



بهینه سازی مبدل حرارتی پوسته لوله‌ای به کمک الگوریتم ژنتیک و ازدحام ذرات

ابراهیم عرب یار محمدی^۱، محمد محمدیون^{۲*}، میثم سعدی^۳ و حمید محمدیون^۴

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد شاهرود، شاهرود، ایران

^۲ دانشیار دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد شاهرود، شاهرود، ایران

^۳ استادیار دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد شاهرود، شاهرود، ایران

^۴ استادیار دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد شاهرود، شاهرود، ایران

مقاله مستقل، تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۰۲/۲۲، تاریخ بازنگری: ۱۳۹۷/۰۳/۱۹، تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۰۵/۲۹

چکیده

انتقال حرارت و هزینه دو پارامتر مهم در طراحی مبدل‌ها بشمار می‌روند. از طرفی، در اغلب مسائل مهندسی، اهداف مورد نظر برای بهینه سازی در تعارض با یکدیگر هستند؛ بطوری‌که با بهبود یک هدف، هدف دیگر بسمت نا مطلوب پیش می‌رود، این مسئله در این نوع از مبادله کن گرما نیز وجود دارد؛ بطوریکه با افزایش انتقال حرارت (مطلوب)، سطح حرارت، هزینه و افت فشار نیز بالا می‌رود. در این پژوهش، ابتدا مدل حرارتی مبدل از روش انتقال حرارت از روش بل دلاوره تخمین زده شده است. بسیاری از روش‌های بهینه‌سازی معمول، برای یافتن این جواب‌ها کارآمد نمی‌باشند. این پژوهش روشی کارآمد براساس الگوریتم ازدحام ذرات و ژنتیک بر مبنای توابع چند هدفه برای بهینه سازی این نوع از مبدل‌ها ارائه می‌دهد که متغیرهای طراحی، قطر خارجی لوله، فاصله بافل‌ها و قطر پوسته و همچنین تابع هدف، هزینه و طول مبدل در نظر گرفته شده است که کمینه‌سازی توسط دو الگوریتم، دو حالت آرایش لوله‌ها در مبدل بررسی شد، هم آرایش مربعی و هم مثلثی که در پایان نتایج بدست آمده از دو الگوریتم حداقل هزینه و طول مبدل به ازای حالت‌های مختلف با یکدیگر و همچنین با نتایج سایر پژوهش‌های صورت گرفته، مورد مقایسه قرار گرفته است.

کلمات کلیدی: الگوریتم ازدحام ذرات؛ ژنتیک؛ مبدل حرارتی پوسته لوله‌ای؛ روش بل دلاوره.

Optimization of Shell and Tube Heat Exchangers Using Heuristic Algorithms

E. Arabyarmohammadi¹, M Mohammadiun^{2,*}, M. Saadi³, H. Mohammadiun⁴

¹ Master. Student, Mech. Eng., Islamic Azad University of Shahroud, Shahroud, Iran.

² Assoc. Prof., Mech. Eng., Islamic Azad University of Shahroud, Shahroud, Iran.

³ Assis. Prof., Mech. Eng., Islamic Azad University of Shahroud, Shahroud, Iran.

⁴ Assis. Prof., Mech. Eng., Islamic Azad University of Shahroud, Shahroud, Iran.

Abstract

Heat transfer and cost are two important parameters of designing a heat exchanger. Mostly, in engineering affairs the goals of interest for optimization are in conflict with each other. In the other hand, by making progress in one parameter, an undesirable factor appears. There is the same problem in heat exchangers. By increasing the heat transfer, heat area, cost and pressure drop increase. Thus, instead of one solution, there are several solutions. In this study for computing the heat transfer and pressure drop, Bell Delaware method is used. Lots of usual optimization methods for extracting the solutions are not efficient. At current research an efficient method is presented based on group particle algorithm and genetic, according to multi goaled function for optimizing of these exchangers. In addition, in optimization by two algorithms, two tube arrangement modes were considered, both square and triangular arrangement, which, At the end of this research, the results obtained from two algorithms for different modes and other research results have been compared.

Keywords: Particle Swarm Optimization; Genetic Algorithm; Shell and Tube Heat Exchanger; Bell Delaware Method.

۱- مقدمه

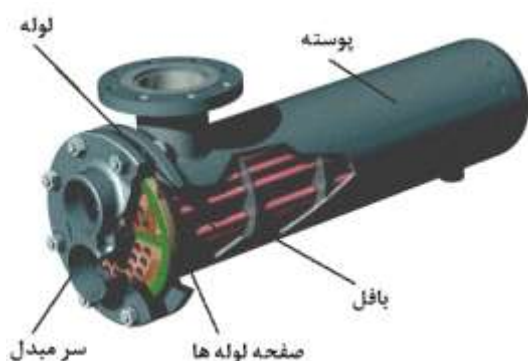
تجهیزات مورد استفاده در انتقال حرارت با توجه به عملی تعریف می‌گردند که در فرایند انجام می‌دهند. مبدل‌های حرارتی، حرارت را بین دو جریان از فرایند بازیابی می‌کنند. مبدل‌های حرارتی پوسته-لوله‌ای با مقطع دایره‌ای ساخته می‌شوند که در پوسته‌ای استوانه شکل نصب شده‌اند. بطوریکه محور لوله‌ها موازی با محور پوسته است. این مبدل‌ها بصورت وسیعی بعنوان خنک کن‌های روغن و چگالنده‌ها و پیش گرمکن‌ها در نیروگاه و پتروشیمی‌ها بکار می‌روند. ساده‌ترین نوع مبدلی که در صنعت ساخته می‌شود، مبدل حرارتی دو لوله‌ای است که به آن مبدل سنجاق سری نیز گفته می‌شود که از دو لوله هم محور و به شکل U 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. شکل ۱. مبدل‌های پوسته لوله‌ای کاربردهای قابل توجهی در بسیاری از صنایع به ویژه صنایع تبدیل انرژی و پتروشیمی دارند، از همین رو در چندین سال اخیر محققین سعی در بهینه سازی عملکرد این نوع مبدل‌ها دارند. از جمله تحقیقاتی که در سال‌های اخیر روی این نوع مبدل صورت گرفته، می‌توان به بهینه سازی هزینه اقتصادی مبدل بواسطه الگوریتم کرم شب تاب نام برد که به کاهش ۲۹٪ هزینه کل در مقایسه با طراحی اصلی منجر شد، در همین پژوهش، این عمل برای دو کاربرد متفاوت از مبدل انجام شد [۱]:

۱. سیال داخل لوله‌ها آب دریا و سیال داخل پوسته متانول
۲. سیال داخل لوله‌ها نفت خام و سیال داخل پوسته نفت سفید

بهینه سازی هزینه این مدل مبدل‌ها با استفاده از الگوریتم تفاضل محدود و همین طور نوع دیگری از آن به نام تی سالیس تفاضل، در دو حالت کار کرد: حالت اول کارکرد مبدل با متانول و آب شور، حالت دوم کارکرد با آب مقطر و آب‌خام پژوهش دیگری است که در این زمینه صورت گرفته

است. تابع هدف مورد تحلیل در این پژوهش، هزینه که حاصل مجموع دو عبارت سرمایه‌گذاری و هزینه عملیاتی کل است و نهایتاً به کاهش ۲۶.۹۹٪ هزینه کل دست یافته شد و در پایان نتایج حاصل از این الگوریتم‌ها، با نتایج حاصل از الگوریتم ژنتیک و الگوریتم بیوگرافی مقایسه شده است [۲]. پارامترهای هندسی در این طراحی مبدل به عنوان متغیرهای طراحی در نظر گرفته می‌شود که در پژوهشی با در نظر گرفتن، قطر داخلی پوسته، قطر خارجی پوسته و فاصله بافل‌ها به عنوان متغیرهای طراحی به مینیمم کردن هزینه کل سالانه، در دو حالت از آرایش لوله‌ها (مثلثی و مربعی) پرداخته شد، برای مینیمم کردن تابع هدف با در نظر گرفتن قیدهای هندسی حاکم بر مبدل، از الگوریتم تکامل تفاضلی بهره برده شده است [۳]. در پژوهشی دیگر به استفاده از فین‌های ذوزنقه‌ای در طول لوله‌ها به جای بافل در این گونه مبدل‌ها روی آورده است که استفاده از این فین‌ها، سبب افزایش سطح انتقال حرارت و به تبع آن افزایش شار حرارتی بین دوسیال، بخصوص در آرایش مربعی لوله‌ها می‌شود [۴].

بهینه سازی مبدل با بافل‌های هلیکال بواسطه الگوریتم چندهدفه ژنتیک به دلیل در نظر گرفتن دو تابع انرژی و هزینه به عنوان توابع هدف از موضوعی است که مورد آنالیز قرار گرفته است [۵-۶]. بهینه سازی این نوع مبدل برای ساختار نانوسیال بواسطه الگوریتم ژنتیک، آزمایش تجربی مبدل پوسته لوله با پوسته و لوله‌های موج دار و استفاده از الگوریتم جستجوی وزنی در بهینه سازی این گونه مبدل‌ها، از پژوهش‌هایی است که در سال‌های ۲۰۱۷-۲۰۱۵ میلادی بر روی این گونه مبدل صورت گرفته است [۷-۹].



شکل ۱- مبدل حرارتی پوسته لوله ای دو مسیره

در این شرکت روغن موتور دیزل پس از انجام عملیات روانکاری به دمایی نزدیک به ۶۰ درجه سلسیوس می‌رسد که به منظور سرد کردن و طی کردن مجدد عملیات روانکاری، وارد مبدل پوسته لوله‌ای می‌شود. مبدل پوسته لوله‌ای که هم اکنون در حال بهره برداری است، موجب کاهش حداکثر ۱۵- ۱۰ درجه دمای روغن می‌شود. از اهداف این پژوهش کاهش ۳۰ درجه ای دمای روغن یا به عبارتی رساندن دمای آن به حد مطلوب ۳۰ درجه سانتی گراد است که موجب افزایش راندمان و عمر کاری موتور دیزل می‌شود. از طرفی در این پژوهش با در نظر گرفتن تابع افت فشار و هزینه به عنوان تابع هدف در الگوریتم‌های بهینه سازی، موجب طراحی بهینه مبدل با کمترین افت فشار دو سیال و هزینه عملیاتی مبدل می‌شود.

۲- مدل‌سازی حرارتی

انتقال حرارت و هزینه دو پارامتر مهم در طراحی مبدل‌ها بشمار می‌روند. این هزینه شامل، هزینه اولیه (سطح حرارتی) و هزینه کارکرد (توان مصرفی برای غلبه بر افت فشار) است. از طرفی، در اغلب مسائل مهندسی، اهداف مورد نظر برای بهینه‌سازی در تعارض با یکدیگر هستند. بطوریکه با بهبود یک هدف، هدف دیگر بسمت نامطلوب پیش می‌رود، این مسئله در این نوع از مبادله کن گرما نیز وجود دارد؛ بطوریکه با افزایش انتقال حرارت (مطلوب)، سطح حرارت، هزینه و افت فشار نیز بالا می‌رود؛ بنابراین بجای یک جواب، دسته‌ای از جواب‌ها وجود دارند. در این پژوهش ابتدا مدل حرارتی مبدل از روش انتقال حرارت تخمین زده شده و برای محاسبه میزان انتقال حرارت و افت فشار از روش بل دلاوره استفاده شده است.

انتقال حرارت در مبدل پوسته لوله‌ای به ضریب انتقال حرارت پوسته و لوله و بعلاوه مقاومت فشاری دو سیال بستگی دارد، رابطه (۱). ضریب انتقال حرارت کل هم به لوله و هم پوسته بستگی دارد که با رابطه (۱) محاسبه می‌شود [۱۵]:

$$U = \frac{1}{\left[\frac{1}{h_s} + R_{foul, shell} + \frac{d_o}{d_i} (R_{foul, tube} + \frac{1}{h_t}) \right]} \quad (1)$$

طراحی مبدل برای دماهای بالا و بعلاوه در تحقیقی دیگر برای دماهای پایین و همچنین برای لوله‌هایی با ضخامت کم و قطر کم، تخمین پارامتری بازده حرارتی مبدل، بهینه سازی چند هدفه، از دیگر پژوهش‌هایی است که در این زمینه صورت گرفت است [۱۴-۱۰].

در همین راستا مد نظر است، با در نظر گرفتن پارامترهای طول لوله‌ها، قطر خارجی لوله، فاصله بافل‌ها به عنوان متغیرهای طراحی، مبدلی با ماکزیمم انتقال حرارت در عین حال کمترین هزینه و افت فشار سیال طراحی شود. در این راستا بهینه سازی بواسطه الگوریتم‌های فراابتکاری ژنتیک، ازدحام ذرات صورت می‌گیرد که پس از مقایسه نتایج آنها با یکدیگر و همینطور سایر پژوهش‌های صورت گرفته در این زمینه، به نتیجه‌ای جامع یا به عبارت دیگر مبدلی با راندمان بالا حاصل خواهد شد.

از این رو مبدل پوسته لوله‌ای مدنظر در این پژوهش، مبدل خنک کاری روغن روانکار موتور دیزل واکوشا است که این موتور در شرکت خطوط لوله و مخابرات نفت ایران منطقه شمالشرق در حال بهره برداری است، شکل ۲. در این پژوهش به منظور کاهش اختلاف فشار سیال ورودی و خروجی و افزایش اختلاف دمای سیال گرم ورودی و خروجی مبدل و همچنین بعلاوه کاهش هزینه عملیاتی این مبدل به بهینه سازی مبدل به کمک الگوریتم‌های فرا ابتکاری پرداخته شده است. در نهایت مبدلی با پارامترهای هندسی بهینه جهت بهبود کارایی و افزایش راندمان موتور طراحی می‌شود.



شکل ۲- مبدل حرارتی شرکت خطوط لوله و مخابرات نفت منطقه شمالشرق

در این رابطه C_{pt} ظرفیت حرارتی لوله و k_t ضریب انتقال حرارت جابجایی لوله است. با توجه به مشخص شدن مقدار عدد رینولدز و پرانتل برای لوله و سیال داخل آن مقدار ضریب انتقال حرارت با توجه به آرایش مد مورد نظر، برای رینولدزهای بیشتر از ۱۰۰۰۰ برابر است با:

$$h_t = 0.027 \frac{k_t}{d_o} \text{Re}_t^{0.8} \cdot \text{Pr}_t^{1/3} \left(\frac{\mu_t}{\mu_{wt}}\right)^{0.14} \quad (۶)$$

این ضریب انتقال حرارت برای سمت پوسته به شکل رابطه (۷) تغییر می کند [۱۵]:

$$h_t = 0.36 \frac{k_t}{d_e} \text{Re}_s^{0.55} \cdot \text{Pr}_s^{1/3} \left(\frac{\mu_s}{\mu_{ws}}\right)^{0.14} \quad (۷)$$

در این رابطه قطر هیدرودینامیکی لوله است که بسته به نوع آرایش مربعی و مثلثی لوله‌ها به ترتیب از رابطه‌های (۸) و (۹) بدست می آیند.

$$d_e = \frac{4(S_t^2 - (\frac{\pi d_o^2}{4}))}{\pi d_o} \quad (۸)$$

$$d_e = \frac{4(0.43S_t^2 - (\frac{0.5\pi d_a^2}{4}))}{0.5\pi d_o} \quad (۹)$$

سرعت سیال سمت پوسته از رابطه زیر محاسبه می شود.

$$v_s = \frac{m_s}{\rho_s A_s} \quad (۱۰)$$

$$A_s = D_s B (1 - \frac{d_o}{S_t}) \quad (۱۱)$$

با این وجود، مقادیر عددی رینولدز و پرانتل برای پوسته و سیال سمت آن به ترتیب برابر است با:

$$\text{Re}_s = \frac{m_s d_e}{A_s \mu_s} \quad (۱۲)$$

$$\text{Pr}_s = \frac{\mu_s C_{ps}}{k_s} \quad (۱۳)$$

مساحت کل تبادل حرارت بین سیال گرم گرم و سیال سرد در مبدل‌های پوسته لوله ای برابر با رابطه (۱۴) است:

$$A = \frac{Q}{UF(LMTD)} \quad (۱۴)$$

در این رابطه Q حرارت تبادل شده بین دوسیال، U ضریب انتقال حرارت کلی، $LMTD$ متوسط دمای لگاریتمی و F ضریب تصحیح آن است. دو ضریب متوسط دمای لگاریتمی و ضریب تصحیح آن به ترتیب از رابطه‌های (۱۵-۱۶) محاسبه می شوند.

$$LMTD = \frac{(T_{hi} - T_{co}) - (T_{ho} - T_{ci})}{\ln((T_{hi} - T_{co}) / (T_{ho} - T_{ci}))} \quad (۱۵)$$

در رابطه بالا $R_{foul,shell}$ و $R_{foul,tube}$ به ترتیب مقاومت حرارتی دیواره‌های لوله و پوسته می باشند که موجب کاهش ضریب انتقال حرارت می شوند.

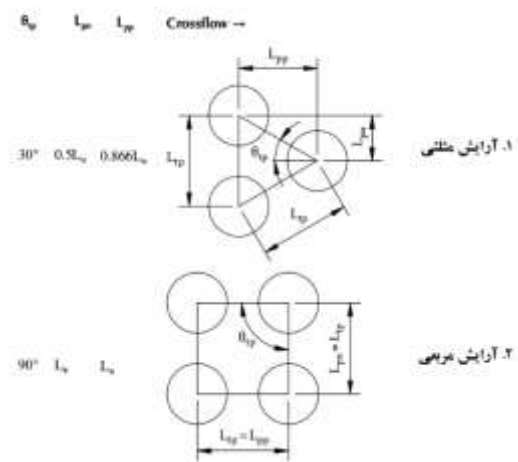
با در نظر گرفتن قطر داخلی لوله به مقدار ۸۰ درصد قطر خارجی، ضخامت لوله تعیین می شود. طبق این تعریف مقدار رینولدز برای سیال داخل لوله از رابطه (۲) بدست می آید که در این رابطه سرعت سیال از رابطه (۳) محاسبه می شود.

$$\text{Re}_t = \frac{\rho_t v_t d_i}{\mu_t} \quad (۲)$$

$$v_t = \frac{m_t}{\frac{\pi}{4} d_i^2 \rho_t} \left(\frac{n}{N_t}\right) \quad (۳)$$

$$N_t = C \left(\frac{D_s}{d_o}\right)^{n_1} \quad (۴)$$

ضرایب n_1, C ضرایبی هستند که با توجه به آرایش لوله‌ها و تعداد عبور آنها مشخص می گردند. مقادیر این دو ضریب در جدول ۱ قابل مشاهده است.



شکل ۳- آرایش لوله ها در مبدل پوسته لوله ای

جدول ۱- ضرایب محاسبه تعداد لوله‌ها

تعداد مسیر	آرایش مثلثی		آرایش مربعی	
	n_1	C	n_1	C
۲	۲/۲۰۷	۰/۲۴۹	۲/۲۹۱	۰/۱۵۶

مقدار عدد پرانتل برای لوله‌ها برابر است با:

$$\text{Pr}_t = \frac{\mu_t C_{pt}}{k_t} \quad (۵)$$

موجب افزایش مساحت انتقال حرارت می‌شود. افت فشار سیال داخل لوله‌ها برابر است با [۱۵]:

$$\Delta P_t = \left(\frac{\rho_t v_t^2}{2} \left(\frac{L}{d_t} f_t \right) + K \frac{\rho_t v_t^2}{2} \right) n \quad (21)$$

ضریب افت هد جزئی در اتصالات و زانویی‌ها است که مقدار آن از جداول مربوطه در کتاب‌های سیالات وایت و یا استریتر آمده است و ضریب دارسی ویسباخ که با توجه به رینولدز محاسبه شده برای سیال داخل لوله، از رابطه زیر محاسبه می‌شود.

۲. افت فشار سمت پوسته

سیالی که در مجاور پوسته حرکت می‌کند، به دلیل وجود بافل و حرکت در جهت عمود بر طول لوله‌ها با کاهش فشار در خروجی روبرو می‌شود. مقدار این افت فشار از رابطه زیر بدست می‌آید.

$$\Delta P_s = f_s \left(\frac{\rho_s v_s^2}{2} \right) \left(\frac{L}{B} \right) \left(\frac{D_s}{d_e} \right) \quad (22)$$

که در آن:

$$f_s = 2b_o \text{Re}_s^{-0.15} \quad (23)$$

B فاصله بافل‌ها است و مقدار ضریب b_o برای رینولدزهای کمتر از ۴۰۰۰۰ برابر با ۰.۷۲ است.

در نهایت رابطه افت فشار کلی مبدل برابر است با:

$$\Delta P = \Delta P_t + \Delta P_s = \left(\frac{\rho_t v_t^2}{2} \left(\frac{L}{d_t} f_t \right) + K \frac{\rho_t v_t^2}{2} \right) n + f_s \left(\frac{\rho_s v_s^2}{2} \right) \left(\frac{L}{B} \right) \left(\frac{D_s}{d_e} \right) \quad (24)$$

با توجه به این افت فشار در مبدل می‌توان به توان پمپ مورد نیاز برای مبدل دست یافت که با در نظر گرفتن η به عنوان بازده پمپ توان پمپ مورد نیاز از رابطه زیر محاسبه می‌شود.

$$P = \frac{1}{\eta} \left(\frac{m_t}{\sigma_t} \Delta P_t + \frac{m_s}{\sigma_s} \Delta P_s \right) \quad (25)$$

۲-۲-۲- تابع هزینه

از پارامترهای مهم دیگر در طراحی و بخصوص ساخت مبدل، هزینه است که این هزینه شامل، هزینه مواد بکار رفته در مبدل که با توجه سطح انتقال حرارت محاسبه شده بین دو سیال، رابطه (۱۴) و هزینه عملیاتی پمپاژ دو سیال با توجه به فشار مورد نیاز محاسبه شده در رابطه (۲۴) و عمر کاری مد نظر می‌شود.

$$F = \sqrt{\frac{R^2+1}{R-1}} \times \ln \left(\frac{(1-P)/(1-PR)}{(2-PR+1-\sqrt{R^2+1})/(2-PR+1+\sqrt{R^2+1})} \right) \quad (16)$$

ضرایب R ، P عبارتند از:

$$\begin{cases} R = (T_{hi} - T_{ho}) / (T_{co} - T_{ci}) \\ P = (T_{co} - T_{ci}) / (T_{hi} - T_{ci}) \end{cases} \quad (17)$$

انتقال حرارت کل که از سیال گرم به سیال سرد انتقال پیدا می‌کند برابر با رابطه (۱۸) است:

$$Q = m_h C_{ph} (T_{hi} - T_{ho}) = m_s C_{ps} (T_{co} - T_{ci}) \quad (18)$$

با مشخص شدن حرارت انتقال یافته از سیال گرم به سیال سرد و همینطور سطح کلی انتقال حرارت بین دو سیال، می‌توان مقدار طول مورد نیاز از لوله با قطر خارجی d_o و تعداد N_t برای انتقال این میزان حرارت را محاسبه نمود. یکی از اهداف این پژوهش، مینیمم کردن این پارامتر در ارضای شرایط حاکم بر مسیله است. این مقدار برابر است با:

$$L = \frac{A}{\pi d_o N_t} \quad (19)$$

۲-۱- تابع اختلاف فشار

دو سیال با عبور از مبدل با کاهش فشار روبرو می‌شوند، در سیالی که از لوله‌ها عبور می‌کند، اصطکاک دیواره لوله و همچنین زانویی‌هایی که در طول لوله وجود دارد، در مبدل های دو پاس به بالا، موجب افت فشار سیال می‌شود. سیالی که از حد فاصل بین لوله و پوسته عبور می‌کند، خود لوله‌ها و بافل‌ها منجر به کاهش فشار سیال می‌شوند. افت فشار کل در مبدل حاصل جمع افت فشار ناشی از لوله‌ها و افت فشار در سمت پوسته است. به منظور بدست آوردن افت فشار کل، به ترتیب این افت فشارها محاسبه می‌شود. در ادامه به محاسبه این افت فشار پرداخته می‌شود.

$$\Delta P = \Delta P_{tubeside} + \Delta P_{shellside} \quad (20)$$

۱. افت فشار سمت لوله

افت فشار سیال داخل لوله‌ها خود به دو قسمت تقسیم می‌شود: ۱. افت ناشی از طول لوله‌ها و ۲. افت ناشی از زانویی است. مبدل مورد نظر در این پژوهش، از نوع U شکل است به عبارت دیگر، ورود و خروج سیال داخل لوله‌ها از یک سمت مبدل صورت می‌گیرد. لوله‌ها با طی کردن طول مبدل، بواسطه زانویی مجدداً طول مبدل را طی می‌کند که این عمل

$$0.1 < B < 0.5$$

$$0.1 < D_s < 0.5$$

$$0.015 < d_o < 0.03$$

۳- الگوریتم‌های بهینه سازی

هدف از بهینه‌سازی یافتن بهترین جواب قابل قبول، با توجه به محدودیت‌ها و نیازهای مسأله است. برای یک مسأله ممکن است، جواب‌های مختلفی موجود باشد که برای مقایسه آنها و انتخاب جواب بهینه، تابعی به نام تابع هدف تعریف می‌شود. انتخاب این تابع به طبیعت مسأله وابسته است. به عنوان مثال، زمان سفر یا هزینه از جمله اهداف رایج بهینه‌سازی شبکه‌های حمل و نقل است. به هر حال، انتخاب تابع هدف مناسب، یکی از مهمترین گام‌های بهینه‌سازی است. گاهی در بهینه‌سازی چند هدف به طور همزمان مد نظر قرار می‌گیرد؛ این گونه مسائل بهینه‌سازی را که دربرگیرنده چند تابع هدف هستند، مسائل چند هدفی می‌نامند. ساده‌ترین راه در برخورد با این گونه مسائل، تشکیل یک تابع هدف جدید به صورت ترکیب خطی توابع هدف اصلی است که در این ترکیب میزان اثرگذاری هر تابع با وزن اختصاص یافته به آن مشخص می‌شود. هر مسأله بهینه‌سازی، دارای تعدادی متغیر مستقل است که آنها را متغیرهای طراحی می‌نامند که با بردار n بعدی x نشان داده می‌شوند.

یک مسأله بهینه سازی در حالت کلی به شکل رابطه (۳۰) تعریف می‌شود.

$$\begin{aligned} \text{Minimize} \quad & f(x) \quad x \in \mathbb{R}^n \\ \text{Subject to:} \quad & G_i(x) = 0, \quad i = 1, \dots, m_e \\ & G_i(x) \leq 0, \quad i = m_e + 1, \dots, m \\ & x_l \leq x \leq x_u \end{aligned} \quad (30)$$

در این پژوهش به دلیل کمینه کردن دو تابع طول مبدل و هزینه، تابع هدف مسئله مجذور حاصل جمع مربعات آن دو تعریف شده است. مسیله بهینه سازی در این پژوهش، به شکل رابطه (۳۱) تعریف شده است:

$$\begin{aligned} \text{Minimize} \quad & f(x) = \sqrt{(C_{total})^2 + (L)^2} \quad x \in \mathbb{R}^n \\ \text{Subject to:} \quad & 0.015 < x_1 < 0.03 \\ & 0.1 < x_2 < 0.5 \\ & 0.1 < x_3 < 0.5 \end{aligned} \quad (31)$$

۱. هزینه مواد بکارفته در مبدل

$$C_i = a_1 + a_2 A^{a_3} \quad (26)$$

که ضرایب a_1, a_2, a_3 با توجه به جنس انتخاب شده برای لوله و پوسته در نظر گرفته می‌شوند و A سطح انتقال حرارت بین دو سیال است که پیشتر در رابطه (۱۴) محاسبه شد.

۲. هزینه عملیاتی پمپاژ

هزینه پمپاژ دو سیال با توجه به فشار مورد نیاز کل که در رابطه (۲۴) محاسبه شد و همچنین با توجه به عمر کاری مبدل محاسبه می‌شود.

$$C_i = \sum_{t=1}^{year} \frac{C_o}{(1+i)^t} \quad (27)$$

در این رابطه C_o هزینه به ازای هر کیلو وات ساعت که از رابطه (۲۸) محاسبه می‌شود و i نرخ افزایش قیمت سالانه است که بطور میانگین ۱۰ درصد در نظر گرفته می‌شود. $year$ عمر طراحی مبدل برحسب سال است.

$$C_o = PC_e H \quad (28)$$

ضریب H میزان ساعت کاری در هر سال مبدل، C_e مقدار هزینه بر کیلووات ساعت و P فشار مورد نیاز مبدل است که پیشتر محاسبه شد. در مجموع هزینه کل که حاصل جمع دو هزینه مواد بکار رفته و هزینه پمپاژ دوسیال است برابر با رابطه (۲۹) است:

$$C_{total} = C_i + C_o \quad (29)$$

در بهینه سازی مهمترین کار، تعریف تابع هدف و بعد از آن مشخص نمودن قیدهای حاکم بر مسئله است که این قیدها می‌توانند محدوده پارامترهای طراحی مسئله نیز باشند. همانطور که پیشتر گفته شد، در این پژوهش از بهینه سازی چند هدفه استفاده شده تا در یک زمان با مینیمم کردن اختلاف فشار، هزینه کل کمترین مقدار را بخود بگیرد و هم طول مبدل مینیمم گردد.

سه متغیر طراحی در این پژوهش عبارتند از: فاصله بافل‌ها، قطر لوله، قطر پوسته که با توجه به هندسه مبدل بکار رفته در شرکت نفت می‌توان به محدوده‌ای از متغیرهای طراحی دست یافت. در این شرکت برای خنک کاری موتور از مبدل حرارتی دو مسیره به طول ۸ فوت و از روغن با گرید ۳۰ شرکت ایرانول استفاده می‌شود، شماتیک این مبدل در شکل ۲ قابل مشاهده است. محدوده پارامترهای طراحی خود در دسته قیدهای نامعین مسئله قرار می‌گیرند.

شایستگی دارد که توسط یک تابع شایستگی محاسبه می‌شود [۱۷-۱۸].

پس از یافتن بهترین مقادیر سرعت و مکان هر ذره با استفاده از معادلات (۳۲) و (۳۳) به روز می‌شود.

$$v[i] = v[i] + c1 * rand(i) * (pbest[i] - position[i]) + c2 * rand(i) * (gbest[i] - position[i]) \quad (32)$$

$$position[i] = position[i] + v[i] \quad (33)$$

در این پژوهش ضرایب وزنی و تعداد ذرات در نظر گرفته شده برابر است با:

$$c1 = 2, \quad c2 = c1 - 2$$

$$numparticle = 70$$

۴- نتایج

در بخش ۲ مدلسازی حرارتی مبدل طبق روش ϵ -NTU و بر اساس استاندارد انجمن تولیدکنندگان مبدل‌های لوله‌ای آمریکا، علاوه بر طراحی بهینه پارامترهای هندسی مبدل صورت گرفت. همانطور که در بخش‌های قبل بیان شد، مبدل مدنظر مبدل لوله پوسته‌ای بکار رفته در شرکت خطوط لوله و مخابرات نفت ایران است که به منظور خنک کاری روغن روانکار موتور دیزل واکوشا بکار می‌رود. در این مبدل روغن با دمای ۶۰ درجه سلسیوس با دبی ۱۲ لیتر بر ثانیه وارد مبدل دو مسیره به طول ۸ فوت شده، در طراحی این پژوهش مد نظر است. روغن با دمای ایده آل ۳۰ تا ۴۰ درجه از مبدل خارج گردد. روغن بکار رفته جهت روانکاری موتور روغن ۳۰ شرکت ایرانول با مشخصات جدول ۲ است.

جدول ۲- خواص روغن ۳۰ شرکت ایرانول

۴۶	CST	۴۰ °C	گرانروی سینماتیک در دمای
۲۰۵	°C		نقطه اشتعال
-۶	°C		نقطه ریزش
۸۷۵	Kg/m3		دانسیته

جهت خنک کردن این روغن در مبدل، از آب شهری به عنوان سیال دوم با دبی ۱۰ لیتر بر ثانیه استفاده شده است. که در دمای محیط دارای دانسیته ۹۹۶ کیلوگرم بر مترمکعب و ویسکوزیته ۰/۰۰۰۷۷۹ کیلوگرم بر متر در ثانیه است. جنس لوله‌های مبدل از کربن استیل است که ضرایب رابطه

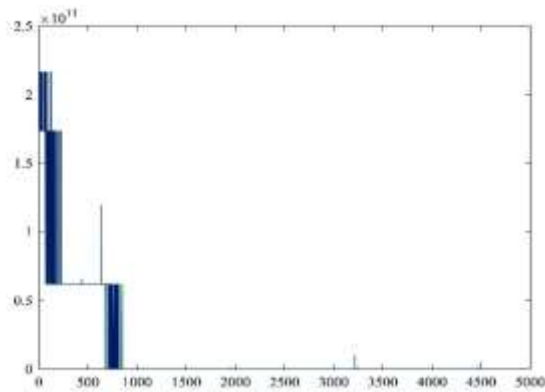
عملیات بهینه سازی در این تحقیق، توسط الگوریتم‌های فرا ابتکاری ژنتیک و ازدحام ذرات صورت گرفته است.

۳-۱- الگوریتم ژنتیک

الگوریتم ژنتیک به عنوان یک الگوریتم محاسباتی بهینه‌سازی با در نظر گرفتن مجموعه‌ای از نقاط فضای جواب در هر تکرار محاسباتی به نحو مؤثری نواحی مختلف فضای جواب را جستجو می‌کند. در مکانیزم جستجو گرچه مقدار تابع هدف تمام فضای جواب محاسبه نمی‌شود، ولی مقدار محاسبه شده تابع هدف برای هر نقطه، در متوسط گیری آماری تابع هدف در کلیه زیر فضاهایی که آن نقطه به آنها وابسته بوده دخالت داده می‌شود و این زیر فضاها به طور موازی از نظر تابع هدف متوسط گیری آماری می‌شوند. بطور کلی در این الگوریتم ضمن آنکه در هر تکرار محاسباتی، توسط عملگرهای ژنتیکی نقاطی جدید از فضای جواب مورد جستجو قرار می‌گیرند توسط مکانیزم انتخاب، روند جستجوی نواحی از فضا را کنکاش می‌کند که متوسط آماری تابع هدف در آنها بیشتر است. بر اساس سیکل اجرایی فوق که بر این اساس، در هر تکرار محاسباتی، سه عملگر اصلی روی رشته‌ها عمل می‌کند؛ این سه عملگر عبارتند از: دو عملگر ژنتیکی و عملکرد انتخابی تصادفی. این الگوریتم با جمعیت اولیه ۵۰ سعی در مینیمم کردن رابطه (۳۲) به ازای قیود حاکم بر مسئله دارد [۱۶-۱۷].

۳-۲- الگوریتم ازدحام ذرات

الگوریتم ازدحام ذرات، به عنوان یک روش جستجوی غیر قطعی برای بهینه سازی تابعی مطرح گشت. این الگوریتم از حرکت دسته جمعی پرندگان که به دنبال غذا می‌باشند، الهام گرفته شده است. گروهی از پرندگان در فضایی به صورت تصادفی دنبال غذا می‌گردند. تنها یک تکه غذا در فضا مورد بحث وجود دارد. هیچ یک از پرندگان محل غذا را نمی‌دانند. یکی از بهترین استراتژی‌ها می‌تواند دنبال کردن پرنده‌ای باشد که کمترین فاصله را تا غذا داشته باشد. این استراتژی در واقع جانما یه الگوریتم است. هر راه حل که به آن یک ذره گفته می‌شود، در الگوریتم معادل یک پرنده در الگوی حرکت جمعی پرندگان است. هر ذره یک مقدار



شکل ۴- تابع هدف در الگوریتم ژنتیک بر حسب تعداد تکرار

جدول ۴- متغیرهای بهینه ژنتیک برای آرایش مربعی

x(3)	x(2)	x(1)
۰/۲۹۹۹۹	۰/۴۷۵۰۸	۰/۰۱۴۹۹

۲-۴- نتایج الگوریتم ژنتیک برای آرایش مثلثی

در این مرحله به کمینه سازی تابع هدف و بدست آوردن پارامترهای هندسی مبدل با آرایش مثلثی لوله‌ها به کمک الگوریتم ژنتیک پرداخته می‌شود. در این حالت ضرایب محاسبه تعداد لوله‌ها با توجه به دو مسیر بودن مبدل از جدول خوانده می‌شوند. در این حالت نتایج پنج مرحله مختلف از الگوریتم برابر با جدول زیر است.

جدول ۵- نتایج الگوریتم ژنتیک برای آرایش مثلثی

ردیف	تابع هدف	طول مبدل	هزینه
۱	۸۲۰۴۹۹/۳۷۶۱	۲/۷۵۵۵۳۶	۸/۲۰۴۹۹e+۰۵
۲	۶۰۶۶۳۷/۵۷۰۸	۲/۰۱۳۶۱۰	۶/۰۶۶۳۷e+۰۵
۳	۳۳۴۳۰۷/۶۷۵۷	۲/۲۲۹۵۸۳	۳/۳۴۳۰۷e+۰۵
۴	۱۹۹۹۰۰/۷۲۵۵	۱/۸۲۴۸۵۳	۱/۹۹۹۰۰e+۰۵
۵	۱۳۱۷۷۱/۵۱۶۶	۱/۱۱۴۸۴۸	۱/۳۱۷۷۱e+۰۵

مقدار تابع هدف بر حسب تعداد تکرار و مقادیر متغیرهای طراحی به ازای کمترین مقدار تابع هدف (ردیف پنجم جدول ۵)، به ترتیب در شکل ۵ و جدول ۶ قابل مشاهده است.

هزینه مواد بکار رفته، در بند ۲-۲ با توجه به این جنس برابر است با [۱۱]:

$$a_1 = 8000$$

$$a_2 = 259.2$$

$$a_3 = 0.91$$

آب با دمای محیط برابر ۲۵ درجه سلسیوس وارد مبدل شده و با افزایش دمای ۲۵ درجه‌ای، با دمایی نزدیک به ۵۰ درجه از مبدل خارج می‌گردد. در این پژوهش عمر طراحی برابر ۱۰ سال به ازای ۷۰۰۰ ساعت کار در هر سال در نظر گرفته شده و طراحی به ازای دو حالت آرایش لوله‌ها صورت گرفته که مورد اول آرایش لوله‌ها به شکل مربعی و مورد دوم حالت آرایش مثلثی لوله‌ها است. در هر دو حالت بهینه سازی از طریق الگوریتم‌های فرا ابتکاری صورت گرفته که در پایان مدلی بهینه ارایه می‌شود.

۱-۴- نتایج الگوریتم ژنتیک برای آرایش مربعی

در الگوریتم‌های فرا ابتکاری الزامی در بدست آوردن جواب بهینه در هر بار ران گیری نیست؛ لذا با چند بار ران گرفتن و مقایسه نتایج جواب بهینه مسیله را بدست می آوریم. چند مرحله از ران گیری این مبدل مدنظر در حالت آرایش لوله مربعی، بواسطه الگوریتم ژنتیک در جدول ۳ قابل مشاهده است.

جدول ۳- نتایج پنج مرحله الگوریتم ژنتیک برای آرایش مربعی

ردیف	تابع هدف	طول مبدل	هزینه
۱	۶۴۱۴۱۷/۵۱۳	۱/۵۲۴۸۳	۶/۴۱۴۱۷e+۰۵
۲	۴۳۵۶۳۳/۷۵۸۹	۱/۹۲۶۷۰۳	۴/۳۵۶۳۳e+۰۵
۳	۱۵۴۷۸۸/۴۱۷۹	۲/۶۷۷۷۰۶	۱/۵۴۷۸۸e+۰۵
۴	۱۱۷۵۶۳/۵۳۰۷	۲/۹۱۵۲	۱/۱۷۵۶۳e+۰۵
۵	۱۰۹۹۹۳/۱۷۶۴	۱/۴۲۹۴۸۱	۱/۰۹۹۹۳e+۰۵

مقدار تابع هدف بر حسب تعداد تکرار و مقادیر متغیرهای طراحی به ازای کمترین مقدار تابع هدف (ردیف پنجم جدول ۳) به ترتیب در شکل ۴ و جدول ۴ قابل مشاهده است.

این جواب بهینه بر حسب تعداد تکرار، به روایت شکل ۷ است.

جدول ۸- متغیرهای بهینه الگوریتم ازدحام ذرات برای آرایش مربعی

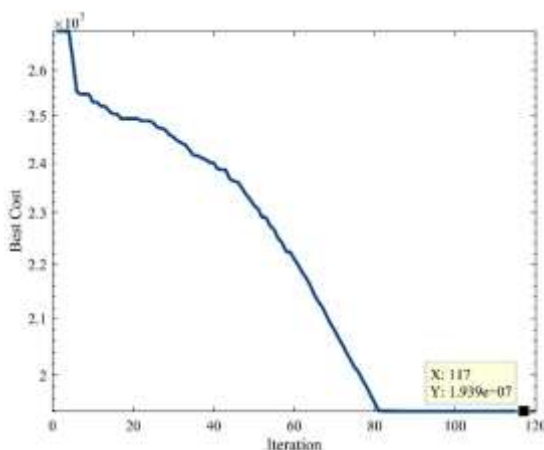
x(3)	x(2)	x(1)
۰/۳۰۰۰	۰/۳۷۶۳۱۸	۰/۰۱۵۰۰

جدول ۹- نتایج الگوریتم ازدحام ذرات برای آرایش مثلثی

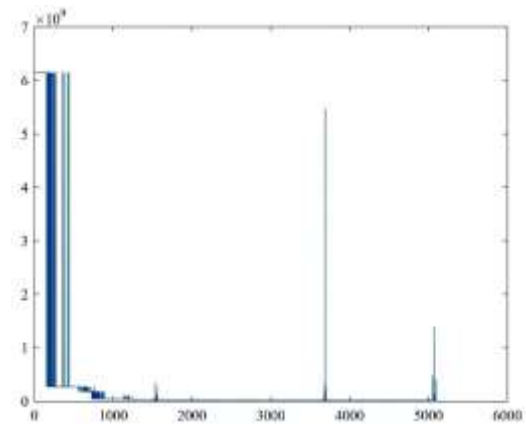
ردیف	تابع هدف	طول مبدل	هزینه
۱	۱۱۹۵۵۹۶۹/۳۶۸۵	۱/۶۸۳۰۲	۱/۱۹۵۶۰۰e+۰۷
۲	۱۱۹۵۵۹۶۹/۳۶۸۵	۱/۶۸۳۰۲	۱/۱۹۵۶۰۰e+۰۷
۳	۱۱۹۵۵۹۶۹/۳۶۸۵	۱/۶۸۳۰۲	۱/۱۹۵۶۰۰e+۰۷
۴	۱۱۹۵۵۹۶۹/۳۶۸۵	۱/۶۸۳۰۲	۱/۱۹۵۶۰۰e+۰۷
۵	۱۱۹۵۵۹۶۹/۳۶۸۵	۱/۶۸۳۰۲	۱/۱۹۵۶۰۰e+۰۷

جدول ۱۰- متغیرهای بهینه توسط الگوریتم ازدحام ذرات برای آرایش مثلثی

x(3)	x(2)	x(1)
۰/۳۰۰۰	۰/۴۸۱۶۳۸	۰/۰۱۵۰



شکل ۶- مقدار تابع هدف در الگوریتم ازدحام ذرات در هر تکرار



شکل ۵- تابع هدف در الگوریتم ژنتیک در هر تکرار

۳-۴ نتایج الگوریتم ازدحام ذرات برای آرایش مربعی این بار مسئله بهینه‌سازی، رابطه (۳۲) را با الگوریتم ازدحام ذرات اجرا شده که در این بخش با در نظر گرفتن آرایش مربعی برای لوله‌ها خواهیم داشت.

۴-۴ نتایج الگوریتم ازدحام ذرات برای آرایش مثلثی نتایج پنج ران الگوریتم ازدحام ذرات به ازای حالت آرایش مثلثی لوله‌ها، به ترتیب مقدار تابع هدف در جدول ۹ قابل مشاهده است.

جدول ۶- متغیرهای بهینه ژنتیک آرایش مثلثی

x(3)	x(2)	x(1)
۰/۲۹۰۲۵۲	۰/۵۰۰۰۰	۰/۰۱۴۹۹

جدول ۷- نتایج الگوریتم ازدحام ذرات برای آرایش مربعی

ردیف	تابع هدف	طول مبدل	هزینه
۱	۱۹۳۹۰۹۷۹/۱۷۲۷	۱/۹۵۳۵۳	۱/۹۳۹۰۹e+۰۷
۲	۱۹۳۹۰۹۷۹/۱۷۴۹	۱/۹۵۳۵۲	۱/۹۳۹۰۹e+۰۷
۳	۱۹۳۹۰۹۷۹/۱۷۲۷	۱/۹۵۳۵۳	۱/۹۳۹۰۹e+۰۷
۴	۱۹۳۹۰۹۷۹/۱۷۲۷	۱/۹۵۳۵۳	۱/۹۳۹۰۹e+۰۷
۵	۱۹۳۹۰۹۷۹/۱۷۲۷	۱/۹۵۳۵۳	۱/۹۳۹۰۹e+۰۷

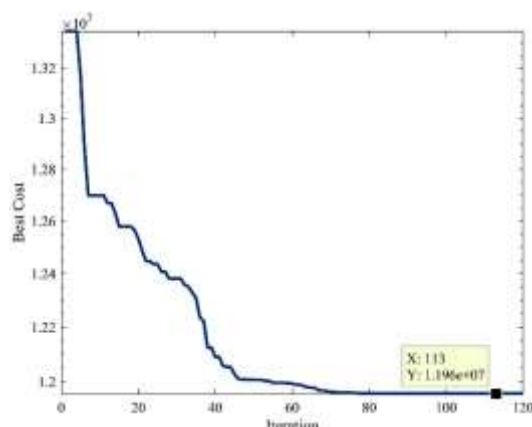
در این حالت الگوریتم ازدحام ذرات همگرایی خوبی دارد و در هر بار ران گیری به یک جواب می‌رسد. روند رسیدن به

همانطور که مشاهده شد، طراحی بهینه میدل مدنظر در این پژوهش به واسطه دو الگوریتم فرا ابتکاری ژنتیک و ازدحام ذرات صورت گرفت که در دو حالت آرایش مربعی و مثلثی لوله‌ها در میدل، پارامترهای هندسی بهینه میدل بدست آمد، با مقایسه این نتایج بدست آمده از دو الگوریتم می‌توان یک مدل بهینه از میدل ارایه کرد. جدول ۱۱ مدلسازی به ازای حالت‌های مختلف و الگوریتم‌های مختلف را نشان می‌دهد.

با توجه به نتایج حاصله از دو الگوریتم برای میدل مد نظر، بهینه‌ترین حالت آرایش لوله‌ها در میدل، آرایش به صورت مربعی می‌باشد. در این حالت تابع هدف که حاصل جذر مربعات طول میدل و هزینه مواد بکار رفته در آن است، به میزان ۱۶/۵۲٪ از مقدار تابع هدف محاسبه شده برای حالت مثلثی توسط همان الگوریتم ژنتیک کمتر بوده و همینطور به ترتیب ۹۴/۳۲٪، ۹۹/۰۸٪ از مقدار تابع هدف محاسبه شده در حالت مربعی و مثلثی توسط الگوریتم ازدحام ذرات نیز کمتر بدست آمده است که در این حالت متغیرهای طراحی شامل، قطر خارجی لوله، فاصله بافل‌ها و قطر داخلی پوسته به ترتیب برابر با ۰/۱۴۹۹، ۰/۴۹۹۹ و ۰/۲۴۱۱۱ متر است که طول میدل محاسبه شده نیز، از جدول ۳ برابر با ۱/۴۲۹۴۸ متر است.

نکته‌ای که قابل توجه است، اختلاف زیاد مقدار تابع هدف محاسبه شده توسط دو الگوریتم است که بالا بودن قدرت حل الگوریتم ژنتیک و یافتن جواب بهینه تری از این الگوریتم نسبت به الگوریتم PSO را می‌توان نتیجه گرفت، خصوصاً در مسائلی که پیچیده هستند و تابع هدفی گسسته دارند [۱۹-۲۰].

همانطور که در بخش ۱ گفته شد، این میدل به طول ۸ فوت معادل ۲/۴۳۸۴ متر به قطر پوسته ۲۰ سانتی متر در خطوط لوله و مخابرات نفت ایران در حال بهره برداری است که منجر به کاهش دمای روغن موتور به میزان حداکثر ۱۰ درجه می‌شود. میدل طراحی شده در این پژوهش، دارای طول ۱/۴۲۹۴۸ متر و قطر پوسته ۲۴/۱۱۱ سانتی متر دمای روغن موتور را به میزان ۲۵ درجه سلسیوس کاهش می‌دهد. که باعث افزایش عمر کاری موتور و کاهش هزینه‌های تعمیرات و نگه داری آن می‌شود.



شکل ۷- مقدار تابع هدف در الگوریتم ازدحام ذرات در هر تکرار

مقایسه نتایج حاصله از دو الگوریتم به ازای آرایش‌های مختلف لوله‌ها به شرح جدول زیر است.

جدول ۱۱- مقایسه نتایج دو الگوریتم در دو حالت مختلف

آرایش	تابع هدف	d_o	B	D_s
مربعی	۱۰۹۹۹۳/۱۷۶	۰/۱۴۹	۰/۴۹۹۹	۰/۲۴۱۱
مثلثی	۱۳۱۷۷۱/۵۱۶	۰/۱۴۹	۰/۵۰۰۰	۰/۲۹۰۲
مربعی	۱۹۳۹۰۹۷۹/۱	۰/۱۵۰	۰/۳۷۶۳	۰/۳۰۰۰
مثلثی	۱۱۹۵۵۹۶۹/۳	۰/۱۵۰	۰/۴۸۱۶	۰/۳۰۰۰

۵- نتیجه گیری

در این پژوهش مدلسازی حرارتی میدل پوسته لوله بر اساس روش انتقال حرارت $\epsilon-NTU$ ، استاندارد انجمن تولیدکنندگان میدل‌های لوله‌ای آمریکا TEMA صورت گرفت که در ادامه با در نظر گرفتن تابع‌های هزینه و طول میدل و نگاهی به افت فشار در میدل به کمینه کردن این مقادیر توسط دو الگوریتم فرا ابتکاری ژنتیک و ازدحام ذرات پرداخته شد. بعلاوه در کمینه سازی توسط دو الگوریتم دو حالت آرایش لوله‌ها در میدل بررسی شد هم آرایش مربعی و هم مثلثی که در پایان نتایج بدست آمده از دو الگوریتم به ازای حالت‌های مختلف، مورد مقایسه قرار گرفت.

- using biogeography-based (BBO) algorithm. *Appl Therm Eng* 51(1-2): 1263-1272.
- [11] Fettaka S, Thibault J, Gupta Y (2013) Design of shell-and-tube heat exchangers using multiobjective optimization. *Int J Heat Mass Transf* 60: 343-354.
- [12] Walraven D, Laenen B, William D (2014) Optimum configuration of shell-and-tube heat exchangers for the use in low-temperature organic Rankine cycles. *Energy Convers Manag* 83: 177-187.
- [13] Amini M, Bazargan M (2013) Two Objective Optimization in Shell-and-Tube Heat Exchangers Using Genetic Algorithm. *Appl Therm Eng* 69: 278-285.
- [14] Ghanei A, Assareh E, Biglari M, Ghanbarzadeh A, Noghrehabadi AR (2014) Thermal-economic multi-objective optimization of shell and tube heat exchanger using particle swarm optimization (PSO). *Appl Therm Eng* 50(10): 1375-1384.
- [15] Thulukkanam K (2013) heat exchanger design handbook. 2nd edn.
- [16] Erkaya S, Uzmay I (2007) A neural-genetic (NN-GA) approach for optimizing mechanisms having joints with clearance. *Multibody Syst Dyn*. DOI: 10.1007/s11044-008-9106-6.
- [17] Singiresu S Rao (2013) Engineering optimization theory and practice. 4th edn. John Wiley & Sons.
- [18] Parsopoulos KE, Vrahatis MN (2015) Particle swarm optimization and intelligence: Advances and applications. *Information science reference*, ISBN 978-1-61520-666-7 (hardcover) -- ISBN 978-1-61520-667-4 (ebook) 1.
- [19] Tharakeshwar TK, Seetharamu KN, Durga Prasad B (2016) Multi-objective optimization using bat algorithm for shell and tube heat exchangers. *Appl Therm Eng* 110: 1029-1038.
- [20] Yang J, Fan A, Liu W, Jacobi AM (2014) Optimization of shell-and-tube heat exchangers conforming to TEMA standards with designs motivated by constructal theory. *Energy Convers Manag* 468-476.
- ۶- مراجع
- [1] Mohanty DK (2016) Gravitational search algorithm for economic optimization design of a shell and tube heat exchanger. *Appl Therm Eng* 107: 184-193.
- [2] de Vasconcelos Segundo EH, Amoroso AL, Mariani VC, dos S Coelho L (2017) Economic optimization design for shell-and-tube heat exchangers by a Tsallis differential evolution. *Appl Therm Eng* 111: 143-151.
- [3] Pant M, Deep K, Nagar A, Bansal JC (2014) Proceedings of the third international conference on soft computing for problem solving: Socpros 2013, volume 2. *Adv Intell Syst Comput* 259.
- [4] Kundu B (2015) Beneficial design of unbaffled shell-and-tube heat exchangers for attachment of longitudinal fins with trapezoidal profile. *Case Stud Therm Eng* 5: 104-112.
- [5] Wen J, Yang H, Jian G, Tong X, Li K, Wang S (2016) Energy and cost optimization of shell and tube heat exchanger with helical baffles using Kriging metamodel based on MOGA. *Int J Heat Mass Transf* 98: 29-39.
- [6] Wang K, Tu XC, Bae CH, Kim HB (2015) Optimal design of porous baffle to improve the flow distribution in the tube-side inlet of a shell and tube heat exchanger. *Int J Heat Mass Transf* 80: 865-872.
- [7] Sadighi Dizaji H, Jafarmadar S, Asaadi S (2017) Experimental exergy analysis for shell and tube heat exchanger made of corrugated shell and corrugated tube. *Exp Therm Fluid Sci* 81: 475-481.
- [8] Vahdat Azad A, Vahdat Azad N (2016) Application of nanofluids for the optimal design of shell and tube heat exchangers using genetic algorithm. *Case Stud Therm Eng* 8: 198-206.
- [9] Mohanty DK (2016) Application of firefly algorithm for design optimization of a shell and tube heat exchanger from economic point of view. *Int J Therm Sci* 102: 228-238.
- [10] Hadidi A, Nazari A (2013) Design and economic optimization of shell-and-tube heat exchangers