



بهینه‌سازی مبدل حرارتی پوسته-لوله با بافل منفذدار کوآترفویل با استفاده از الگوریتم‌های فراابتکاری

سید ایمان هاشمی مرغملکی^۱، هادی اسکندری^{۲*}

۱. کارشناس ارشد، شرکت نفت و گاز اروندان، خرمشهر، ایران.

۲. عضو هیئت علمی دانشگاه صنعت نفت، آبادان، ایران.

*نویسنده مسئول: hadi.nioc@gmail.com

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۱۰/۰۲ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۱۲/۲۲

چکیده

در این پژوهش، مشخصه‌های حرارتی و هیدرولیکی سمت پوسته مبدل حرارتی پوسته-لوله با بافل منفذدار کوآترفویل به وسیله الگوریتم‌های فراابتکاری گرگ خاکستری و ژنتیک به صورت تک هدفه و چند هدفه بهینه‌سازی می‌شود. تابع‌های هدف، ظرفیت انتقال حرارت برای مقدار بیشینه و اتلاف فشار برای مقدار کمینه می‌باشد. متغیرهای مبدل حرارتی پوسته-لوله برای بهینه‌سازی عبارتند از: قطر و تعداد لوله‌ها، عدد رینولدز، فاصله بین بافل‌ها و ارتفاع منفذ کوآترفویل. مقادیر بهینه شده برای آرایش مربع و مثلث دسته لوله‌ها به دست آمده است. نتایج نشان داده است که برای بیشترین انتقال حرارت بافل کوآترفویل مقادیر قطر لوله ۰/۰۳ متر، تعداد لوله‌ها ۳۰ عدد، مقدار عدد رینولدز ۲۰۰۰۰، ارتفاع منفذ ۰/۰۱۸ متر و فاصله بین بافل‌ها ۰/۱۵ متر است. برای کمترین مقدار افت فشار قطر لوله‌ها ۰/۰۳ متر برای آرایش مربع و ۰/۰۱ متر برای آرایش مثلث، عدد رینولدز ۵۰۰۰، ارتفاع منفذ ۰/۰۰۳ متر و فاصله بین بافل‌ها ۰/۲۵ متر است. در بهینه‌سازی چند هدفه قطر لوله‌ها ۰/۰۳ متر و تعداد لوله‌ها ۳۰ عدد حاصل شده است. بهینه‌سازی به وسیله الگوریتم گرگ خاکستری و الگوریتم ژنتیک نتایج یکسانی برای مبدل حرارتی پوسته-لوله با بافل کوآترفویل در بر داشته است.

کلمات کلیدی: بافل منفذدار کوآترفویل، الگوریتم گرگ خاکستری، الگوریتم ژنتیک، بهینه‌سازی تک هدفه، بهینه‌سازی چند هدفه.

مقدمه

مبدل‌های حرارتی پوسته-لوله به دلیل ویژگی‌هایی مانند ساختار ساده، سطح انتقال حرارت زیاد، ساختار قوی و قابلیت اطمینان بالا، اصلی‌ترین مبدلی است که در نیروگاه‌های مرسوم و هسته‌ای استفاده می‌شود. بافل‌های نگهدارنده دسته لوله نه تنها تکیه‌گاه لوله‌های مبدل حرارتی هستند بلکه مجموعه لوله‌ها را در جای خود ثابت و محکم قرار می‌دهند و از ارتعاش آنها جلوگیری می‌کنند. همچنین هدایت گر الگوی جریان در پوسته است و تاثیر به سزایی در ضریب انتقال حرارت دارد. بنابراین طراحی و بهینه‌سازی ساختار بافل‌های نگهدارنده لوله، کلید تحقیق و بهبود فناوری مبدل‌های حرارتی می‌باشد. مطالعه رفتار جریان در حین عبور از بافل‌ها و چگونگی توزیع انتقال حرارت در مراحل مختلف عملکرد سیال سمت پوسته، روش‌هایی را برای ارتقاء کارایی مبدل‌های حرارتی پوسته-لوله نتیجه می‌دهد. این یک نیاز پیش رو می‌باشد تا همگام با پیچیده شدن فرایندهای صنعتی، مبدل‌های حرارتی پوسته-لوله با کارایی فزون تری برای مرتفع نمودن این خواسته اجتناب ناپذیر، طراحی و ساخته شوند. بافل‌های صفحه‌ای منفذدار کوآترفویل مطابق شکل (۱) یک نوع از بافل‌های صفحه‌ای آرفیس مدور هستند که جریان مایع سمت پوسته را به صورت طولی هدایت می‌کنند.

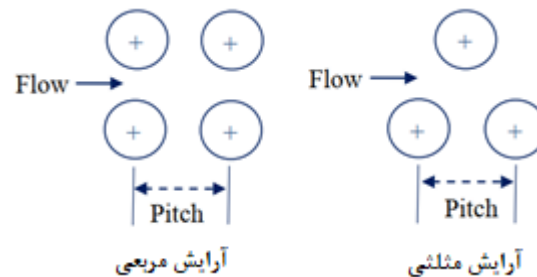
وین هوا گو و همکاران [۱] به بررسی مبدل حرارتی جدید با لوله‌های میکروکانال لایه بندی شده جایگزین حاوی دو جفت هدر عمودی و لوله‌های مسطح میکروکانال چند لایه که انتقال حرارت کارآمد بین آب و مبرد را انجام می‌دهد، پرداختند. آن‌ها، طراحی بهینه‌سازی و توزیع نادرست مبرد دو فازی در این نوع مبدل‌های حرارتی با هدرهای عمودی به صورت تجربی و عددی را مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان می‌دهد که مبرد مایع بیشتری به لوله‌های میانی عرضه می‌گردد اما کمتر به هر دو انتهای تحت تاثیر جداساز فاز و گرانث عرضه می‌شود. بنابراین، صفحه دهانه غیرمرکز و چند محفظه موازی برای بهبود توزیع مبرد



طراحی شده‌اند. میانگین انحراف استاندارد نرخ جریان مبرد با صفحه دهانه غیرمرکز به ترتیب از ۰/۲۱ به ۰/۰۷ و با چند محفظه موازی به ۰/۰۳ کاهش یافت.



شکل ۱: بافل منفذدار کوآتر فویل با آرایش مربع



شکل ۲: آرایش دسته لوله‌ها

سابینایا ماهاپاترا و همکاران [۲] یک مدل مکانیکی برای طراحی بهینه مبدل‌های حرارتی پره صفحه‌ای برای به حداقل رساندن پنج تابع هدف مانند نرخ انتقال حرارت کل، وزن کل، نرخ جریان جرم کل، تعداد واحد تولید آنتروپی و هزینه کل سالانه ارائه دادند. آنها یک رویکرد بهینه‌سازی آشوب‌انگیز مبتنی بر یادگیری اجتماعی برای طراحی مبدل‌های حرارتی پره صفحه‌ای پیشنهاد نمودند. با استفاده از این رویکرد بهینه‌سازی پیشنهادی، مقدار بهینه نرخ انتقال حرارت کل، وزن کل، نرخ جریان جرمی در منطقه گرم، نرخ جریان جرمی در منطقه سرد، تعداد تولید آنتروپی و هزینه کل سالانه به ترتیب ۱۱۰۷/۱ وات، ۲۲/۷ کیلوگرم، ۱/۸۴ کیلوگرم بر ثانیه، ۲/۰۱ کیلوگرم بر ثانیه، ۰/۱۳۲۱ و ۸۲۳ دلار به دست آمده است. وانگ و همکاران [۳] برخی از ساختارهای جدید با هدف بهینه‌سازی عملکرد مبدل‌های حرارتی لوله پره‌دار نوع H، مانند مولدهای گرداب طولی، فرورفتگی‌ها/برآمدگی‌ها و شیرها را به صورت عددی بررسی کردند. همچنین اثرات پارامترهای هندسی بر انتقال حرارت، مقاومت جریان و عملکردهای حرارتی-هیدرولیکی جامع با استفاده از روش تاگوچی بررسی نمودند. با توجه به نتایج، برای مولدهای گرداب طولی، گودی‌ها/برآمدگی‌ها و شیرها، ویژگی‌های انتقال حرارت به‌طور قابل توجهی تحت‌تاثیر نوع بال، فاصله عمودی و قطر شیر قرار گرفت. در حالی که زاویه حمله، عمق گودی و نوع شیر تاثیرات برجسته‌ای بر مشخصه‌های مقاومت جریان داشتند. لی دانگ ژانگ و همکاران [۴] یک مبدل حرارتی پره-صفحه را که عملکرد آن به شدت به طراحی ساختاری آن بستگی دارد، مورد مطالعه قرار دادند. آنها یک روش یادگیری پویا-مخالف بهبود یافته جایا (DOLJaya) را به کار گرفتند. نتایج ۱۸ معیار یک وجهی و چند وجهی و ۹ معیار ترکیبی نشان داد که این الگوریتم پیشنهادی دارای استحکام، کارایی و اثربخشی رقابتی برای حل مسائل پیچیده غیرخطی را دارا است. پینگ هوا ليو و همکاران [۵] مبدل‌های حرارتی سوخت-هوا که در سیستم‌های هوای خنک‌کننده استفاده می‌شوند را بررسی نمودند. در این مطالعه، بهینه‌سازی چند هدفه مبدل حرارتی برای حل تضاد بین نسبت توان به وزن و افت فشار هوا با ترکیب روش‌شناسی سطح پاسخ و الگوریتم ژنتیک چند هدفه انجام گرفته است. در نهایت، ترکیبی بهینه از پارامترهای ساختاری با استفاده از نقاط بهینه پارتو گرفته شده توسط الگوریتم ژنتیک مرتب‌سازی غیرمسلط انتخاب شده است. نتایج نشان می‌دهد که مدل آشفتگی $k-\epsilon$ بهترین پیش‌بینی ویژگی‌های حرارتی و هیدرولیکی مبدل حرارتی را انجام می‌دهد. کی یو ژو و همکاران [۶] مبدل حرارتی K_2 که جزء کلیدی سیستم برودتی در شتاب دهنده ابرسانای پیشرفته است را مورد تحقیق قرار دادند. از روش پارامتر توزیع شده برای طراحی و محاسبه این مبدل حرارتی و با سرعت جریان هلیوم ۱۰ گرم بر ثانیه استفاده نمودند و محدودیت‌های ایده‌آل و محدودیت‌های واقعی با توجه به شرایط آزمایش واقعی تنظیم شدند. الگوریتم ژنتیک مرتب‌سازی غیرمسلط به عنوان بهینه‌سازی انتخاب کردند و دو گروه از مجموعه‌های راه‌حل پارتو به دست آوردند. دو نتیجه بهینه‌سازی از مجموعه راه‌حل‌ها به عنوان طرح‌های بهینه انتخاب شدند، و با توجه به سازگاری مبدل حرارتی در شرایط جریان مختلف، تایید شبیه‌سازی عددی دینامیک سیالات محاسباتی برای طراحی بهینه مبدل حرارتی با توجه به شرایط محدودیت واقعی و آزمایش تجربی برای نمونه اولیه با همان طرح انجام شد.



دیوید زینیسکی و همکاران [۷] در پژوهش خود ابزار جدیدی را برای بهینه‌سازی شکل سریع سطح تبادل حرارت ژنراتور الکتریکی میکرو توربین (چرخه رانکین آلی) ارائه نمودند. بهینه‌سازی هندسه روکش آب یک ژنراتور میکروتوربین ۱۰ کیلو وات با استفاده از یک مدل تغییر یافته و با توجه به مدل‌های ارائه شده در پژوهش، یک مدل انتقال حرارت DO سطح تبادل حرارت پره‌دار ژاکت آب خنک‌کننده انجام گردید. در نتیجه بهینه‌سازی، کاهش ظاهری در اندازه پره و افزایش چگالی پره در سطح دیوار پره‌دار حاصل شد که افزایش قابل توجهی در ضریب انتقال حرارت و کاهش دمای استاتور ژنراتور الکتریکی را به همراه دارد. همچنین دمای سطح پوسته مماس با استاتور ژنراتور الکتریکی بیش از ۶ درجه سانتیگراد کاهش می‌یابد. ژنگ یانگ ژیان و همکاران [۸] ناپایداری جوشش جریان در میکروکانال‌ها را برای بهبود قابلیت اطمینان مبدل‌های حرارتی میکروکانال مورد مطالعه قرار دادند. دو مبدل حرارتی میکروکانالی مستطیلی به صورت تجربی مورد بررسی قرار گرفتند، یک کانال با برش متقاطع و دیگری بدون مقطع. دو مدل ریاضی حاوی همبستگی انتقال حرارت و پارامترهای ناپایداری توسعه داده شد. بر اساس مدل‌ها، ساختار میکروکانال در حال گسترش بهینه‌سازی شد و تاثیر میکروکانال در حال گسترش بر ناپایداری جریان مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. نتایج نشان می‌دهد که در مدل‌های دو مبدل حرارتی با و بدون مقطع، میانگین انحرافات به ترتیب ۱۰/۰۳ و ۵/۹۵ درصد است. نتایج این مطالعه بینش‌هایی را برای مهار ناپایداری جوشش جریان و بهینه‌سازی بیشتر ساختار میکروکانال در حال گسترش برای افزایش قابلیت انتقال حرارت ارائه می‌دهد. وینکاتا راتو و همکاران [۹] در تحقیق خود، چهار مطالعه موردی مختلف را در نظر گرفتند و بهینه‌سازی طراحی این چهار مبدل حرارتی پوسته و لوله برای حداقل هزینه با استفاده از الگوریتم‌های راتو و الگوریتم‌های راتو چند جمعیتی خود-تطبیقی انجام دادند. هزینه شامل هزینه‌های ثابت و عملیاتی است و از توان پمپاژ محاسبه می‌شود. نتایج بهبود قابل توجهی را در به حداقل رساندن هزینه مبدل‌های حرارتی پوسته و لوله نشان داده است. ژانگ و همکاران [۱۰] یک مبدل پوسته-لوله جدید با بافل آرفیس سینکوفویل پیچ‌دار را برای فهم و درک ضعف مبدل حرارتی پوسته و لوله رایج با بافل‌های آرفیس سینکوفویل طراحی کردند. آنها با جریان جرم یکسان مبدل بافل آرفیس سینکوفویل پیچ‌دار را با بافل آرفیس سینکوفویل و بافل مقطعی مقایسه کردند. ضریب انتقال حرارت بافل آرفیس سینکوفویل پیچ‌دار در حدود ۹/۲٪ بیشتر بود. جینا و همکاران [۱۱] به طور واضح تاثیر حداقل‌سازی یک هدف را بر هدف دیگر تشریح نمودند. برای دستیابی به این هدف یک حل‌کننده چند هدفه را که از الگوریتم ژنتیک استفاده می‌نمود، با استفاده از جعبه ابزار بهینه‌سازی نرم افزار متلب پیاده‌سازی نمودند. با الگوریتم چند هدفه مقادیر بهینه متغیرهای طراحی مانند قطر خارجی لوله، قطر خارجی پوسته و فاصله بافل‌ها را برای دو نوع آرایش لوله شکل (۲) با تعداد عبور دو یا چهار لوله جستجو نمودند و نتیجه گرفتند که به طور کلی برای مقادیر کم هزینه سالانه، باید فاصله بافل تقریباً ۰/۵ متر باشد. اما برای طول‌های کوچکتر فضای بافل و قطر پوسته داخلی به ترتیب نزدیک به ۰/۵ و ۰/۵ بود. بالاترین مقادیر تابع هزینه و طول برای طرح لوله مربع و عبور ۴ لوله در بین چهار مورد نتیجه شد.

معرفی الگوریتم‌های فرا ابتکاری گرگ خاکستری و ژنتیک

الگوریتم گرگ خاکستری

این الگوریتم از رفتار گرگ‌های خاکستری در شکار و نحوه رهبری اجتماعی آنها در طبیعت الهام گرفته شده است و همانند دیگر الگوریتم‌های فرا ابتکاری، ابتدا با یک جمعیت تصادفی از گرگ‌ها (راه‌حل‌های کاندیدا) آغاز می‌شود. در این الگوریتم، طبقات اجتماعی گرگ‌ها شکل (۲)، به ۴ گروه آلفا (α)، بتا (β)، دلتا (δ) و امگا (ω) تقسیم می‌شوند. در تکرارهای مختلف الگوریتم، سه راه حل برتر هر دور به ترتیب گروه آلفا، بتا و دلتا نامیده می‌شوند. در این الگوریتم فرایند شکار (بهترین راه حل) توسط این سه گرگ برتر هدایت می‌شود. گرگ‌های امگا برای رسیدن به بهترین راه حل‌ها به دور این سه گرگ حلقه می‌زنند و تغییر موقعیت گرگ‌ها بر اساس روابط زیر می‌باشد:

$$\vec{D} = |\vec{C}, \overline{X_P} - \overline{X(T)}| \quad (1)$$



شکل ۳: سلسله مراتب گرگ‌های خاکستری در دسته

$$\overline{X(t+1)} = \overline{X_p} - \vec{A} \cdot \vec{D} \quad (2)$$

که $\overline{X_p}$ بردار مکانی طعمه (شکار)، $\overline{X(t)}$ موقعیت فعلی و $\overline{X(t+1)}$ موقعیت بعدی را نشان می‌دهد. در روابط فوق دو بردار \vec{D} و \vec{A} از روابط زیر محاسبه می‌شود:

$$\vec{C} = 2 * \vec{r}_2 \quad (3)$$

$$\vec{A} = 2 * \vec{a} * \vec{r}_1 - \vec{a} \quad (4)$$

که در آن \vec{a} یک بردار کاهش‌ی است و در طول اجرای الگوریتم به صورت خطی از دو به صفر می‌رسد. بردار \vec{r}_1 و \vec{r}_2 بردار اعداد تصادفی در بازه‌ی [۰،۱] می‌باشند. به منظور شبیه‌سازی ریاضیاتی رفتار گرگ‌های خاکستری در کار، همواره موقعیت سه راه حل برتر (آلفا، بتا و دلتا) تا آخرین لحظه ذخیره شده و دیگر گرگ‌ها (ω) موظف هستند موقعیت خود را با توجه به موقعیت سه گرگ برتر بروز رسانی کنند. مدل ریاضیاتی بروز رسانی موقعیت گرگ‌های ω به صورت زیر است:

$$\begin{aligned} \vec{D}_\alpha &= |\vec{C}_1 * \vec{X}_\alpha - \vec{X}| \\ \vec{D}_\beta &= |\vec{C}_2 * \vec{X}_\beta - \vec{X}| \\ \vec{D}_\delta &= |\vec{C}_3 * \vec{X}_\delta - \vec{X}| \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \vec{X}_1 &= |\vec{X}_\alpha - \vec{A} * \vec{D}_\alpha| \\ \vec{X}_2 &= |\vec{X}_\beta - \vec{A} * \vec{D}_\beta| \\ \vec{X}_3 &= |\vec{X}_\delta - \vec{A} * \vec{D}_\delta| \end{aligned} \quad (6)$$

$$\overline{X(t+1)} = \frac{\vec{X}_1 + \vec{X}_2 + \vec{X}_3}{3} \quad (7)$$

که در آن X_α ، X_β و X_δ به ترتیب موقعیت گرگ‌های آلفا، بتا و دلتا و X_1 ، X_2 و X_3 ، موقعیت هر گرگ بر اساس این سه گرگ است. بردارهای C_1 ، C_2 ، C_3 و A_1 ، A_2 و A_3 همگی بردارهای تصادفی هستند و مانند معادله (۳) و (۴) محاسبه می‌شوند. از این الگوریتم برای بهینه‌سازی چند هدفه نیز استفاده می‌شود که به نام الگوریتم بهینه‌سازی چند هدفه گرگ خاکستری (MOGWO) می‌باشد.

الگوریتم ژنتیک

الگوریتم ژنتیک یک روش جستجو است که روند انتخاب طبیعی را تقلید می‌کند. این روش جستجوی ابتکاری به طور معمول برای تولید راه حل‌های مفید برای بهینه‌سازی جستجوی مسائل استفاده می‌شود. الگوریتم‌های ژنتیک به گروه بزرگتر الگوریتم‌های تکاملی^۱ تعلق دارند که با بهره جستن از تکنیک‌های الهام گرفته از تکامل طبیعی، راه حل‌هایی برای مشکلات بهینه‌سازی مانند وراثت، جهش، انتخاب تولید می‌کنند. الگوریتم با مجموعه‌ای از راه حل‌ها شروع می‌شود که جمعیت نامیده می‌شود. راه حل‌هایی از یک جمعیت گرفته شده و برای تشکیل جمعیت جدید استفاده می‌شود. راه حل‌هایی که برای تشکیل راه حل‌های جدید (فرزندان) انتخاب می‌شوند، با توجه به تناسب آنها انتخاب می‌شوند، هر چه مناسب‌تر باشند، شانس بیشتری برای تولید مثل

¹ Evaluation Algorithm



دارند. این کار تکرار می‌شود تا زمانی که برخی شرایط (تعداد جمعیت یا بهبود بهترین راه‌حل) برآورده شود. تعمیم عملکرد ارائه شده در الگوریتم ژنتیک برای به حداقل رساندن یک مسئله است بنابراین، یک تابع دیگر $g(x)$ باید ارائه شود به طوری که $g(x) = -f(x)$ برای تابع هدف تا حداکثر سازی مسئله ایجاد شود. قیدها در مسئله انتخاب راه حل دقیقی مورد نیاز است تا یک بهینه‌سازی چند هدفه با الگوریتم ژنتیک انجام خواهد گرفت. از طرح ترکیبی برای یافتن یک (Pareto front) بهینه برای مسئله چند هدفه استفاده می‌شود.

بهینه‌سازی مبدل حرارتی پوسته-لوله با صفحه منفذدار کوآترفویل

معادلات حاکم بر طراحی را می‌توان به شکل زیر ارائه نمود:

$$Nu = 0.01676Re^{0.92639} \left(\frac{\delta}{d_e}\right)^{-0.3272} \left(\frac{B}{d_e}\right)^{-0.26012} Pr^{1/3} \left(\frac{\mu}{\mu_w}\right)^{0.14} \quad (8)$$

$$\frac{\Delta P}{\rho u^2} = 69.81438Re^{-0.01614} \left(\frac{\delta}{d_e}\right)^{-0.58967} \left(\frac{B}{d_e}\right)^{-0.30333} \quad (9)$$

در این معادلات، عدد ناسلت (Nu) و افت فشار (ΔP) بر حسب عدد رینولدز (Re)، ارتفاع منفذ (δ) و فاصله بین صفحه‌های بافل (B) بیان می‌شود. برای تابع‌های هدف انتقال حرارت و اتلاف فشار قیدهای زیر در نظر گرفته می‌شود:

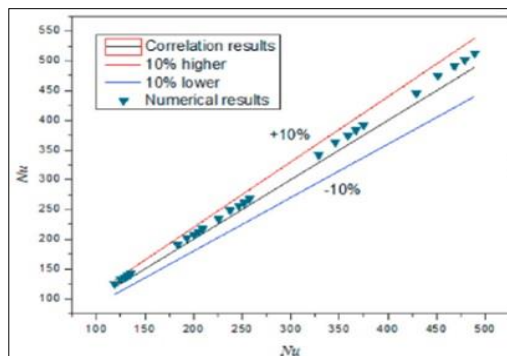
$$max Q(X) \rightarrow \begin{cases} 5000 \leq Re \leq 20000 \\ 10 \leq N_T \leq 30 \\ 0.01 \leq d_o \leq 0.03 \\ 0.0018 \leq \delta \leq 0.0033 \\ 0.15 \leq B \leq 0.25 \end{cases} \quad (10)$$

$$min \Delta P(X) \rightarrow \begin{cases} 5000 \leq Re \leq 20000 \\ 0.01 \leq d_o \leq 0.03 \\ 0.0025 \leq \delta \leq 0.0033 \\ 0.15 \leq B \leq 0.25 \end{cases} \quad (11)$$

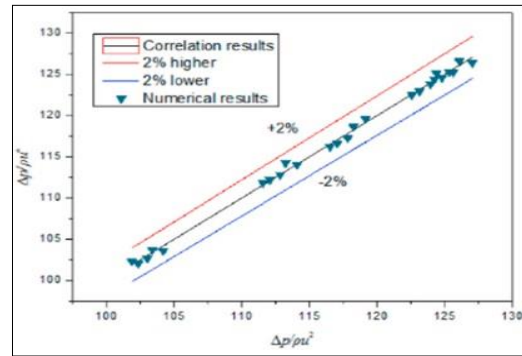
در قیدهای قرارداده شده، (N_T) تعداد و (d_o) قطر لوله‌ها می‌باشد.

اعتبار سنجی

نتایج حاصل از روش‌های عددی در کار حاضر با خروجی معادلات ارائه شده توسط وانگ و همکاران [۱۲] برای بافل‌های کوآترفویل برای مقادیر مختلف افت فشار و عدد ناسلت در شکل (۴) نشان داده شده است.



(الف)



(ب)

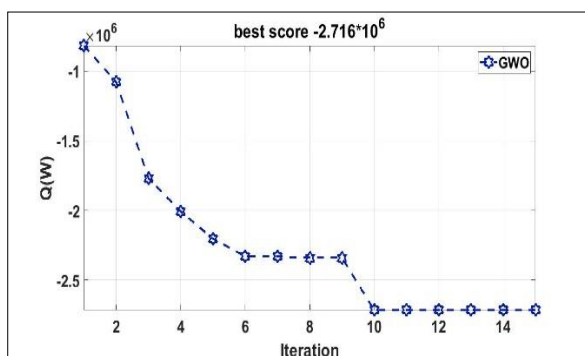
شکل ۴: نمودار مقایسه‌ای نتیجه‌ی عددی و معادلات بافل کوآترفویل برای (الف) عدد ناسلت و (ب) افت فشار



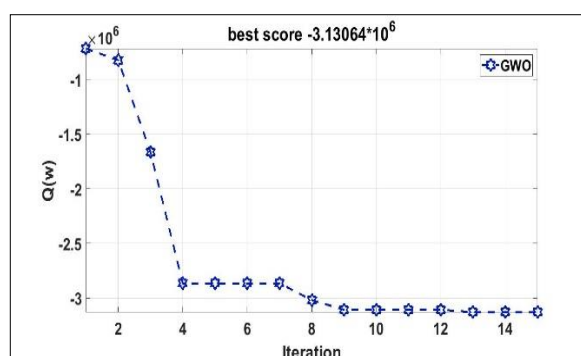
روابط معیار (۸) و (۹) مربوط به صفحه منفذدار کواترفویل برای عدد رینولدز ۵۰۰۰ تا ۲۰۰۰۰، عدد پرانتل ۰/۵ تا ۱/۶۰، ارتفاع منفذ ۰/۰۰۲۵ تا ۰/۰۰۳۵ متر و فاصله بافل ۰/۱۱ تا ۰/۱۵ متر معتبر است.

نتایج بهینه‌سازی مبدل حرارتی پوسته-لوله با الگوریتم گرگ خاکستری بهینه‌سازی تک‌هدفه

شکل (۵) بیشترین مقدار انتقال حرارت در آرایش مربع و مثلث بافل کواترفویل که به وسیله الگوریتم گرگ خاکستری حاصل شده است را نشان می‌دهد، که برای آرایش مربع ۲/۷۱۶ مگاوات و برای آرایش مثلث ۳/۱۳۶۸۹ مگاوات حاصل شده است. پارامترهای مبدل حرارتی برای این بهینه‌سازی عبارتند از: قطر لوله‌ها ۰/۰۳ متر، تعداد لوله‌ها ۳۰ عدد، مقدار عدد رینولدز ۲۰۰۰۰، ارتفاع منفذ کواترفویل ۰/۰۰۱۸ متر و فاصله بین بافل‌ها ۰/۱۵ متر، برای آرایش مربع و مثلث دسته لوله‌ها است.



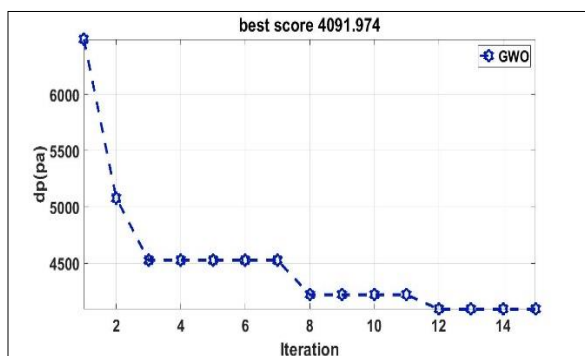
(الف)



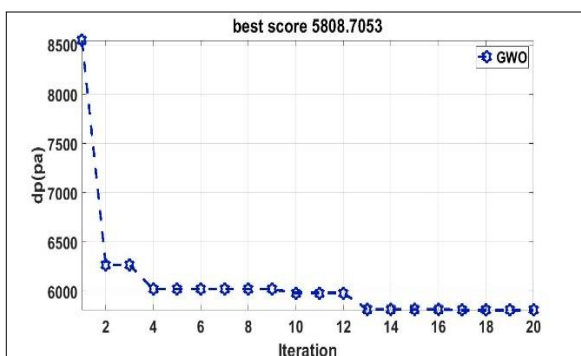
(ب)

شکل ۵: بهترین طرح تناسب در بهینه‌سازی تک‌هدفه برای بیشترین مقدار انتقال حرارت به وسیله الگوریتم گرگ خاکستری
(الف) آرایش مربع (ب) آرایش مثلث

شکل (۶) کمترین مقدار افت فشار در آرایش مربع و مثلث بافل کواترفویل حاصل از الگوریتم گرگ خاکستری را نشان می‌دهد، که برای آرایش مربع ۴۰۹۱/۹۷۴ پاسکال و برای آرایش مثلث ۵۸۰۸/۷۰۵۳ پاسکال بدست آمده است. پارامترهای مبدل حرارتی برای این کمینه افت فشار عبارتند از: عدد رینولدز ۵۰۰۰، ارتفاع منفذ کواترفویل ۰/۰۰۳ متر و فاصله بین بافل‌ها ۰/۲۵ متر، برای آرایش مربع و مثلث دسته لوله‌ها است. همچنین قطر لوله‌ها ۰/۰۳ متر برای آرایش مربع و ۰/۰۱ متر برای آرایش مثلث می‌باشد.



(الف)



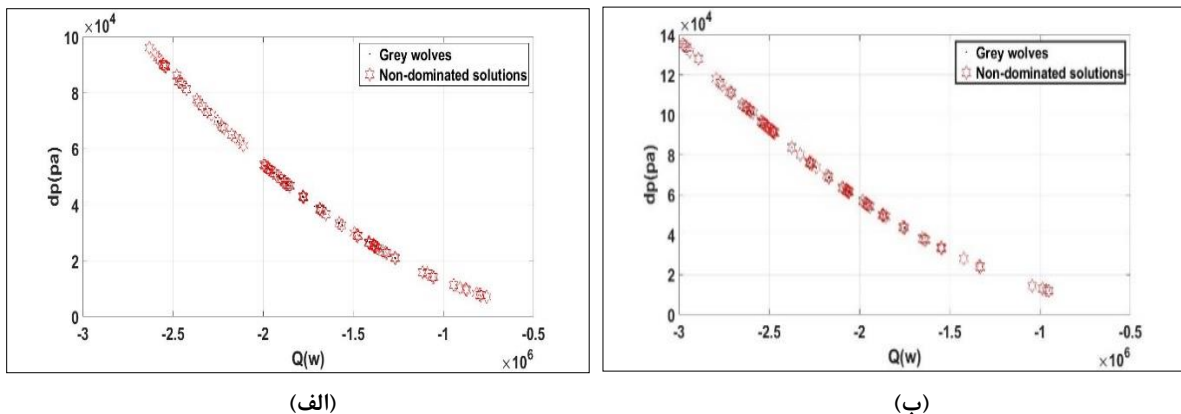
(ب)

شکل ۶: بهترین طرح تناسب در بهینه‌سازی تک‌هدفه برای کمترین مقدار افت فشار به وسیله الگوریتم گرگ خاکستری
(الف) آرایش مربع (ب) آرایش مثلث



بهینه‌سازی چند هدفه

شکل (۷) نمودارهای پارتو حاصل از الگوریتم چند هدفه گرگ خاکستری برای آرایش مربع و مثلث دسته لوله‌ها را نمایش می‌دهد. این نمودارها ظرفیت انتقال حرارت در برابر افت فشار و مقدار پارامترهای متناظر با آن‌ها را ارائه می‌کند. مقدار بهینه این پارامترها برای آرایش مربع عبارتند از: قطر لوله ۰/۰۳ متر، تعداد لوله‌ها ۳۰ عدد، ارتفاع منفذ ۰/۰۲۱ متر و مقدار عدد رینولدز و فاصله بافل‌ها برای به دست آوردن ظرفیت انتقال حرارت در مقابل افت فشارهای مختلف، متغیر می‌باشد. این مقادیر برای آرایش مثلث دسته لوله‌ها عبارتند از: قطر لوله ۰/۰۳ متر، تعداد لوله‌ها ۳۰ عدد، ارتفاع منفذ از ۰/۰۱۹ تا ۰/۰۱۹۷ متر و فاصله بین بافل‌ها ۰/۱۵۲ تا ۰/۱۵۵ متر، متغیر است. با تغییر عدد رینولدز مقدارهای متفاوتی از ظرفیت انتقال حرارت و افت فشار حاصل شده است.

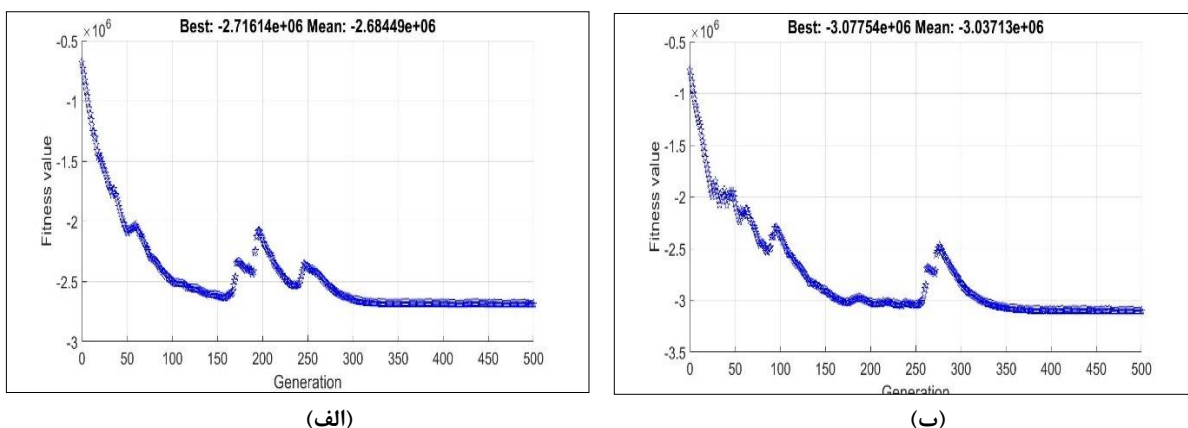


شکل ۷: نمودار پارتو با رویکرد ترکیبی برای منفذ کوآتر فویل به وسیله الگوریتم گرگ خاکستری (الف) آرایش مربع (ب) آرایش مثلث

نتایج بهینه‌سازی مبدل حرارتی پوسته-لوله با الگوریتم ژنتیک

بهینه‌سازی تک هدفه

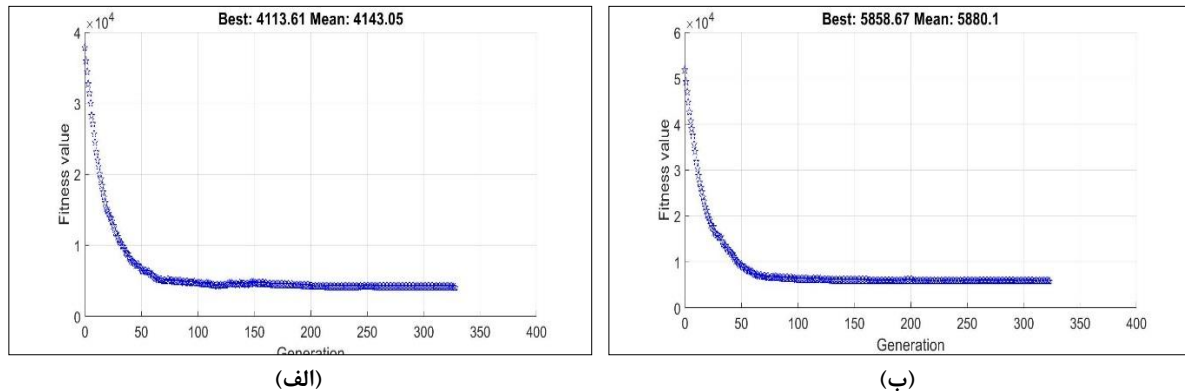
شکل (۸) بیشترین مقدار انتقال حرارت در آرایش مربع بافل کوآتر فویل که به وسیله الگوریتم ژنتیک حاصل شده است را با ۲/۷۱۶۵ مگاوات و برای آرایش مثلث ۳/۰۷۷۵۴ مگاوات نمایش می‌دهد. پارامترهای مبدل حرارتی برای این بیشینه انتقال حرارت در آرایش مربع و مثلث دسته لوله‌ها مشابه حالت الگوریتم گرگ خاکستری می‌باشند.



شکل ۸: بهترین طرح تناسب در بهینه‌سازی تک هدفه برای بیشترین مقدار انتقال حرارت به وسیله الگوریتم ژنتیک (الف) آرایش مربع (ب) آرایش مثلث



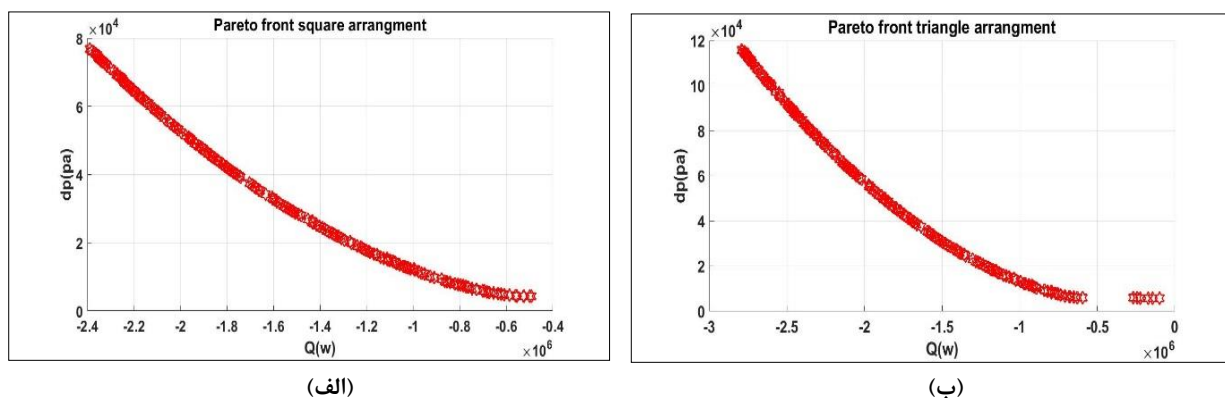
شکل (۹) کمترین مقدار افت فشار در آرایش‌های مربع و مثلث بافل کوتاه‌فویل که به‌وسیله الگوریتم ژنتیک حاصل شده است را برابر $4113/61$ پاسکال و برای آرایش مثلث $5858/67$ پاسکال نشان می‌دهد. پارامترهای مبدل حرارتی برای این کمینه انتقال حرارت همانند الگوریتم گرگ خاکستری نتیجه می‌دهند.



شکل ۹: بهترین طرح تناسب در بهینه‌سازی تک هدفه برای کمترین مقدار افت فشار به‌وسیله الگوریتم ژنتیک (الف) آرایش مربع (ب) آرایش مثلث

بهینه‌سازی چند هدفه

شکل (۱۰) نمودارهای پارتو حاصل از الگوریتم ژنتیک چند هدفه برای آرایش مربع و مثلث دسته لوله‌ها را نمایش می‌دهد. در این نمودارها ظرفیت انتقال حرارت در برابر افت فشار و مقدار پارامترهای متناظر با آن‌ها را ارائه می‌کند. مقدار بهینه این پارامترها برای آرایش مربع عبارتند از: قطر لوله $0/03$ متر، تعداد لوله‌ها ۳۰ عدد، ارتفاع منفذ از $0/0018$ تا $0/003$ متر متغیر است، و مقدار عدد رینولدز و فاصله بافل‌ها برای به دست آوردن ظرفیت انتقال حرارت در مقابل افت فشارهای مختلف، متغیر می‌باشد. این مقدارها برای آرایش مثلث دسته لوله‌ها عبارتند از: قطر لوله $0/03$ متر، تعداد لوله‌ها ۳۰ عدد، ارتفاع منفذ از $0/0018$ تا $0/003$ متر و فاصله بین بافل‌ها $0/15$ تا $0/25$ متر متغیر است. با تغییر عدد رینولدز مقادیر متفاوتی از ظرفیت انتقال حرارت و افت فشار حاصل شده است.



شکل ۱۰: نمودار پارتو با رویکرد ترکیبی برای منفذ کوتاه فویل به‌وسیله الگوریتم ژنتیک (الف) آرایش مربع (ب) آرایش مثلث

نتیجه‌گیری

نتایج به دست آمده از بهینه‌سازی تک‌هدفه نشان می‌دهد که برای بیشترین انتقال حرارت مبدل حرارتی پوسته-لوله با صفحه منفذدار کوتاه‌فویل، پارامترهای قطر لوله $0/03$ متر، تعداد لوله‌ها ۳۰ عدد، ارتفاع منفذ $0/0018$ متر و فاصله بین بافل‌ها $0/15$



متر، برای آرایش مربع و مثلث دسته لوله‌ها از هر دو الگوریتم ژنتیک و گرگ خاکستری حاصل شده است. مقدار بیشینه انتقال حرارت $2/716$ مگاوات و $3/13689$ مگاوات به ترتیب برای چیدمان مربع و مثلث از الگوریتم گرگ خاکستری است و برای الگوریتم ژنتیک این مقادیر به ترتیب $2/7165$ مگاوات و $3/07754$ مگاوات حاصل شده است. برای به حداقل رساندن مقدار اتلاف فشار مبدل حرارتی پوسته-لوله کوآترفویل، مقدار پارامترهای قطر لوله $0/03$ متر، عدد رینولدز 5000 ، ارتفاع منفذ $0/03$ متر و فاصله بین بافل‌ها $0/25$ متر برای آرایش مربع است و برای آرایش مثلث، قطر لوله‌ها $0/01$ متر است. کمترین مقدار افت فشار حاصل از الگوریتم گرگ خاکستری $4091/974$ پاسکال برای آرایش مربع است و برای آرایش مثلث $5808/7053$ پاسکال است. این مقادیر برای الگوریتم ژنتیک به ترتیب عبارتند از: $4113/61$ پاسکال و $5858/67$ پاسکال در بهینه‌سازی چند هدفه حاصل از الگوریتم گرگ خاکستری و الگوریتم ژنتیک، مقدار قطر لوله‌ها $0/03$ متر و تعداد لوله‌ها 30 عدد می‌باشد و با تغییر مقادیر عدد رینولدز، ارتفاع منفذ و فاصله بین بافل‌ها حالت‌های گوناگون ظرفیت انتقال حرارت در مقابل افت فشار متناظر را نتیجه داده است. آرایش مثلث دسته لوله‌ها نسبت به آرایش مربع دسته لوله‌ها مقدار حرارت بیشتر را همراه با افت فشار بالاتری انتقال می‌دهد.

مراجع

- [1] Guo, W., Zhao, R., Hu, K., Huang, D., Zhao, Y., (2023), Two-phase refrigerant maldistribution and optimization design in novel alternatively-laminated-microchannel-tube (ALMT) heat exchangers with vertical headers. *International Journal of Refrigeration*.
- [2] Mohapatra, S., Das, D. K. Singh, A. K. (2023), Mechanical design of plate-fin heat exchangers for industry using social learning chaotic based Kho-Kho optimization. *Annals of Nuclear Energy* 181: p 109517.
- [3] Zhang, T., Chen, L., Wang, J., (2023), Multi-objective optimization of elliptical tube fin heat exchanger based on neural networks and genetic algorithm. *Energy*: p 126729.
- [4] Feng, Y., Xu, R., Cao, Y., Wu, X., Liang, C., Zhang, L., (2023), Optimization of H-type finned tube heat exchangers with combinations of longitudinal vortex generator, dimples/protrusions and grooves by Taguchi method. *International Communications in Heat and Mass Transfer* 143: p 106709.
- [5] Liu, P., Han, H., and Bao, Z., (2022), Multi-objective optimization of fuel-air tube-in-tube helical coil heat exchangers for cooled cooling air system applied in aeroengines. *Aerospace Science and Technology* 130: p 107933.
- [6] Zhu, K., Chang, Z., Li M., Sun, L., Li, S., Xu, H., Xu, M., Sang M., Ye, R., Han, R., (2023), Design, optimization and experimental testing of 2 K cryogenic plate-fin heat exchanger. *Applied Thermal Engineering* 223: p 119973.
- [7] Zaniowski, D., Klimaszewski, P., Klonowicz, P., Witanowski, Ł., Lampart, P., Jędrzejewski, Ł., Suchocki, T., (2023), Organic Rankine Cycle turbogenerator cooling-optimization of the generator water jacket heat exchange surface. *Applied Thermal Engineering*: p 120041.
- [8] Zhengyong, J., Mengjie, S., Chaobin, D., Yuyan, J., Pun, W. M., Hang, C. C. Y., (2023), Two mathematical models of flow boiling and flow instability in rectangular expanding microchannel heat exchangers and structure optimization. *Applied Thermal Engineering*: p 120483.
- [9] Rao, R. V., and Majethia, M., (2022), Design optimization of shell-and-tube heat exchanger using Rao algorithms and their variants. *Thermal Science and Engineering Progress* 36: p 101520.
- [10] Zhang, X., Han, D., He, W., Yue, C. Pu, W., (2017), Numerical simulation on a novel shell-and-tube heat exchanger with screw cinquefoil orifice baffles. *Advances in Mechanical Engineering* 9(8): 1687814017717665.
- [11] Jena, S., Patro, P., Behera, S. S. (2013), Multi-objective optimization of design parameters of a shell & tube type heat exchanger using genetic algorithm. *International Journal of Current Engineering and Technology* 3(4): pp 1379-1386.
- [12] Wang, D., Wang, H., Xing, J., Wang, Y., (2021), Investigation of the thermal-hydraulic characteristics in the shell side of heat exchanger with quatrefoil perforated plate. *International Journal of Thermal Sciences* 159: 106580.