

بکارگیری نوار مارپیچی برای افزایش انتقال حرارت در ایستگاه تقلیل فشار

بهنام رنجبر

شرکت پالایش و پخش فرآورده های نفتی کرمانشاه، کرمانشاه، ایران

احسان جعفریگی

گروه مهندسی شیمی و نفت، دانشکده مهندسی شیمی و نفت، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران

مسعود رحیمی

گروه مهندسی شیمی، دانشکده نفت و مهندسی شیمی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران

فائزه محمدی⁺*

گروه مهندسی شیمی، واحد کرمانشاه، دانشگاه آزاد اسلامی، کرمانشاه، ایران

چکیده: در حال حاضر گاز طبیعی به عنوان یکی از مهمترین منابع انرژی بشر شناخته شده است. در صنعت، انرژی زیادی برای بالا بردن توان گرم کن ها در ایستگاه های تقلیل فشار مصرف می شود. بنابراین در این پژوهش به جهت افزایش نرخ انتقال حرارت در گرمکن های ایستگاه تقلیل فشار، قطعاتی با زوایای خاص (نوار مارپیچی کلاسیک) درون کوئل ها تعبیه شده است. مطالعه فوق بر روی گرمکن ایستگاه تقلیل فشار CGS & TBS ماویان (شهرستان کامیاران استان کردستان) با ظرفیت $2500 \text{ m}^3/\text{h}$ انجام شده است. آزمایش ها در شرایط دمایی مختلف آب گرمکن انجام گرفته است. نوار مارپیچی کلاسیک با سه گام مختلف در این مطالعه طراحی و استفاده گردیده است. در تمامی مدل ها طول نوار مارپیچی کلاسیک 200 سانتی متر و ارتفاع آن $3/8$ سانتی متر در نظر گرفته شده است، با این تفاوت که در مدل اول طول هر گام برابر 8 سانتی متر و در نوار مارپیچی کلاسیک مدل دوم طول هر گام 6 سانتی متر و در مدل سوم طول گام 4 سانتی متر می باشد. نتایج این بررسی نشان داد بیشترین درصد بهبود انتقال حرارت با استفاده از نوار مارپیچی کلاسیک با ساختار سوم در دمای آب 25 درجه سلسیوس برابر 16 درصد است. از طرفی کمترین درصد بهبود انتقال حرارت برای نوار مارپیچی کلاسیک با ساختار اول در دمای 60 درجه سلسیوس $3/82$ درصد به دست آمده است. این نتایج می تواند برای افزایش بازده انتقال حرارت و کاهش هزینه ها در این مبدل ها موثر و کاربردی باشد.

کلمات کلیدی: انتقال حرارت، نوار مارپیچی کلاسیک، گرمکن، ایستگاه تقلیل فشار

KEYWORDS: Heat transfer, Classic twisted tape, Heater, Pressure reducing station.

مقدمه

با توجه به جایگاه انرژی در صنعت، استفاده از سیستم‌هایی با مصرف انرژی کمتر و راندمان بالا از اهمیت زیادی برخوردار می‌باشد. یکی از مهمترین تجهیزات در صنایع، مبدل‌های حرارتی می‌باشند که به طور مستقیم با مصرف انرژی ارتباط دارند [۲و۱]. مبدل حرارتی برای گرم کردن یا خنک کردن دو سیال بدون تماس مستقیم، مورد استفاده قرار می‌گیرد [۳]. از مهمترین مسائل در طراحی مبدل‌های حرارتی افزایش میزان انتقال حرارت و افت فشار می‌باشد. اخیراً، استفاده از روش‌های کارآمد جهت بهبود انتقال حرارت در مبدل‌های حرارتی اهمیت پیدا کرده است [۴و۵].

به طور کلی، روش‌های افزایش انتقال حرارت به سه دسته‌ی فعال، غیرفعال و ترکیبی طبقه‌بندی می‌شوند [۶]. در روش فعال نیاز به انرژی خارجی است. در واقع افزودن توان خارجی، باعث بهبود سرعت انتقال حرارت و اصلاح شدت جریان مطلوب می‌شود. میدان الکتریکی، امواج اولتراسونیک یا ارتعاش سطح از جمله روش‌های فعالی هستند که در برخی از تحقیقات مورد استفاده قرار گرفته شده‌اند [۷]. در روش غیر فعال به انرژی خارجی نیاز نیست. در این روش معمولاً از تغییرات سطحی یا هندسی در کانال جریان بهره می‌برند و یا از یک اینزرت، ماده یا قطعه‌ی اضافی استفاده می‌کنند [۸]. و دسته‌ی سوم ترکیبی از دو روش فعال و غیر فعال می‌باشد.

از مهمترین روش‌های غیر فعال جهت افزایش انتقال حرارت، استفاده از مغشوش کننده‌ها در مسیر جریان سیال می‌باشد که در سال‌های اخیر توسط محققین مختلف مورد بررسی قرار گرفته است [۹-۱۳]. در یک مطالعه *ساراس* و *بالی* [۱۴] مغشوش کننده‌هایی از نوع پروانه‌ای جهت تولید جریان چرخشی را در سه موقعیت مختلف یک لوله قرار دادند. نتایج نشان داد که میزان انتقال حرارت در رنج ۱۸ تا ۱۶۳ درصد نسبت به لوله‌ی ساده افزایش یافت. *ژانگ* و *همکاران* [۱۵] جهت بررسی میزان انتقال حرارت در یک مبدل حرارتی که لوله‌های آن با استفاده از پره‌های سه بعدی پوشیده شده بود، پژوهشی انجام دادند. در انتهای پره‌ها مغشوش کننده مارپیچی تعبیه شده بود. افزایش عدد ناسلت و افت فشار با افزایش عدد رینولدز نتیجه مهم این تحقیق بود. *ایامسا* و *همکاران* [۱۶] در یک پژوهش نسبت پیچش و زاویه پروانه‌های پره را به جای موقعیت پروانه‌ها، تغییر دادند. آنان در حالتی که زاویه پره ۶۰ درجه، تعداد پره‌ها ۸ و $PR=5$ بود، توانستند ضریب انتقال حرارت را نسبت به لوله ساده و بدون مغشوش کننده حدود ۲/۰۷ الی ۲/۱۸ افزایش دهند. این محققین در پژوهشی دیگر از نوارهای آلومینیومی پیچ خورده با سه زاویه

مختلف نوک بال، در مسیر سیال استفاده کردند. نتایج نشان داد با کاهش زاویه نوک بال سرعت انتقال حرارت افزایش می‌یابد. در واقع در محدوده مورد بررسی، نوار پیچ خورده با زاویه نوک بال ۲۰ درجه بالاترین ضریب عملکرد حرارتی ۱/۲۶ را برابر لوله ساده ارائه داد [۱۷و۱۸].

رحیمی و *همکاران* در یک مبدل پوسته-لوله اثرات چهار نوع نوار تابیده بر میزان انتقال حرارت و افت فشار را مورد مطالعه قرار دادند [۱۹]. آنان نوارهای طراحی شده را در نسبت‌های پیچش یکسان مورد آزمایش قرار دادند. نتایج نشان داد که نوار پیچیده لبه دار در راستای افزایش انتقال حرارت و افت فشار بیشترین کارایی را دارد. *موروسان* و *همکاران* [۲۰] ویژگی‌های انتقال حرارت و افت فشار در یک لوله دایره‌ای مجهز به نوار پیچ خورده با برش‌های مربعی شکل در گوشه‌ها را مورد مطالعه قرار دادند. استفاده از این نوار ضریب عملکرد حرارتی را ۱/۱۴ برابر افزایش داد. در مطالعه‌ی دیگر *پراساد* و *همکاران* [۲۱] تأثیر نوار پیچیده شده دوزنقه‌ای شکل در مبدل حرارتی دولوله‌ای را بررسی نمودند. نتایج آنان افزایش عدد ناسلت را به میزان ۳۴/۳ درصد نسبت به حالت ساده را نشان داد. همچنین در این حالت ضریب عملکرد حرارتی مبدل افزایش قابل توجهی را داشت. بهینه‌سازی حرارتی-هیدرولیکی پارامترهای طراحی یک مبدل حرارتی پوسته و لوله با جریان موازی با نوع جدیدی از بافل بستن شش ضلعی ضد ارتعاش و نوار تابیده پیچ‌دار با مقطع مثلث متساوی الاضلاع مورد بررسی قرار گرفت [۲۲]. نتایج نشان داد که عرض بافل تأثیر قابل توجهی بر عملکرد حرارتی و هیدرولیکی مبدل ندارد ولی طول گام و قطر سیم پیچ اثر قابل ملاحظه‌ای بر عملکرد حرارتی و هیدرولیکی مبدل دارد.

بهبود انتقال حرارت در یک لوله مارپیچ با درج نوار پیچ خورده مورد بررسی قرار گرفت [۲۳]. درج نوار پیچ خورده جریان ثانویه و انتقال حرارت را افزایش داد. قرار دادن این نوار، درصد انتقال حرارت را تا چهار برابر در مقایسه با لوله‌های معمولی افزایش داد. در یک مطالعه توسط *ارجمندی* و *همکاران* [۲۴] بهینه‌سازی هندسی مبدل حرارتی دو لوله با مولد گردابی ترکیبی و نوار تاب خورده صورت گرفت. عملکرد مبدل حرارتی بهبود یافته و عدد ناسلت با کاهش نسبت گام و زاویه افزایش یافت. *کولا* و *همکاران* [۲۵] پارامترهای عملکرد مبدل حرارتی دو لوله با نوارهای تابیده برش خورده را بهینه‌سازی کردند. اثر ترکیبی شعاع و زاویه برش بر ضریب کلی انتقال حرارت و ضریب اصطکاک بررسی شد. در محدوده در نظر گرفته شده، برای دستیابی به ضریب انتقال



شکل ۱- شماتیکی از گرمکن ایستگاه تقلیل فشار مورد مطالعه

با کاهش فشار، دمای گاز طبیعی افت پیدا می کند. به این ترتیب چنانچه دمای گاز به نقطه شبنم نزدیک شود هیدروکربن های سنگین به صورت مایع درآمد و با رسیدن به نقطه شبنم آب، چگالش آب نیز اتفاق خواهد افتاد که در دمای پایین محیط می تواند سبب ایجاد یخ زدگی در تاسیسات شود. از طرفی دیگر این کاهش دما در حضور آب همراه گاز، چه در فاز گاز و چه در فاز مایع، تشکیل هیدرات گازی را سبب می شود. همچنین از آنجا که شرایط استاندارد دمای گاز مصرفی در حدود 15°C می باشد، لذا تأمین این شرایط در سیستم های تقلیل فشار و در نهایت در مبادی مصرف ضروری است. با عنایت به موارد مذکور در سیستم های تقلیل فشار نصب گرمکن ها امری ضروری می باشد [۲۸].

مشخصات ایستگاه و هندسه مسئله

ظرفیت گرمکن مورد مطالعه در این پژوهش، $2500 \text{ m}^3/\text{hr}$ است. این گرمکن توسط شرکت آریا پترو جم در سال ۲۰۰۸ ساخته شده است. درون محفظه گرمکن مخلوط آب مقطر و ضد یخ وجود دارد که ۸ مسیر کوئل با قطر ۲ اینچ از درون این مخلوط می گذرد. با توجه به اینکه فشار کاری گرمکن 105 psi می باشد، از تجهیزات متناسب با فشار بالا استفاده شده است. جهت جلوگیری از اتلاف حرارتی در خروجی گرمکن، مسیر خروجی باید عایق شده است. به جهت افزایش دمای مخلوط درون محفظه گرمکن از آتشدان استفاده می گردد، به طوریکه خوراک آن از گاز خروجی ایستگاه که قطر لوله آن ۱ اینچ می باشد، تأمین شود. طرح شماتیک گرمکن پوسته و لوله در شکل ۴ نشان داده شده است.

مشخصات نوار های ماریپیچی کلاسیک

پارامترهای شاخص نوارهای ماریپیچی کلاسیک در شکل ۵ نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می شود، طول نوار ماریپیچ کلاسیک، H طول هر گام، C ارتفاع نوار، D قطر بیرونی و

حرارت بالاتر و ضریب اصطکاک کمتر، شعاع برش $5/464$ میلی متر و زاویه برش 45 درجه بدست آمد.

تجزیه و تحلیل آگرژی و مطالعه اقتصادی استفاده از نوار تابیده در گرمکن ایستگاه تقلیل فشار توسط رنجیر و همکاران [۲۶] انجام گرفت. این تحلیل نشان داد که آگرژی تخریب شده با استفاده از نوار پیچ خورده کاهش می یابد و هر چه نسبت پیچش و دمای آب گرمکن بیشتر باشد، آگرژی تخریب شده کمتر می شود. همچنین، در مطالعه ای دیگر تأثیر درج لوله سیم پیچ دار به عنوان توربولاتور بر عملکرد یک گرمکن در دو حالت لوله های دایره ای و بیضوی با سطح مقطع مشابه بررسی شد [۲۷]. نتایج نشان داد که درج لوله فنی با نسبت قطر 10 برای گرمکن با لوله بیضوی و نسبت قطر $0/95$ بهترین عملکرد را دارد. با توجه به مطالعات فوق، موضوع اصلی در این پژوهش ارائه یک نوار ماریپیچی با قابلیت افزایش سرعت انتقال حرارت در سمت لوله در گرمکن ایستگاه تقلیل فشار ماویان در شهرستان کامیاران (شکل ۱) می باشد. در این پژوهش اثر پارامترهای مختلف همچون قطر نوار، گام نوار و ضخامت آن بر راندمان انتقال حرارت بررسی می گردد. نوآوری این پژوهش، بکارگیری نوار ماریپیچی به صورت عملیاتی در ایستگاه تقلیل فشار مورد مطالعه می باشد. استفاده از نوار ماریپیچی و هر مغشوش کننده ای باعث افت فشار می گردد که از معایب استفاده از این تجهیزات می باشد ولی در سیستم ایستگاه تقلیل فشار گاز این امر یک مزیت به حساب می آید. در واقع نوار ماریپیچ به افت فشار کمک می کند و نقش رگولاتور ثانویه در ایستگاه را خواهد داشت. بنابراین با درج این نوع نوار ماریپیچی می توان به افزایش سرعت انتقال حرارت و افت فشار مطلوب سیستم دست یافت.

اهمیت گرمکن

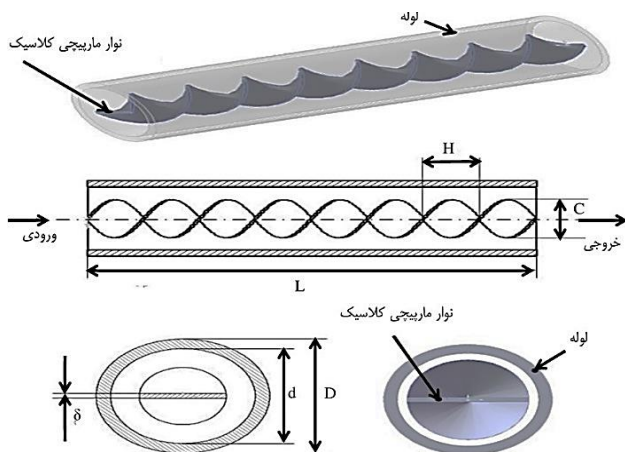
زمانی که یک گاز واقعی و غیر ایده آل، در یک شیر فشار شکن (رگولاتور) از فشار بالا به فشار پایین می رسد، این تغییر فشار که اصولاً در آنتالپی ثابت اتفاق می افتد باعث تغییر دمای گاز می شود. در اینگونه موارد نسبت تغییرات دما به تغییرات فشار در آنتالپی ثابت به عنوان ضریب ژول-تامسون شناخته می شود. این ضریب به صورت رابطه ۱ تعریف می شود [۲۸].

$$\mu \equiv \left(\frac{\partial T}{\partial P} \right)_H \quad (1)$$

برای بسیاری از گازها از جمله گاز طبیعی این ضریب مقداری مثبت است. این بدین معناست که با افت فشار دمای گاز افت خواهد داشت، لذا در ایستگاه های تحت فشار، بر اثر پدیده ژول-تامسون،

جدول ۱- نتایج مربوط به مقادیر نسبت پیچش نوارهای ماریچی کلاسیک

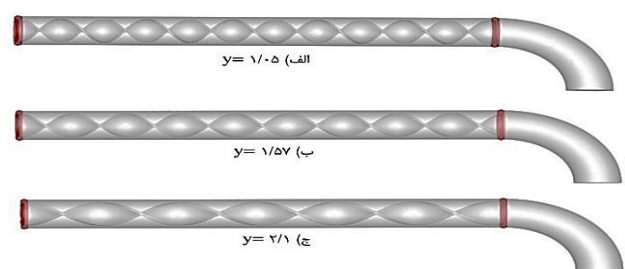
عنوان	طول هر گام (سانی متر)	γ (نسبت پیچش)
ساختار اول (گام اول)	۸	۲/۱
ساختار دوم (گام دوم)	۶	۱/۵۷
ساختار سوم (گام سوم)	۴	۱/۰۵



شکل ۵- شماتیک هندسه نوار ماریچی کلاسیک



شکل ۶- (الف) نوار ماریچی کلاسیک مدل اول (ب) نوار کلاسیک ماریچی مدل دوم (ج) نوار ماریچی کلاسیک مدل سوم



شکل ۷- شماتیک سه نوع نوار ماریچی استفاده شده در شرایط آزمایش

روشن آزمایش

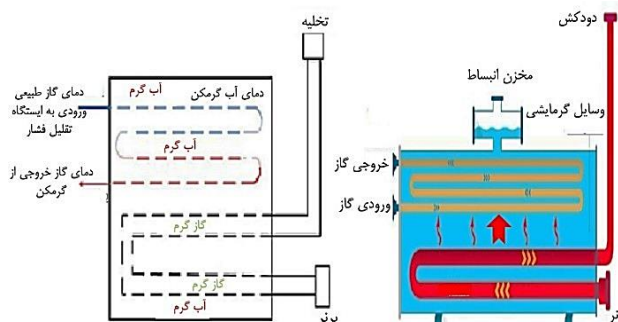
در ابتدا آزمایش هایی برای گرمکن در حالت ساده و بدون استفاده از نوار ماریچی کلاسیک انجام گرفت و مقادیر مربوط به داده های ورودی و خروجی پارامترهای دما و فشار اندازه گیری شد. سپس از نوارهای ماریچی کلاسیک فقط در ورودی گرمکن با گام های متفاوت



شکل ۲- شماتیک کنتور اندازه گیری سوخت تغذیه گرمکن



شکل ۳- شماتیکی از مجموعه کوپل ها



شکل ۴- شماتیک کلی گرمکن (الف) شماتیک کلی گرمکن (ب) نحوه آرایش جریان در گرمکن

d قطر داخلی لوله می باشد. در این مطالعه سه گام با اندازه های مختلف ساخته شده است. شکل ۶ الف، ب، ج نمونه های واقعی این نوارهای ماریچی کلاسیک را نشان می دهد. در تمامی مدل ها طول نوار ماریچی ۲۰۰ و ارتفاع آن ۳/۸ سانتی متر در نظر گرفته شده است، با این تفاوت که در مدل اول طول هر گام برابر ۸ سانتی متر و در مدل دوم طول هر گام ۶ سانتی متر و در مدل سوم ۴ سانتی متر می باشد. نسبت پیچش نوار ماریچی (γ) عبارت است از نسبت گام به قطر داخلی که با استفاده از رابطه ۲ محاسبه می گردد.

$$\gamma = \frac{H}{d} \quad (2)$$

نتایج مربوط به مقادیر نسبت پیچش نوارهای ماریچی کلاسیک در جدول ۱ مشاهده می شود و شماتیک این نوارها با مقدار نسبت پیچش آنها در شکل ۷ الف، ب و ج نشان داده شده است.

علاوه بر این عدد رینولدز و ضریب اصطکاک متوسط توسط معادلات ۸ و ۹ مشخص می گردند.

$$Re = \frac{\rho u D_h}{\mu} \quad (۸)$$

$$f = \frac{2D\Delta P}{\rho Lu^2} \quad (۸)$$

پارامتر درصد بهبود انتقال حرارت ($\% \Delta T_e$) برای مقایسه میزان انتقال حرارت با و بدون حضور نوارهای ماریپیج کلاسیک در گرمکن تعریف می شود. این پارامتر به صورت تفاوت اختلاف دما در حالت با نوار ماریپیج کلاسیک و بدون نوار نسبت به اختلاف دما مطابق معادله ۱۰ تعریف می شود.

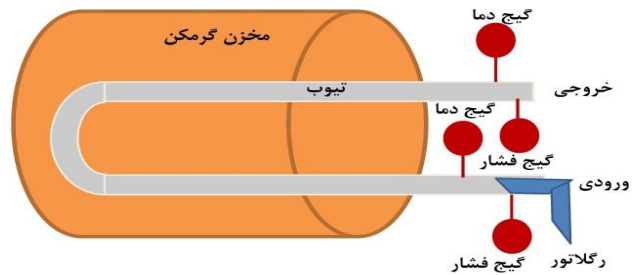
$$\% \Delta T_e = \frac{(\Delta T_{with\ insert} - \Delta T_{without\ insert})}{\Delta T_{without\ insert}} \times 100 \quad (۸)$$

نتایج و بحث

نتایج مربوط به درج هر سه نوع نوار ماریپیجی کلاسیک با نسبت پیچش های متفاوت در ورودی گرمکن در جدول های ۲ و ۳ و ۴ آمده است.

بررسی جدول های بالا نشان می دهد که درج نوار باعث افزایش ضریب انتقال حرارت و عدد ناسلت می شود. با عبور سیال از اطراف نوار ماریپیج داخل لوله، بی نظمی افزایش یافته و یک جریان چرخشی ایجاد می گردد. در واقع وجود مانع باعث حرکت بخشی از جریان سیال عمود بر جهت جریان اولیه شده که تحت عنوان جریان چرخشی شناخته می شود. این تغییر جریان سیال سبب افزایش گرادیان دما در کل سطح مقطع شده و منجر به افزایش نرخ انتقال حرارت خواهد شد [۲۶]. شکل ۹ مقادیر ضریب انتقال حرارت (h) و عدد ناسلت (Nu) بر حسب دمای آب گرمکن را نشان می دهد.

همانطور که در شکل ۹ مشاهده می شود، در حضور هر سه نوع نوار با افزایش دما پارامترهای ضریب انتقال حرارت و عدد ناسلت کاهش می یابد. به عبارتی بیشترین انتقال حرارت در دمای کمتر معادل ۳۵ درجه سلسیوس بدست می آید. دلیل این امر را می توان در نیروی محرکه دمایی یافت. از سوی دیگر با افزایش نسبت پیچش میزان انتقال حرارت کاسته می گردد و بیشترین میزان انتقال حرارت در ساختار سوم با نسبت پیچش $\gamma = 1/0.5$ مشاهده می گردد. به عبارتی نسبت پیچش کمتر به معنای تعداد پیچ های بیشتر در طول لوله می باشد که منجر به افزایش آشفتگی جریان و میزان انتقال حرارت بیشتر می شود [۱۹]. بیشترین درصد بهبود انتقال حرارت در ساختار سوم با نسبت پیچش $1/0.5$ به میزان ۱۶ درصد گزارش شده است (جدول ۴).



شکل ۸- شماتیک نحوه اندازه گیری پارامترهای لازم در این مطالعه

استفاده شده و نتایج با هم مقایسه شدند. در شکل ۸ نحوه اندازه گیری پارامترهای لازم گزارش شده است. در بازه زمانی مشخص و به منظور دقت در انجام تمام مراحل آزمایش، پارامتر دبی به مقدار ثابت در نظر گرفته شد. این میزان دبی برابر ۱۰۰ متر مکعب بر ساعت در شرایط آزمایش منظور گردید. متوسط بازه زمانی هر آزمایش یک ساعت در نظر گرفته شد. آزمایش ها در شرایط دمایی مختلف آب گرمکن به ترتیب ۳۵، ۴۰، ۴۵، ۵۰، ۵۵ و ۶۰ درجه سلسیوس انجام گرفت. تمامی خواص سیال همچون ویسکوزیته، دانسیته، ضریب هدایت حرارتی سیال و گرمای ویژه در دمای میانگین سیال محاسبه گردید.

پردازش داده ها

به منظور استفاده بهینه از نتایج آزمایشگاهی مربوط به پارامترهای اندازه گیری شده، معادلاتی در ادامه گزارش شده اند. در مرحله نخست میزان انتقال حرارت از معادله ۳ به دست می آید.

$$Q = mC_p (T_0 - T_i) \quad (۳)$$

از سوی دیگر میزان انتقال حرارتی که از سیال به محیط انتقال می یابد، توسط معادله ۴ محاسبه می گردد.

$$Q = hA (\bar{T}_w - T_b) \quad (۴)$$

\bar{T}_w معرف دمای سطح لوله ها می باشد و در نمونه صنعتی مورد نظر، همان دمای آب گرمکن است و T_b معرف دمای توده ی سیال است که از معادله ۵ به دست می آید.

$$T_b = \frac{T_i + T_o}{2} \quad (۵)$$

معادلات ۶ و ۷ برای محاسبه ضریب انتقال حرارت متوسط و عدد ناسلت می باشد.

$$h = \frac{mC_p(T_0 - T_i)}{A(\bar{T}_w - T_b)} \quad (۶)$$

$$Nu_m = \frac{hD_h}{k} \quad (۷)$$

جدول ۲ - نتایج مربوط به نوار ماریچی کلاسیک با گام یا ساختار اول ($y=2/1$)

% بهبود حرارت	f	Re	U(m/s)	Nu	h(w/m ² .k)	ΔP (bar)	T _o (°C)	T _i (°C)	وضعیت	T _w (°C)
-	۰/۲۵	۵۰۳۸۳	۲۲	۴۵/۶	۳۸	۰/۱۵	۳۳	۱۴	بدون درج نوار	۳۵
۵/۳	۰/۲۷	۵۳۶۵۶	۲۳/۵	۴۶	۳۹	۰/۱۶	۳۳	۱۳	y=2/1	
-	۰/۲۵	۵۰۳۸۳	۲۲	۳۴/۵	۲۹	۰/۱۵	۳۴	۱۴	بدون درج نوار	۴۰
۵	۰/۲۷	۵۳۶۵۶	۲۳/۵	۳۵/۲	۲۹/۹	۰/۱۶	۳۴	۱۳	y=2/1	
-	۰/۲۴	۵۰۳۸۳	۲۲	۳۳/۱۹	۲۸/۲	۰/۱۴	۳۷	۱۳	بدون درج نوار	۴۵
۴	۰/۲۵	۵۳۶۵۶	۲۳/۴	۳۷/۳	۳۱	۰/۱۵	۳۹	۱۴	y=2/1	
-	۰/۲۴	۵۰۳۸۳	۲۲	۳۱/۲۶	۲۶/۵	۰/۱۴	۴۰	۱۴	بدون درج نوار	۵۰
۳/۸	۰/۲۵	۵۳۶۵۶	۲۳/۴	۳۵/۵	۲۸/۲۱	۰/۱۵	۴۱	۱۴	y=2/1	
-	۰/۲	۵۰۳۸۳	۲۲	۲۶/۶	۲۲/۶	۰/۱۲	۴۱	۱۵	بدون درج نوار	۵۵
۳/۸۲	۰/۲۴	۵۳۶۵۶	۲۳/۴	۲۸/۱۸	۲۳/۹	۰/۱۴	۴۲	۱۵	y=2/1	
-	۰/۲	۵۰۳۸۳	۲۲	۲۳/۹	۲۰/۳۷	۰/۱۲	۴۳	۱۷	بدون درج نوار	۶۰
۳/۸۲	۰/۲۲	۵۳۶۵۶	۲۳/۴	۲۳/۹	۲۰/۳۷	۰/۱۳	۴۳	۱۷	y=2/1	

جدول ۳ - نتایج مربوط به نوار ماریچی کلاسیک با گام یا ساختار دوم ($y=1/57$)

% بهبود حرارت	f	Re	U(m/s)	Nu	h(w/m ² .k)	ΔP (bar)	T _o (°C)	T _i (°C)	وضعیت	T _w (°C)
-	۰/۲۵	۵۰۳۸۳	۲۲	۴۵/۶	۳۸	۰/۱۵	۳۳	۱۴	بدون درج نوار	۳۵
۱۱	۰/۲۸	۵۳۶۵۶	۲۳/۵	۴۶/۴	۳۹/۴	۰/۱۷	۳۳	۱۲	y=1/57	
-	۰/۲۵	۵۰۳۸۳	۲۲	۳۴/۵	۲۹	۰/۱۵	۳۴	۱۴	بدون درج نوار	۴۰
۱۰	۰/۲۸	۵۳۶۵۶	۲۳/۵	۳۸	۲۳/۳	۰/۱۷	۳۵	۱۳	y=1/57	
-	۰/۲۴	۵۰۳۸۳	۲۲	۳۳/۱۹	۲۸/۲	۰/۱۴	۳۷	۱۳	بدون درج نوار	۴۵
۸	۰/۲۵	۵۳۶۵۶	۲۳/۴	۳۷/۸	۳۲/۱۷	۰/۱۵	۳۹	۱۳	y=1/57	
-	۰/۲۴	۵۰۳۸۳	۲۲	۳۱/۲۶	۲۶/۵	۰/۱۴	۴۰	۱۴	بدون درج نوار	۵۰
۷/۶	۰/۲۵	۵۳۶۵۶	۲۳/۴۷	۳۳/۶۷	۲۸/۶	۰/۱۵	۴۱	۱۴	y=1/57	
-	۰/۲	۵۰۳۸۳	۲۲	۲۶/۶	۲۶/۶	۰/۱۲	۴۱	۱۵	بدون درج نوار	۵۵
۳/۸۴	۰/۲۵	۵۳۶۵۶	۲۳/۴۷	۲۹/۲	۲۴/۸	۰/۱۵	۴۲	۱۵	y=1/57	
-	۰/۲	۵۰۳۸۳	۲۲	۲۳/۹	۲۰/۳۷	۰/۱۲	۴۳	۱۷	بدون درج نوار	۶۰
۳/۸۴	۰/۲۵	۵۳۶۵۶	۲۳/۴۷	۲۵/۳	۲۱/۵	۰/۱۵	۴۳	۱۷	y=1/57	

جدول ۴ - نتایج مربوط به نوار ماریچی کلاسیک با گام یا ساختار سوم ($y=1/05$)

% بهبود حرارت	f	Re	U(m/s)	Nu	h(w/m ² .k)	ΔP (bar)	T _o (°C)	T _i (°C)	وضعیت	T _w (°C)
-	۰/۲۵	۵۰۳۸۳	۲۲	۴۵/۶	۳۸	۰/۱۵	۳۳	۱۴	بدون درج نوار	۳۵
۱۶	۰/۳۳	۵۳۶۵۶	۲۳/۵	۵۰/۷	۴۳	۰/۲	۳۴	۱۱	y=1/05	
-	۰/۲۵	۵۰۳۸۳	۲۲	۳۴/۵	۲۹	۰/۱۵	۳۴	۱۴	بدون درج نوار	۴۰
۱۳/۵	۰/۳۱	۵۳۶۵۶	۲۳/۵	۳۸	۳۲/۳	۰/۱۹	۳۵	۱۳	y=1/05	
-	۰/۲۴	۵۰۳۸۳	۲۲	۳۳/۱۹	۲۸/۲	۰/۱۴	۳۷	۱۳	بدون درج نوار	۴۵
۱۲/۵	۰/۲۷	۵۳۶۵۶	۲۳/۴	۴۰/۳۶	۳۴/۳	۰/۱۶	۴۰	۱۳	y=1/05	
-	۰/۲۴	۵۰۳۸۳	۲۲	۳۱/۲۶	۲۶/۵	۰/۱۴	۴۰	۱۴	بدون درج نوار	۵۰
۱۱	۰/۲۷	۵۳۶۵۶	۲۳/۴۷	۳۵/۶	۳۰/۳	۰/۱۶	۴۲	۱۳	y=1/05	
-	۰/۲	۵۰۳۸۳	۲۲	۲۶/۶	۲۶/۶	۰/۱۲	۴۱	۱۵	بدون درج نوار	۵۵
۷/۷	۰/۲۷	۵۳۶۵۶	۲۳/۴۷	۳۰/۹	۲۶/۳	۰/۱۶	۴۴	۱۶	y=1/05	
-	۰/۲	۵۰۳۸۳	۲۲	۲۳/۹	۲۰/۳۷	۰/۱۲	۴۳	۱۷	بدون درج نوار	۶۰
۷/۷	۰/۲۸	۵۳۶۵۶	۲۳/۴۷	۲۵/۳	۲۱/۵	۰/۱۷	۴۴	۱۷	y=1/05	

جدول ۵- نتایج نسبت پیچش $\gamma=1/0.5$

ردیف	دماهای مختلف گرمکن ($^{\circ}\text{C}$)	میزان مصرف بدون قطعه تعبیه شده (متر مکعب بر ساعت)	میزان مصرف با قطعه تعبیه شده (متر مکعب بر ساعت)	درصد صرفه جویی در مصرف گاز
۱	۳۵	۲۰	۱۸/۶	۷
۲	۴۰	۲۰	۱۸/۸	۶
۳	۴۵	۱۹	۱۸	۵
۴	۵۰	۲۷	۲۵/۲	۵
۵	۵۵	۲۵	۲۴	۴
۶	۶۰	۲۸	۲۷/۱	۳

جدول ۶- میزان مصرف گاز و هزینه‌های گاز گرمکن‌ها

ردیف	ظرفیت گرمکن	میزان مصرف سالیانه (m^3/h)	میزان مصرف روزانه (m^3/h)	درصد صرفه جویی گاز	میزان کاهش مصرف سالیانه (تومان)
۱	۲۵۰۰	۱۱۵۲۰	۲	۶	۳۴۵۷۰۰۰۰
۲	۵۰۰۰	۲۸۸۰۰	۵	۶	۸۶۴۰۰۰۰
۳	۱۰۰۰۰	۶۳۳۶۰	۱۱	۶	۱۹۰۰۸۰۰۰
۴	۲۰۰۰۰	۱۶۸۰۰۰	۲۹	۶	۵۰۴۰۰۰۰۰
۵	۳۰۰۰۰	۲۸۸۰۰۰	۵۰	۶	۸۶۴۰۰۰۰۰
۶	۵۰۰۰۰	۳۵۷۱۲۰	۶۲	۶	۱۰۷۱۳۶۰۰۰
۷	۱۰۰۰۰۰	۴۰۸۰۰۰	۸/۷۰	۶	۱۲۲۴۰۰۰۰۰

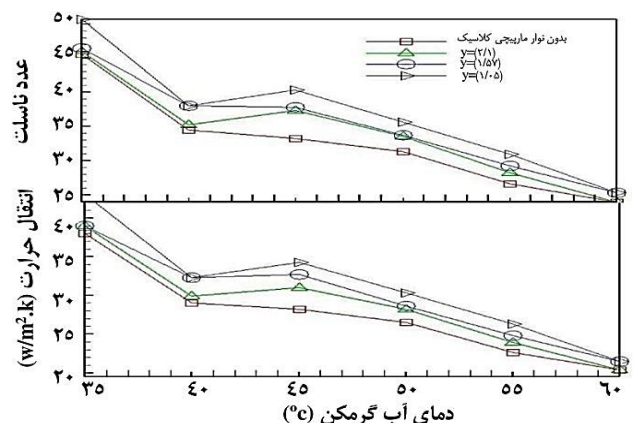
در رابطه ۱۱، LHV ارزش گرمایی پایین سوخت می‌باشد که با استفاده از آنالیز گاز منطقه مورد مطالعه، برابر $\frac{34129}{19} \frac{\text{Kj}}{\text{m}^3}$ می‌باشد. همچنین μ ، میزان بازده گرمکن است که این عدد مطابق شرکت سازنده عدد 0.4 تعریف شده است.

$$Q_{\text{heater}} \left(\frac{\text{Kj}}{\text{h}} \right) = \dot{m} \left(\frac{\text{Kg}}{\text{h}} \right) \times \text{CP} \left(\frac{\text{Kj}}{\text{Kg}^{\circ}\text{K}} \right) \times \Delta T \quad (12)$$

پس از آنکه مشخص شد نسبت پیچش $\gamma=1/0.5$ بهترین راندمان را دارد. محاسبات برای این نسبت پیچش انجام شده و نتایج در جدول ۵ ارائه شده است.

با استعلام از شرایط بهره برداری گرمکن‌ها، در بازه زمانی سرد سال دمای آب گرمکن در محدوده $35-40$ درجه سلسیوس می‌باشد. در این بررسی دمای 40 درجه سلسیوس به عنوان مبنای محاسبات در نظر گرفته شده است. بنابراین در جدول ۶ میزان صرفه جویی انرژی حدود 6 درصد لحاظ گردیده و میزان مصرف روزانه و نیز مقدار کاهش مصرف سالیانه محاسبه شده است.

هزینه‌هایی که برای ساخت قطعه تعبیه شده و نصب در این گرمکن صورت گرفته در جدول ۷ آمده است. استفاده از قطعه تعبیه شده در بهترین حالت در این مطالعه 5 سال منظور گردیده است. با توجه به مبالغی که برای صرفه جویی سالیانه محاسبه شده است، می‌توان میزان نرخ برگشتی برای گرمکن را محاسبه کرد.



شکل ۹- ضریب انتقال حرارت (h) و عدد ناسلت (Nu) بر حسب دمای آب گرمکن

تحلیل اقتصادی استفاده از نوار ماریپیج کلاسیک در گرمکن

از آنجا که انرژی زیادی صرف گرمایش گاز در ایستگاه‌های تقلیل فشار گاز می‌گردد، محاسبه این انرژی در راستای این مطالعه قرار گرفته است. میزان مصرف سوخت در ساعت توسط کنتور توربینی ایستگاه در دماهای مختلف آب گرمکن اندازه گیری می‌گردد. سپس مقدار آن با حالتی که نوار ماریپیج تعبیه شده مقایسه و میزان صرفه جویی انرژی مطابق روابط ۱۱ و ۱۲ محاسبه می‌گردد.

$$V = \frac{\dot{Q}_{\text{heater}}}{\mu \times \text{LHV}} \quad (11)$$

جدول ۷- هزینه های ساخت و نصب قطعه تعبیه شده

ردیف	ظرفیت گرمکن	هزینه ساخت و نصب قطعه تعبیه شده (تومان)	هزینه سالیانه (برای ۵ سال حساب گردیده شده) (تومان)
۱	۲۵۰۰	۱۲۵۰۰۰۰	۲۵۰۰۰۰
۲	۵۰۰۰	۱۵۰۰۰۰۰	۳۰۰۰۰۰
۳	۱۰۰۰۰	۲۰۰۰۰۰۰	۴۰۰۰۰۰۰
۴	۲۰۰۰۰	۳۸۰۰۰۰۰	۷۶۰۰۰۰۰
۵	۳۰۰۰۰	۶۰۰۰۰۰۰	۱۲۰۰۰۰۰۰
۶	۵۰۰۰۰	۹۰۰۰۰۰۰	۱۸۰۰۰۰۰۰
۷	۱۰۰۰۰۰	۱۷۰۰۰۰۰۰	۳۴۰۰۰۰۰۰

جدول ۸- نرخ بازگشت سرمایه

ردیف	ظرفیت گرمکن	نرخ بازگشت سرمایه
۱	۲۵۰۰	۲/۵۷
۲	۵۰۰۰	۵/۵۶
۳	۱۰۰۰۰	۹/۳
۴	۲۰۰۰۰	۱۳/۱
۵	۳۰۰۰۰	۱۴/۲
۶	۵۰۰۰۰	۱/۷۱
۷	۱۰۰۰۰۰	۷

جدول ۹- زمان بازگشت سرمایه (سال)

ردیف	ظرفیت گرمکن	زمان بازگشت سرمایه (سال)
۱	۲۵۰۰	۰/۳۹
۲	۵۰۰۰	۰/۱۸
۳	۱۰۰۰۰	۰/۱۱
۴	۲۰۰۰۰	۰/۰۸
۵	۳۰۰۰۰	۰/۰۷
۶	۵۰۰۰۰	۰/۰۸۵
۷	۱۰۰۰۰۰	۰/۱۴

انتقال حرارت در ایستگاه تقلیل فشار گاز استفاده گردید. آزمایش‌ها در محدوده دمایی ۳۵ تا ۶۰ درجه سلسیوس برای آب گرمکن و در حضور سه نوار ماریچی کلاسیک با نسب پیچش‌های متفاوت انجام گرفت. نتایج نشان داد که تعبیه نوار ماریچی در هر سه نوع ساختار باعث افزایش ضریب انتقال حرارت و عدد ناسلت شد. بیشترین بهبود انتقال حرارت در دمای آب گرمکن ۳۵ درجه سلسیوس و نسبت پیچش $y = 1/0.5$ به میزان ۱۶ درصد حاصل گردید. کمترین افزایش مربوط به دمای آب ۶۰ درجه سلسیوس و نسبت پیچش $y = 2/1$ به میزان $3/82$ بدست آمد. استفاده از نوار ماریچی باعث افت فشار در لوله شده که برای سیستم ایستگاه تقلیل فشار گاز یک مزیت به حساب می‌آید. بنابراین با درج این نوع نوار ماریچی می‌توان به افزایش سرعت انتقال حرارت و افت فشار مطلوب سیستم دست یافت. تحلیل اقتصادی استفاده از نوار ماریچی در گرمکن کاهش هزینه‌ها در این مبدل را نشان داد.

تشکر و قدردانی

نویسندگان این مقاله مراتب تشکر و سپاس خود را از دانشگاه آزاد اسلامی واحد کرمانشاه، شرکت پخش فرآورده‌های نفتی منطقه کرمانشاه و شرکت گاز استان کردستان به دلیل حمایت در انجام این تحقیق اعلام می‌دارند.

در این رابطه نرخ بازگشت سرمایه، با کم کردن هزینه از درآمد کل و تقسیم آن بر هزینه‌ی کل مطابق رابطه ۱۳ محاسبه می‌شود.

$$\text{نرخ بازگشت سرمایه} = \frac{\text{هزینه - درآمد کل}}{\text{هزینه ی کل}} \quad (13)$$

در جدول ۸ نرخ بازگشت سرمایه گزارش شده است. به طور کلی هر نرخ بازگشت سرمایه‌ی مثبتی را می‌توان بازگشت خوبی به شمار آورد. مثبت بودن این نسبت، عبارت است از کل هزینه‌ی سرمایه‌گذاری به علاوه‌ی سود. نرخ بازگشت سرمایه‌ی منفی یعنی درآمد آنقدر نبوده که بتواند کل هزینه‌ها را پوشش دهد.

زمان برگشت سرمایه

رابطه‌ی ۱۴ زمان برگشت سرمایه را گزارش می‌دهد.

$$\text{زمان بازگشت سرمایه (سال)} = \frac{\text{کل هزینه}}{\text{هزینه سال - درآمد کل سال}} \quad (14)$$

مقادیر زمان بازگشت سرمایه (سال) در جدول ۹ نشان داده شده است. به طور کلی اگر میزان عدد مرتبط با بازگشت سرمایه کوچکتر باشد نشانگر این موضوع است که در بازه زمان کوتاهتری می‌توان کل مبلغ هزینه را عودت داد.

نتیجه‌گیری

در این تحقیق از نوار ماریچی کلاسیک جهت بهبود سرعت

		نمادها	
عدد رینولدز	Re	سطح حرارتی	A
دما °C یا K	T	ظرفیت گرمایی سیال $\frac{Kj}{kg K}$	Cp
دمای توده بالک °C	T _b	قطر هیدرولیکی m	D _h
دمای هوای خروجی °C	T _o	ضریب اصطکاک	F
دمای سطح لوله °C	T _s	ضریب انتقال گرما $\frac{W}{m^2 K}$	h
دمای آب گرمکن °C	T _w	ضریب هدایت گرمایی سیال $\frac{W}{m^2 K}$	K
سرعت متوسط $m s^{-1}$	u	طول لوله m	L
شدت انتقال حرارت	Q	شدت جریان جرمی $kg s^{-1}$	\dot{m}
حروف یونانی		عدد ناسلت	Nu _m
گرانروی Kg/ms	μ	فشار bar	P
دانسیته kg/m^3	ρ	عدد پراتل	Pr
		فشار محیط bar	Po

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۳/۱۲؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۱/۱۴

مراجع

- [1] Miansari M., Valipour M.A., Arasteh H., Toghraie D., [Energy and Exergy Analysis and Optimization of Helically Grooved Shell and Tube Heat Exchangers by Using Taguchi Experimental Design](#), *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, **139(5)**: 3151-3164 (2020).
- [۲] بزرگان ن، میری م، وحیدی نیا ف، کاربرد نانو سیال آب آلومینا گاما در مبدل گرمایی پوسته و لوله در غلظت های حجمی گوناگون، نشریه شیمی و مهندسی شیمی ایران، **۳۵(۲)**: ۱۳۹ تا ۱۴۹ (۱۳۹۵).
- [3] Maghrabie H.M., Attalla M., Fawaz H.E., Khalil M., [Impingement/Effusion Cooling of Electronic Components with Cross-flow](#), *Applied Thermal Engineering*, **151**: 199-213 (2019).
- [4] Hosseini S.M., Safaei M.R., Estelle P., Jafarnia S.H., [Heat Transfer of Water-based Carbon Nanotube Nanofluids in the Shell and Tube Cooling Heat Exchangers of the Gasoline Product of the Residue Fluid Catalytic Cracking Unit](#), *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, **140(1)**: 351-362 (2020).
- [5] Omid M., Darzi A.A.R., Farhadi M., [Turbulent Heat Transfer and Fluid Flow of Alumina Nanofluid Inside Three-lobed Twisted Tube](#), *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, **137(4)**: 1451-1462 (2019).
- [6] Omid M., Farhadi M., Jafari M., [A Comprehensive Review on Double Pipe Heat Exchangers](#), *Applied Thermal Engineering*, **110**: 1075-1090 (2017).
- [7] Bergles A.E., [Techniques to Augment Heat Transfer](#), Handbook of Heat Transfer Applications. McGraw-Hill, New York, 3-1-3-80 (1985).
- [8] Hosseinian A., Meghdadi Isfahani A.H., [Experimental Study of Heat Transfer Enhancement due to the Surface Vibrations in a Flexible Double Pipe Heat Exchanger](#), *Heat Mass Transfer*, **54**: 1113-1120 (2018).

- [9] Gorjaei A.R., Shahidian A., [Heat Transfer Enhancement in a Curved Tube by Using Twisted Tape Insert and Turbulent Nanofluid Flow](#), *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, **137**: 1059-1068 (2019).
- [10] Tafarroj M.M., Zarabian-Ghaeini G., Esfahani J.A., Kim K.C., [Multi-Purpose Prediction of the Various Edge Cut Twisted Tape Insert Characteristics: Multilayer Perceptron Network Modeling](#), *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, **145**: 2005-2020 (2021).
- [11] Kumar A., Singh S., Chamoli S., Kumar M., [Experimental Investigation on Thermo-Hydraulic Performance of Heat Exchanger Tube with Solid and Perforated Circular Disk Along with Twisted Tape Insert](#), *Heat Transfer Engineering*, **40**: 616-626 (2019).
- [12] Sarac B.A., Bali T., [An Experimental Study on Heat Transfer and Pressure Drop Characteristics of Decaying Swirl Flow Through a Circular Pipe with a Vortex Generator](#), *Experimental Thermal and Fluid Science*, **32**: 158-165 (2007).
- [۱۳] پهلوانزاده ح، روشن ضمیر ح، مظفری، س.ح، بررسی تأثیر به کارگیری افزایشنده‌های انتقال حرارت بر ضریب انتقال حرارت در جریان دوفازی آب - هوا در الگوی حبابی، نشریه شیمی و مهندسی شیمی ایران، ۳۰(۱): ۵۳ تا ۶۲ (۱۳۹۰).
- [14] Sarma P.K., Kishore P.S., Rao V.D., Subrahmanyam T., [A Combined Approach to Predict Friction Coefficients and Convective Heat Transfer Characteristics in A Tube with Twisted Tape Inserts for a Wide Range of Re and Pr](#), *International Journal of Thermal Sciences*, **44**: 393-398 (2005).
- [15] Li L., Yang M., Zhang Y., [Numerical Study of Periodically Fully-developed Convection in Channels with Periodically Grooved Parts](#), *International Journal of Heat and Mass Transfer*, **51**: 3057-3065 (2008).
- [16] Eiamsa-Ard S., Rattanawong S., Promvong P., [Turbulent Convection in Round Tube Equipped with Propeller Type Swirl Generators](#), *International Communications in Heat and Mass Transfer*, **36**: 357-364 (2009).
- [17] Eiamsa-Ard S., Nuntadusit, C., Promvong P., [Effect of Twin Delta-Winged Twisted-Tape on Thermal Performance of Heat Exchanger Tube](#), *Heat transfer engineering*, **34**: 1278-1288 (2013)
- [18] Eiamsa-ard S., Wongcharee K., Kunrak K., Kumar M., Chuwattabakul V., [Heat Transfer Enhancement of TiO₂-Water Nanofluid Flow in Dimpled Tube with Twisted Tape Insert](#), *Heat and Mass Transfer*, **55**: 2987-3001 (2019).
- [19] Rahimi M., Shabani S R., Alsairafi A A., [Experimental and CFD Studies on Heat Transfer and Friction Factor Characteristics of a Tube Equipped with Modified Twisted Tape Inserts](#), *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, **48**: 762-770 (2009).
- [20] Murugesan P., Mayilsamy K., Suresh S., Srinivasan P S S., [Heat transfer and pressure drop characteristics in a circular tube fitted with and without V-cut twisted tape insert](#), *International Communications in Heat and Mass Transfer*, **38**(3): 329-334 (2011).

- [21] Prasad P.D., Gupta A., Deepak K., [Investigation of Trapezoidal-Cut Twisted Tape Insert in a Double Pipe U-Tube Heat Exchanger Using Al₂O₃/Water Nanofluid](#), *Procedia Materials Science*, **10**: 50-63 (2015).
- [22] Yu C.L., Ren Z.W., Zeng M., Ji M.D., [Parameters Optimization of a Parallel-Flow Heat Exchanger with a New Type of Anti-Vibration Hexagon Clamping Baffle and Coiled Wire Using Taguchi Method](#), *Journal of Zhejiang University - Science A: Applied Physics & Engineering*, **19**: 676-690 (2018).
- [23] Kurnia J.C., Chaedir B.A., Sasmito A.P., [Laminar Convective Heat Transfer in Helical Tube with Twisted Tape Insert](#), *International Journal of Heat and Mass Transfer*, **50**: 119309 (2020)
- [24] Arjmandi H., Amiri P., Saffari Pour M., [Geometric Optimization of a Double Pipe Heat Exchanger with Combined Vortex Generator and Twisted Tape: A CFD and Response Surface Methodology \(RSM\) Study](#), *Thermal Science and Engineering Progress*, **18**: 100514 (2020).
- [25] Kola P.V.K.V., Pisipaty S.K., Mendu S.S., Ghosh R., [Optimization of Performance Parameters of a Double Pipe Heat Exchanger with Cut Twisted Tapes using CFD and RSM](#), *Chemical Engineering and Processing-Process Intensification*, **163**: 108362 (2021).
- [26] Ranjith., Shaji K., [Numerical Analysis on a Double Pipe Heat Exchanger with Twisted Tape Induced Swirl Flow on Both Sides](#), *Procedia Technology*, **24**: 436-443 (2016).
- [27] Salari S., Goudarzi K., [Heat Transfer Enhancement and Fuel Consumption Reduction in Heaters of CGS Gas Stations](#), *Case studies in thermal engineering*, **10**: 641-649 (2020).
- [28] Ranjbar B., Jafarbeigi E., Kazemi M., [Studying and Simulating Gas Hydrate Formation Procedure in Kamyaran CGS Pressure Reduction Station](#), *International Journal of Advanced Biotechnology and Research (IJBR)*, **5**: 1030-1036 (2016).