیت در تراکم شبکه ایجاد می‌کند، لذا شبکه‌بندی‌های مختلفی برای یافتن شبکه مناسب آزمایش شد. در این مسئله و با توجه به انتخاب روش مدل‌سازی جریان تا لبه‌ی مرز جامد برای جریان آشفته، باید بر استقلال نتایج از تعداد المان‌ها، توجه نمود. شبکه دارای تراکم بیشتری در نزدیکی دیواره خارجی و داخلی لوله میانی است. افزایش میزان تراکم سلول‌ها در شبکه‌بندی، باعث افزایش میزان چگالش در سطح خارجی لوله میانی بوده و به انجام بهتر این فرآیند منجر می‌شود، لذا شبکه‌بندی‌های متعددی برای رسیدن به ثبات در میزان چگالش و توزیع بهتر کیفیت در لبه لوله انجام شده است. در نهایت تعداد المان انتخاب شده برای شبکه‌بندی در این مسئله، برای مشاهده فرآیند چگالش و تبادل حرارتی میان لوله‌ها، 2265250 المان است. در شکل 5 بررسی استقلال شبکه‌بندی بر حسب میزان چگالش سطحی نمایش داده شده است. همان‌طور که مشخص است با افزایش تعداد المان‌ها از مقدار معین شده، مقدار آب چگالش شده تغییر چندانی نکرده است.



شکل 5. نمایش مقادیر تعداد سلول‌های شبکه و میزان نرخ آب کندانس شده.

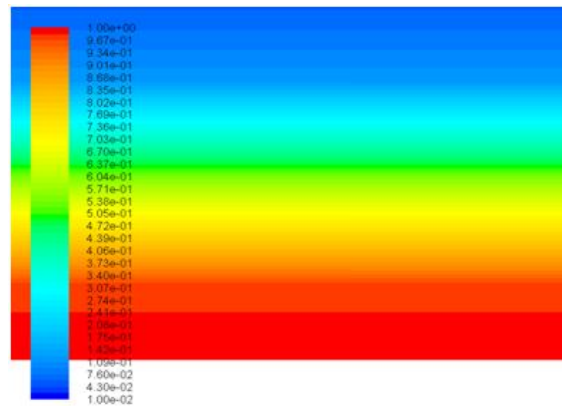
مدل آشفستگی

تاکنون مدل‌های آشفستگی متفاوتی با توانایی‌های خاص ارائه شده است. کارایی هر یک از این مدل‌ها در محدوده خاصی از مسائل است و غالباً نمی‌توانند به‌طور کلی در مورد همه مسائل و جریان‌ها از دقت خوبی برخوردار باشند. انتخاب یک مدل آشفستگی می‌تواند وابسته به شرایط فیزیکی مسئله، دقت مورد نیاز و زمان در دسترس برای تحلیل و شبیه‌سازی باشد. برای این تحقیق از مدل آشفستگی $k - \varepsilon$ تحقق پذیر استفاده شده که برای این دسته از جریان‌ها بسیار کاربردی‌تر از سایر مدل‌هاست. برای ضرایب ثابت مدل آشفستگی در این مسئله، از مقادیر پیش‌فرض فلونت استفاده شده است.

نتایج

بررسی چگالش فیلمی

برای اعتبار سنجی نتایج میزان کیفیت بخار خروجی از مبدل حرارتی واحد پالایشگاهی با کیفیت خروجی بخار مدل عددی در این مقاله مقایسه شد و میزان اختلاف ناچیزی بین مقدار آب‌کنده در دو بررسی وجود داشت. پس از مشخص شدن شرایط اعتبارسنجی در مسئله، به بررسی شرایط لایه‌ی آب تشکیل شده پس از چگالش فیلمی در سطح لوله پرداخته می‌شود. پس از ورود بخار اشباع به لوله بیرونی، با تماس بخار با سطح سرد لوله میانی، کیفیت بخار به تدریج در امتداد لوله کاسته شده و در لبه دیواره لوله بخشی از دبی ورودی، چگالش می‌شود. در شکل 6 نمایشی از کانتور فاز از لایه چگالش شده در نزدیکی دیواره نمایش داده می‌شود.



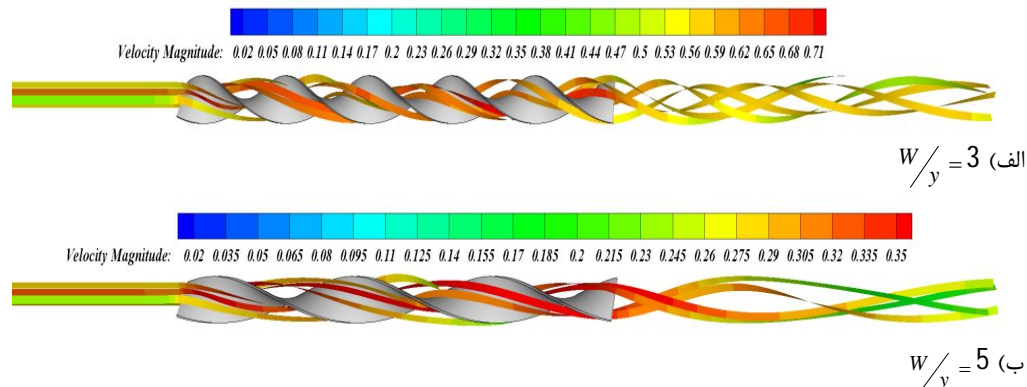
شکل 6. نمایش طیف تغییرات کیفیت بخار در امتداد لوله.

شکل 6، برشی عمودی در امتداد جریان از صفحه میانی لوله را نشان می‌دهد. لبه پایینی شکل دارای فاز یک بوده و مایع با ضخامت کم در امتداد لوله تشکیل شده است. با فاصله گرفتن از لبه دیواره به کیفیت بخار افزوده می‌شود و از میزان آب چگالش شده کم می‌شود. در امتداد لوله پس از تبادل حرارتی صورت گرفته با لوله میانی به تدریج تراکم لایه‌های مایع با کیفیت بالای 0/5 افزوده می‌گردد.

ساختار جریان

یکی از موارد مهم برای بررسی اثر نوارهای تابیده در امتداد لوله، اثر وجود این نوارها با گام متغیر روی الگوی میدان جریان و تغییرات پروفیل سرعت است. در شکل 7، (الف) و (ب) نوارهای تابیده با نسبت گام 3 و 5 در لوله میانی

دارای سیال آب قابل مشاهده است.

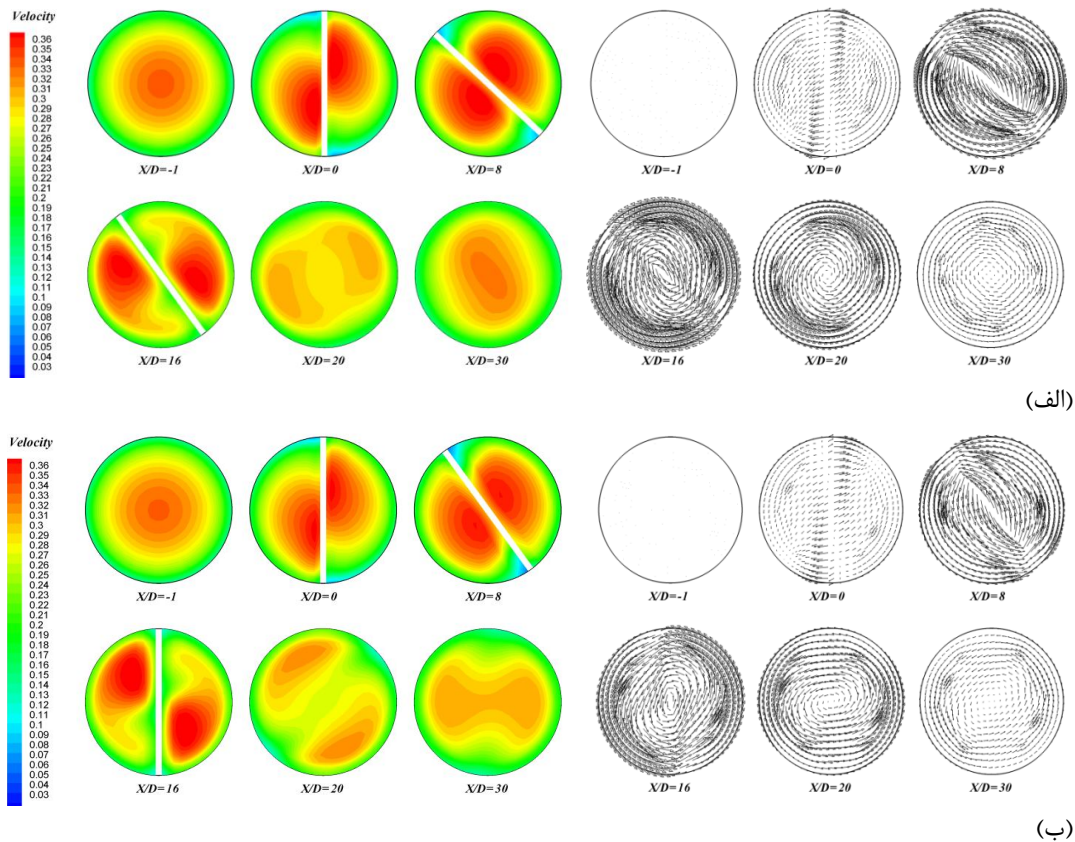


شکل 7. نمایش خط جریان سیال با نوارهای تابیده با رینولدز $Re = 5000$.

با توجه به شکل 7، در ابتدا سیال در داخل لوله در حال حرکت مستقیم بوده و پس از توسعه یافتگی کامل جریان، با حضور نوارهای تابیده جریان دچار چرخش شده که با داشتن مؤلفه افقی قبلی به واسطه چرخش ایجاد شده، مؤلفه سرعت مماسی در لوله پدید می‌آید. با توجه به افزوده شدن این مؤلفه، برآیند سرعت در امتداد نوارهای تابیده بیشتر شده و سرعت در نواحی حضور نوار افزوده می‌شود، با توجه به ثابت بودن سرعت افقی و دبی ورودی به لوله با ایجاد این مؤلفه مماسی، برآیند سرعت سیال افزایش می‌یابد. با توجه به شکل 7 نقاط دارای سرعت بالاتر در نواحی که نوار تابیده موجود است، مشاهده می‌شود. پس از عبور جریان از نوارها، جریان‌های چرخشی ایجاد شده به تدریج افت کرده و از میزان سرعت مماسی کاسته می‌شود. علاوه بر این، به دلیل چرخش ایجاد شده، زمان حضور و چرخش سیال در لوله افزایش می‌یابد که همین ویژگی فرصت تبادل حرارتی را برای سیال افزایش می‌دهد.

کانتورهای سرعت با برش عرضی

برای بررسی هرچه بهتر اثر نوارهای تابیده برش‌های عرضی از جریان در ادامه بررسی می‌شود. در شکل 8 (الف) و (ب) کانتورهای سرعت و خط جریان سیال داخل لوله میانی برای برش‌های مختلف از لوله نمایش داده شده است. برای بررسی و مشاهده سریع‌تر عدد بی‌بعد z/D تعریف شده که در آن z فاصله از ابتدای محل قرارگیری نوار تابیده در امتداد لوله بوده و D قطر داخلی لوله میانی است. برای برش‌هایی که قبل از ورود سیال به ناحیه وجود نوار تابیده زده شده است، مقدار z/D منفی است. بعد از عبور جریان از نوار تابیده، در z/D بالا، از اثر نوارهای تابیده کاسته شده و چرخش جریان سیال کم می‌شود. شش برش زده شده به گونه‌ای انتخاب شده که اثر نوارها در کانتورهای سرعت به خوبی توصیف نماید.



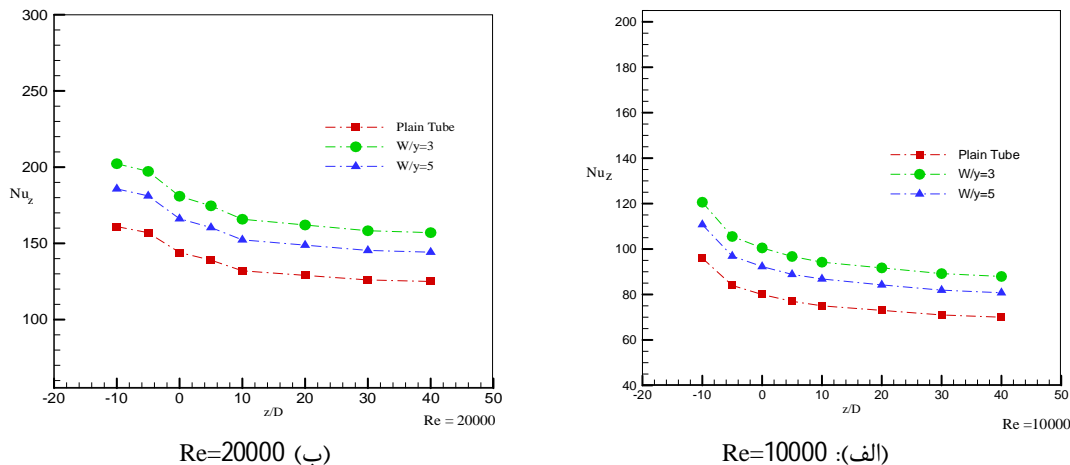
شکل 8. کانتور سرعت و الگوی خط جریان در لوله میانی با وجود نوارهای تابیده

(الف) $W/y = 3$ و (ب) $W/y = 5$ در عدد رینولدز 5000

نکته مهم دیگر این است که شرط عدم لغزش، در نزدیکی دیواره‌های لوله در تمام مرزهای جامد برقرار است. در پروفیل مربوط به خط جریان هم چرخش‌های ثانویه ایجاد شده قابل مشاهده است. در سمت راست شکل 8 هم اثر میزان چرخش سیال در لحظه ورود به نوار تابیده تا انتهای لوله مشخص شده است. در نواحی که نوار تابیده نبوده، سیال تنها مؤلفه افقی داشته و در امتداد لوله در حرکت بوده است. پس از ورود سیال به ناحیه دارای نوارهای تابیده، مؤلفه چرخشی نیز افزوده می‌شود. با حرکت سیال در امتداد لوله شدت این چرخش‌ها افزوده شده و همان‌طور که در شکل 8 مشخص است، پس از خروج جریان از لوله نیز اثر چرخش به تدریج کاسته می‌شود.

عدد ناسلت محلی

در شکل 9 تغییرات عدد ناسلت محلی در اعداد رینولدز 10000 و 20000 برحسب طول بی‌بعد z/D در امتداد لوله ارائه شده است. مقادیر ارائه شده برای حالت استفاده از نوارهای تابیده با دو نسبت پیمش 3 و 5، با لوله خالی مقایسه شده است. از ابتدای محل حضور نوار تابیده در لوله برش‌های مقطعی انجام شده است، با توجه به این موضوع، $z=0$ ، اولین برش برای مشخص کردن ضریب ناسلت محلی در ابتدای شروع نوارهای تابیده است.



شکل 9. نمودار تغییرات عدد ناسلت محلی در امتداد لوله در برش‌های مقطعی قبل و بعد از توسعه یافتگی.

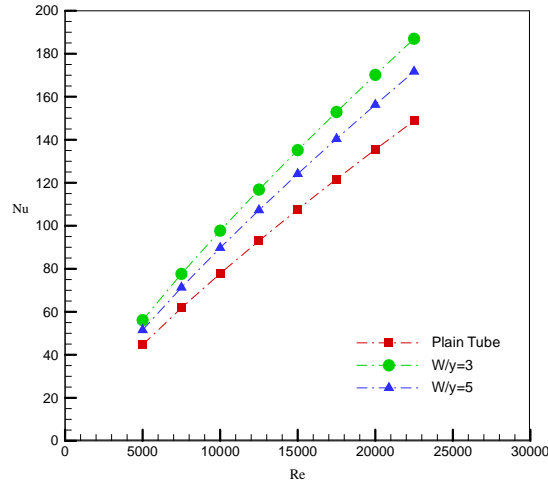
همان‌طور که در شکل 9 مشخص شده است، پس از ورود سیال به لوله ابتدا شرایط جریان توسعه نیافته بوده و مقدار عدد ناسلت در ابتدای لوله بالاتر است. رفته‌رفته از میزان آن کاسته شده و در ناحیه توسعه نیافته جریان به میزان تقریبی ثابتی می‌رسد. مقدار عدد ناسلت، با توجه به وجود نوارهای تابیده، افزایش سرعت چرخشی و کاهش میزان اختلاف دمای مرکز لوله و دیواره‌ها، افزایش می‌یابد و به تدریج در امتداد لوله با عبور از این ناحیه مقدار اثر چرخش سیال و سرعت مماسی کاسته شده است. با استفاده از این نوارها همواره دمای توده سیال سریع‌تر به دمای دیواره نزدیک می‌شود.

در شکل 9-ب هم تأثیر افزایش سرعت در لوله مشخص است. افزایش سرعت در لوله میانی میزان عدد رینولدز را افزایش داده و سبب رشد میزان عدد ناسلت به صورت محلی و میانگین می‌شود. در این حالت هم رشد میزان عدد ناسلت در امتداد لوله برای نوارهای تابیده با پیش‌تر 3 بیشتر است. هرچه میزان نسبت پیش‌تر در نوارها بیشتر باشد، میزان سرعت مماسی افزوده شده و دمای سیال به دمای مرکز لوله نزدیک‌تر می‌شود. این تغییر ضریب جابه‌جایی سبب افزایش دمای سطح بیرونی لوله میانی شده و لوله میانی، دمای بالاتری خواهد داشت. در این مسئله، پس از انجام فرآیند چگالش و افزایش ضخامت مایع، شار حرارتی به میزان کمتری نسبت به اختلاف دمای سطح و توده سیال رشد داشته، لذا عدد ناسلت محلی اندکی کاسته شده است. انتقال حرارت محلی به دلیل ایجاد جریان‌های چرخشی و تغییرات دمای نزدیک دیواره با توجه به حداقل شدن لایه مرزی، به میزان نزدیک به 25 درصد در حالت $W/y = 3$ و نزدیک به 15 درصد در حالت $W/y = 5$ ، رشد در مقادیر به وجود آمده است.

عدد ناسلت میانگین

در شکل 10 تغییرات عدد ناسلت میانگین محاسبه شده برای لوله خالی با لوله‌های دارای نوارهای تابیده نشان داده شده است. برای محاسبه عدد ناسلت میانگین و عدد ناسلت محلی در لوله، دمای توده سیال و شار حرارتی موضعی برای هر صفحه برش خورده استفاده شده است. برای محاسبه عدد ناسلت کلی در امتداد لوله دمای میانگین سطح لوله، از بخش گزارش‌های نرم‌افزار استفاده شده و دمای توده سیال برای کل لوله قرار داده شده است.

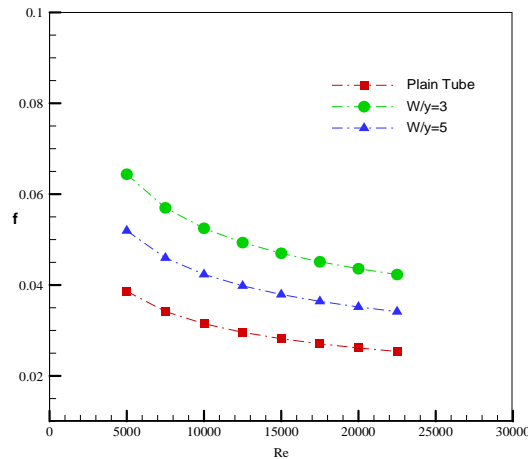
از شکل 10، میزان رشد انتقال حرارت با افزایش عدد رینولدز با نوارهای تابیده با نسبت پیچش 3 و 5 قابل مشاهده است. در نسبت گام کمتر، رشد انتقال حرارت محسوس تر است. برای حالت استفاده از نوار تابیده در عدد رینولدز 10000 و 20000 با نسبت پیچش 3، به ترتیب به میزان 26 و 28 درصد از لوله خالی بیشتر بوده و با نسبت پیچش 5 به ترتیب به میزان 13 و 14 درصد از لوله خالی بالاتر بوده است. همان طور که مشاهده می شود، افزایش میزان عدد رینولدز سبب افزایش میزان انتقال حرارت با نوارها شده است. در اعداد رینولدز بالا میزان رشد عدد ناسلت میانگین بیشتر بوده است.



شکل 10. تغییرات عدد ناسلت میانگین بر حسب عدد رینولدز برای لوله خالی و دارای نوارهای تابیده.

ضریب اصطکاک

مقادیر به دست آمده برای ضریب اصطکاک برای لوله خالی با مقادیر لوله دارای نوارهای تابیده، در شکل 11 مقایسه شده است.



شکل 11. تغییرات ضریب اصطکاک بر حسب عدد رینولدز برای لوله خالی و دارای نوارهای تابیده.

با استفاده از نوارهای تابیده میزان افزایش ضریب اصطکاک با افزایش میزان پیچش، افزوده می شود. به طوری که برای عدد رینولدز 20000، با نوار تابیده $W/y = 3$ نسبت به لوله خالی 58 درصد افزوده شده است. برای حالت استفاده از نوار تابیده $W/y = 5$ به میزان 34 درصد نسبت به حالت لوله خالی افزایش در میزان ضریب اصطکاک رخ داده است.

لازم به ذکر است، با افزایش عدد رینولدز در لوله مقدار عدد اصطکاک کاسته شده است؛ لذا افزایش عدد رینولدز در کاهش میزان ضریب اصطکاک بسیار مؤثر است. وجود نوارهای تابیده در لوله، میزان ضریب اصطکاک را به شکل چشم‌گیری در تمامی اعداد رینولدز افزایش می‌دهد.

نتیجه‌گیری

در این مقاله جریان آشفته درون لوله مبدل حرارتی با حضور نوار تابیده به صورت 3 بعدی شبیه‌سازی و مطالعه شده است که بر اساس مطالعه میدان جریان و انتقال حرارت، نتایج زیر قابل ذکر است:

- حضور نوارهای تابیده باعث افزایش انتقال حرارت و عدد ناسلت شده که مقادیر این افزایش با عدد رینولدز تغییر پیدا می‌کند. بیشترین افزایش در عدد رینولدز 22500 با حضور نوار تابیده با نسبت پیچش 3، به میزان 29 درصد در مقایسه با لوله خالی بوده است. با افزایش عدد رینولدز میزان افزایش عدد ناسلت نیز روندی افزایشی را طی می‌کند.
 - به کار بردن نوارهای تابیده در داخل لوله باعث از میان رفتن لایه مرزی حرارتی شده و دمای توده سیال را هرچه بیشتر به دمای دیواره لوله نزدیک می‌کند. علاوه بر این با ایجاد سرعت مماسی در امتداد لوله، در افزایش میزان انتقال حرارت بسیار مؤثر است. همچنین امکان ماند سیال در لوله و ایجاد رسوب‌گذاری را کاهش می‌دهد.
 - به کار بردن نوارهای تابیده درون لوله باعث افزایش ضریب اصطکاک می‌شود. بیشترین درصد افزایش در مقایسه با لوله بدون نوارهای تابیده مربوط به عدد رینولدز 5000 و به اندازه 47 درصد است. عدد ضریب اصطکاک با افزایش عدد رینولدز کاهش می‌یابد.
- بررسی دمای ناحیه بین نوارهای تابیده و دیواره لوله مشخص کرد، افزایش دمای سیال در امتداد لوله با استفاده از نوارهای تابیده بیشتر بوده که استفاده از نوار تابیده با پیچش بیشتر سبب افزایش دمای توده سیال و نزدیکی دمای توده سیال به دمای دیواره است.

تشکر و قدردانی

نویسندگان مراتب قدردانی و تشکر خود را از شرکت ملی پالایش و پخش فرآورده‌های نفتی به خاطر حمایت‌های مادی و معنوی این تحقیق دارند.

علائم و نشانه‌ها

حروف لاتین

Pr	A	عدد پراتل	سطح انتقال حرارت (m^2)
P	c	توان پمپ کردن (W)	مقدار لقی (m)
q	c_p	نرخ انتقال حرارت (W)	ظرفیت حرارتی ویژه (J/kg.K)
q''	D	شار حرارتی (W/m^2)	قطر لوله (mm)
q''	f	شار حرارتی (W/m^2)	ضریب اصطکاک
Re	H	عدد رینولدز	گام نوار مارپیچ (m)
T	h	دما (K)	ضریب انتقال حرارت

			$(W/m^2.K)$
u	سرعت (m/s)	K	قدرت هدایت (W/K)
w	طول نوار تابیده	k	ضریب هدایت حرارتی (W/m.K)
y	پهنای نوار مارپیچ (m)	l	طول مبدل حرارتی (m)
زیر نویس ها		حروف یونانی	
m	میانگین	α	ضریب ثابت معادلات
o	خارجی	β	ضریب ثابت معادلات
t	زمان اولیه	μ	لزجت (Pa.s)
v	بخار	ρ	چگالی (kg/m^3)
w	دیواره	τ	تنش برشی (Pa)

منابع

- [1] S.Liu, M.Sakr, A Comprehensive review on passive heat transfer enhancements in pipe exchangers, *Renewable Energy Journal*, 19(2013), pp. 64-81.
- [2] R. M. Manglik, A. E. Bergles, Heat Transfer and Pressure Drop Correlations for Twisted-Tape Inserts in Isothermal Tubes: Part two-Transition and Turbulent flow, *ASME Journal of Heat transfer* 115(1993), pp. 890-896.
- [3] W. Noothong, S. Eiamsa-ard, P. Promvong, Effect of Twisted Tape Inserts on Heat Transfer in a Tube, *The Second International Conference on Sustainable Energy and Environment*, November 2006, Bangkok, Thailand, pp. 21-23.
- [4] S. Eiamsa-ard, C. Thianpong, P. Eiamsa-ard, P. Promvong, "Convective Heat Transfer in a Circular Tube with Short-Length Twisted Tape Insert", *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 36(2009), pp. 365-371.
- [5] P. Murugesan, K. Mayilsamy, S. Suresh, P. Srinivasan, "Heat Transfer and Pressure Drop Characteristics of Turbulent Flow in a Tube Fitted with Trapezoidal-Cut Twisted Tape Insert", *International Journal of Academic Research*, 1(2009), pp. 123-127.
- [6] اخوان بهابادی، حجاری، ارزیابی عملکرد نوارهای پیچیده شده در افزایش انتقال حرارت چگالشی و تأثیر آن بر میزان افت فشار، نشریه دانشکده فنی، شماره 1، اردیبهشت 1388.
- [7] P. Sivashanmugam and S.Suresh, Experimental Studies on Heat Transfer and Friction Factor Characteristics of Turbulent Flow Through a Circular Tube Fitted with Regularly Spaced Through Helical Screw Tape Inserts, *Journal of Experimental Thermal and Fluid Sciences*, 31(2007), pp. 301-308.
- [8] S. Eiamsa-ard, Study on Thermal and Fluid Flow Characteristics in Turbulent Channel Flows with Multiple Twisted Tape Vortex Generators, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 37(2010), pp. 644-651.

- [9] Y. Chiu, J. Jang, Numerical and Experimental Analysis for Thermal Hydraulic Characteristics of Air Flow Inside a Circular Tube with Different Tube Inserts, *Journal Applied Thermal Engineering*, 29(2009), pp. 250-258.
- [10] M.Rahimi, S. R. Shabaniyan, Experimental and CFD Studies on Heat Transfer and Friction Factor Characteristics of a Tube Equipped with Modified Twisted Tape Inserts, *Chemical Engineering and Processing*, 48(2009), pp. 762-770.
- [11] X. Zhang, Z. Liu, Numerical Studies in Heat Transfer and Flow Characteristics for Laminar Flow in a Tube with Multiple Regularly Spaced Twisted Tapes, *Journal of Thermal Sciences*, 58(2012), pp. 157-167.
- [12] J. Guo, A. Fan, X. Zhang, W. Liu, "A Numerical Study in Heat Transfer and Friction Factor Characteristics of Laminar Flow in a Circular Tube Fitted with Center-Cleared Twisted Tape", *Journal of Thermal Sciences*, 50(2011), pp. 1263-1270.