

بررسی تجربی افزایش انتقال حرارت و افت فشار جریان آرام و رینولدزهای پایین جریان مغشوش در لوله دایروی با سیم-

پیچ

علی اکبر شمشیری^۱، محمدعلی اخوان بهابادی^۲، احمد صداقت^۳

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اصفهان، aliakbar.shamshiri@yahoo.com

^۲ استاد دانشکده مهندسی مکانیک، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران، akhavan@ut.ac.ir

^۳ استادیار دانشکده مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اصفهان، sedaghat@cc.iut.ac.ir

چکیده

ویژگی‌های انتقال حرارت و افت فشار جریان آرام و مغشوش روغن انتقال حرارت در لوله دایروی با سیم‌پیچ که در شرایط دمای دیواره ثابت است، در این تحقیق مورد بررسی تجربی قرار گرفته است. آزمایش‌ها در ناحیه کاملاً توسعه یافته از نظر هیدرودینامیکی و در ناحیه ورودی از نظر حرارتی برای جریان آرام انجام شدند. برای این هدف، ابتدا روغن انتقال حرارت HT-B در لوله‌ای افقی با مقطع دایروی با قطر داخلی ۱۴/۵ میلی‌متر مورد آزمایش قرار گرفت و سپس سیم‌پیچ‌هایی با گام‌ها و قطر سیم‌های مختلف درون لوله جا داده شد و آزمایش‌ها ادامه یافت. سیم‌پیچ‌های مورد آزمایش در این تحقیق از جنس فولاد کربن بودند که در گستره هندسی نسبت گام پیچ به قطر داخلی لوله $2/79 \leq p/d \leq 1/12$ و نسبت قطر سیم به قطر داخلی لوله $0/097 \leq e/d \leq 0/069$ قرار داشتند. اثرات عدد رینولدز و هم‌چنین هندسه سیم‌پیچ‌ها بر انتقال حرارت و ضریب اصطکاک مورد بررسی قرار گرفت. افزایش قابل ملاحظه انتقال حرارت در ناحیه‌ای که الگوی جریان به دلیل استفاده از سیم‌پیچ تغییر کرده بود، مشاهده شد. البته افزایش در ضریب انتقال حرارت همراه با افزایش در ضریب اصطکاک و افت فشار مشاهده شد. از همین رو هر دو عامل انتقال حرارت و افت فشار به منظور ارزیابی عملکرد سیم‌پیچ‌ها به‌طور هم‌زمان مورد بررسی قرار گرفتند. آزمایش‌ها در محدوده عدد رینولدز ۱۰۰ تا ۴۳۰۰ و عدد پرانتل ۱۵۰ تا ۴۳۰ انجام گرفت.

واژه‌های کلیدی: انتقال حرارت، افت فشار، سیم‌پیچ، دمای دیواره ثابت.

مقدمه

استفاده از سیم‌پیچ یکی از معمول‌ترین روش‌های غیرفعال برای افزایش انتقال حرارت در موارد عملی می‌باشد. از آنجایی که خنک‌کاری یکی از مهم‌ترین چالش‌هایی است که بسیاری از صنایع با آن روبرو هستند، روش‌های افزایش انتقال حرارت اعم از فعال و غیر فعال و یا ترکیبی از این دو در شمار زیادی از این صنایع مانند تجهیزات تهویه مطبوع، بخچال‌ها، صنایع پتروشیمی، نیروگاه‌ها و خودروسازی‌ها بکار می‌رود. روش‌های فعال شامل یک نیروی خارجی نظیر میدان الکتریکی یا آکوستیک و ارتعاش سطحی می‌باشد که به دلیل پیچیدگی‌های طراحی کمتر مورد استفاده قرار گرفته است. در روش‌های غیرفعال به هیچ‌گونه نیروی خارجی نیاز نمی‌باشد و از نیروی خود جریان استفاده می‌شود که در نهایت به افزایش افت فشار منجر خواهد شد. افزایش انتقال حرارت از طریق زبری مصنوعی که استفاده از تجهیزات درون لوله‌ای نیز یکی از آنهاست، برای دستیابی به مبدل‌های گرمایی کوچک‌تر و با کارایی بالاتر همیشه مورد توجه بوده

است [۱-۲]. به دلیل هزینه کم و سهولت در نصب و نگهداری، سیم‌پیچ و نوار پیچیده شده دارای مزیت نسبی در برابر دیگر روش‌های ایجاد زبری مصنوعی می‌باشند. که البته کارهای انجام شده بر سیم‌پیچ نسبت به نوار پیچیده شده خیلی کمتر است. نوارهای پیچیده شده لزوماً بهترین تجهیزات درون لوله‌ای نیستند [۱]، اما به دلیل وجود رابطه‌های دقیق طراحی شده برای هر سه جریان آرام، گذرا و مغشوش بیشتر از سیم‌پیچ مورد استفاده قرار گرفته‌اند [۳].

تجهیزات درون لوله‌ای می‌توانند با ترکیبی از یک یا چند مورد زیر، باعث افزایش انتقال حرارت و به همراه آن افزایش ضریب اصطکاک جریان شوند:

۱- جلوگیری از توسعه زیر لایه آرام جریان، افزایش میزان اغتشاش

آن

۲- افزایش سطح مؤثر انتقال حرارت

۳- تولید جریان‌های گردابه‌ای یا ثانویه

مطالعات زیادی توسط گروه‌های مختلف در سال‌های گذشته بر روی استفاده از سیم‌پیچ در رژیم‌های مختلف جریان و با سیالاتی با خصوصیات متفاوت انجام شده است [۴-۱۲]. در بیشتر کارهای انجام شده سیال آزمایش آب یا هوا بوده است که معمولاً در رژیم مغشوش آزمایش انجام گرفته است. مرور و مقایسه‌ای از نظر حرارتی و هیدرودینامیکی بر تعدادی از کارهای انجام گرفته بر روی نوارهای پیچیده شده و سیم‌پیچ‌ها در مراجع [۱۳-۱۴] آمده است. دوان و همکاران [۱۴] گزارش کردند که میزان کارایی سیم‌پیچ به عدد پرانتل سیال آزمایش بستگی دارد و هرچه این عدد بالاتر باشد کارایی سیم‌پیچ نیز بهتر خواهد بود، آنها هم‌چنین اعلام کردند که سیم‌پیچ‌ها در جریان مغشوش نسبت به جریان آرام عملکرد بهتری دارند. در جدول (۱) سیال و هندسه سیم‌پیچ‌های استفاده شده در آزمایش منتخبی از کارهایی که در گذشته انجام شده است، مشاهده می‌شود.

از کارهای تجربی انجام گرفته با سیم‌پیچ درون لوله در جریان آرام می‌توان به کار اولیور و شوچی [۶] برای سیال‌های غیرنیوتنی و کارهای اوتاروار و راجا راو [۱۶]، اینابا و همکاران [۸]، گارسیا و همکاران [۱۷] و اخوان بهابادی و همکاران [۱۹] برای سیال‌های نیوتنی اشاره کرد. اولیور و شوچی [۶] که سیال آزمایش آن‌ها غیرنیوتنی بود، با استفاده از سیم‌پیچ درون لوله افزایش انتقال حرارت را تا ۴ مرتبه و افزایش افت فشار را تا ۵ مرتبه بیشتر از لوله صاف گزارش کردند. اینابا و همکاران [۸] افزایش انتقال حرارت حاصل از اغتشاش ایجاد شده حتی در جریان پایین دست سیم‌پیچ را گزارش کردند. گارسیا و همکاران [۱۷] در کار خود اثرات جابجایی آزاد را نیز بررسی کردند، آن‌ها اعلام کردند که در جریان کاملاً آرام و در اعداد

ارزیابی‌های آنان نشان داد که استفاده هم‌زمان نانوسیال و سیم‌پیچ به عنوان دو روش غیرفعال افزایش انتقال حرارت از کارایی بالاتری نسبت به استفاده از یکی این دو روش به تنهایی دارد.

هدف اصلی کار حاضر بسط و توسعه داده‌های تجربی برای سیالات با پراتنل بالا در گستره بالاتری از اعداد رینولدز و اعداد پراتنل نسبت به کارهای قبلی می‌باشد، که در این محدوده کار قابل ملاحظه‌ای مشاهده نشده است. سیال آزمایش در این تحقیق روغن انتقال حرارت HT-B می‌باشد، که به بررسی تأثیر استفاده از سیم‌پیچ بر میزان انتقال حرارت و افت فشار جریان سیال در لوله افقی با شرایط دمای دیواره ثابت پرداخته می‌شود. آزمایش‌ها در جریان آرام و هم‌چنین در اعداد رینولدز پایین جریان مغشوش انجام می‌شود، که محدوده اعداد رینولدز و اعداد پراتنل آزمایش به ترتیب ۴۳۰۰-۱۰۰ و ۴۳۰-۱۵۰ است.

دستگاه آزمایش

طرح شماتیک دستگاه آزمایشی که در این تحقیق استفاده شده است را در شکل (۱) می‌توان مشاهده کرد. دستگاه آزمایش برای مطالعه ویژگی‌های انتقال حرارت و افت فشار جریان روغن انتقال حرارت HT-B در لوله‌ای افقی با و بدون سیم‌پیچ تحت شرایط دمای دیواره ثابت طراحی و ساخته شد. این دستگاه آزمایش متشکل از یک مدار برای جریان روغن انتقال حرارت HT-B می‌باشد که از بخش‌های متفاوتی تشکیل شده است.

حلقه جریان متشکل از بخش آزمایش، مبدل حرارتی، دستگاه اندازه‌گیری دبی، پیش‌خنک کننده، مخزن و پمپ دنده‌ای است. برای کنترل دبی جریان از یک شیر بای‌پس با خط برگشت به مخزن استفاده شد. بخش آزمایش از یک لوله صاف مسی که فنرها درون آن قرار می‌گیرند، به طول ۱/۵ متر و قطر داخلی ۱۴/۵ میلی‌متر و قطر خارجی ۱۵/۶ میلی‌متر تشکیل شده است، البته طول لوله برای سنجش ضریب انتقال حرارت ۱/۲ متر و برای پارامتر افت فشار ۱/۵ متر می‌باشد. سیال جاری درون لوله توسط بخار موجود در مخزن که اطراف لوله را احاطه کرده بود، گرم می‌شد. بخار درون مخزن بیش از نیاز توسط المنت‌های حرارتی تولید می‌شد. دو ترموکوپل نوع K برای اندازه‌گیری دمای حجمی نانوسیال در ورود و خروج، درون لوله جاسازی شد. پنج ترموکوپل دیگر نیز در طول لوله‌ی آزمایش برای اندازه‌گیری دمای سطح لوله، به بدنه آن جوش داده شد. دستگاه اندازه‌گیری افت فشار که در این تحقیق به کار گرفته شد، دستگاه فشارسنج دیفرانسیلی بسیار دقیق PMD-75 می‌باشد. سیال پس از ترک بخش آزمایش، ابتدا از یک مبدل حرارتی گذر می‌کرد، سیال خنک‌کننده این مبدل آب بود و با جهت جریان نیز ناهمسو بود سپس برای اندازه‌گیری

رینولدز کمتر از ۲۰۰ سیم‌پیچ افزایشی در انتقال حرارت ایجاد نمی‌کند ولی در رینولدزهای نزدیک ۱۰۰۰ تا ۸ برابر انتقال حرارت را بوسیله سیم‌پیچ گزارش کردند. اخوان بهابادی و همکاران [۱۹] در کاری تجربی افزایش انتقال حرارت با استفاده از سیم‌پیچ را در جریان آرام روغن داخل لوله بررسی کردند که محدوده عدد رینولدز آزمایش آن‌ها ۱۰ تا ۱۵۰۰ بود. آن‌ها تأثیر عدد رینولدز، عدد پراتنل و هم‌چنین هندسه سیم‌پیچ‌ها را بر انتقال حرارت بررسی کردند و در آخر دو رابطه تجربی برای پیش‌بینی انتقال حرارت بسته به هندسه سیم‌پیچ‌ها ارائه کردند.

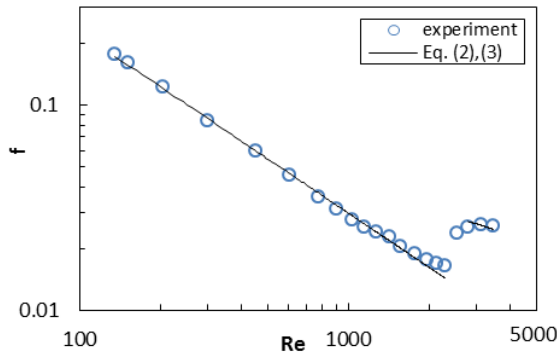
در مطالعاتی که بر جریان مغشوش صورت گرفته است، می‌توان به کار تجربی ستومادهوان و راجا راو [۱۵] اشاره کرد که از آب و گلیسرین به عنوان سیال آزمایش استفاده کردند تا دامنه عدد پراتنل بالاتری را پوشش دهند. آنها تأثیر زاویه پیچش بر انتقال حرارت را بررسی کردند، آن‌ها دریافتند از بین سیم‌پیچ‌هایی با زاویه پیچش ۳۰، ۴۵، ۶۰ و ۷۰ درجه و با $e/d = 0.8$ سیم‌پیچ‌های با زاویه پیچش ۶۰ و ۷۰ بهترین عملکرد را دارند، آن‌ها هم‌چنین گزارش کردند که تأثیر e/d بر انتقال حرارت ناچیز است. گارسیا و همکاران [۳] در کار تجربی خود که گستره وسیعی از عدد رینولدز (۹۰۰۰-۸۰) را پوشش دادند، با استفاده از ۶ سیم‌پیچ به بررسی افزایش انتقال حرارت در جریان‌های آرام، گذرا و مغشوش پرداختند. این مطالعه بیان داشت، گذار به جریان مغشوش به صورت تدریجی و در $Re \approx 700$ رخ داد. به‌علاوه، اعلام داشتند که پراتنل در جریان مغشوش اثری بر افزایش انتقال حرارت با استفاده از سیم‌پیچ ندارد، ولی برعکس در ناحیه گذار، پراتنل‌های بالاتر موجب افزایش بیشتر در انتقال حرارت گشتند. آن‌ها در جریان مغشوش دو رابطه تجربی نیز برای انتقال حرارت و ضریب اصطکاک به‌ترتیب برای اعداد رینولدز بالاتر از ۱۷۰۰ و ۲۰۰۰ ارائه کردند. پرومونتگ [۱۸] به بررسی تجربی استفاده هم‌زمان از سیم‌پیچ و نوار پیچیده‌شده برای مغشوش کردن جریان پرداخت، کاری که قبلاً کمتر انجام شده بود. او متوجه شد استفاده هم‌زمان از سیم‌پیچ و نوار پیچیده‌شده سبب افزایش افت فشار زیادی می‌شود که البته با افزایش قابل ملاحظه انتقال حرارت از ۳ تا ۶ برابر در محدوده اعداد رینولدز ۱۸۰۰-۳۰۰۰ همراه بود.

اخیراً سعیدی‌نیا و همکاران [۲۰] به بررسی افزایش انتقال حرارت جریان نانوسیال با استفاده از سیم‌پیچ پرداخته‌اند. سیال آزمایش آن‌ها روغن پایه-نانوذرات اکسید مس بود، آزمایش‌های آن‌ها در جریان کاملاً آرام و در اعداد رینولدز کمتر از ۱۲۰ انجام گرفت. به وضوح در نتایج آن‌ها مشاهده شد که برای یک غلظت مشخص از نانوسیال، استفاده از سیم‌پیچ موجب افزایش انتقال حرارت و هم‌چنین افزایش در افت فشار می‌شود. هم‌چنین

جدول ۱: گستره داده‌های تجربی ارائه شده در کارهای قبلی

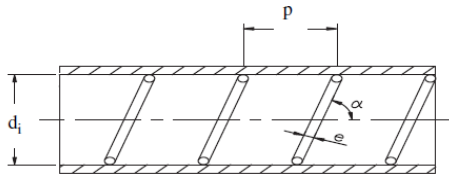
محققان	N_{wire}	p/d	e/d	p/e	d (mm)	$Re \times 10^{-3}$	سیال آزمایش (Pr)
ستومادهوان و راجا راو [۱۵]	۸	۰/۴۰ - ۰/۶۴	۰/۰۸ - ۰/۱۲	۳/۳ - ۳۳/۰	۲۵/۰	۴/۰ - ۱۰۰	آب - گلیسرین (۳۲ - ۵/۲)
اوتاروار و راجا راو [۱۶]	۷	۰/۴۰ - ۰/۶۲	۰/۰۸ - ۰/۱۳	۵/۰ - ۲۳/۰	۲۵/۲	۰/۳ - ۰/۷	روغن (۶۷۵ - ۳۰۰)
اینابا و همکاران [۸]	۱۹	۰/۳۰ - ۰/۵۰	۰/۱۲ - ۰/۱۹	۱/۶ - ۵۲/۰	۱۶	۰/۲ - ۶/۰	آب (۸/۲ - ۳/۹)
گارسیا و همکاران [۳]	۶	۱/۱۷ - ۲/۶۸	۰/۰۷۴ - ۰/۱۰۱	۱۳/۹ - ۳۳/۳	۱۸/۰	۰/۰۸ - ۹۰	آب - گلیکول (۱۵۰ - ۲/۸)
گارسیا و همکاران [۱۷]	۳	۱/۲۵ - ۳/۳۷	۰/۰۷۶	۱۶/۴ - ۴۴/۳	۱۸/۰	۰/۱ - ۲/۵	آب - گلیکول (۷۰۰ - ۲۰۰)
پونگژت پرومونتگ [۱۸]	۳	۴ - ۸	۰/۱۰۶	۳۷/۶ - ۷۵/۲	۴۷/۰	۳/۰ - ۱۸/۰	هوا (۰/۷)
اخوان بهابادی و همکاران [۱۹]	۷	۰/۴۶ - ۲/۶۵	۰/۰۷۷ - ۰/۱۳۴	۶/۰ - ۳۲/۵	۲۶/۰	۰/۰۱ - ۱/۵	روغن موتور (۳۰۰ - ۱۲۰)

برای لوله صاف در شکل (۲) نشان داده شده است. در این شکل نتایج تئوری با یک خط صاف به نمایش درآمده است. از این شکل تطابق خوب داده‌های تجربی و تئوری مشهود است و حداکثر خطا بین ۳٪ تا ۱۰٪ گزارش شد. البته در جریان آرام تا حدود عدد رینولدز ۲۰۰۰ حداکثر خطای مشاهده شده ۵٪ بوده است و از این عدد رینولدز به بعد کمی جهش در مقادیر تجربی نسبت به تئوری مشاهده می‌شود که دلیل آن می‌تواند بروز سریع‌تر از حد معمول اغتشاش‌ها باشد. همان‌طور که قبلاً اشاره شد این نتایج مبنای صحت دستگاه آزمایش و هم‌چنین مقایسه‌ی نتایج لوله صاف با لوله دارای سیم‌پیچ خواهد بود.



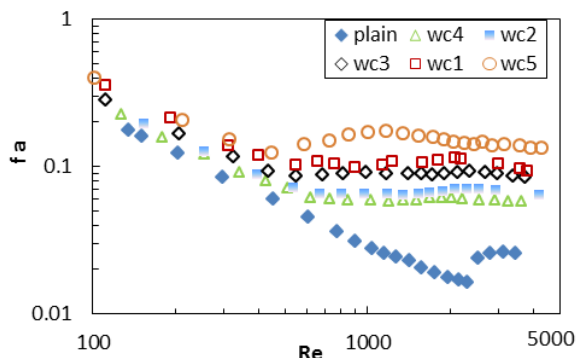
شکل ۲: مقایسه ضریب اصطکاک تئوری با داده‌های آزمایش برای لوله صاف بر حسب عدد رینولدز

بعد از انجام آزمایش در لوله صاف، ۵ سیم‌پیچ به ترتیب درون همان لوله قرار گرفت و آزمایش‌ها ادامه یافت. شکل (۳) طرح هندسی یک سیم‌پیچ داخل لوله را نشان می‌دهد، که در آن p گام سیم‌پیچ، e قطر سیم و d_i قطر داخلی لوله می‌باشد. سیم‌پیچ‌های استفاده شده در این آزمایش از جنس فولاد کربنی بودند که مشخصات آن‌ها در جدول (۲) آمده است.



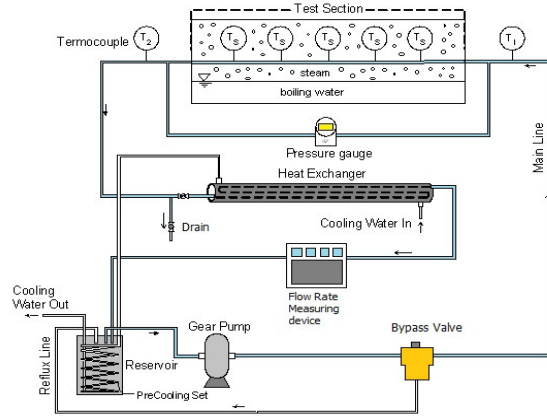
شکل ۳: طرح هندسی یک سیم‌پیچ درون لوله صاف

نتایج ضریب اصطکاک لوله صاف به همراه سیم‌پیچ‌ها که از رابطه (۱) به دست آمده‌اند، در شکل (۴) مشاهده می‌شوند که بر حسب عدد رینولدز رسم شده‌اند. همان‌طور که انتظار می‌رفت در ناحیه آرام با افزایش عدد رینولدز ضریب اصطکاک برای تمامی سیم‌پیچ‌ها کاهش یافت.



شکل ۴: نتایج ضریب اصطکاک لوله صاف و سیم‌پیچ‌ها بر حسب عدد رینولدز

دبی جریان به واحد اندازه‌گیری دبی هدایت شده و در انتها وارد مخزن می‌شد. در این قسمت خنک‌سازی ثانویه توسط کوئل مسی، که آب خارج شده از مبدل وارد آن می‌شد، انجام شده و پس از پمپ کردن و تنظیم دبی توسط شیر بای‌پس، مجدداً به بخش آزمایش وارد می‌شد.



شکل ۱: طرح شماتیک سیستم آزمایشی

نتایج افت فشار

آزمایش‌های افت فشار در ناحیه کاملاً توسعه یافته از نظر هیدرودینامیکی ابتدا برای لوله صاف انجام شد و ضریب اصطکاک آن محاسبه شد که نتایج آن مبنای صحت دستگاه آزمایش قرار گرفت. سپس آزمایش‌ها با قرار دادن سیم‌پیچ درون لوله ادامه یافت.

به منظور محاسبه ضریب انتقال حرارت جابجایی و ضریب اصطکاک، خواص ترموفیزیکی و رئولوژیکی سیال مورد استفاده (اعم از چگالی، لزجت، هدایت حرارتی و گرمای ویژه) به صورت تجربی در دماهای مختلف اندازه‌گیری شده است. اندازه‌ی این خواص به طور مستقیم در محاسبه‌ی اعداد رینولدز، ضریب اصطکاک و ضریب انتقال حرارت جابجایی در هر آزمایش با توجه به دمای متوسط سیال، مورد استفاده قرار گرفته است.

برای محاسبه ضریب اصطکاک تجربی، رابطه (۱) به کار گرفته شد.

$$f = \frac{\Delta P d_i^5 \pi^2 \rho}{8 l_p m^2} \quad (1)$$

به منظور اندازه‌گیری میزان افت فشار از دو انتهای لوله (مقطع مورد آزمایش، $l_p = 1/5$) دو خروجی به صورت عمود بر لوله به دو ترمینال فشار سنج دیفرانسیلی مربوط می‌شود که در شکل (۱) نشان داده شده است. قطر بکار رفته در این رابطه برای تمامی سیم‌پیچ‌ها همان قطر داخلی لوله صاف می‌باشد، ولی برای محاسبه عدد رینولدز باید از قطر هیدرولیکی استفاده کنیم. برای مقایسه نتایج تجربی ضریب اصطکاک با مقادیر تئوری در جریان آرام از رابطه $f = 64/Re$ و در جریان مغشوش از رابطه بلایزیوس $f = 0.316/Re^{0.25}$ استفاده شد. اما برای سیالاتی که تغییرات ویسکوزیته آنها با دما زیاد است، باید یک ضریب تصحیح برای تغییرات ویسکوزیته در روی مقطع جریان به صورت زیر در نظر گرفته شود [۲۱].

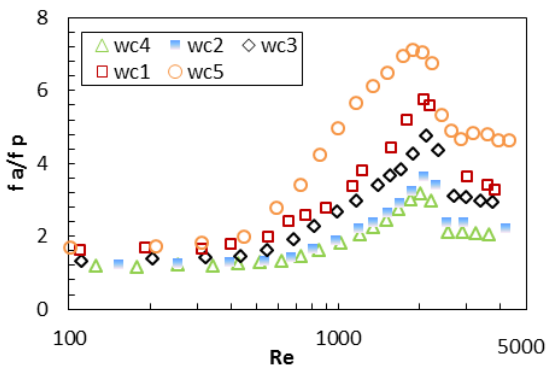
$$f = \frac{64}{Re} \left(\frac{\mu_s}{\mu_m} \right)^{0.58} \quad (2)$$

$$f = \frac{0.316}{Re^{0.25}} \left(\frac{\mu_s}{\mu_m} \right)^{0.58} \quad (3)$$

با این توضیحات نمودار مقایسه‌ای نتایج تجربی و تئوری ضریب اصطکاک

جدول ۲: مشخصات هندسی سیم‌پیچ‌ها

شماره سیم‌پیچ	d (mm)	d _h (mm)	p	e	p/d	e/d	p/e
لوله صاف	۱۴.۵	۱۴.۵	-	-	-	-	-
WC1	۱۴.۵	۱۲.۱۷	۳۱	۱.۴	۲.۱۴	۰.۰۹۶۶	۲۲.۰۱۴
WC2	۱۴.۵	۱۲.۷	۲۸	۱	۱.۹۳	۰.۰۶۹	۲۸
WC3	۱۴.۵	۱۲.۴۴	۲۳	۱	۱.۵۹	۰.۰۶۹	۲۳
WC4	۱۴.۵	۱۲.۷۶	۴۰.۵	۱.۲	۲.۷۹	۰.۰۸۲۸	۳۳.۷۵
WC5	۱۴.۵	۱۱.۴	۱۶.۳	۱.۲	۱.۱۲	۰.۰۸۲۸	۱۳.۵۸



شکل ۵: نسبت افزایش ضریب اصطکاک سیم‌پیچ‌ها به لوله صاف بر حسب عدد رینولدز

محدوده اعداد رینولدز و پراوتل آزمایش به ترتیب ۱۰۰-۴۳۰ و ۴۳۰-۱۵۰ بود. برای بررسی تأثیرات عدد پراوتل بر میزان انتقال حرارت دمای میانگین سیال از ۴۱ C تا ۷۱ C تغییر کرد. آزمایش‌ها در لوله صاف در رژیم جریان آرام و رینولدزهای پایین جریان مغشوش انجام شد. در تمامی طول لوله جریان از نظر هیدروپدینامیکی کاملاً توسعه یافته بود و از نظر حرارتی نیز برای جریان آرام در طول ورودی قرار داشتیم. برای بدست آوردن ضریب انتقال حرارت در این حالت، از رابطه زیر استفاده می‌کنیم:

$$h = \frac{m c_p (T_{out} - T_{in})}{\pi d_i l_h \Delta T_{LMTD}} \quad (۴)$$

که ΔT_{LMTD} اختلاف دمای میانگین لگاریتمی سیال می‌باشد. طول بخش آزمایش برای ضریب انتقال حرارت به میزان ۱/۲ متر می‌باشد و برای محاسبه عدد ناسلت نیز از رابطه زیر استفاده می‌گردد:

$$Nu = \frac{hd}{k} \quad (۵)$$

برای مقایسه نتایج تجربی با تئوری و ارزیابی حرارتی دستگاه آزمایش، داده‌های بدست آمده از آزمایش در جریان آرام با رابطه (۶)، که مقدار ناسلت میانگین جریان آرام در ناحیه ورودی برای شرایط دمای دیواره ثابت می‌باشد [۲۲]، مقایسه شدند. نتایج عدد ناسلت جریان مغشوش نیز با رابطه (۷) که توسط گنیلنسکی [۲۳] ارائه شده بود، مقایسه شدند. در رابطه‌های (۶) و (۷) عبارت $(\mu_s / \mu_m)^{-0.14}$ بدلیل اثرات تغییر لزجت بواسطه تغییرات دما در مقطع جریان اعمال شد [۲۱].

$$Nu_m = \frac{1}{2x^+} \ln \left(\frac{1}{8 \sum_{n=0}^{\infty} (G_n / \lambda_n^2) \exp(-\lambda_n^2 x^+)} \right) \left(\frac{\mu_s}{\mu_m} \right)^{-0.14} \quad (۶)$$

که ثابت‌ها و مقادیر مشخصه این سری توسط سلارز و همکاران [۲۴] ارائه

در شکل (۴) ناحیه‌ای که گذار از جریان آرام در آن آغاز می‌شود را می‌توان در جایی که روند تغییرات ضریب اصطکاک با عدد رینولدز تغییر می‌کند، مشاهده کرد. که البته این گذار برخلاف لوله‌های صاف به صورت تدریجی است، گارسیا و همکاران [۱۷] این رفتار را در نتیجه سرعت چرخشی ایجاد شده توسط سیم‌پیچ اعلام کردند.

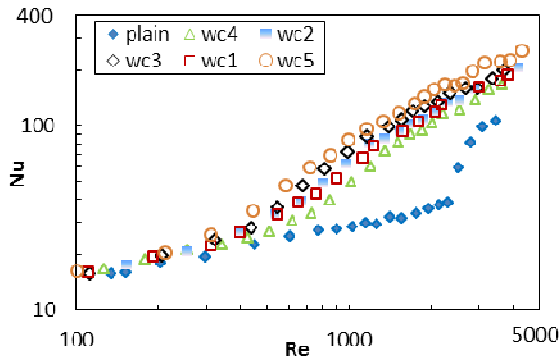
گستره جریان کاملاً آرام برای سیم‌پیچ‌ها بستگی به هندسه‌ی آنان دارد، به طوری که برای سیم‌پیچ (۴) تا حدود عدد رینولدز ۶۰۰ رژیم جریان کاملاً آرام است ولی برای سیم‌پیچ (۵) فقط تا عدد رینولدز ۳۵۰ جریان کاملاً آرام می‌باشد. برای سیم‌پیچ‌های ۱ تا ۳ نیز این محدوده به ترتیب تا اعداد رینولدز ۴۰۰، ۵۵۰ و ۴۵۰ است. با توجه به جدول (۲) می‌توان به این نتیجه رسید که برای فنرهای با p/e بزرگ‌تر، ناحیه آرام گسترده‌تری خواهیم داشت. با افزایش عدد رینولدز و آغاز ناحیه گذار در لوله با سیم‌پیچ مشاهده می‌شود که تا عدد رینولدز ۲۰۰۰ ضریب اصطکاک یا ثابت می‌ماند و یا کمی افزایش می‌یابد، از این عدد رینولدز به بعد دوباره ضریب اصطکاک با افزایش عدد رینولدز کاهش می‌یابد.

همچنین در شکل (۴) مشاهده می‌شود که سیم‌پیچ‌های با قطر هیدرولیکی کمتر ضریب اصطکاک بالاتری دارند، که این نکته در کارهای اوتاروار و راجا راو [۱۶] و گارسیا و همکاران [۳] نیز اشاره شده بود.

در شکل (۵) نسبت افزایش ضریب اصطکاک سیم‌پیچ‌ها به لوله صاف بر حسب عدد رینولدز آمده است. در این شکل مشاهده می‌شود که در جریان آرام این نسبت بین ۱/۱۸ تا ۱/۸۰ می‌باشد ولی در حدود عدد رینولدز ۱۹۰۰ که آغاز ناحیه گذار لوله صاف می‌باشد این نسبت برای سیم‌پیچ (۵) به ۷/۱۰ می‌رسد و از این ناحیه به بعد مشاهده می‌شود که با افزایش عدد رینولدز این نسبت روندی کاهشی دارد که در تقابل با یافته‌ی گارسیا و همکاران [۳] می‌باشد که در کار خود فقط روند افزایشی اعلام کرده بودند. برای تمامی سیم‌پیچ‌ها با افزایش عدد رینولدز این نسبت افزایش می‌یابد، ولی این افزایش در ناحیه آرام ناچیز است، برای مثال برای سیم‌پیچ (۴) این نسبت در اعداد رینولدز ۱۲۶ و ۶۲۰ به ترتیب برابر با ۱/۱۸ و ۱/۳۱ است. در ناحیه‌ای که جریان در لوله صاف هنوز آرام است ولی برای لوله با سیم‌پیچ گذار به جریان مغشوش آغاز شده است، این افزایش روند سریع‌تری به خود می‌گیرد و برای همان سیم‌پیچ (۴) مقدار این نسبت از ۱/۳۱ در رینولدز ۶۲۰ به ۳/۱۸ در رینولدز ۲۰۲۵ می‌رسد.

نتایج انتقال حرارت

هدف از انجام آزمایش‌ها در این قسمت بدست آوردن ضریب انتقال حرارت و عدد ناسلت میانگین جریان روغن انتقال حرارت HT-B در لوله صاف با و بدون سیم‌پیچ می‌باشد. آزمایش‌های انتقال حرارت تحت شرایط دمای دیواره ثابت ابتدا در لوله صاف انجام گرفت و سپس با جاسازی ۵ سیم‌پیچ در همان لوله، آزمایش‌ها ادامه یافت. همان‌طور که قبلاً نیز اشاره شد،



شکل ۷: تغییرات عدد ناسلت برای سیم‌پیچ‌های ۱-۵ به همراه لوله صاف بر حسب عدد رینولدز

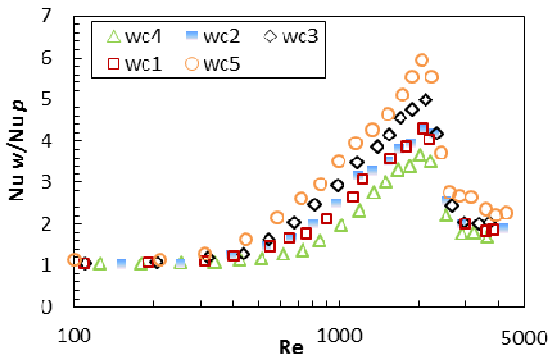
برخلاف لوله صاف به صورت تدریجی و آهسته صورت گرفت. در این ناحیه سیم‌پیچ با ایجاد آشفتنگی در جریان باعث افزایش انتقال حرارت در لوله گردید.

همان‌طور که قبلاً اشاره شد، محدوده ناحیه گذار برای سیم‌پیچ‌ها بستگی به هندسه آنان دارد، از همین‌رو در جدول (۴) این محدوده‌ها برای هر سیم‌پیچ به نمایش درآمده است.

جدول ۴: محدوده ناحیه گذار برای سیم‌پیچ‌های ۱-۵

سیم‌پیچ	Re _{min}	Re _{max}
wc1	۳۷۵	۱۲۰۰
wc2	۳۵۰	۱۱۵۰
wc3	۳۰۰	۱۰۵۰
wc4	۴۸۰	۱۳۰۰
wc5	۲۳۰	۹۰۰

و بالاخره ناحیه سوم، ناحیه کاملاً مغشوش می‌باشد که از عدد رینولدز تقریباً ۱۱۰۰ به بعد آغاز می‌شود، که مقدار دقیق‌تر آن برای هر سیم‌پیچ کران بالایی عدد رینولدز در جدول (۴) می‌باشد. افزایش عدد ناسلت با تقسیم عدد ناسلت سیم‌پیچ (Nu_w) به عدد ناسلت لوله صاف (Nu_p) در همان عدد رینولدز و عدد پراوتل تعریف می‌شود، شکل (۸) این افزایش عدد ناسلت را برحسب عدد رینولدز نشان می‌دهد.



شکل ۸: نسبت افزایش عدد ناسلت سیم‌پیچ‌ها به لوله صاف بر حسب عدد رینولدز

در شکل (۸) مشاهده می‌شود که در ناحیه آرام سیم‌پیچ افزایش قابل ملاحظه‌ای در ناسلت ایجاد نمی‌کند و تفاوت چندانی نیز مابین سیم‌پیچ‌ها از لحاظ افزایش انتقال حرارت مشاهده نشد و حداکثر افزایش در این ناحیه حدود ۲۵٪ می‌باشد، که البته این یافته در دو تحقیق اینابا و همکاران [۸]

شده است که در جدول (۳) نشان داده شده‌اند.

جدول ۳: ثابت‌ها و مقادیر ویژه حل سری بی‌نهایت برای لوله دایروی در طول

ورودی برای شرایط دمایی دیواره ثابت

G_n	λ_n	n
۰.۷۴۹	۷.۳۱۳	۰
۰.۵۴۴	۴۴.۶۱	۱
۰.۴۶۳	۱۱۳.۹	۲
۰.۴۱۵	۲۱۵.۲	۳
۰.۳۸۳	۳۴۸.۶	۴

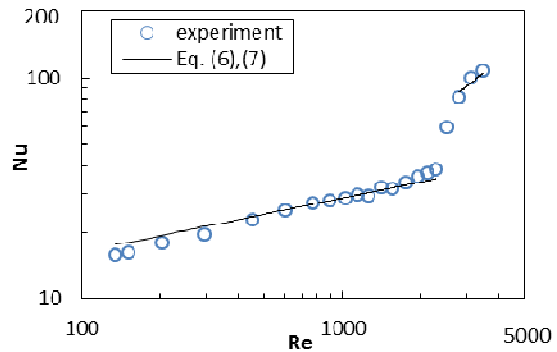
$$G_n = 1.01276 \lambda_n^{-1/3}; \lambda_n = 4n + \frac{8}{3}, n > 2 \text{ برای}$$

رابطه‌ای که گتیلنسکی برای مایعات ارائه داده بود و برای هر دو شرط مرزی دمایی دیواره ثابت و شار ثابت می‌تواند بکار رود، به صورت زیر می‌باشد.

$$Nu = 0.012(Re^{0.87} - 280) Pr^{0.4} \quad (7)$$

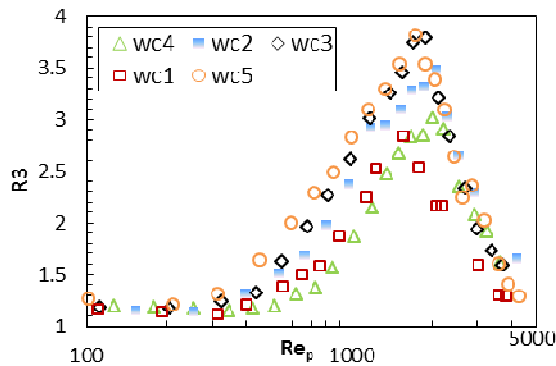
که البته این رابطه نیز با ضریب $(\mu_s / \mu_m)^{-0.14}$ باید اصلاح شود.

شکل (۶) عدد ناسلت تجربی روغن انتقال حرارت در لوله صاف را برحسب عدد رینولدز در مقایسه با روابط (۶) و (۷) نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که داده‌های آزمایش تطابق خوبی با رابطه تئوری دارند و حداکثر خطا بین ۱۰٪ تا ۱۳٪ می‌باشد، که از این میان تنها ۹/۵٪ از داده‌های تجربی بیش از ۱۰٪ از مقدار تئوری انحراف دارند.



شکل ۶: مقایسه بین عدد ناسلت تجربی با مقادیر تئوری بدست آمده از رابطه (۶) و رابطه گتیلنسکی (۷) برای لوله صاف بر حسب عدد رینولدز

بعد از این آزمایش مینا و ارزیابی حرارتی دستگاه آزمایش، داده‌برداری برای ۵ سیم‌پیچ دیگر که مشخصات آن‌ها در جدول (۲) آمده است، انجام شد. در شکل (۷) نتایج عدد ناسلت جریان روغن انتقال حرارت در لوله با این سیم‌پیچ‌ها به همراه نتایج لوله صاف مشاهده می‌شوند. برای سیم‌پیچ‌ها می‌توان سه ناحیه را در نظر گرفت. ناحیه اول جریان کاملاً آرام می‌باشد، در این ناحیه تغییرات عدد ناسلت سیم‌پیچ همانند لوله صاف می‌باشد و فقط کمی از آن بیشتر است. از آن جایی که عدد ناسلت در این ناحیه تحت تأثیر طول ورودی است می‌توان آن را با معادله (۶) مقایسه کرد. محدوده این ناحیه بستگی به هندسه سیم‌پیچ دارد و بیشتر متأثر از گام سیم‌پیچ می‌باشد که هر چه گام بیشتر باشد این محدوده وسعت بیشتری خواهد داشت. برای نمونه برای سیم‌پیچ (۴) که گام آن برابر ۴۰/۵ mm بود تا حدود رینولدز ۴۵۰ جریان آرام بود و برای سیم‌پیچ (۵) که گام آن ۱۶/۳ mm بود این ناحیه فقط تا رینولدز ۲۳۰ ادامه داشت. ناحیه دوم ناحیه گذار از جریان کاملاً آرام به جریان کاملاً مغشوش بود، برای سیم‌پیچ‌ها



شکل ۹: معیار ارزیابی عملکرد $R3$ سیم‌پیچ‌های ۱-۵ بر حسب عدد رینولدز معادل لوله صاف Re_p

انتقال حرارت مشاهده کردیم و مقدار $R3$ با افزایش عدد رینولدز، رشد قابل ملاحظه‌ای دارد و برای سیم‌پیچ (۳) از $1/3$ در عدد رینولدز 430 به $3/8$ در عدد رینولدز 1900 می‌رسد. با فراتر رفتن عدد رینولدز از این ناحیه و مغشوش شدن جریان در لوله صاف این معیار رو به کاهش می‌گردد و برای همین سیم‌پیچ در عدد رینولدز 3700 به $1/6$ می‌رسد.

نتیجه‌گیری

عملکرد تجربی انتقال حرارت جابجایی و افت فشار جریان آرام و اعداد رینولدز پایین جریان مغشوش روغن انتقال حرارت در لوله صاف با و بدون سیم‌پیچ با شرایط دمایی دایره ثابت در محدوده اعداد رینولدز 100 تا 4300 و اعداد پراکتل 150 تا 430 مورد مطالعه قرار گرفت و نتایج زیر حاصل شد:

۱. ضریب اصطکاک تجربی لوله صاف تنها 3% تا 10% انحراف از روابط (۲) و (۳) که ضریب اصطکاک را در جریان‌های آرام و مغشوش پیش‌بینی می‌کردند، از خود نشان داد. هم‌چنین نتایج تجربی ضریب انتقال حرارت حداکثر 13% انحراف را از روابط (۶) و (۷) نشان داد.
۲. با افزایش عدد رینولدز تا زمانی که جریان آرام حکمفرما بود، ضریب اصطکاک همانند لوله صاف برای تمامی سیم‌پیچ‌ها کاهش یافت. در حدود عدد رینولدز 500 این روند تغییر کرد و بسته به هندسه سیم‌پیچ در عددی ثابت ماند که بیان‌گر ناحیه گذار از جریان آرام به مغشوش می‌باشد، که برخلاف لوله صاف این گذار به صورت تدریجی اتفاق می‌افتد. سپس از حدود عدد رینولدز 2000 به بعد که جریان در سیم‌پیچ کاملاً مغشوش گشته است، دوباره ضریب اصطکاک روندی نزولی پیش می‌گیرد. بیشترین افزایش در ضریب اصطکاک در ناحیه گذار مشاهده شد و برای سیم‌پیچ (۵) به $7/1$ برابر لوله صاف در عدد رینولدز 1900 رسید.
۳. روند تغییرات ناسلت سیم‌پیچ در اعداد رینولدز پایین همانند لوله صاف بود و سیم‌پیچ به سختی افزایشی در ضریب انتقال حرارت ایجاد نمود. ولی با آغاز ناحیه گذار سیم‌پیچ باعث افزایش قابل ملاحظه‌ای در ضریب انتقال حرارت گردید، این افزایش بیشتر وابسته به نسبت هندسی گام سیم‌پیچ به قطر لوله بود و برای سیم‌پیچ (۵) که از بیشترین مقدار این نسبت بهره می‌برد، در عدد رینولدز 2070 به $5/9$ برابر میزان انتقال حرارت لوله صاف رسید. با عبور عدد رینولدز از محدوده 2000 و با شروع اغتشاشات در لوله صاف میزان

و نیز گارسیا و همکاران [۳] مشاهده شده بود، که البته گارسیا و همکاران اثرات نیروهای شناوری را نیز بر عدد ناسلت در نظر گرفته بودند. در کار اخوان و همکاران [۱۹] که نتایج خود را با مدل اصلاح شده رابطه سیدر-تیت [۲۵] مقایسه کرده بودند، این افزایش کمی بیشتر بود. در شکل (۸) ملاحظه می‌شود که بیشترین افزایش در عدد ناسلت در حدود اعداد رینولدز 400 تا 2200 صورت می‌گیرد، در جایی که رژیم جریان در لوله صاف آرام است در حالی که درون لوله با سیم‌پیچ به دلیل اغتشاشات و زبری که فنر ایجاد کرده رژیم جریان از آرام به مغشوش در حال گذار است و یا کاملاً مغشوش گشته است. در حدود عدد رینولدز 300 مشاهده می‌شود که روند افزایش ناسلت نسبت به اعداد رینولدز پایین‌تر تغییر می‌کند که مشخص کننده ناحیه گذار از آرام به مغشوش می‌باشد. در حالی که حداکثر افزایش در ناحیه آرام حدود 25% مشاهده شده بود، در ناحیه گذار و در عدد رینولدز حدود 900 افزایش ناسلت سیم‌پیچ (۵) به 3 برابر ناسلت لوله صاف در همان عدد رینولدز رسید. این روند صعودی در افزایش ناسلت سیم‌پیچ در ناحیه‌ای که رژیم جریان سیم‌پیچ مغشوش شده است نیز تا به حدود عدد رینولدز 2200 ادامه می‌یابد و از آن عدد رینولدز به بعد چون رژیم جریان در لوله صاف نیز مغشوش گشته است، این روند نزولی می‌گردد. برای نمونه سیم‌پیچ (۵) در عدد رینولدز 2100 افزایشی 6 برابری را در انتقال حرارت در مقایسه با لوله صاف نشان می‌دهد ولی با افزایش رینولدز دیگر این نسبت نه تنها افزایش نمی‌یابد بلکه کاهش نیز می‌یابد و برای همین سیم‌پیچ در رینولدز 4000 به $2/2$ برابری لوله صاف می‌رسد.

ارزیابی عملکرد

داده‌های آزمایش نشان داد که استفاده از سیم‌پیچ باعث افزایش انتقال حرارت می‌شود ولی از طرفی باعث افزایش ضریب اصطکاک و افت فشار جریان نیز می‌گردد، بنابراین بهتر است افزایش ضریب انتقال حرارت و افزایش افت فشار همزمان ارزیابی شوند. برگلز و همکاران [۲۶] چند معیار برای ارزیابی عملکرد تجهیزات افزایشنده انتقال حرارت ارائه کرده‌اند که از آن جمله می‌توان به معیار $R3$ که در این مطالعه از آن استفاده شده است، اشاره کرد. معیار $R3$ به صورت $R3 = Nu_w / Nu_p$ تعریف می‌شود، که در آن Nu_w بیان‌گر عدد ناسلت سیم‌پیچ می‌باشد و Nu_p نیز عدد ناسلت لوله صاف برای یک توان پمپاژ و سطح انتقال حرارت یکسان را مشخص می‌کند. در سیم‌پیچ $A_w = A_p$ می‌باشد و برای این که قید توان پمپاژ یکسان ارضا شود، بایستی Nu_p را در یک عدد رینولدز معادل (Re_p) که با استفاده از رابطه (۸) بدست می‌آید، محاسبه کرد.

$$f_w Re_w^3 = f_p Re_p^3 \quad (8)$$

در شکل (۹) تغییرات معیار ارزیابی عملکرد $R3$ برای سیم‌پیچ‌های ۱-۵ بر حسب عدد رینولدز معادل لوله صاف Re_p نشان داده شده است. برای تمامی اعداد رینولدز مورد بررسی ($Re = 100 - 4300$) این معیار بزرگ‌تر از یک می‌باشد.

مشاهده می‌شود که سیم‌پیچ‌های با قطر سیم کمتر و گام کوتاه‌تر از عملکرد بهتری برخوردارند، این حقیقت با یافته اخوان و همکاران [۱۹] تطابق دارد. ولی از طرفی با مشاهدات گارسیا و همکاران [۳] تفاوت دارد، آن‌ها مشاهده کردند که سیم‌پیچ‌های مختلف عملکرد تقریباً یکسانی داشته‌اند. در جریان آرام تا حدود عدد رینولدز 400 ، که رژیم جریان در سیم‌پیچ هنوز آرام است، حداکثر مقدار $R3$ به $1/4$ می‌رسد، یعنی 40% افزایش انتقال حرارت با توان پمپاژ یکسان. هنگامی که رژیم جریان درون سیم‌پیچ از آرام به مغشوش در حال گذار است، بیشترین افزایش را در

مراجع

- Bergles, A.E., 1985. *Techniques to augment heat transfer, Handbook of Heat Transfer Applications, second ed.*. Mc-Graw Hill, New York, Chapter 1.
- Webb, R.L., Kim, N.H., 2005. *Principles of Enhanced Heat Transfer, second ed.*. Taylor & Francis Group, New York,
- Garcia, A., Vicente, P.G., Viedma, A., 2005. "Experimental study of heat transfer enhancement with wire coil inserts in laminar-transition-turbulent regimes at different Prandtl number". *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 48, pp. 4640-4651.
- Sams, E.W., 1957. *Heat transfer and pressure drop characteristics of wire coil type turbulence promoters*. TID-7529 Part 1, Book 2, pp. 390-415.
- Kumar, P. and Judd, R. L., 1970. "Heat transfer with coiled wire turbulence promoters". *Canadian J. Chem. Engng.*, Vol. 48, pp. 378-383.
- Oliver, D.R., Shoji, Y., 1992. "Heat transfer enhancement in a round tubes using different tube inserts: non-newtonian fluids". *J. Chem. Engng. Res. and Des.* Vol. 70, pp. 558-564.
- Arici, M. E., Asan, H., 1994. "Enhancement of turbulent flow heat transfer in tubes by means of wire coil inserts". *ASME PD Adv. in Heat Transfer*, Vol. 64, pp. 113-117.
- Inaba, H., Ozaki, K., Kanakoa, S., 1994. "A fundamental study of heat transfer enhancement and flow-drag reduction in tubes by means of wire coil insert". *Nippon Kikai Gakkai Ronbunshu, Trans. Jpn. Soc. Mech. Eng.*, Vol. 60, pp. 240-247.
- Agrawal, K.N., Kumar, A., Behabadi, M.A.A., Varma H.K., 1998. "Heat transfer augmentation by coiled wire insert during forced convection condensation of R-22 inside horizontal tubes". *Int Multiphase Flow*, Vol. 24(4), pp. 635-50.
- Kim, H.Y., Koyama, S., Matsumoto, W., 2001. "Flow pattern and flow characteristics for counter current two-phase flow in a vertical round tube with wire-coil inserts". *Int JMultiphase Flow*, Vol. 27, pp. 2063-81.
- Inaba, H., Haruki, N., 2002. "Heat transfer enhancement of water flow in a straight pipe with drag reduction surfactant by using wire coil". *Trans. Jap. Soc. Mech. Engrs, Part B*, Vol. 68, pp. 481-488.
- Shoji, Y., Sato, K., Oliver, D.R., 2003. "Heat transfer enhancement in round tube using wire coil: influence of length and segmentation". *Heat Transfer—Asian Res*, Vol. 32 (2), pp. 99-107.
- Wang L, Sunden B., 2002. "Performance comparison of some tube inserts". *Int Comm Heat Mass Transfer*, Vol. 29(1), pp. 45-56.
- Dewan, A., Mahanta, P., Sumithra Raju, K., Suresh Kumar, P., 2004. "Review of passive heat transfer augmentation techniques". *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy*, pp. 218-509.
- Sethumadhavan, R., Raja Rao, M., 1983. "Turbulent flow heat transfer and fluid friction in

افزایش انتقال حرارت سیم‌پیچ به لوله صاف رو به کاهش گذاشت و برای همین سیم‌پیچ (۵) به مقدار ۲/۲ در عدد رینولدز ۴۰۰۰ رسید. ۴. بر طبق معیار ارزیابی عملکرد، که نسبت افزایش ناسلت سیم‌پیچ به لوله صاف در یک توان پمپاژ یکسان را مشخص می‌کند، تمامی سیم‌پیچ‌ها افزایش در انتقال حرارت را نشان دادند. در این میان سیم‌پیچ‌های (۳) و (۵) بالاترین افزایش را در انتقال حرارت نشان دادند و مقدار R3 در حوالی عدد رینولدز ۱۸۰۰ به ۳/۸ رسید که بیان‌گر ۲۸٪ افزایش در انتقال حرارت بود.

فهرست علائم

A	سطح مقطع، (m ²)
c _p	ظرفیت گرمایی ویژه، (J/kgK)
d	قطر لوله، (m)
e	قطر سیم، (m)
f	ضریب اصطکاک
G _n	مقدار ویژه
h	ضریب انتقال حرارت، (W/m ² K)
k	ضریب هدایت حرارتی، (W/mK)
l	طول لوله، (m)
\dot{m}	دبی جرمی، (kg/s)
Nu	عدد ناسلت
p	گام سیم‌پیچ، (m)
Pr	عدد پرانتل
Δp	افت فشار، (Pa)
R3	ضریب عملکرد
Re	عدد رینولدز
T	دما، (K)
x ⁺	طول بی‌بعد
علائم یونانی	
λ_n	مقدار ویژه
μ	ویسکوزیته دینامیکی، (Pa.s)
π	عدد پی
ρ	چگالی، (kg/m ³)
زیرنویس	
i	داخلی
in	ورودی
m	متوسط، بالک
out	خروجی
p	لوله صاف
s	سطح لوله
w	سیم‌پیچ

- M., 2012. "Experimental study on heat transfer and pressure drop of nanofluid flow in a horizontal coiled wire inserted tube under constant heat flux". *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 36, pp. 158–168.
21. Deissler, R.C., July 1951. NACA (now NASA) TN 2410, Washington,.
 22. W.M. Kays, M.E. Crawford, Bernhard Weigand, 2005. *Convective Heat and Mass Transfer*. fourth ed., McGraw Hill.
 23. Gnielinski, V., 1976. "Equations for heat and mass transfer in turbulent pipe and channel flow". *Int. Chem. Eng.*, Vol. 16, pp. 359–368.
 24. Sellars, J.R., Tribus, M., Klein, J. S., 1956. *Trans. ASME*, vol. 78, pp. 441-448.
 25. Sieder, E.N., Tate, E.G., 1936. "Heat transfer and pressure drop of liquids in tubes". *Ind. Eng. Chem.*, Vol. 28, pp. 1429.
 26. Bergles, A.E., Blumenkrantz, A.R., Taborek, J., 1974. "Performance evaluation criteria for enhanced heat transfer surfaces". *J. Heat Transfer*, Vol. 2, pp. 239–243.
 - helical-wire-coil inserted tubes". *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 26, pp. 1833–1845.
 16. Uttarwar, S.B., Raja Rao, M., 1985. "Augmentation of laminar flow heat transfer in tubes by means of wire coil inserts". *Trans. ASME*, Vol. 107, pp. 930–935.
 17. Garcia, A., Solano, J.P., Vicente, P.G., Viedma, A., 2007. "Enhancement of laminar and transitional flow heat transfer in tubes by means of wire coil inserts". *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 50, pp. 3176-3189.
 18. Promvong, P., 2008. "Thermal augmentation in circular tube with twisted tape and wire coil turbulators". *Energy Conversion and Management*, Vol. 49, pp. 2949–2955.
 19. Akhavan-Behabadi, M.A., Kumar, R., Salimpour, M.R., Azimi, R., 2010. "Pressure drop and heat transfer augmentation due to coiled wire inserts during laminar flow of oil inside a horizontal tube", *International Journal of Thermal Sciences*, Vol. 49, pp. 373–379.
 20. Saeedinia, M., Akhavan-Behabadi, M.A., Nasr,