

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشکده مهندسی مکانیک و مکاترونیک

پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی تبدیل انرژی

بهینه‌سازی مبدل حرارتی پوسته و لوله مارپیچ با

استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی هوشمند

نگارنده: مهدی قاسمی بارفروش

اساتید راهنما:

دکتر سید مجید هاشمیان

دکتر موسی فرهادی

بهمن ۱۳۹۵

دانشگاه صنعتی شاهرود

دانشکده: مکانیک

گروه: حرارت و سیالات

پایان نامه کارشناسی ارشد آقای مهدی قاسمی بارفروش

تحت عنوان: بهینه‌سازی مبدل حرارتی پوسته لوله و مارپیچ با استفاده از الگوریتم‌های

بهینه‌سازی هوشمند

در تاریخ توسط کمیته تخصصی زیر جهت اخذ مدرک کارشناسی ارشد

مورد ارزیابی و با درجه مورد پذیرش قرار گرفت.

| امضاء | اساتید مشاور | امضاء | اساتید راهنما |
|-------|---------------------|-------|---|
| | نام و نام خانوادگی: | | نام و نام خانوادگی: دکتر سید مجید هاشمیان |
| | نام و نام خانوادگی: | | نام و نام خانوادگی: دکتر موسی فرهادی |

| امضاء | نماینده تحصیلات تکمیلی | امضاء | اساتید داور |
|-------|------------------------|-------|---------------------|
| | نام و نام خانوادگی: | | نام و نام خانوادگی: |
| | | | نام و نام خانوادگی: |
| | | | نام و نام خانوادگی: |
| | | | نام و نام خانوادگی: |

تقدیم به پدر و مادر دلسوز و مهربانم که زحماتشان با هیچ واژه‌ای قابل قدردانی نیست.

شایسته است از زحمات و راهنمایی‌های ارزشمند اساتید گرامی جناب آقای دکتر سید مجید هاشمیان و دکتر موسی فرهادی که در راستای انجام این پروژه مرا یاری نمودند و به هنگام نیاز از هیچ کمکی دریغ نوزیدند تشکر و قدردانی نمایم.

مهدی قاسمی

تعهد نامه

این جانب مهدی قاسمی بار فروش دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی مکانیک گرایش تبدیل انرژی دانشکده مکانیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه بهینه‌سازی مبدل حرارتی پوسته و لوله مارپیچ با استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی هوشمند تحت راهنمایی دکتر سید مجید هاشمیان و دکتر موسی فرهادی متعهد می‌شوم:

- تحقیقات در این پایان نامه توسط این جانب 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 پایان نامه 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 با نام « دانشگاه صنعتی شاهرود » و یا « Shahrood University of Technology » به چاپ خواهد رسید.
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان نامه تأثیرگذار بوده‌اند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت می‌گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که از موجود زنده (یا بافت‌های آنها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، 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، نرم افزارها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می‌باشد. این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود.

چکیده

انتقال حرارت و افت فشار دو پارامتر مهم و مؤثر در طراحی مبدل‌های حرارتی هستند. در پایان‌نامه حاضر بهینه‌سازی مبدل حرارتی پوسته و لوله مارپیچ با اهداف افزایش انتقال حرارت و کاهش افت فشار مورد بررسی قرار گرفته است. در اغلب مسائل مهندسی، اهداف مورد نظر برای بهینه‌سازی در تعارض با یکدیگر هستند. به طوری که با بهبود یک هدف، هدف دیگر به سمت نامطلوب پیش می‌رود. این مساله در این نوع از مبدل گرمایی نیز وجود دارد به طوری که با افزایش کارایی (مطلوب)، افت فشار نیز بالا می‌رود؛ بنابراین بجای یک جواب، دسته‌ای از جواب‌ها وجود دارند. مجموعه جواب‌ها در منحنی تحت عنوان منحنی پارتو به ارائه می‌شوند. ضریب کارایی مبدل (ϵ) که در رابطه خود دربردارنده ضرایب انتقال حرارت جابجایی هر دو سمت پوسته و لوله است، معیار مناسبی برای بررسی انتقال حرارت کلی مبدل محسوب می‌شود؛ بنابراین به‌عنوان یک تابع هدف در بهینه‌سازی در نظر گرفته شده است. همچنین میزان افت فشار سیال سمت لوله به‌عنوان تابع هدف بعدی مدنظر قرار گرفته است. تعداد سه متغیر برای بهینه‌سازی شامل شعاع لوله، شعاع مارپیچ و گام مارپیچ در نظر گرفته شدند. ابتدا با استفاده از معادلات حاکم یک مدل‌سازی حرارتی با استفاده از روش ϵ -NTU انجام شده و سپس با اجرای دو روش بهینه‌سازی تکاملی الگوریتم ژنتیک و الگوریتم ازدحام ذرات در محدوده متغیرها، توابع هدف بهینه شدند و در پایان مقادیر بهینه متغیرها و همچنین مقدار کارایی و افت فشار سیال در مبدل به‌صورت دسته جواب متناظر با جبهه پارتو ارائه شده است.

کلمات کلیدی: مبدل حرارتی پوسته و لوله مارپیچ، بهینه‌سازی چندهدفه، الگوریتم ژنتیک، الگوریتم ازدحام ذرات، ضریب کارایی مبدل، افت فشار

لیست مقالات مستخرج از پایان نامه

- ۱- مهدی قاسمی، سید مجید هاشمیان، موسی فرهادی، (۱۳۹۵)، "بهینه‌سازی دو هدفه مبدل حرارتی پوسته و لوله مارپیچ با استفاده از الگوریتم ژنتیک"، کنفرانس بین‌المللی دستاوردهای نوین پژوهشی در مکانیک، صنایع و هوافضا، تهران، ایران.

فهرست مطالب

| | |
|--|----|
| فصل ۱ مقدمه | ۱ |
| ۱-۱ کلیات | ۲ |
| ۲-۱ تعریف مساله | ۳ |
| ۳-۱ اهداف مطالعه | ۴ |
| ۴-۱ روش اجرای طرح | ۴ |
| فصل ۲ | ۷ |
| مبدل حرارتی پوسته لوله مارپیچ | ۷ |
| ۱-۲ مقدمه | ۸ |
| ۲-۲ دسته‌بندی مبدل‌های حرارتی | ۸ |
| ۳-۲ روش‌های افزایش انتقال حرارت | ۱۳ |
| ۱-۳-۲ روش‌های فعال | ۱۳ |
| ۲-۳-۲ روش‌های غیرفعال | ۱۴ |
| ۴-۲ مبدل‌های حرارتی لوله مارپیچ | ۱۵ |
| ۱-۴-۲ مشخصه جریان در لوله مارپیچ | ۱۶ |
| ۲-۴-۲ مطالعات انجام‌شده در زمینه الگوی جریان در لوله مارپیچ | ۱۷ |
| ۳-۴-۲ عدد رینولدز بحرانی و گذر از جریان آرام به آشفته | ۱۸ |
| ۴-۴-۲ مطالعات انجام‌شده در زمینه انتقال حرارت در لوله مارپیچ | ۱۹ |
| ۵-۲ مطالعات انجام‌شده در زمینه بهینه‌سازی انواع مبدل‌ها | ۳۶ |
| فصل ۳ مدل‌سازی گرمایی مبدل حرارتی پوسته و لوله مارپیچ | ۴۵ |

| | |
|----|---|
| ۴۶ | ۱-۳ فرضیات و شرایط عملکرد مبدل حرارتی |
| ۴۶ | ۲-۳ فرایند مدل سازی به روش $\varepsilon-NTU$ |
| ۴۹ | ۳-۳ روابط مربوط به انتقال حرارت سمت پوسته |
| ۴۹ | ۴-۳ روابط مربوط به انتقال حرارت سمت لوله |
| ۵۲ | ۵-۳ افت فشار |
| ۵۵ | فصل ۴ بهینه سازی |
| ۵۶ | ۱-۴ مقدمه |
| ۵۷ | ۲-۴ روش های بهینه سازی تکاملی |
| ۵۹ | ۳-۴ روش های بهینه سازی چند هدفه تکاملی |
| ۶۱ | ۴-۴ مفاهیم کلی موجود در الگوریتم های بهینه سازی چندهدفه |
| ۶۱ | ۱-۴-۴ مفهوم غلبه |
| ۶۳ | ۲-۴-۴ مفهوم جبهه پارتو |
| ۶۴ | ۳-۴-۴ مجموعه ممکن و محدوده ممکن |
| ۶۵ | ۴-۴-۴ مفهوم رتبه |
| ۶۵ | ۵-۴-۴ پراکندگی پاسخها |
| ۶۸ | ۵-۴ الگوریتم ژنتیک (GA) |
| ۶۸ | ۱-۵-۴ کلیات |
| ۷۰ | ۲-۵-۴ الگوریتم ژنتیک با مرتب سازی نامغلوب (NSGA-II) |
| ۷۴ | ۶-۴ الگوریتم بهینه سازی ازدحام ذرات (PSO) |
| ۷۴ | ۱-۶-۴ کلیات |
| ۷۶ | ۲-۶-۴ الگوریتم بهینه سازی ازدحام ذرات چند هدفه (MOPSO) |

| | |
|-----|--|
| ۷۹ | حل مسائل نمونه با کدهای نوشته شده و ارزیابی صحت نتایج آنها |
| ۸۱ | فصل ۵ نتایج و بحث |
| ۸۲ | ۱-۵ مقدمه |
| ۸۲ | ۲-۵ شرایط عملکرد مبدل حرارتی |
| ۸۳ | ۳-۵ توابع هدف |
| ۸۳ | ۴-۵ متغیرهای طراحی |
| ۸۴ | ۵-۵ اجرای الگوریتمها و ترسیم منحنی پارتو |
| ۸۴ | ۱-۵-۵ تعیین تعداد جمعیت و پارامترهای دو الگوریتم |
| ۸۵ | ۲-۵-۵ تعیین تعداد تکرار برای محاسبات |
| ۸۷ | ۳-۵-۵ بررسی انطباق و دقت منحنیهای پارتو برای دو الگوریتم |
| ۹۰ | ۴-۵-۵ منحنیهای پارتو در شرایط مختلف عملکرد مبدل |
| ۹۲ | ۶-۵ مقادیر بهینه طراحی |
| ۹۴ | ۷-۵ تحلیل عددی هندسه بهینه شده مبدل حرارتی |
| ۹۴ | ۱-۷-۵ ابعاد هندسه و شبکه بندی |
| ۹۵ | ۲-۷-۵ روشهای حل معادلات حاکم |
| ۹۶ | ۳-۷-۵ شرایط مرزی |
| ۹۶ | ۴-۷-۵ نتایج و تفسیر شبیه سازی عددی |
| ۱۰۳ | ۸-۵ جمع بندی و نتیجه گیری |
| ۱۰۴ | ۹-۵ پیشنهادها |
| ۱۰۶ | مراجع |

فهرست اشکال

- شکل (۱-۱): هندسه کلی یک مبدل حرارتی پوسته و لوله مارپیچ ۲
- شکل (۲-۱): حالت‌های مختلف قابل فرض برای لوله مارپیچ درون پوسته ۴
- شکل (۱-۲): مبدل حرارتی صفحه ای ۱۰
- شکل (۲-۲): شماتیک مبدل حرارتی دو لوله ای ۱۱
- شکل (۳-۲): مبدل حرارتی پوسته و لوله ۱۲
- شکل (۴-۲): مبدل حرارتی پوسته و لوله مارپیچ ۱۳
- شکل (۵-۲): لوله‌های مارپیچ درون پوسته مبدل ۱۶
- شکل (۶-۲): شماتیک سیستم آزمایشگاهی رنی و رقوان ۲۲
- شکل (۷-۲): شماتیک سیستم آزمایشگاهی سلیم‌پور ۲۳
- شکل (۸-۲): شماتیک سیستم آزمایشگاهی هاشمی و همکاران ۲۴
- شکل (۹-۲): شماتیک سیستم آزمایشگاهی کومار و همکاران ۲۶
- شکل (۱۰-۲): هندسه مبدل در نظر گرفته شده توسط حدادی و نظری ۳۰
- شکل (۱۱-۲): هندسه مبدل در نظر گرفته شده توسط سلباش و همکاران ۳۱
- شکل (۱۲-۲): هندسه مبدل در نظر گرفته شده توسط صنایع و همکاران ۳۳
- شکل (۱۳-۲): هندسه مبدل فشرده در نظر گرفته شده توسط حاج عبدالهی و همکاران ۳۴
- شکل (۱۴-۲): هندسه کندانسور در نظر گرفته شده توسط حاج عبدالهی و همکاران ۳۴
- شکل (۱-۳): هندسه و پارامترهای ابعادی مبدل پوسته و لوله مارپیچ ۴۴
- شکل (۲-۳): شماتیک کوئل مارپیچ در نظر گرفته شده توسط جوشی و شا ۵۱
- شکل (۱-۴): فرآیند بهینه‌سازی یک مساله ۵۵
- شکل (۲-۴): مقایسه پاسخ‌های یک مساله بهینه‌سازی دو هدفه در فضای حل ۶۰

- شکل (۳-۴): مجموعه جوابهای مغلوب و نامغلوب x ۶۱
- شکل (۴-۴): پاسخهای جبهه پارتو ۶۲
- شکل (۵-۴): محدوده ممکن و ناممکن در فضای حل ۶۲
- شکل (۶-۴): رتبه بندی نامغلوب پاسخها در فضای حل ۶۳
- شکل (۷-۴): شبکه بندی 5×5 فضای حل ۶۵
- شکل (۸-۴): فاصله ازدحامی عضو i ام پارتو ۶۶
- شکل (۹-۴): شبه کد الگوریتم ژنتیک ۶۸
- شکل (۱۰-۴): فلوجارت الگوریتم ژنتیک با مرتب سازی نامغلوب (NSGA-II) ۷۱
- شکل (۱۱-۴): شبه کد الگوریتم ازدحام ذرات ۷۴
- شکل (۱۲-۴): فلوجارت الگوریتم MOPSO ۷۶
- شکل (۱۳-۴): نتایج حاصل از به کارگیری کدهای نوشته شده برای چهار الگوریتم MOPSO و NSGA-II در یافتن پاسخهای پارتو مساله نمونه ۱ ۷۸
- شکل (۱۴-۴): نتایج حاصل از به کارگیری کدهای نوشته شده برای چهار الگوریتم MOPSO و NSGA-II در یافتن پاسخهای پارتو مساله نمونه ۲ ۷۸
- شکل (۱-۵): منحنیهای پارتو حاصل از بهینه سازی با الگوریتم ژنتیک با تکرارهای مختلف ۸۴
- شکل (۲-۵): منحنیهای پارتو حاصل از بهینه سازی با ازدحام ذرات با تکرارهای مختلف ۸۴
- شکل (۳-۵): مقایسه توزیع نقاط بهینه روی منحنیهای پارتو حاصل از بهینه سازی به کمک دو الگوریتم ۸۵
- شکل (۴-۵): توزیع نقاط بهینه روی منحنیهای پارتو در بازه کارایی $(0/6 - 0/5)$ ۸۶
- شکل (۵-۵): توزیع نقاط بهینه روی منحنیهای پارتو در بازه کارایی $(0/8 - 0/7)$ ۸۷
- شکل (۶-۵): مقایسه منحنیهای پارتو در شرایط مرزی شارثابت و دماثابت برای جداره لوله در مبدل ۸۸

- شکل (۷-۵): مقایسه منحنی‌های پارتو در شرایط جریان‌های موازی و مخالف در مبدل ۸۹
- شکل (۸-۵): توزیع نقاط بهینه در منحنی پارتو به دست آمده با استفاده از NSGA-II ۹۱
- شکل (۹-۵): لوله مارپیچ پره دار با پره‌های دایره ای ۹۳
- شکل (۱۰-۵): موقعیت صفحات و زوایای آنها جهت ترسیم کانتورها ۹۵
- شکل (۱۱-۵): کانتورهای سرعت در صفحات مختلف در طول لوله مارپیچ ۹۶
- شکل (۱۲-۵): کانتورهای مرتب شده سرعت در مقاطع مختلف ۹۶
- شکل (۱۳-۵): کانتورهای سرعت در نیم دور اول کوئل ۹۷
- شکل (۱۴-۵): بردارهای سرعت ذرات سیال نشان دهنده وجود جریان‌های ثانویه ۹۸
- شکل (۱۵-۵): کانتورهای فشار در صفحات مختلف در طول لوله مارپیچ ۹۸
- شکل (۱۶-۵): کانتورهای مرتب شده فشار در مقاطع مختلف ۹۹
- شکل (۱۷-۵): کانتورهای دما در صفحات مختلف در طول لوله مارپیچ ۱۰۰
- شکل (۱۸-۵): کانتورهای مرتب شده دما در مقاطع مختلف ۱۰۰
- شکل (۱۹-۵): لوله با پره‌های دایره ای ۱۰۳
- شکل (۲۰-۵): لوله با پره‌های صفحه ای ۱۰۳
- شکل (۲۱-۵): لوله با پره‌های میخی ۱۰۴

فهرست جداول

جدول (۱-۲): روابط ارائه شده جهت پیش بینی ضریب انتقال حرارت در طرفین لوله مارپیچ ۲۶

جدول (۲-۲): مطالعات صورت گرفته در زمینه بهینه‌سازی مبدل‌ها ۳۳

جدول (۱-۴): چند نمونه از مسائل بهینه‌سازی چندهدفه ۶۶

جدول (۱-۵): شرایط کارکرد مبدل حرارتی ۶۹

جدول (۲-۵): محدوده متغیرهای طراحی ۷۱

جدول (۳-۵): مقادیر انتقال حرارت و افت فشار برای نقاط بهینه A تا E موجود در منحنی پارتو... ۸۰

علائم و اختصارات

| | |
|-----------|---|
| A_t | مساحت انتقال حرارت سمت لوله (m^2) |
| b | گام لوله مارپیچ |
| C_{min} | کمترین مقدار بین C_c و C_h (W/K) |
| C_{max} | بیشترین مقدار بین C_c و C_h (W/K) |
| c_p | گرمای ویژه در فشار ثابت ($J/kg.K$) |
| C_r | نسبت ظرفیت‌های گرمایی |
| D | قطر پوسته (m) |
| d | قطر لوله (m) |
| De | عدد دین |
| e | متوسط آماری زبری سطح لوله |
| f | ضریب اصطکاک |
| Gz | عدد گرتز |
| h | ضریب انتقال حرارت جابجایی ($W/m^2.K$) |
| k | ضریب رسانش ($W/m.K$) |
| L | طول لوله مارپیچ (m) |
| \dot{m} | آهنگ جریان جرمی (kg/s) |
| NTU | تعداد واحدهای انتقال |
| Nu | عدد ناسلت |
| Pr | عدد پرانتل |

| | |
|------------------------------------|-------|
| عدد رینولدز | Re |
| شعاع کویل مارپیچ (m) | R_c |
| شعاع لوله (m) | r |
| ضریب کلی انتقال گرما ($W/m^2.K$) | U |

حروف یونانی

| | |
|-------------------------|---------------|
| کارایی مبدل | ε |
| نسبت انحنا | δ |
| افت فشار (Pa) | Δp |
| گام بدون بعد | γ |
| ویسکوزیته ($kg/s.m$) | μ |
| چگالی جرمی (kg/m^3) | ρ |

اندیس‌ها

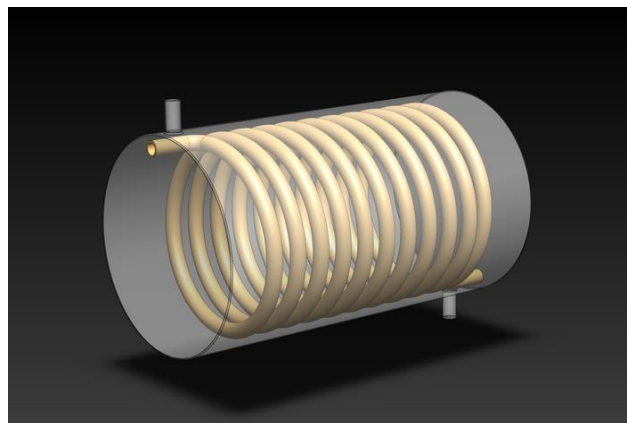
| | |
|------------------|-----|
| مشخصات سمت پوسته | s |
| مشخصات سمت لوله | t |
| مشخصات داخل لوله | i |
| مشخصات خارج لوله | o |
| جریان موازی | p |
| جریان مخالف | c |

فصل ۱

مقدمه

۱-۱ کلیات

گرمایش و سرمایش یک سیستم توسط سیال در بسیاری از صنایع از اهمیت زیادی برخوردار است. سیستم‌های خنک‌کننده و گرمایشی بر پایه روش‌های مختلف انتقال حرارت طراحی می‌شوند. با توجه به محدودیت‌های منابع انرژی در جهان و همچنین افزایش هزینه استفاده از انرژی در سال‌های اخیر، تحقیق در زمینه حفظ انرژی با هدف کاهش آن در فرآیندهای مختلف سرعت یافته است. در راستای این هدف، مطالعات بسیاری در زمینه انتقال حرارت در مبدل‌های حرارتی صورت گرفته است. بهبود انتقال حرارت در مبدل‌های حرارتی سبب کاهش اندازه مبدل شده و استفاده از مبدل‌های حرارتی فشرده‌تر و دارای بازده بالاتر باعث کاهش مصرف انرژی و هزینه بهره‌برداری می‌گردد. لوله‌های خمیده به علت ساختار فشرده و ضریب انتقال حرارت بالا یکی دیگر از روش‌های افزایش ضریب انتقال حرارت بشمار می‌روند. لوله‌های مارپیچ هلیکال^۱ و اسپیرال^۲ از انواع لوله‌های خمیده‌اند که کاربرد فراوانی در صنایع نفتی از جمله گرمایش نفت خام، گرمایش گاز طبیعی مایع، گرمایش قیر، فرایندهای تهویه مطبوع و سیستم‌های خنک‌کننده و پروسه‌های تولید غذا و لبنیات دارند. شکل (۱-۱) هندسه یک مبدل حرارتی پوسته و لوله مارپیچ را نشان می‌دهد.



شکل (۱-۱): هندسه کلی یک مبدل حرارتی پوسته و لوله مارپیچ

^۱ Helical

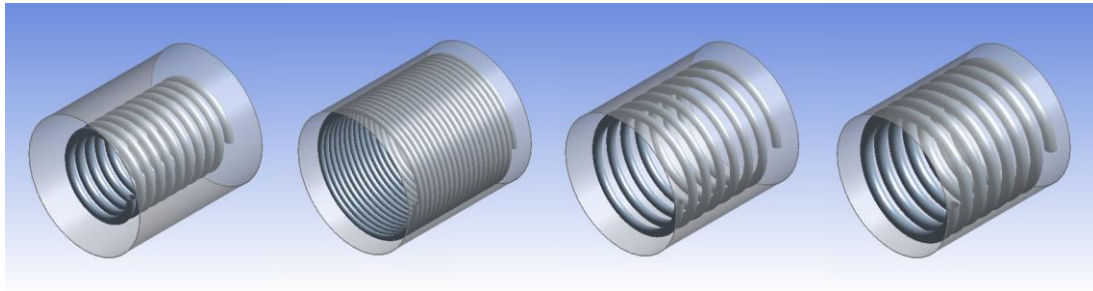
^۲ Spiral

در حالت کلی مبدل‌های پوسته لوله‌ای از متداول‌ترین سیستم‌های تبادل انرژی در صنایع مختلف می‌باشند. لذا در جهت افزایش راندمان و کاهش مصرف انرژی، عملکرد مبدل‌ها مورد ارزیابی و طراحی بهینه قرار می‌گیرد. در این راستا محققین با بررسی روش‌های مختلف بهینه‌سازی بهترین راه‌حل را در جهت یک طراحی مناسب با کمترین مصرف انرژی به دست می‌آورند. در این پایان‌نامه به مدل‌سازی حرارتی نوعی از مبدل حرارتی پوسته لوله با لوله‌های مارپیچ پرداخته شده و در ادامه بهینه‌سازی آن با استفاده از دو الگوریتم بهینه‌سازی تکاملی انجام شده است.

۲-۱ تعریف مساله

استفاده از هندسه‌های خاص، باعث افزایش انتقال حرارت در سیستم‌های حرارتی می‌گردد. با وجود مطالعاتی که در زمینه بررسی این نوع مبدل‌ها و ارائه روابط برای محاسبه انتقال حرارت و افت فشار آن‌ها انجام شده تا کنون پژوهشی در زمینه بهینه‌سازی چند هدفه در یک مبدل پوسته و لوله مارپیچ در شرایط مرزی و رژیم‌های جریان مختلف انجام نیافته است. هدف این پایان‌نامه، بهینه‌سازی دو هدفه مبدل حرارتی پوسته لوله مارپیچ جهت افزایش انتقال حرارت و کاهش افت فشار با تعیین بهترین مقدار برای پارامترهای متغیر هندسه لوله مارپیچ است.

برای این منظور یک مبدل حرارتی پوسته و لوله مارپیچ با محور افقی جهت بهینه‌سازی در نظر گرفته شد. برای یک مبدل از نوع پوسته و لوله مارپیچ با فرض اندازه قطر و طول ثابت برای پوسته و با توجه به مطالعات انجام‌شده در زمینه پارامترهای تأثیرگذار بر عملکرد مبدل، سه پارامتر متغیر برای هندسه لوله مارپیچ درون پوسته در نظر گرفته شده است که عبارت‌اند از شعاع لوله، شعاع مارپیچ و گام مارپیچ. می‌توان دریافت که با در نظر گرفتن مقادیر متعدد برای پارامترهای ذکرشده هندسه‌های متعددی برای کوئل درون پوسته قابل تصور خواهد بود که دارای عملکردهای متفاوتی هستند. شکل (۲-۱) این مفهوم را به‌طور واضح بیان می‌کند و تعدادی از حالات مختلف مبدل پوسته و لوله مارپیچ را که با تغییر متغیرهای هندسه لوله‌ها به دست می‌آیند نشان می‌دهد.



شکل (۲-۱): حالت‌های مختلف قابل فرض برای لوله مارپیچ درون پوسته

مسأله‌ای که در این مطالعه به آن پرداخته می‌شود یافتن مقادیر مناسب برای متغیرهای هندسه لوله مارپیچ است که استفاده از این مقادیر در طراحی مبدل، بهترین عملکرد را نتیجه می‌دهد.

۳-۱ اهداف مطالعه

با توجه به دو هدفه بودن مسأله امکان یافتن یک دسته جواب برای متغیرها وجود ندارد و هدف به دست آوردن مجموعه‌ای از جواب‌هاست که شامل بهترین مقادیر برای پارامترهای هندسی متغیر مسأله هستند. این دسته جواب‌ها که با عنوان منحنی پارتو در پایان ارائه می‌شوند می‌توانند گزینه‌های مناسبی جهت طراحی بهینه مبدل موردنظر باشند.

۴-۱ روش اجرای طرح

با توجه به اهداف مطالعه شاخص‌هایی که برای بررسی عملکرد مبدل میزان کارایی مبدل و افت فشار سمت لوله هستند. در واقع توابع هدف جهت بهینه‌سازی بر اساس این دو شاخص تعیین شدند. ابتدا با استفاده از روابط به دست آمده از مطالعات گذشته، مبدل موردنظر مدل‌سازی شد. برای برآورد کارایی از روش ε -NTU و جهت محاسبه افت فشار از روابط موجود در مراجع استفاده شد. در اغلب مسأله‌ها مهندسی، اهداف مورد نظر برای بهینه‌سازی در تعارض با یکدیگر هستند. به

طوری که با بهبود یک هدف، هدف دیگر به سمت نامطلوب پیش می‌رود. این مساله در این نوع از مبدل گرمایی نیز وجود دارد به طوری که با افزایش کارایی (مطلوب)، افت فشار نیز بالا می‌رود؛ بنابراین بجای یک جواب، دسته‌ای از جواب‌ها وجود دارند. مجموعه جواب‌ها در منحنی تحت عنوان، منحنی پارتو به دست آورده شده‌اند.

بهینه‌سازی هندسه مبدل پوسته و لوله مارپیچ با استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی چند هدفه تکاملی انجام گرفته است. از میان کارآمدترین الگوریتم‌های بهینه‌سازی تکاملی، الگوریتم ژنتیک با مرتب‌سازی نامغلوب (NSGA-II) و الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات چند هدفه (MOPSO) جهت بهینه‌سازی انتخاب شدند. همچنین از نرم‌افزار متلب^۱ جهت نوشتن و پیاده‌سازی الگوریتم‌های ذکر شده استفاده شد. سپس روابط مربوط به کارایی مبدل و افت فشار به‌عنوان توابع هدف برای برنامه تعریف شد و همچنین قطر لوله، قطر مارپیچ و گام مارپیچ به‌عنوان پارامترهای متغیر هندسه مبدل برای برنامه تعریف گردیدند. الگوریتم پس از اجرا و پردازش خروجی مطلوب را نتیجه می‌دهد.

^۱ Matlab

فصل ۲

مبدل حرارتی پوسته لوله مارپیچ

۱-۲ مقدمه

مبدل‌های حرارتی تجهیزاتی صنعتی می‌باشند که به کمک آن‌ها می‌توان در اثر تماس غیرمستقیم دو سیال، سیال دیگر را گرم یا سرد کرد. این تعریف به‌طور ضمنی بیان می‌کند که در یک مبدل حرارتی حداقل دو سیال وجود دارد که حرارت بین آن دو جابجا می‌شود. مبدل حرارتی کاربرد بسیار وسیعی در صنایع مختلفی از قبیل نیروگاه‌های تولید برق، پالایشگاه‌ها، صنایع ذوب فلز و شیشه‌سازی، صنایع غذایی و داروسازی، کاغذسازی، صنایع پتروشیمی، سردخانه‌ها و سیستم‌های گرمایش و سرمایش ساختمان‌ها، صنایع میعان گازها (مانند هوا) و صنایع الکتریک دارد. در ادامه مروری بر انواع مبدل‌ها، اصول انتقال حرارت در آن‌ها و روابط حاکم بر مبدل‌های حرارتی لوله مارپیچ خواهد شد.

۲-۲ دسته‌بندی مبدل‌های حرارتی

مبدل‌های حرارتی اصولاً بر اساس پیوستگی یا تناوب، پدیده انتقال، ساختمان مبدل و یا نوع جریان دسته‌بندی می‌شود. در مبدل‌های جریان پیوسته مجاری سیال گرم و سرد از هم تفکیک شده‌اند، به طوری که سیال گرم در مجاری مخصوص خود و سیال سرد نیز در مجاری مربوط به خود جریان دارند، سیالات در دو مجرای جریان توسط یک جداره لوله یا یک ورق از هم جدا شده‌اند. تقسیم‌بندی بر اساس پدیده انتقال به دو صورت مستقیم و غیرمستقیم می‌باشد. در انتقال انرژی بین دو سیال به‌صورت تماس مستقیم، حرارت بین دو سیال که با هم تماس مستقیم دارند مبادله می‌شود. معمولاً یکی از این دو سیال گاز و دیگر مایعی است با فشار بخار خیلی پایین و پس از تبادل حرارت به سادگی قابل تفکیک هستند. در نوع غیرمستقیم، حرارت ابتدا به یک سطح جامد نفوذناپذیر منتقل می‌شود و سپس از آن به سیال سرد انتقال می‌یابد. بر اساس نوع جریان، مبدل‌ها به سه دسته جریان موازی، مخالف و متقاطع تقسیم می‌شوند. در

بسیاری مواقع مبدل‌های حرارتی بر مبنای ساختمان تقسیم‌بندی می‌شوند. مبدل‌های حرارتی از نظر ساختمان به صورت زیر تقسیم‌بندی می‌شوند که عبارت‌اند از:

مبدل‌های حرارتی صفحه‌ای^۱: این مبدل‌ها از ورق‌های نازک صاف یا موجدار و به صورت مسطح و استوانه‌ای ساخته می‌شوند و بیشتر برای حالت مایع-مایع به کار می‌روند و خود به سه دسته صفحه و شاسی، مارپیچی و صفحه کویل تقسیم‌بندی می‌شوند. مبدل حرارتی صفحه‌ای حلزونی با پیچاندن دو صفحه بلند موازی به شکل یک حلزونی و جوش دادن لبه‌های صفحات مجاور به صورتی که یک کانال را تشکیل دهند، شکل داده می‌شود. در هر یک از دو مسیر حلزونی یک جریان ثانویه ایجاد می‌شود که انتقال حرارت را افزایش و تشکیل رسوب را کاهش می‌دهد. این نوع مبدل‌های حرارتی بسیار فشرده بوده و دارای قیمت تمام‌شده بالایی می‌باشند این نوع مبدل بیشتر در کاربرد سیال لجن‌آلود، مایعات لزج و مایعاتی با ذرات جامد معلق شامل ذرات بزرگ در جریان دو فاز مایع-جامد استفاده می‌شوند؛ زیرا این مبدل‌ها توانایی زیادی در خود تمیز کنی و کم کردن رسوب‌گیری دارند.

مبدل حرارتی صفحه‌ای پره‌دار^۲: در این مبدل در طرف مجاری عبوری هر کدام از سیال‌ها بین دو صفحه برای افزایش سطح تماس پره‌هایی قرار می‌گیرد. این پره‌ها موجب افزایش سطح تماس و در نتیجه انتقال حرارت بیشتر می‌شوند. علاوه بر آن پره‌ها موجب افزایش مقاومت مکانیکی و افزایش توان مبدل در تحمیل فشارهای بالا می‌گردد. این نوع از مبدل‌ها در تهویه مطبوع، پیش گرم‌کن‌های هوا و بازیاب در توربین‌های گازی استفاده می‌شود.

^۱ Plate heat exchanger

^۲ Flat plate heat exchanger

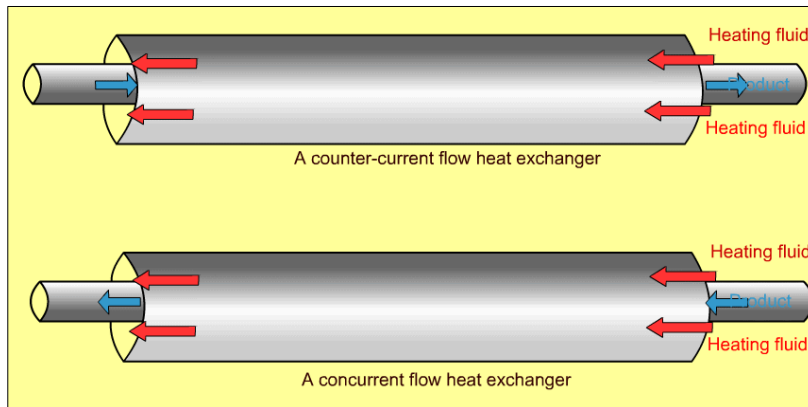


شکل (۱-۲) مبدل حرارتی صفحه‌ای

مبدل‌های حرارتی لوله‌ای^۱: این نوع از مبدل‌ها که در صنعت کاربرد بیشتری دارند خود به مبدل‌های تک لوله‌ای، دو لوله‌ای، لوله مارپیچ، چند لوله‌ای و پوسته و لوله تقسیم‌بندی می‌شوند. ساده‌ترین نوع مبدلی که در صنعت ساخته می‌شود مبدل حرارتی دو لوله‌ای^۲ است که از دو لوله‌ی هم‌محور تشکیل شده است. در این نوع مبدل یکی از سیال‌ها از درون لوله و سیال دیگر از مجاری بین دو لوله عبور می‌کند و به این ترتیب عمل انتقال حرارت صورت می‌پذیرد. از مزایای این نوع مبدل‌ها می‌توان به ساخت آسان و هزینه نسبتاً کم، محاسبات و طراحی آسان، کنترل ساده جریان‌های سیال در دو مسیر، نگهداری و تمیز کردن آسان و کاربرد در فشارهای زیاد اشاره کرد. در صنعت معمولاً برای سیالاتی که رسوب‌زا هستند از این نوع مبدل‌ها استفاده می‌شود.

^۱ Tube heat exchanger

^۲ Double tube heat exchanger



شکل (۲-۲) شماتیک مبدل حرارتی دو لوله‌ای

متداول‌ترین و پرکاربردترین نوع مبدل‌های حرارتی که در صنعت مورد استفاده قرار می‌گیرد مبدل‌های حرارتی پوسته و لوله^۱ می‌باشد که برای کاربردهای مختلف و در اندازه‌های گوناگون طراحی و ساخته می‌شود. از این نوع مبدل‌ها به منظور تبخیر یک مایع یا تقطیر کردن یک بخار و یا انتقال حرارت بین دو مایع استفاده می‌شود. اجزای تشکیل‌دهنده یک مبدل حرارتی لوله و پوسته عبارت‌اند از: دسته لوله، پوسته، سر جلو، سر عقب و صفحات نگه‌دارنده (بافل‌ها). این نوع از مبدل‌ها از تعداد زیادی لوله حاوی سیال که بخش خارجی آن با سیال دیگر در تماس می‌باشد تشکیل یافته و عمل انتقال حرارت از طریق سطح واسط که همان بدنه یا جداره لوله است امکان می‌پذیرد. لذا باید جنس‌ها به گونه‌ای انتخاب گردد که علاوه بر استقامت، رسانای خوب گرما نیز باشد.

^۱ Shell and tube heat exchanger



شکل (۲-۳) مبدل حرارتی پوسته و لوله

مبدل‌های حرارتی پوسته و لوله مارپیچ^۱، از یک یا چند حلقه لوله مارپیچ تشکیل شده‌اند که ابتدا و انتهای این لوله مارپیچ به لوله اصلی ورودی و خروجی متصل می‌شود و محفظه‌ای اطراف آن را می‌پوشاند. معمولاً جنس لوله‌های مارپیچ از فولاد کربن دار یا مس و آلیاژهای آن یا فولاد زنگ نزن و آلیاژهای نیکل می‌باشد. ابعاد این دست از مبدل‌ها در مقایسه با سایر مبدل‌های لوله‌ای کمتر است زیرا انتقال حرارت در مسیرهای منحنی و پیچ‌دار بیشتر از مسیر مستقیم است. از معایب و مزایای این نوع از مبدل‌ها می‌توان به موارد زیر اشاره نمود:

معایب: به دلیل کوچک بودن لوله مارپیچ تعمیر و جوشکاری آن‌ها مشکل و زمان‌بر است و به دلیل مارپیچ بودن لوله‌ها تمیز کردن آن‌ها عملاً مشکل می‌باشد.

مزایا: راندمان بالا، مونتاژ آسان، مقاومت مکانیکی در مقابل انبساط و انقباض و مناسب برای دبی‌های کم و بارهای حرارتی پایین.

^۱ Coiled tube heat exchanger



شکل (۲-۴) مبدل حرارتی پوسته و لوله ماریچ

۲-۳ روش‌های افزایش انتقال حرارت

برگلز و همکاران [1] روش‌های بهبود انتقال حرارتی را به دو دسته فعال و غیرفعال تقسیم کردند. میزان تأثیر هر روش علاوه بر شرایط اعمال آن شدیداً وابسته به نوع انتقال حرارت بوده که دامنه زیادی از جریان‌های جابجایی طبیعی و اجباری تک فاز و دو فاز را می‌پوشاند. به‌طور کلی با بررسی دسته‌بندی‌های مختلفی که در مقالات مختلف ارائه شده است، انواع روش‌های بهبود را می‌توان به دو دسته کلی زیر تقسیم کرد.

۲-۳-۱ روش‌های فعال

به روش‌هایی گفته می‌شود که برای اعمال آن‌ها به توان یا نیروی اعمالی خارجی به سیستم نیاز است. به دلیل پیچیدگی‌های زیاد در طراحی، اقبال زیادی به استفاده از این روش‌ها وجود ندارد. علاوه بر این در برخی از شرایط استفاده از این روش‌ها غیرممکن است. روش‌های زیر را می‌توان از نوع فعال دانست. تمام این روش‌ها دارای این نقطه ضعف بوده که هر کدام مستلزم هزینه اضافی هستند که باید در محاسبات اولیه برآورد هزینه‌ها مورد ارزیابی قرار گیرند تا مقرون‌به‌صرفه بودن آن‌ها صحت‌گذاری شود.

الف) ابزار مکانیکی : وسایل مکانیکی که برای به هم زدن سیال استفاده می‌شوند. این روش در صنایع

پلاستیک کاربرد زیادی دارد.

ب) ارتعاش سطوح : ارتعاش دیواره کانال مبدل در فرکانس‌های کم و زیاد یکی از روش‌های کسب بهبود در انتقال حرارت تک فازی است.

ج) ارتعاش سیال : یکی از عملی‌ترین روش‌های اعمال ارتعاش است که در مبدل‌های زیادی استفاده می‌شود. محدوده ارتعاش از ۱ هرتز تا مافوق صوت تغییر می‌کند. این روش بیشتر در جریان تک فاز مورد استفاده قرار می‌گیرد.

د) میدان الکتروستاتیکی : میدان‌های جهت‌دار الکتروستاتیکی برای کمک به اختلاط سیال در کنار سطحی که انتقال حرارت در آن صورت می‌گیرد، مورد استفاده قرار می‌گیرند. گاهی از اوقات از ترکیب میدان الکتریکی و مغناطیسی برای تشدید انتقال حرارت جابجایی استفاده می‌شود.

هـ) تزریق : شامل افزودن گاز به سیال در حال حرکت از طریق یک سطح انتقال حرارت متخلخل یا تزریق یک سیال مشابه به ناحیه‌ای که انتقال حرارت صورت می‌گیرد، می‌شود این روش نیز بیشتر در جریان تک فاز مورد استفاده قرار می‌گیرد.

و) مکش : می‌تواند شامل دفع بخار از طریق سطح انتقال حرارت متخلخل در انتقال حرارت جوششی یا دفع سیال از طریق سطح انتقال حرارت متخلخل در جریان تک فاز باشد.

۲-۳-۲ روش‌های غیرفعال

روش‌های غیرفعال شامل روش‌هایی است که نیاز به توان یا نیروی خارجی ندارند و در صورت نیاز به توان اضافی، از توان در دسترس سیستم استفاده می‌شود. روش‌های زیر را می‌توان از نوع غیرفعال دانست.

الف) کاهش ابعاد کانال : یکی از راه‌های بهبود انتقال حرارت در کانال‌ها، استفاده از کانال‌هایی با ابعاد کوچک‌تر و میل این ابعاد به ابعاد میکرو نانو است که در سال‌های اخیر به این موضوع توجه زیادی

شده است.

(ب) سطوح ناهموار : استفاده از سطوح ناهموار که به صورت تصادفی یا منظم روی سطح انتقال حرارت ایجاد می‌شوند. بیشتر برای تحریک سیال و ایجاد اغتشاش استفاده می‌شوند تا افزایش سطح انتقال حرارت.

(ج) سطوح گسترش‌یافته : استفاده از این روش در مبدل‌های حرارتی بسیار معمول است. سطوح گسترش‌یافته می‌توانند به صورت پره‌های داخلی یا خارجی باشند.

(د) ابزارهای جریان چرخشی : شامل تعداد از آرایش هندسی‌ها یا زوائد می‌شوند که در سیال حرکت دورانی یا چرخشی ایجاد می‌کنند، مانند تولیدکننده گردابه در ورودی؛ نوارهای پیچیده و ...

(ه) لوله‌های مارپیچ : باعث فشردگی شدن مبدل می‌شوند. جریان ثانویه ایجادشده در آن‌ها باعث افزایش ضریب انتقال حرارت تک‌فازی و توسعه نواحی جوششی در جریان دوفازی می‌شود. با توجه به اهمیت این روش‌ها و اقبال فراوان به استفاده از آن در صنایع مختلف و همچنین به دلیل استفاده از این نوع از لوله در این رساله، در ادامه این بخش بعد به طور گسترده مورد بررسی قرار می‌گیرند.

(و) مواد افزودنی : این مواد افزودنی می‌توانند به صورت مواد جامد و حباب‌های گازی برای سیال مایع و قطرات مایع و ذرات جامد برای سیال گازی باشند. یک نمونه پرکاربرد از این نوع بهبود انتقال حرارت، استفاده از نانو سیال است که در سال‌های اخیر بسیار مورد توجه قرار گرفته است. با ترکیب دو یا چند روش از روش‌های فوق می‌توان به بهبود بیشتری در انتقال حرارتی دست یافت. به این روش‌ها، روش‌های ترکیبی می‌گویند. در این رساله از دو روش غیرفعال در کنار یکدیگر به عنوان یک روش ترکیبی برای بهبود انتقال حرارت استفاده شده است.

۲-۴ مبدل‌های حرارتی لوله مارپیچ

لوله‌های خمیده به علت ساختار فشرده و ضریب انتقال حرارت بالا یکی از روش‌های غیرفعال

افزایش ضریب انتقال حرارت بشمار می‌روند. لوله‌های مارپیچ هلیکال و اسپیرال از انواع لوله‌های خمیده‌اند که کاربردهای فراوانی در فرایند احیاء تهویه مطبوع و سیستم‌های خنک‌کننده، راکتورهای شیمیایی پروسه‌های تولید غذا و لبنیات دارند. جریان و انتقال حرارت در لوله‌های مارپیچ بسیار پیچیده‌تر از لوله‌های ساده می‌باشند.



شکل (۲-۵) لوله‌های مارپیچ درون پوسته مبدل

۲-۴-۱ مشخصه جریان در لوله مارپیچ

میدان جریان در لوله مارپیچ بدون در نظر گرفتن اثر گام تحت تأثیر نیروی سانتریفوژ ناشی از انحنا قرار می‌گیرد. نیروی سانتریفوژ اعمالی روی ذره با انحنای مسیر حرکت و مجذور سرعت سیال متناسب است. در نزدیکی دیواره که سرعت‌ها کوچک هستند، نیروی سانتریفوژ نیز ناچیز خواهد بود. لیکن در مرکز لوله که سرعت‌ها بزرگ‌تر هستند، نیروی سانتریفوژ جریان را به سمت دیواره می‌راند. در حقیقت نیروی سانتریفوژ با یک گرادیان فشار موجود در صفحه عمود بر محور لوله موازنه می‌شود؛ اما در نزدیکی دیواره لوله، این گرادیان فشار نمی‌تواند با جریان موازنه شود و در نتیجه جریان به سمت داخل کشیده می‌شود و بنا بر پیوستگی، بخش داخلی سیال به سمت خارج لوله رانده می‌شود. این جریان که عمود بر جریان محوری است، جریان ثانویه خوانده می‌شود. این جریان ثانویه پروفیل‌های سرعت و دما را شدیداً تحت تأثیر قرار داده و باعث رانده شدن نقطه ماکزیمم این سرعت‌ها به سمت

دیواره بیرونی لوله می‌گردد؛ بنابراین می‌توان انتظار داشت که نیروی سانتریفوژ باعث افزایش نرخ انتقال حرارت و افت فشار گردد. مطالعات در زمینه جریان ثانویه نشان می‌دهد که با تغییر برخی پارامترها، جریان دچار تحول می‌شود؛ بنابراین انتخاب مشخصات لوله مارپیچ می‌تواند تأثیر زیادی بر خواص انتقال حرارت و میزان توان مورد نیاز جهت غلبه بر افت فشار داشته باشد. قرار گرفتن لوله مارپیچ به صورت افقی یا قائم نیز بر روی ضریب انتقال حرارت جابجایی بخصوص در سمت خارج لوله 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 در هم شدن پیش رفته و یا روی حرکت کلی جریان تأثیر گذاشته و باعث افزایش ضریب انتقال حرارت جابجایی می‌شود. [2]

۲-۴-۲ مطالعات انجام شده در زمینه الگوی جریان در لوله مارپیچ

اوستن و همکاران^۱ [3] متذکر شدند که انحنا در لوله هر چقدر هم کم باشد، تمایل به اصلاح سرعت‌های بحرانی که مشخصه تبدیل رژیم جریان از آرام به درهم است دارد. ایشان با تزریق جوهر به آب جاری در لوله‌های مارپیچ، لوله‌های U شکل و زانویی برای نخستین بار جریان ثانویه را مشاهده کرد. او همچنین با وارد کردن ماسه به درون جریان آشفته الگوی مشابهی را مشاهده نمود. دین^۲ [4] و [5] در بررسی خود بر روی لوله‌های مارپیچ دریافت که کاهش دبی مربوط به انحنا در سرعت‌های پایین تابعی از یک پارامتر k است که به صورت $k = 2(Re)^2 \frac{r}{R_c}$ تعریف می‌شود در این رابطه Re عدد رینولدز، r شعاع لوله و R_c شعاع انحنا می‌باشد. و این رابطه را با فرض کوچک بودن نسبت r/R_c و ساده‌سازی‌های بسیاری در معادلات اساسی پیوستگی و ممنتم به دست آورد. دین علت لزوم برقراری گرادیان فشار بالاتر جهت ایجاد یک دبی مشخص در لوله‌های منحنی را به بخشی از سیال در نوسان پیوسته بین بخش مرکزی لوله که سرعت آن بالاست و بخش بیرونی لوله که سرعت آن پایین است نشان داد.

^۱ Austen et al.

^۲ Dean

وایت^۱ [6] مطالعه دین را برای جریان آرام درون لوله با آب و روغن انجام داده و نشان داد که

شروع جریان آشفته تنها تابع عدد رینولدز و یا تابع معیار دین ($De = Re \sqrt{r/R_c}$) نیست.

مک کونالوگ و سریواستاوا^۲ [7] با استفاده از روش عددی به بررسی مشخصات جریان ثانویه در جریان کاملاً توسعه یافته پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد که با افزایش سرعت محوری، مقدار ماکزیمم سرعت و همچنین حرکات چرخشی به دیواره خارجی لوله، نزدیک‌تر می‌گردند.

۲-۴-۳ عدد رینولدز بحرانی و گذر از جریان آرام به آشفته

عدد رینولدز بحرانی در انتقال از جریان آرام به درهم در لوله‌های مارپیچ به صورت تابعی از پارامترهای مارپیچ می‌باشد. عدد رینولدز بحرانی را می‌توان با استفاده از رابطه‌های زیر به دست آورد:
رابطه ایتو^۳: [8]

$$Re_{cr} = 20000 \left(\frac{r}{R_c} \right)^{0.32} \quad (1-2)$$

رابطه اشمیت^۴: [9]:

$$Re_{cr} = 2300 [1 + 8.6 \left(\frac{r}{R_c} \right)^{0.45}] \quad (2-2)$$

رابطه سریناواس و همکاران^۵: [10]:

^۱ White

^۲ McConalogue and Srivastava

^۳ Ito

^۴ Schmidt

^۵ Srinavas et al.

$$Re_{cr} = 2100[1 + 12(r/R_c)^{0.5}]$$

در نسبت‌های انحنا^۱ ($\delta = r/R_c$) کمتر از $1/860$ ، می‌توان عدد رینولدز بحرانی را همانند لوله صاف به دست آورد. در $\delta < 0.05$ ، تمامی روابط پیشنهادشده، نتایج یکسانی دارند و در تمامی نسبت‌های انحنا روابط پیشنهادی ایتو [8] و اشمیت [9] به عدد رینولدز بحرانی یکسان می‌انجامند.

۴-۴-۲ مطالعات انجام‌شده در زمینه انتقال حرارت در لوله مارپیچ

مطالعات صورت گرفته در زمینه انتقال حرارت در لوله‌های مارپیچ به صورت عددی و تجربی می‌باشد به دلیل پیچیدگی‌هایی که در زمینه انتقال حرارت در لوله‌های مارپیچ وجود دارد، بررسی تجربی کمتری انجام شده است. بیشتر بررسی‌های انجام‌شده به شرایط مرزی دمای دیوار ثابت و شار حرارت ثابت بر روی دیوار محدود می‌شود. شرط دمای ثابت دیوار یک شرط مرزی ایده آل در مبدل‌های حرارتی که همراه با تغییر فاز در سمت خارجی لوله است و شرط شار حرارت ثابت شرط مرزی مناسبی برای لوله‌هایی که تحت گرمایش الکتریکی و یا تحت اثر حرارت ناشی از سوخت هسته‌ای هستند، می‌باشد. با وجود اینکه در بسیاری از کاربردهای عملی، با انتقال حرارت سیال به سیال بدون تغییر فاز وجود داشته، بررسی‌های انجام‌شده در زمینه انتقال حرارت سیال به سیال محدود است. در ادامه به طور خلاصه، بررسی‌های صورت گرفته در رابطه با لوله‌های مارپیچ تحت شرایط مرزی مختلف آورده شده است.

سبان و مک لاوین^۲ [11] انتقال حرارت در لوله‌های مارپیچ را برای جریان آرام و آشفته تحت شرط مرزی شار حرارت ثابت دیوار مورد بررسی قرار داده‌اند. بدین منظور از کویل‌های مجهز به

^۱ Curvature Ratio

^۲ Seban and McLaughlin

فشارسنج و ترموکوپل استفاده شده است. ترموکوپل‌ها در هر دور محیط داخلی و خارجی نصب شده و نمودارهای عدد ناسلت^۱ بر حسب عدد گراتز^۲ برای کویل‌های با نسبت انحنا ۷:۱ و ۱۴:۱ در محدوده عدد رینولدز ۱۲ تا ۵۶۰۰ برای جریان آرام، رسم گردید. عدد پرانتل بین اعداد ۱۰۰ و ۶۵۷ متغیر بوده و نتایج نشان می‌دهد که عدد ناسلت محیط خارجی بالاتر از عدد ناسلت محیط داخلی می‌باشد (حدود چهار برابر) و البته هر دو عدد ناسلت به‌طور قابل توجهی از عدد ناسلت لوله مستقیم بالاتر می‌باشند. آن‌ها رابطه‌ای را برای محاسبه عدد ناسلت بر حسب عدد رینولدز و ضریب اصطکاک به صورت زیر ارائه داده‌اند:

$$Nu = A Pr^{1/3} \left[\frac{f}{8} (Re)^2 \right]^{1/3} \quad (۴-۲)$$

مقدار A در کویل با نسبت انحنا ۷:۱ برابر ۰/۱۳ می‌باشد. سبان و مک لاین [11] با استفاده از همان دستگاه آزمایش رابطه زیر را برای جریان آشفته ارائه نمودند.

$$Nu \cdot Pr^{-0.4} = \frac{f}{8} Re \quad (۵-۲)$$

دراوید و همکاران^۳ [12] انتقال حرارت در لوله‌های مارپیچ هلیکال را در رژیم جریان آرام به صورت عددی بررسی کرده و رابطه‌ای برای محاسبه عدد ناسلت ارائه نموده و نهایتاً نتایج حاصله را با نتایج عددی مقایسه کرده‌اند.

$$Nu = (0.65\sqrt{De} + 0.76) Pr^{0.175} \quad (۶-۲)$$

^۱ Nusselt number (Nu)

^۲ Graetz number (Gz)

^۳ David et al.

جایاکومار و همکاران^۱ [13] انتقال حرارت در لوله‌های مارپیچ را تحت شرایط مرزی دما و شار حرارتی ثابت دیواره بررسی نموده‌اند. نتایج این بررسی نشان می‌دهد که گام مارپیچ تنها در منطقه در حال توسعه مؤثر بوده و عدد ناسلت محلی در اثر پیچش ایجادشده در جریان، به گام مارپیچ وابسته می‌باشد. ایشان رابطه‌ای جهت محاسبه عدد ناسلت با توجه به شرایط مرزی مساله ارائه نمودند. نتایج حاصل از روابط پیشنهادی در اعداد رینولدز بالاتر از ۵۰۰۰۰ به جواب‌های یکسانی می‌انجامد. در بررسی دیگر [14]، ایشان به بررسی مبدل پوسته لوله با لوله‌های مارپیچ به صورت تجربی و عددی پرداخته و رابطه‌ای جهت محاسبه ضریب انتقال حرارت داخل لوله ارائه نمودند که این روابط در جدول ادامه فصل قرار داده شده است.

مطالعات عددی میدان سرعت کاملاً توسعه‌یافته و میدان درجه حرارت با شرط مرزی شار حرارتی ثابت و فرض دمای ثابت در عرض محیط لوله توسط کالب و سیدر^۲ [15] با فرض گام بسیار کوچک انجام شده است. آن‌ها نتیجه گرفتند که انحنا اثر ناچیزی بر عدد ناسلت متوسط (در هر عدد پرانتل) دارد. لیکن اثر انحنا بر توزیع محیطی عدد ناسلت قابل اغماض می‌باشد. در اعداد پرانتل بالاتر از ۷۰، عدد ناسلت محلی سطحی داخلی لوله مارپیچ از لوله مستقیم کمتر بوده و با افزایش عدد دین رشد کمتری را از خود نشان می‌دهد، درحالی‌که عدد ناسلت محلی سطح خارجی با افزایش عدد دین، از رشد چشمگیری برخوردار است. افزایش انتقال حرارت در بررسی ایشان بسیار بیشتر از افزایش افت فشار بود.

یانگ و همکاران^۳ [16] به صورت عددی به بررسی آثار اعداد دین و پرانتل در جریان آرام و توسعه‌یافته در لوله هلیکال با شرایط مرزی شار حرارتی ثابت پرداختند. در اعداد پرانتل بالا با افزایش پیچش لوله عدد ناسلت به شدت کاهش می‌یابد. اما در اعداد پرانتل پایین این تغییرات به آرامی صورت می‌گیرد.

^۱ Jayakumar et al.

^۲ Kalb and Seader

^۳ Yang et al.

یانگ و عبادیان^۱ [17] جریان درهم داخل لوله هلیکال با طول محدود را به صورت عددی بررسی نمودند. نتایج حاصل از این بررسی نشان می‌دهد که با افزایش گام، توزیع دما در مقطع عمودی نامتقارن شده و با افزایش دبی جریان، آثار گام تشدید می‌گردد.

از جمله مبدل‌های حرارتی لوله مارپیچ سیال به سیال می‌توان به پژوهش‌های پاتیل و همکاران^۲ [18] و هاربوردا^۳ [19] اشاره نمود. اگرچه مبدل حرارتی ایشان از نوع کوپل و پوسته بوده، لیکن کوپل بر روی یک هسته داخلی پیچیده شده و در تحلیل از روابط تجربی موجود برای جریان بر روی دسته لوله استفاده نموده‌اند. آن‌ها جهت ساده‌سازی از فرضیات بسیاری استفاده کردند به همین دلیل در دقت کار آن‌ها تردید وجود دارد.

رنی و رقوان^۴ [20] به مطالعه آزمایشگاهی مبدل حرارتی هلیکال دو لوله‌ای اقدام نمودند. آن‌ها دو مبدل حرارتی با اندازه‌های مختلف و چیدمان‌های موازی و مخالف را مورد آزمون قرار داده‌اند. آن‌ها با تغییر دبی جریان داخل لوله‌های مارپیچ و ناحیه حلقوی مارپیچ و اندازه‌گیری درجه حرارت‌های ورودی و خروجی سیالات و با استفاده از نمودار ویلسون^۵، ضرایب انتقال حرارت جابجایی لوله مارپیچ و ناحیه حلقوی را به دست آوردند. سپس ضرایب انتقال حرارت داخلی را با نتایج موجود از مطالعات دیگران مقایسه نموده و با وجود اختلاف در شرایط مرزی، تطابق خوبی مشاهده نموده‌اند.

رنی و رقوان [21] با استفاده از یک بسته نرم‌افزار تجاری به تحلیل جریان و انتقال حرارت در سمت داخل و خارج لوله هلیکال در جریان آرام در مبدل حرارتی هلیکال دو لوله‌ای برای دبی‌های مختلف سیال در هر قسمت لوله اقدام نمودند. این تحقیق جهت بررسی اعتبار یافته‌های خود، عدد ناسلت سمت داخل لوله هلیکال را با داده‌های موجود در نتایج پژوهش‌های دیگران مقایسه کردند که از تطابق خوبی برخوردار بود. آن‌ها همچنین دریافتند که بیشترین مقاومت حرارتی در سمت لوله

^۱ Yang and Ebadian

^۲ Patil et al.

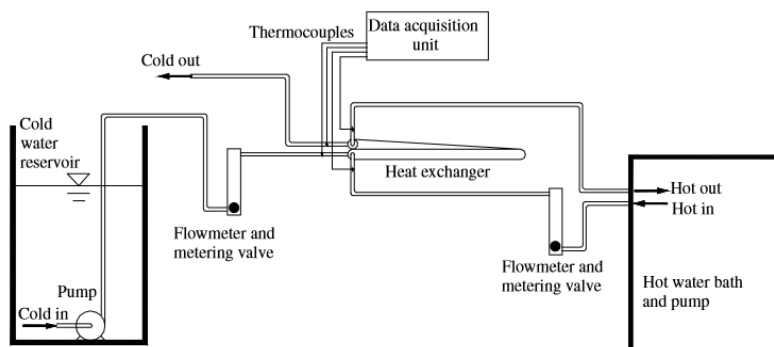
^۳ Harburda

^۴ Rennie and Raghavan

^۵ Wilson Plot

حلقوی می‌باشد. نهایتاً عدد ناسلت در این سمت لوله بر حسب عدد دین اصلاح شده توسط رابطه‌ای بیان گردید.

رنی و رقوان [22] در مطالعه دیگری اثر تغییرات خواص سیال بر مشخصات انتقال حرارتی مبدل حرارتی هلیکال دو لوله‌ای مورد بررسی قرار دادند. نتایج حاکی از وابستگی عدد ناسلت داخلی به عدد پراتنل، به‌ویژه در اعداد دین پایین می‌باشد.

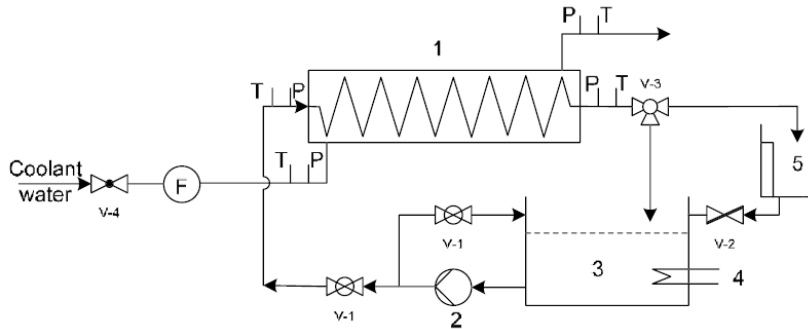


شکل (۲-۶) شماتیک سیستم آزمایشگاهی رنی و رقوان [۲۰]

سلیم پور^۱ [23] و [24] مبدل حرارتی پوسته و لوله با لوله‌های مارپیچ را به صورت تجربی مطالعه کرد. از آنجا که تغییر دما در طول مبدل باعث تغییر خواص سیال می‌گردد، بر روی ضریب انتقال حرارت نیز تأثیر خواهد داشت. سلیم‌پور در بررسی خود ویسکویته، هدایت حرارتی، ظرفیت حرارتی مخصوص و چگالی سیال عامل درون لوله (روغن) را به صورت تابعی از دما در نظر گرفت. در دمای سیال ورودی 70°C ، عدد پراتنل در بازه رابطه ارائه شده توسط دراوید و همکاران [12] قرار می‌گیرد و نتایج حاصل از این مطالعه (خواص متغیر)، با نتایج دراوید و همکاران (خواص ثابت) مقایسه گردید. در اعداد دین بالا؛ فرض خواص ثابت تفاوت زیادی در نتایج می‌گردد و نهایتاً رابطه‌ای برای محاسبه ضریب انتقال حرارت سمت لوله با توجه به تغییرات خواص ارائه نمود. ایشان مبدل حرارتی را در دو حالت جریان مخالف و جریان هم سو به صورت آزمایشگاهی بررسی نمودند. سلیم‌پور با استفاده

^۱ Salimpour

از ۷۲ آزمایش، رابطه‌ای برای محاسبه ضریب انتقال حرارت سمت پوسته و لوله به صورت جداگانه ارائه نمود و نهایتاً روابط پیشنهادی را با روابط ارائه‌شده توسط سایر محققین تحت شرایط مرزی متفاوت مقایسه نمود.



شکل (۷-۲) شماتیک سیستم آزمایشگاهی سلیم‌پور [24]

پراساد و همکاران^۱ [25] به صورت تجربی مبدل پوسته و لوله مارپیچ را بررسی نموده و به این نتیجه رسیدند که در جریان آرام سمت لوله، عدد ناسلت تابعی از $Re\sqrt{r/R_c}$ می‌باشد. اما در جریان در هم سمت لوله، این رابطه به صورتی نسبتی از $Re(r/R_c)^2$ می‌باشد.

روابط پیشنهاد شده توسط ایشان به صورت زیر است:

سمت لوله - جریان آرام:

$$Nu = A \left[\frac{f}{8} Re_d^2 \right]^{1/3} Pr^{1/3} \quad (7-2)$$

$$10 < De < 500, A = 11.6$$

$$500 < De < 1500, B = 6$$

$$200 < De < 500, A = 0.25$$

$$f = \frac{64}{Re_d} \left\{ 1 - \left[1 - \left(\frac{B}{De} \right)^{0.45} \right]^{2.22} \right\}^{-1}$$

سمت لوله - جریان درهم:

^۱ Prasad et al.

$$Nu = \frac{f}{8} Re_d ; \frac{f}{f_s} = 1 + 0.18 \left(Re \left(\frac{r}{R_c} \right)^2 \right)^{0.25} \quad (8-2)$$

سمت پوسته:

$$Nu = 0.057 Re_{D_h}^{0.8} , \quad \frac{R_c}{r} = 17.24 \quad (9-2)$$

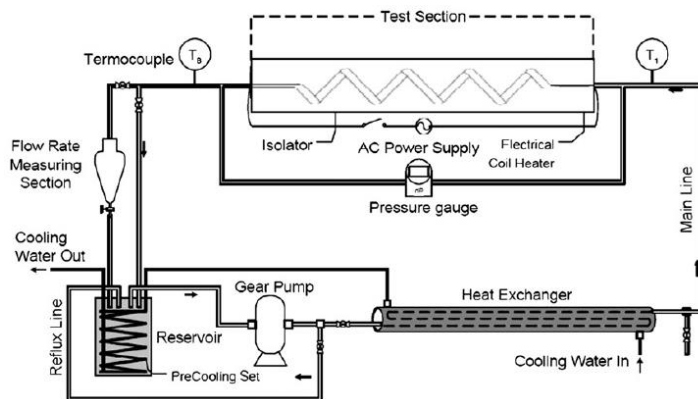
$$Nu = 0.11 Re_{D_h}^{0.8} , \quad \frac{R_c}{r} = 34.9 \quad (10-2)$$

هاشمی و اخوان بهبادی [26] به مطالعه جریان نانو سیال در داخل لوله هلیکال تحت شرایط شار حرارتی ثابت پرداختند. ایشان در مطالعه تجربی خود از نانو سیال روغن/CuO با درصد جرمی ۱/۵، ۱، ۲ درصد استفاده کردند.

هندسه مبدل در طول آزمایش ثابت بوده و تنها شار حرارتی اعمالی بر روی جدار خارجی لوله، دبی جریان و درصد جرمی نانو سیال تغییر داده شده است. بر اساس آزمایش‌های صورت گرفته آن‌ها نتیجه گرفتند تأثیر استفاده از نانوسیالات در لوله‌های هلیکال در هندسه لوله و شار جریان برابر به مراتب بیشتر از لوله صاف است. در شرایط ذکر شده رابطه زیر را برای عدد ناسلت داخل لوله ارائه دادند.

$$Nu = 41.730 Re^{0.346} Pr^{-0.286} (1 + \phi)^{0.18} \quad (11-2)$$

رابطه بالا در رژیم جریان آرام، $Re < 125$ و $2050 < Pr < 700$ برقرار می‌باشد.



شکل (۸-۲) شماتیک سیستم آزمایشگاهی هاشمی و همکاران [۲۶]

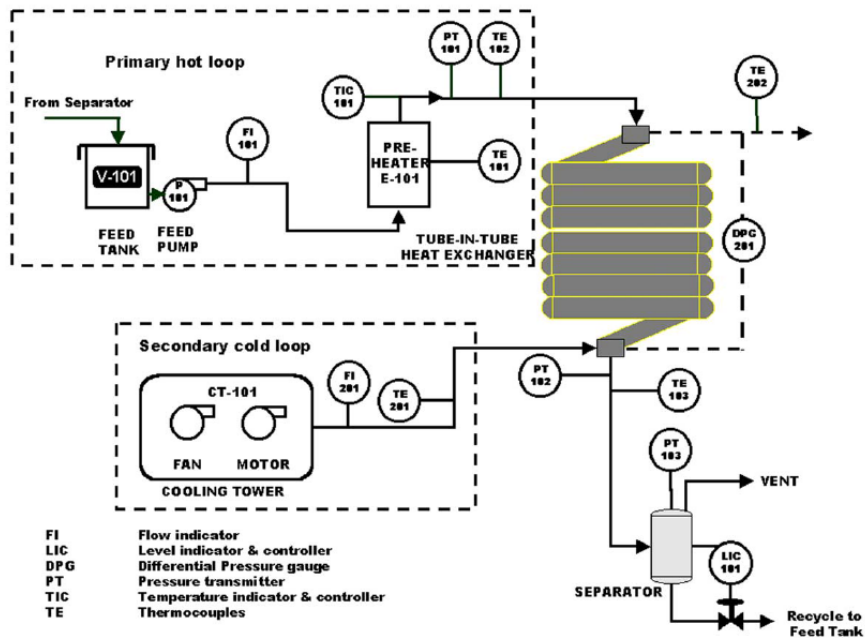
هامینیک و همکاران^۱ [27] به صورت عددی مبدل حرارتی دو لوله مارپیچ را در رژیم جریان آرام بررسی کردند. ایشان از نانو ذرات CuO و TiO_2 با درصد ۰/۵ تا ۳ درصد حجمی در آب استفاده نمودند. کد CFD استفاده شده نرم افزار تجاری ANSYS CFX-12.0 می باشد. تعداد شبکه مورد استفاده ۲۳۰۸۹۹۲ گره می باشد. شرط مرزی سرعت محوری ورودی، فشار صفر در خروجی و عدم لغزش در سطوح مبدل حرارتی در نظر گرفته شده است. سطح خارجی مدل عایق شده و نانو سیال در لوله داخلی جریان دارد. نتایج نشان می دهد که افزایش CuO و TiO_2 در آب باعث افزایش انتقال حرارت جابجایی گشته و این افزایش با ازدیاد عدد دین و نیز غلظت حجمی نانو ذرات بیشتر می گردد. با افزایش غلظت نانو ذرات دمای آب خروجی نیز افزایش می یابد.

کومار و همکاران^۲ [28] مبدل حرارتی دو لوله مارپیچ را به صورت عددی و آزمایشگاهی بررسی نمودند. در بررسی عددی از بسته تجاری FLUENT 6.0 و جهت مدل نمودن جریان درهم از روش $k - \epsilon$ استاندارد استفاده نموده و نهایتاً پروفیل های سرعت و دما را ترسیم نموده اند. در روش آزمایشگاهی با استفاده از اندازه گیری دماهای ورودی و خروجی و روش ویلسون پلات، نمودارهای تغییرات ضریب انتقال حرارت کلی، عدد ناسلت داخلی و خارجی بر حسب عدد دین را ارائه داده اند.

^۱ Huminic et al.

^۲ Kumar et al.

ایشان افزایش ضریب انتقال حرارت کلی را با افزایش عدد دین در لوله داخلی در یک دبی جرمی ثابت در پوسته، گزارش داده‌اند. روند مشابهی نیز در افزایش ضریب انتقال حرارت کلی با افزایش عدد دین در لوله خارجی، در یک دبی جرمی ثابت در لوله نیز مشاهده گردید.



شکل (۲-۹) شماتیک سیستم آزمایشگاهی کومار و همکاران [۲۸]

ویچایانووات و خیوم^۱ [29] حرارت دریافتی از یک مبدل حرارتی لوله مارپیچ را از هوای خروجی از یک برج اسپری شوینده خشک به صورت آزمایشگاهی بررسی نمودند. آب در داخل لوله مارپیچ و هوای شامل مواد شوینده با قطر تقریبی ۴۳ میکرومتر در سمت پوسته جریان دارند. ایشان در آزمایش خود گام مارپیچ، دبی جریان هوا و درصد جرم ذرات تزریق شده را تغییر داده و در نهایت روابط زیر را برای محاسبه ضریب انتقال حرارت سمت آب (لوله) و هوا (پوسته) ارائه دادند.

$$Nu_i = 0.134 Re_i^{0.44} Pr^{0.097} \phi_i^{-0.181}, \quad 3500 \leq Re_i \leq 4100 \quad (12-2)$$

$$Nu_0 = 0.608 Re_0^{3.083} Pr_0^{3.9497} \phi_0^{0.029} \beta^{-0.217}, \quad 89000 \leq Re_0 \leq 220000 \quad (13-2)$$

^۱ Witchayanuwat and Kheawhom

جمشیدی و همکاران [30] عملکرد حرارتی و هیدرولیکی کوئل مارپیچ را با استفاده از نانو سیال آب- Al_2O_3 مورد بررسی عددی قرار دادند. جهت شبیه‌سازی آزمایش‌ها بر اساس پارامترهای طراحی از روش تاگوچی^۱ استفاده شد. همچنین جهت شبیه‌سازی نانوسیال از نرم افزار تجاری فلونت^۲ استفاده شد و نتایج زیر توسط ایشان ارائه شد:

با استفاده از نانوسیال مورد نظر هدایت حرارتی و همچنین ویسکوزیته سیال تحت تأثیر قرار می‌گیرد. پارامترهای بهینه مؤثر طراحی در شرایط دمای ثابت دیواره معرفی شد. همچنین در حالت ثابت بودن طول و قطر ثابت لوله، قطر کوئل و گام کوئل بعنوان مهم‌ترین پارامترهای تأثیرگذار بر عملکرد حرارتی لوله مارپیچ معرفی شدند.

قربانی و همکاران [31] به بررسی انتقال حرارت مخلوط در یک کوئل مارپیچ پوسته-لوله با نسبت قطر و گام‌های مختلف پرداختند و نشان دادند که افزایش سطح کوئل باعث کاهش ضریب انتقال حرارت می‌شود؛ از سوی دیگر ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی، هنگامی که گام بیشتر می‌شود، افزایش می‌یابد.

لین و همکاران^۳ [32] به بررسی ویژگی‌های مبدل مارپیچ مورد استفاده در رآکتورهای گاز دما بالا پرداختند. آن‌ها که از سه مدل توربولانس استفاده کردند، مشاهده کردند که گرادیان سرعت بالاتر، در سمت بیرونی و سپس در سمت داخلی دیده می‌شود، در نتیجه ضریب اصطکاک بالاتر و عدد ناسلت در سمت بیرونی کوئل اتفاق می‌افتد و این نتایج با هر سه مدل توربولانس مطابقت داشت.

شی و دانگ^۴ [33] یک مبدل حرارتی پوسته لوله مارپیچ دوار بکار رفته در یک راکتور را مورد تحلیل و بهینه‌سازی قرار دادند. بهینه‌سازی با تعیین شش متغیر طراحی و دو تابع هدف انجام گرفت که عبارتند از تولید انتروپی ناشی از انتقال حرارت و تولید انتروپی ناشی از افت فشار اصطکاکی. از

^۱ Taguchi Method

^۲ Fluent

^۳ Lin et al.

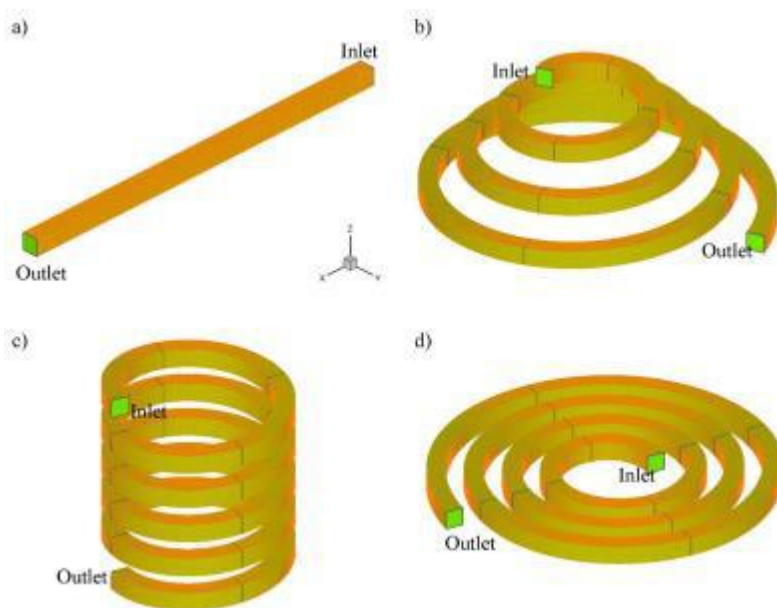
^۴ Shi and Dong

الگوریتم ژنتیک با مرتب سازی نامغلوب (NSGA-II) جهت بهینه سازی استفاده شد و نتایج بصورت جبهه پارتو ارائه شدند.

احدی و عباسی [34] تولید انتروپی ناشی از انتقال حرارت جا به جایی در رژیم جریان آرام روی کویل مارپیچ را بصورت تحلیلی مورد بررسی قرار دادند. برای این منظور روابط تحلیلی مربوط به انتقال حرارت، افت فشار و نرخ تولید انتروپی استخراج شدند و اثر پارامترهای موجود در معادلات روی نرخ تولید انتروپی مورد سنجش قرار گرفتند. سپس با استفاده از مقدار حداقل نرخ تولید انتروپی عدد رینولدز بهینه به ازای مقادیر متعدد برای پارامترهای دیگر محاسبه شدند. همچنین نویسندگان به این نتیجه رسیدند که نرخ تولید انتروپی در کویل مارپیچ تا حدود زیادی تحت تاثیر طول و شار حرارتی کویل و همچنین خواص ترموفیزیکی سیال است.

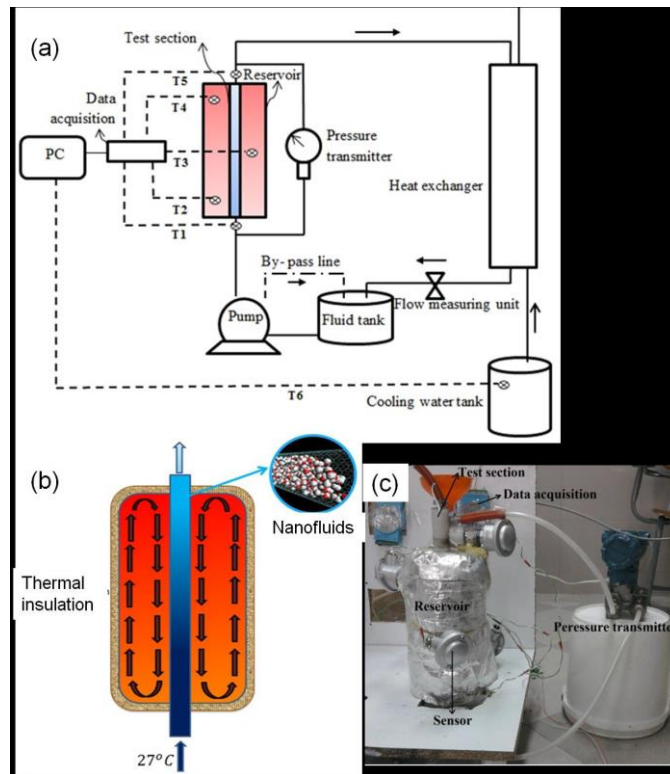
کارنیا و همکاران^۱ [35] عملکرد حرارتی کویل‌های مارپیچ با سطح مقطع مربعی را بصورت عددی مورد بررسی قرار دادند. برای این منظور کویل‌هایی بصورت مارپیچ، حلزونی و مخروطی در نظر گرفته شد و با عملکرد آنها با لوله مستقیم مورد مقایسه قرار گرفت. هندسه‌های در نظر گرفته شده در شکل قابل مشاهده‌اند. آنها دو عامل را بعنوان تاثیر گذارترین عوامل بر عملکرد این نوع مبدل معرفی نمودند که عبارتند از بویانسی تحت تاثیر دما و جریان سانویه ایجاد شده تحت تاثیر انحنای لوله. همچنین بر اساس نتایج بدست آمده به ترتیب کویل‌های حلزونی، مخروطی و مارپیچ عملکرد بهتری داشتند.

^۱ Kurnia et al.



شکل (۲-۱۰) هندسه کویل‌های در نظر گرفته شده با سطح مقطع مربعی

نظری و همکاران [36] تاثیر تخلخل جداره لوله و همچنین استفاده از کویل مارپیچ را در یک مبدل در مقایسه با مبدل با لوله‌های ساده و مستقیم بصوت آزمایشگاهی بررسی نمودند. مبدل مورد نظر بخشی از یک چرخه آزمایشگاهی جهت خنک کاری سیال درون یک مخزن بسته است. تصاویر مربوط به سیستم آزمایشگاهی نظری و همکاران در شکل قابل مشاهده است. داده‌های آزمایشگاهی بهبود انتقال حرارت به میزان ۴۲ و ۴۵ درصد را به ترتیب برای روش‌های استفاده از کویل مارپیچ و جداره متخلخل نشان داده‌اند.



شکل (۲-۱۱) تصویر و شماتیک سیستم آزمایشگاهی نظری و همکاران

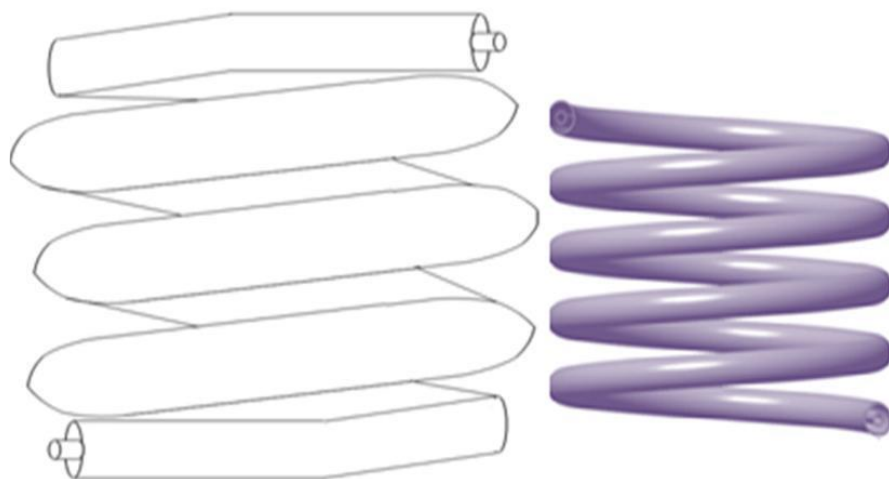
بازولی و همکاران^۱ [37] اثر ایجاد شیار در سطح لوله‌ها را در مبدل پوسته و لوله مارپیچ بصورت آزمایشگاهی بررسی نمودند و بهبود انتقال حرارت جابجایی اجباری تحت تاثیر دو عامل انحنا و شیار در لوله‌های یک مبدل حرارتی را گزارش کردند. آنها آزمایش‌ها را در بازه عدد دین بین ۲۵ و ۲۴۰ انجام دادند و به این نتیجه رسیدند که در اعداد دین پایین انحنای لوله تاثیر بیشتری در بهبود انتقال حرارت دارد و وجود شیار در سطح لوله تاثیر چندانی در بهبود انتقال حرارت جابجایی ندارد. همچنین در اعداد دین بالا ایجاد شیار در سطح لوله موثرتر خواهد بود.

^۱ Bozzoli et al.



شکل (۲-۱۲) تصویر و شماتیک شیارها ایجاد شده روی کوپل مارپیچ

فرزانه گرد و همکاران [38] با کمینه کردن تولید انترویی به بهینه سازی مبدل حرارتی دولوله ای مارپیچ پرداختند. شماتیک مبدل در نظر گرفته شده در شکل قبل مشاهده است. برای این منظور آنها یک تابع بی بعد متشکل از متغیرهای بی بعد مانند عدد پراتل، عدد دین و نسبت قطر مارپیچ به قطر لوله در نظر گرفتند. در ادامه مقدار تولید انترویی طی یک فرایند کمینه شد که در پی آن مقادیر بهینه برای نسبت قطر مارپیچ به قطر لوله، عدد دین و عدد رینولدز برای جریانهای آرام و درهم محاسبه شدند.

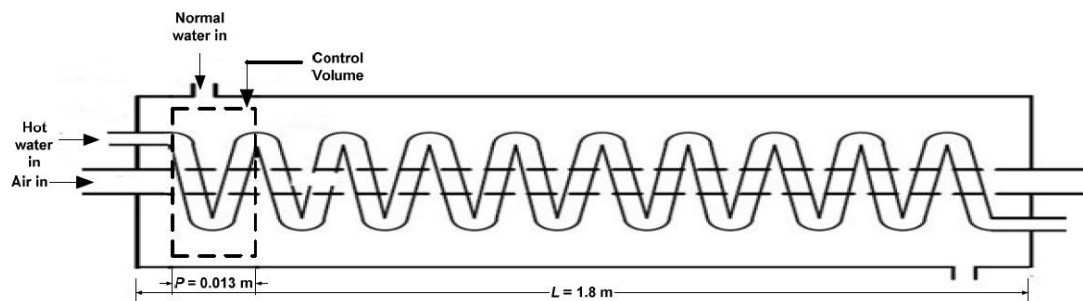


شکل (۲-۱۳) هندسه در نظر گرفته شده برای مبدل حرارتی دو لوله ای مارپیچ

تاراپراساد و همکاران^۱ [39] نوعی از مبدل حرارتی را با سه سیال بصورت ترکیب لوله و کوپل مارپیچ

^۱ Taraprasad et al

درون یک پوسته بصورت آزمایشگاهی مورد بررسی قرار دادند. این مبدل نوع تکامل یافته مبدل دو لوله ایست. بطوریکه یک کوئل مارپیچ بین دو لوله هم مرکز قرار می گیرد. شکل هندسه این نوع مبدل را نمایش می دهد. از کاربردهای این مبدل می توان گرمایش همزمان آب و هوای درون محیط های بسته را نام برد. در این تحقیق نسبت انحنا و نسبت گام به قطر لوله مارپیچ بصورت ثابت و عدد رینولدز سیال سمت کوئل مارپیچ بصورت متغیر بین ۹۰۰۰ تا ۴۵۰۰۰ در نظر گرفته شدند. در نهایت محققین به این نتیجه رسیدند که ضریب انتقال حرارت کلی با افزایش دبی جریان هر سه سیال افزایش پیدا میکند و کارایی مبدل تحت تاثیر همزمان عواملی مانند شعاع لوله مارپیچ، نسبت ابعاد لوله داخلی به خارجی و مقدار NTU می تواند کاهش یا افزایش یابد.



شکل (۱۴-۲) شماتیک مبدل حرارتی سه سیاله در نظر گرفته شده توسط تاراپراساد و همکاران

در ادامه خلاصه ای از روابط پیشنهاد شده جهت پیش بینی ضریب انتقال حرارت در مبدل حرارتی

پوسته و لوله مارپیچ در جدول (۱-۲) آمده است.

جدول (۱-۲) روابط ارائه شده جهت پیش‌بینی ضریب انتقال حرارت در طرفین لوله ماریچ

| محققین | روابط ارائه شده و توضیحات |
|--------------------------------|--|
| Seban & Mclaughlin [11] | $Nu_i \cdot Pr^{-0.4} = \frac{f}{8} Re$ رژیم جریان آرام |
| David et al. [12] | $Nu_i = (0.65\sqrt{De} + 0.76) Pr^{0.175}$ $5 < De < 200$ رژیم جریان آرام |
| Jayakumar et al. [13] | $Nu_i = 0.025De^{0.9112} Pr^{0.4}$, $2000 < De < 12000$ |
| Jayakumar et al. [14] | $Nu_i = 0.116Re^{0.71} Pr^{0.4} \delta^{0.1}$ $Nu_i = 0.085De^{0.74} Pr^{0.40.1}$ $3000 < De < 22000$ $14000 < Re < 70000, 0.05 < \delta < 0.2$ |
| Kalb and Seader [15] | $Nu_i = 0.836De^{0.5} Pr^{0.1}$, $0.7 < Pr < 5$, $De \geq 80$ |
| Salimpour [23], [24] | $Nu_{i,c} = 0.152De^{0.431} \gamma^{-0.277} Pr^{1.06}$ $Nu_{i,p} = 0.112De^{0.51} \gamma^{-0.37} Pr^{0.72}$ $Nu_{o,c} = 19.64 Re_o^{0.431} \gamma^{0.938} Pr_o^{0.129}$ $Nu_{o,p} = 5.48 Re_o^{0.511} \gamma^{0.546} Pr_o^{0.226}$ $35 < De < 22000$ $0.058 < \gamma < 0.095$ |
| Rogers & Mayhew [40] | $Nu_i = 0.021 Re^{0.85} Pr^{0.4} \left(\frac{r}{R}\right)^{0.1}$ جریان در هم - دمای دیواره ثابت |
| Manlapaz and Churchill [41] | $Nu_T = \left[\left(3.657 + \frac{4.343}{x_1} \right)^3 + 1.158 \left(\frac{De}{x_2} \right)^{3/2} \right]^{1/3}$ شرط مرزی شار ثابت $Nu_H = \left[\left(4.364 + \frac{4.636}{x_3} \right)^3 + 1.816 \left(\frac{De}{x_4} \right)^{3/2} \right]^{1/2}$ شرط مرزی دما ثابت |
| Cengiz et al. [42] | $Nu_i = 0.0551De^{0.864} Pr^{0.4}$, $1265 < De < 2850$, $Pr = 0.7$ |

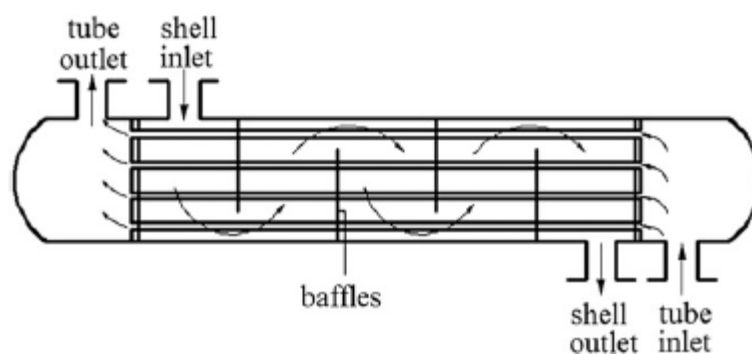
| | |
|---------------------------|---|
| | $Nu_i = 4.02De^{0.785} Pr^{0.4} \left(\frac{H_s}{d_s} \right)^{-1.008}, \quad 1315 < De < 3200, \quad Pr = 0.7$ |
| Xin and Ebadian [43] | $Nu_i = (2.153 + 0.318De^{0.643}) Pr^{0.177}$ $20 < De < 200$ $0.0267 < d/D < 0.0884$ $Nu_i = 0.00619 Re^{0.92} Pr^{0.4} (1 + 3.455d/D)$ $5 \times 10^3 < Re < 10^5$ $0.0267 < d/D < 0.0884$ |
| Guo et al. [44] | $Nu_i = 0.328Re^{0.785} Pr^{0.4}, \quad 6000 < Re < 18000$ $Nu_i = 0.0147W_0^{-0.31} Pr^{-4.4} (De/1000)^{0.82}, \quad W_0 = d_i \sqrt{2\pi n / \mu}$ $25000 < Re < 125000, \quad 0.003 < n < 0.05$ |
| Rahul et al. [45] | $Nu_o = 0.518Re_D^{0.595} (P/d_o)^{0.857}$ $7000 < Re_D < 55000, \quad 1.1275 < P/d_o < 1.8575$ |
| Nephon and Wongwises [46] | $Nu_i = 27.358De^{0.287} Pr^{-0.949}, \quad 300 \leq De \leq 2200, \quad Pr \geq 5$ $J = \frac{h_0}{G_{\max} \times c_{p,m}} Pr^{2/3} = 0.135Re^{-0.318}, \quad Re_o < 6000$ |

۵-۲ مطالعات انجام شده در زمینه بهینه‌سازی انواع مبدل‌ها

تا کنون تحقیقات بسیاری در زمینه طراحی و بهینه‌سازی مبدل‌های حرارتی انجام گرفته است. همچنین در سال‌های اخیر استفاده از الگوریتم‌های تکاملی جهت بهینه‌سازی مبدل‌های حرارتی مورد توجه محققان قرار گرفته است. در ادامه خلاصه تعدادی از مطالعاتی که در این زمینه صورت گرفته با ذکر نوع مبدل، اهداف و متغیرهای طراحی بیان شده‌اند. توضیحات تکمیلی در مورد روش‌های بهینه‌سازی عنوان شده در این بخش در فصل ۴ ارائه شده است.

سلطان و همکاران^۱ [47] بهینه‌ترین شرایط را برای فاصله بافل‌ها در یک چگالنده پوسته و لوله جهت کاهش هزینه ساخت و هزینه‌های سالانه مربوط به پمپاژ سیالات با در نظر گرفتن توابع وزنی مناسب به دست آوردند.

حدادی و نظری [48] با استفاده از الگوریتم جغرافیای زیستی^۲ (BBO) بهینه‌سازی مبدل حرارتی پوسته و لوله را انجام دادند. این بهینه‌سازی نیز از نوع یک هدفه و جهت کاهش هزینه کل که شامل هزینه ساخت و بهره‌برداری مبدل می‌باشد، انجام شد. متغیرهای طراحی برای این تحقیق طول لوله، قطر داخلی پوسته، قطر خارجی پوسته، گام لوله‌ها و فاصله بافل‌ها بودند.

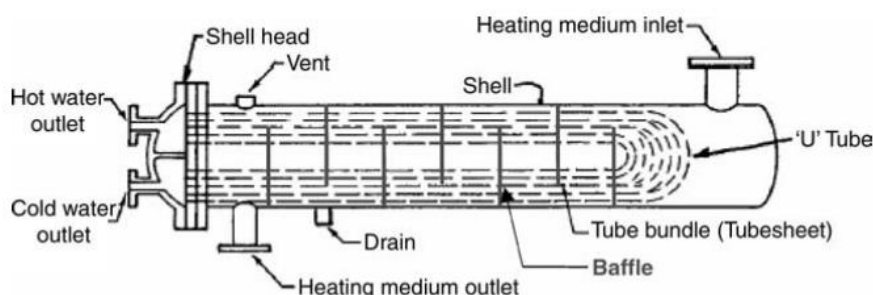


شکل (۱۵-۲) هندسه مبدل در نظر گرفته شده توسط حدادی و نظری [48]

^۱ Soltan et al.

^۲ Biogeography Based Optimization

سلباش و همکاران^۱ [49] بهینه‌سازی اقتصادی مبدل حرارتی پوسته و لوله‌ای را با استفاده از الگوریتم ژنتیک انجام دادند که اهداف مورد نظر آن‌ها رسیدن به حداقل سطح انتقال حرارت و کاهش هزینه مبدل بود. همچنین پارامترهای طراحی برای این تحقیق قطر خارجی لوله، نوع آرایش لوله، تعداد گذر لوله، قطر خارجی پوسته، فاصله بافل‌ها و ارتفاع بافل‌ها بودند.



شکل (۲-۱۶) هندسه مبدل در نظر گرفته شده توسط سلباش و همکاران [49]

بابو و موناور^۲ [50] با انتخاب سطح انتقال حرارت در یک مبدل پوسته و لوله به‌عنوان تابع هدف، الگوریتم ژنتیک (GA) و نوعی الگوریتم ژنتیک بهبودیافته (DE) را از نظر زمانی مقایسه کردند. برای این تحقیق شش پارامترهای طراحی جهت بهینه شدن در نظر گرفته شدند که عبارتند از طول لوله، تعداد گذر لوله، قطر خارجی لوله، گام لوله، فاصله بافل‌ها و ارتفاع بافل‌ها. نویسندگان در نهایت به این نتیجه رسیدند که برای مساله مورد نظر الگوریتم DE سرعت حل بسیار بالاتری نسبت به الگوریتم GA دارد و برای یافتن اکسترمم مطلق عملکرد بهتری خواهد داشت.

هیلبرت و همکاران^۳ [51] در سال ۲۰۰۶ به بهینه‌سازی چند هدفه مبدل حرارتی پوسته و لوله برای افزایش انتقال حرارت و کاهش افت فشار بر روی یک دسته لوله پرداختند. در این تحقیق از

^۱ Selbas et al.

^۲ Babu and Munawar

^۳ Hilbert et al

نرم افزار فلونت جهت بررسی انتقال حرارت و از الگوریتم ژنتیک جهت یافتن هندسه بهینه استفاده شد.

دمنسکی و یاشار^۱ [52] ماکزیمم ظرفیت را برای چگالنده های لوله ای پره دار با استفاده از یک برنامه هوشمند بهره گیرنده از تئوری داروین در شرایط خاص تخمین زدند. در این تحقیق بهینه سازی برای شش نوع مبرد مختلف انجام شد.

کاپتو و همکاران^۲ [53] با بهره گیری از الگوریتم ژنتیک، هزینه مبدل شامل هزینه های مربوط به تولید و همچنین هزینه های بهره برداری و پمپاژ سیالات را به حداقل رساندند. برای مساله مورد مطالعه آن ها با استفاده از روش بهینه سازی مقدار هزینه کلی تا ۵۰ درصد کاهش پیدا کرد.

گوا و همکاران^۳ [54] با استفاده از الگوریتم ژنتیک مبدل حرارتی پوسته و لوله ای با بافل های سگمنتال را بر اساس تئوری هم افزایی بهینه سازی کردند. این بهینه سازی از نوع یک هدفه بوده و شار حرارتی در مبدل به عنوان تابع هدف انتخاب شد.

فسنقوری و همکاران [55] جهت طراحی بهینه مبدل حرارتی پوسته و لوله از الگوریتم جستجوی هارمونی استفاده نمودند. سپس نتایج این بهینه سازی را با نتایج حاصل از بهینه سازی با الگوریتم ژنتیک مقایسه نمودند که الگوریتم جستجوی هارمونی همگرایی و دقت بهتری نسبت به الگوریتم ژنتیک از خود نشان داد.

پاتل و راثو^۴ [56] در یک تحقیق برای بهینه سازی طراحی مبدل حرارتی پوسته و لوله ای از روش بهینه سازی بر اساس الگوریتم ازدحام ذرات استفاده کردند. هدف از این بهینه سازی به حداقل رساندن هزینه های سالیانه استفاده از مبدل بود. سه پارامتر طراحی برای این بهینه سازی در نظر گرفته شدند که عبارتند از قطر داخلی پوسته، قطر خارجی لوله و فاصله بافل ها. همچنین دو نوع آرایش

^۱ Domanski and Yashar

^۲ Caputo et al.

^۳ Guo et al.

^۴ Patel and Rao

مربعی و مثلثی برای طراحی در نظر گرفته شدند.

سahین و همکاران^۱ [57] موضوع طراحی بهینه مبدل حرارتی پوسته و لوله را با به کار بردن الگوریتم کلونی زنبور عسل مصنوعی بررسی کردند. تابع هدف این بهینه‌سازی هزینه کلی شامل هزینه‌های ساخت و هزینه‌های بهره‌برداری سالیانه بود. همچنین قطر داخلی پوسته، قطر خارجی لوله، تعداد گذر لوله و فاصله بافل‌ها چهار پارامتر طراحی برای این بهینه‌سازی بودند.

توسط فتاکا و همکاران^۲ [58] بهینه‌سازی چند هدفه مبدل پوسته و لوله‌ای با استفاده از الگوریتم ژنتیک با مرتب‌سازی نا مغلوب (NSGA-II) با هدف به حداقل رساندن سطح انتقال حرارت در مبدل و قدرت پمپاژ انجام پذیرفت.

صنایع و همکاران [59] بهینه‌سازی چند هدفه را برای مبدل پوسته و لوله با هدف افزایش کارایی و کاهش هزینه کل با استفاده از نوع بهبودیافته الگوریتم ژنتیک با عنوان الگوریتم ژنتیک با مرتب‌سازی نا مغلوب (NSGA-II) انجام دادند. متغیرهای طراحی برای این بهینه‌سازی چیدمان لوله‌ها، قطر لوله، گام لوله، طول لوله، تعداد لوله‌ها، فاصله بافل‌ها و ارتفاع بافل‌ها بودند. همچنین از روش ϵ -NTU برای مدل‌سازی گرمایی مبدل استفاده شد و جهت تخمین ضریب انتقال حرارت سمت پوسته از روش بل-دلاوار استفاده شد.

آکادیا و وانولی^۳ [60] چگالنده دو لوله‌ای یک پمپ گرمایی را با جریان داشتن مبرد دوفازی در لوله داخلی و مبرد یک‌فازی بین دو لوله جهت بهینه‌سازی گرمایی در نظر گرفتند. تابع هدف این بهینه‌سازی به صورت مجموع دو پارامتر تعریف شد که عبارت‌اند از: هزینه ساخت مرتبط با مساحت سطح انتقال حرارت و هزینه الکتریکی کارکرد پمپ گرمایی. همچنین سه مبرد R22، R134a و R140a برای این پمپ گرمایی بررسی شدند.

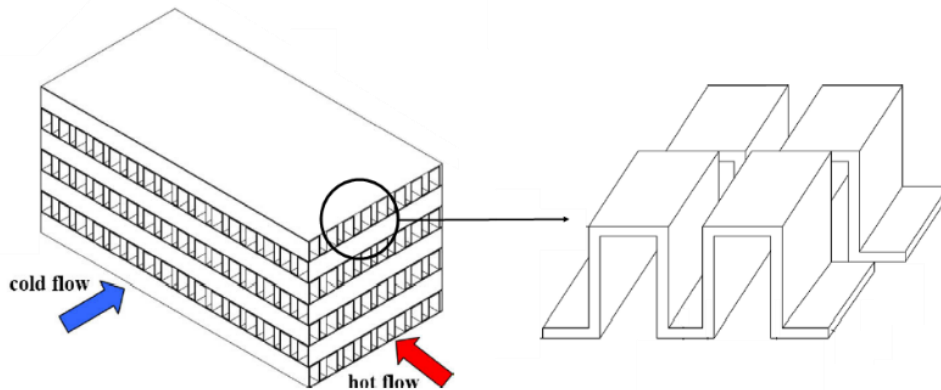
صنایع و همکاران [61] بهینه‌سازی چند هدفه ای برای مبدل حرارتی صفحه-پره انجام دادند. از

^۱ Sahin et al.

^۲ Fettaka et al.

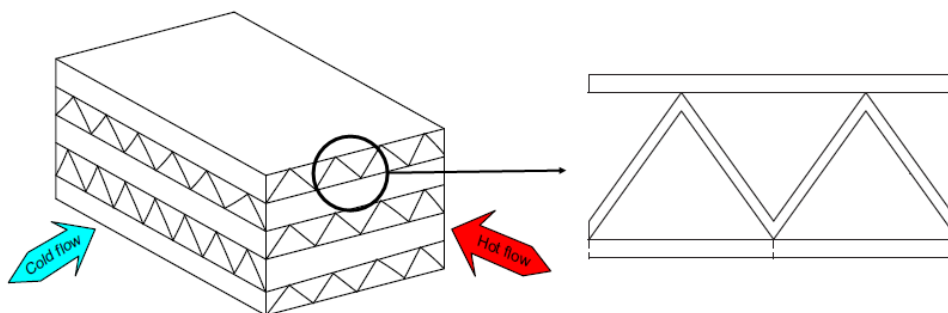
^۳ Accadia and Vanoli

روش ε -NTU برای مدل‌سازی گرمایی مبدل استفاده شد. الگوریتم ژنتیک با مرتب‌سازی نامغلوب (NSGA-II) برای این تحقیق جهت ماکزیمم کردن کارایی و مینیمم کردن هزینه ناشی از افت فشار به کار گرفته شد. پارامترهای طراحی برای این مبدل گام پره، طول پره، ارتفاع پره، طول مبدل در سمت ورودی سیال سرد، طول مبدل در سمت ورودی سیال گرم و ارتفاع مبدل در نظر گرفته شدند.



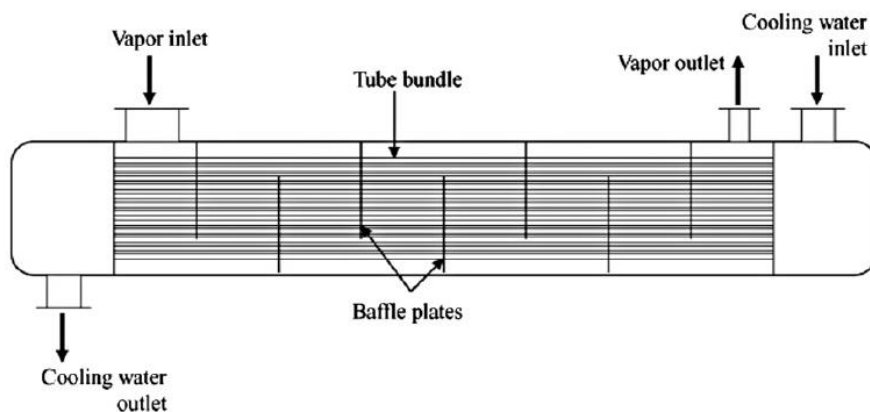
شکل (۲-۱۷) هندسه مبدل در نظر گرفته شده توسط صنایع و همکاران [61]

حاج عبدالهی و همکاران [62] یک مبدل حرارتی فشرده را مورد تحلیل و بهینه‌سازی چند هدفه قرار دادند. هدف این بهینه‌سازی افزایش کارایی کاهش افت فشار در مبدل بودند. در این تحقیق برای بهینه‌سازی از الگوریتم ژنتیک با مرتب‌سازی نامغلوب (NSGA-II) استفاده شد. گام پره، ارتفاع پره، طول مبدل در سمت ورودی سیال سرد، طول مبدل در سمت ورودی سیال گرم و ارتفاع مبدل به‌عنوان پارامترهای طراحی در نظر گرفته شدند.



شکل (۲-۱۸) هندسه مبدل فشرده در نظر گرفته شده توسط حاج عبدالهی و همکاران [62]

حاج عبدالهی و همکاران [63] بهینه‌سازی کندانسور پوسته و لوله‌ای را با استفاده از هر دو الگوریتم ژنتیک (GA) و ازدحام ذرات (PSO) انجام دادند. هدف از این بهینه‌سازی کمینه کردن هزینه کل بود که شامل هزینه تولید و کارکرد می‌شد. برای این تحقیق شش پارامترهای طراحی جهت بهینه شدن در نظر گرفته شدند که عبارت‌اند از تعداد لوله، تعداد گذر لوله، قطر داخلی لوله، قطر خارجی لوله، نسبت گام لوله و نوع آرایش لوله (۳۰، ۴۵، ۶۰ و ۹۰ درجه). مقایسه بین نتایج نشان داد الگوریتم ژنتیک نتایج بهتری نسبت به الگوریتم ازدحام ذرات ارائه کرده است.



شکل (۲-۱۹) هندسه کندانسور در نظر گرفته شده توسط حاج عبدالهی و همکاران [63]

در ادامه خلاصه مطالعاتی که در زمینه بهینه‌سازی مبدل‌ها صورت گرفته با ذکر نوع مبدل، الگوریتم بهینه‌سازی، توابع هدف و متغیرهای طراحی در جدول (۲-۲) آمده است.

جدول (۲-۲) مطالعات صورت گرفته در زمینه بهینه‌سازی مبدل‌ها

| محققین | نوع مبدل حرارتی / روش بهینه‌سازی / توابع هدف / متغیرهای طراحی |
|------------------------|---|
| Hadadi and Nazari [41] | مبدل پوسته و لوله / الگوریتم جغرافیای زیستی (BBO) یک هدفه / کاهش هزینه کل شامل هزینه ساخت و بهره‌برداری مبدل / طول لوله، قطر داخلی پوسته، قطر خارجی پوسته، گام لوله‌ها و فاصله بافل‌ها |
| Selbash et al. [42] | مبدل حرارتی پوسته و لوله / الگوریتم ژنتیک / رسیدن به حداقل سطح انتقال حرارت و کاهش هزینه مبدل / قطر خارجی لوله، نوع آرایش لوله، تعداد گذر لوله، قطر خارجی پوسته، فاصله بافل‌ها و ارتفاع بافل‌ها |
| Babu and Munawar [43] | مبدل حرارتی پوسته و لوله / الگوریتم ژنتیک (GA) و نوعی الگوریتم ژنتیک بهبودیافته (DE) / سطح انتقال حرارت / طول لوله، تعداد گذر لوله، قطر خارجی لوله، گام لوله، فاصله بافل‌ها و ارتفاع بافل‌ها |
| Fesanghary et al. [48] | مبدل حرارتی پوسته و لوله / الگوریتم جستجوی هارمونی / کاهش هزینه کل شامل هزینه ساخت و پمپاژ |
| Patel and Rao [49] | مبدل حرارتی پوسته و لوله / الگوریتم ازدحام ذرات / حداقل رساندن هزینه‌های سالیانه / قطر داخلی پوسته، قطر خارجی لوله و فاصله بافل‌ها |
| Sahin et al. [50] | مبدل حرارتی پوسته و لوله / الگوریتم کلونی زنبور عسل / هزینه کلی شامل هزینه‌های ساخت و هزینه‌های بهره‌برداری سالیانه / قطر داخلی پوسته، قطر خارجی لوله، تعداد گذر لوله و فاصله بافل‌ها |
| Sanaye et al. [52] | مبدل پوسته و لوله / الگوریتم ژنتیک با عنوان الگوریتم ژنتیک با مرتب‌سازی نا مغلوب (NSGA-II) چند هدفه / افزایش کارایی و کاهش هزینه کل / چیدمان لوله‌ها، قطر لوله، گام لوله، طول لوله، تعداد لوله‌ها، فاصله بافل‌ها و ارتفاع بافل‌ها |
| Sanaye et al. [54] | مبدل حرارتی صفحه-پره / الگوریتم ژنتیک با مرتب‌سازی نا مغلوب (NSGA-II) چند هدفه / ماکزیمم کردن کارایی و مینیمم کردن هزینه ناشی از افت فشار / گام پره، طول پره، ارتفاع پره، طول مبدل در سمت ورودی سیال سرد، |

| | |
|--------------------------|--|
| | طول مبدل در سمت ورودی سیال گرم و ارتفاع مبدل |
| Hajabdollahi et al. [55] | یک مبدل حرارتی فشرده / الگوریتم ژنتیک با مرتب‌سازی نامغلوب (NSGA-II) / چند / افزایش کارایی کاهش افت فشار در مبدل / گام پره، ارتفاع پره، طول مبدل در سمت ورودی سیال سرد، طول مبدل در سمت ورودی سیال گرم و ارتفاع مبدل |
| Hajabdollahi et al. [56] | کندانسور پوسته و لوله‌ای / دو الگوریتم ژنتیک (GA) و ازدحام ذرات (PSO) / کمینه کردن هزینه کل بود که شامل هزینه تولید و کارکرد / تعداد لوله، تعداد گذر لوله، قطر داخلی لوله، قطر خارجی لوله، نسبت گام لوله و نوع آرایش لوله (۳۰، ۴۵، ۶۰ و ۹۰ درجه) |

فصل ۳

مدل سازی گرمایی مبدل حرارتی

پوسته و لوله مارپیچ

۳-۱ فرضیات و شرایط عملکرد مبدل حرارتی

جهت امکان پذیر بودن استفاده از روابط موجود و ساده سازی معادلات شرایط زیر برای عملکرد

مبدل حرارتی پوسته و لوله مارپیچ در نظر گرفته شدند:

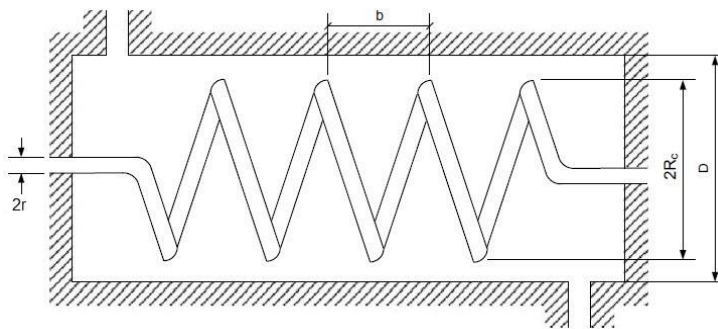
- انتقال گرما از مبدل و تغییرات انرژی پتانسیل سیالات ناچیز است.
- شرایط گرمایی و جریان داخلی کاملاً فراگیرند.
- مقاومت گرمایی لوله و اثر رسوب ناچیز است.
- خواص سیالات ثابت اند.

۳-۲ فرایند مدل سازی به روش $\varepsilon-NTU$

در این پایان نامه برای مدل سازی حرارتی مبدل حرارتی پوسته و لوله صنعتی از روش $\varepsilon-NTU$

NTU استفاده شد. برای محاسبه کارایی مبدل حرارتی افقی نوع پوسته لوله مارپیچ با هندسه

در نظر گرفته شده در شکل (۳-۱) از رابطه کیز و لاندن استفاده می شود. [64]



شکل (۳-۱) هندسه و پارامترهای ابعادی مبدل پوسته و لوله مارپیچ [63]

برای جریان موازی رابطه زیر برقرار است.

$$\varepsilon = \frac{1 - \exp[-NTU(1+C_r)]}{1+C_r} \quad (1-1)$$

همچنین برای جریان مخالف از رابطه زیر استفاده می‌شود.

$$\varepsilon = \frac{1 - \exp[-NTU(1-C_r)]}{1-C_r \exp[-NTU(1-C_r)]} \quad (2-3)$$

در روابط بالا C_r نسبت ظرفیت‌های گرمایی و NTU تعداد واحدهای انتقال گرما به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$C_r = \frac{C_{\min}}{C_{\max}} = \frac{\min(C_s, C_t)}{\max(C_s, C_t)} = \frac{\min((\dot{m} c_p)_s, (\dot{m} c_p)_t)}{\max((\dot{m} c_p)_s, (\dot{m} c_p)_t)} \quad (3-3)$$

$$NTU = \frac{UA_t}{C_{\min}} \quad (4-3)$$

در رابطه (۲-۳) اندیس‌های s و t به ترتیب بیانگر مشخصات سمت لوله و پوسته هستند و \dot{m} بیانگر دبی جرمی سیال می‌باشد. همچنین A_t در رابطه (۳-۳) سطح کلی انتقال حرارت است که از رابطه زیر قابل محاسبه است:

$$A_t = \pi d_o L \quad (5-3)$$

L طول لوله مارپیچ به کاررفته در مبدل می‌باشد که از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$L = 2\pi R_c N \quad (6-3)$$

که N در رابطه بالا نشان‌دهنده تعداد دورهای کوئل مارپیچ است. همچنین در رابطه (۳-۳)، U ضریب انتقال حرارت کلی مبدل که وابسته به ضرایب انتقال حرارت داخلی و خارجی است برای مبدل لوله‌ای و بی‌پره با توجه به فرض مقاومت گرمایی ناچیز لوله به صورت زیر تعیین می‌شوند: [65]

$$\frac{1}{U} = \frac{A_o}{A_i h_i} + \frac{A_o \ln(d_o/d_i)}{2\pi kL} + \frac{1}{h_o} \quad (7-3)$$

در رابطه بالا A_i و A_o به ترتیب مساحت سطوح خارجی و داخلی لوله ماریچ و d_i و d_o به ترتیب قطر خارجی و داخلی لوله هستند. با فرض ضخامت کم لوله و نادیده گرفتن اثر رسانش رابطه بالا به صورت زیر درمی آید:

$$U = \frac{1}{\left(\frac{1}{h_i}\right) + \left(\frac{1}{h_o}\right)} \quad (8-3)$$

که h_i و h_o به ترتیب ضرایب انتقال حرارت سطوح داخلی و خارجی لوله ماریچ هستند که از روابط زیر محاسبه می شوند:

$$h_i = \frac{Nu_i k_i}{d} \quad (9-3)$$

$$h_o = \frac{Nu_o k_o}{D_h} \quad (10-3)$$

در روابط بالا k_i و k_o به ترتیب ضرایب رسانش سمت لوله و پوسته و d قطر لوله ($d=2r$) هستند. قطر هیدرولیک سمت پوسته که در رابطه بالا به صورت D_h معرفی شد به صورت زیر تعیین می شود:

$$D_h = \frac{D^2 - 2\pi R_c d^2 \gamma^{-1}}{D + 2\pi R_c d \gamma^{-1}} \quad (11-3)$$

در رابطه بالا D قطر پوسته و γ گام بی بعد کویل ماریچ است که به صورت زیر تعریف می شود:

$$\gamma = \frac{b}{2\pi R_c} \quad (12-3)$$

که در این رابطه b گام کوئل مارپیچ است.

در روابط (۳-۸) و (۳-۹) Nu_o و Nu_i اعداد ناسلت سطوح خارجی و داخلی لوله مارپیچ هستند که روابط آنها در ادامه فصل با ذکر منبع آورده شده‌اند. با استفاده از این روابط میزان کارایی مبدل حرارتی که یکی از توابع هدف مورد نظر برای بهینه‌سازی است، قابل محاسبه خواهد بود.

۳-۳ روابط مربوط به انتقال حرارت سمت پوسته

جهت محاسبه عدد ناسلت برای جریان سمت پوسته روابط کمتری نسبت به سمت لوله پیش‌بینی شده است. در بین مطالعات پیشین که در زمینه انتقال حرارت در مبدل‌های پوسته و لوله مارپیچ صورت گرفته و خلاصه تعدادی از آنها در فصل دوم ارائه شدند، روابط سلیم‌پور [24] جهت محاسبه انتقال حرارت در سمت پوسته انتخاب شدند. برای جریان‌های موازی رابطه زیر برای عدد ناسلت سمت پوسته برقرار است:

$$Nu_{o,p} = 5.48 Re_o^{0.511} \gamma^{0.546} Pr_o^{0.226} \quad (13-3)$$

همچنین برای جریان مخالف در سمت پوسته رابطه زیر ارائه شده است.

$$Nu_{o,c} = 19.64 Re_o^{0.431} \gamma^{0.938} Pr_o^{0.129} \quad (14-3)$$

۳-۴ روابط مربوط به انتقال حرارت سمت لوله

مطالعات نظری و تجربی متعددی اعداد ناسلت برای سیال‌های نیوتنی از داخل یک کوئل مارپیچ را گزارش کرده‌اند. از بین روابط مربوط به عدد بی‌بعد ناسلت سمت لوله که در فصل دوم ارائه شدند

دسته‌ای از روابط جهت محاسبه کارایی مبدل انتخاب شدند که گستره وسیع‌تری از ابعاد لوله ماریچ را دربرمی‌گیرند. همچنین برخی از روابط بصورت دقیق‌تر برای رژیم‌های جریان‌های آرام و درهم، جریان‌های موازی و مخالف و شرایط مرزی شار ثابت و دما ثابت در جداره به‌صورت مجزا ارائه شده‌اند. نتایج تجربی و نظری با رابطه مانلاپز و چرچیل [66] که در زیر آمده است بر مبنای تحلیل آماری منطبق با داده‌های موجود مقایسه شده‌اند و نتیجه قابل قبول به‌دست آمده است. رابطه زیر برای شرایط مرزی دما ثابت ارائه شده است:

$$Nu_T = \left[\left(3.657 + \frac{4.343}{x_1} \right)^3 + 1.158 \left(\frac{De}{x_2} \right)^{3/2} \right]^{1/3} \quad (15-3)$$

در رابطه بالا مقادیر x_1 و x_2 به‌صورت زیر محاسبه می‌شوند:

$$x_1 = \left(1 + \frac{957}{De^2 Pr} \right)^2, \quad x_2 = 1 + \frac{0.477}{Pr} \quad (16-3)$$

در رابطه بالا De عدد دین است که به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

$$De = Re \left(\frac{r}{R_c} \right)^{1/2} \quad (17-3)$$

همچنین رابطه زیر برای شرایط مرزی شار ثابت ارائه شده است:

$$Nu_H = \left[\left(4.364 + \frac{4.636}{x_3} \right)^3 + 1.816 \left(\frac{De}{x_4} \right)^{3/2} \right]^{1/2} \quad (18-3)$$

که در رابطه بالا مقادیر x_3 و x_4 به‌صورت زیر محاسبه می‌شوند:

$$x_3 = \left(1 + \frac{1342}{De^2 Pr}\right)^2, \quad x_4 = 1 + \frac{1.15}{Pr} \quad (19-3)$$

سلیم‌پور [24] برای جریان‌های موازی و مخالف سمت پوسته و لوله روابط مجزایی را ارائه کرد. رابطه زیر برای مبدل با جریان موازی ارائه شده است:

$$Nu_{i,p} = 0.112 De^{0.51} \gamma^{-0.37} Pr^{0.72} \quad (20-3)$$

همچنین رابطه زیر برای مبدل جریان مخالف ارائه شده است:

$$Nu_{i,c} = 0.152 De^{0.431} \gamma^{-0.277} Pr^{1.06} \quad (21-3)$$

روابط تجربی و نظری بسیاری برای پیش‌بینی اعداد ناسلت جریان آشفته در کویل مارپیچ در دسترس هستند. اغلب تحلیل‌های جریان آشفته سیال و انتقال گرما در آن، به جریان کاملاً توسعه یافته محدود می‌شوند. داده‌های محدود راجع به جریان آشفته در حال توسعه نشان می‌دهد که جریان در نیم دور اول کویل کاملاً توسعه می‌یابد [67]. طول ورودی برای جریان آشفته در حال توسعه معمولاً کوتاه‌تر از طول ورودی برای جریان آرام می‌باشد. در این موضوع روابط متعددی در دسترس هستند. رابطه اشمیت^۱ [67] بزرگ‌ترین محدوده کاربرد را داراست:

$$\frac{Nu_c}{Nu_s} = 1 + 3.6 \left[1 - \left(\frac{r}{R_c} \right) \right] \left(\frac{r}{R_c} \right)^{0.8} \quad (22-3)$$

که در آن Nu_c عدد ناسلت برای کویل خمیده Nu_s عدد ناسلت لوله مستقیم است.

^۱ Schmidt

۳-۵ افت فشار

در جریان کاملاً توسعه یافته در لوله رابطه زیر به شکل تابع می تواند برای افت فشار اصطکاکی جریان آرام یا آشفته نوشته شود:

$$\frac{\Delta p}{L} = \phi(u_m, d, \rho, \mu, e) \quad (23-3)$$

که کمیت e متوسط آماری زبری سطح لوله است و به لحاظ ابعادی دارای بعد طول می باشد. فرض می شود که Δp متناسب با طول لوله باشد. با داشتن جرم M ، طول L و زمان θ به عنوان بدهای اصلی و u_m ، d و ρ به عنوان حداکثر تعداد کمیت های مؤثر، تئوری π^1 نتیجه می دهد:

$$\frac{\Delta p}{4(L/d) \left(\frac{\rho u_m^2}{2} \right)} = \phi \left(\frac{u_m d \rho}{\mu}, \frac{e}{d} \right) \quad (24-3)$$

که در آن ثابت های عددی بی بعد ۴ و ۲ برای راحتی استفاده از تعریف فشار دینامیکی و رابطه ضریب اصطکاک زیر استفاده شده اند. گروه بی بعد شامل Δp به عنوان ضریب اصطکاک فنینگ f تعریف می شود:

$$f = \frac{\Delta p}{4(L/d) \left(\frac{\rho u_m^2}{2} \right)} \quad (25-3)$$

در نهایت با جابجایی پارامترهای طرفین تساوی افت فشار با استفاده از معادله زیر محاسبه می شود:

¹ π theorem

$$\Delta p = 4f \left(\frac{L}{d} \right) \left(\frac{\rho u_m^2}{2} \right) \quad (26-3)$$

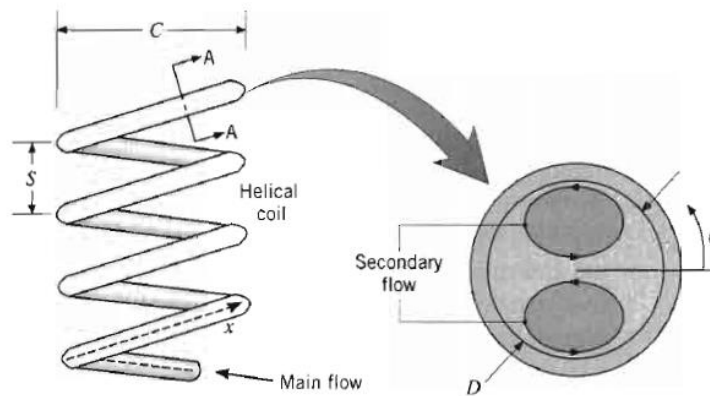
برای استفاده از رابطه بالا ابتدا باید ضریب اصطکاک f محاسبه شود. مطالعات تجربی متعددی روابطی را برای محاسبه ضریب اصطکاک جریان آرام و آشفته پیشنهاد کرده‌اند. شا و جوشی روابط زیر را در گستره‌های مختلف معرفی کردند [67]

$$f = \frac{64}{Re_D} , \quad Re_D (D/C)^{1/2} \leq 30 \quad (27-3)$$

$$f = \frac{27}{Re_D^{0.725}} (D/C)^{0.1375} , \quad 30 \leq Re_D (D/C)^{1/2} \leq 300 \quad (28-3)$$

$$f = \frac{7.2}{Re_D^{0.5}} (D/C)^{0.25} , \quad 300 \leq Re_D (D/C)^{1/2} \quad (29-3)$$

ابعاد D و C استفاده شده در روابط بالا و همچنین شماتیک کوئل مارپیچ در نظر گرفته شده توسط جوشی و شا در شکل (۲-۳) نشان داده شده است



شکل (۲-۳) شماتیک کوئل مارپیچ در نظر گرفته شده توسط جوشی و شا [67]

فصل ۴

بهینه‌سازی

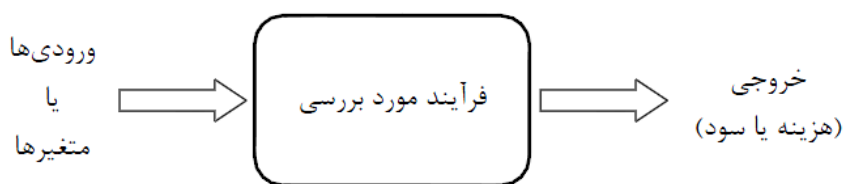
۴-۱ مقدمه

بهینه‌سازی فرآیندی است که برای بهتر کردن چیزی دنبال می‌شود. فکر، ایده و یا طرحی که به وسیله یک دانشمند یا یک مهندس مطرح می‌شود، طی روال بهینه‌سازی بهتر می‌شود. در هنگام بهینه‌سازی، شرایط اولیه با روش‌های مختلف مورد بررسی قرار می‌گیرد و اطلاعات به‌دست‌آمده، برای بهبود بخشیدن به یک فکر یا روش مورد استفاده قرار می‌گیرند. بهینه‌سازی ابزاری ریاضی است که برای یافتن پاسخ بسیاری از پرسش‌ها در خصوص چگونگی راه‌حل مسائل مختلف به کار می‌رود.

در بهینه‌سازی از یافتن بهترین پاسخ برای یک مساله صحبت به میان می‌آید. لفظ بهترین، به طور ضمنی بیان می‌کند که بیش از یک پاسخ برای مساله مورد نظر وجود دارد که البته دارای ارزش یکسانی نیستند. تعریف بهترین پاسخ، به مساله مورد بررسی، روش حل و همچنین میزان خطای مجاز وابسته است. بنابراین نحوه فرمول‌بندی مساله نیز بر چگونگی تعریف بهترین پاسخ تأثیر مستقیم دارد.

بهینه‌سازی، تغییر دادن ورودی‌ها و خصوصیات یک دستگاه، فرآیند ریاضی و یا آزمایش تجربی است، به نحوی که بهترین خروجی یا نتیجه به دست بیاید. ورودی‌ها متغیرهای فرآیند یا تابع موردبررسی (تابع هدف، تابع هزینه و یا تابع برازندگی) و خروجی‌ها نیز مقدار تابع موردبررسی به ازای این ورودی‌ها هستند که هزینه، سود و یا برازندگی نامیده می‌شوند.

عموماً تمام مسائل بهینه‌سازی به صورت کمینه‌سازی مقدار یک تابع هزینه در نظر گرفته می‌شوند، زیرا به راحتی می‌توان نشان داد که هر نوع مساله بهینه‌سازی را می‌توان در قالب یک مساله کمینه‌سازی تعریف نمود.



شکل (۱-۱) فرآیند بهینه‌سازی یک مساله [68]

یک مساله بهینه‌سازی از نظر ریاضی به صورت زیر بیان می‌شود:

$$\text{minimize } f(x) \text{ subject to } g_i(x) \leq b_i, \quad i=1,2,\dots,m \quad (1-4)$$

که در آن $x = \{x_1, x_2, \dots, x_n\} \in \mathbb{R}^n$ متغیر اصلی و مستقل مساله است که با تغییر آن، مقدار کمینه برای تابع هدف پیدا می‌شود. تابع هدف به صورت $f: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$ تعریف شده است و دارای مقدار حقیقی می‌باشد. مجموعه توابع $g_i: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$ نیز تعریف شده‌اند تا قيودی به صورت نامساوی به وسیله آن‌ها بیان گردند. اعداد حقیقی سمت راست این نامساوی‌ها، یعنی b_i ها، حدود نامساوی‌ها هستند. می‌توان زیرمجموعه‌ای از \mathbb{R}^n به Ω یافت، به نحوی که قيود نامساوی برای همه‌ی اعضای این مجموعه برقرار باشند. در اصطلاح Ω مجموعه‌ی شدنی^۱ نامیده می‌شود [68].

۲-۴ روش‌های بهینه‌سازی تکاملی

قانون انتخاب طبیعی به این صورت است که تنها گونه‌هایی از یک جمعیت ادامه نسل می‌دهند که بهترین خصوصیات را داشته باشند و آن‌هایی که این خصوصیات را نداشته باشند به تدریج و در طی زمان از بین می‌روند، به طور مثال فرض کنید گونه خاصی از افراد، هوش بسیار بیشتری از بقیه افراد یک جامعه دارند، در شرایط به طور کامل طبیعی این افراد پیشرفت بهتری خواهند کرد و رفاه به نسبت

^۱ Feasible set

بالتری خواهند داشت و این رفاه خود باعث طول عمر بیشتر و باروری بهتر خواهد بود؛ حال اگر این خصوصیت (هوش) ارثی باشد در نسل بعدی همان جامعه تعداد افراد باهوش به دلیل زاد و ولد بیشتر این گونه افراد بیشتر خواهد بود، اگر همین روند ادامه پیدا کند، ملاحظه می‌شود که در طی نسل‌های متوالی به طور دائم جامعه نمونه، باهوش و باهوش‌تر می‌شود و به این ترتیب یک مکانیزم ساده طبیعی توانسته است در طی چند نسل افراد کم‌هوش را از جامعه حذف کند. به این ترتیب می‌توان دید که طبیعت با بهره‌گیری از یک روش بسیار ساده یعنی حذف تدریجی گونه‌های نامناسب و در عین حال تکثیر بالاتر گونه‌های بهینه، توانسته است به طور دایم هر نسل را از لحاظ خصوصیات مختلف ارتقا بخشد. البته آنچه که در بالا ذکر شد به تنهایی توصیف کننده رخداد‌های واقعی در تکامل طبیعی نیست. بهینه‌سازی و تکامل تدریجی به خودی خود نمی‌تواند طبیعت را در دسترسی به بهترین نمونه‌ها یاری دهد. این مساله در زیر با یک مثال شرح داده شده است.

پس از اختراع اتومبیل به تدریج و در طی سال‌ها اتومبیل‌های بهتری با سرعت‌های بالاتر و قابلیت‌های بیشتر نسبت به نمونه‌های اولیه تولید شدند؛ طبیعی است که این نمونه‌ها حاصل تلاش مهندسان طراح جهت بهینه‌سازی طراحی‌های قبلی بوده‌اند، اما دقت کنید که بهینه‌سازی یک اتومبیل، تنها یک اتومبیل بهتر را نتیجه می‌دهد، اما آیا می‌توان گفت اختراع هواپیما نتیجه همین تلاش بوده است؟ یا به فرض می‌توان گفت فضاپیماها حاصل بهینه‌سازی طرح اولیه هواپیماها بوده‌اند؟

پاسخ این است که گرچه اختراع هواپیما به طور قطع تحت تأثیر دستاوردهای صنعت اتومبیل بوده است، اما به هیچ وجه نمی‌توان گفت که هواپیما فقط حاصل بهینه‌سازی اتومبیل و یا فضاپیما حاصل بهینه‌سازی هواپیما است. در طبیعت هم همین روند حکم فرماست، گونه‌های متکامل‌تری وجود دارند که نمی‌توان گفت فقط حاصل تکامل تدریجی گونه قبلی هستند. در این میان آنچه شاید بتواند تا حدودی ما را در فهم این مساله یاری کند مفهومی است به نام تصادف یا جهش؛ به عبارتی طرح هواپیما نسبت به طرح اتومبیل، یک جهش بود و نه یک حرکت تدریجی. در طبیعت نیز به همین گونه است، در هر نسل جدید بعضی از خصوصیات به صورتی به طور کامل تصادفی تغییر می‌یابند سپس بر اثر تکامل

تدریجی که پیش تر توضیح داده شد، در صورتی که این خصوصیت تصادفی شرایط طبیعت را ارضا کند حفظ می شود در غیر این صورت به شکل خودکار از چرخه طبیعت حذف می گردد؛ در واقع می توان تکامل طبیعی را به صورت (جستجوی کور کورانه^۱ + بقای قوی تر) خلاصه کرد. عوامل مطرح شده در بالا، شالوده اصلی روش های ابتکاری برگرفته از طبیعت را تشکیل می دهند. انتخاب و بقای قوی تر، ایده ای مبنا برای بهینه سازی و جهش ایده ای مبنا برای جستجوی پیوسته می باشد.

اصول فوق منجر به ایجاد برتری هایی در روش های ابتکاری برگرفته از طبیعت بر روش های بهینه سازی کلاسیک ریاضی می شود که از آن جمله می توان به شانس بیشتر کشف بهینه سراسری به دلیل ماهیت تصادفی بودن آنها، عدم نیازمند به تعریف دقیقی از مساله به صورت تابعی خاص، قدرت زیاد در برخورد با مسائل غیرخطی و یا مشتق ناپذیر اشاره کرد [68].

۳-۴ روش های بهینه سازی چند هدفه تکاملی

همانطور که در بخش قبل ذکر شد، مسائل بهینه سازی از منظر تعداد توابع هدف و معیارهای بهینه سازی، به دو نوع دسته مسائل بهینه سازی تک هدفه و مسائل بهینه سازی چند هدفه تقسیم می شوند. در مسائل بهینه سازی تک هدفه، هدف از حل مساله بهبود یک شاخص عملکرد^۲ یگانه است که مقدار کمینه یا بیشینه آن، کیفیت پاسخ به دست آمده را به طور کامل منعکس می کند؛ اما در برخی موارد، نمی توان صرفاً با اتکا به یک شاخص، یک پاسخ فرضی برای مساله بهینه سازی را امتیازدهی نمود. در این نوع مسائل به ناگزیر باید چندین تابع هدف یا شاخص عملکرد را تعریف نمود و به طور همزمان، مقدار همه آنها را بهینه کرد.

بهینه سازی چند هدفه، یکی از زمینه های بسیار فعال و پرکاربرد تحقیقاتی در میان مباحث

^۱ Blind search

^۲ Performance Index

بهینه‌سازی است. غالباً بهینه‌سازی چند هدفه به نام‌های بهینه‌سازی چند معیاره^۱ و بهینه‌سازی برداری^۲ نیز شناخته می‌شود. در بهینه‌یابی چندهدفه، چند تابع هدف مختلف وجود دارند که تمایل به یافتن کمینه یا بیشینه‌ی آن‌ها به‌طور هم‌زمان وجود دارد. اغلب این توابع هدف در نقطه‌ی مقابل یکدیگر قرار دارند، به‌طوری‌که بهبود یکی از آن‌ها، با بدتر شدن دیگری مواجه می‌شود. بنابراین در این‌گونه مسائل برخلاف مسائل تک‌هدفی که تنها یک نقطه‌ی اکسترمم برای مساله وجود دارد، مجموعه‌ای از پاسخ‌های بهینه به عنوان پاسخ به‌دست می‌آیند که به اصطلاح نقاط بهینه‌ی پارتو یا جبهه پارتو^۳ خوانده می‌شوند.

تاکنون، روش‌های متعددی برای حل مسائل بهینه‌سازی چند هدفه معرفی شده‌اند که از میان آن‌ها، روش‌های بهینه‌سازی هوشمند (الگوریتم‌های تکاملی) جایگاه ویژه‌ای دارند. زیرا اغلب، برخلاف روش‌های کلاسیک در ریاضیات کاربردی، مسائل بهینه‌سازی چندهدفه را به همان شکل که هستند، مورد حل قرار می‌دهند و از تبدیلات هندسی و مشابه آن استفاده نمی‌کنند. از میان الگوریتم‌های تکاملی و هوشمند که برای حل مسائل بهینه‌سازی چند هدفه ارائه شده‌اند، می‌توان به موارد زیر اشاره نمود:

- الگوریتم ژنتیک چند هدفه یا Multi-objective Genetic Algorithm به اختصار MOGA
- الگوریتم ژنتیک با ارزیابی برداری یا Vector Evaluated Genetic Algorithm به اختصار VEGA
- الگوریتم ژنتیک مبتنی بر نیچینگ (همسایگی) پارتو یا Niche Pareto Genetic Algorithm به اختصار NPGA
- الگوریتم ژنتیک با مرتب‌سازی نا مغلوب یا Non-dominated Sorting Genetic Algorithm به اختصار NSGA و نسخه دوم آن NSGA-II
- الگوریتم ژنتیک میکرو یا Micro Genetic Algorithm به اختصار μ GA و نسخه دوم آن μ GA2

^۱ Multi-criteria Optimization

^۲ Vector Optimization

^۳ Pareto Front

- بهینه‌سازی ازدحام ذرات چند هدفه یا Multi-objective Particle Swarm Optimization به اختصار MOPSO
- استراتژی تکاملی با آرشیو پارتو یا Pareto Archived Evolution Strategy به اختصار PAES
- الگوریتم انتخاب مبتنی بر الگوی پارتو یا Pareto Envelope-based Selection Algorithm به اختصار PESA و نسخه دوم آن PESA-II
- الگوریتم تکاملی مبتنی بر شدت پارتو یا Pareto Strength Evolutionary Algorithm به اختصار PSEA و نسخه دوم آن PSEA2
- الگوریتم تکاملی چند هدفه مبتنی بر تجزیه یا Multi-objective Evolutionary Algorithm based on Decomposition به اختصار MOEA/D
- الگوریتم رقابت استعماری چند هدفه یا Multi-objective Imperialist Competition Algorithm به اختصار MOICA

در این پروژه از الگوریتم NSGA-II و MOPSO در فرآیند بهینه‌سازی، استفاده کرده و نتایج حاصل از هریک را مورد بحث و بررسی قرار خواهیم داد. در ادامه به معرفی و توضیح الگوریتم‌های فوق و برخی از مفاهیم اساسی موجود در این الگوریتم‌ها پرداخته خواهد شد.

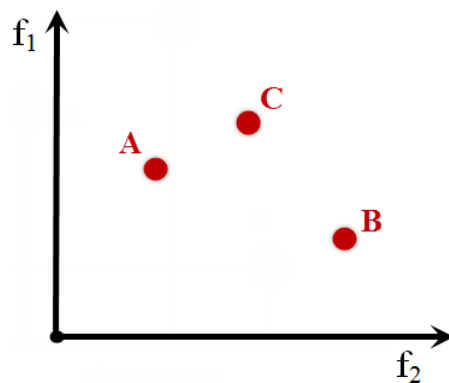
۴-۴ مفاهیم کلی موجود در الگوریتم‌های بهینه‌سازی چندهدفه

۴-۴-۱ مفهوم غلبه^۱

در بهینه‌سازی تک هدفه، فضای پاسخ ترتیب پذیر است و می‌توان به راحتی پاسخ‌ها را براساس ارزش آن‌ها مرتب کرد؛ برای مثال اگر تابع $f(x)$ به ازای $x=1$ و $x=2$ به ترتیب برابر ۱۰ و ۵ باشد، در حالتی که هدف بهینه‌سازی ما، کمینه‌سازی تابع $f(x)$ باشد، می‌توان گفت که همواره $f(2)$

¹ Dominance

بهتر از $f(1)$ است و به این صورت به ازای تمامی مقادیر x ، فضای پاسخ را مرتب کرد، اما در مسائل بهینه‌سازی چند هدفه، این امر امکان‌پذیر نخواهد بود، زیرا ممکن است با افزایش مقدار ورودی، مقدار یکی از توابع هدف کاهش و دیگری افزایش یابد، برای مثال در شکل (۲-۴) فضای پاسخ یک مساله چند هدفه به همراه سه پاسخ فرضی آن، نشان داده شده است که در آن، هدف، کمینه‌سازی مقادیر f_1 و f_2 می‌باشد، همانطور که مشاهده می‌شود، پاسخ A ، از هر دو منظر f_1 و f_2 از پاسخ C بهتر است، اما A از منظر هدف f_1 بدتر از B و از منظر هدف f_2 بهتر از آن است، اما در حالت کلی نمی‌توان گفت کدامیک از این پاسخ‌ها بر دیگری برتری دارد؛ به همین دلیل، فضای پاسخ در بهینه‌سازی چند هدفه را اصطلاحاً ترتیب‌ناپذیر گویند.



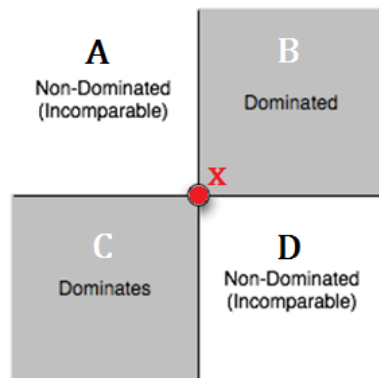
شکل (۲-۴) مقایسه پاسخ‌های یک مساله بهینه‌سازی دو هدفه در فضای حل

به منظور حل مشکل فوق، مفهومی با عنوان غلبه، در بحث بهینه‌سازی چند هدفه مطرح است که معیاری در تعیین برتری پاسخ‌ها نسبت به یکدیگر می‌باشد. بر اساس این مفهوم x بر y غالب است اگر و فقط اگر y از هیچ نظر برتر از x نباشد و x حداقل از یک نظر بهتر از y باشد یا

$$x \text{ dom } y \leftrightarrow \forall i : x_i \leq y_i \text{ and } \exists i_0 : x_{i_0} < y_{i_0} \quad (2-4)$$

برای مثال در شکل (۳-۴) x بر تمامی اعضای مجموعه B غلبه می‌کند، در حالی که توسط تمامی اعضای مجموعه C مغلوب می‌شود (در حالت کلی نمی‌توان در مورد نسبت اعضای مجموعه‌های A و D

با x صحبتی کرد).



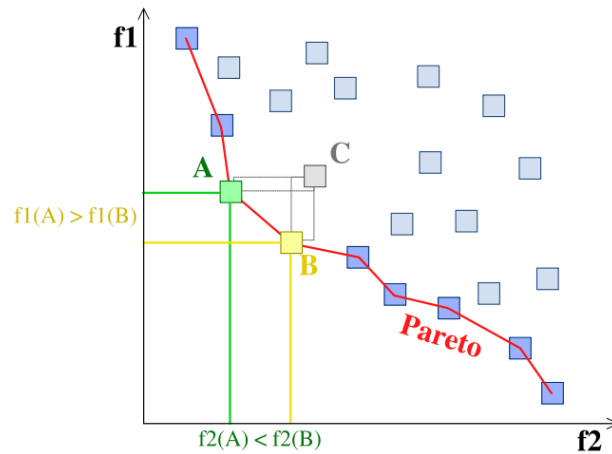
شکل (۴-۳) مجموعه جواب‌های مغلوب و نامغلوب x

۴-۴-۲ مفهوم جبهه پارتو^۱

همانطور که در بخش قبل ذکر شد، در الگوریتم‌های بهینه‌سازی چندهدفه صحبت از پاسخ‌های نامغلوب است، به مجموعه این پاسخ‌ها در فضای حل که هیچ کدام از آن‌ها بر دیگری ارجحیت ندارند و بسته به شرایط، می‌توان هر کدام را به عنوان یک تصمیم بهینه در نظر گرفت، به اصطلاح جبهه پارتو گفته می‌شود.

از مزایای بهینه‌سازی چندهدفه مبتنی بر پارتو این است که پاسخ بهینه‌ی پارتو در بردارنده‌ی مجموعه‌ای از پاسخ‌ها می‌باشد که می‌تواند شامل پاسخ‌هایی که دارای نقض قید می‌باشند نیز باشد، بنابراین یک پاسخ با نقض قید مجاز، اگر ارزش تابع هدف بالایی داشته باشند، نیز می‌تواند در نظر گرفته شود. دوم این که با تجزیه‌ی مساله‌ی اصلی به چندین مساله، اهداف مختلف انعطاف‌پذیری بیشتری در جست‌وجوی فضای پاسخ خواهند داشت. در شکل (۴-۴) جبهه پارتو برای یک مجموعه از پاسخ‌های شدنی در فضای حل نشان داده شده است.

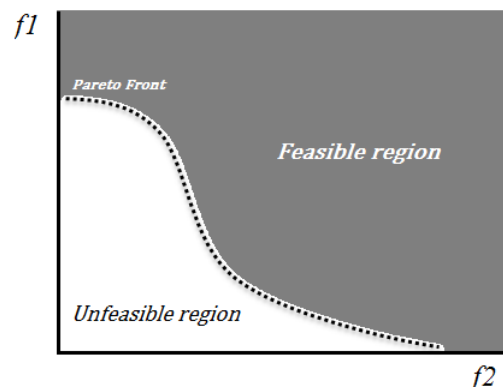
¹Pareto Front



شکل (۴-۴) پاسخ‌های جبهه پارتو

۳-۴-۴ مجموعه ممکن^۱ و محدوده ممکن^۲

اصولاً در هر مساله بهینه‌سازی به دلیل شرایط حاکم بر آن‌ها و یا قیدهای مساله تنها مجموعه‌ای از پاسخ‌ها، قابل دستیابی هستند که مجموعه متغیرهای قابل قبول برای مساله را مجموعه ممکن و محدوده قابل دستیابی در فضای هدف را اصطلاحاً محدوده ممکن می‌نامند. کاملاً واضح است که مرز بین محدود ممکن و محدوده ناممکن همان جبهه پارتو خواهد بود.



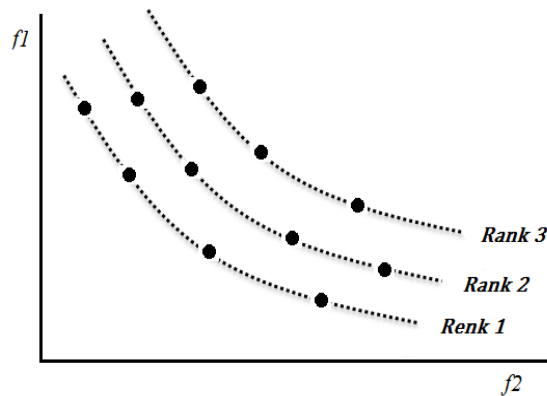
شکل (۵-۴) محدوده ممکن و ناممکن در فضای حل

¹ Feasible Set

² Feasible Region

۴-۴-۴ مفهوم رتبه^۱

در برخی از الگوریتم‌های بهینه‌سازی نیازمند پارامتری به منظور ارزیابی کیفیت پاسخ‌ها هستند، یکی از این روش‌ها که در الگوریتم‌هایی مانند NSGA-II مورد استفاده قرار می‌گیرد، روش مرتب‌سازی براساس تعداد دفعات مغلوب شدن هر پاسخ توسط سایر پاسخ‌ها است که اصطلاحاً آن را رتبه پاسخ می‌نامند. بر این اساس پاسخ‌هایی که توسط هیچ پاسخی مغلوب نشوند، رتبه ۱، پاسخ‌هایی که تنها توسط اعضای دارای رتبه ۱ مغلوب شوند، رتبه ۲، پاسخ‌هایی که تنها توسط اعضای دارای رتبه ۱ و ۲ مغلوب شوند، رتبه ۳ و ... خواهند داشت. کاملاً واضح است که بر طبق این تعریف، در هر تکرار، پاسخ‌های رتبه ۱ پاسخ‌های پارتو هستند.



شکل (۴-۶) رتبه بندی نامغلوب پاسخ‌ها در فضای حل

۵-۴-۴ پراکندگی پاسخ‌ها

میزان پراکندگی پاسخ‌ها در داخل فضای هدف یکی از معیارهای مهم در بهینه‌سازی چندهدفه

¹ Rank

می‌باشد، زیرا تمرکز پاسخ‌های نامغلوب ارائه شده توسط الگوریتم، در یک منطقه خاص از جبهه پارتو مطلوب نیست و لازم است که پاسخ‌های ارائه شده حتی‌الامکان تمامی جبهه پارتو را به طور یکنواخت پوشش دهند. بدین منظور در الگوریتم‌های بهینه‌سازی روش‌هایی برای حفظ پراکندگی پاسخ‌ها در نظر گرفته می‌شود که از مهم‌ترین می‌توان به روش اشتراک برزندگی^۱، روش شبکه‌بندی تطبیق شونده^۲ محدود حل و روش ارزیابی فاصله ازدحامی^۳ اشاره کرد.

الف- روش اشتراک برزندگی

این روش یکی از قدیمی‌ترین روش‌های تخمین پراکندگی پاسخ‌ها در بهینه‌سازی چندهدفه و از خانواده روش‌های تخمین پراکندگی براساس همسایگی^۴ می‌باشد. در این روش برای هر پاسخ، ناحیه‌ای با شعاع σ_{share} در نظر می‌گیرند و بر این اساس در هنگام ارزیابی پاسخ‌ها، به تعداد پاسخ‌های موجود در ناحیه نفوذ هر پاسخ، تاثیر منفی در مقدار برزندگی آن در نظر می‌گیرند. اشکال اصلی این روش مشکل بودن تعریف مقدار مناسب شعاع همسایگی می‌باشد.

ب- روش شبکه‌بندی تطبیق شونده

در این روش فضای حل را به تعداد مشخصی شبکه تقسیم‌بندی می‌کنند و بر این اساس پاسخ‌های پارتویی که در سلول‌های با تراکم کمتر از نظر تعداد پاسخ قرار دارند با احتمال بیشتری به عنوان پاسخ‌های بهینه برگزیده می‌شوند. یعنی در این روش، بر خلاف روش قبل که انتخاب در آن مبتنی بر فرد صورت می‌گرفت، انتخاب مبتنی بر ناحیه انجام می‌شود. این روش پایه و اساس الگوریتم‌هایی مانند PESA-II می‌باشد.

در شکل (۴-۷) شبکه‌بندی محدود حل با ۲۵ سلول برای یک مساله نشان داده شده است که پاسخ‌های پارتو در سلول‌های ۶، ۱۲، ۱۸ و ۲۴ قرار گرفته‌اند. براساس روش فوق، بدلیل اینکه تعداد

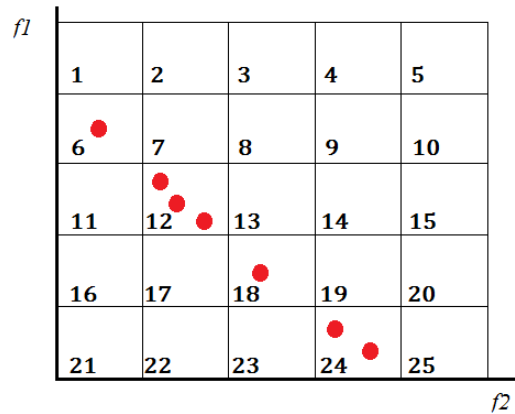
¹ Fitness Sharing

² Adaptive grid

³ Crowding distance

⁴ Niching Method

پاسخ‌های موجود در سلول ۶ و ۱۸ کمتر از سایر سلول‌ها است، لذا احتمال انتخاب پاسخ‌های پارتو موجود در آن‌ها بیشتر از بقیه سلول‌ها است.



شکل (۴-۷) شبکه بندی ۵×۵ فضای حل

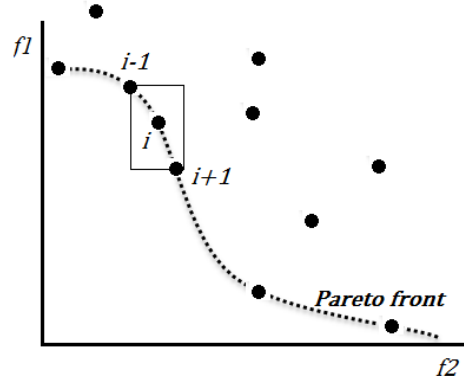
پ- روش ارزیابی فاصله ازدحامی

در این روش از نسبت فاصله پاسخ‌ها از پاسخ‌های مجاور خود به کل بازه پاسخ‌های جبهه پارتو، در تخمین پراکندگی پاسخ‌ها استفاده می‌شود. مقدار فاصله ازدحامی پاسخ i ام جبهه پارتو به صورت زیر محاسبه می‌گردد

$$d_i^j = \frac{|f_{i+1}^j - f_{i-1}^j|}{f_{max}^j - f_{min}^j} \quad (۳-۴)$$

$$D_i = \sum_{j=1}^m d_i^j \quad (۴-۴)$$

که در آن f_i^j مقدار تابع هدف j ام، امضو i ام، f_{max}^j مقدار بیشینه تابع هدف j ام، f_{min}^j مقدار کمینه تابع هدف j ام، d_i^j فاصله ازدحامی عضو i ام نسبت به هدف j ام و D_i مجموع کل فاصله ازدحامی عضو i ام در تمامی هدف‌ها است.



شکل (۴-۸) فاصله ازدحامی عضو i ام پارتو

۴-۵ الگوریتم ژنتیک (GA)

در این بخش ابتدا توضیحات کوتاهی در مورد الگوریتم ژنتیک ارائه شده و در ادامه روش بهینه‌سازی با استفاده از الگوریتم ژنتیک با مرتب‌سازی نا مغلوب (NSGA-II) شرح داده خواهد شد.

۴-۵-۱ کلیات

الگوریتم ژنتیک یکی از قدیمی‌ترین و در عین حال یکی از موفق‌ترین الگوریتم‌های بهینه‌سازی تکاملی معرفی شده تا به امروز می‌باشد.

الگوریتم ژنتیک برای کاربردهای مهندسی و به صورت امروزی آن نخستین بار توسط هلند^۱ [69]، متخصص علوم کامپیوتر دانشگاه میشیگان در سال ۱۹۷۵ ارائه شد. پس از آن کارهای دژونگ^۲ در سال ۱۹۷۵ در زمینه بررسی و مقایسه چندین روش الگوریتم ژنتیک، پایه‌های نظری بحث را فراهم آورد.

این الگوریتم با الهام از طبیعت بر پایه اصل تکاملی "پایداری بهترین‌ها"^۳ استوار است. الگوریتم

^۱ Holland

^۲ Dejong

^۳ Survival of the fittest

ژنتیک اگرچه پس از الگوریتم استراتژی تکاملی پیشنهاد گردید ولی مشهورترین روش از بین الگوریتم‌های تکاملی است. در یک الگوریتم ژنتیک یک جمعیت از افراد طبق مطلوبیت آن‌ها در محیط بقا می‌یابند و افرادی با قابلیت‌های برتر، شانس ازدواج و تولید مثل بیشتری را خواهند یافت، بنابراین بعد از چند نسل فرزندان با کارایی بهتر به وجود می‌آیند. در الگوریتم ژنتیک هر فرد از جمعیت به صورت یک کروموزوم معرفی می‌شود، کروموزوم‌ها در طول چندین نسل کامل‌تر می‌شوند و در هر نسل کروموزوم‌ها پس از ارزیابی، متناسب با ارزش خود امکان بقا و تکثیر می‌یابند. تولید نسل در بحث الگوریتم ژنتیک با عملگرهای تقاطع^۱ و جهش^۲ صورت می‌گیرد و والدین برتر بر اساس یک تابع برازندگی انتخاب می‌شوند.

در هر مرحله از اجرای الگوریتم ژنتیک، یک دسته از نقاط فضای جستجو مورد پردازش‌های تصادفی قرار می‌گیرند. به این صورت که به هر نقطه، دنباله‌ای از کاراکترها نسبت داده می‌شود و بر روی این دنباله‌ها، عملگرهای ژنتیکی اعمال می‌شود. سپس دنباله‌های به دست آمده رمز گشایی^۳ شده تا نقاط جدیدی در فضای جستجو به دست آید. سرانجام براساس این که تابع هدف در هر یک از نقاط چه مقدار باشد، احتمال شرکت نمودن آن‌ها در مرحله بعد تعیین می‌گردد.

در شکل (۴-۹) نمای کلی الگوریتم ژنتیک نمایش داده شده است. آن چه که باید در اینجا به آن اشاره کرد این است که روند ارائه شده در این شکل، یک حالت کلی است و برای اعمال هر یک از بخش‌ها روش‌های متفاوتی وجود دارد، برای مثال برای پیاده‌سازی ترکیب می‌توان از روش ترکیب تک نقطه‌ای، دو نقطه‌ای و یا ترکیب یکنواخت استفاده کرد.

^۱ Cross over

^۲ Mutation

^۳ Decode

۱. تولید جمعیت اولیه
۲. تعیین میزان برازندگی^۱ برای هر عضو از جمعیت
۳. انتخاب درصدی از اعضای جمعیت به عنوان والد، بر اساس میزان برازندگی آنها
۴. انجام عملیات ترکیب بر روی والدین به منظور ایجاد فرزندان
۵. اعمال جهش بر روی درصدی از اعضای جمعیت
۶. تشکیل جمعیت جدید به وسیله اعضای به دست آمده از ترکیب و جهش و درصدی از بهترین اعضای جمعیت قبلی
۷. توقف اجرای الگوریتم در صورت مشاهده شرایط توقف و برگرداندن بهترین پاسخ در جمعیت فعلی و در غیر این صورت رفتن به مرحله ۳

شکل (۴-۹) شبه کد الگوریتم ژنتیک

۴-۵-۲ الگوریتم ژنتیک با مرتب‌سازی نامغلوب (NSGA-II)

به علت موفقیت‌های الگوریتم ژنتیک در حل مسائل بهینه‌سازی تک هدفه، نسخه‌های چندهدفه بسیاری از آن در سال‌های اخیر ارائه شده‌اند که در این میان، الگوریتم NSGA-II یکی از پرکاربردترین و قدرتمندترین آنها می‌باشد و کارایی آن در حل مسائل مختلف، به اثبات رسیده است. اسرینیواس^۲ و دب^۳ [70] در سال ۱۹۹۵ روش بهینه‌سازی NSGA را برای حل مسائل بهینه‌سازی چند هدفه معرفی نمودند. نکات برجسته‌ای که در مورد این روش بهینه‌سازی وجود دارند، عبارت‌اند از:

۱. پاسخی که هیچ پاسخ دیگری، به طور قطع بهتر از آن نباشد، دارای امتیاز بیشتری است. پاسخ‌ها بر اساس این که چند پاسخ بهتر از آنها وجود داشته باشند، رتبه‌بندی و مرتب

¹ Fitness value

² Srinivas

³ Deb

می‌شوند.

۲. شایستگی (برازندگی) برای پاسخ‌ها بر حسب رتبه آن‌ها و عدم غلبه سایر پاسخ‌ها، اختصاص می‌یابد.

۳. از شیوه اشتراک‌برازندگی برای پاسخ‌های نزدیک استفاده می‌شود تا به این ترتیب پراکندگی پاسخ‌ها به نحو مطلوبی تنظیم شود و پاسخ‌های به‌طور یکنواخت در فضای جستجو پخش شوند.

با توجه به حساسیت نسبتاً زیادی که نحوه عملکرد و کیفیت پاسخ‌های الگوریتم NSGA به پارامترهای اشتراک‌برازندگی و سایر پارامترها دارند، نسخه دوم الگوریتم NSGA با نام NSGA-II توسط دب و همکاران [71] در سال ۲۰۰۰ معرفی گردید. ویژگی‌های عمده این الگوریتم عبارت‌اند از:

۱. تعریف فاصله تراکمی به عنوان ویژگی جایگزین برای شیوه‌هایی مانند اشتراک‌برازندگی

۲. استفاده از عملگر انتخاب تورنومنت دو-دویی

۳. ذخیره و آرشیو کردن پاسخ‌های نامغلوب که در مراحل قبلی الگوریتم به دست آمده‌اند (نخبه

گرایی)^۱

در الگوریتم NSGA-II از میان پاسخ‌های هر نسل، تعدادی از آن‌ها با استفاده از روش انتخاب تورنومنت دو-دویی انتخاب می‌شوند. در روش انتخاب دو-دویی، دو پاسخ به تصادف از میان جمعیت انتخاب شده و سپس میان این دو پاسخ، مقایسه‌ای انجام می‌شود و هر کدام که بهتر باشد، نهایتاً انتخاب می‌شود. معیارهای انتخاب در الگوریتم NSGA-II در درجه اول، رتبه پاسخ و در درجه دوم فاصله ازدحامی مربوط به پاسخ است و هر چه قدر رتبه پاسخ کمتر و فاصله تراکمی آن بیشتر باشد، مطلوب‌تر است.

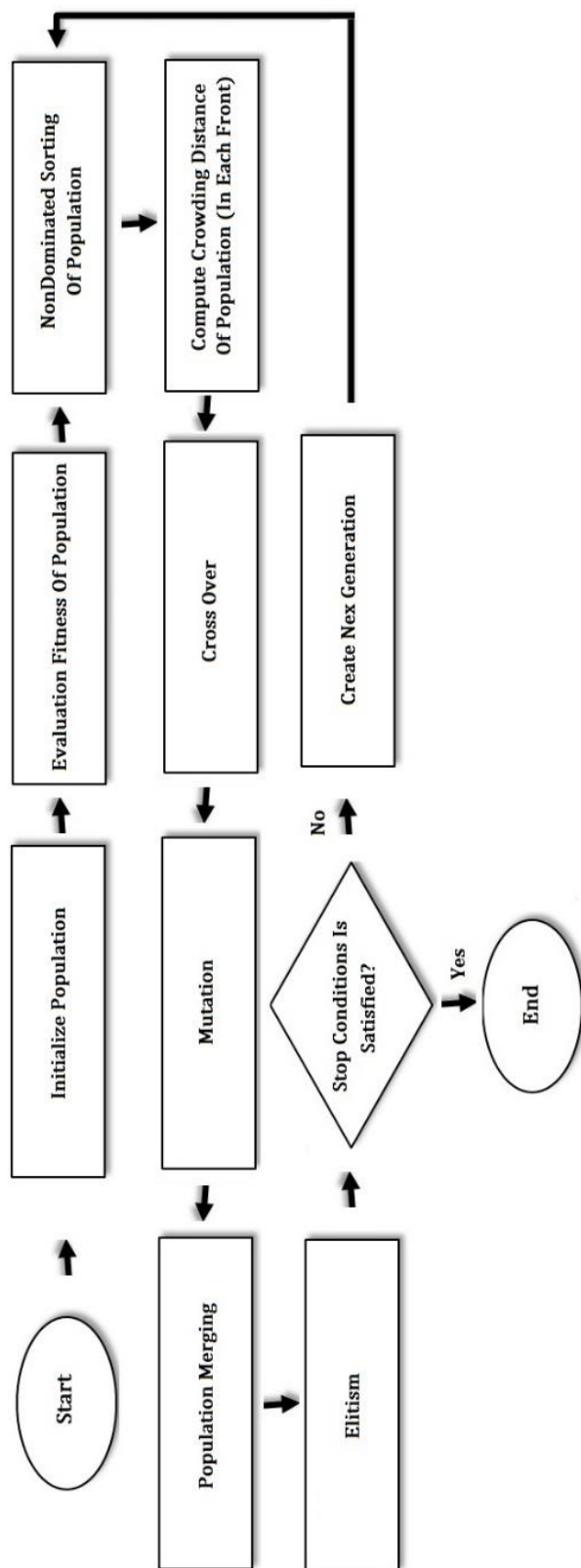
با تکرار عملگر انتخاب دو-دویی بر روی جمعیت هر نسل، مجموعه‌ای از افراد آن نسل برای

^۱ Elitism

شرکت در تقاطع^۱ و جهش^۲ انتخاب می‌شوند. بر روی بخشی از مجموعه افراد انتخاب شده، عمل تقاطع و بر روی بقیه، عمل جهش انجام می‌شود و جمعیتی از فرزندان و جهش‌یافتگان ایجاد می‌شود. در ادامه، این جمعیت با جمعیت اصلی ادغام شده و اعضای جمعیت تازه تشکیل یافته، ابتدا بر حسب رتبه و به صورت صعودی مرتب می‌شوند. اعضای از جمعیت که دارای رتبه یکسانی هستند، بر حسب فاصله تراکمی و به صورت نزولی مرتب می‌شوند. با این کار اعضای جمعیت در درجه اول بر حسب رتبه و در درجه دوم بر حسب فاصله تراکمی مرتب‌سازی می‌شوند. در نهایت برابر با تعداد افراد جمعیت اصلی، اعضای از بالای فهرست مرتب شده انتخاب می‌شوند و بقیه اعضای جمعیت دور ریخته می‌شوند. اعضای انتخاب شده جمعیت نسل بعدی را تشکیل می‌دهند و چرخه مذکور در این بخش تا محقق شدن شرایط خاتمه، تکرار می‌شود. در شکل (۴-۱۰) نمای کلی الگوریتم NSGA-II نمایش داده شده است [72].

^۱ Crossover

^۲ Mutation



شکل (۴-۱۰) فلوجارت الگوریتم ژنتیک با مرتب‌سازی نامغلوب (NSGA-II)

۴-۶ الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات (PSO)

در این بخش ابتدا توضیحات کوتاهی در مورد الگوریتم ازدحام ذرات ارائه شده و در ادامه روش بهینه‌سازی با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات چندهدفه (MOPSO) شرح داده خواهد شد.

۴-۶-۱ کلیات

جیمز کندی^۱، روانشناس اجتماعی و راسل سی ابرهارت^۲، مهندس برق، صاحبان اصلی ایده‌ی الگوریتم ازدحام ذرات می‌باشند. آن‌ها در ابتدا قصد داشتند که با بهره‌گیری از مدل‌های اجتماعی و روابط موجود اجتماعی، نوعی از هوش محاسباتی را به وجود بیاورند که به توانایی‌های فردی ویژه نیازی نداشته باشد.

اولین شبیه‌سازی آن‌ها که در سال ۱۹۹۵ انجام گردید، آن‌ها را به سمت شبیه‌سازی رفتار پرندگان برای یافتن دانه رهنمون کرد. این کار تحت تأثیر کار هپنر^۳ و گرناندر^۴ بود، که در سال ۱۹۹۰ برای شبیه‌سازی رفتار پرندگان به صورت یک سیستم غیرخطی انجام گرفته بود. کار کندی و ابرهارت، منجر به ایجاد الگوریتمی قوی برای بهینه‌سازی، به نام الگوریتم بهینه‌سازی گروه ذرات یا PSO شد.

در الگوریتم PSO، تعدادی از موجودات وجود دارند، که به آن‌ها ذره گفته می‌شود و در فضای جستجوی تابع هدف پخش شده‌اند. هر ذره مقدار تابع هدف را در موقعیتی از فضا که در آن قرار گرفته است، محاسبه می‌کند. سپس با استفاده از ترکیب اطلاعات محل فعلی‌اش و بهترین محلی که در گذشته در آن بوده است و همچنین اطلاعات یک یا چند ذره از بهترین ذرات موجود در جمع، جهتی را برای حرکت انتخاب می‌کند و پس از انجام حرکت، یک مرحله از الگوریتم به پایان می‌رسد. این مراحل

¹ James Kennedy

² Russell C. Eberhart

³ Heppner

⁴ Grenander

چندین بار تکرار می‌شوند تا آن که پاسخ مورد نظر به دست بیاید. در واقع انبوه ذرات که مقدار بهینه‌ی یک تابع را جستجو می‌کنند، همانند دسته‌ای از پرندگان عمل می‌کنند که به دنبال غذا می‌گردند [73] و [74].

اگر $x^i[t]$ و $v^i[t]$ به ترتیب بیانگر موقعیت و سرعت ذره i ام در تکرار t و $x^{i,best}$ و x^{gbest} به ترتیب بیانگر بهترین موقعیت تجربه شده ذره i ام و بهترین موقعیت تجربه شده کل مجموعه ذرات در الگوریتم PSO باشد، آنگاه موقعیت و سرعت ذره i ام در تکرار $t+1$ بوسیله روابط زیر به دست می‌آیند:

$$v^i[t+1] = wv^i[t] + c_1R_1 \otimes (x^{i,best}[t] - x^i[t]) \quad (5-4)$$

$$+ c_2R_2 \otimes (x^{gbest}[t] - x^i[t])$$

$$x^i[t+1] = x^i[t] + v^i[t+1] \quad (6-4)$$

که در آن، w ضریب اینرسی، c_1 ضریب یادگیری مربوط به تجارب شخصی هر ذره، c_2 ضریب یادگیری مربوط به تجارب کل جمع و R_1 و R_2 دو بردار هم اندازه با بعد فضای جستجو هستند که مولفه‌هایشان اعداد تصادفی مستقل با توزیع یکنواخت و در بازه $[0,1]$ هستند. همچنین علامت \otimes نشان‌دهنده‌ی عمل ضرب عضو به عضو برای ماتریس‌ها است. به منظور محدود کردن میزان حرکت هر ذره، مقدار مؤلفه‌های سرعت ذرات در بازه‌ی $[-V_{max}, V_{min}]$ در نظر گرفته می‌شود و مقادیر بزرگ‌تر یا کوچک‌تر نیز به این بازه تصویر می‌شوند که با فرض ثابت بودن عرض فضای جستجو در تمام ابعاد، به طور معمول $V_{max} = SP$ در نظر گرفته می‌شود که در آن S عرض فضای جستجو و P عددی در بازه $[0.1,1]$ است.

به طور معمول در PSO، مقدار w را برابر با 0.4 و مقدار c_1 و c_2 را برابر با 2 در نظر می‌گیرند. در

شکل (۴-۱۱) نمای کلی الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات نمایش داده شده است.

۱. تولید جمعیت اولیه
۲. ایجاد سرعت و موقعیتی تصادفی برای هر ذره
۳. تعیین میزان برازندگی هر ذره
۴. تعیین بهترین موقعیت هر ذره ($x^{i,best}$)
۵. تعیین بهترین موقعیت کل اعضا (x^{gbest})
۶. محاسبه سرعت جدید هر ذره براساس سرعت قبلی، بهترین تجربه شخصی و بهترین تجربه کل مجموعه ذرات
۷. تغییر موقعیت هر زده با سرعت تعیین شده برای آن در مرحله قبل
۸. توقف اجرای الگوریتم در صورت مشاهده شرایط توقف و برگرداندن بهترین پاسخ در جمعیت فعلی و در غیر این صورت رفتن به مرحله ۳

شکل (۴-۱۱) شبه کد الگوریتم ازدحام ذرات

۴-۶-۲ الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات چند هدفه (MOPSO)

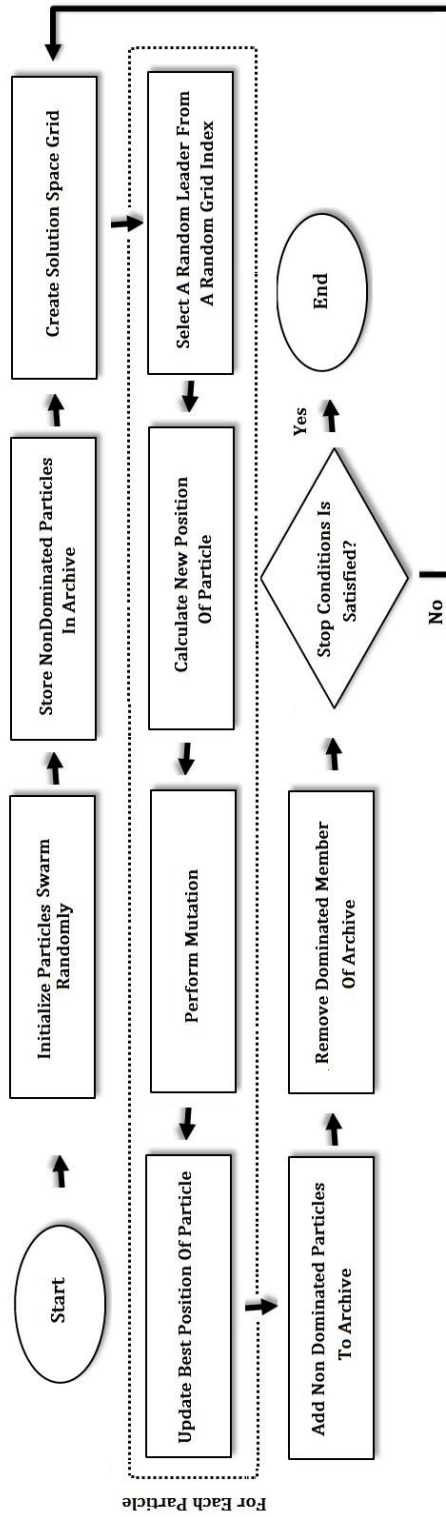
با توجه به موفقیت‌های قابل توجه الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات در حل مسائل بهینه‌سازی تک هدفه (به خصوص مسائل پیوسته)، دانشمندان و محققین بسیاری، سعی در استفاده از این الگوریتم برای حل مسائل چند هدفه کردند که منجر به ارائه نسخه‌های متعددی از الگوریتم PSO برای حل مسائل چند هدفه شد که از این میان، الگوریتم ارائه شده توسط کوئلو^۱ و همکاران [75] در سال ۲۰۰۴، (آن را MOPSO خواهیم نامید) و الگوریتم ارائه شده توسط راکوئل^۲ و ناوال^۳ [76] در سال ۲۰۰۵ (آن را MOPSO-CD خواهیم نامید)، از کارآمدترین الگوریتم‌های ارائه شده در این زمینه هستند.

¹ Coello

² Raquel

³ Naval

هر دو الگوریتم فوق از یک آرشیو خارجی برای ذخیره پاسخها نامغلوب به دست آمده در طول تکرارها استفاده می کنند که روشی بسیار کارآمد در حیطه الگوریتم های جستجوگری مانند PSO می باشد، تنها تفاوت این دو الگوریتم این است که در MOPSO از مفهوم شبکه سازگار و در MOPSO-CD از مفهوم فاصله ازدحامی به عنوان پارامتر ثانویه برای تعیین برتری پاسخها استفاده شده است. در شکل (۴-۱۲) فلوچارت الگوریتم MOPSO که در این پایان نامه مورد استفاده قرار گرفت نشان داده شده است.



شكل (٤-١٢) فلوچارت الگورېتم MOPSO

۷-۴ حل مسائل نمونه با کدهای نوشته شده و ارزیابی صحت

نتایج آن‌ها

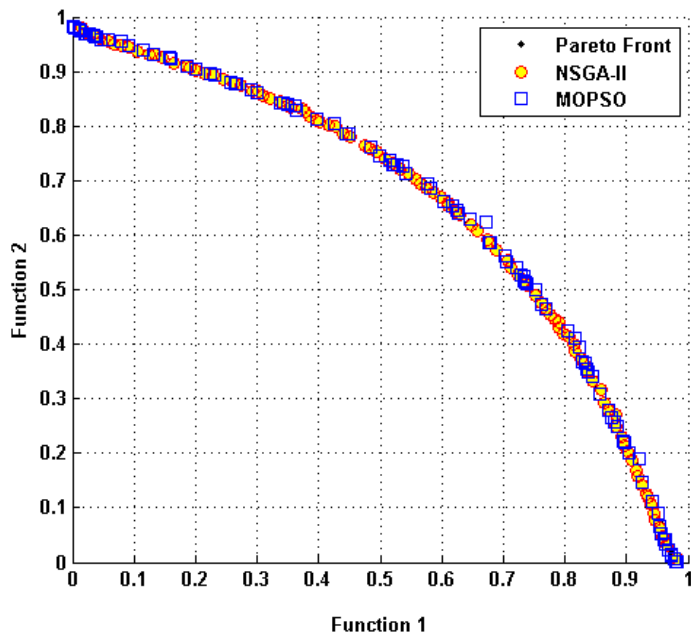
به منظور صحت سنجی کدهای نوشته شده با الگوریتم‌های شرح داده شده در بخش‌های قبلی، نتایج حاصل از بکارگیری این کدها در حل سه مساله بهینه‌سازی چند هدفه (بر اساس جدول (۱-۴))، مورد بررسی قرار داده شد.

جدول (۱-۴) چند نمونه از مسائل بهینه‌سازی چندهدفه [77]

| حدود متغیرها | تعریف مساله | |
|---|---|---|
| $-4 \leq x_i \leq 4, i=1,2,3$ | $\min F = (f_1(x), f_2(x)) \text{ where}$ $f_1(x) = 1 - \exp\left(-\sum_{i=1}^n \left(x_i - \frac{1}{\sqrt{n}}\right)^2\right)$ $f_2(x) = 1 - \exp\left(-\sum_{i=1+1}^n \left(x_i + \frac{1}{\sqrt{n}}\right)^2\right)$ | ۱ |
| $-5 \leq x_i \leq 5, i=1,2,3$ $a=0.8$ $b=3$ | $\min F = (f_1(x), f_2(x)) \text{ where}$ $f_1(x) = \sum_{i=1}^{n-1} -10 \exp\left(-0.2 * \sqrt{x_i^2 + x_{i+1}^2}\right)$ $f_2(x) = \sum_{i=1}^n (x_i ^a + 5 \sin(x_i)^b)$ | ۲ |

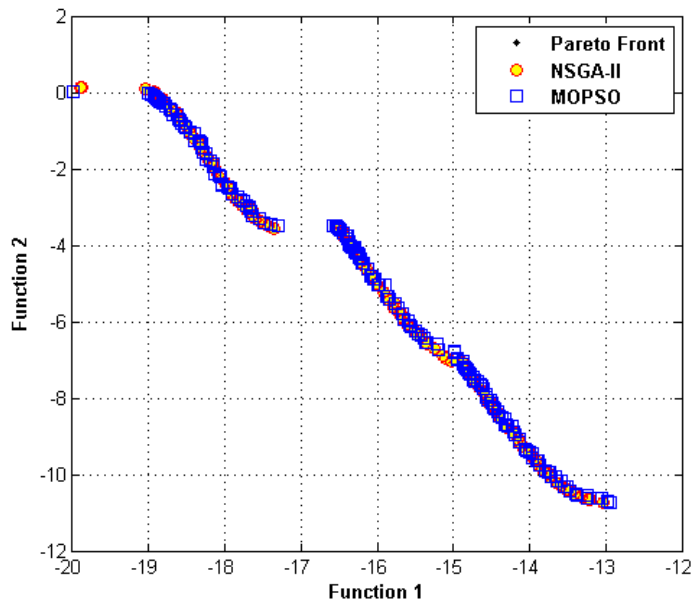
در شکل‌های (۱۳-۴) و (۱۴-۴)، نتایج حاصل از بکارگیری کدهای نوشته شده برای دو الگوریتم MOPSO و NSGA-II در یافتن پاسخ‌های پارتو مسائل نمونه مندرج در جدول (۱-۴) نشان داده شده است. همانطور که در این شکل‌ها مشخص است، کدهای نوشته به خوبی توانسته‌اند پاسخ‌های بهینه

این مسائل را بیابند.



شکل (۴-۱۳) نتایج حاصل از به‌کارگیری کدهای نوشته‌شده برای چهار الگوریتم NSGA-II و MOPSO در یافتن

پاسخ‌های پارتو مساله نمونه ۱



شکل (۴-۱۴) نتایج حاصل از به‌کارگیری کدهای نوشته‌شده برای چهار الگوریتم NSGA-II و MOPSO در یافتن

پاسخ‌های پارتو مساله نمونه ۲

فصل ۵

نتایج و بحث

۵-۱ مقدمه

در فصل‌های قبل مراحل مدل‌سازی حرارتی یک مبدل پوسته و لوله مارپیچ بر اساس روابط و معادلات موجود ارائه شدند. در ادامه بهینه‌سازی مسائل با استفاده از الگوریتم‌های چند هدفه تکاملی مورد بحث و بررسی قرار داده شد. در این فصل نتایج حاصل از بهینه‌سازی چند هدفه مبدل حرارتی پوسته و لوله مارپیچ با به کار گیری اصول مطرح شده در فصل‌های گذشته مورد بحث و بررسی قرار خواهد گرفت.

۵-۲ شرایط عملکرد مبدل حرارتی

در این پایان‌نامه جهت بهینه کردن مبدل حرارتی یک مبدل پوسته و لوله مارپیچ با چیدمان افقی مد نظر قرار گرفت. مبدل حرارتی با سیالات سمت پوسته و لوله هر دو آب در نظر گرفته شدند به گونه‌ای که سیال گرم درون لوله به وسیله سیال سرد سمت پوسته خنک می‌شود. طول مبدل ۱ متر و قطر جداره داخلی پوسته مبدل ۵۰ سانتی‌متر انتخاب شدند. دما و دبی جرمی سیال گرم (سمت لوله) به ترتیب ۳۵۰ K و ۴ kg/s و دما و دبی جرمی سیال سرد (سمت پوسته) به ترتیب ۳۰۰ K و ۱۲ kg/s در نظر گرفته شدند. خواص ترموفیزیکی آب در دماهای تعیین شده در جدول (۵-۱) شرح داده شده‌اند.

جدول (۵-۱) شرایط کارکرد مبدل حرارتی

| خواص ترموفیزیکی سیالات | سمت لوله (سیال گرم) | سمت پوسته (سیال سرد) |
|--------------------------------------|---------------------|----------------------|
| دانسیته (Kg/m^3) | ۹۷۴ | ۹۹۷ |
| ظرفیت گرمای ویژه (J/Kg.K) | ۴۱۹۵ | ۴۱۷۹ |
| ویسکوزیته (N.s/m^2) | ۰/۰۰۰۳۶۵ | ۰/۰۰۰۸۵۵ |
| ضریب هدایت حرارتی (W/m.K) | ۰/۶۶۸ | ۰/۶۱۳ |
| عدد پرانتل | ۲/۲۹ | ۵/۸۳ |

۵-۳ توابع هدف

در این مطالعه اهداف کلی، بهبود انتقال حرارت و کاهش افت فشار هستند. برای برآورده شدن این منظور مقدار ضریب کارایی مبدل حرارتی (ϵ) که از رابطه (۳-۱) قابل محاسبه است، به عنوان یکی از توابع هدف انتخاب شد. انتخاب ضریب کارایی به عنوان تابع هدف به دلیل مؤثر بودن ضرایب انتقال حرارت هر دو سمت (پوسته و لوله) می تواند معیار مناسبی جهت بهینه سازی باشد. برای تابع هدف بعدی با توجه به سطح مقطع عبور جریان در سمت پوسته و تأثیر ناچیز تغییرات هندسه کوئل مارپیچ در میزان افت فشار سیال سمت پوسته، مقدار افت فشار سیال سمت لوله (ΔP) که از رابطه (۳-۲۵) قابل محاسبه است، به عنوان تابع هدف دوم انتخاب شد که معیاری از هزینه کارکرد مبدل است. در ادامه الگوریتم های بهینه سازی جهت ماکزیمم کردن تابع هدف اول و مینیمم کردن تابع هدف دوم به کار گرفته شدند.

۵-۴ متغیرهای طراحی

جهت بهینه سازی مبدل پوسته و لوله مارپیچ، اندازه قطر و طول پوسته به عنوان قید در نظر گرفته می شوند اما هندسه لوله مارپیچ درون پوسته قابل تغییر خواهد بود. با توجه به تحقیقات و مطالعات پیشین در زمینه پارامترهای تأثیرگذار بر عملکرد مبدل، سه متغیر برای هندسه لوله مارپیچ درون پوسته معرفی شده است که عبارتند از شعاع لوله (r)، شعاع مارپیچ (R_c) و گام مارپیچ (b). در شکل (۳-۱) پارامترهای ابعادی یک مبدل حرارتی پوسته و لوله مارپیچ افقی نشان داده شده است. می توان دریافت که با در نظر گرفتن مقادیر متعدد برای پارامترهای ذکر شده هندسه های بی شماری برای کوئل درون پوسته قابل تصور خواهد بود که دارای عملکردهای متفاوتی هستند. در ادامه پس از انجام بهینه سازی بهترین مقادیر برای پارامترهای ذکر شده با در نظر گرفتن اهداف بهینه سازی معرفی

می‌گردند. محدوده متغیرهای طراحی مساله با توجه به ابعاد پوسته و قیدهای ساخت مبدل انتخاب شده و در جدول (۲-۵) ارائه شده‌است.

جدول (۲-۵) محدوده متغیرهای طراحی

| محدوده بالا | محدوده پایین | پارامترهای ابعادی مبدل |
|-------------|--------------|--------------------------|
| ۰/۰۳۵ | ۰/۰۱ | شعاع لوله $r - (m)$ |
| ۰/۲۱ | ۰/۱۵ | شعاع ماریپیچ $R_c - (m)$ |
| ۰/۳ | ۰/۰۷ | گام ماریپیچ $b - (m)$ |

۵-۵ اجرای الگوریتم‌ها و ترسیم منحنی پارتو

برای اجرای الگوریتم‌های بهینه‌سازی ژنتیک و ازدحام ذرات ابتدا لازم است متناسب با مساله پیش رو مقادیر مناسبی برای پارامترهای تعیین‌کننده دو الگوریتم انتخاب شوند. در بخش‌های زیر این شرایط مشخص شده‌اند.

۵-۵-۱ تعیین تعداد جمعیت و پارامترهای دو الگوریتم

برای تشکیل منحنی پارتو با استفاده از دو الگوریتم ژنتیک و ازدحام ذرات ۱۰۰ نقطه طراحی در نظر گرفته شد. طبق مطالب گفته‌شده در فصل قبل این نقاط برای الگوریتم ژنتیک به صورت جمعیت (Population) و برای الگوریتم ازدحام ذرات به صورت تعداد ذرات (Particles) تعریف می‌شوند. با توجه به بازه در نظر گرفته شده برای ابعاد هندسه لوله ماریپیچ، تعداد ۱۰۰ نقطه جهت ارائه و گزینش نقطه دلخواه جهت طراحی و تولید کافی خواهد بود.

همچنین برای تعیین سایر پارامترهای تأثیرگذار تعداد زیادی اجرای اولیه جهت دستیابی به بهترین نتیجه برای کدهای نوشته شده الگوریتم‌ها انجام شد. در نهایت مقادیر زیر برای پارامترها در حل مساله استفاده شدند.

پارامترهای الگوریتم NSGA-II

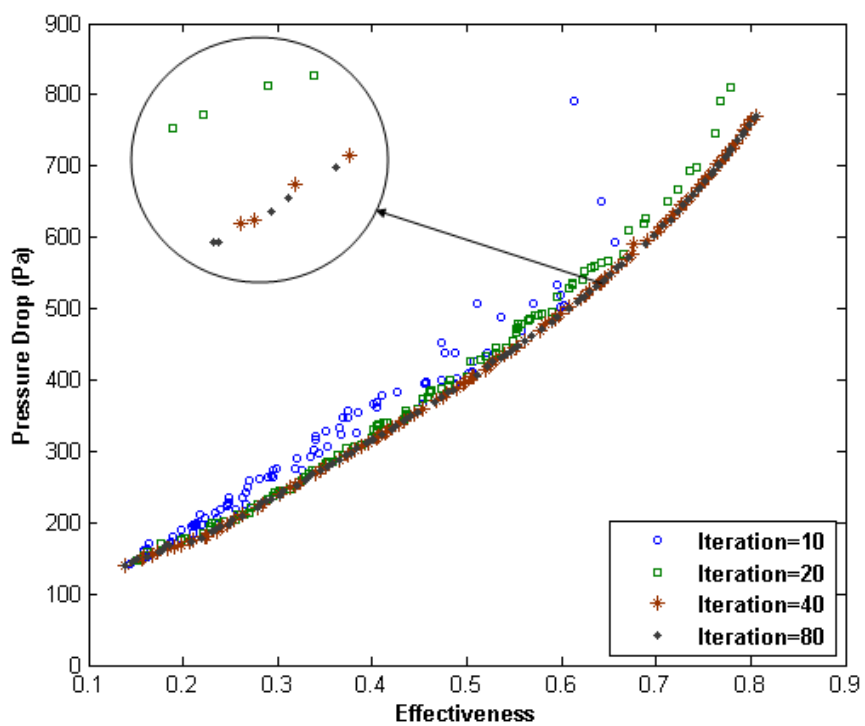
- درصد تقاطع (Crossover Percentage) = 0.7
- درصد جهش (Mutation Percentage) = 0.3

پارامترهای الگوریتم MOPSO

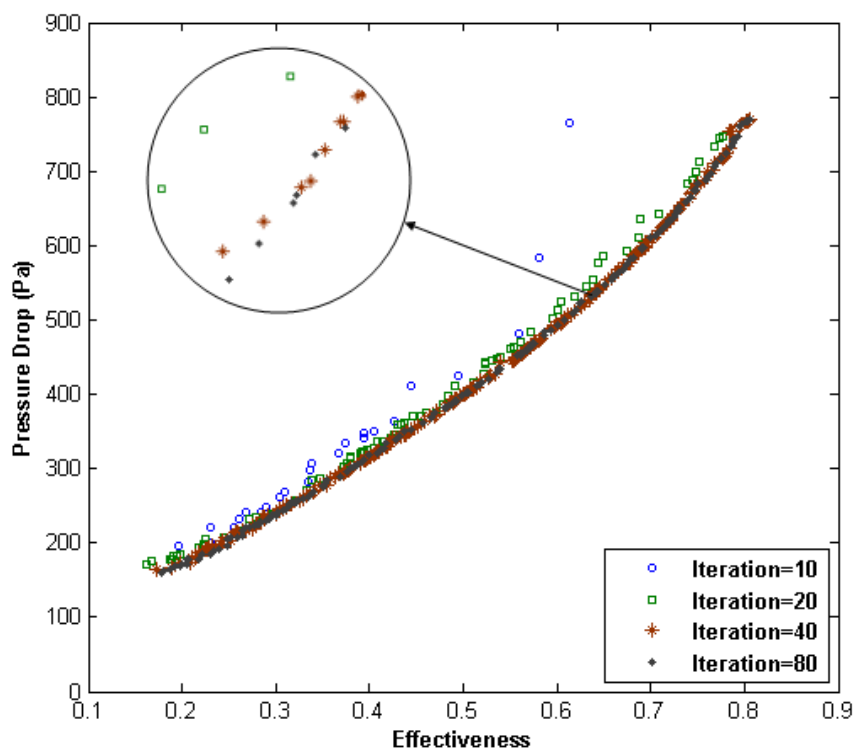
- ضریب اینرسی (Inertia Weight) = 0.4
- ضریب یادگیری تجارب شخصی (Personal Learning Coefficient) = 2
- ضریب یادگیری تجارب جمعی (Global Learning Coefficient) = 2

۵-۵-۲ تعیین تعداد تکرار برای محاسبات

برای تعیین تعداد تکرار مناسب جهت اتمام حل و ترسیم منحنی پارتو نهایی ابتدا چند اجرای اولیه برای یکی از حالت‌های عملکرد مبدل (جریان مخالف و شرط مرزی شارثابت جداره لوله) گرفته شد. برای هر کدام از الگوریتم‌های بهینه‌سازی در مراحل مختلف محاسباتی با ۱۰، ۲۰، ۴۰ و ۸۰ تکرار، انجام شد که نتایج این محاسبات به صورت نمودار در شکل‌های (۵-۱) و (۵-۲) قابل مشاهده است.



شکل (۵-۱) منحنی‌های پارتو حاصل از بهینه‌سازی با الگوریتم ژنتیک با تکرارهای مختلف

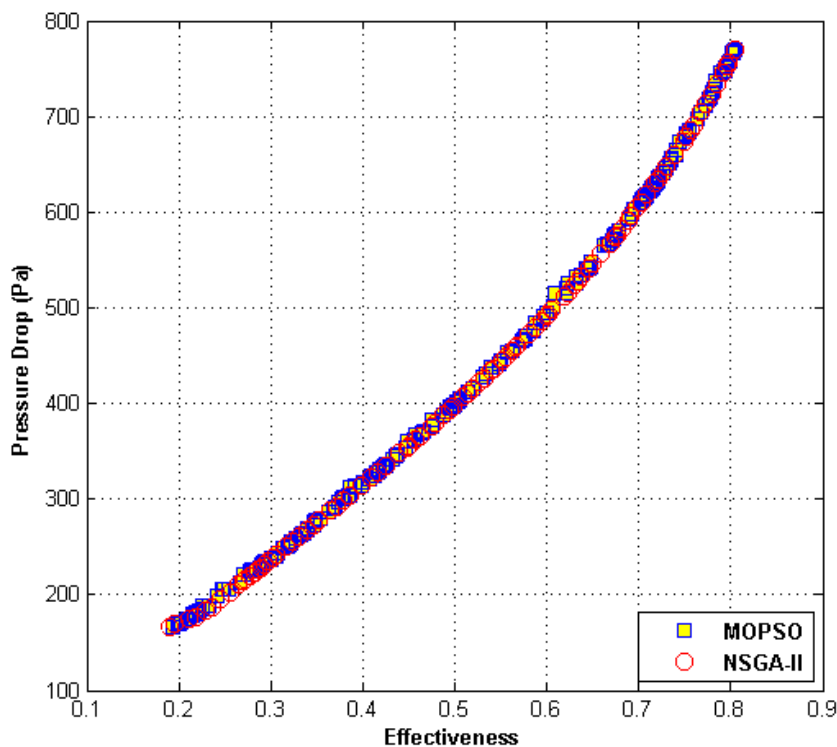


شکل (۵-۲) منحنی‌های پارتو حاصل از بهینه‌سازی با الگوریتم ازدحام ذرات با تکرارهای مختلف

با توجه به شکل‌های (۱-۵) و (۲-۵) با انجام محاسبات با تکرار بالاتر از ۴۰ منحنی پارتو تغییر چندانی نخواهد داشت و منحنی‌های پارتو بدست آمده با ۴۰ و ۸۰ تکرار تقریباً بر هم منطبق‌اند. بنابراین جهت انجام محاسبات بعدی به‌وسیله هر دو الگوریتم با ۸۰ تکرار می‌توان به نتایج مطلوب و بهینه دست یافت.

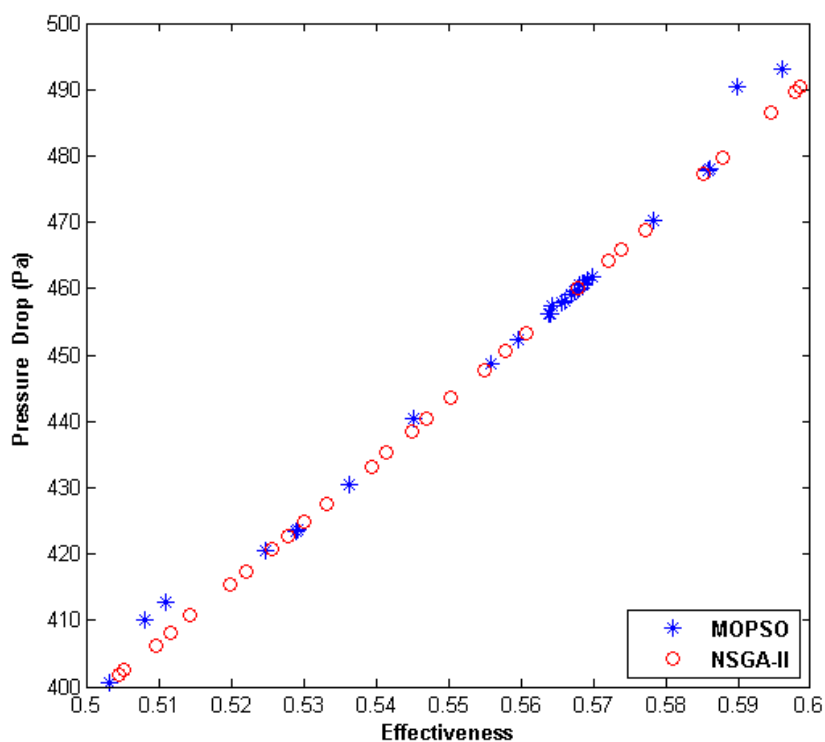
۳-۵-۵ بررسی انطباق و دقت منحنی‌های پارتو برای دو الگوریتم

علاوه بر بهینه‌سازی مسائل نمونه فصل قبل، جهت ارزیابی صحت و انطباق الگوریتم‌های ژنتیک و ازدحام ذرات منحنی پارتو برای هر دو الگوریتم با ۸۰ تکرار و ۱۰۰ نقطه طراحی رسم شده و در شکل (۳-۵) قابل مشاهده است. با توجه به شکل، منحنی پارتو حاصل از بهینه‌سازی به کمک دو الگوریتم تا حدود زیادی بر هم منطبق بوده و جهت بهینه‌سازی مساله مورد نظر ایده آل هستند.

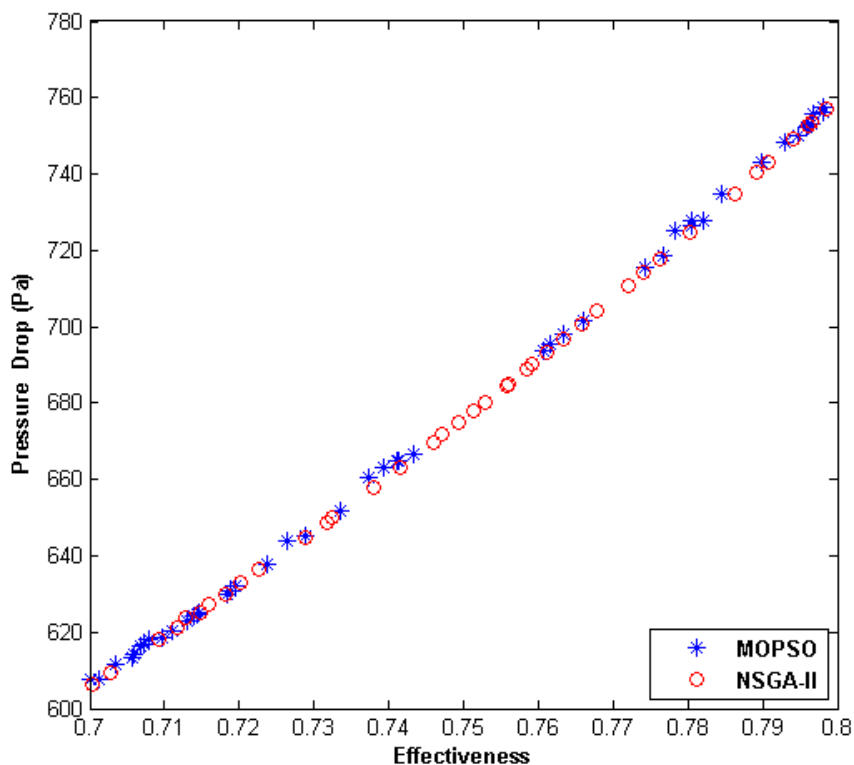


شکل (۳-۵) توزیع نقاط بهینه روی منحنی‌های پارتو حاصل از بهینه‌سازی به کمک دو الگوریتم

اما جهت مقایسه کیفیت و نظم نقاط روی منحنی پارتو حاصل از اجرای دو الگوریتم، منحنی‌های بالا با تعداد نقاط بیشتر و تراکم بالاتر ترسیم شدند که با بزرگنمایی تصویر وضعیت نقاط در بازه‌های مختلف قابل مقایسه هستند. شکل‌های (۴-۵) و (۵-۵) وضعیت توزیع نقاط را در بازه‌های کارایی (۰/۶ - ۰/۵) و (۰/۷-۰/۸) به‌عنوان نمونه نشان می‌دهد.



شکل (۴-۵) توزیع نقاط بهینه روی منحنی‌های پارتو در بازه کارایی (۰/۶ - ۰/۵)

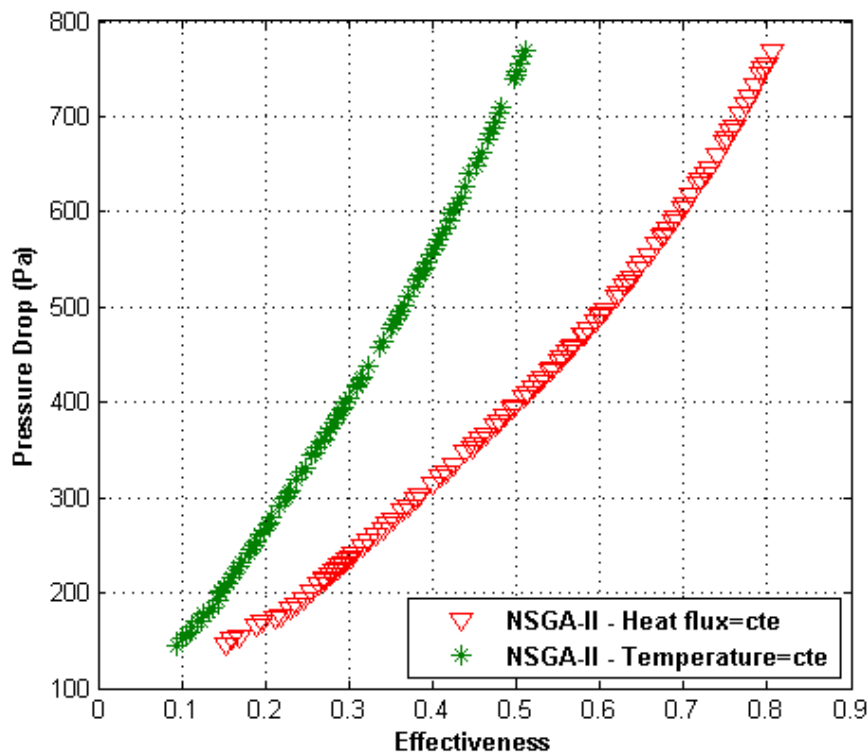


شکل (۵-۵) توزیع نقاط بهینه روی منحنی‌های پارتو در بازه کارایی (۰/۸ - ۰/۷)

در بررسی و تحلیل نتایج به دست آمده به صورت نقاط روی منحنی پارتو عموماً دو شاخص برای ارزش‌گذاری نتایج مد نظر قرار می‌گیرد که عبارت‌اند از کیفیت و نظم. فاصله نقاط تا منحنی پارتو کیفیت پاسخ‌ها را بیان می‌کند و نحوه پراکندگی نقاط نظم پاسخ‌ها را بیان می‌کند. با توجه شکل‌های بالا نتایج الگوریتم ژنتیک کیفیت بهتری دارند زیرا تقریباً هیچ یک از پاسخ‌های الگوریتم ژنتیک به وسیله پاسخ‌های الگوریتم ازدحام ذرات مغلوب نمی‌شوند. همچنین نظم بهتری دارند زیرا به صورت یکنواخت‌تری توزیع شده‌اند و در همه بازه‌های کوچک یک نقطه طراحی به وسیله الگوریتم ژنتیک ارائه شده است.

۵-۴-۵ منحنی‌های پارتو در شرایط مختلف عملکرد مبدل

در فصل سوم برای مدل‌سازی حرارتی مبدل پوسته و لوله مارپیچ در شرایط مرزی دما ثابت و شار ثابت برای جداره داخلی لوله روابط مجزایی توسط مانلاپز و چرچیل [66] پیشنهاد شده است. با استفاده از روابط (۳-۱۵) و (۳-۱۸) برای محاسبه انتقال حرارت سمت لوله و در ادامه اعمال روش‌های بهینه‌سازی، منحنی‌های پارتو برای شرایط مرزی مختلف به صورت شکل (۵-۶) به دست می‌آید. با توجه به مقایسه جواب‌های دو الگوریتم منحنی‌های زیر فقط با اعمال الگوریتم ژنتیک نمایش داده شده‌اند.

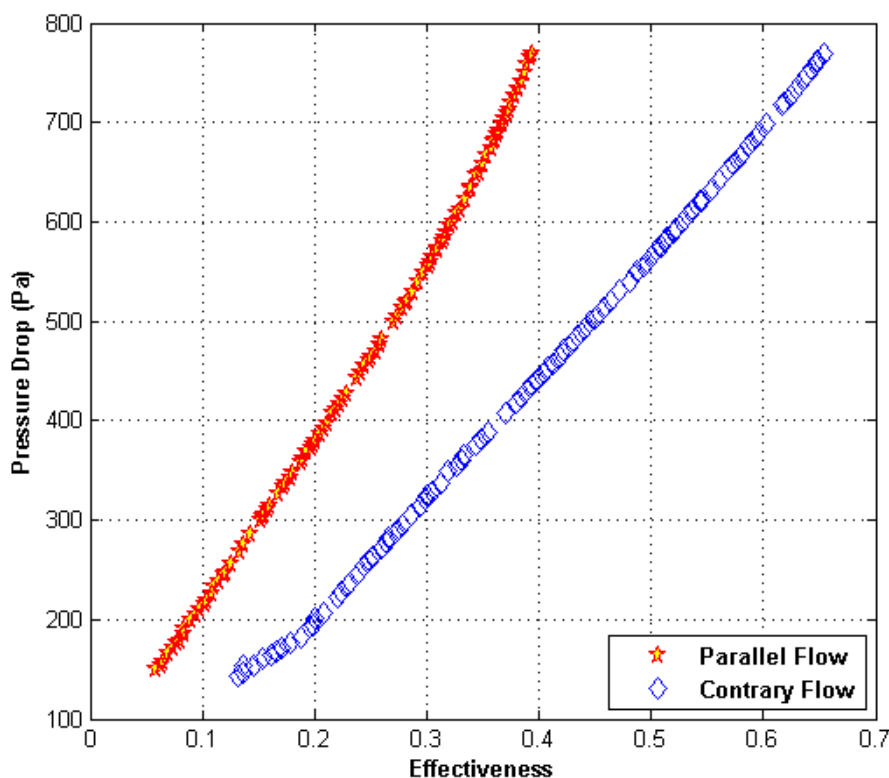


شکل (۵-۶) مقایسه منحنی‌های پارتو در شرایط مرزی شار ثابت و دما ثابت برای جداره لوله در مبدل

همان‌طور که در شکل (۵-۶) پیداست، منحنی پارتو مربوط به شرط مرزی شار ثابت کاملاً نسبت به شرط مرزی دما ثابت برتری دارد؛ زیرا به ازای هر مقداری از کارایی (Effectiveness) افت فشار کمتری

نسبت به منحنی دیگر دارد و به ازای یک افت فشار معین میزان کارایی بیشتری نسبت به منحنی مقابل خود دارد.

همچنین برای مدل سازی حرارتی مبدل پوسته و لوله مارپیچ در شرایط جریان موازی و مخالف روابط مجزایی توسط سلیم پور [24] ارائه شده است. با استفاده از روابط (۳-۲۰) و (۳-۲۱) برای محاسبه انتقال حرارت و در ادامه اعمال روش های بهینه سازی، منحنی های پارتو برای حالت های مختلف جریان به صورت شکل (۵-۷) به دست می آید.

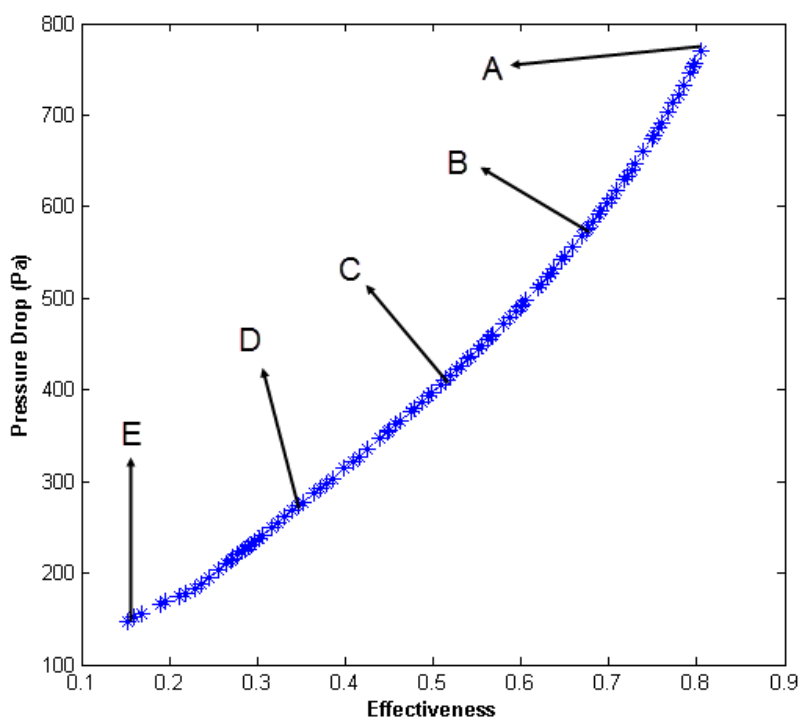


شکل (۵-۷) مقایسه منحنی های پارتو در شرایط جریان های موازی و مخالف در مبدل

با توجه به شکل بالا منحنی پارتو مربوط به مبدل با جریان مخالف نسبت به مبدل با جریان موازی برتری دارد؛ زیرا به ازای هر مقداری از کارایی (Effectiveness) افت فشار کمتری نسبت به منحنی دیگر دارد و به ازای یک افت فشار معین میزان کارایی بیشتری نسبت به منحنی مقابل خود دارد.

۵-۶ مقادیر بهینه طراحی

هدف از پایان‌نامه حاضر بهینه‌سازی هندسه مبدل حرارتی پوسته و لوله مارپیچ و ارائه مقادیر بهینه طراحی بودند. هر نقطه روی منحنی پارتو به دست آمده بیانگر یک حالت منحصر به فرد برای طراحی مبدل است. همچنین برای هر نقطه روی نمودار پارتو این خاصیت وجود دارد که با در نظر گرفتن مقدار کارایی در آن حالت طراحی کمترین میزان افت فشار قابل‌دستیابی را در اختیار داریم. همچنین با در نظر گرفتن افت فشار هر نقطه بیشترین میزان کارایی مبدل را در اختیار داریم. بدین ترتیب با توجه به حاصل شدن نمودارهای پارتو در شرایط عملکردی مختلف مبدل، مقادیر بهینه برای سه پارامتر طراحی شامل شعاع لوله، شعاع مارپیچ و گام مارپیچ قابل ارائه هستند. همچنین مقادیر کارایی و افت فشار برای هر حالت طراحی قابل مشاهده است. در این بخش به‌عنوان نمونه برای تعدادی از حالت‌های بهینه طراحی، میزان کارایی و افت فشار ارائه خواهد شد. این نقاط طراحی برای حالت جریان موازی و شرط مرزی شار ثابت و از طریق بهینه‌سازی با الگوریتم ژنتیک به دست آمده‌اند.



شکل (۵-۸) توزیع نقاط بهینه در منحنی پارتو به دست آمده با استفاده از الگوریتم NSGA-II

در شکل (۵-۶) تعدادی از نقاط روی منحنی پارتو نام گذاری شده اند. همان طور که در نمودار پیداست نقطه A بهترین انتخاب از نظر میزان کارایی و نقطه E بهترین انتخاب از نظر افت فشار هستند. مقادیر انتقال حرارت و افت فشار برای این نقاط در جدول (۵-۳) ارائه شده است.

جدول (۵-۳) مقادیر انتقال حرارت و افت فشار برای نقاط بهینه A تا E موجود در منحنی پارتو

| E | D | C | B | A | |
|--------|--------|--------|--------|--------|-----------------|
| ۰/۱۵۳۰ | ۰/۳۶۴۷ | ۰/۵۲۷۵ | ۰/۶۸۸۵ | ۰/۸۰۵۱ | کارایی مبدل (-) |
| ۱۴۷/۴ | ۲۸۷/۶ | ۴۲۲/۷ | ۵۹۱/۷ | ۷۶۹/۶ | افت فشار (Pa) |

با توجه به محدوده های تعریف شده برای سه متغیر مساله، مقادیر به دست آمده نتایج نشان می دهد که کارایی مبدل (E) در محدوده ۰/۱۵۳۰ و ۰/۸۰۵۱ تغییر می کند. همچنین مقدار افت فشار

(ΔP) در محدوده ۱۴۷/۴ و ۷۶۹/۶ پاسکال تغییر می‌کند.

همچنین مقادیر سه متغیر هندسه مبدل برای پنج نقطه طراحی انتخاب‌شده در جدول (۴-۵) آورده شده‌اند.

جدول (۴-۵) ابعاد هندسه برای نقاط بهینه A تا E موجود در منحنی پارتو

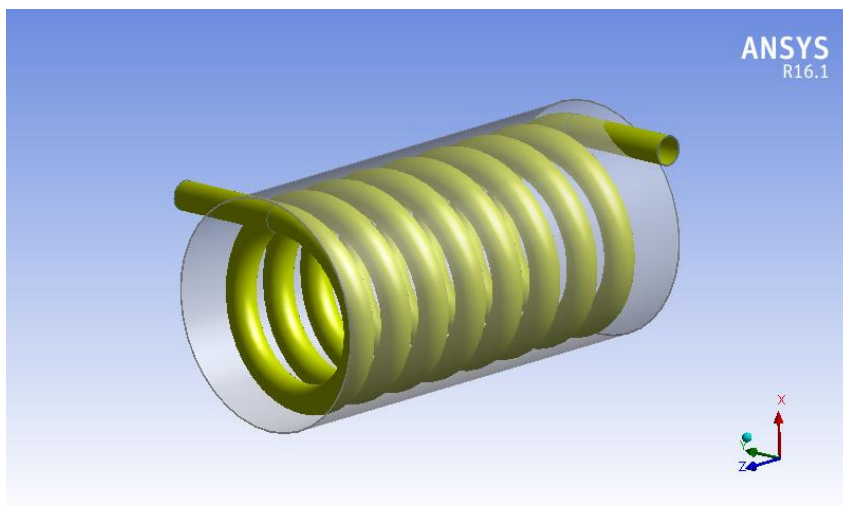
| E | D | C | B | A | |
|--------|--------|--------|--------|--------|--------------------------|
| ۰/۰۳۴۶ | ۰/۰۳۴۶ | ۰/۰۳۴۸ | ۰/۰۳۴۹ | ۰/۰۳۵۰ | شعاع لوله (m) - r |
| ۰/۲۰۶۰ | ۰/۲۰۹۷ | ۰/۲۰۲۳ | ۰/۲۰۹۵ | ۰/۲۱ | شعاع ماریپیچ (m) - R_c |
| ۰/۲۳۴ | ۰/۱۸۸ | ۰/۱۲۴ | ۰/۰۹۲ | ۰/۰۷۰ | گام ماریپیچ (m) - b |

۷-۵ تحلیل عددی هندسه بهینه شده مبدل حرارتی

پس از مطالعه تحقیق‌های پیشین در مورد ویژگی‌های جریان درون لوله ماریپیچ و دستیابی به هندسه‌های بهینه در این پایان‌نامه، برای یکی از هندسه‌های بهینه تحلیل عددی جهت مشاهده رفتار سیال درون لوله ماریپیچ صورت گرفت. از میان نقاط طراحی که ابعاد هندسه آنها در بخش قبل ارائه شد نقطه C بعنوان نمونه جهت تحلیل انتخاب شد.

۷-۵-۱ ابعاد هندسه و شبکه بندی

تحلیل CFD برای مبدل حرارتی در نظر گرفته شده برای سیال آب سمت لوله با استفاده نرم افزار ANSYS Fluent نسخه ۱۶/۱ انجام شد. در ابتدا رسم هندسه و مش زنی با استفاده محیط‌های Design Modeler و Meshing نرم افزار Ansys Workbench انجام شد. شکل (۵-۹) هندسه کوپل ماریپیچ در نظر گرفته شده را در مقایسه با ابعاد پوسته نمایش می‌دهد.



شکل (۵-۹) هندسه کوئل مارپیچ در نظر گرفته شده جهت تحلیل عددی

طبق شکل بخشی از کوئل درون پوسته قرار گرفته و با سیال سمت پوسته در تماس است. برای بخشی از سیال که درون این بخش از لوله مارپیچ قرار گرفته است مش زنی صورت گرفت. با توجه به اهمیت لایه مرزی در جداره داخلی لوله از مش لایه مرزی برای این هندسه استفاده شد. همچنین هندسه به 377250 تقسیم بندی شد که جهت مشاهده شرایط جریان درون کوئل مناسب می باشد.

۵-۷-۲ روش های حل معادلات حاکم

جهت تعیین روش های حل و گسسته سازی معادلات حاکم تعدادی اجرای اولیه صورت گرفت. سپس با توجه به دقت نتایج و همچنین اصول حل عددی برای رژیم های جریان در مسیرهای منحنی روش های مناسب اختیار شدند. جهت مدل کردن آشفتگی جریان از مدل $k-\epsilon$ و حالت Realizable استفاده شد. این مدل برای تحلیل جریان های چرخشی و همچنین تحلیل لایه های مرزی همراه با گرادین فشار معکوس و جدایش مدل ایده آلی محسوب می شود. برای کوئل فشار و سرعت حالت SIMPLE انتخاب شد. جهت گسسته سازی معادلات مومنتوم از روش QUICK بهره گرفته شد. همچنین برای گسسته سازی معادلات انرژی جنبشی و نرخ اتلاف آشفتگی روش Power Law و برای

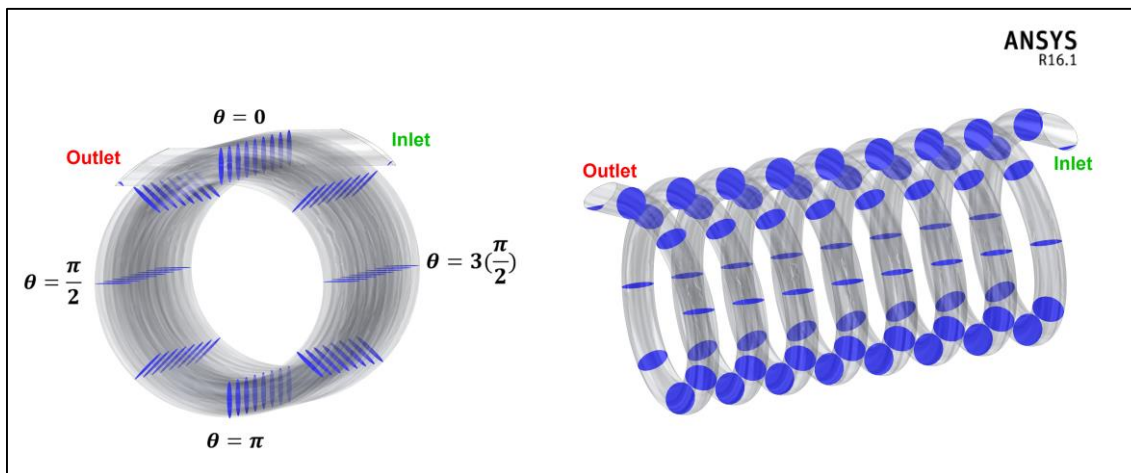
معادله انرژی روش QUICK مورد استفاده قرار گرفت.

۵-۷-۳ شرایط مرزی

شرط مرزی در ورودی از نوع Velocity inlet در نظر گرفته شده است. آب گرم با دمای ۳۵۰ کلوین و دبی ۴ kg/s وارد کویل می‌شود. با توجه به مقدار دبی و قطر لوله مقدار سرعت در ورودی برابر ۱/۰۴ m/s و جهت آن موازی با محور Y است. جریان درون لوله به منظور گرم کردن سیال درون پوسته مورد استفاده قرار می‌گیرد و طی عبور از درون کویل با دمای جداره ثابت خنک می‌شود. دمای کویل برای حل عددی با حدس و محاسبه اولیه در نهایت بصورت میانگین برابر ۳۰۹ کلوین در نظر گرفته شد. همچنین برای خروجی شرط مرزی Pressure outlet انتخاب شد.

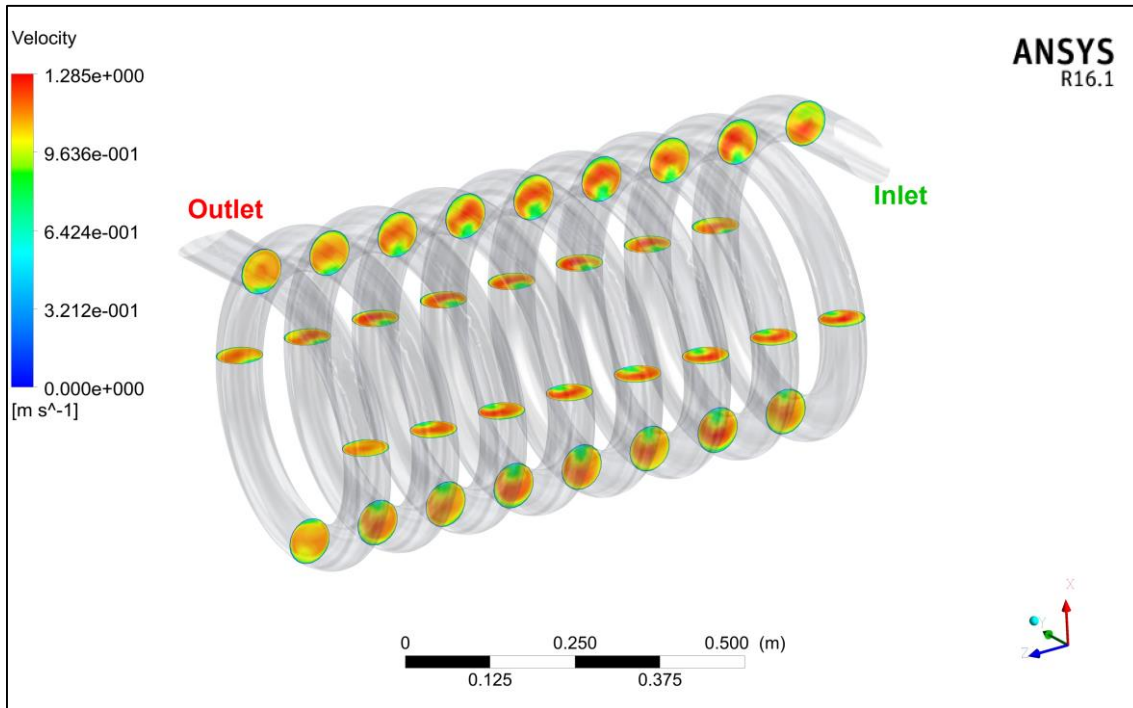
۵-۷-۴ نتایج و تفسیر شبیه سازی عددی

جهت نمایش کانتورها ابتدا صفحاتی ترسیم شدند که از محور کویل مارپیچ عبور می‌کنند. این صفحات که کانتورها در مقاطع مختلف لوله روی آن‌ها نمایش داده می‌شوند با زاویه θ معرفی می‌شوند. θ زاویه بین این صفحات با صفحه ایست که از محور کویل مارپیچ می‌گذرد و از محل شروع انحنای لوله بعد از ورودی نیز عبور می‌کند. شکل زیر کویل را از دو نما نشان می‌دهد. تعدادی از صفحات بعنوان نمونه ترسیم شده و نحوه نامگذاری آنها بر اساس زاویه مشخص شده‌اند.

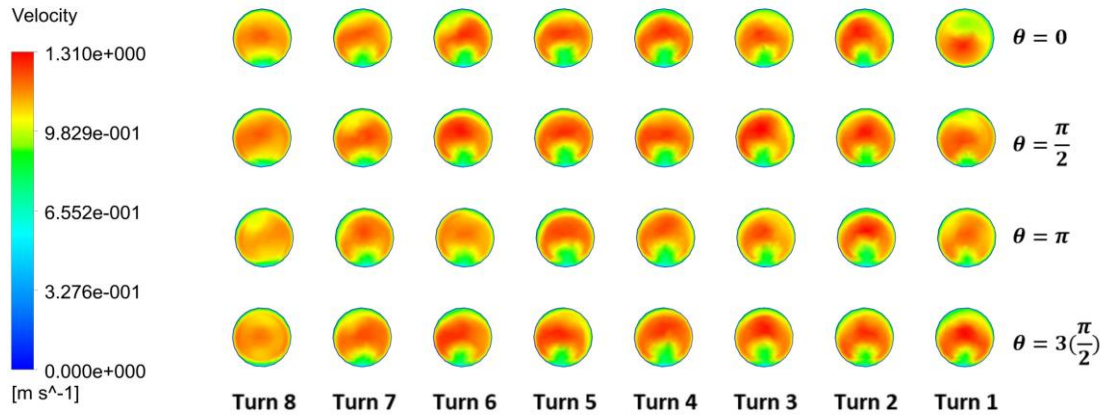


شکل (۵-۱۰) موقعیت صفحات و زوایای آنها جهت ترسیم کانتورها

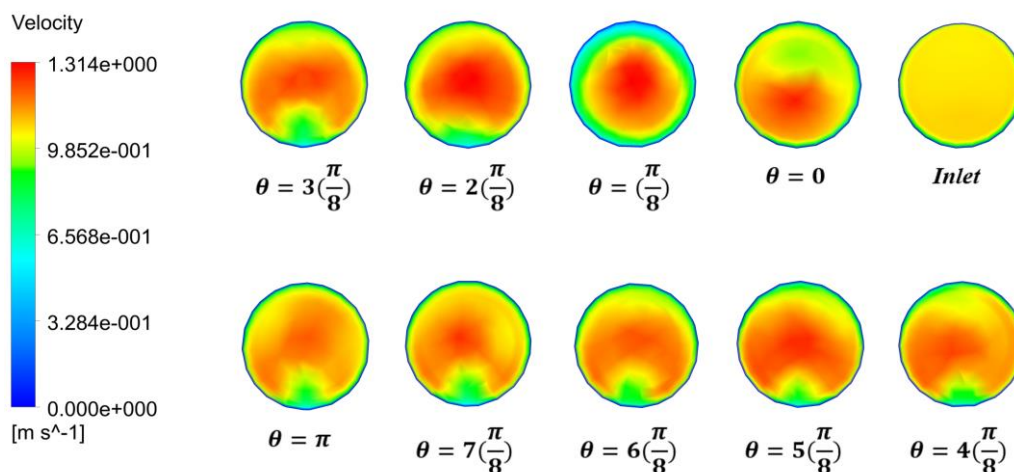
جهت تحلیل رفتار هیدرولیکی و حرارتی سیال کانتورهای سرعت، دما و فشار در ادامه ارائه شدند. شکل (۵-۱۱) کانتورهای سرعت را در مقاطع مختلفی در طول کوئل مارپیچ نشان می‌دهد. با تعداد ۴ تصویر به ازای هر دور کوئل، کانتورها ترسیم شدند. جهت مشاهده دقیق‌تر، نمای کامل این کانتورها برای دورها و زوایای مختلف در شکل (۵-۱۲) نمایش داده شده‌اند. همچنین با توجه به وجود ناحیه ورودی هیدرولیکی به منظور مشاهده روند توسعه جریان، کانتورهای سرعت از ابتدای ورودی (قبل از شروع انحنای لوله) تا پایان نیم دور اول با فاصله‌های کمتر و به ازای هر $\frac{22}{5}$ درجه ترسیم شدند که در شکل (۵-۱۳) قابل مشاهده هستند.



شکل (۵-۱۱) کانتورهای سرعت در صفحات مختلف در طول لوله مارپیچ



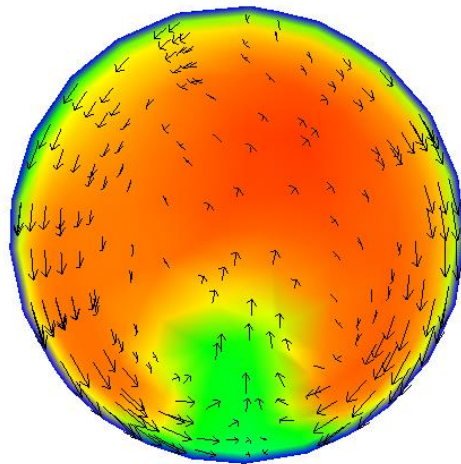
شکل (۵-۱۲) کانتورهای مرتب شده سرعت در مقاطع مختلف



شکل (۵-۱۳) کانتورهای سرعت در نیم دور اول کوئل

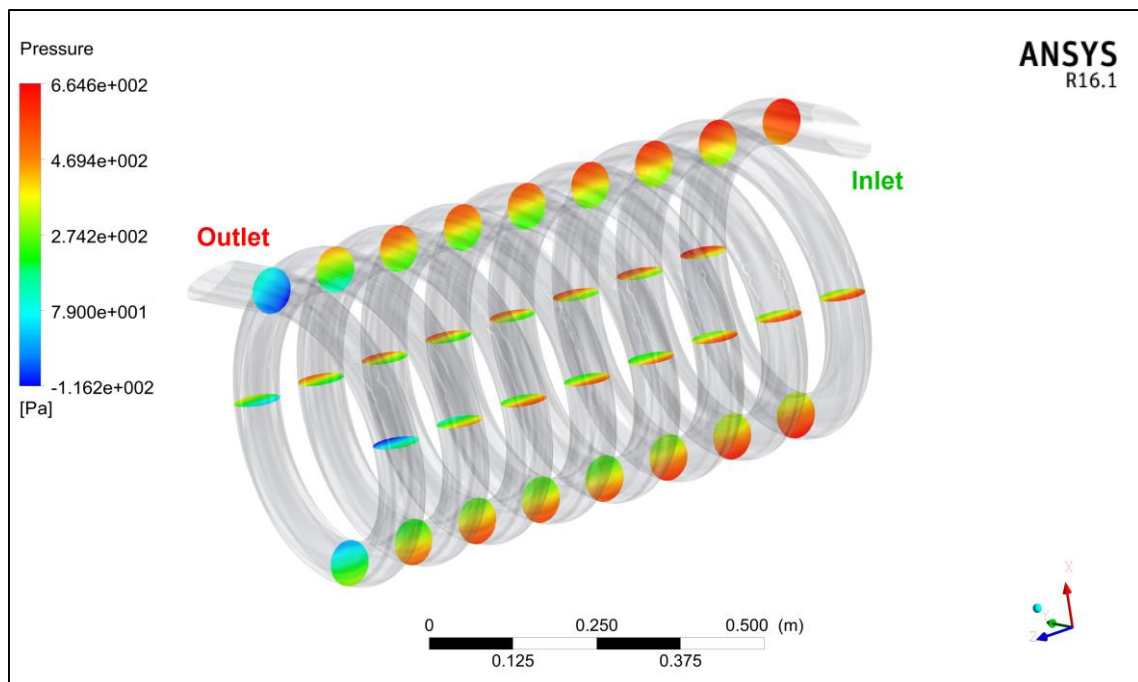
با توجه به شکل (۵-۱۳) از ابتدای ورودی تا شروع انحنا در $\theta = 0$ پروفیل سرعت در مقطع لوله یکنواخت است. پس از گذر از این مقطع پروفیل سرعت به تدریج تغییر شکل پیدا می‌کند. بدین صورت که در سمت بیرونی کوئل سرعت بیشتری مشاهده می‌شود. این تغییر رفتار سرعت تا بخشی از نیم دور اول ادامه پیدا کرده و بعد از آن تغییر قابل توجهی در پروفیل سرعت مشاهده نمی‌شود. همانطور که در شکل (۵-۱۲) پیداست در دوره‌های بعدی نیز این شرایط تغییر چندانی پیدا نمی‌کند. تنها در نزدیکی خروجی لوله در دور آخر کوئل به دلیل نزدیک شدن به بخش مستقیم و بدون انحنای لوله، تغییراتی در پروفیل سرعت ایجاد می‌شود.

اما علاوه بر اختلاف سرعت نواحی بیرونی و درونی کوئل نکته قابل توجه دیگر در پروفیل‌های سرعت، ایجاد ناحیه متقارن در پروفیل است. شکل (۵-۱۴) بردارهای سرعت ذرات سیال را برای یکی از مقاطع نشان می‌دهد. جهت بردارها نشان دهنده نحوه حرکت ذرات سیال است. علاوه بر حرکت سیال در راستای طول لوله جریان‌های دیگری بصورت چرخشی در دو نیمه مقطع لوله ایجاد می‌شوند که با عنوان جریان‌های ثانویه شناخته می‌شوند. علت وجود تقارن در پروفیل‌های سرعت جریان‌های ثانویه هستند.

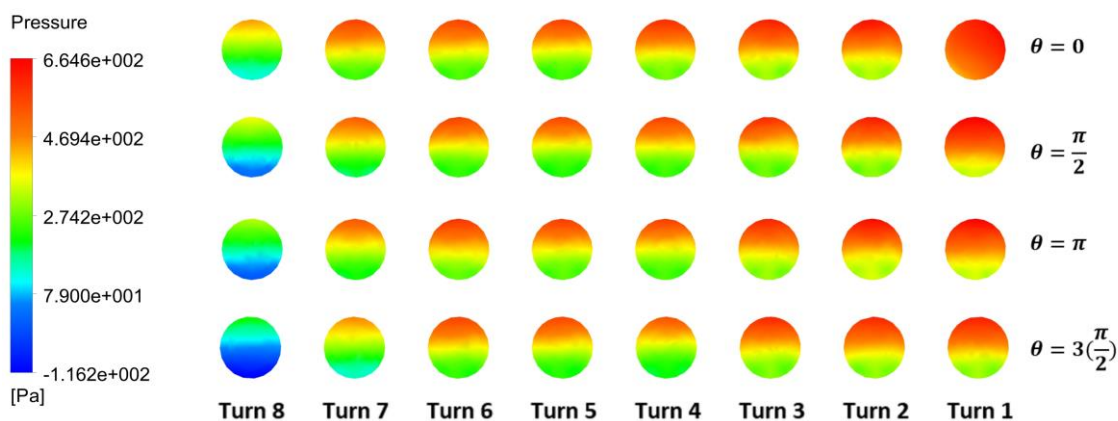


شکل (۵-۱۴) بردارهای سرعت ذرات سیال نشان دهنده وجود جریان‌های ثانویه

شکل (۵-۱۵) کانتورهای فشار را در مقاطع مختلفی در طول کوئل مارپیچ نشان می‌دهد. جهت مشاهده دقیق‌تر، نمای کامل این کانتورها برای دورها و زوایای مختلف در شکل (۵-۱۶) نمایش داده شده‌اند.



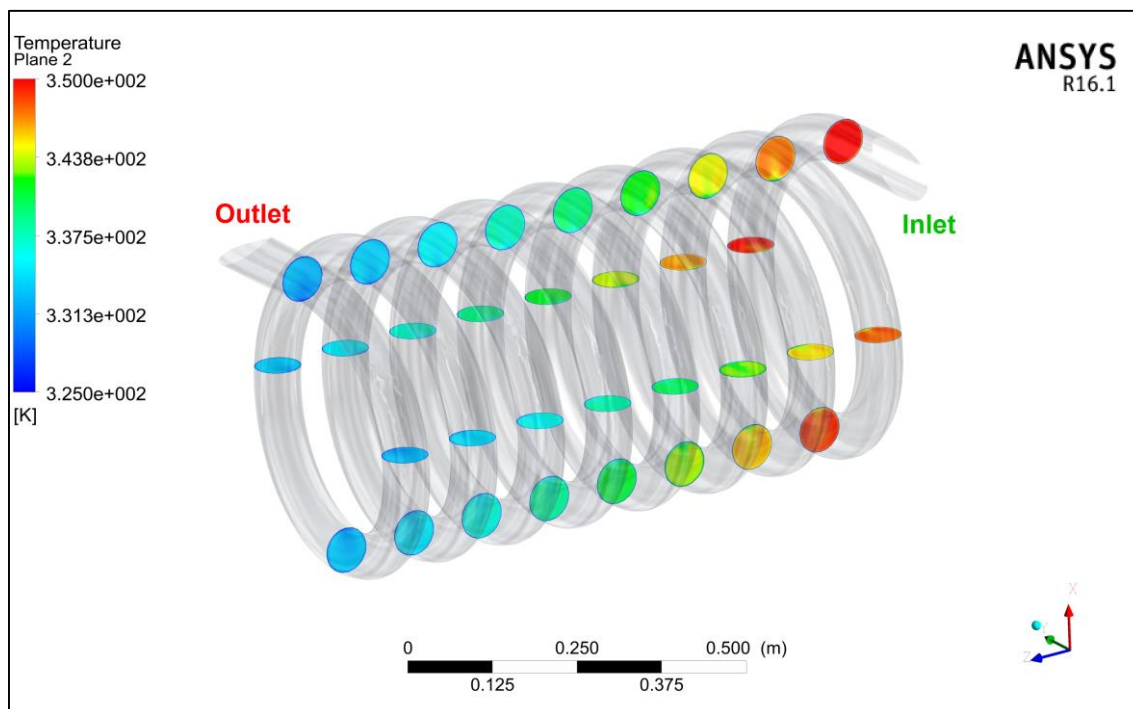
شکل (۵-۱۵) کانتورهای فشار در صفحات مختلف در طول لوله مارپیچ



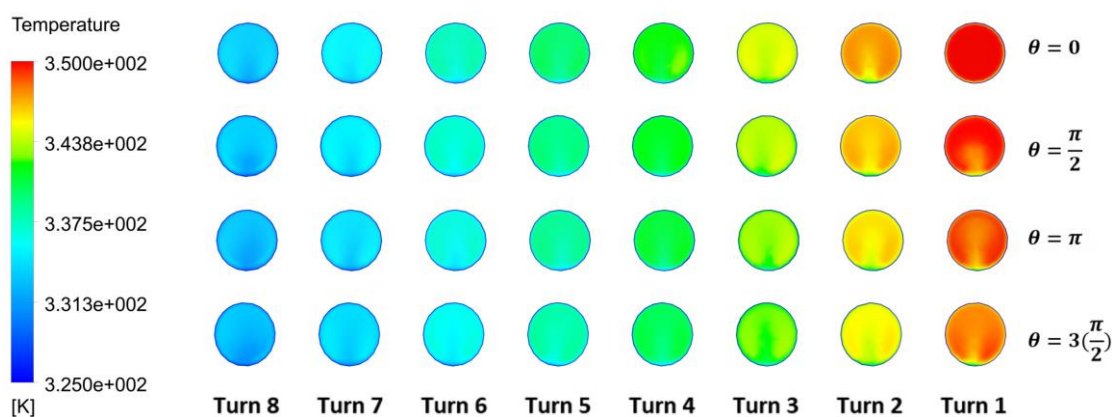
شکل (۵-۱۶) کانتورهای مرتب شده فشار در مقاطع مختلف

در شکل‌های بالا اختلاف فشار نقاط بیرونی و درونی کویل تحت تاثیر انحنای آن به خوبی قابل مشاهده است. بعد از شروع انحنای در دور اول پروفیل فشار شروع به تغییر میکند به طوری که فشار سیال در ناحیه بیرونی کویل بیشتر از نقاط درونی آن خواهد بود. پس از این تغییر در دور اول تغییر چشمگیری در پروفیل فشار تا قبل از دور آخر مشاهده نمی‌شود. در دور آخر بدلیل نزدیک شدن به خروجی لوله فشار سیال نسبت به دورهای قبلی کاهش می‌یابد.

شکل (۵-۱۷) کانتورهای دما را در مقاطع مختلفی در طول کویل مارپیچ نشان می‌دهد. جهت مشاهده دقیق‌تر، نمای کامل این کانتورها برای دورها و زوایای مختلف در شکل (۵-۱۸) نمایش داده شده‌اند.



شکل (۱۷-۵) کانتورهای دما در صفحات مختلف در طول لوله مارپیچ



شکل (۱۸-۵) کانتورهای مرتب شده دما در مقاطع مختلف

با توجه به شکل (۱۷-۵) روند کاهش دما طی عبور سیال از لوله مارپیچ در دورهای مختلف قابل مشاهده است. در $\theta = 0$ پروفیل دما در مقطع لوله یکنواخت است. پس از گذر از این مقطع پروفیل دما به تدریج تغییر شکل پیدا می‌کند. مشابه پروفیل سرعت، پروفیل دما نیز تحت تاثیر جریانهای ثانویه قرار گرفته و نواحی متقارن در دو سمت مقطع تشکیل می‌شود.

۸-۵ جمع بندی و نتیجه گیری

در این مطالعه تلاش شده طراحی مبدل با نگرش صنعتی و با هدف انتخاب مبدلی با مصرف انرژی و بازدهی حرارتی بهتر با استفاده از الگوریتم‌های ژنتیک و ازدحام ذرات انجام گیرد. در بخش‌های قبل نقاط بهینه طراحی به صورت دسته جواب در قالب جبهه پارتو ارائه شدند. با بررسی و تحلیل نتایج حاصل شده در این فصل نکاتی قابل ارائه است که در این بخش بیان می‌شود:

- همان طور که در تفسیر شکل‌های (۴-۵) و (۵-۵) بیان شد الگوریتم ژنتیک استفاده شده برای مساله پاسخ‌های با کیفیت‌تر و منظم‌تری را ارائه داده است. اما لازم به ذکر است این نتیجه نشان‌دهنده برتری مطلق الگوریتم ژنتیک بر الگوریتم ازدحام ذرات چندهدفه نیست. نتایج الگوریتم‌های بهینه‌سازی با توجه به نوع مساله و کد نویسی الگوریتم‌ها می‌تواند متفاوت باشد.
- طی اجراهای مختلف زمان رسیدن به پاسخ‌های مورد نظر برای دو الگوریتم با تکرارهای برابر، نشان داد که سرعت رسیدن به حل نهایی در الگوریتم ازدحام ذرات بیشتر از الگوریتم ژنتیک است.
- با توجه به منحنی‌های پارتو نشان داده شده در شکل (۶-۵) برای استفاده بهینه از مبدل حرارتی پوسته و لوله ماریپیچ باید در تلاش بود تا شرایط مرزی شارثابت را برای دیواره لوله برقرار کرد.
- با توجه به منحنی‌های پارتو نشان داده شده در شکل (۷-۵) برای مبدل حرارتی پوسته و لوله ماریپیچ با شرط برقرار کردن جهت‌های جریان مخالف در سمت‌های لوله و پوسته عملکرد بهینه‌تری قابل دستیابی خواهد بود.
- برای بهینه‌سازی به وسیله هر دو الگوریتم ۱۰۰ نقطه طراحی در نظر گرفته شد. با بررسی پاسخ‌های روی منحنی‌های پارتو مشاهده شد که غالب حالت‌های طراحی بهینه دارای مقادیر شعاع لوله (r) و شعاع ماریپیچ (R_c) بیشتری هستند. اما اندازه متغیر گام در حالت‌های مختلف

مقادیر متفاوتی هستند. در مطالعات پیشین ارتباط افزایش شعاع لوله و شعاع مارپیچ با افزایش انتقال حرارت بیان شده بود. در این مطالعه نشان داده شد که در صورت در نظر گرفتن افت فشار نیز با انتخاب مقادیر بیشتری برای شعاع لوله و شعاع مارپیچ، مبدل حرارتی بهینه‌تری قابل دستیابی خواهد بود.

با مشاهده منحنی‌های پارتو می‌توان دریافت که افزایش کارایی مبدل (مطلوب) با افزایش افت فشار (نامطلوب) و همچنین کاهش افت فشار (مطلوب) با کاهش کارایی مبدل (نامطلوب) همراه است. بنابراین انتخاب بهینه‌ترین نقاط روی نمودار پارتو نیازمند دید مهندسی و تجربی در زمینه طراحی مبدل‌های حرارتی است. همچنین نکته حائز اهمیت در مورد طراحی مبدل این است که مارپیچ کردن لوله‌ها به وسیله دستگاه‌های خم کننده در صنعت دارای محدودیت‌هایی است که باید مدنظر قرار گیرد. به عنوان مثال لوله‌های مورد استفاده می‌بایست از کیفیت و ضخامت حداقلی برخوردار باشند تا حین فرایند خم کردن دچار پارگی و شکستگی نشوند. به این دلیل معمولاً از لوله‌های مانیسمن یا بدون درز برای این منظور استفاده می‌شود.

۹-۵ پیشنهادها

- بهینه‌سازی چند هدفه مبدل حرارتی پوسته و لوله مارپیچ با استفاده از الگوریتم‌های تکاملی دیگر نظیر الگوریتم رقابت استعماری چند هدفه (MOICA)، الگوریتم تکاملی چند هدفه مبتنی بر تجزیه (MOEA/D) و غیره و مقایسه نتایج آن با الگوریتم‌های ژنتیک و ازدحام ذرات
- بررسی و تحلیل انتقال حرارت و افت فشار در مبدل حرارتی پوسته و لوله مارپیچ پره دار با انواع مختلف پره‌ها و بهینه‌سازی مبدل با استفاده از الگوریتم‌های تکاملی با در نظر گرفتن

ابعاد هندسه پره‌ها در بهینه‌سازی به‌عنوان متغیر طراحی . پره‌ها می‌توان از نوع دایره‌ای^۱، صفحه‌ای^۲ و میخی^۳ انتخاب کرد.



شکل (۵-۱۹) لوله مارپیچ پره دار با پره‌های دایره‌ای



شکل (۵-۲۰) لوله با پره‌های صفحه‌ای

^۱ Circular Fin

^۲ Plate fin

^۳ Pin Fin



شکل (۵-۲۱) لوله با پره‌های میخی

مراجع

- [١] A.E. Bergles , (1998) Techniques to enhance heat transfer in :w.M. Rohsenow , J.p. Hartnett , Y.I. Cho (eds) , Handbook of Heat Transfer , Mc-Graw Hill , New York, p. 11.1 .
- [٢] Rennie, T. J. (2004). Numerical and experimental studies of a double-pipe helical heat exchanger (Doctoral dissertation, McGill University) .
- [٣] D.S Austen , H. M Soliman , (1988) Laminar slow and heat transfer in helically coiled tubes with substantial ,Experimental Thermal and fluid Science,1 183-194 .
- [٤] Dean, W. R. (1927). XVI. Note on the motion of fluid in a curved pipe. The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science, 4(20), 208-223 .
- [٥] Dean, W. R. (1928). LXXII. The stream-line motion of fluid in a curved pipe (Second paper). The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science, 5(30), 673-695 .
- [٦] White, C. M. (1929, April). Streamline flow through curved pipes. In Proceedings of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences (Vol. 123, No. 792, pp. 645-663). The Royal Society .
- [٧] McConalogue, D. J & ,Srivastava, R. S. (1968, October). Motion of a fluid in a curved tube. In Proceedings of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences (Vol. 307, No. 1488, pp. 37-53). The Royal Society .

- [λ] Ito, H. (1959). Friction factors for turbulent flow in curved pipes. *J. Basic Eng*, 81(2), 123-134 .
- [ϑ] Schmidt, E. F. (1967). Wärmeübergang und druckverlust in rohrschlangen. *Chemie Ingenieur Technik*, 39(13), 781-789 ..
- [λ·] SRINIVAS. PS, NANDAPUR. SS & ,Holland, F. A. (1968). Pressure drop and heat transfer in coils. *TRANSACTIONS OF THE INSTITUTION OF CHEMICAL ENGINEERS AND THE CHEMICAL ENGINEER*, 46(4), C113 .
- [λλ] Seban, R. A & ,McLaughlin, E. F. (1963). Heat transfer in tube coils with laminar and turbulent flow. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 6(5), 387-395 .
- [λλ] Dravid, A. N., Smith, K. A., Merrill, E. W & ,Brian, P. L. T. (1971). Effect of secondary fluid motion on laminar flow heat transfer in helically coiled tubes. *AIChE Journal*, 17(5), 1114-1122 .
- [λλ] Jayakumar, J. S., Mahajani, S. M., Mandal, J. C., Iyer, K. N & ,Vijayan, P. K. (2010). CFD analysis of single-phase flows inside helically coiled tubes. *Computers & chemical engineering*, 34(4), 430-446 .
- [λλ] Jayakumar, J. S., Mahajani, S. M., Mandal, J. C., Vijayan, P. K & ,Bhoi, R. (2008). Experimental and CFD estimation of heat transfer in helically coiled heat exchangers. *chemical engineering research and design*, 86(3), 221-232 .
- [λλ] Kalb, C. E & ,Seader, J. D. (1974). Fully developed viscous—flow heat transfer in curved circular tubes with uniform wall temperature. *AIChE Journal*, 20(2),

340-346 .

[۱۶] Yang, G., Dong, Z. F & ,Ebadian, M. A. (1995). Laminar forced convection in a helicoidal pipe with finite pitch. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 38(5), 853-862 .

[۱۷] Yang, G & ,Ebadian, M. A. (1996). Turbulent forced convection in a helicoidal pipe with substantial pitch. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 39(10), 2015-2022 .

[۱۸] Patil, R. K., Shende, B. W & ,Ghosh, P. K. (1982). Designing a helical-coil heat exchanger. *Chemical Engineering*, 92(24), 85-88 .

[۱۹] Haraburda, S. S. (1995). Three-phase flow? Consider helical-coil heat exchangers. *Chemical Engineering*, 102(7), 149 .

[۲۰] Rennie, T. J & ,Raghavan, V. G. (2005). Experimental studies of a double-pipe helical heat exchanger. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 29(8), 919-924 .

[۲۱] Rennie, T. J & ,Raghavan, V. G. (2006). Numerical studies of a double-pipe helical heat exchanger. *Applied Thermal Engineering*, 26(11), 1266-1273 .

[۲۲] Rennie, T. J & ,Raghavan, G. V. (2007). Thermally dependent viscosity and non-Newtonian flow in a double-pipe helical heat exchanger. *Applied Thermal Engineering*, 27(5), 862-868 .

[۲۳] Salimpour, M. R. (2009). Heat transfer coefficients of shell and coiled tube heat

exchangers. *Experimental thermal and fluid science*, 33(2), 203-207 .

[۳۴] Salimpour, M. R. (2008). Heat transfer characteristics of a temperature-dependent-property fluid in shell and coiled tube heat exchangers. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 35(9), 1190-1195 .

[۳۵] Prasad, B. V. S. S. S., Das, D. H & ,Prabhakar, A. K. (1989). Pressure drop, heat transfer and performance of a helically coiled tubular exchanger. *Heat Recovery Systems and CHP*, 9(3), 249-256 .

[۳۶] Hashemi, S. M & ,Akhavan-Behabadi, M. A. (2012). An empirical study on heat transfer and pressure drop characteristics of CuO–base oil nanofluid flow in a horizontal helically coiled tube under constant heat flux, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 39(1), 144-151 .

[۳۷] Huminic, G & ,Huminic, A. (2011). Heat transfer characteristics in double tube helical heat exchangers using nanofluids. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 54(19), 4280-4287 .

[۳۸] Kumar, V., Saini, S., Sharma, M & ,Nigam, K. D. P. (2006). Pressure drop and heat transfer study in tube-in-tube helical heat exchanger. *Chemical Engineering Science*, 61(13), 4403-4416 .

[۳۹] Witchayanuwat, W & ,Kheawhom, S. (2009). Heat Transfer Coefficients for Particulate Airflow in Shell and Coiled Tube Heat Exchangers. *World Academy of Science, Engineering and Technology* .

[۳۰] Jamshidi, N., Farhadi, M., Sedighi, K & ,Ganji, D. D. (2012). Optimization of

design parameters for nanofluids flowing inside helical coils. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 39(2), 311-317 .

[۳۱] Ghorbani, N., Taherian, H., Gorji, M & ,Mirgolbabaei, H. (2010). An experimental study of thermal performance of shell-and-coil heat exchangers. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 37(7), 775-781 .

[۳۲] Lin, W. C., Ferng, Y. M & ,Chieng, C. C. (2013). Numerical computations on flow and heat transfer characteristics of a helically coiled heat exchanger using different turbulence models. *Nuclear Engineering and Design*, 263, 77-86 .

[۳۳] Shi, Z & ,Dong, T. (2014). Thermodynamic investigation and optimization of laminar forced convection in a rotating helical tube heat exchanger. *Energy Conversion and Management*, 86, 399-409 .

[۳۴] Ahadi, M & ,Abbassi, A. (2015). Entropy generation analysis of laminar forced convection through uniformly heated helical coils considering effects of high length and heat flux and temperature dependence of thermophysical properties. *Energy*, 82, 322-332 .

[۳۵] Kurnia, J. C., Sasmito, A. P., Akhtar, S., Shamim, T & ,Mujumdar, A. S. (2015). Numerical Investigation of Heat Transfer Performance of Various Coiled Square Tubes for Heat Exchanger Application. *Energy Procedia*, 75, 3168-3173 .

[۳۶] Nazari, M., Baie, N. B., Ashouri, M., Shahmardan, M. M & ,Tamayol, A. (2017). Unsteady heat transfer from a reservoir fluid by employing metal foam tube, helically tube and straight tube: a comparative experimental study. *Applied Thermal Engineering*, 111, 39-48 .

- [۳۷] Bozzoli, F., Cattani, L & ,Rainieri, S. (2016). Effect of wall corrugation on local convective heat transfer in coiled tubes. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 101, 76-90 .
- [۳۸] Farzaneh-Gord, M., Ameri, H & ,Arabkoohsar, A. (2016). Tube-in-tube helical heat exchangers performance optimization by entropy generation minimization approach. *Applied Thermal Engineering*, 108, 1279-1287 .
- [۳۹] Mohapatra, T., Padhi, B. N & ,Sahoo, S. S. (2017). Experimental investigation of convective heat transfer in an inserted coiled tube type three fluid heat exchanger. *Applied Thermal Engineering* .
- [۴۰] Rogers, G. F. C & ,Mayhew, Y. R. (1964). Heat transfer and pressure loss in helically coiled tubes with turbulent flow. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 7(11), 1207-1216 .
- [۴۱] Manlapaz, R. L & ,Churchill, S. W. (1981). Fully developed laminar convection from a helical coil. *Chemical Engineering Communications*, 9(1-6), 185-200 .
- [۴۲] Yildiz, C., Biçer, Y & ,Pehlivan, D. (1997). Heat transfer and pressure drop in a heat exchanger with a helical pipe containing inside springs. *Energy Conversion and Management*, 38(6), 619-624 .
- [۴۳] Xin, R. C & ,Ebadian, M. A. (1997). The effects of Prandtl numbers on local and average convective heat transfer characteristics in helical pipes. *Journal of Heat Transfer*, 119(3), 467-473 .
- [۴۴] Guo, L., Chen, X., Feng, Z & ,Bai, B. (1998). Transient convective heat transfer

in a helical coiled tube with pulsatile fully developed turbulent flow. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 41(19), 2867-2875 .

[۴۵] Rahul, S., Gupta, S. K & ,Subbarao, P. M. V. (1997, December). An experimental study for estimating heat transfer coefficient from coiled tube surfaces in cross-flow of air, In *Proceedings of the Third ISHMT-ASME Heat and Mass Transfer Conference and Fourth National Heat and Mass Transfer Conference*, Kanpur, India, Dec (pp. 29-31) .

[۴۶] Naphon, P & ,Wongwises, S. (2005). A study of the heat transfer characteristics of a compact spiral coil heat exchanger under wet-surface conditions. *Experimental thermal and fluid science*, 29(4), 511-521 .

[۴۷] Soltan, B. K., Saffar-Avval, M & ,Damangir, E. (2004). Minimizing capital and operating costs of shell and tube condensers using optimum baffle spacing. *Applied thermal engineering*, 24(17), 2801-2810 .

[۴۸] Hadidi, A & ,Nazari, A. (2013). Design and economic optimization of shell-and-tube heat exchangers using biogeography-based (BBO) algorithm. *Applied Thermal Engineering*, 51(1), 1263-1272 .

[۴۹] Selbaş ,R., Kızıllkan ,Ö & ,Reppich, M. (2006). A new design approach for shell-and-tube heat exchangers using genetic algorithms from economic point of view. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 45(4), 268-275 .

[۵۰] Babu, B. V & ,Munawar, S. A. (2007). Differential evolution strategies for optimal design of shell-and-tube heat exchangers. *Chemical Engineering Science*, 62(14), 3720-3739 .

- [Δ١] Hilbert, R., Janiga, G., Baron, R & ,Thévenin, D. (2006). Multi-objective shape optimization of a heat exchanger using parallel genetic algorithms. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 49(15), 2567-2577 .
- [Δ٢] Domanski, P. A & ,Yashar, D. (2007). Optimization of finned-tube condensers using an intelligent system. *International Journal of Refrigeration*, 30(3), 482-488 .
- [Δ٣] Caputo, A. C., Pelagagge, P. M & ,Salini, P. (2008). Heat exchanger design based on economic optimisation. *Applied thermal engineering*, 28(10), 1151-1159 .
- [Δ٤] Guo, J., Xu, M & ,Cheng, L. (2009). The application of field synergy number in shell-and-tube heat exchanger optimization design. *Applied Energy*, 86(10), 2079-2087 .
- [Δ٥] Fesanghary, M., Damangir, E & ,Soleimani, I. (2009). Design optimization of shell and tube heat exchangers using global sensitivity analysis and harmony search algorithm. *Applied Thermal Engineering*, 29(5), 1026-1031 .
- [Δ٦] Patel, V. K & ,Rao, R. V. (2010). Design optimization of shell-and-tube heat exchanger using particle swarm optimization technique. *Applied Thermal Engineering*, 30(11), 1417-1425 .
- [Δ٧] Şahin, A. Ş ,Kılıç ,B & ,Kılıç ,U. (2011). Design and economic optimization of shell and tube heat exchangers using Artificial Bee Colony (ABC) algorithm. *Energy Conversion and Management*, 52(11), 3356-3362 .
- [Δ٨] Fettaka, S., Thibault, J & ,Gupta, Y. (2013). Design of shell-and-tube heat exchangers using multiobjective optimization. *International Journal of Heat and*

Mass Transfer, 60, 343-354 .

[۵۹] Sanaye, S & ,Hajabdollahi, H. (2010). Multi-objective optimization of shell and tube heat exchangers. *Applied Thermal Engineering*, 30(14), 1937-1945 .

[۶۰] d'Accadia, M. D & ,Vanoli, L. (2004). Thermoeconomic optimisation of the condenser in a vapour compression heat pump. *International Journal of refrigeration*, 27(4), 433-441 .

[۶۱] Sanaye, S & ,Hajabdollahi, H. (2010). Thermal-economic multi-objective optimization of plate fin heat exchanger using genetic algorithm. *Applied Energy*, 87(6), 1893-1902 .

[۶۲] Hajabdollahi, H., Tahani, M & ,Fard, M. S. (2011). CFD modeling and multi-objective optimization of compact heat exchanger using CAN method. *Applied Thermal Engineering*, 31(14), 2597-2604 .

[۶۳] Hajabdollahi, H., Ahmadi, P & ,Dincer, I. (2011). Thermoeconomic optimization of a shell and tube condenser using both genetic algorithm and particle swarm. *international journal of refrigeration*, 34(4), 1066-1076 .

[۶۴] W.M. Kays, A.L. London, (1984) *Compact Heat Exchanger*, Third Edition, McGraw-Hill Inc.,New York, , p. 8 .

[۶۵] F.M. White, (1984) *Heat Transfer*, Addison-Wesley Publishing Company Inc., New York .

[۶۶] Manlapaz, R. L & ,Churchill, S. W. (1981). Fully developed laminar convection

from a helical coil. *Chemical Engineering Communications*, 9(1-6), 185-200 .

[۶۷] Kakaç ,S., Shah, R. K & ,Aung, W. (Eds.). (1987). *Handbook of single-phase convective heat transfer* (pp. 7-1). New York et al.: Wiley .

[۶۸] حبیب مطیع قادر، شهریار لطفی و میر مهدی سید اسفهلان، مروری بر برخی از روشهای بهینه سازی هوشمند، دانشگاه آزاد اسلامی (واحد شبستر)، ۱۳۸۹.

[۶۹] Holland, J. H. (1975). *Adaptation in Natural and Artificial Systems*, the University of Michigan Press, Ann Arbor, MI. 1975 .

[۷۰] Srinivas, N & ,Deb, K. (1994). Multiobjective optimization using nondominated sorting in genetic algorithms. *Evolutionary computation*, 2(3), 221-248 .

[۷۱] Deb, K., Agrawal, S., Pratap, A & ,Meyarivan, T. (2000, September). A fast elitist non-dominated sorting genetic algorithm for multi-objective optimization: NSGA-II. In *International Conference on Parallel Problem Solving From Nature* (pp. 849-858). Sprin .

[۷۲] Deb, K., Pratap, A., Agarwal, S & ,Meyarivan, T. A. M. T. (2002). A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II. *IEEE transactions on evolutionary computation*, 6(2), 182-197 .

[۷۳] Kennedy, J. (2011). Particle swarm optimization. In *Encyclopedia of machine learning* (pp. 760-766). Springer US .

[۷۴] Eberhart, R. C & ,Kennedy, J. (1995, October). A new optimizer using particle swarm theory. In *Proceedings of the sixth international symposium on micro*

machine and human science (Vol. 1, pp. 39-43) .

[٧٥] Coello, C. A. C., Pulido, G. T & ,Lechuga, M. S. (2004). Handling multiple objectives with particle swarm optimization. IEEE Transactions on evolutionary computation, 8(3), 256-279 .

[٧٦] Raquel, C. R & ,Naval Jr, P. C. (2005, June). An effective use of crowding distance in multiobjective particle swarm optimization. In Proceedings of the 7th annual conference on Genetic and evolutionary computation (pp. 257-264). ACM .

[٧٧] Coello, C. C., Lamont, G. B & ,Van Veldhuizen, D. A. (2007). Evolutionary algorithms for solving multi-objective problems. Springer Science & Business Media .

[٧٨] Kakac, S., Liu, H & ,Pramuanjaroenkij, A“ .(٢٠٠٢) .Heat exchangers :”selection, rating, and thermal design. CRC press .

[٧٩] Shah R.K, Joshi S.D“ (١٩٨٧),Convective heat transfer in curved ducts, ch.5, Handbook of single phase convective heat transfer ,”John Wiley & Sons, New York .

Abstract

The heat transfer and pressure drop are two important parameters in heat exchanger design. This thesis presents an optimization of a shell and coiled tube heat exchanger. In most engineering problems purposes of optimization are not achievable simultaneously. It means that improvement of a purpose results in undesirable condition for second one. So a set of results will be obtained as 'Pareto Front'. In this study, effectiveness is considered as an objective function as it includes heat transfer of tube side as well as heat transfer of shell side in a correlation. Also pressure drop is considered as second objective function. Tube radius, coil radius and coil pitch were considered as three design parameters. For optimal design of a shell and coiled tube heat exchanger, it was first thermally modeled using ϵ -NTU method. Non-dominated sorting genetic algorithm (NSGA-II) and multi-objective particle swarm optimization (MOPSO) were applied to obtain the optimum results for objective functions. The results of optimal designs for effectiveness and pressure drop were presented as a set of multiple optimum solutions called Pareto front.

Keywords: shell and coiled tube heat exchanger, multi-objective optimization, non-dominated sorting genetic algorithm, particle swarm optimization, effectiveness, pressure drop.



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

**Optimization of shell and coiled tube heat exchanger
using intelligent optimization algorithms**

By: Mehdi Ghasemi Barforush

Supervisors:

Dr Seyed Majid Hashemian

Dr Mousa Farhadi

February 2017