

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشکده مهندسی مکانیک و مکاترونیک

گروه تبدیل انرژی

پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی تبدیل انرژی

بررسی آزمایشگاهی انتقال حرارت دوفازی در کویل مارپیچ

نگارنده: احسان علی نژاد ندافی

اساتید راهنما

دکتر محسن نظری

دکتر محمد محسن شاه مردان

اسفند ۱۴۰۰

در این صفحه صورت جلسه دفاع را قرار دهید. لازم است پس از صحافی این صفحه مجدداً توسط دانشکده مهر گردد و استاد راهنما با امضای خود اصلاحات پایان نامه را تأیید کند.

ماحصل آموخته ایم را تقدیم می کنم به

آنان که مهر آسمانی شان آرام بخش آلام زمینی ام است

به استوارترین تکیه گاهم، دستان پر مهر پدرم

به سبزترین نگاه زندگی ام، چشمان سبز مادرم

که هرچه آموختم در مکتب عشق شما آموختم و هرچه بگو شتم قطره ای از دریای بی کران مهربانی تان را پاس توانم بگویم.

امروز، مستی ام به امید شماست و فردا کلید باغ بهشت رضای شما

را آوردی کران سگ تر از این ارزان نداشتم تا به خاک پیاتان نثار کنم، باشد که حاصل تلاشم نسیم کوزه غبار محنتی تان را

بزدايد.

بوسه بر دستان پر مهر تان

شکر و قدردانی:

در اینجا لازم میدانم از اساتید بزرگوارم جناب آقای دکتر محسن نظری و جناب آقای دکتر محمد محسن شاه مردان برای

تمام حمایت ها و زحمات بی دریغشان سپاس گزاری کنم.

در پایان از کلیه دوستان خوبم که مراد رسیدن به اهدافم یاری نمودند مطالب زیادی را به من آموختند صمیمانه شکر کرده و

برایشان آرزوی موفقیت و سربلندی می نمایم.

تعمدنامه

اینجانب احسان علی‌نژاد ندافی دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی مکانیک دانشکده مهندسی مکانیک و مکاترونیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان‌نامه بررسی آزمایشگاهی انتقال حرارت دوفازی در کویل مارپیچ تحت راهنمایی دکتر محسن نظری و دکتر محمدمحسن شاه‌مردان متعهد می‌شوم.

- تحقیقات در این پایان‌نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است.
- در استفاده از نتایج پژوهش‌های محققان دیگر به مرجع مورداستفاده استناد شده است.
- مطالب مندرج در پایان‌نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است.
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می‌باشد و مقالات مستخرج بانام «دانشگاه صنعتی شاهرود» و یا «Shahrood University of Technology» به چاپ خواهد رسید.
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان‌نامه تأثیرگذار بوده‌اند در مقالات مستخرج از پایان‌نامه رعایت می‌گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان‌نامه، در مواردی که از موجود زنده (بافته‌های آن‌ها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.
- در کلیه مراحل انجام این پایان‌نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است.

تاریخ

امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج، کتاب، برنامه‌های رایانه‌ای، نرم‌افزارها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می‌باشد. این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود. استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان‌نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی‌باشد.

چکیده

کویل‌های مارپیچ یکی از پرکاربردترین مبدل‌ها در صنایع به شمار می‌روند. با توجه به ویژگی‌های مثبت استفاده از کویل‌های مارپیچ در مبدل‌های حرارتی از جمله: دربرگیری فضای کمتر و نیز انتقال حرارت بالاتر، از این روش تحقیقات زیادی در زمینه‌ی استفاده از انواع کویل‌های مارپیچ و نیز مدل‌سازی آن‌ها انجام شده است. در کویل مارپیچ به علت وجود شعاع انحنا، نیروی گریز از مرکز ایجاد خواهد شد که این نیرو سبب تشکیل جریان ثانویه در کویل می‌شود. از اثرات ایجاد جریان ثانویه در کویل‌های مارپیچ می‌توان به بهبود اختلاط جریان و همچنین افزایش ضریب انتقال حرارت در جریان‌های دوفازی و تک‌فازی اشاره کرد.

در این تحقیق، به مدل‌سازی مبدل حرارتی دوفازی و همچنین بررسی آزمایشگاهی انتقال حرارت جریان دوفازی (جوششی) سیال آب، در کویل مارپیچ موجود در مبدل حرارتی پرداخته شده است. به منظور رسیدن به این هدف، از یک کویل مارپیچ از جنس استیل ضدزنگ به قطر میانگین ۹۲ میلی‌متر و گام ۳۰ میلی‌متر استفاده شده است. علاوه بر این، جهت ایجاد توان حرارتی موردنیاز، یک عدد مشعل گازی از نوع PDG1 در ست‌آپ، استفاده شده است. در آزمایش‌های جریان جوششی، ضریب انتقال حرارت دوفازی و همچنین کیفیت بخار خروجی از کویل، تحت شرایط مختلف آزمایش، محاسبه می‌شود. همچنین در ادامه، به نمایش تغییرات دمای سطح داخلی و خارجی کویل و سیال عبوری پرداخته شده است. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد، با افزایش دبی حجمی از ۴۰۰ تا $(\frac{ml}{min})$ ۷۰۰، ضریب حرارت دوفازی دارای سیر صعودی از مقدار ۵۴۰۰ تا $(\frac{W}{m^2K})$ ۶۹۰۰، می‌باشد. با جدایش فازها در هر آزمایش و به دنبال آن اندازه‌گیری فاز مایع خروجی از کویل مارپیچ و همچنین محاسبه کیفیت بخار خروجی کویل در هر آزمایش، مشاهده شد با افزایش دبی حجمی سیال، کیفیت بخار خروجی دارای یک‌روند نزولی از مقدار ۰/۸ تا ۰/۴ می‌باشد. همچنین نتایج به دست آمده در این تحقیق نشان می‌دهد، میزان اثربخشی مبدل حرارتی، به‌طور میانگین ۶۴٪ می‌باشد.

کلید واژگان:

کویل مارپیچ، جریان دوفازی، ضریب انتقال حرارت، کیفیت بخار

فهرست مطالب

فصل اول: مقدمه	۱
۱-۱- ساختار پایان نامه	۲
۲-۱- مبدل حرارتی کویل مارپیچ	۳
۳-۱- مشخصه جریان در کویل مارپیچ:	۶
۴-۱- روش‌های بهبود انتقال حرارت:	۷
۵-۱- مقدمه‌ای بر جریان جوششی:	۹
۱-۵-۱- رژیم‌های جریان جوششی:	۹
۲-۵-۱- معرفی فرایند جوشش:	۱۲
فصل دوم: مروری بر کارهای گذشته	۱۵
۱-۲- پیشینه عملکرد و روش‌های بهبود انتقال حرارت در کویل مارپیچ	۱۶
۲-۲- مطالعات انجام‌شده در زمینه الگوی جریان در کویل مارپیچ	۱۷
۳-۲- مطالعات انجام‌شده در زمینه انتقال حرارت تک فازی در کویل مارپیچ	۱۷
۴-۲- پیشینه انتقال حرارت جریان دوفازی (جوششی)	۱۹
۵-۲- اهداف	۲۷
۶-۲- نوآوری	۲۷
فصل سوم: لوازم و تجهیزات آزمایشگاهی	۲۹
۱-۳- نحوه انجام آزمایش	۳۰
۲-۳- لوازم و تجهیزات مورد استفاده	۳۲
۱-۲-۳- مبدل حرارتی	۳۲
۲-۲-۳- کویل تست	۳۴

۳۴	۳-۲-۳- مشعل گازی
۳۵	۴-۲-۳- اتصالات
۳۶	۵-۲-۳- عایق حرارتی پشم سنگ
۳۷	۶-۲-۳- سنسور دما
۳۷	۱-۶-۲-۳- سنسور دمای سطح
۳۹	۲-۶-۲-۳- سنسور دمای سیال
۳۹	۷-۲-۳- پمپ
۴۰	۸-۲-۳- سنسور فشار
۴۱	۹-۲-۳- المنت حرارتی
۴۱	۱۰-۲-۳- پیش گرم کن
۴۲	۱۱-۲-۳- دستگاه ثبت داده‌ها (دما و فشار)
۴۵	فصل چهارم: نتایج
۴۶	۱-۴- آزمایش‌ها جریان دوفازی
۴۶	۱-۱-۴- روابط مورد استفاده در انتقال حرارت دوفازی
۴۸	۲-۱-۴- تشریح نتایج آزمایش‌ها انتقال حرارت دوفازی
۵۵	۳-۱-۴- محاسبه اثربخشی مبدل حرارتی
۵۶	۲-۴- اعتبارسنجی
۵۷	۳-۴- عدم قطعیت
۵۷	۱-۳-۴- اندازه‌گیری عدم قطعیت
۵۹	فصل پنجم: نتیجه‌گیری و پیشنهادها
۶۰	۱-۵- نتایج
۶۱	۲-۵- ارائه پیشنهادها برای تحقیقات آینده

۶۳	 فصل ششم: مراجع
۶۴	 مراجع
۷۳	 پیوست‌ها
۷۴	 پیوست الف: نتیجه آزمایش خواص آب
۷۵	 پیوست ب: نتیجه آزمایش خواص مکانیکی کویل
۷۵	 پیوست ج: روش‌های آماری
۷۵	 ۶-۱- تعاریف اصطلاحات
۷۶	 ۶-۲- خطاهای آزمایشگاهی
۷۶	 ۶-۳- تحلیل عدم قطعیت
۷۷	 ۶-۴- روش فاصله اطمینان

فهرست جداول

- جدول ۱-۲: مروری بر روابط موجود انتقال حرارت دوفازی در کوئل‌های مارپیچ ۲۵
- جدول ۱-۳: موقعیت مکانی نقاط سنسورها ۳۷
- جدول ۱-۴: دمای محصولات ورودی و خروجی مبدل حرارتی ۴۸
- جدول ۲-۴: نتایج آزمایش‌ها دوفازی ۵۴
- جدول ۳-۴: اثربخشی مبدل حرارتی ۵۶
- جدول ۴-۴: اعتبارسنجی نتایج ۵۷
- جدول ۵-۴: خطای اندازه‌گیری ۵۸
- جدول ۱-۶: تعیین ضریب تعمیم ۷۸

فهرست اشغال

- شکل ۱-۱: جریان ثانویه در کویل منحنی [۱] ۵
- شکل ۲-۱: کویل مارپیچ و جریان ثانویه در یک سطح مقطع [۴] ۶
- شکل ۳-۱: رژیم‌های رایج جریان [۵] ۱۰
- شکل ۴-۱: نقشه رژیم جریان هویت و رابرت [۶] ۱۱
- شکل ۵-۱: نقشه جریان گویر و عزیز [۷] ۱۲
- شکل ۶-۱: شماتیکی از فرآیند جریان جوششی در لوله صاف افقی [۸] ۱۳
- شکل ۳-۱: نمای کلی ست‌آپ ۳۲
- شکل ۳-۲: شماتیک مبدل حرارتی طراحی شده ۳۳
- شکل ۳-۳: نمای اصلی مبدل حرارتی ۳۳
- شکل ۳-۴: نمای ایزوترمیک کویل مارپیچ ۳۴
- شکل ۳-۵: مشعل گازی PDG1 ساخت شرکت ایران‌نوین ۳۵
- شکل ۳-۶: اتصالات پلی‌آمید ۳۶
- شکل ۳-۷: عایق حرارتی ۳۶
- شکل ۳-۸: زوایا و مبدا اندازه‌گیری محل سنسورها بر روی کویل مارپیچ طراحی شده ۳۸
- شکل ۳-۹: نمایی از کویل و مهره‌های جوش داده‌شده و آرایش مقاطع ۳۸
- شکل ۳-۱۰: پمپ دنده‌ای میکرولانگر مدل WT3000-1FB ۴۰
- شکل ۳-۱۱: سنسور فشار هاگلر و کولینگ المنت ۴۱
- شکل ۳-۱۲: مخزن پیش گرم‌کن با حجم ۳۵۰ Lit و جنس پلی‌اتیلن ۴۲
- شکل ۳-۱۳: دستگاه ثبت داده‌ها ۴۳
- شکل ۴-۱: دمای سیال و کویل برای دبی 400 mlmin ، دمای سیال ورودی $52/19^\circ\text{C}$ ، دمای ورودی گاز مشعل $543/27^\circ\text{C}$ ۴۹

- شکل ۲-۴: دمای سیال و کویل برای دبی $mlmin$ ۵۰۰، دمای سیال ورودی $53/12^{\circ}C$ ، دمای ورودی گاز مشعل $535/80^{\circ}C$ ۴۹
- شکل ۳-۴: دمای سیال و کویل برای دبی $mlmin$ ۶۰۰، دمای سیال ورودی $54/35^{\circ}C$ ، دمای ورودی گاز مشعل $532/80^{\circ}C$ ۵۰
- شکل ۴-۴: دمای سیال و کویل برای دبی $mlmin$ ۷۰۰، دمای سیال ورودی $55/25^{\circ}C$ ، دمای ورودی گاز مشعل $536/30^{\circ}C$ ۵۰
- شکل ۵-۴: دمای سطح خارجی کویل در دبی‌های مختلف برای سنسورهای با زاویه $\theta = 0^{\circ}$ نسبت به خط عمودی..... ۵۲
- شکل ۶-۴: دمای سطح داخلی کویل در دبی‌های مختلف برای سنسورهای با زاویه $\theta = 0^{\circ}$ نسبت به خط عمودی..... ۵۲
- شکل ۷-۴: دمای سطح خارجی کویل در دبی‌های مختلف برای سنسورهای با زاویه $\theta = 240^{\circ}$ نسبت به خط عمودی..... ۵۳
- شکل ۸-۴: دمای سطح داخلی کویل در دبی‌های مختلف برای سنسورهای با زاویه $\theta = 240^{\circ}$ نسبت به خط عمودی..... ۵۳
- شکل ۹-۴: تاثیر افزایش دبی حجمی بر کیفیت بخار خروجی از کویل..... ۵۵
- شکل ۱-۶: آزمایش خواص آب..... ۷۴
- شکل ۲-۶: آزمایش خواص مکانیکی کویل..... ۷۵

فهرست علائم

سطح مقطع کویل	A	m^2
قطر داخلی کویل	d	m
قطر مارپیچ	D	m
طول کویل	L	m
گام کویل	p	m
گرمای ویژه	C_p	$\frac{J}{kgK}$
ضریب انتقال حرارت	h	$\frac{W}{m^2K}$
نرخ جرمی جریان	$\dot{m}$	$\frac{Kg}{s}$
فشار	P	Pa
افت فشار	ΔP	Pa
عدد ناسلت	Nu	بی بعد
شار حرارتی	q	$\frac{Kw}{m^2}$
توان حرارتی	Q	Kw
دما	T	°C
رینولدز	Re	بی بعد
کیفیت بخار	x	بی بعد

فہرست علامت یونانی

چگالی	ρ	$\frac{Kg}{m^2}$
نسبت انحنا	δ	بی بعد
کشش سطحی	σ	$\frac{N}{m}$
لاکھارت-مارتینلی	X_{tt}	بی بعد
اثر بخشی	ε	بی بعد

زیر نویس ها

توده سیال	b
کوئل	C
بحرانی	Crit
گاز	g
مایع	l
جوشش هسته‌ای	nb
شروع جوشش هسته‌ای	ONB
شرایط اشباع	sat
شرایط دوفازی	TP
بخار	v
دیوار	w
مینیمم	min
ماکزیمم	max

فصل اول: مقدمه

۱-۱- ساختار پایان نامه

در این بخش توضیح مختصری از فصول مرتبط با این پایان نامه، ارائه می شود:

۱- در فصل اول، مقدمه و معرفی کوئل مارپیچ و جزئیاتی از انتقال حرارت در آن، بیان شده است.

۲- در فصل دوم، به مروری بر کارهای گذشته، پرداخته شده است.

۳- معرفی تجهیزات استفاده شده و همچنین ست آپ آزمایشگاهی، به همراه جزئیات در فصل سوم، ارائه شده است.

۴- در فصل چهارم، به ارائه نتایج حاصل از آزمایش ها و نتیجه گیری از نتایج پرداخته شده است.

۵- ارائه پیشنهادها برای انجام کارهای بیشتر و تحقیقات آینده در فصل پنجم آمده است.

۱-۲- مبدل حرارتی کویل مارپیچ

مبدل‌های حرارتی عموماً بر اساس معیارهایی از جمله: پیوستگی جریان، پدیده انتقال، ساختمان مبدل و یا نوع جریان، تقسیم‌بندی می‌شوند. مبدل‌های حرارتی از نظر ساختمان به صورت مبدل‌های حرارتی صفحه‌ای^۱، مبدل حرارتی صفحه پره^۲، مبدل‌های حرارتی لوله‌ای^۳، مبدل حرارتی لوله پوسته^۴، مبدل حرارتی مارپیچ^۵، تقسیم‌بندی می‌شوند که در ادامه، به شرح مبدل حرارتی مارپیچ پرداخته خواهد شد.

از لحاظ ساختاری، این نوع از مبدل‌ها، از یک یا چند حلقه کویل مارپیچ ساخته می‌شوند که ابتدا و انتهای آن به ورودی و خروجی متصل خواهد شد. رایج است که کویل‌های مارپیچ را از جنس فولاد کربن‌دار یا مس و یا فولاد ضدزنگ، می‌سازند.

با توجه به استفاده گسترده از مبدل‌های حرارتی در صنایع مختلف، با افزایش کارایی آن‌ها می‌توان میزان هزینه‌ها را به صورت قابل ملاحظه‌ای کاهش داد. همچنین با بالا رفتن میزان انتقال حرارت در مبدل‌ها می‌توان از اندازه‌های کوچک‌تر آن‌ها استفاده کرد. یکی از روش‌های افزایش انتقال حرارت در مبدل‌ها استفاده از کویل‌هایی با هندسه مناسب می‌باشد.

با توجه به ویژگی‌های مثبت استفاده از کویل‌های مارپیچ در مبدل‌های حرارتی از جمله: دربرگیری فضای کمتر و نیز انتقال حرارت بالاتر، تحقیقات زیادی در زمینه‌ی استفاده از انواع کویل‌های مارپیچ و نیز مدل‌سازی آن‌ها انجام شده است. از کویل‌های مارپیچ و به‌طور کلی از سطوح منحنی شکل به صورت گسترده در صنایع استفاده می‌شود. کاربرد این سطوح، علاوه بر انتقال حرارت در زمینه‌های مربوط به انتقال جرم نیز استفاده می‌شود. طیف گسترده‌ای از صنایع، از کویل‌های مارپیچ به منظور سرمایش و گرمایش مایعات و گازها استفاده می‌کنند. کویل‌های مارپیچ یکی از پرکاربردترین مبدل‌ها در صنایع بوده که در صنایع مختلفی از جمله: تبرید، تهویه مطبوع، نیروگاه‌ها، نفت و گاز و مواد غذایی استفاده می‌شود. همچنین کویل‌های

¹ - Plate heat exchanger

² - Flat plate heat exchanger

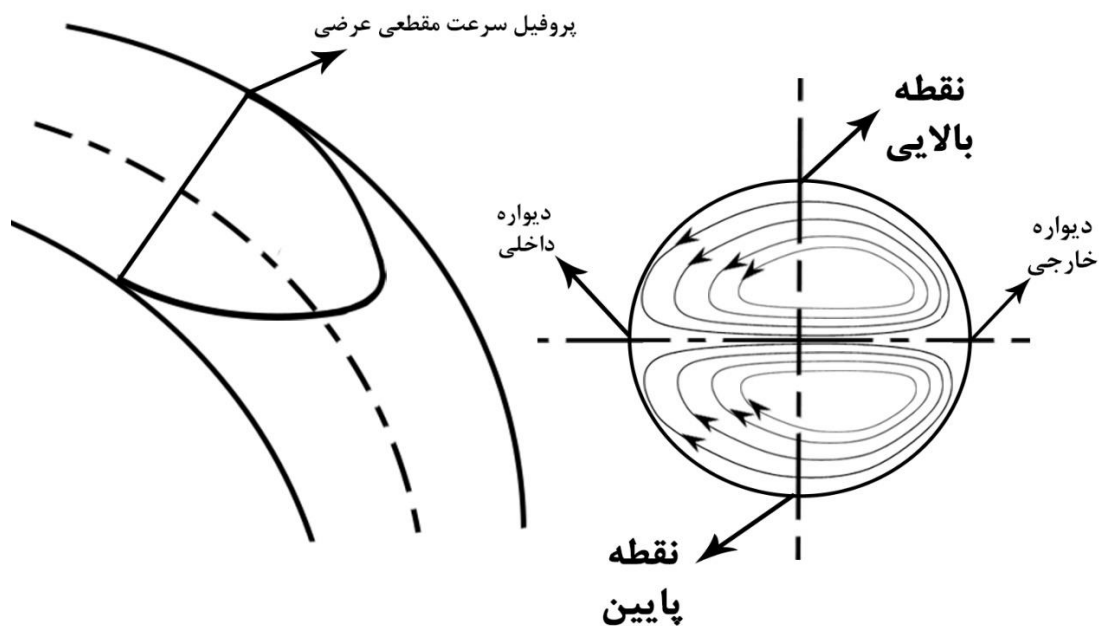
³ - tube heat exchanger

⁴ - Shell and tube heat exchanger

⁵ - Coil tube heat exchanger

مارپیچ در صنعت هسته‌ای به‌عنوان مولد بخار برای تولید الکتریسیته کاربرد دارند. این نوع کوپل‌ها در کلکتورهای خورشیدی مقیاس بزرگ، تحت عنوان دریافت‌کننده انرژی مورد استفاده قرار گرفته‌اند.

در کوپل‌های مارپیچ به علت وجود شعاع انحنا، نیروی گریز از مرکز ایجاد خواهد شد که این نیرو سبب تشکیل جریان ثانویه در این کوپل‌ها می‌شود. از اثرات ایجاد جریان ثانویه در کوپل‌های مارپیچ می‌توان به بهبود اختلاط جریان و همچنین افزایش ضریب انتقال حرارت در جریان‌های دوفازی و تک فازی اشاره کرد. یکی از مهم‌ترین مزیت‌های کوپل‌های مارپیچ را می‌توان، بیشتر بودن سطح مؤثر این کوپل‌ها نسبت به لوله‌های صاف (مستقیم) عنوان کرد. در نتیجه به دلیل ساختار هندسی خاص آن‌ها و اینکه فضای کمتری را اشغال می‌کنند، می‌توانند یک سطح تبادل بزرگ را در یک فضای کوچک جای دهند. هنگامی که سیال از درون یک کوپل منحنی عبور می‌کند، در هر مقطع عرضی عمود بر محور کوپل، جریان ثانویه ایجاد خواهد شد، شکل ۱-۱. نخستین بار تامسون به‌صورت تئوری جریان ثانویه را مورد بررسی قرار داد. در هر مقطع می‌بایست نیروی گرادیان فشار وجود داشته باشد تا با نیروی مرکزگرای ناشی از انحنا به تعادل برسد. در هر مقطع، سیال در نزدیکی بالا و پایین دیواره نسبت به مرکز کوپل، با سرعت کمتری حرکت می‌کند. چراکه با توجه به اثرات ویسکوزیته در نزدیکی دیواره نیاز به گرادیان فشار کمتر برای تعادل با نیروی مرکزگرا است. به همین خاطر جریان ثانویه در نزدیکی بالا و پایین دیواره کوپل و به سمت داخل مرکز آن حرکت می‌کند و سیال در مرکز به سمت خارج حرکت می‌کند [۱].



شکل ۱-۱: جریان ثانویه در کویل منحنی [۱]

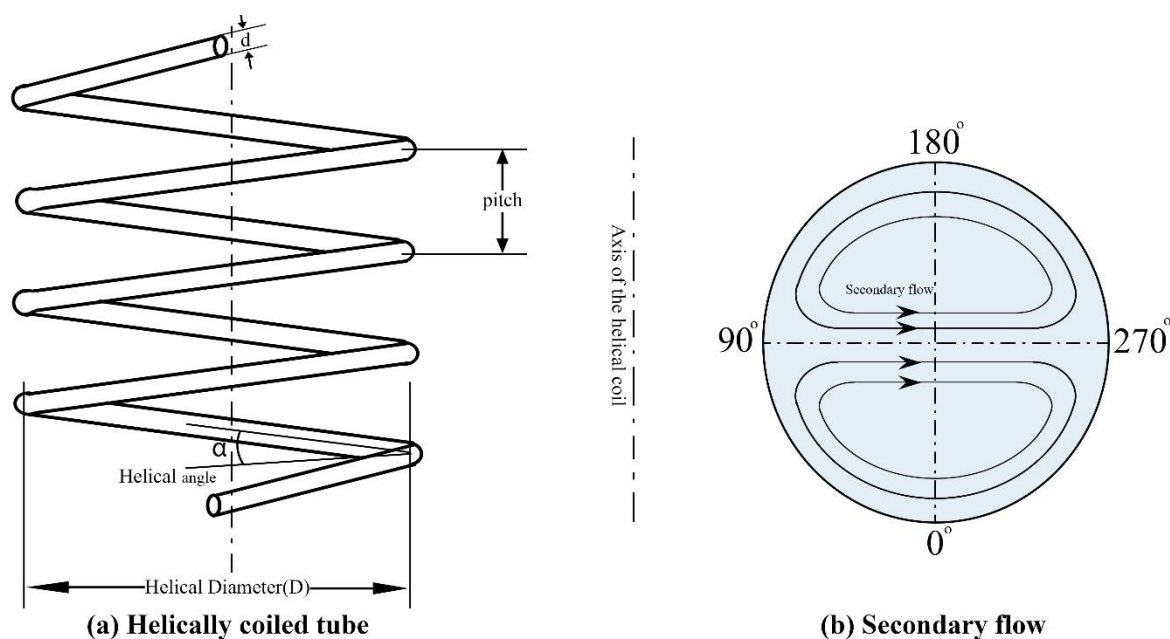
نکته‌ایی که می‌توان به آن اشاره کرد، آن است که از عوامل مؤثر بر شدت جریان ثانویه می‌توان به نسبت انحنا و پیچش اشاره کرد. نتایج بررسی‌ها نشان می‌دهد که تأثیر نسبت پیچش بر شدت جریان ثانویه از اهمیت بیشتری نسبت به تأثیر نسبت انحنا برخوردار است. این بدان معناست که با افزایش هر دو عامل، شدت جریان ثانویه افزایش می‌یابد، اما تأثیر نسبت انحنا بیشتر خواهد بود [۲]. انحنا و پیچش کویل، مشخصه‌های بدون بعد کویل مارپیچ هستند که با توجه به معادلات زیر تعریف خواهند شد [۳]:

$$\delta = \frac{d}{D}$$

$$\tau = \frac{P}{2\pi D}$$

همچنین از جمله مزیت‌های دیگر کویل مارپیچ در برابر لوله صاف، می‌توان به بهبود ویژگی‌های انتقال حرارت، اشغال کردن فضای کمتر به دلیل فشرده بودن، اشاره نمود. ولی همان‌گونه که می‌دانیم در برابر هر مزیتی، معایبی نیز وجود دارد که از معایب کویل‌های مارپیچ نیز می‌توان به افزایش افت فشار نسبت به افت فشار لوله صاف، دشواری ساخت به علت پیچیدگی ساختار و دشواری در بازرسی از کویل در هنگام فعالیت سیستم اشاره نمود. با مقایسه مزیت‌ها و معایب عنوان شده می‌توان به مؤثر بودن کویل‌های مارپیچ پی برد.

یکی از مهم‌ترین تفاوت‌های نوع جریان سیال در کویل‌های مارپیچ نسبت به لوله صاف، تشکیل جریان ثانویه است که یک جفت گردابه متقارن و عمود بر جهت جریان ناشی از نیروی گریز است که باعث تغییر نرخ انتقال حرارت می‌شود، شکل ۱-۲. اثبات شده است که جریان ثانویه در جریان‌های تک فازی و دوفازی وجود دارد و تفاوت‌های انتقال حرارت و افت فشار بین کویل مارپیچ و لوله صاف ناشی از حضور این پدیده است.



شکل ۱-۲: کویل مارپیچ و جریان ثانویه در یک سطح مقطع [۴]

جوشش، باعث به وجود آمدن جریان دوفازی آب و بخار می‌شود که هر فاز چگالی متفاوتی دارد. انحنای کویل مارپیچ باعث به وجود آمدن نیروی گریز از مرکز می‌شود و این نیرو نیز جدایی فازها را در پی دارد و باعث می‌شود فاز بخار که چگالی کمتری دارد، در سمت درونی کویل و فاز مایع با چگالی بیشتر در سمت بیرونی کویل حرکت داشته باشند.

۱-۳- مشخصه جریان در کویل مارپیچ:

میدان جریان در کویل مارپیچ بدون در نظر گرفتن اثر گام، تحت تأثیر نیروی گریز از مرکز ناشی از انحنای قرار می‌گیرد. نیروی گریز از مرکز اعمالی روی ذره، با انحنای مسیر حرکت و مجذور سرعت سیال متناسب

است. در نزدیکی دیواره که سرعت‌ها کوچک هستند، نیروی گریز از مرکز نیز ناچیز خواهد بود. لیکن در مرکز کویل که سرعت‌ها بزرگ‌تر هستند، این نیرو، جریان را به سمت دیواره می‌راند. در حقیقت نیروی گریز از مرکز با گرادیان فشار موجود در صفحه عمود بر محور کویل، موازنه می‌شود، اما در نزدیکی دیواره کویل این گرادیان فشار نمی‌تواند با جریان موازنه شود و در نتیجه جریان به سمت داخل کشیده می‌شود و بنا بر پیوستگی، بخش‌های سرعت و دما را شدیداً تحت تأثیر قرار داده و باعث حرکت نقطه ماکزیمم سرعت‌ها به سمت دیواره بیرونی کویل می‌گردد، بنابراین می‌توان انتظار داشت که نیروی گریز از مرکز باعث افزایش نرخ انتقال حرارت و افت فشار گردد. مطالعات در زمینه جریان ثانویه نشان می‌دهد که با تغییر برخی پارامترها الگوی جریان دچار تحول می‌شود، بنابراین انتخاب مشخصات کویل مارپیچ می‌تواند تأثیر زیادی بر خواص انتقال حرارت و میزان توان موردنیاز جهت غلبه بر افت فشار داشته باشد. قرار گرفتن کویل مارپیچ به صورت افقی یا قائم نیز بر روی ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی به‌خصوص در سمت خارج کویل مؤثر است، زیرا انتقال حرارت باعث تغییر چگالی سیال و ایجاد یک حرکت انتقالی در اثر نیروی ارشمیدس می‌شود که این حرکت اگر تقویت شود به سمت درهم شدن پیش رفته و یا روی حرکت کلی جریان تأثیر گذاشته و آن را به سمت درهم شدن پیش برده و باعث افزایش ضریب حرارت جابه‌جایی می‌شود.

۱-۴- روش‌های بهبود انتقال حرارت:

افزایش میزان انتقال حرارت در کاربردهای مهندسی بسیاری همانند مبدل‌های حرارتی، تهویه مطبوع، راکتورهای شیمیایی و سیستم‌های تبرید مهم می‌باشد، به همین خاطر، روش‌های مختلفی برای افزایش نرخ انتقال گرما و کاهش هزینه‌ها توسط محققین برای رسیدن به این هدف، به کار گرفته شده است. این روش‌ها را می‌توان به گروه عمده‌ی روش‌های اکتیو^۱ یا فعال، روش‌های پسیو^۲ یا انفعالی و روش‌های کامپاند^۳ یا ترکیبی تقسیم‌بندی کرد.

^۱ - Active methods

^۲ - Passive methods

^۳ - Compound methods

در روش‌های فعال، از یک توان خارجی برای افزایش انتقال حرارت استفاده می‌شود. استفاده از میدان‌های الکترومغناطیسی و مرتعش ساختن سیال از جمله تکنیک‌های مطرح، برای بهبود انتقال حرارت به شکل فعال می‌باشند.

در روش‌های انفعالی، احتیاجی به استفاده از یک توان خارجی برای افزایش نرخ انتقال گرما نیست. درواقع در این روش، تغییراتی در سطح هندسه کانال جریان و یا خواص سیال عامل، با افزودن مواد و یا جا گذاشتن ابزارهایی ایجاد می‌کنند. روش‌های انفعالی بسیاری برای بهبود انتقال حرارت وجود دارد که به چند نمونه از مطرح‌ترین این روش‌ها اشاره می‌کنیم:

✓ سطوح پرداخت‌شده^۱: سطوحی از انتقال حرارت می‌باشند که در مراحل پایانی از تولید به دقت پرداخته شده‌اند و مقدار زبری در این سطوح بسیار اندک می‌باشد. از این سطوح بیشتر در سیستم‌های جوش و تقطیر استفاده می‌شود.

✓ سطوح زبر^۲: روشی برای بهبود و اصلاح سطح می‌باشد که سبب افزایش سطح توربولانس در میدان سیال می‌شود و تأثیری برافزایش سطح انتقال حرارت ندارد. این روش اکثراً در جریان‌های تک فازی استفاده می‌شود.

✓ سطوح گسترش‌یافته^۳: این روش باعث افزایش مؤثر ضریب انتقال حرارت سیال می‌شود. در این روش با استفاده از پره سبب افزایش سطح انتقال حرارت و همچنین اختلاط بهتر جریان می‌شوند.

✓ ابزارهای چرخش جریان^۴: در این روش، با استفاده از ابزارهایی قابل نصب درون کانال، سبب ایجاد چرخش درون کانال جریان می‌شوند که به دنبال آن بهبود انتقال حرارت را در پی دارد. این روش در جریان‌های تک فازی و دوفازی قابل استفاده می‌باشد.

¹ - Treated Surfaces

² - Rough surfaces

³ - Extended Surfaces

⁴ - Swirl flow devices

✓ لوله‌ی مارپیچ^۱: این روش برای بسیاری از مبدل‌های گرمایی فشرده مناسب می‌باشد. درواقع حرکت سیال درون مارپیچ، باعث ایجاد جریان‌های ثانویه و گردابه درون جریان می‌شود که افزایش ضریب انتقال حرارت را در پی دارد.

✓ افزودنی‌هایی برای مایعات^۲: با افزودن ذرات ریز جامد فلزی به سیال عامل مایع، می‌توان ضریب انتقال حرارت سیال را افزایش داد. استفاده از نانو ذرات فلزی در مایعات برای افزایش انتقال حرارت، ازجمله موضوعات موردعلاقه محققین می‌باشد.

✓ افزودنی‌هایی برای گازها^۳: افزودن ذرات ریز جامد و یا قطرات مایع به سیال عامل گازی، می‌تواند سهم عمده‌ای در بهبود انتقال حرارت این نوع از مبدل‌های گرمایی داشته باشد.

روش‌های ترکیبی درواقع استفاده‌ی هم‌زمان از حداقل دو روش بهبود بخش، برای بهبود انتقال حرارت در مبدل‌های گرمایی می‌باشد. برای مثال، استفاده هم‌زمان توربولاتور و نانو سیال، استفاده هم‌زمان از کویل مارپیچ و ارتعاش سیال، استفاده هم‌زمان از نانو سیال و میدان الکترومغناطیسی و

۱-۵- مقدمه‌ای بر جریان جوششی:

در جریان‌های جوششی عموماً رژیم‌های مختلفی از جریان‌های دوفازی اتفاق می‌افتد که به عواملی ازجمله: مشخصات جریان و یا میزان شار حرارتی وابسته است. در ادامه این بخش، ابتدا به معرفی رژیم‌ها و سپس به تشریح فرآیند جوشش جریان می‌پردازیم.

۱-۵-۱- رژیم‌های جریان جوششی:

انتقال حرارت و خواص سیال در فرآیند جوشش عموماً تحت تأثیر توزیع فاز بخار قرار دارد. تعدادی الگوی جریان^۴ یا رژیم جریان^۵ از جریان دوفازی آب و بخار در لوله شفاف به‌طور تجربی مشاهده و ثبت شده است.

¹ - Coiled tubes

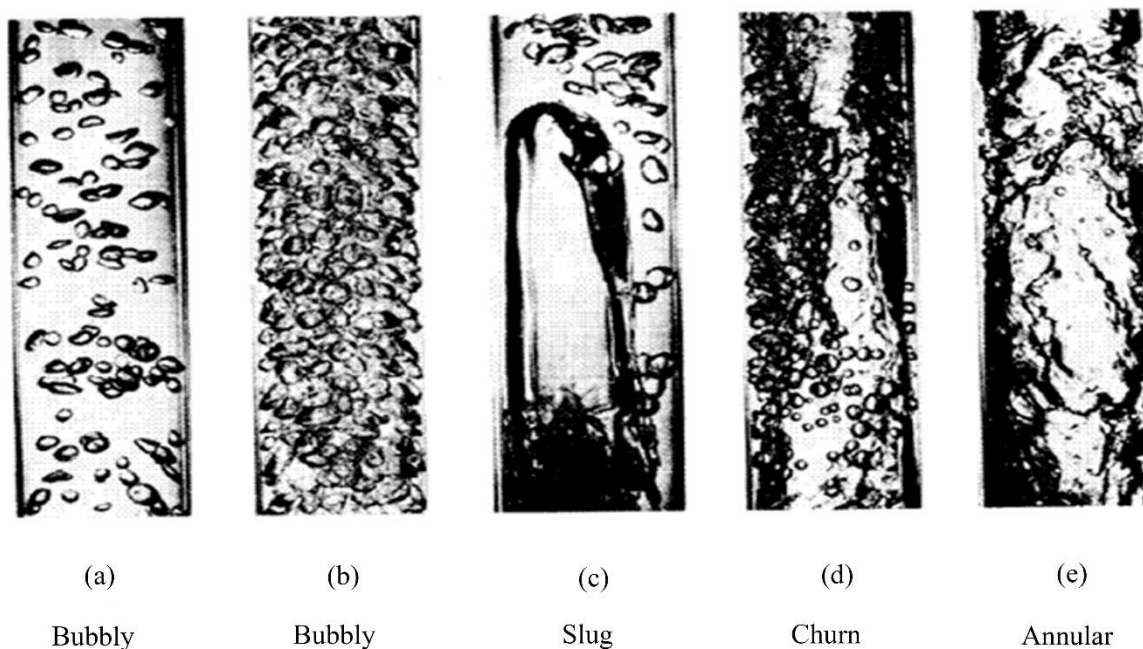
² - Additives for liquids

³ - Additives for gases

⁴ - Flow pattern

⁵ - Flow regime

به‌طور کلی ۴ نوع رژیم اصلی جریان، بیان شده است که می‌توان به جریان حبابی^۱، جریان اسلاگ^۲، جریان چرن^۳ و جریان حلقوی^۴ اشاره کرد که در شکل ۱-۳، این ۴ نوع رژیم را مشاهده می‌کنید:



شکل ۱-۳: رژیم‌های رایج جریان [۵]

رژیم‌های جریان بیان شده عموماً با مشخصاتی که در ادامه به آن اشاره می‌شود، معرفی خواهند شد:

جریان حبابی: حباب‌های پراکنده^۵ که به داخل فاز پیوسته مایع، منتقل می‌شوند.

جریان اسلاگ: حباب‌های بزرگ گلوله‌ای شکل که به وسیله فاز مایع جدا می‌شوند.

جریان چرن: بخار با رفتار بی‌نظمی داخل مایع جریان دارد. بخار در مرکز کانال یا لوله متمرکز بوده و فاز

مایع به سمت دیواره هل داده می‌شود.

جریان حلقوی: بخار، هسته پیوسته‌ای در مرکز کانال یا لوله تشکیل داده و لایه‌ای از مایع در دیواره

جریان دارد.

^۱ - Bubbly flow

^۲ - Slug flow

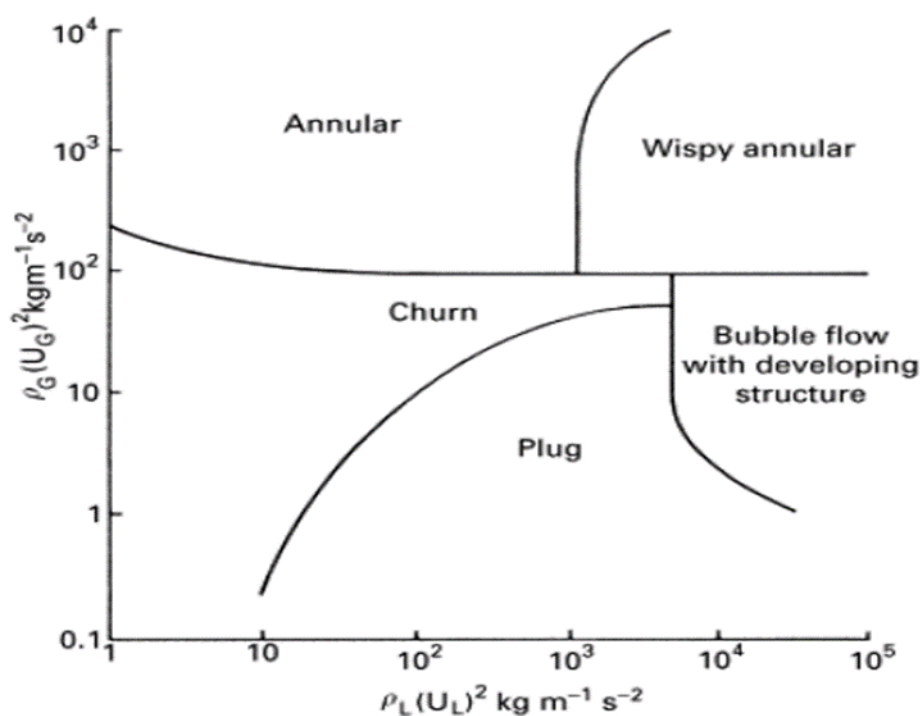
^۳ - Churn flow

^۴ - Annular flow

^۵ - Dispersed

پیش‌بینی نوع رژیم جریان یا انتقال از یک رژیم به رژیم دیگر نیاز به مشاهده تجربی رژیم‌های جریان در پارامترهای قابل‌اندازه‌گیری دارد. پیش‌بینی رژیم جریان عمدتاً به‌وسیله نقشه‌های رژیم جریان^۱ صورت می‌گیرد.

دو نقشه رژیم جریان در ادامه ارائه می‌شود. نقشه هویت و رابرت^۲ که برای هر دو نوع جریان هوا-آب و بخار-آب معتبر است و نقشه گویر و عزیز^۳ که برای جریان هوا-آب در لوله‌ای با قطر ۱ اینچ ارائه شده است.

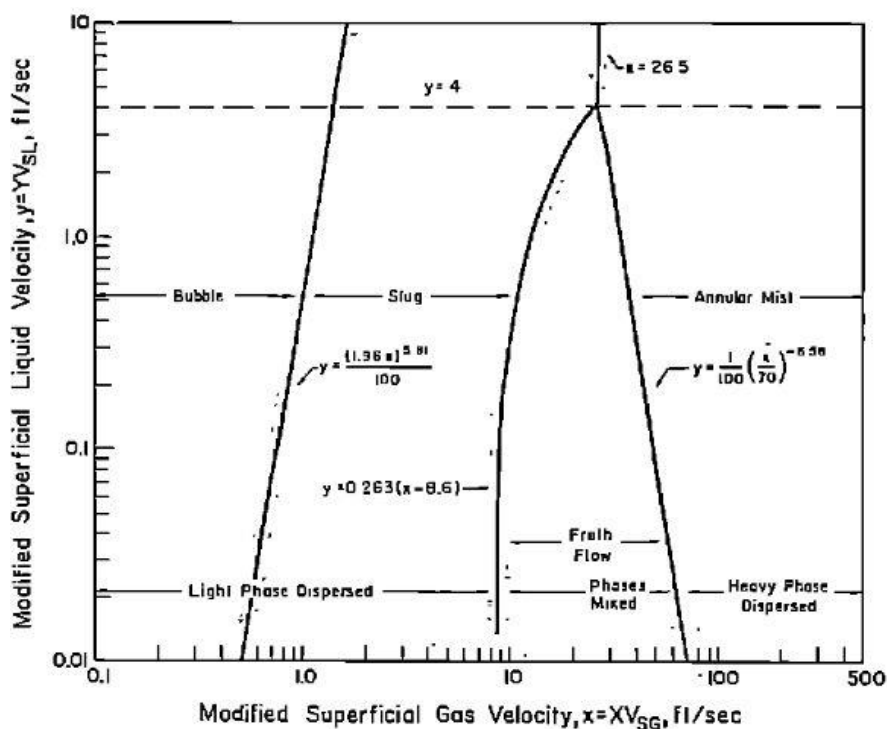


شکل ۱-۴: نقشه رژیم جریان هویت و رابرت [۶]

^۱ - Flow Regimes Maps

^۲ - Hewitt and Roberts

^۳ - Govier and Aziz



شکل ۱-۵: نقشه جریان گویر و عزیز [۷]

۱-۵-۲- معرفی فرایند جوشش:

در شکل ۱-۶، نمایی از فرایند جوششی نشان داده شده است. چگونگی فرایند جوشش در این شکل آورده شده که در ادامه به تشریح آن می پردازیم:

نکته‌ای که حائز اهمیت است، آن است که شروع فرایند جوشش^۱ زمانی اتفاق می افتد که دمای دیواره کوپل به دمای اشباع رسیده باشد و حباب‌های بخار شروع به شکل‌گیری کنند. در ادامه مطلب شروع فرایند جوشش با (ONB) نشان داده شده است.

ناحیه A-B: قبل از نقطه A فقط انتقال حرارت جابه‌جایی تک فاز اتفاق می افتد بین نقاط A تا B اگر $q_{ONB} > q$ تنها جابه‌جایی تک فاز و اگر $q_{ONB} < q$ جوشش مادون سرد^۲ رخ می‌دهد که آغاز فرایند جوشش است. در جوشش مادون سرد حباب‌ها در نزدیکی دیواره رشد کرده و می‌ترکند که این امر سبب افزایش انتقال حرارت می‌شود.

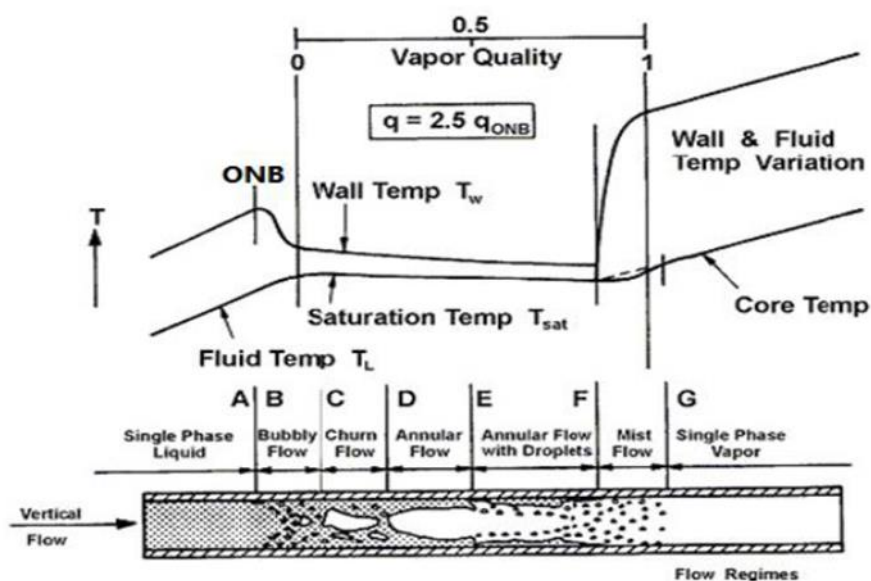
^۱ - Onset of nucleate boiling

^۲ - Subcooled boiling

ناحیه B-C-D: زمانی که $q_{ONB} > q$ باشد تنها تبخیر جابجایی^۱ رخ می‌دهد، همان‌گونه که با عنوان منحنی (جوشش جابه‌جایی خالص)^۲ نمایش داده شده است. اگر $q_{ONB} < q$ باشد، جوشش هسته‌ای^۳ و جوشش جابجایی^۴ رخ می‌دهد و رژیم‌های جریان حبابی و چرن حضور خواهند داشت.

ناحیه D-E-F: اگر $q_{ONB} > q$ باشد، منحنی (جوشش جابجایی خالص) تا رسیدن به کیفیت بخار ۱ و خشک شدن^۵ ادامه می‌یابد. اگر $q_{ONB} < q$ باشد، رژیم جریان حلقوی رخ می‌دهد و لایه‌ی نازکی از مایع در دیواره و بخار در مرکز، جریان دارند. این امر تا رسیدن به کیفیت بخار بحرانی x_{crit} ادامه می‌یابد و لایه‌ی مایع کاملاً بخار می‌شود.

ناحیه F-G: در x_{crit} لایه‌ی مایع به علت تنش برشی و نیروهای چسبندگی^۶ ناپایدار است. در رژیم جریان حلقوی مکانیزم انتقال حرارت کاملاً تغییر کرده و حرارت به‌وسیله جابجایی فاز بخار منتقل می‌شود. با تبخیر کامل قطرات مایع، دمای سطح افزایش یافته و تمام سیال به بخار مافوق گرم^۷ تبدیل می‌شود.



شکل ۱-۶: شماتیکی از فرآیند جریان جوششی در لوله صاف افقی [۸]

- 1 - Convective Evaporation
- 2 - Pure convective Boiling
- 3 - Nucleate Boiling
- 4 - Convective Boiling
- 5 - Dry out
- 6 - Adhesion Forces
- 7 - Superheated vapor

فصل دوم: مروری بر کارهای گذشته

در این فصل به بررسی و مرور تحقیقات انجام شده در زمینه عملکرد، انتقال حرارت و افت فشار در جریان‌های تک فاز و دوفازی در کویل مارپیچ می‌پردازیم.

۲-۱- پیشینه عملکرد و روش‌های بهبود انتقال حرارت در کویل مارپیچ

روش‌های بهبود انتقال حرارت توسط برگلز^۱ به دودسته فعال^۲ و غیرفعال^۳ تقسیم شده است. تأثیر هر کدام از این روش‌ها به عواملی از جمله شرایط اعمال آن و همچنین به نوع انتقال حرارت بستگی دارد [۹]. با توجه به بررسی‌های صورت گرفته از دسته‌بندی‌های مختلف در مقالات گوناگون، می‌توان انواع روش‌های بهبود انتقال حرارت را به دودسته کلی زیر تقسیم نمود:

روش فعال: به روشی گفته می‌شود که اعمال آن بر سیستم، وابسته به یک توان یا نیروی خارجی است. با توجه به بررسی‌های انجام شده، به دلیل پیچیدگی‌هایی که در طراحی این روش وجود دارد، استقبال زیادی به استفاده از این روش وجود ندارد، حتی در برخی موارد، استفاده از این روش امکان‌پذیر نخواهد بود. روش‌های فعال مرسوم عبارت‌اند از: تغییرات طراحی کویل^۴، استفاده از پره، استفاده از باله^۵ و فنرهای داخلی.

روش غیرفعال: روش‌های غیرفعال نیاز به توان یا نیروی خارجی ندارند و در صورت نیاز به توان اضافی، از توان در دسترس سیستم، استفاده می‌شود. از روش‌های غیرفعال می‌توان، کاربرد ضربان القاشده^۶، چرخش لوله، کاهش ابعاد کانال، سطوح ناهموار و لوله مارپیچ نام برد.

^۱- Bergels

^۲- Active

^۳- Passive

^۴- Coil

^۵- Fin

^۶- Induced Pulsation

۲-۲- مطالعات انجام شده در زمینه الگوی جریان در کویل مارپیچ

در بررسی‌های انجام شده بر روی کویل‌های مارپیچ توسط دین^۱ به این نتایج دست یافت که کاهش دبی مربوط به انحنا در سرعت‌های پایین وابسته به یک پارامتر به نام K است که به صورت رابطه‌ی $k=2(Re)^2 \frac{r}{R}$ تعریف می‌شود که در رابطه ذکر شده Re رینولدز، r شعاع کویل و R شعاع انحنا می‌باشد [۱۱، ۱۰].

اوستان و سلیمان^۲ در بررسی‌های خود نشان دادند که انحنا در کویل هرچقدر هم که کم باشد، تمایل به اصلاح سرعت‌های بحرانی که مشخصه رژیم جریان از آرام به درهم است، دارد. همچنین آن‌ها در بررسی‌های خود، با تزریق جوهر به آب جاری در کویل مارپیچ برای نخستین بار جریان ثانویه را مشاهده کردند [۱۲]. نتایج به دست آمده در مطالعات عددی انجام شده توسط مک کونالوگ و سریواستاوا^۳ در زمینه بررسی مشخصات جریان ثانویه در جریان کاملاً توسعه یافته نشان می‌دهد که با افزایش سرعت محوری، مقدار ماکزیمم سرعت و همچنین حرکات گردابه‌ای به دیواره کویل، نزدیک‌تر می‌گردند [۱۳].

۲-۳- مطالعات انجام شده در زمینه انتقال حرارت تک فازی در کویل مارپیچ

تحقیقات انجام شده در مبحث انتقال حرارت در کویل‌های مارپیچ به دو صورت عددی و تجربی می‌باشد. اکثریت مطالعات تجربی (آزمایشگاهی) انجام شده در کویل‌های مارپیچ محدود به دو شرط مرزی دمای دیوار ثابت و شار حرارتی ثابت بر روی دیواره می‌شوند. از جمله مواردی که می‌توان در استفاده از دو شرط دمای ثابت دیواره و شار حرارتی یکنواخت به عنوان شرایط مرزی ایده آل یادکرد، به ترتیب در مبدل‌های حرارتی همراه با تغییر فاز در سمت خارجی کویل و دیگری برای کویل‌هایی که تحت گرمایش الکتریکی هستند، اشاره کرد. در ادامه، به مطالعات صورت گرفته در زمینه کویل‌های مارپیچ تحت شرایط مرزی مختلف، اشاره می‌شود:

¹- Dean

²- Austen and Soliman

³- Macconalogue and Srivastava

سبان و مک‌لافین^۱ به بررسی و پژوهش در زمینه^۲ انتقال حرارت در کویل‌های مارپیچ برای جریان‌های آرام و درهم تحت شرایط مرزی شار حرارتی یکنواخت دیواره، پرداختند. آن‌ها در نتایج خود، نمودارهای عدد ناسلت برحسب عدد گراتز^۳ برای کویل‌هایی با نسبت انحنا ۱:۱۷ و ۱:۱۰۴ در محدوده عدد رینولدز ۱۲ تا ۵۶۰۰ برای جریان آرام را نشان داده‌اند. همچنین نتایج آن‌ها نشان می‌دهد که عدد ناسلت ناحیه خارجی از ناحیه داخلی بالاتر است و بیان این نکته نیز حائز اهمیت است که هر دو عدد ناسلت به‌طور قابل‌توجهی از عدد ناسلت لوله مستقیم، بیشتر می‌باشد [۱۴].

یکی دیگر از مطالعات انجام‌شده در زمینه کویل‌های مارپیچ توسط دراوید و همکارانش^۴ صورت گرفته است. آن‌ها در مطالعات خود به بررسی رژیم جریان آرام پرداختند و نتایج به‌دست‌آمده‌ی آن‌ها نشان‌گر به دست آمدن رابطه‌هایی جهت محاسبه عدد ناسلت می‌باشد [۱۵].

همچنین در مطالعه‌ای دیگر، مانلاپاز و چرچیل^۴ با بررسی روابط عددی و آزمایشگاهی، به یک رابطه جهت محاسبه افت فشار جریان آرام در حالت تک فاز در کویل مارپیچ دست یافتند [۱۶].

جایاکومار و همکاران^۵ به بررسی و مطالعه انتقال حرارت در کویل مارپیچ تحت شرایط مرزی دما و شار یکنواخت دیواره، پرداختند. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد که گام مارپیچ تنها در منطقه درحال‌توسعه مؤثر است و همچنین عدد ناسلت محلی در اثر پیچش ایجادشده در جریان، به گام مارپیچ وابستگی دارد. همچنین آن‌ها در نتایج خود، رابطه‌هایی را جهت محاسبه عدد ناسلت با توجه به شرایط، ارائه کرده‌اند [۱۷].

یکی از روابط تجربی به‌دست‌آمده به کمک عدد دین، جهت محاسبه ضریب اصطکاک جریان آرام تک فاز بر مبنای آزمایش‌ها صورت گرفته، توسط سرینیوسان^۶ و همکارانش صورت پذیرفته است [۱۸].

¹- Seban and MacLangelin

²- Graetz number

³- Dravid et al.

⁴- Manlapaz and Churchill

⁵- Jayakumar et al.

⁶- Srinivasan

یکی دیگر از مطالعات عددی صورت گرفته در کوئل مارپیچ تحت شرایط مرزی شار ثابت توسط یانگ و همکاران^۱ بوده است. آن‌ها در تحقیقات خود به مطالعه اثرات اعداد دین و پرانتل در جریان آرام و توسعه یافته پرداختند. همچنین نتایج آن‌ها نشان می‌دهد در اعداد پرانتل بالا، عدد ناسلت با افزایش پیچش کوئل، به شدت کاهش پیدا می‌کند [۱۹].

میشرا و گوپتا^۲ در تحقیق و بررسی خود جهت محاسبه ضریب اصطکاک جریان درهم در کوئل مارپیچ با مقطع دایره‌ای، با برهم‌نهی تأثیر چرخش جریان بر جریان مستقیم یک رابطه ارائه نمودند [۲۰]. همان‌طور که در ابتدای بخش گفته شد یکی از روش‌های غیرفعال در بهبود انتقال حرارت اضافه کردن نانو ذرات به سیال پایه است که سبب می‌شود انتقال حرارت از طریق افزایش هدایت حرارتی نانو سیال‌ها افزایش یابد.

ساسمیتو و همکارانش^۳ به بررسی و مطالعه افزایش انتقال حرارت در کوئل مارپیچ با سطح مقطع مربعی شکل با استفاده از نانو سیال در جریان آرام به صورت عددی پرداختند. نتایج آن‌ها افزایش در عملکرد انتقال حرارت برای مقدار کمی از کسر حجمی نانو ذرات با یک‌صدم درصد را نشان می‌دهد [۲۱].

۲-۴- پیشینه انتقال حرارت جریان دوفازی (جوششی)

با بررسی‌های صورت گرفته به این نتیجه می‌توان رسید که تحقیقات و بررسی‌های انجام شده در زمینه انتقال حرارت دوفازی در کوئل مارپیچ در مقایسه با بررسی‌های انجام شده در زمینه انتقال حرارت تک فازی، کمتر است.

در ادامه به مروری بر مطالعات و بررسی‌های انجام شده در زمینه انتقال حرارت دوفازی می‌پردازیم: از جمله افرادی که به بررسی و مطالعه آزمایشگاهی انتقال حرارت جریان دوفازی در کوئل مارپیچ پرداختند، می‌توان به اوحدی و همکارانش اشاره کرد. آن‌ها در نتایج خود نشان دادند که برای نواحی باکیفیت بخار بالا،

¹- Yang et al.

²- Mishra and Gupta

³- Sasmito et al.

حالت غالب انتقال حرارت، جابه‌جایی است و در نواحی باکیفیت بخار پایین، حالت جوشش هسته‌ای^۱ نیز حضور دارد [۲۲]. نکته‌ای که می‌توان به آن اشاره کرد، این است که آن‌ها در نتایج خود همچنین بیان کردند، رابطه‌هایی که برای پیش‌بینی جریان دوفازی در لوله صاف توسط چن^۲ [۲۳] ارائه شده بود، می‌تواند با دقت قابل قبولی مشخصات انتقال حرارت دوفازی در کویل مارپیچ را نیز پیش‌بینی کند.

یاوژی^۳ و همکاران به بررسی انتقال حرارت جریان جوششی برای جریان آب-بخار در کویل مارپیچ، به صورت آزمایشگاهی، پرداختند. نتایج بررسی‌های آن‌ها نشان می‌دهد، نیروی گریز از مرکز، سبب ایجاد نیروی ثانویه شده که اثر مطلوبی بر انتقال حرارت جوششی در کویل مارپیچ دارد. همچنین با افزایش کیفیت، جرم مجموع قطرات و به دنبال آن کارایی انتقال حرارت کویل مارپیچ، کاهش می‌یابد و در کیفیت پایین بخار، با افزایش فشار سیستم، انتقال حرارت جوششی کاهش یافته اما در کیفیت بالا، افزایش می‌یابد [۲۴].

لوسفی^۴ و همکاران به بررسی انتقال حرارت جوششی مادون سرد در کویل‌های مارپیچ به صورت عددی پرداختند. آن‌ها در پژوهش خود، به بررسی جابه‌جایی اجباری مادون سرد و آشفته در جریان دوفازی آب-بخار در کویل مارپیچ تحت شرایط فشار، شار حرارتی و شار جرمی مختلف پرداختند. آن‌ها معتقدند انتقال حرارت جوششی مادون سرد در کویل‌های مارپیچ، به دلیل توانایی بالایی که در جذب شار گرمایی دارند، کارایی انتقال حرارت بهتری را نسبت به دیگر فرآیندهای جوششی ارائه می‌دهند. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد که انتقال حرارت جوششی مادون سرد در کویل مارپیچ، ضریب انتقال حرارت را بهبود می‌بخشد. همچنین ضریب انتقال حرارت با افزایش شار حرارتی و کاهش شار جرمی، افزایش می‌یابد [۲۵].

همچنین از دیگر محققینی که در این زمینه، به پژوهش پرداختند، می‌توان به هوآنگ^۵ و همکاران و همچنین چانگ^۶ و همکارانش، اشاره کرد [۲۶، ۲۷].

1- Nucleate Boiling

2- Chen

3- Yaoxia

4- Luthfi

5- Hwang

6- Chang

بررسی‌های انجام‌شده توسط هوانگ و همکارانش در زمینه انتقال حرارت جریان جوششی و خشک شدن^۱ در دبی‌های کم، بوده است. همچنین مطالعات هوانگ و چانگ ازجمله مطالعاتی هستند که به بررسی انتقال حرارت جریان جوششی کوئل‌های مارپیچ در محدوده فشار سیستم ۵/۳Mpa و کیفیت بخار کمتر از ۰/۱ پرداختند.

در بررسی‌های انجام‌شده توسط استینر و تابورک^۲ به روابطی پی برده شده که می‌تواند پیش‌بینی خوبی از ضریب انتقال حرارت جریان جوششی برای کوئل مارپیچ با قطر زیاد و فشار کمتر از ۷Mpa داشته باشد [۲۸].

یاوژی و همکاران به بررسی آزمایشگاهی انتقال حرارت جوششی در کوئل مارپیچ، در شرایط فشار بالا، پرداختند. آن‌ها آزمایش‌ها متعددی برای به دست آوردن مشخصات انتقال حرارت جوششی یا سیال کاری آب، انجام دادند [۲۹]. همچنین یاوژی و همکارانش، تأثیر شار حرارتی، شار جرمی و فشار سیستم بر رفتار انتقال حرارت جوششی را با جزئیات موردبحث قراردادند. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد که افزایش شار حرارتی سبب افزایش جوشش مادون سرد و ضریب انتقال حرارت جوشش هسته‌ای اشباع‌شده است. همچنین بررسی‌هایشان نشان می‌دهد، شار حرارتی بر ضریب انتقال حرارت جوشش همرفت اشباع، تأثیری ندارد درحالی‌که شار جرمی سبب افزایش این ضریب شده است.

در بررسی دیگری از یاوژی و همکارانش به بررسی و مطالعه تجربی افت فشار اصطکاکی دوفازی آب-بخار در کوئل مارپیچ در شرایط فشار بالا، پرداختند. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد، افت فشار اصطکاکی دوفازی، با بالا رفتن فشار سیستم، کاهش می‌یابد. درحالی‌که این افت فشار نسبت به شار حرارتی و شار جرمی واکنشی نشان نمی‌دهد. همچنین به این نتیجه رسیدند که نسبت انحنا کوئل، تأثیری برافت فشار اصطکاکی جریان دوفازی ندارد [۳۰].

از محققین دیگری که در زمینه انتقال حرارت جریان دوفازی در کوئل مارپیچ به دو صورت افقی و عمودی به بررسی و مطالعه پرداختند، می‌توان به ژین^۱ و آواد^۲ به همراه همکارانشان اشاره کرد [۳۲، ۳۱].

¹- Dry out

²- Steiner and Taborek

نتایج آن‌ها در کویل‌های افقی نشان می‌دهد که سرعت‌های ظاهری تأثیر چشم‌گیری بر ضریب افت فشار خواهد داشت و همچنین در کویل مارپیچ عمودی در دی‌های کم، پارامتر لوکارت-مارتینلی و دی برافت فشار تأثیر دارند. همچنین بر اساس نتایج آزمایشگاهی آن‌ها برای هر دو کویل عمودی و افقی، روابطی را برای ضریب افت فشار جریان‌های دوفازی پیشنهاد داده‌اند.

بررسی و مطالعه رفتار هیدرولیک دمایی ژنراتور بخار با شرایط مرزی دما ثابت در کویل مارپیچ توسط نری^۳ و همکارانش صورت پذیرفته است. آن‌ها در نتایج خود بیان کردند که انحنا کویل‌های مارپیچ اثر چشم‌گیری بر ضریب انتقال حرارت ندارد [۳۳]. همچنین خاطرنشان می‌شود که روابط ارائه‌شده توسط نری بر پایه رابطه شروک و گروسمن^۴ بوده که برای لوله‌های صاف عمودی بوده است [۳۴].

یاوژی و همکاران به بررسی آزمایشگاهی مشخصات خشک شدن^۵ جریان دوفازی آب-بخار در کویل مارپیچ عمودی با قطر کوچک، پرداختند. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد که منطقه خشک شدن جزئی وجود دارد، چراکه مشخصات هندسی کویل مارپیچ و جریان ثانویه، تأثیر زیادی بر ضریب خشک شدن بحرانی دارند. همچنین با توجه به مشخصات جریان، افزایش شار گرمی سبب افزایش ضریب خشک شدن خواهد شد درحالی‌که با افزایش شار حرارتی و فشار سیستم، این ضریب کاهش می‌یابد [۳۵].

هاتف آریا^۶ و همکارانش به بررسی انتقال حرارت جوششی با استفاده از سیال کاری HFC-134a درون کویل عمودی مارپیچ، به‌صورت آزمایشگاهی، پرداختند. در این بررسی میانگین کیفیت بخار در محدوده ۰/۱ تا ۰/۸ بوده است. تجزیه و تحلیل‌های به‌دست‌آمده توسط هاتف آریا و همکارانش، نشان می‌دهد که افزایش کیفیت بخار و شار گرمی منجر به بیشتر شدن افزایش ضریب انتقال حرارت و افت فشار شده است. همچنین مشاهده‌شده است، در صورتی‌که به‌جای یک لوله صاف از یک کویل مارپیچ استفاده شود، به دنبال آن ضریب انتقال حرارت و همچنین افت فشار افزایش پیدا خواهد کرد [۳۶].

¹- Xin

²- Awwad

³- Nariai

²- Schrock and Grossman

⁵- Dry out

⁶- Hatef Aria

رانگایلو و دیویس^۱ افت فشار را در جریان بالارونده مختلف‌الجهت هوا-آب در کویل مارپیچ بررسی کردند و بر اساس پارامتر لوکارت-مارتینلی اصلاح‌شده، روابط جدیدی را برای افت فشار دوفازی ارائه دادند [۳۷].

گو^۲ و همکارانش به بررسی انتقال حرارت دوفازی در کویل‌های مارپیچ در شرایط زوایای مختلف پرداختند که طی این بررسی به این نتیجه رسیدند که ضریب انتقال حرارت تابعی از فشار سیستم است [۳۸]. همچنین کوزکی^۳ و همکاران به تحقیق در زمینه انتقال حرارت در کویل‌های مارپیچ تحت شرایط دما ثابت پرداختند؛ که بر اساس این پژوهش به این نتیجه رسیدند که به دلیل وجود نیروی گریز از مرکز و جریان ثانویه، جزء غالب انتقال حرارت، جابه‌جایی دوفازی است. همچنین آن‌ها برای پیش‌بینی ضریب انتقال حرارت رابطه‌ای را بر اساس تابعی از پارامتر لاکهارت-مارتینلی که خود نیز تابعی از کیفیت بخار است ارائه کردند [۳۹]. کامپولنچی^۴ و همکارانش مشخصات انتقال حرارت در سیستم تولید بخار در محدوده فشار ۸-۱۷ MPa را بررسی کردند. روابط آن‌ها برخلاف روابط گذشته تابعی از کیفیت بخار نیست [۴۰].

ژائو چن^۵ و همکارانش به پژوهش آزمایشگاهی، مشخصات انتقال حرارت جریان جوششی مادون سرد در کویل مارپیچ با قطرهای داخلی متفاوت پرداختند. همچنین آن‌ها بر اثرات شار حرارتی، شار جرمی و فشار سیستم بر رفتار انتقال حرارت در این جریان به بحث و بررسی پرداختند. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد که شروع این نوع جریان به‌طور قابل ملاحظه‌ای به شار حرارتی و فشار سیستم وابسته است [۴۱]. بای و گو^۶ روابطی برای ضریب انتقال حرارت جریان دوفازی برای کویل‌های مارپیچ در محدوده کیفیت بخار ۰/۱ ارائه کردند. همچنین روابط ارائه‌شده توسط آن‌ها بر پایه نسبت انتقال حرارت دوفازی به تک فاز است [۴۲]. یی^۷ و همکاران نیز به پژوهش در زمینه مشخصات انتقال حرارت و الگوهای جریان در ناحیه تبخیر در لوله گرمایی پرداختند [۴۳].

¹- Rangachayulu and Davies

²- Guo

³- Kozeki

⁴- Campolunghi

⁵- shuo.chen

⁶- Bai and Guo

⁷- Yi

لیانگ ژو^۱ و همکارانش به بررسی و تجربی شار حرارتی بحرانی در جریان جوششی در کویل‌های مارپیچ عمودی پرداختند. آن‌ها در مطالعه خود، اثرات شار حرارتی، شار جرمی، فشار سیستم را نیز مورد بررسی قرار داده‌اند [۴۴].

باوژی^۲ و همکارانش به بررسی عددی توزیع غیریکنواخت دمای دیواره در انتقال حرارت جوشش هسته‌ای در کویل مارپیچ پرداختند. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد که در قسمت بیرون و پایین مقطع، در طول انتقال حرارت جوششی، مایع جمع می‌شود، در نتیجه دمای دیواره در این مکان‌ها کاهش می‌یابد [۴۵].

بررسی انتقال حرارت و افت فشار در کویل‌های مارپیچ با جریان دوفازی در لوله‌های مارپیچ افقی توسط برگر^۳ و همکاران و همچنین شاه و جوشی^۴ مورد مطالعه قرار گرفت [۴۶،۴۷]. علاوه بر این افت فشار و انتقال حرارت در مبدل‌های حرارتی لوله در لوله با شرایط مرزی توربولانس توسط جایاکومار و گورور^۵ و همچنین ویمالکومار^۶ و همکارانش مورد بررسی و مطالعه قرار گرفت [۴۸،۴۹].

در ادامه با توجه به مطالعات و بررسی‌های ذکر شده در بالا، مواردی از شرایط و روابط به کار رفته در تحقیقات پیشین در جدول ۱-۲، ارائه شده است:

¹- Liang zhao

²- Baozhi sun

³- Berger

⁴- Shah and Joshi

⁵- Jayakumar and Gorver

⁶- Vimalkumar

جدول ۱-۲: مروری بر روابط موجود انتقال حرارت دوفازی در کویل‌های مارپیچ

شرایط آزمایش	مشخصات کویل مارپیچ	نویسندگان
$P = 0.1 \text{ Mpa} \ \& \ 60 < q < 256$ $0.5 < x < 1 \ \& \ 80 < G < 315$	$d = 12.5 \text{ mm}$ $250 < D < 527$	اوحدی و همکاران [۲۲]
$2 < P < 3.5 \text{ Mpa} \ \& \ 0.7E5 < q < 1.85E5$ $0.1 < x < 0.9 \ \& \ 150 < G < 850$	$D = 595 \text{ mm}$ $14.3 < d < 20 \text{ mm}$	نری و همکاران [۳۳]
$1 < P < 7 \text{ Mpa} \ \& \ 82 < q < 200$ $0 < x < 0.8 \ \& \ 177 < G < 531$	$d = 12 \text{ mm}$ $D = 577, 937, 1297 \text{ mm}$	چانگ و همکاران [۲۷]
$0.4 < P < 3 \text{ Mpa} \ \& \ 0 < q < 450$ $0.05 < x < 1 \ \& \ 0 < G < 2400$	$d = 15 \text{ mm}$ $D = 256 \text{ mm}$	گو و همکاران [۳۸]
$8 < P < 17 \text{ Mpa} \ \& \ 0.1E5 < q < 3E5$ $0 < x < 1 \ \& \ 1000 < G < 2500$	$d = 15.5 \text{ mm}$ $D = 835 \text{ mm}$	کامپولنفی و همکاران [۴۰]
$0.6 < P < 2.1 \text{ Mpa} \ \& \ 151 < q < 348$ $0 < x < 1 \ \& \ 161 < G < 486$	$d = 21.7 \text{ mm}$ $628 < D < 682 \text{ mm}$	کوزکی و همکاران [۳۹]
$1 < P < 6 \text{ Mpa} \ \& \ 30 < q < 1145$ $0 < x < 0.8 \ \& \ 88.4 < G < 530.5$	$d = 12 \text{ mm}$ $606 < D < 1290 \text{ mm}$	هوانگ و همکاران [۲۶]
$0.5 < P < 3 \text{ Mpa} \ \& \ 230 < q < 500$	$d = 11 \text{ mm}$	بای و گو [۴۲]

$0 < x < 0.8 \ \& \ 200 < G < 2500$	$D = 255 \text{ mm}$	
$1.8 < P < 7.8 \text{ Mpa} \ \& \ 100 < q < 450$ $300 < G < 1100$	$d = 14.5 \text{ mm}$ $D = 380 \text{ mm}$	ژائو چن و همکاران [۴۱]
$977 < Wo < 1322 \text{ Mpa} \ \& \ 10 < q < 62$ $0.5691 < Bo < 1.5584 \ \& \ 0.89 < Pr < 2.71$ $221 < Re < 1749 \ \& \ 0.11 < Fr < 0.18$	$d = 4 \text{ mm}$ $64.2 < D < 100.2 \text{ mm}$ جریان آرام عمودی	بی و همکاران [۴۳]
$2 < P < 8 \text{ Mpa} \ \& \ 150 < q < 450$ $0.3 < x < 0.7 \ \& \ 300 < G < 1100$	$12.5 < d < 14.5 \text{ mm}$ $180 < D < 380 \text{ mm}$	یاوژی و همکاران [۲۴]
$2 < P < 8 \text{ Mpa} \ \& \ 150 < q < 450$ $0.4 < x < 0.7 \ \& \ 300 < G < 1100$	$12.5 < d < 14.5 \text{ mm}$ $180 < D < 380 \text{ mm}$	یاوژی و همکاران [۲۹]
$2 < P < 8 \text{ Mpa} \ \& \ 150 < q < 450$ $0 < x < 0.9 \ \& \ 300 < G < 1100$	$12.5 < d < 14.5 \text{ mm}$ $180 < D < 380 \text{ mm}$	یاوژی و همکاران [۳۰]
$2 < P < 8 \text{ Mpa} \ \& \ 150 < q < 450$ $0.2 < x < 0.9 \ \& \ 300 < G < 1100$	$12.5 < d < 14.5 \text{ mm}$ $180 < D < 380 \text{ mm}$	یاوژی و همکاران [۳۵]

۲-۵- اهداف

در این پژوهش، به بررسی و تحلیل اهداف زیر پرداخته خواهد شد:

- ✓ مدل سازی مبدل حرارتی دوفازی
- ✓ محاسبه، تحلیل و بررسی نرخ انتقال حرارت دوفازی سیال آب در کویل مارپیچ، در یک مبدل حرارتی
- ✓ محاسبه، تحلیل و بررسی کیفیت بخار خروجی از کویل مارپیچ، در مبدل حرارتی

۲-۶- نوآوری

در این پژوهش، به مدل سازی مبدل حرارتی دوفازی، با استفاده از کویل مارپیچ پرداخته شده است. همچنین جهت تولید توان حرارتی مورد نیاز از مشعل گازی در این مبدل، استفاده شده است.

فصل سوم: لوازم و تجهیزات آزمایشگاهی

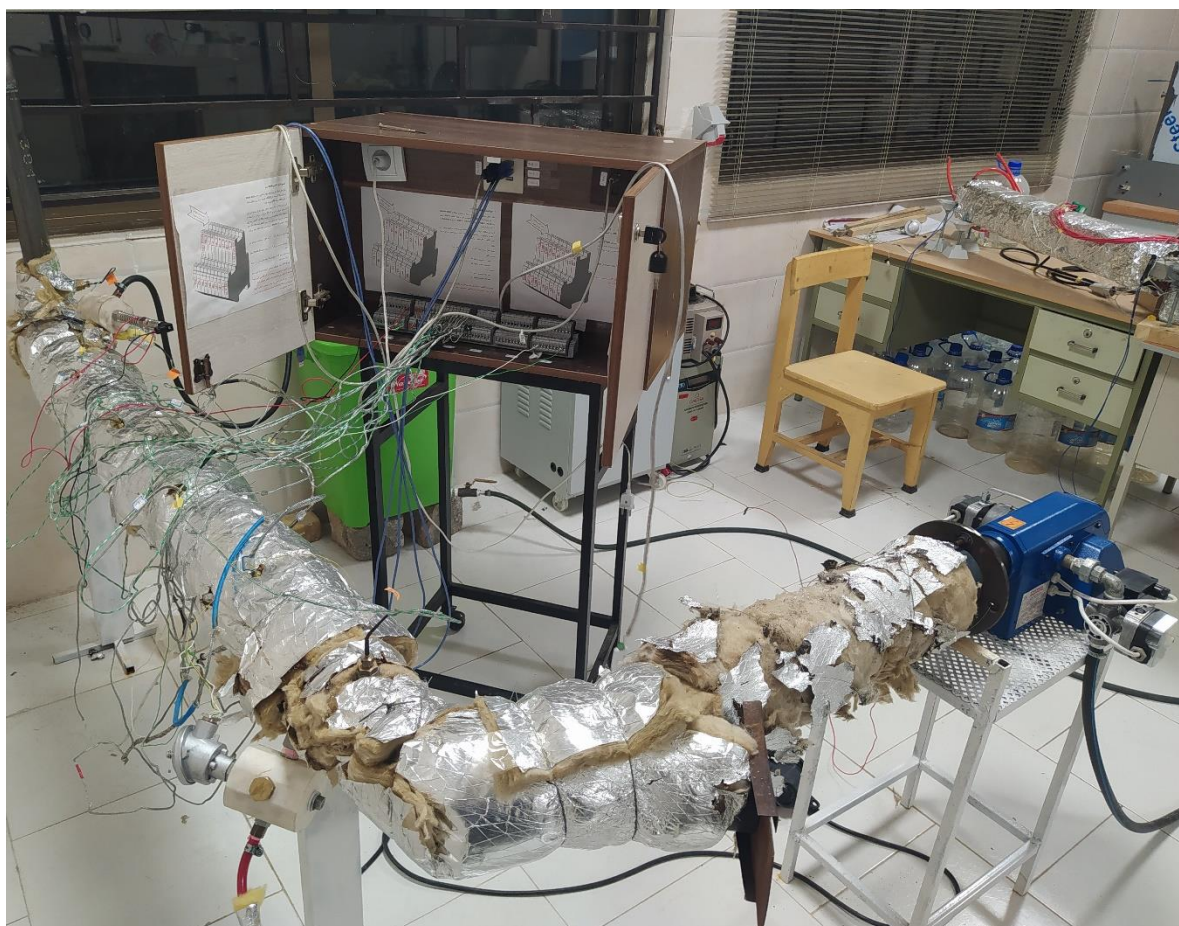
در این فصل، ابتدا سیستم آزمایشگاهی مورد نیاز، به منظور بررسی اهداف تعیین شده، از جمله بررسی انتقال حرارت و...، مورد بررسی قرار گرفته و سپس اقدام به طراحی و ساخت آن شده است. در ادامه، ابتدا نحوه انجام آزمایش و نمای کلی ست آپ آزمایش را در شکل ۳-۱، مشاهده خواهید کرد و سپس به بیان جزئیات تجهیزات به کار برده شده، پرداخته می شود.

۳-۱- نحوه انجام آزمایش

در ابتدای فرآیند آزمایش، مخزن پیش گرم کن که در بخش های قبلی توضیح داده شد، از سیال پر شده تا به وسیله المنت های موجود در آن به دمای مورد نظر قبل از شروع آزمایش برسد. جریان متصل به المنت ها، جریان از نوع ۳ فاز می باشد. به وسیله کنترلر دما، دمای سیال خروجی از پیش گرم کن که در واقع دمای ورودی به ست آپ اصلی نیز است، تنظیم می شود. این دستگاه پس از گذشت مدت زمان کوتاهی به وسیله کنترلر توان ورودی به المنت ها و قطع و وصل کردن جریان ورودی، دمای سیال را به دمای مورد نظر می رساند. مدت زمان رسیدن دمای سیال به دمای مورد نظر حدوداً ۹۰ دقیقه می باشد. پس از این اقدام، یکی از عوامل مهم، تعیین کردن دبی حجمی پمپ است که برای هر آزمایش دبی مورد نظر تنظیم می شود. بیان این نکته حائز اهمیت است که به منظور اطمینان از دقت پمپ، دبی حجمی، پیش از شروع هر تست، به وسیله یک بشر مدرج ۱ لیتری و کرنومتر نیز اندازه گیری می شود. پس از حصول اطمینان از صحت دبی حجمی عبوری از ست آپ، در قدم بعدی سیستم های ثبت اطلاعات را روشن نموده و به رایانه متصل کرده و توسط نرم افزار نصب شده بر روی رایانه به نام ADAMAPAX.NET، اطلاعات دمای سیال، جداره کوئل و فشار سیال عبوری ثبت و ذخیره می شود. اطلاعات ذخیره شده توسط این نرم افزار در پایان آزمایش به وسیله نرم افزار اکسل قابل فراخوانی است. پس از آماده سازی سیستم ثبت اطلاعات و برقراری جریان سیال با دمای مورد نظر، اقدام به روشن کردن مشعل می کنیم. همان طور که گفته شد، مشعل گازی قابلیت فعال شدن با گاز شهری و برق شهر را داراست. جهت کنترل توان تولیدی و در ادامه محصولات احتراق مشعل، از دو طریق می توان اقدام کرد، اولین راه از طریق دریچه ایی که در قسمت پایین مشعل تعبیه شده، جهت کنترل اکسیژن ورودی به مشعل و راه دوم از طریق کنترلر گاز ورودی به آن می باشد که این دو راه سبب ثابت

نگه داشتن شعله مشعل و در پی آن باعث ثابت نگه داشتن دمای محصولات احتراق خواهد شد. پس از اتصال مشعل به برق شهر، گاز در مشعل جریان پیدا کرده و پس از گذشت زمان حدوداً ۳۰ ثانیه مشعل شروع به فعالیت می کند. برای رسیدن به شرایط پایدار در آزمایش حدود ۲۰ الی ۲۵ دقیقه زمان نیاز است تا مشعل به شرایط ثابت و پایداری از لحاظ شعله و دمایی برسد. در همین حین سیستم اطلاعات نیز داده های دما و فشار را هر یک ثانیه ثبت می نماید. در آزمایش های دوفازی شرط حالت پایا شدن به این صورت است که دمای دیواره کوئل با گذشت زمان، ثابت مانده و تغییری نکند.

در نتیجه با توجه به اینکه داده های دما و فشار و همچنین داشتن نمودار تغییرات آن ها با گذر زمان، پس از اطمینان از رسیدن به حالت پایا، فرآیند آزمایش متوقف شده که مدت زمان این آزمایش در حالت دوفازی حدوداً ۱۵ الی ۲۰ دقیقه می باشد. پس از پایان آزمایش و قطع جریان مشعل، به منظور جلوگیری از آسیب به کوئل و خنک شدن تدریجی آن، جریان سیال کماکان برقرار است. پس از حصول اطمینان از خنک شدن کوئل، جریان سیال قطع شده و برای خروج مواد زائد از جمله رسوبات و چربی و... کوئل به وسیله یک کمپرسور هوا، جریان هوا با فشار بالا به داخل کوئل وارد شده تا مواد زائد و همچنین سیال باقی مانده از درون آن خارج شود. در شکل ۳-۱، نمایی از ست آپ مورد استفاده در این تحقیق را مشاهده می کنید:



شکل ۳-۱: نمای کلی ست آپ

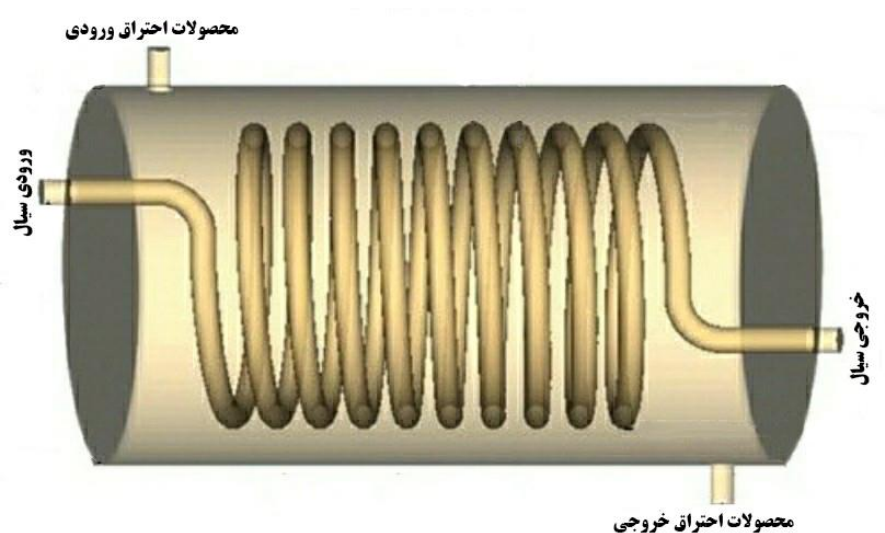
در ادامه به بررسی جزئیات تجهیزات به کار برده شده در ست آپ آزمایش، اشاره خواهد شد.

۳-۲- لوازم و تجهیزات مورد استفاده

۳-۲-۱- مبدل حرارتی

از مبدل‌های حرارتی کوئل مارپیچ در کاربردهایی که با کمبود فضا مواجه هستند، به دلیل آنکه از فضای موجود به طور بهینه استفاده می‌کنند، می‌توان استفاده نمود. همچنین مبدل‌های حرارتی در صنایع تولید توان، صنایع هیدرولیک، سیستم‌های بازیافت انرژی و ... کاربرد بسیار دارند. در این تحقیق، به مدل‌سازی مبدل حرارتی دوفازی که در شکل‌های ۳-۲ و ۳-۳ نشان داده شده، پرداخته شده است. به این صورت که در مبدل حرارتی به کار برده شده، از یک کوئل مارپیچ که سیال آب از درون آن عبور کرده و تغییر فاز در آن رخ خواهد داد و همچنین محفظه‌ی بیرونی که کوئل مارپیچ را احاطه کرده و محصولات احتراق از آن عبور

می‌کند، استفاده شده است. نکته‌ای که حائز اهمیت است، دمای ورودی و خروجی محصولات احتراق است که در هر آزمایش به صورت ثابت، نگهداشته شده است. علاوه بر این، دمای سیال ورودی به کویل مارپیچ، در این مبدل حرارتی نیز ثابت در نظر گرفته شده است.



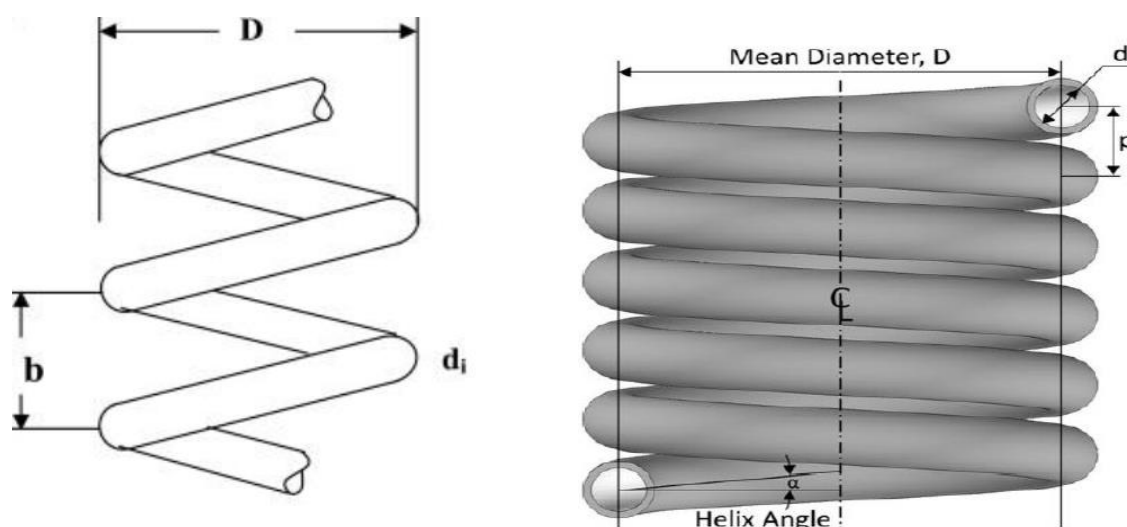
شکل ۳-۲: شماتیک مبدل حرارتی طراحی شده



شکل ۳-۳: نمای اصلی مبدل حرارتی

۳-۲-۲-کویل تست

در این پژوهش، از یک کویل که از جنس استیل ضدزنگ کلاس ۳۱۴ است، استفاده شده است. قطر داخلی لوله ۱۰ میلی‌متر و ضخامت آن ۱ میلی‌متر و همچنین قطر میانگین کویل مارپیچ ۹۲ میلی‌متر و گام آن ۳۰ میلی‌متر است، شکل ۳-۴. کویل به صورت شاخه‌هایی از لوله صاف تهیه شده و به وسیله دستگاه پیچش لوله به صورت مارپیچ درآمده است.



شکل ۳-۴: نمای ایزوترمیک کویل مارپیچ

۳-۲-۳- مشعل گازی

برای وارد کردن انرژی حرارتی به کویل و سپس به سیال عبوری، از مشعل گازی PDG1 ساخت شرکت ایران نوین شکل ۳-۵، استفاده شده است.

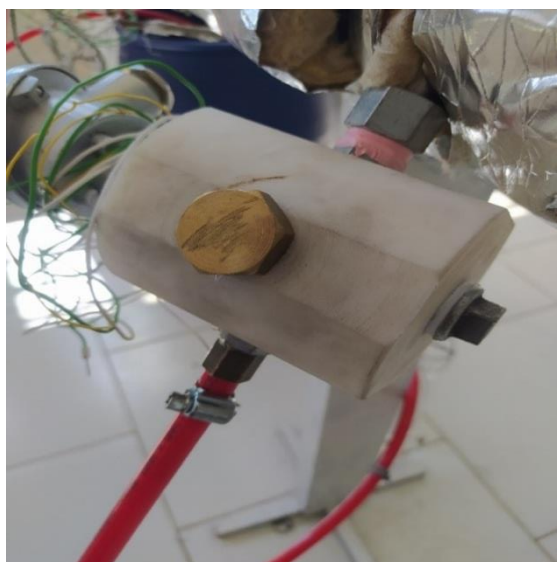
مشعل‌های گازسوز ایران نوین برای احتراق گاز طبیعی طبق استاندارد DIN_7595 طراحی شده است. این مشعل‌ها به صورت تک مرحله‌ای کار می‌کنند (استارت موتور، جرقه، روشن شدن و خاموش شدن مشعل و در نتیجه عملکرد ترموستات) و این عملکرد به وسیله رله کنترل می‌شود. مشعل PDG1 دارای ظرفیت ۱۲۰۰۰۰ (KCal/h) است که شامل الکتروموتوری با توان ۱۰۰ وات است.



شکل ۳-۵: مشعل گازی PDG1 ساخت شرکت ایران نوین

۳-۲-۴- اتصالات

به منظور متصل کردن اجزای مختلف تجهیزات آزمایش به مقطع اصلی آزمون، اتصالاتی از جنس پلی آمید، شکل ۳-۶، طراحی شده‌اند. از مزایای این اتصالات می‌توان به مواردی از جمله: اتصال اجزای مختلف مورد نیاز، فراهم کردن امکان اندازه‌گیری دما و فشار سیال عبوری از ست‌آپ، اشاره کرد.



شکل ۳ - ۶: اتصالات پلی آمید

۳-۲-۵- عایق حرارتی پشم سنگ

یکی از اقدامات ضروری و مهم در این آزمایش می‌توان به عایق کردن کویل مورد استفاده در ست‌آپ، اشاره نمود. به‌منظور این کار، پشم سنگ از نوع پتویی شکل ۳-۷، با تراکم ۱۴۰ و ضخامت ۵۰ میلی‌متر استفاده شده است. از مهم‌ترین اهداف این اقدام، می‌توان به کاهش اتلاف حرارتی از مجموعه مبدل حرارتی به محیط پیرامون اشاره کرد.



شکل ۳ - ۷: عایق حرارتی

۳-۲-۶- سنسور دما

به منظور اندازه گیری دما از دو نوع سنسور، برای محاسبه دمای سیال و دمای سطح کوئل استفاده شده است که در ادامه به معرفی آن ها پرداخته می شود:

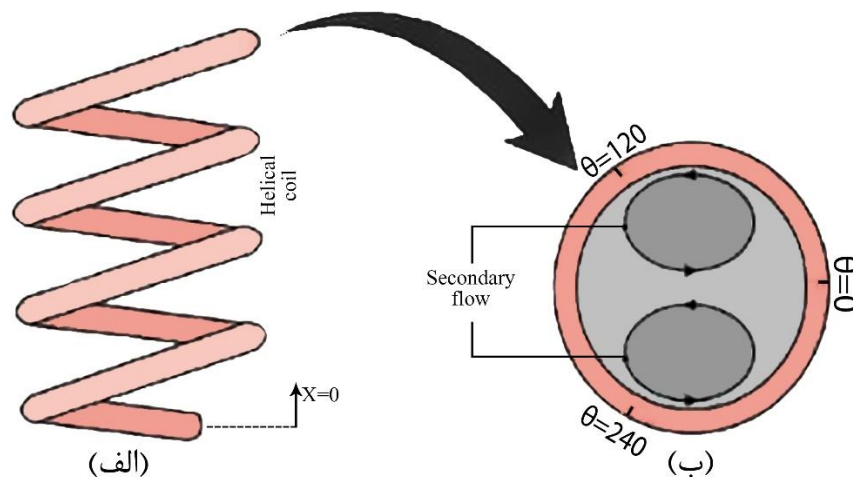
۳-۲-۶-۱- سنسور دمای سطح

به منظور محاسبه دمای سطح کوئل، از ترموکوپل نوع K به تعداد ۱۱ عدد در ۱۱ نقطه از کوئل استفاده شده است. در هر مقطع از کوئل مارپیچ یک ترموکوپل در سمت خارج آن نصب شده است. به منظور اتصال بدون نقص ترموکوپل ها به سطح خارجی کوئل، مهره های رزوه دار از جنس استیل به سطح خارجی کوئل با جوش آرگون اتصال داده شده و پس از آن ترموکوپل ها به داخل مهره ها قرار داده شده اند، به طوری که نوک آن ها کاملاً با سطح خارجی کوئل در تماس بوده است. موقعیت مکانی ترموکوپل ها در جدول ۳-۱، آورده شده است.

جدول ۳-۱: موقعیت مکانی نقاط سنسورها

شماره مقطع	مکان (cm)	زاویه نقاط نسبت به محور عمودی
۱	۲۲/۵	۲۴۰
۲	۳۳	۰
۳	۴۱/۵	۱۲۰
۴	۵۱/۵	۲۴۰
۵	۶۲	۰
۶	۷۰	۱۲۰
۷	۸۴	۲۴۰
۸	۹۳/۵	۰
۹	۱۰۱/۵	۱۲۰
۱۰	۱۱۴/۵	۲۴۰
۱۱	۱۲۵	۰

در شکل ۳-۸، در قسمت (الف) و (ب) به ترتیب مبدأ اندازه‌گیری فاصله ترموکوپل‌ها و زاویه قرارگیری آن‌ها نشان داده شده و همچنین نمای آزمایشگاهی از کویل مارپیچ به همراه مهره‌های جوش داده شده و مقاطع در شکل ۳-۹، نمایش داده شده است.



شکل ۳ - ۸: زوایا و مبدأ اندازه‌گیری محل سنسورها بر روی کویل مارپیچ طراحی شده



شکل ۳ - ۹: نمایی از کویل و مهره‌های جوش داده شده و آرایش مقاطع

۳-۲-۶-۲- سنسور دمای سیال

برای محاسبه‌ی دمای سیال از سنسورهای مقاومتی^۱ از نوع پی تی ۱۰۰^۲ پرابدار ساخت شرکت جومو آلمان^۳ استفاده شده است. این سنسورها دارای دقت ± 0.1 درجه سانتی‌گراد هستند. برای ثبت دما از ۲ عدد سنسور دما پرابدار استفاده شده، یک عدد در خروجی پیش گرم‌کن و یک عدد نیز در ورودی مقطع آزمون (ست‌آپ). همچنین به‌منظور محاسبه محصولات احتراق خارج شده از مشعل و محاسبه اختلاف دمای این محصولات در ابتدا و انتهای ست‌آپ از دو عدد سنسور دما نوع K استفاده شده است.

۳-۲-۷- پمپ

پمپ مورد استفاده در این آزمایش از نوع پمپ‌های دنده‌ای میکرو^۴ مدل WT3000-1FB ساخت شرکت Longer انگلستان شکل ۳-۱۰، است. این پمپ از نوع پمپ فشار بالا بوده و در گروه پمپ جابه‌جایی مثبت قرار دارد که در هر بار چرخش چرخ‌دنده‌ها، مقدار ثابتی از سیال را جابه‌جا می‌کند. پمپ دنده‌ای به‌طور عمده برای کارهای آزمایشگاهی و صنعتی استفاده می‌شود. میکرو پمپ دنده‌ای برای انتقال مداوم مایعات استفاده می‌شود و در دو حالت کنترل جریان برای انتقال سیال پیوسته و کنترل تخلیه برای توزیع مایع در حجم توزیع، مورد استفاده قرار می‌گیرد. این نوع از پمپ، با بیشینه دبی ۲۵۷۱/۴ میلی‌لیتر بر دقیقه، سرعت ۳۰۰۰ دور بر دقیقه و توان ۱۵۰ وات است. همچنین به‌منظور تنظیم دور موتور و دبی حجمی پمپ، می‌توان از تجهیزات الکترونیکی قرار داده شده بر روی آن، استفاده نمود.

^۱-Resistance Temperature Detector

^۲- PT100

^۳- RTD Temperature Probe by Jumo GMBH

^۴- Micro-Gear Longer pump



شکل ۳-۱۰: پمپ دنده‌ای میکرو لایزر مدل WT3000-1FB

۳-۲-۸- سنسور فشار

به منظور اندازه‌گیری فشار سیال خروجی در مقطع خروجی ست‌آپ از ترانسمیتر فشار هاگلر (سری HOT) ساخت کشور آلمان، استفاده شده است. این نوع ترانسمیترها برای اندازه‌گیری فشار انواع مایعات و گازهای سازگار با فولاد ضدزنگ ۳۰۴ مناسب می‌باشد. سازگاری الکترومغناطیسی بالا، خطاهای دمایی پایین و مقاومت عالی در برابر شوک و لرزش، عملکرد مطمئن سری HOT در محدوده دمایی حداکثر تا ۱۲۵ درجه سانتی‌گراد را تضمین می‌کند. عنصر حسگر پیزو مقاومتی سری HOT از آخرین فناوری ASIC بهره می‌برد که درستی بسیار عالی، پایداری بلندمدت و انواع مختلف سیگنال‌های خروجی را برای این سری به ارمغان می‌آورد. این سنسورها دارای دقت $\pm 0.5\%$ میلی بار می‌باشند. با توجه به دوفازی بودن آزمایش و رسیدن سیال به دمای اشباع از کولینگ المنت‌های^۱ ۹ پره ساخت شرکت هاگلر آلمان استفاده شده تا آسیبی به سنسور وارد نشود. نمایی از سنسور فشار به همراه کولینگ المنت در شکل ۳ - ۱۱ قابل مشاهده است.

¹- Cooling Element



شکل ۳ - ۱۱: سنسور فشار هاگلر و کولینگ المنت

۳-۲-۹- المنت حرارتی

در بخش پیش گرمایش از المنت‌های میله‌ای با توان کلی ۹ کیلووات، به منظور گرمایش سیال ورودی به ست‌آپ آزمایش، استفاده شده است.

۳-۲-۱۰- پیش گرم‌کن

به منظور گرمایش آب ورودی به دمای اولیه مورد نظر، اقدام به ساخت پیش گرم‌کن شده است. در این بخش از یک مخزن از جنس پلی‌اتیلن شکل ۳-۱۲ که گنجایش آن به میزان تقریبی ۳۵۰ لیتر می‌رسد، استفاده شده است، همچنین المنت‌هایی که در بخش قبل توضیح داده شده، در درون این مخزن جهت رساندن دمای سیال به دمای مورد نظر قرار داده شده‌اند.



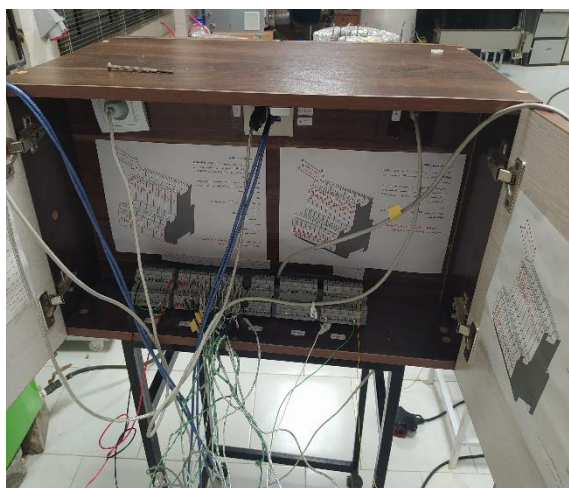
شکل ۳-۱۲: مخزن پیش گرم کن با حجم ۳۵۰ Lit و جنس پلی اتیلن

۳-۲-۱۱- دستگاه ثبت داده‌ها (دما و فشار)

به منظور ثبت اطلاعات و داده‌های آزمایش‌های انجام‌شده، از دستگاه ثبت ساخت شرکت ادونتک تایوان استفاده شده است شکل ۳-۱۳ که در ادامه توضیحات کامل‌تری از آن ارائه خواهد شد.

برای ثبت دمای سنسورهای از نوع k (ترموکوپل‌ها) از سیستم ADAM ۴۰۱۸+ و همچنین به منظور ثبت دمای سنسورهای از نوع پی تی ۱۰۰ از سیستم ADAM ۴۰۱۵، استفاده شده است. از قابلیت‌های این دو سیستم می‌توان به اتصال هم‌زمان (به ترتیب) تعداد ۸ و ۶ سنسور، اشاره کرد. علاوه بر دو سیستم اشاره‌شده، می‌توان به سیستم کاربردی ADAM ۴۵۶۱ که به منظور تبدیل و انتقال داده‌ها به اطلاعات قابل دسترس به رایانه تعبیه شده، اشاره کرد.

همچنین برای ثبت فشار سیال، سنسور فشار استفاده شده به سیستم ثبت دما متصل شده است. به این منظور تمام این سیستم‌ها به سیستم ADAM ۴۰۱۸+ که تنظیمات آن برای ثبت اطلاعات سیستم‌های فشار که خروجی آن در بازه ۴ تا ۲۰ میلی‌آمپر انجام‌شده، استفاده شده است.



شکل ۳-۱۳: دستگاه ثبت داده‌ها

فصل چہارم: نتیج

در این فصل می‌خواهیم، به بیان بررسی و تشریح نتایج حاصل از آزمایش‌ها انجام‌شده بپردازیم:

۴-۱- آزمایش‌ها جریان دوفازی

در این تحقیق، آزمایش‌ها جریان دوفازی (جوششی) در دبی‌های مختلف صورت پذیرفته است. نکته حائز اهمیت آن است که به‌منظور حصول اطمینان از نتایج حاصل از آزمایش‌ها انجام‌شده، هریک از آزمایش‌ها، حداقل ۳ مرتبه تکرار شده است.

در جریان‌های دوفازی، با توجه به افت فشار ناچیز جریان و با توجه به مشخص بودن مقدار فشار در ناحیه‌ی ورودی و خروجی کویل، توسط سنسورهای فشار، جهت محاسبه‌ی مقدار فشار در هر مقطع، از روش درونیابی استفاده می‌شود.

۴-۱-۱- روابط مورد استفاده در انتقال حرارت دوفازی

در این بخش به روابط کاربردی که در محاسبات انتقال حرارت دوفازی، مورد استفاده قرار گرفته است، می‌پردازیم:

یکی از نکات حائز اهمیت، رابطه‌هایی برای محاسبه رینولدز بحرانی در کویل‌های مارپیچ است که در آن انتقال جریان از حالت آرام به درهم اتفاق می‌افتد که در ادامه به این روابط اشاره خواهد شد [۵۰، ۵۱]:

$$Re_{cr} = 2000 \left(\frac{d}{D} \right)^{0.32} \quad ۱-۴$$

$$Re_{cr} = 2100 \left(1 + 12 \left(\frac{d}{D} \right)^{0.5} \right) \quad ۲-۴$$

روابط ۱-۴ و ۲-۴ به ترتیب توسط ایتو و همکارانش و سرینیوسان و همکارانش ارائه‌شده است [۵۰، ۵۱]. طبق این روابط برای کویل مارپیچ مورد آزمایش، رینولدز بحرانی به ترتیب ۹۸۳۱/۴۵ و ۱۰۴۰۸ می‌باشد. از آنجایی که از مقطعی به بعد، دمای سنسورها تغییرات کمی را نشان می‌دهد، این نتیجه گرفته‌شده که ناحیه جوشش شروع شده است، از این‌رو، میزان انرژی حرارتی منتقل‌شده به سیال در ناحیه جوشش، از میزان بخار آب تولیدشده، طبق رابطه ۴-۴، محاسبه خواهد شد. همچنین مساحت مورد استفاده در محاسبه

شار حرارتی ناحیه جوشش نیز مساحت آن مقطعی از کویل است که دمای سنسورها ثابت شده است. جهت محاسبه کیفیت بخار خروجی از رابطه ۳-۴، استفاده می‌شود:

$$x = \frac{V_{total} - V_R}{V_{total}} \quad ۳-۴$$

$$Q_T = x \dot{m} h_{fg} \quad ۴-۴$$

$$q = \frac{Q_T}{\pi d L_h} \quad ۵-۴$$

که در رابطه‌ی ۳-۴، V_{total} و V_R به ترتیب حجم کل سیال وارد شده به کویل مارپیچ و حجم سیال باقی‌مانده در خروجی است، که واحد آن‌ها $(\frac{ml}{min})$ می‌باشد، همچنین جهت محاسبه حجم کل سیال وارد شده به کویل (V_{total})، میزان دبی حجمی ورودی، در مدت‌زمان انجام آزمایش، ضرب شده است، نکته‌ای که حائز اهمیت است آن است که، جهت اطمینان از دقت محاسبه حجم کل سیال ورودی و همچنین کیفیت بخار خروجی (x) در هر مرحله، ۳ مرتبه هرکدام از آن‌ها در هر آزمایش، تکرار و محاسبه شده‌اند. همچنین در رابطه‌ی ۴-۴، $\dot{m}$ دبی جرمی سیال که واحد آن $(\frac{kg}{s})$ ، x کیفیت بخار در خروجی و h_{fg} آنتالپی حالت اشباع که واحد آن $(\frac{kJ}{kg})$ است. همچنین در رابطه ۴-۴، d قطر داخلی کویل برحسب متر و L_h طول کویل در ناحیه جوشش و برحسب متر معرفی می‌شود.

در جریان جوششی اشباع، ضریب انتقال حرارت دوفازی از رابطه‌ی زیر به دست می‌آید:

$$h_{TP_{local}} = \frac{q}{T_{w_{local}} - T_{sat_{local}}} \quad ۶-۴$$

در این رابطه، $T_{w_{local}}$ دمای دیواره خارجی کویل می‌باشد. علاوه بر این $T_{sat_{local}}$ نیز در ناحیه‌ی جوشش از دمای اشباع سیال در فشار اندازه‌گیری شده، قابل محاسبه است.

در ناحیه‌ی جوشش، مقدار ضریب انتقال حرارت به دلیل آنکه دمای سیال و دیواره‌های سمت داخلی و خارجی کویل، تغییرات کمی دارند، ثابت می‌ماند و رابطه ۷-۴، به‌صورت زیر قابل بیان است:

$$h_{TP_{ave}} = \frac{q}{T_{W_{ave}} - T_{sat_{ave}}} \quad ۷-۴$$

که در رابطه ۷-۴، q شار حرارتی و واحد آن $(\frac{W}{m^2})$ ، دمای میانگین سیال در ناحیه‌ی جوششی و T_{satave} نیز دمای اشباع سیال خواهد بود. نکته‌ی حائز اهمیت آن است که در رابطه ۷-۴، دماهای T_{Wave} و T_{satave} ، در ناحیه‌ی جوشش، مقادیر ثابتی هستند.

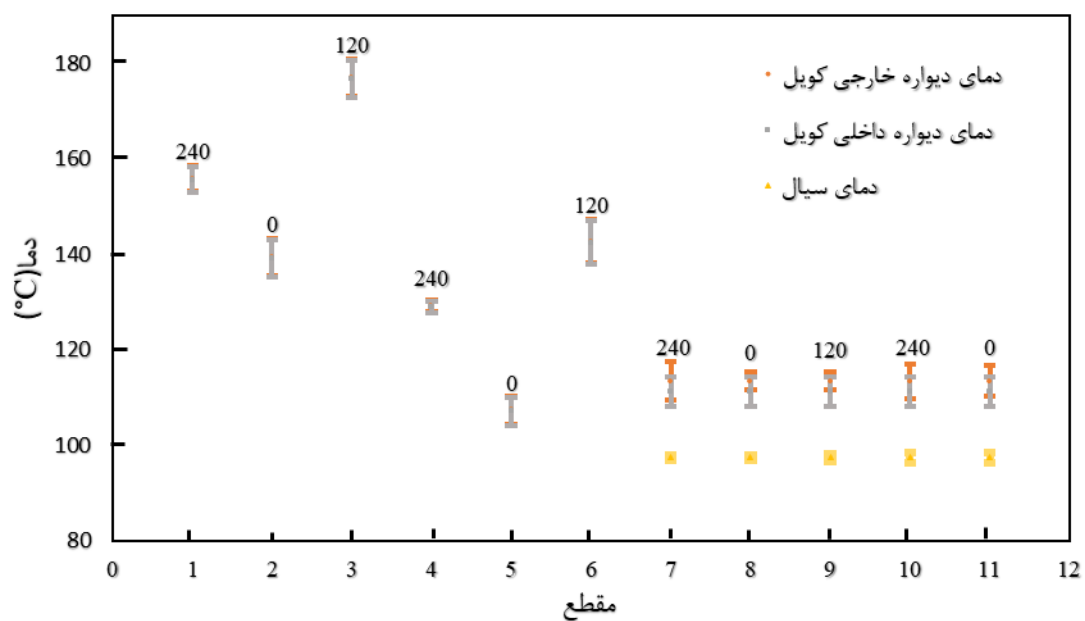
۴-۱-۲- تشریح نتایج آزمایش‌ها انتقال حرارت دوفازی

با توجه به اینکه در این تحقیق، به مدل‌سازی مبدل حرارتی دوفازی پرداخته شده که در فصل ۳ به شرح آن اشاره شده است و از آنجایی که در این مبدل از مقطع مشخصی، فرآیند دوفازی یا همان تغییر فاز سیال را خواهیم داشت، شاهد ثابت بودن دمای جداره و دمای اشباع سیال خواهیم بود. در جدول ۴-۱، دمای محصولات احتراق ورودی و خروجی مبدل حرارتی در هر آزمایش نشان داده شده است:

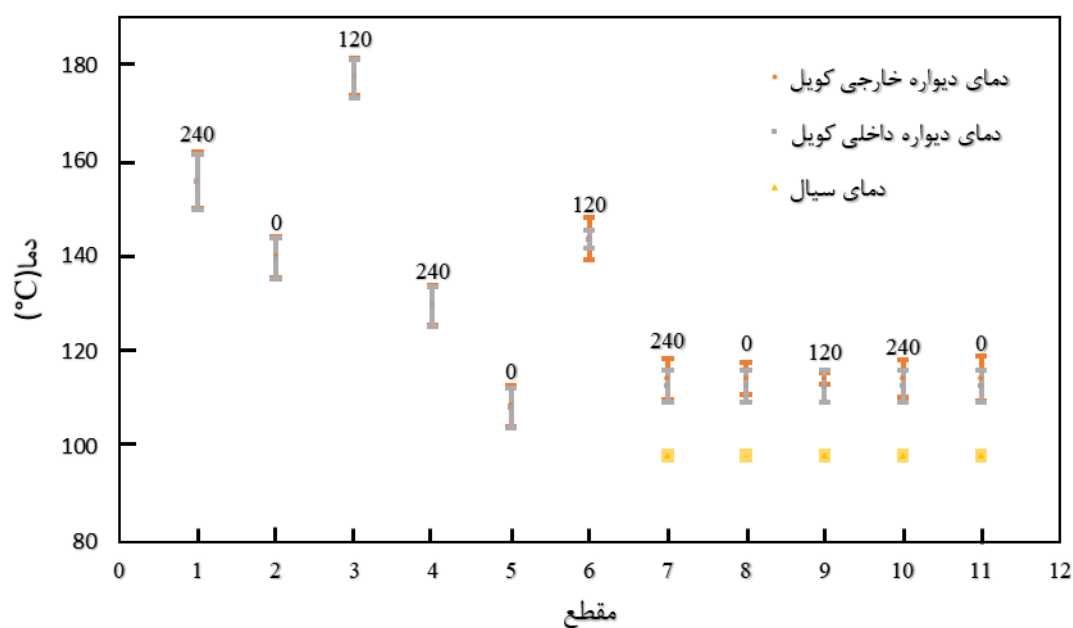
جدول ۴-۱: دمای محصولات ورودی و خروجی مبدل حرارتی

دبی حجمی (mlit/min)	دمای محصولات احتراق ورودی (°C)	دمای محصولات احتراق خروجی (°C)	دمای سیال ورودی (°C)	دمای سیال خروجی (°C)
۴۰۰	۵۴۳/۲۷	۲۲۹/۸۰	۵۲/۱۹	۱۰۳/۲۶
۵۰۰	۵۳۵/۸۰	۲۲۷/۸۶	۵۳/۱۲	۱۰۲/۶۵
۶۰۰	۵۳۲/۸۳	۲۲۶/۷۴	۵۴/۳۵	۱۰۱/۱۶
۷۰۰	۵۳۶/۳۰	۲۲۵/۲۱	۵۵/۲۵	۱۰۰/۳۴

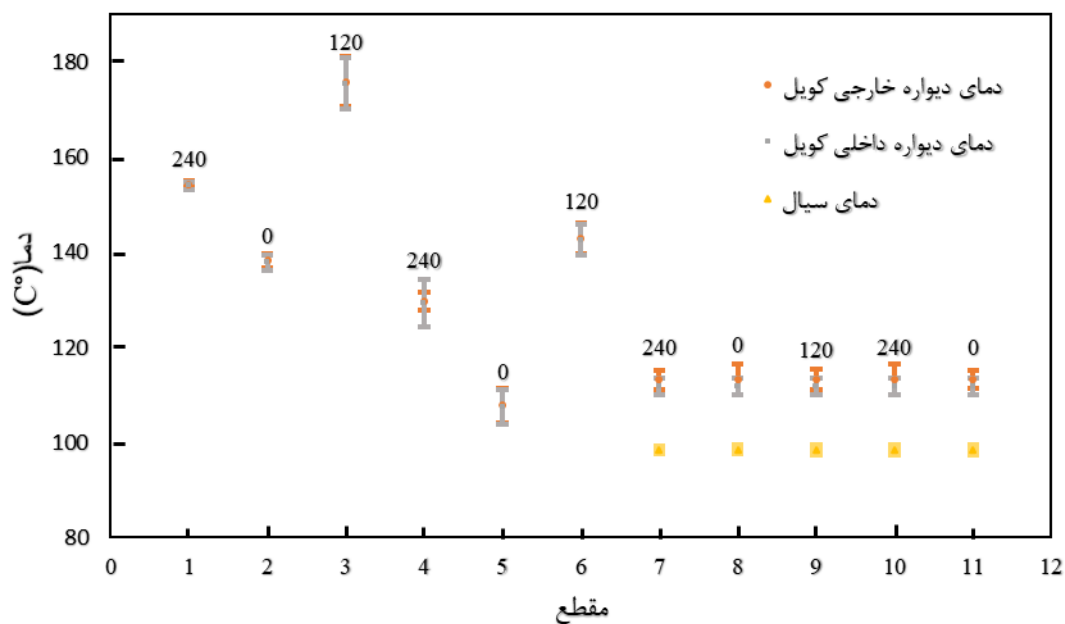
یکی از نتایج به دست آمده در آزمایش‌ها جریان دوفازی، دمای سطح کویل و سیال در آزمایش است. در شکل‌های ۴-۱ تا ۴-۴، نمودارهای دمای سیال و کویل برای آزمایش‌ها انجام شده در دبی‌های مختلف، ارائه شده است. مقاطع ذکر شده در نمودارها، طبق جدول ۴-۱، در فصل ۳، بیانگر محل قرارگیری سنسورها بر روی سطح خارجی کویل مارپیچ، می‌باشند.



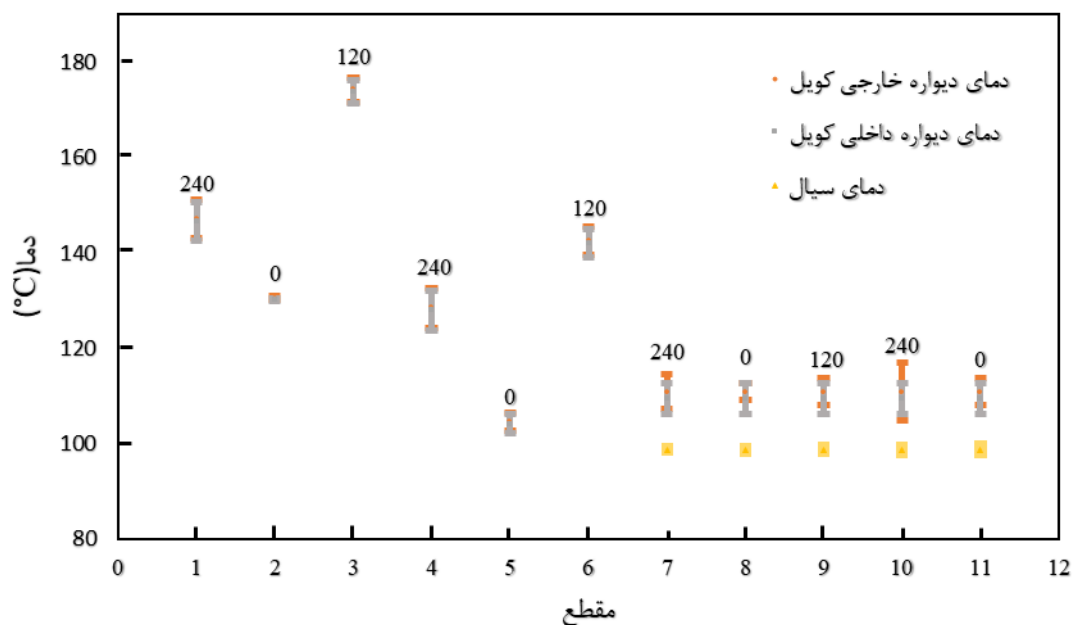
شکل ۴-۱: دمای سیال و کویل برای دبی 400 ml/min ، دمای ورودی سیال $52/19^\circ\text{C}$ ، دمای ورودی گاز مشعل $543/27^\circ\text{C}$



شکل ۴-۲: دمای سیال و کویل برای دبی 500 ml/min ، دمای ورودی سیال $53/12^\circ\text{C}$ ، دمای ورودی گاز مشعل $535/80^\circ\text{C}$



شکل ۳-۴: دمای سیال و کویل برای دبی 600 ml/min ، دمای سیال ورودی $54/35^\circ\text{C}$ ، دمای ورودی گاز مشعل $532/8^\circ\text{C}$



شکل ۴-۴: دمای سیال و کویل برای دبی 700 ml/min ، دمای سیال ورودی $55/25^\circ\text{C}$ ، دمای ورودی گاز مشعل $536/30^\circ\text{C}$

همان‌طور که در شکل‌های ۱-۴ تا ۴-۴، قابل‌مشاهده است، دمای دیواره خارجی و داخلی کویل برای سنسورهای هم زاویه دارای یک‌روند نزولی است تا مقطع ۷ که می‌توان گفت از این مقطع به بعد دمای سطح خارجی و داخلی کویل تغییرات بسیار کمی خواهد داشت. دلیل ثابت بودن دمای دیواره در این ناحیه،

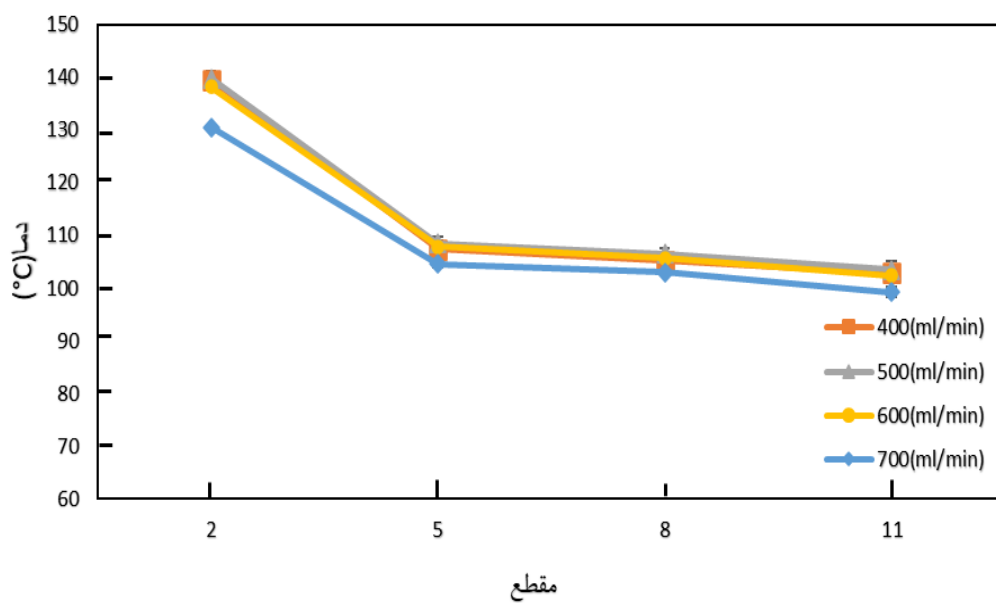
شروع فرآیند تغییر فاز سیال عبوری است که موجب افزایش قابل توجه انتقال حرارت در ناحیه دوفازی شده و توان حرارتی منتقل شده به سیال صرف تغییر فاز آن خواهد شد، لذا سیال عبوری در دمای ثابت اشباع، باقی خواهد ماند. این پدیده سبب می شود دمای سطح کویل در دبی های ۴۰۰ الی ۷۰۰ میلی لیتر بر دقیقه، به ترتیب در دمای ۱۱۳/۵، ۱۱۴/۲، ۱۱۳/۲ و ۱۱۰/۹ در این نواحی، تقریباً ثابت بماند. همچنین عدم قطعیت دماهای به دست آمده از سنسورها، 0.1°C ، می باشد. نکته ی حائز اهمیت که می توان به آن اشاره کرد، جدایش فازها^۱ است. همان طور که در فصل های قبل به آن اشاره شد، با توجه به اینکه در کویل های مارپیچ نیرویی تحت عنوان نیروی گریز از مرکز وجود دارد، جریان ثانویه^۲ ایجاد شده و به دنبال آن در جریان های دوفازی^۳ و حتی چند فاز، جدایش فاز را خواهیم داشت. از آنجایی که فاز مایع دارای چگالی بیشتری نسبت به فاز بخار است، در سمت بیرونی انحنا حرکت می کند و به دنبال آن فاز بخار در سمت درونی انحنا به حرکت خود ادامه می دهد. از این رو، در انتهای کویل، سیال مایع خروجی از کویل، به درون مخزنی منتقل شده و مقدار حجم آن اندازه گیری خواهد شد و در رابطه محاسبه کیفیت بخار خروجی قرار داده می شود.

از آنجایی که بر اساس طراحی صورت گرفته از کویل مارپیچ، ۱۱ عدد سنسور موجود در سطح خارجی کویل، در زوایای مشخصی از کویل ($240^{\circ}, 0^{\circ}$) قرار گرفته اند، جدول ۱-۳، از این رو، در ادامه، در شکل های ۴-۵ تا ۴-۸، به ارائه نمودارهای دمای سنسورهای هم زاویه (سنسورهایی که در یک زاویه ثابت و مشخص قرار دارند)، در سطح خارجی و داخلی کویل، می پردازیم:

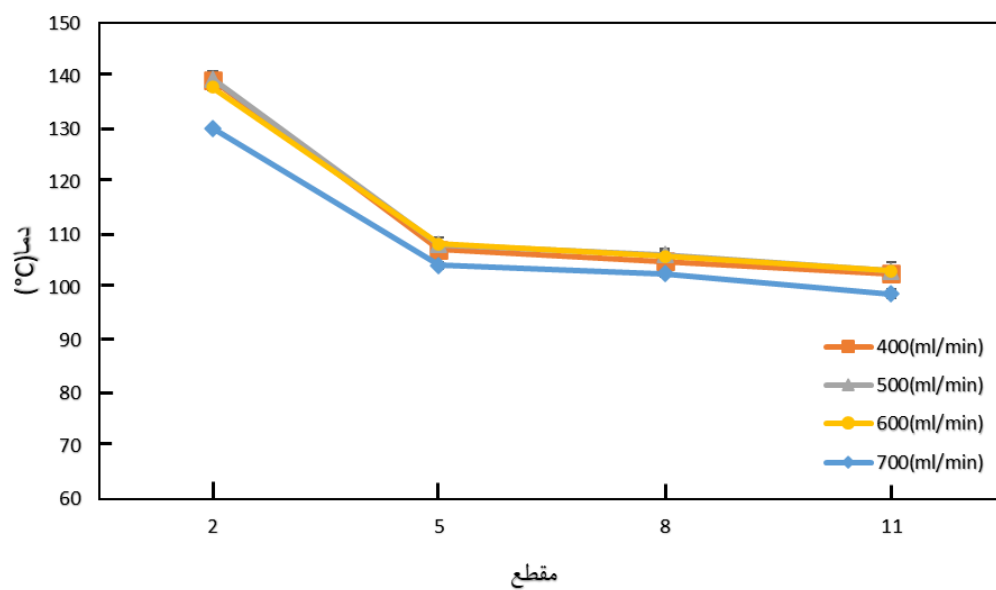
^۱ - Phase separation

^۲ - Secondary flow

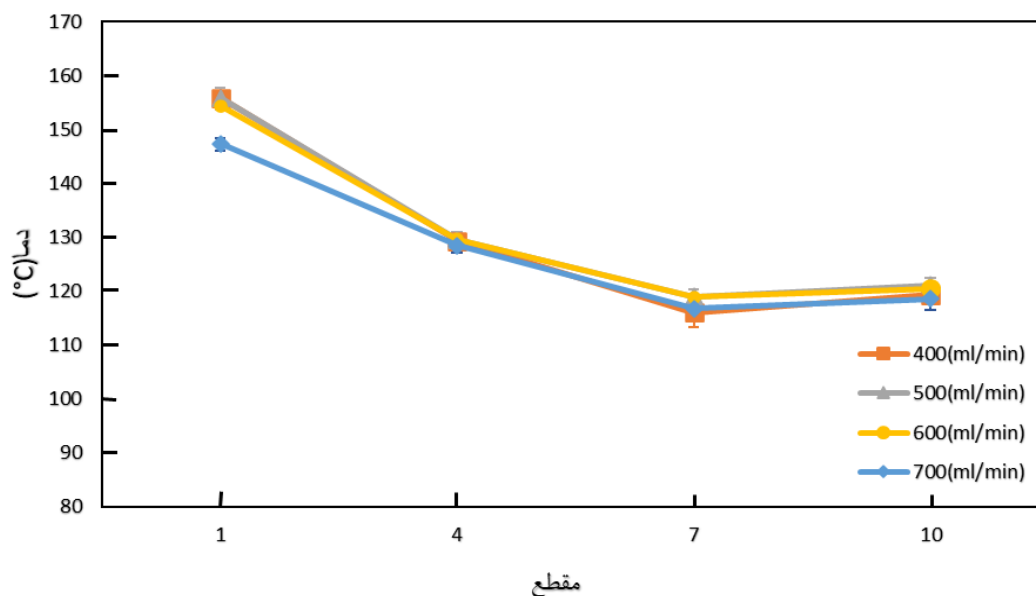
^۳ - Two phase flow



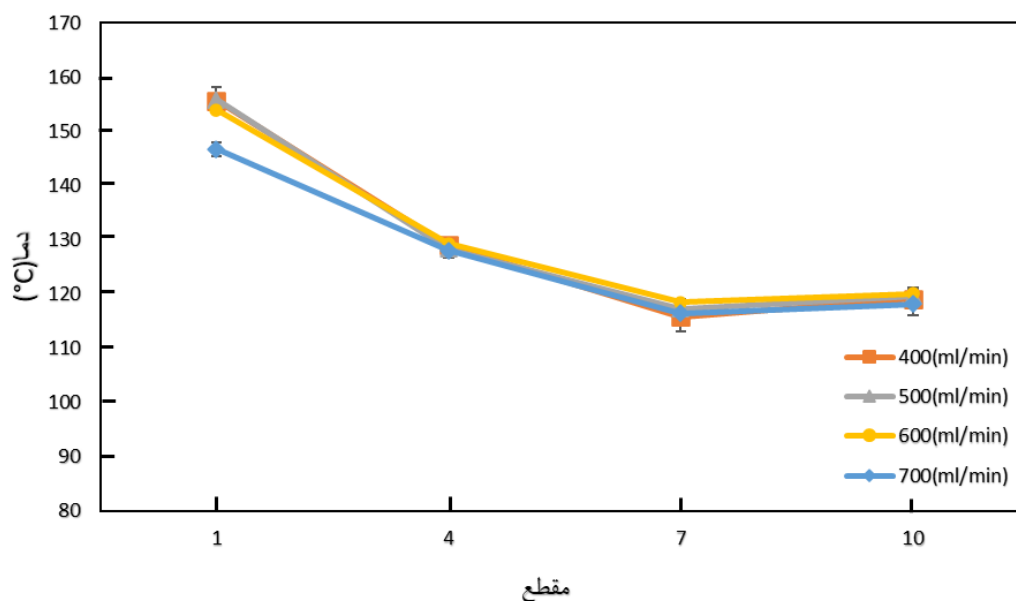
شکل ۴-۵: دمای سطح خارجی کویل در دبی‌های مختلف برای سنسورهای با زاویه $\theta = 0^\circ$ نسبت به خط عمودی



شکل ۴-۶: دمای سطح داخلی کویل در دبی‌های مختلف برای سنسورهای با زاویه $\theta = 0^\circ$ نسبت به خط عمودی



شکل ۴-۷: دمای سطح خارجی کویل در دبی‌های مختلف برای سنسورهای با زاویه $\theta = 240^\circ$ نسبت به خط عمودی



شکل ۴-۸: دمای سطح داخلی کویل در دبی‌های مختلف برای سنسورهای با زاویه $\theta = 240^\circ$ نسبت به خط عمودی

همان‌طور که در شکل‌های ۴-۵ تا ۴-۸، قابل‌مشاهده است، دمای سنسورهای هم زاویه بر روی سطح کویل، یک سیر نزولی را تا یک مقطع مشخص، دنبال می‌کند که از آن مقطع به بعد، تغییرات دمایی کمی را در این سنسورها مشاهده می‌کنیم. از علل آن می‌توان به این نکته اشاره کرد، از آنجایی که محصولات احتراق از ابتدا، توان حرارتی خود را به کویل منتقل می‌کنند، به تدریج دمای محصولات کاهش می‌یابد. در نتیجه دمای

سطح کویل از ابتدا در بالاترین میزان خود قرار دارد و هرچه به نقاط پایانی کویل نزدیک می‌شویم این دما سیر کاهشی را دنبال می‌کند تا مقطعی که به ثبات تقریبی می‌رسد.

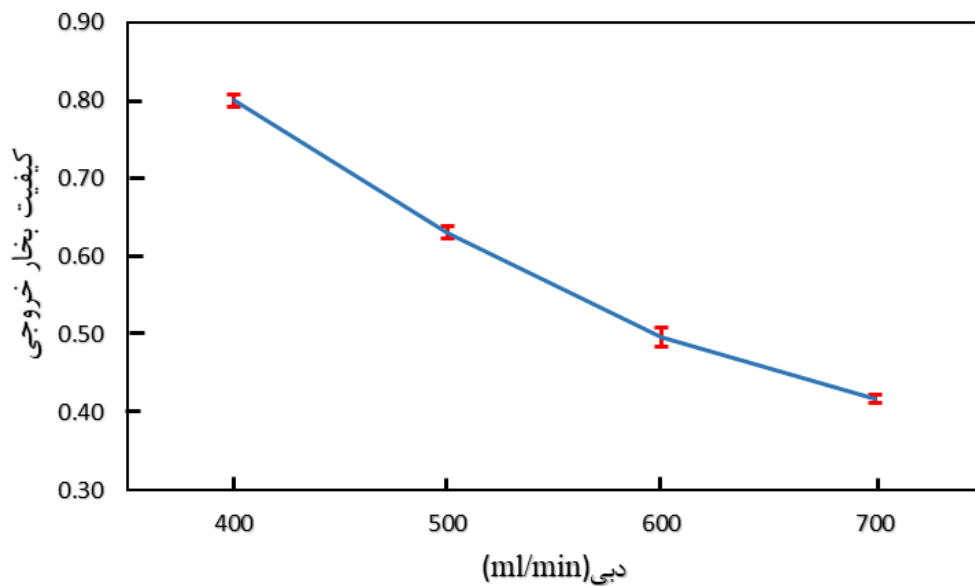
در جدول ۴-۲، ضریب انتقال حرارت دوفازی میانگین و عدم قطعیت آن و همچنین عدد ناسلت متناسب با ضریب انتقال حرارت دوفازی و کیفیت بخار خروجی از کویل، در دبی‌های مختلف ارائه شده است:

جدول ۴-۲: نتایج آزمایش‌ها دوفازی

دبی حجمی ($mlit/min$)	ضریب انتقال حرارت دوفازی ($W/m^2 k$)	عدم قطعیت ضریب انتقال حرارت دوفازی	ناسلت (Nu)	کیفیت بخار خروجی
۴۰۰	۵۴۰۴/۹۱	%۱/۴۵	۷۹/۹۲	۰/۸۰
۵۰۰	۵۴۶۳/۶۱	%۱/۵۰	۸۰/۷۷	۰/۶۳
۶۰۰	۵۶۸۵/۳۰	%۱/۳۳	۸۴/۰۳	۰/۴۹
۷۰۰	۶۹۲۰/۲۳	%۰/۸۸	۱۰۲/۲۷	۰/۴۱

جهت محاسبه ضریب انتقال حرارت دوفازی و کیفیت بخار خروجی به ترتیب از روابط ۴-۷ و ۴-۳ که در بخش قبل آمده است، استفاده خواهد شد.

همچنین نمودار کیفیت بخار خروجی از کویل مارپیچ در شکل ۴-۹، نمایش داده شده است:



شکل ۴-۹: تأثیر افزایش دبی حجمی بر کیفیت بخار خروجی از کویل
در جدول ۴-۲، مقادیر ضریب انتقال حرارت دوفازی در دبی‌های مختلف آورده شده است. همان‌طور که قابل‌مشاهده است با افزایش دبی حجمی، ضریب انتقال حرارت دوفازی، افزایش می‌یابد. از علل افزایش ضریب انتقال حرارت دوفازی، علاوه بر افزایش دبی حجمی می‌توان به کاهش اختلاف دمای سیال و دیواره کویل نیز اشاره کرد. به دنبال افزایش ضریب انتقال حرارت دوفازی میزان ناسلت نیز افزایش می‌یابد. همچنین همان‌طور که در جدول ۴-۲، قابل‌مشاهده است با افزایش دبی حجمی، کیفیت بخار خروجی، کاهش می‌یابد.

۴-۱-۳- محاسبه اثربخشی مبدل حرارتی

با توجه به روابط ۴-۸ تا ۴-۱۱، میزان اثربخشی^۱ مبدل حرارتی در آزمایش‌های مختلف، در جدول ۴-۳، نشان داده شده است [۵۲]:

$$C_c = \dot{m}_c C_{p,c} \quad ۴-۸$$

$$C_h = \dot{m}_h C_{p,h} = C_c \frac{(T_{c_o} - T_{c_i})}{(T_{h_i} - T_{h_o})} \quad ۴-۹$$

$$C_{min} = \min(C_c, C_h) \quad ۴-۱۰$$

^۱-Effectiveness

$$\varepsilon = \frac{q}{q_{max}} = \frac{C_c(T_{c,o} - T_{c,i})}{C_{min}(T_{h,i} - T_{c,i})} = \frac{C_h(T_{h,i} - T_{h,o})}{C_{min}(T_{h,i} - T_{c,i})} \quad ۱۱-۴$$

در روابط ۸-۴ تا ۱۱-۴ و $\dot{m}_h$ و $\dot{m}_c$ به ترتیب دبی سیال سرد و سیال گرم با واحد $(\frac{kg}{s})$ ، می‌باشند. C_{min}

نرخ ظرفیت حرارتی $(\frac{Kj}{k})$ ، $T_{h,o}$ و $T_{h,i}$ به ترتیب دمای سیال گرم خروجی و ورودی و همچنین $T_{c,i}$ و $T_{c,o}$

دمای سیال سرد خروجی و ورودی به مبدل حرارتی، می‌باشند. q و q_{max} به ترتیب انتقال حرارت واقعی و

حداکثر انتقال حرارت ممکن، می‌باشند.

جدول ۳-۴: اثربخشی مبدل حرارتی

دبی حجمی (mlit/min)	ε
۴۰۰	٪ ۶۴/۰۸
۵۰۰	٪ ۶۳/۹۵
۶۰۰	٪ ۶۴
۷۰۰	٪ ۶۴/۶۸

۴-۲- اعتبارسنجی

مقایسه‌ی نتایج آزمایشگاهی تحقیق حاضر و مقاله مرجع را در جدول ۴-۴، مشاهده می‌کنید. نتایج

به‌دست‌آمده در تحقیق حاضر، بر مبنای سیال عبوری آب از درون کوئل مارپیچ، با نتایج تحقیقات شیائو

جوان نیو و همکارانش که بر مبنای سیال R134a بوده و به‌صورت آزمایشگاهی در مبدل حرارتی کوئل

مارپیچ انجام‌شده، مقایسه شده است [۵۳].

جدول ۴-۴: اعتبارسنجی نتایج

مشخصات	مطالعه حاضر	مقاله مرجع [۵۳]
طول کویل ماریپچ (m)	۱/۳۲	۱/۸۵
قطر کویل (mm)	۹۲	۲۰۵
گام کویل (mm)	۳۰	۲۵
قطر داخلی کویل (mm)	۱۰	۸
شار جرمی ($\frac{kg}{m^2s}$)	۸۵/۳۵، ۱۰۷، ۱۲۷/۳۹، ۱۴۹/۰۴	۱۹۵، ۲۵۲، ۲۹۶، ۳۴۵
کیفیت بخار	۰/۴ - ۰/۸	۰/۱ - ۰/۹
ضریب انتقال حرارت میانگین ($\frac{W}{m^2k}$)	۵۰۰۰ - ۶۹۰۰	۴۵۰۰ - ۸۵۰۰

۴-۳- عدم قطعیت

با توجه به اینکه در محاسبات، در مواقعی مقدار دقیق خطا را نخواهیم داشت، به همین خاطر خطای محاسبات را با عدم قطعیت گزارش خواهیم کرد. به عبارتی دیگر می‌توان عدم قطعیت را تخمین احتمالی خطا تعریف نمود.

۴-۳-۱- اندازه‌گیری عدم قطعیت

عدم قطعیت پارامتر X را می‌توان از رابطه‌ی زیر محاسبه نمود:

$$\sigma_x = \frac{a}{L} \quad ۱۲-۴$$

که در رابطه ۴-۱۲، a دقت و L طول بازه تغییرات دستگاه اندازه‌گیری، است.

در نتیجه اگر $x, y, z, \dots$ پارامترهای تابع f باشند، عدم قطعیت تابع f از رابطه‌ی زیر قابل‌اندازه‌گیری خواهد بود [۵۵، ۵۴]:

$$\sigma_f = \left(\frac{\partial f}{\partial x}\right)^2 \partial x^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial y}\right)^2 \partial y^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial z}\right)^2 \partial z^2 + \dots \quad ۱۳-۴$$

همچنین نکات تکمیلی درباره تشریح روابط عدم قطعیت در پیوست، ذکر شده است.

با توجه به اینکه برای اندازه‌گیری پارامترهای مهمی از جمله: ضریب انتقال حرارت دوفازی، کیفیت بخار خروجی، دبی حجمی و ...، از تجهیزات آزمایشگاهی استفاده شده و از آنجایی این تجهیزات دارای خطای اندازه‌گیری هستند، از این‌رو در جدول ۴-۵، به خطای این تجهیزات، اشاره شده است.

جدول ۴-۵: خطای اندازه‌گیری

وسيله اندازه‌گیری	کمیت	واحد	خطا
پمپ	$\dot{m}$	$mlit/min$	۱
سنسور دما	ΔT	$^{\circ}C$	۰/۱
سنسور فشار	P	mbar	۰/۵
متر	L	mm	۱
کولیس	D	mm	۱
کرنومتر	Δt	s	۱
بشر مدرج	ΔV	ml	۲۵

فصل پنجم: نتیجه گیری و پیشنهادها

۵-۱- نتایج:

همان‌طور که در فصل قبل به آن اشاره شد، در این پژوهش به مدل‌سازی مبدل حرارتی دوفازی و همچنین بررسی و تحلیل تعدادی آزمایش در انتقال حرارت جوششی به همراه سیال آب، صورت پذیرفته است که در ادامه به ذکر مواردی از نتایج به‌دست‌آمده اشاره خواهد شد:

✓ با افزایش دبی حجمی از ۴۰۰ الی ۷۰۰ ($\frac{ml}{min}$)، ضریب انتقال حرارت دوفازی دارای سیر

صعودی از مقدار ۵۴۰۰ تا ۶۹۰۰ ($\frac{W}{m^2k}$) می‌باشد.

✓ با توجه به آزمایش‌های انجام‌شده در این تحقیق، به دلیل وجود جریان ثانویه در کوئل

مارپیچ، در خروجی جدایش فازها را مشاهده کرده‌ایم؛ و از آنجایی که فاز مایع دارای چگالی

بیشتری نسبت به فاز بخار است، در سمت بیرونی انحنا حرکت می‌کند.

✓ با جدایش فازها و به دنبال آن اندازه‌گیری فاز مایع خروجی از کوئل مارپیچ و همچنین

محاسبه کیفیت بخار خرجی از کوئل در هر آزمایش، مشاهده شده است، با افزایش دبی

حجمی سیال، کیفیت بخار خروجی دارای یک‌روند نزولی از مقدار تقریبی ۰/۸ تا ۰/۴

می‌باشد.

✓ نتایج به‌دست‌آمده نشان می‌دهد، دمای دیواره خارجی و داخلی کوئل برای سنسورهای هم

زاویه دارای یک‌روند نزولی تا مقطع ۷ در کوئل مارپیچ می‌باشد که می‌توان گفت از این

مقطع به بعد دمای دیواره داخلی و خارجی کوئل، به علت شروع فرآیند تغییر فاز سیال

عبوری که موجب افزایش قابل‌توجه انتقال حرارت در ناحیه دوفازی می‌شود، تغییرات

بسیار کمی را شاهد بوده‌ایم.

✓ نتایج به‌دست‌آمده در این تحقیق نشان می‌دهد، میزان اثربخشی مبدل حرارتی، به‌طور

میانگین ۶۴٪ می‌باشد.

۵-۲- ارائه پیشنهادها برای تحقیقات آینده

با توجه به نتایج به دست آمده در این پژوهش، نکاتی که برای افزایش کیفیت و ادامه روند این پژوهش می توان پیشنهاد نمود، به شرح زیر است:

✓ تحقیق و بررسی آزمایش ها در شکل های مختلف کوئل

✓ مدل سازی عددی جریان دوفازی در کوئل

✓ بررسی و مشاهده رژیم های جریان در کوئل مارپیچ

فصل ششم: مراجع

مراجع

- [1] H. Cuming, The secondary flow in curved pipes: HM Stationery Office, 1955.
- [2] M. Vasudevaiah, R. Rajalakshmi, Flow in a helical pipe, Indian J. Pure Appl. Math, Vol. 19, No. 1, pp.75-85,1988.
- [3] J. Jayakumar, S. Mahajani, J. Mandal, K. N. Iyer, P. Vijayan, CFD analysis of single-phase flows inside helically coiled tubes, Computers & chemical engineering, Vol. 34, No. 4, pp. 430-446, 2010.
- [4] Gou, J. Ma, H. Yang, Z. and Shan, J. 2017, "An Assessment of Heat Transfer Models of Water Flow in Helically Coiled Tubes Based on Selected Experimental Datasets, Ann. Nucl. Energy, 110, pp. 648–667.
- [5] Delhaye, J. M. Giot, M. and Riethmuller, M. L. 1981, Thermohydraulics of Two-Phase Systems for Industrial Design and Nuclear Engineering, Hemisphere Pub. Corp.
- [6] Hewitt, G. F. and Roberts, D. N. (1969). Studies of two-phase flow patterns by simultaneous X-ray and flash photography'. AERE-M 2 1 59, HMSO.
- [7] Aziz K. Govier G.W. & Fogarasi M. Pressure Drop in Wells Producing Oil and Gas, J.Canadian Petro. Tech,1972.

- [8] STEINER, D. and TABOREK, J. 1992, "Flow Boiling Heat Transfer in Vertical Tubes Correlated by an Asymptotic Model, *Heat Transf. Eng.* 13(2), pp. 43–69.
- [9] A.E. Bergles, Techniques to enhance heat transfer in: W.M. Rohsenow, J.P Hartnett, Y.I. Cho (eds), *Handbook of Heat Tansfer*, Mc-Graw Hill, New York, 1998, p. 11.1.
- [10] W.R. Dean, Notes on the motion of fluid in a curved pipe, *Philosophical Magazine*, 4(1927) 208–233.
- [11] W.R. Dean, The stream line motion of fluid in a curved pipe, *Philosophical Magazine*, 5 (1928) 673–695.
- [12] D.S. Austen, H.M. Soliman, Laminar flow and heat transfer in helically coiled tubes with substantial pitch, *Experimental Thermal and Fluid Science*, 1(1988) 183– 194.
- [13] D. J. McConalogue and R. S. Srivastava, Motion of a fluid in a curved tube, *Proceedings of the Royal Society of London, Series A, Mathematical and Physical Sciences*, Vol. 307(1968),37-53.
- [14] R.A. Seban, E.F. Mclanghlin, Heat transfer in tube coils with laminar and turbulent flow, *Int J Heat Mass Transfer*, 6(1963) 387–95.
- [15] A.N. Dravid, K.A. Smith, E.W. Merrill, P.L.T. Brain, Effect of secondary fluid on laminar flow heat transfer in helically coiled tubes, *AIChE J*,17 (1971) 1114–22.

- [16] RL. Manlapaz, SEW. Churchill, Fully developed laminar flow in a helically coiled tube of finite pitch. *Chem Eng Commun*, 1980, pp 57–78.
- [17] J.S. Jayakumar, S.M. Mahajani, J.C. Mandal, Kannan N. Iyer, P.K. Vijayan, CFD analysis of single-phase flows inside helically coiled tubes, *Computers & Chemical Engineering*, 34, 5(2010) 430-446.
- [18] P.S. Srinivasan, S.S. Nadapurker, F.A. Hlland, Friction Factor for Coil, *Trans. Inst. Chem. Eng.* 1970, Vol. 16, pp. 156-161.
- [19] G. Yang, F. Dong, M.A. Ebadian, Laminar forced convection in a helicoidal pipe with finite pitch, *Int J Heat Mass Transfer*, 38 (1995) 853–62.
- [20] P. Mishra, Gupta, Momentum Transfer in Curved Pipe; 1. Newtonian Fluids; 2. Non-Newtonian Fluid. *Ind. Eng. Chem. Process Des*, 1979, Dev. 18, pp. 130-142.
- [21] 39- A.P. Sasmito, J.C. Kurnia, A.S. Mujumdar, Numerical evaluation of laminar heat transfer enhancement in nanofluid flow in coiled square tubes”, *Nano scale Research Letters*, vol. 6, p.376, 2011.
- [22] Owhadi, A. Bell, K. J. and Crain, B. 1968, “Forced Convection Boiling inside Helically-Coiled Tubes, *Int. J. Heat Mass Transf.* 11(12), pp.1779–1793.
- [23] Chen, J. C. 1966, “Correlation for Boiling Heat Transfer to Saturated Fluids in Convective Flow, *Ind. Eng. Chem. Process Des. Dev.* 5(3), pp. 322–329.

- [24] Y. Xiao, Z. Hu, S. Chen, H. Gu, Experimental investigation and prediction of post-dryout heat transfer for steam-water flow in helical coils, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 127 (2018) 515-525.
- [25] L.A. Haryoko, J.C. Kurnia, A.P. Sasmito, Numerical Investigation of Subcooled Boiling Heat Transfer in Helically-Coiled Tube, *International Journal of Automotive and Mechanical Engineering*, 17 (2020) 7675-7686.
- [26] Hwang, K. W. Kim, D. E. Yang, K. H. Kim, J. M. Kim, M. H. and Park, H.S. 2014, “Experimental Study of Flow Boiling Heat Transfer and Dryout Characteristics at Low Mass Flux in Helically-Coiled Tubes, *Nucl. Eng. Des.* 273, pp. 529–541.
- [27] Chung, Y.J. Bae, K.H. Kim, K. K. and Lee, W.J. 2014, “Boiling Heat Transfer and Dryout in Helically Coiled Tubes under Different Pressure Conditions, *Ann. Nucl. Energy*, 71, pp. 298–303.
- [28] STEINER, D. and TABOREK, J. 1992, “Flow Boiling Heat Transfer in Vertical Tubes Correlated by an Asymptotic Model, *Heat Transf. Eng.* 13(2), pp. 43–69.
- [29] Y. Xiao, Z. Hu, S. Chen, H. Gu, Experimental investigation of boiling heat transfer in helically coiled tubes at high pressure, *Annals of Nuclear Energy*, 113 (2018) 409-419.
- [30] Y. Xiao, Z. Hu, S. Chen, H. Gu, Experimental study of two-phase frictional pressure drop of steam-water in helically coiled tubes with small coil diameters at high pressure, *Applied Thermal Engineering*, 132 (2018) 18-29.

- [31] R.C. Xin, A.Awwad, Z.F. Dong, M.A. Ebadian. An investigation and comparative study of the pressure drop in air–water two-phase flow in vertical helicoidal pipes. *Int J Heat Mass Transfer*, 1996;39:735–43.
- [32] A.Awwad, R.C. Xin, Z.F. Dong, M.A. Ebadian, H.M. Soliman. Measurement and correlation of the pressure drop in air–water two-phase flow in horizontal helicoidal pipes. *Int J Multiphase Flow*, 1995, pp 607–619.
- [33] NARIAI, H. KOBAYASHI, M. and MATSUOKA, T. 1982, “Friction Pressure Drop and Heat Transfer Coefficient of Two-Phase Flow in Helically Coiled Tube Once-Through Steam Generator for Integrated Type Marine Water Reactor, *J. Nucl. Sci. Technol.* 19(11), pp. 936–947.
- [34] Schrock, V. E. and Grossman, L. M. 1962, “Forced Convection Boiling in Tubes, *Nucl. Sci. Eng.* 12(4), pp. 474–481.
- [35] Y. Xiao, Z. Hu, S. Chen, H. Gu, Experimental study on dryout characteristics of steam-water flow in vertical helical coils with small coil diameters, *Nuclear Engineering and Design*, 335 (2018) 303-313.
- [36] H. Aria, M.A. Akhavan-Behabadi, F.M. Shemirani, Experimental investigation on flow boiling heat transfer and pressure drop of HFC-134a inside a vertical helically coiled tube, *Heat transfer engineering*, 33 (2012) 79-87.
- [37] K. Rangacharyulu, G. Davies, Pressure drop and holdup studies of air-liquid flow in helical coils, *The Chemical Engineering Journal*, 29 (1984) 41-46.

[38] Guo, L. J. Chen, X. J. Xu, C. Guo, C. and Lai, K. 1998, “Forced Convection Boiling Heat Transfer and Dryout Characteristics in Helical Coiled Tubes with Various Axial Angles, Proceedings of the 11th Conference IHTC, pp. 261–266.

[39] KOZEKI, M. NARIAI, H. FURUKAWA, T. and KUROSU, K. 1970, “A Study of Helically-Coiled Tube Once-Through Steam Generator, Bull. JSME, 13(66), pp. 1485–1494.

[40] Campolunghi, F. Cumo, M. Ferrari, G. Palazzi, G. 1976, “Full Scale Tests and Thermal Design Correlation for Coiled Once-through Steam Generators, AIChE Symp. Ser. 73(164), pp. 215–227.

[41] S. Chen, Z. Hu, Y. Xiao, H. Gu, Experimental investigation of subcooled flow boiling heat transfer in helical coils, Nuclear Engineering and Design, 327 (2018) 187-197.

[42] Bai, B. and Guo, L. 1997, “Study on Convective Boiling Heat Transfer in Horizontal Helically Coiled Tubes, Chinese J. Nucl. Sci. Eng. 17(4), pp. 302–308.

[43] Yi, J. Liu, Z.H. and Wang, J. 2003, “Heat Transfer Characteristics of the Evaporator Section Using Small Helical Coiled Pipes in a Looped Heat Pipe, Appl. Therm. Eng. 23(1), pp. 89–99.

[44] X. Niu, H. Yuan, L. Zhao, Experimental study on critical heat flux during flow boiling of R134a in a vertical helically coiled tube, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, 234 (2020) 3094-3101.

- [45] B. Sun, X. Yu, S. Liu, J. Shi, L. Yang, G. Zhang, P. Zhang, Non-uniform wall temperature distribution of nucleate boiling heat transfer in helically coiled tubes, *Nuclear Engineering and Design*, 330 (2018) 356-367.
- [46] Berger SA, Talbot L, Yao LS (1983) Flow in curved pipes. *Ann Rev Fluid Mech* 15:461–512.
- [47] Shah RK, Joshi SD (1987) Convective heat transfer in curved ducts (Chapter 3). In: Kakac S, Shah RK, Hung W (eds) *Handbook of single-phase convective heat transfer*. Wiley, New York.
- [48] Jayakumar JS, Grover RB (1997) Two phase natural circulation residual heat removal. In: *Proceedings of 3rd ISHMT-ASME heat and mass transfer conference*, Kanpur.
- [49] Kumar V, Saini S, Sharma M, Nigam KDP (2006) Pressure drop and heat transfer in tube-in-tube helical heat exchanger. *Chem Eng Sci* 61:4403–4416.
- [50] Ito, H. 1959, “Frictional Factors for Turbulent Flow in Curved Pipes, *ASME J. Basic Eng.* 81, pp. 123–134.
- [51] Srinivansan, P. S. and Nandapurkar, S. S. 1968, “Pressure Drop and Heat Transfer in Coils, *Chem. Eng.* (218), pp. 113–119.
- [52] Incropera, F. P. et al. (1996). *Fundamentals of heat and mass transfer*, Wiley New York.

[53] Niu, X. et al. (2019). "Flow boiling heat transfer of R134a in a vertical helically coiled tube. *Heat Transfer Engineering* 40(16): 1393-1402.

[54] Moffat, R. J. 1988, "Describing the Uncertainties in Experimental Results, *Exp. Therm. Fluid Sci.* 1(1), pp. 3–17.

[55] Bell, S. 2001, *A Beginner's Guide to Uncertainty of Measurement*, National Physical Laboratory.

[56] Kline, S. J. and McClintock, F. 1953, "Describing Uncertainties in Single-Sample Experiments, *Mech. Eng.* 75, pp. 3–8.

پوستها

پیوست الف: نتیجه آزمایش خواص آب

شماره نامه: ۲۲۰۳۳۰۰۳۳۱
شماره ثبت: ۲۲۰۳۳۰۰۳۳۱
شماره ثبت: ۲۲۰۳۳۰۰۳۳۱

نام شخص حقیقی: آقای/سرکاره: ...
نام شخص حقوقی: ...
تاریخ دریافت نمونه: ۱۴۰۱/۰۵/۲۳
تاریخ تحویل نتیجه: ۱۴۰۱/۰۵/۲۴

شماره نامه تحویل نتیجه: ۸۰۰۰۹۵۱۱
شماره نامه تحویل نتیجه: ۸۰۰۰۹۵۱۱

نتیجه آزمایش: ...
نتیجه آزمایش: ...
نتیجه آزمایش: ...

Ca ²⁺ (meq/lit)	Mg ²⁺ (meq/lit)	Na ⁺ (meq/lit)	Sum cations	HCO ₃ ⁻ (meq/lit)	Cl ⁻ (meq/lit)	SO ₄ ²⁻ (meq/lit)	CO ₃ ²⁻ (meq/lit)	Sum anions
2.08	0.80	4.78	7.58	1.30	4.10	2.40	0.00	7.80
Hardness (ppm)	K ⁺ (ppm)	T.D.S (ppm)	T.S.S (ppm)	E.C (μs/cm)	pH	NO ₂ (ppm)	NO ₃ (ppm)	P (ppm)
140	2.18	407	1.00	683	8.05	---	---	---
SSP	SAR	کیفیت‌های کربنات/سولفات	میزان کل‌کلرید/سولفات					
0.63	4.05	---	36±2					

مسئول اداره خدمات فنی و تخصصی پارک: ...
مسئول آزمایشگاه: ...
مسئول آزمایشگاه: ...

شماره ثبت: ۲۲۰۳۳۰۰۳۳۱
شماره ثبت: ۲۲۰۳۳۰۰۳۳۱
شماره ثبت: ۲۲۰۳۳۰۰۳۳۱

شکل ۶-۱: آزمایش خواص آب

پیوست ب: نتیجه آزمایش خواص مکانیکی کوپل

درخواست کننده: جناب آقای کرمانی نژاد
نشانی: مشهد- بلوار وکیل آباد- پلوار لادن
نام نمونه: لوله آرسلی
شماره شناسایی: ۹۶۰۶۰۱
تاریخ درخواست: ۱۳۹۶/۰۶/۰۱
تاریخ گزارش: ۱۳۹۶/۰۶/۰۴

بسمه تعالی

آزمایشگاه متالورژی جهاد شریف

گزارش نتایج آزمون

جهاد شریف

پژوهشکده توسعه تکنولوژی

نوع آزمون: کولتومتري

استاندارد کنترل شرایط محیطی: ASTM E 406-81(2012):2016

نتایج: برحسب درصد وزنی

Fe	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo
Base	0.0724	2.02	1.24	0.0239	< 0.00020	23	19.06	0.187
Al	Co	Cu	Nb	Ti	V	W	Pb	Sn
0.0329	0.38	0.115	0.0226	0.014	0.0526	0.0313	0.003	0.0138
Ca	Ta	B						
0.00062	0.0136	0.0043						

تعیین استاندارد معادل:

ترکیب شیمیایی فوق معادل با آلیاژ 314 در استاندارد AISI آمریکا می باشد.

Fe	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni
Base	≤0.25	1.50-3.00	≤2.00	≤0.045	≤0.030	23.0-26.0	19.0-22.0

کد سند: F-Che.02
شماره بازنگری: A
تاریخ بازنگری: ۹۹/۱۰/۱۹
شماره صفحه: ۱ از ۱

شکل ۶-۲: آزمایش خواص مکانیکی کوپل

پیوست ج: روش های آماری

۱-۶- تعاریف اصطلاحات

- خطا^۱: به اختلاف مقدار محاسبه شده (اندازه گیری شده) و مقدار واقعی یک پارامتر خطا می گویند.
- دقت^۲: به میزان نزدیک بودن مقدار محاسبه شده از یک پارامتر به مقدار واقعی آن، دقت می گویند.
- صحت^۳: به میزان نزدیک بودن نتایج آزمایش تحت شرایط یکسان در تکرارهای پی درپی را صحت آن آزمایش می گویند.

1- Error
2- Accuracy
3- Precision

۶-۲- خطاهای آزمایشگاهی

این نوع خطاها را می‌توان به دو نوع خطای تصادفی و سیستماتیک دسته‌بندی کرد که در ادامه به تشریح این دو خطا می‌پردازیم:

از جمله عواملی که باعث ایجاد خطای تصادفی خواهند شد، می‌توان به خطای خواندن، تغییرات در موقعیت وسیله اندازه‌گیری، تنظیم نبودن اتصالات و ... اشاره کرد.

همچنین عواملی که باعث ایجاد خطای سیستماتیک خواهند شد، می‌توان به کالیبره نبودن وسیله اندازه‌گیری اشاره کرد. نکته‌ای که حائز اهمیت است، آن است که در اندازه‌گیری که خطای سیستماتیک اتفاق نیافتد، به آن، اندازه‌گیری دقیق یا معتبر می‌گویند.

۶-۳- تحلیل عدم قطعیت

یکی از پارامترهای مربوطه در این بخش که می‌توان به آن اشاره کرد، میانگین متوسط^۱ است. به مجموع مقادیر موجود در مجموعه نتایج، تقسیم‌بر تعداد آن‌ها، میانگین متوسط می‌گویند. برای محاسبه این پارامتر، از رابطه‌ی زیر استفاده خواهد شد:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad ۱-۶$$

در بحث آماری، یکی از معیارهای پراکندگی را می‌توان به انحراف معیار^۲ اشاره نمود که این پارامتر به‌طور میانگین مقدار فاصله‌ی نتایج از میزان متوسط آن‌ها را نشان می‌دهد. از آنجایی که انحراف معیار را یکی از معیارهای پراکندگی دانستند، در صورتی که انحراف معیار مقداری بزرگ حاصل شود، نشان‌دهنده‌ی پراکندگی زیادی در نتایج است و بالعکس اگر انحراف معیار نزدیک به صفر باشد، بیانگر نزدیکی نتایج به میانگین است.

در نتیجه جهت محاسبه انحراف معیار از رابطه زیر می‌توان استفاده نمود:

^۱- Arithemtic mean

^۲- Standard deviation

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}} \quad ۲-۶$$

سرانجام عدم قطعیت برای پارامتر x_i در n بار تکرار آزمایش را می‌توان از رابطه‌ی زیر به دست آورد [۵۶]:

$$\sigma_E = \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \quad ۳-۶$$

۴-۶- روش فاصله اطمینان

برای محاسبه فاصله اطمینان و در پی آن حد بالا و پایین این فاصله، می‌توان از رابطه‌ی زیر استفاده نمود:

$$\mu = \bar{x} \pm (B + \frac{\sigma}{\sqrt{n}}) \quad ۴-۶$$

در رابطه ۴-۶، B ضریب تعمیم نامیده می‌شود که جهت بدست‌آوردن این پارامتر از جدول ۶-۱، استفاده

خواهد شد:

جدول ٦-١: تعیین ضریب تعمیم

t Table

cum. prob	t _{.50}	t _{.75}	t _{.80}	t _{.85}	t _{.90}	t _{.95}	t _{.975}	t _{.99}	t _{.995}	t _{.999}	t _{.9995}
one-tail	0.50	0.25	0.20	0.15	0.10	0.05	0.025	0.01	0.005	0.001	0.0005
two-tails	1.00	0.50	0.40	0.30	0.20	0.10	0.05	0.02	0.01	0.002	0.001
df											
1	0.000	1.000	1.376	1.963	3.078	6.314	12.71	31.82	63.66	318.31	636.62
2	0.000	0.816	1.061	1.386	1.886	2.920	4.303	6.965	9.925	22.327	31.599
3	0.000	0.765	0.978	1.250	1.638	2.353	3.182	4.541	5.841	10.215	12.924
4	0.000	0.741	0.941	1.190	1.533	2.132	2.776	3.747	4.604	7.173	8.610
5	0.000	0.727	0.920	1.156	1.476	2.015	2.571	3.365	4.032	5.893	6.869
6	0.000	0.718	0.906	1.134	1.440	1.943	2.447	3.143	3.707	5.208	5.959
7	0.000	0.711	0.896	1.119	1.415	1.895	2.365	2.998	3.499	4.785	5.408
8	0.000	0.706	0.889	1.108	1.397	1.860	2.306	2.896	3.355	4.501	5.041
9	0.000	0.703	0.883	1.100	1.383	1.833	2.262	2.821	3.250	4.297	4.781
10	0.000	0.700	0.879	1.093	1.372	1.812	2.228	2.764	3.169	4.144	4.587
11	0.000	0.697	0.876	1.088	1.363	1.796	2.201	2.718	3.106	4.025	4.437
12	0.000	0.695	0.873	1.083	1.356	1.782	2.179	2.681	3.055	3.930	4.318
13	0.000	0.694	0.870	1.079	1.350	1.771	2.160	2.650	3.012	3.852	4.221
14	0.000	0.692	0.868	1.076	1.345	1.761	2.145	2.624	2.977	3.787	4.140
15	0.000	0.691	0.866	1.074	1.341	1.753	2.131	2.602	2.947	3.733	4.073
16	0.000	0.690	0.865	1.071	1.337	1.746	2.120	2.583	2.921	3.686	4.015
17	0.000	0.689	0.863	1.069	1.333	1.740	2.110	2.567	2.898	3.646	3.965
18	0.000	0.688	0.862	1.067	1.330	1.734	2.101	2.552	2.878	3.610	3.922
19	0.000	0.688	0.861	1.066	1.328	1.729	2.093	2.539	2.861	3.579	3.883
20	0.000	0.687	0.860	1.064	1.325	1.725	2.086	2.528	2.845	3.552	3.850
21	0.000	0.686	0.859	1.063	1.323	1.721	2.080	2.518	2.831	3.527	3.819
22	0.000	0.686	0.858	1.061	1.321	1.717	2.074	2.508	2.819	3.505	3.792
23	0.000	0.685	0.858	1.060	1.319	1.714	2.069	2.500	2.807	3.485	3.768
24	0.000	0.685	0.857	1.059	1.318	1.711	2.064	2.492	2.797	3.467	3.745
25	0.000	0.684	0.856	1.058	1.316	1.708	2.060	2.485	2.787	3.450	3.725
26	0.000	0.684	0.856	1.058	1.315	1.706	2.056	2.479	2.779	3.435	3.707
27	0.000	0.684	0.855	1.057	1.314	1.703	2.052	2.473	2.771	3.421	3.690
28	0.000	0.683	0.855	1.056	1.313	1.701	2.048	2.467	2.763	3.408	3.674
29	0.000	0.683	0.854	1.055	1.311	1.699	2.045	2.462	2.756	3.396	3.659
30	0.000	0.683	0.854	1.055	1.310	1.697	2.042	2.457	2.750	3.385	3.646
40	0.000	0.681	0.851	1.050	1.303	1.684	2.021	2.423	2.704	3.307	3.551
60	0.000	0.679	0.848	1.045	1.296	1.671	2.000	2.390	2.660	3.232	3.460
80	0.000	0.678	0.846	1.043	1.292	1.664	1.990	2.374	2.639	3.195	3.416
100	0.000	0.677	0.845	1.042	1.290	1.660	1.984	2.364	2.626	3.174	3.390
1000	0.000	0.675	0.842	1.037	1.282	1.646	1.962	2.330	2.581	3.098	3.300
Z	0.000	0.674	0.842	1.036	1.282	1.645	1.960	2.326	2.576	3.090	3.291
	0%	50%	60%	70%	80%	90%	95%	98%	99%	99.8%	99.9%
	Confidence Level										

Abstract:

Helical coils are one of the most widely used converters in industry. Considering the positive features of using helical coils in heat exchangers, such as less occupation as well as higher heat transfer. Much research has been done on the use of different types of helical coils as well as their modeling. Helical coils and generally curved surfaces are widely used in industry. In helical coils, a centrifugal force will be created due to the radius of curvature. This force causes a secondary current to form in these coils. The effects of secondary current on coil coils can be improved by mixing current, increasing the heat transfer coefficient in two-phase and single-phase currents, and also mentioned the increase in pressure drop in this type of coils compared to flat coils. Use of Helical coils due to the higher effective level of these coils than direct coils. One of their most important advantages. In this research, an experimental study of two-phase (boiling) flow of water fluid, The helical coil is discussed and the results will be presented below.

Keywords:

Helical Coil, two-phase flow, Heat transfer coefficient, Steam quality



Shahrood University of Technology
Faculty of Mechanical and Mechatronics Engineering
M.Sc. Thesis in Energy Conversion Engineering

Experimental Investigation on Flow Boiling Heat Transfer in Helical Coils

By:

Ehsan Alinezhad Naddafi

Supervisor(s):

Dr. Mohsen Nazari

Dr. Mohammad Mohsen Shahmardan

February 2022