



Multi-objective Optimization of Multi-tube Heat Exchanger Network Considering the Effect of Different Nanoparticles

ARTICLE INFO

Article Type

Original Research

Authors

Hajabdollahi H.^{*1} PhD,
Masoumpour B.¹ MSc,

How to cite this article

Hajabdollahi H, Masoumpour B. Multi-objective Optimization of Multi-tube Heat Exchanger Network Considering the Effect of Different Nanoparticles. Modares Mechanical Engineering, 2019;19(6):1507-1518.

ABSTRACT

The present study investigated modeling and optimization of a multi-tube heat exchanger (MTHE) network considering the effect of different nanoparticles on the tube side. After thermal modeling in ε -NTU method, optimization was performed from the perspective of increasing effectiveness and decreasing total annual cost as 2 objective functions, using 8 design parameters, including number of MTHE and particles volumetric concentration. In addition, optimization was performed at 3 various cold mass flow rates and different nanoparticles including Al_2O_3 , CuO and ZrO_2 and result were compared with the base fluid (water). The results show that the Pareto front was improved in nanoparticles case, and the rate of improvement in CuO nanoparticles case, especially in higher effectiveness and lower nanofluid mass flow rates is more significant compared with the other studied cases. In addition, because of the improved thermal performance of MTHE network in the nanoparticles case, the heat transfer surface area and consequently the volume of MTHE network for fixed values of effectiveness are significantly reduced. Finally, after display of the results of the design parameters versus effectiveness, sensitive analysis of particle volumetric concentration on the objective functions was performed for typical point and the results were discussed.

Keywords Thermo; Conomic Optimization; Multi-Tube Heat Exchanger Network; Different Nanoparticles; Genetic Algorithm

¹Mechanical Engineering Department, Vali-e-Asr University, Rafsanjan, Iran

*Correspondence

Address: Mechanical Engineering Department, Vali-e-Asr University, Rafsanjan, Iran

Phone: -

Fax: -

h.hajabdollahi@vru.ac.ir

Article History

Received: November 12, 2018

Accepted: December 23, 2018

ePublished: June 01, 2019

CITATION LINKS

[1] Optimum design of double pipe heat ... [2] Multi-objective optimization of double-tube ... [3] Two objective optimization of heat transfer ... [4] Multi-objective optimization of shell and tube ... [5] Hydraulic and thermal modeling and optimization of rectangular ... [6] Investigating the effect of non-similar fins in thermoeconomic ... [7] Cost and entropy generation minimization of a cross-flow ... [8] Experimental studies on heat transfer and pressure ... [9] Effectiveness-NTU analyses in a double ... [10] Experimental study on heat transfer of water/ TiO_2 nanofluid ... [11] A comprehensive review on double pipe ... [12] Effect of magnetic field on natural convection ... [13] Enhancing thermal conductivity of fluids ... [14] Application of nanofluids in heat ... [15] A study on the thermophysical properties ... [16] Correlations to predict friction and forced convection heat ... [17] Experimental study of Cu-water nanofluid heat ... [18] Investigation of trapezoidal-cut twisted tape ... [19] Experimental investigation of forced convective ... [20] Investigation of using nanofluid in horizontal ... [21] Heat transfer enhancement of nanofluids ... [22] Assessment of nanoparticles in thermoeconomic ... [23] Investigating the effect of nanoparticle ... [24] Fundamentals of heat exchanger ... [25] Thermo-economic modeling and optimization ... [26] Heat exchangers: Selection, rating, and ... [27] Heat transfer design ...

بهینه‌سازی چندهدفه شبکه مبادله‌کن حرارتی چندلوله‌ای U شکل با در نظر گرفتن اثر نانوذرات مختلف

حسن حاج‌عبداللہی * PhD

گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه ولی‌عصر^(ع)، رفسنجان، ایران

بابک معصوم‌پور MSc

گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه ولی‌عصر^(ع)، رفسنجان، ایران

چکیده

پژوهش حاضر به مدل‌سازی و بهینه‌سازی شبکه مبادله‌کن حرارتی چندلوله‌ای U شکل با در نظر گرفتن اثر نانوذرات مختلف در سمت لوله پرداخت. پس از مدل‌سازی حرارتی به روش $NTU - \epsilon$ ، بهینه‌سازی از دیدگاه افزایش کارایی و کاهش هزینه کلی سالیانه به عنوان دو تابع هدف همزمان با استفاده از هشت متغیر طراحی از جمله تعداد مبادله‌کن حرارتی و غلظت حجمی ذرات، توسط تکنیک الگوریتم ژنتیک چندهدفه صورت گرفت. به منظور کلی بودن نتایج، بهینه‌سازی در سه نرخ جریان جرمی مختلف سمت سرد و نانوذرات متفاوت شامل Al_2O_3 ، CuO و ZrO_2 انجام و نتایج با حالت سیال پایه (آب) مقایسه شد. نتایج نشان می‌دهد که منحنی پرتو در حالت نانوذرات بهبود یافت و میزان بهبودی در حالت نانوذرات اکسیدمس به‌ویژه در کارایی‌های بالاتر و نرخ‌های جریان جرمی پایین‌تر نانوسیال نسبت به دیگر حالات مطالعه‌شده محسوس‌تر است. علاوه بر این به دلیل بهبود عملکرد حرارتی مبادله‌کن در حالت نانوذرات، سطح تبادل حرارت و در نتیجه آن حجم مبادله‌کن برای مقادیر ثابت کارایی به صورت قابل توجهی کاهش یافته است. در پایان، پس از ارایه نتایج پارامترهای طراحی در برابر کارایی، آنالیز حساسیت توابع هدف با غلظت حجمی ذرات برای یک نقطه نمونه انجام و نتایج بررسی شد.

کلیدواژه‌ها: بهینه‌سازی فنی اقتصادی، شبکه مبادله‌کن حرارتی چندلوله‌ای، نانوذرات مختلف، الگوریتم ژنتیک

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۰۸/۲۱

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۱۰/۰۲

*نویسنده مسئول: h.hajabdollahi@vru.ac.ir

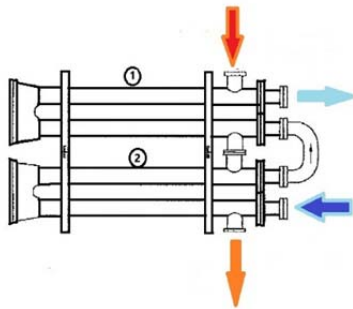
۱- مقدمه

انتقال حرارت بین دو یا چند سیال با شرایط عملکردی مختلف و جدا شده از یکدیگر توسط یک سطح جامد با استفاده از مبادله‌کن‌های حرارتی صورت می‌گیرد که وابسته به نوع سیال‌ها و شرایط کاری، انواع مختلف آن شامل پوسته و لوله، چندلوله‌ای و مبادله‌کن‌های صفحه‌ای به کار گرفته می‌شود. در واقع مبادله‌کن‌ها نقش اساسی را در سیستم‌های مهندسی حرارتی بازی می‌کنند. با توجه به بحران انرژی، قیمت بالای تجهیزات، هزینه بالای حامل‌های انرژی و نیاز به کاهش زمان لازم برای انتقال حرارت، استفاده از حداکثر ظرفیت حرارتی مبادله‌کن‌ها اهمیت زیادی دارد. همچنین لزوم استفاده از مبادله‌کن‌ها در ابعاد کوچک به منظور کاهش هزینه تولید و نصب آسانتر، نیاز به بهینه‌سازی را دوچندان نموده است. تلاش‌های زیادی به منظور برآورده کردن اهداف فوق انجام شده است. عمده تلاش‌های صورت گرفته را به صورت کلی می‌توان به سه روش تقسیم کرد. روش اول طراحی بهینه و استفاده از هندسه مبادله‌کن در جهت بهبود عملکرد آن را شامل می‌شود. به عنوان مثال می‌توان به طراحی بهینه مبادله‌کن‌های حرارتی مختلف شامل دولوله‌ای^[1-2]، پوسته و لوله^[3-4]، صفحه‌ای^[5-6] با در نظر گرفتن توابع هدف مختلف از جمله نرخ انتقال حرارت^[1, 3]، طول لوله^[2]، افت فشار^[2]، کارایی^[4-6]، هزینه کلی سالیانه^[3, 5-7]، هزینه کلی^[3-4, 6] و تولید آنتروپی^[7] اشاره نمود.

تولید جریان آشفته، یکی دیگر از روش‌هایی است که به منظور افزایش ضریب انتقال حرارت و در نتیجه آن بهبود عملکرد حرارتی مبادله‌کن‌های لوله‌ای بسیار مورد توجه بوده و برای آن راهکارهای متنوعی از سوی محققان ارایه شده است. به عنوان مثال دیزلیج و همکاران به آنالیز انتقال حرارت و افت فشار مبادله‌کن حرارتی دولوله‌ای با یک شکل جدید از لوله‌های شیاردار پرداختند^[8]. در یک کار اخیر پور/حمد و همکاران یک مطالعه آزمایشگاهی روی عملکرد حرارتی مبادله‌کن دولوله‌ای با نوار موجی شکل نصب شده در لوله داخلی انجام دادند^[9]. آنها مشاهده کردند که رشد کارایی مبادله‌کن حرارتی با کاهش هر دو عدد رینولدز جریان گرم و زاویه نوار موجی شکل و همچنین افزایش عدد رینولدز جریان سرد همراه بود. استفاده از نوار پیچ به توسط هوشمند را نیز می‌توان از دیگر راهکارهای ارایه شده در این زمینه معرفی کرد^[10]. ارایه پژوهش‌های مختلف و حتی چندین مطالعه جامع گواه تعدد تحقیقات انجام شده در این زمینه است^[11, 12].

روش سوم استفاده از ذرات جامد با خواص حرارتی بالاتر در سیال پایه را شامل می‌شود. هدایت حرارتی از جمله خواصی است که مستقیماً روی ضریب انتقال حرارت تاثیر می‌گذارد. این خاصیت ترموفیزیکی بسیار بالای جامدات در مقایسه با سیال‌های پایه رایج همچون آب و اتیل‌گلیکول محققان را به سمت استفاده از ذرات جامد در این سیالات به منظور افزایش هدایت حرارتی جریان سیال سوق می‌داد. البته استفاده از ذرات جامد در اندازه میلی‌متری و میکرومتری هر چند که هدایت حرارتی جریان سیال را افزایش می‌داد اما مشکلاتی از قبیل افت فشار بالاتر، ته‌نشینی ذرات جامد و گرفتگی مجاری را نیز به همراه داشت. تحقیقات به منظور بهبود مشکلات ذکر شده ادامه داشت تا پیشرفت‌های اخیر در نانوتکنولوژی و امکان تولید ذرات جامد در اندازه معمول کوچکتر از ۱۰۰ نانومتر، منجر شد یک گروه جدید از مایعات به نام نانوسیال‌ها به وجود آید که در ابتدا توسط چوی مطرح شد^[13]. پراکنده کردن نانوذرات در سیال پایه علاوه بر تغییر خواص ترموفیزیکی، انتقال حرارت (ضریب انتقال حرارت) و افت فشار (ضریب اصطکاک) جریان را نیز تحت تاثیر قرار می‌دهد. پس از معرفی نانوسیال، تعیین خواص ترموفیزیکی جریان و کاربرد نانوسیال‌ها مطرح و محققان زیادی را به خود جلب کرد و حتی چندین مطالعه جامع نیز در این زمینه منتشر شده است^[14-15]. استفاده از تحقیقات گذشته، *شماره* و همکاران را به خود وا داشت تا با جمع‌آوری داده‌های حاصل از مطالعات گذشته، روابط واحدی را برای خواص ترموفیزیکی نانوسیال‌ها (شامل هدایت حرارتی و ویسکوزیته) و همچنین ضرایب انتقال حرارت و اصطکاک ارایه دهد، به نحوی که برای تعداد قابل توجهی از نانوذرات قابل استفاده باشد^[16]. *المقلانی* و همکاران انتقال حرارت و افت فشار نانوسیال آب-مس را در یک مبادله‌کن حرارتی دولوله‌ای مجهز به قابلیت چرخش لوله داخلی تحت جریان آشفته به صورت آزمایشگاهی بررسی کردند^[17]. نتایج آنها شرح داد که پخش کردن نانوذرات به سیال پایه موجب بهبود کارایی مبادله‌کن می‌شود و میزان بهبودی با عدد رینولدز جریان نانوسیال و غلظت حجمی نانوذرات رابطه مستقیم دارد. همچنین آنها مشاهده کردند که استفاده از نانوذرات سبب افزایش جزیی افت فشار می‌شود. از دیگر نتایج آنها می‌توان به رابطه مستقیم سرعت چرخش لوله داخلی با افت فشار و کارایی مبادله‌کن حرارتی اشاره نمود. *پیراساد* و همکاران به مطالعه آزمایشگاهی جریان نانوسیال گذرا از مبادله‌کن حرارتی دولوله‌ای U شکل با نوار برش خورده ذوزنقه‌ای نصب شده روی لوله داخلی

شرایط عملکردی یکسان فراهم می‌آورد. در کاربردهای صنعتی و ظرفیت‌های بالا، استفاده از تعداد واحد مبادله‌کن حرارتی پاسخگو نیست و از مجموعه مبادله‌کن‌های حرارتی (شبکه مبادله‌کن) استفاده می‌شود. در جهت کاربردی بودن نتایج پژوهش حاضر، استفاده از مجموعه مبادله‌کن‌ها با در نظر گرفتن تعداد مبادله‌کن حرارتی به عنوان یک متغیر طراحی و آرایش کلی سری و مخالف جهت هریک از مبادله‌کن‌ها همانند شکل ۱ مطالعه شده است.



شکل ۱ شماتیک مجموعه مبادله‌کن حرارتی چندلوله‌ای

در این مطالعه برای آنالیز حرارتی مبادله‌کن از آنجایی که دو دمای ورودی معلوم و دو دمای خروجی نامعلوم هستند، روش کارایی-تعداد واحد انتقال $(\varepsilon - NTU)$ به کار گرفته شده است. کارایی مبادله‌کن حرارتی جریان مخالف جهت از رابطه ۱ به دست می‌آید [24]:

$$\varepsilon = \frac{(1 - \exp(-NTU(1 - C^*)))}{(1 - C^* \exp(-NTU(1 - C^*)))} \quad (1)$$

که NTU و C^* به ترتیب تعداد واحد انتقال و نسبت ظرفیت حرارتی هستند و به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$NTU = \frac{U_o A_o}{C_{min}} \quad (2)$$

$$C^* = \frac{C_{min}}{C_{max}} = \frac{\min((\dot{m}c_p)_t, (\dot{m}c_p)_s)}{\max((\dot{m}c_p)_t, (\dot{m}c_p)_s)} \quad (3)$$

در روابط فوق $\dot{m}$ ، U_o و A_o به ترتیب نرخ جریان جرمی سیال، ضریب کلی انتقال حرارت و مساحت خارجی لوله‌ها هستند. همچنین زیرنویس s و t به ترتیب مربوط به سمت فضای حلقوی (پوسته) و سمت لوله در نظر گرفته شده است. U_o تابعی از ضرایب انتقال حرارت سمت لوله و سمت فضای حلقوی، مقاومت هدایت حرارتی دیواره لوله و با در نظر گرفتن مقاومت رسوب جریان‌های هر دو سمت، به صورت زیر محاسبه می‌شوند:

$$\frac{1}{U_o} = \frac{1}{h_s} + R_{of} + \frac{d_o \ln(d_o/d_i)}{2k_w} + \left(\frac{d_{oo}}{d_i}\right) R_{if} + \left(\frac{d_o}{d_i}\right) \frac{1}{h_t} \quad (4)$$

که در آن h ، d_i ، d_o ، R_{if} ، R_{of} و k_w به ترتیب ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی، قطر داخلی لوله، قطر خارجی لوله، مقاومت رسوب سمت لوله، مقاومت رسوب سمت فضای حلقوی و ضریب هدایت حرارتی جداره لوله تعریف شده است. علاوه بر این A_o در رابطه ۲ به صورت زیر به دست می‌آید:

$$A_o = \pi l_c d_o N_t \quad (5)$$

پرداختند و نشان دادند که استفاده از نانوذرات اکسید آلومینیوم اثر قوی بر بهبود عملکرد کلی مبادله‌کن حرارتی دارد [18]. ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی اجباری نانوسیال Al_2O_3/EG و CuO/EG در مبادله‌کن‌های حرارتی دولوله‌ای و پره-لوله توسط زمزبان و همکاران به صورت آزمایشگاهی ارزیابی شد [19]. نتایج آنها تایید کرد که با افزایش هر دو پارامتر دما و غلظت نانوذرات، ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی اجباری افزایش یافت. تاثیر نانوذرات مختلف شامل اکسید آلومینا، اکسید تیتانیوم، اکسید نقره و اکسید مس در یک مبادله‌کن حرارتی پوسته و لوله توسط /سیدی و همکاران بررسی شد [20]. محمد و همکاران یک مبادله‌کن حرارتی دولوله‌ای مجهز به نوار بادگیر با دو نوع الگوی پیش‌رونده و پس‌رونده نوار به همراه نانوذرات مختلف را شبیه‌سازی کردند و به مطالعه اثر پارامترهای عملکردی همانند نرخ جریان جرمی نانوسیال‌ها و غلظت نانوذرات و پارامترهای هندسی نوار شامل زاویه کج شدن و گام نوار بر عملکرد حرارتی و ضریب اصطکاک پرداختند [21]. در دیگر تحقیقات انجام شده، حاج عبد/لهی و همکاران اثر نانوذرات را بر بهینه‌سازی مبادله‌کن‌های حرارتی پوسته و لوله و پره-لوله بررسی کردند [22, 23]. یافته‌های آنها نتیجه می‌داد که استفاده از نانوسیال $Al_2O_3/Water$ به جای سیال پایه آب در سمت لوله مبادله‌کن‌های ذکر شده، برای هر مبادله‌کن بهبود منحنی کارایی در برابر هزینه کلی سالیانه را به همراه دارد. همچنین آنها نتیجه گرفتند که در مبادله‌کن حرارتی پره-لوله، اضافه کردن نانوذرات به سیال پایه (آب) علاوه بر سطح بهینه انتقال حرارت، حجم بهینه مبادله‌کن حرارتی را نیز کاهش می‌داد.

مطالعه بهینه‌سازی چندهدفه انواع مبادله‌کن و بررسی اثر نانوذرات در مبادله‌کن‌ها، همان‌گونه که ذکر شده است، توسط محققان مختلفی انجام شده که تاکنون هیچ محقق به بررسی بهینه‌سازی چندهدفه شبکه مبادله‌کن حرارتی چندلوله‌ای نپرداخته است. بنابراین می‌توان چنین گفت که مطالعه بهینه‌سازی فنی و اقتصادی شبکه مبادله‌کن گرمایی چندلوله‌ای و همچنین به کارگیری نانوذرات مختلف در جهت بهبودی بهینه‌سازی، به عنوان نوآوری این پژوهش است. کار حاضر به مدل‌سازی و بهینه‌سازی فنی اقتصادی شبکه مبادله‌کن حرارتی چندلوله‌ای با خم U (سنجاق‌سری) به همراه نانوذرات مختلف می‌پردازد. نانوذرات Al_2O_3 ، CuO و ZrO_2 به صورت جداگانه با حداکثر غلظت حجمی ۰.۰۴٪ پخش شده در سیال پایه (آب) به عنوان سیال خنک‌کننده در سمت لوله استفاده شده است. بهینه‌سازی به منظور ماکزیمم کارایی و مینیمم هزینه کلی سالیانه به عنوان دو تابع هدف همزمان و با استفاده از الگوریتم ژنتیک با مرتب‌سازی ناغالب (NSGA-II) در سه نرخ جریان جرمی مختلف نانوسیال‌ها شامل ۱، ۱/۵ و ۲ کیلوگرم بر ثانیه انجام شد. نتایج بهینه برای هر نوع نانوذرات به همراه سیال پایه نمایش، مقایسه و بحث شده است. در حقیقت می‌توان گفت که کار حاضر بر این است که در ابتدا با استفاده از متغیرهای طراحی عملکرد بهینه فنی اقتصادی مبادله‌کن حرارتی را به دست آورده و سپس در جهت بهبود بخشیدن به آن، این بار علاوه بر متغیرهای طراحی، انواع مختلف نانوذرات را نیز به کار گیرد.

۲- آنالیز حرارتی

در مبادله‌کن‌های حرارتی بهترین نوع آرایش جریان، آرایش مخالف جهت است زیرا کارایی بالاتری را نسبت به دیگر آرایش‌های جریان شامل آرایش هم‌جهت و متقاطع برای مبادله‌کن حرارتی طی یک

کرد، با این تفاوت که به جای قطر داخلی از قطر هیدرولیکی و قطر معادل استفاده می‌شود. در این کار برای آنالیز حرارتی و هیدرولیکی سمت فضای حلقوی، روابط ارائه شده در مرجع [25] به کار رفت. عدد رینولدز سمت فضای حلقوی به صورت زیر تصحیح و محاسبه شده است:

$$Re_s = \frac{4\dot{m}_s D_h}{\mu_s A_c} \quad (14)$$

A_c معرف مساحت سطح مقطع ورودی جریان سمت فضای حلقوی و به صورت زیر به دست آمده است:

$$A_c = \frac{\pi(D_s^2 - N_t d_o^2)}{4} \quad (15)$$

D_h و D_e استفاده شده در روابط فوق به عنوان قطر هیدرولیکی و قطر معادل هستند و به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$D_h = D_s - d_o \quad (16)$$

$$D_e = \frac{D_s^2 - d_o^2}{d_o} \quad (17)$$

که در آن D_s معرف قطر فضای حلقوی (قطر پوسته) است و از رابطه ۱۸ تخمین زده می‌شود [26]:

$$D_s = 0.637 P_t \sqrt{\pi C L N_t / CTP} \quad (18)$$

که CTP و CL مقادیری ثابت و به ترتیب با توجه به تعداد گذر لوله و جانمایی لوله محاسبه می‌شوند.

۳- مدل سازی اقتصادی

در کار حاضر برای در نظر گرفتن جنبه اقتصادی بهینه سازی مبادله کن حرارتی، هزینه کلی سالیانه (TAC) به عنوان یکی از توابع هدف در نظر گرفته شده است. هزینه کلی سالیانه به صورت تابعی از هزینه اولیه مبادله کن و هزینه عملکردی آن است که به صورت زیر تخمین زده می‌شود [6]:

$$TAC (\$/year) = a_f C_{in, total} + C_{op, total} \quad (19)$$

$$a_f = \frac{i}{1 - (1 + i)^{-n}} \quad (20)$$

که در آن a_f ، i و n به ترتیب ضریب سالیانه کنند، نرخ بهره و عمر تجهیزات است. علاوه بر این $C_{in, total}$ و $C_{op, total}$ به ترتیب معرف هزینه اولیه و هزینه عملکردی مجموعه مبادله کن‌ها است. هزینه اولیه مبادله کن حرارتی وابسته به هزینه پایه آن که برای مبادله کن با لوله های از جنس فولاد کربن دار در زدار، به صورت زیر تخمین زده می‌شود [27]:

$$b (\$/m^2) = 485 (l * 3.28)^{-0.705} \left(\frac{A_o}{A_T} \right) \quad (21)$$

در نتیجه هزینه اولیه مبادله کن حرارتی با در نظر گرفتن هزینه خرید نانو ذرات (C_{NP}) به صورت زیر تخمین زده می‌شود [27]:

$$C_{in} (\$) = b(1 + C_T)(A_o * 10.76) + C_{NP} \quad (22)$$

که b و C_T به ترتیب هزینه پایه مبادله کن حرارتی و مجموع ضرایب تصحیح (ضریب تصحیح تعداد لوله، ضریب تصحیح قطر پوسته، ضریب تصحیح مواد مصرفی و غیره) است. علاوه بر این A_o و A_T به ترتیب سطح انتقال حرارت بر اساس لوله لخت و سطح کلی انتقال حرارت (سطح لوله بدون پره+سطح پره ها) تعریف شده است. همچنین C_{NP} هزینه تهیه نانو ذرات استفاده شده در

که در آن N_t تعداد لوله و l_c طول تصحیح شده است که با در نظر گرفتن مجموع طول لوله در هر گذر و طول خم U ، به صورت زیر تخمین زده می‌شود:

$$l_c = n_p l + \pi R \quad (6)$$

که R ، l و n_p به ترتیب شعاع خم U ، طول لوله در هر گذر است.

۲- آنالیز سمت لوله

در پژوهش حاضر به منظور بررسی تاثیر نانو ذرات بر بهینه سازی فنی اقتصادی مبادله کن حرارتی از سه نوع مختلف نانو ذرات شامل اکسید آلومینوم (Al_2O_3)، اکسید مس (CuO) و اکسید زیرکونیوم (ZrO_2) به صورت مجزا پراکنده شده در سیال پایه و گذرا از سمت لوله استفاده شده است. خواص ترموفیزیکی جریان نانوسیال شامل چگالی (ρ)، هدایت حرارتی (k)، ویسکوزیته (μ) و ظرفیت حرارتی (C_p) به صورت زیر تقریب زده شده اند [16]:

$$\rho_{NF} = (1 - \phi) \rho_{BF} + \phi \rho_{NP} \quad (7)$$

$$C_{p, NF} = \frac{(1 - \phi) (\rho C_p)_{BF} + \phi (\rho C_p)_{NP}}{(1 - \phi) \rho_{BF} + \phi \rho_{NP}} \quad (8)$$

$$\quad (9)$$

$$\frac{\mu_{NF}}{\mu_{BF}} = C_1 (1 + \phi)^{11.3} \left(1 + \frac{T_{NF}}{70} \right)^{-0.038} \left(1 + \frac{d_{NP}}{170} \right)^{-0.061} \quad (10)$$

$$\frac{k_{NF}}{k_{BF}} = 0.8938 (1 + \phi)^{1.37} \left(1 + \frac{T_{NF}}{70} \right)^{0.277} \left(1 + \frac{d_{NP}}{150} \right)^{-0.0336} \left(\frac{\alpha_{NP}}{\alpha_{BF}} \right)^{0.01737}$$

که در آن ϕ ، T ، d ، α و C_1 به ترتیب کسر حجمی نانو ذرات، دمای نانو ذرات، قطر، ضریب پخش حرارتی و ثابت نوع نانو ذره هستند. همچنین زیر نویس های NP ، BF و NF به ترتیب مربوط به نانو ذرات، سیال پایه و نانوسیال است. روابط ۹ و ۱۰ برای سیال پایه آب و محدوده $0 \leq \phi \leq 0.04$ و $20 < d_{NP} < 100$ ، $20 < T_{NF} < 70$ حداکثر خطا ۱۰٪ اعتبار دارد.

استفاده از روابط واحد به نحوی که برای تمامی نانوسیال ها مورد استفاده به منظور بررسی دقیق تر اثر نانو ذرات و کاهش خطا، اهمیت فوق العاده ای دارد. ضریب انتقال حرارت و ضریب اصطکاک نانوسیال ها به صورت زیر تخمین زده می‌شوند [16]:

$$Nu_{NF} = 0.023 Re_{NF}^{0.8} Pr_{BF}^{0.4} (1 + Pr_{NF})^{-0.012} (1 + \phi)^{0.23} \quad (11)$$

$$f_{NF} = 1.078 \left[\frac{0.3164}{Re_{NF}^{0.25}} \left(\frac{\rho_{NF}}{\rho_{BF}} \right)^{-0.514} \left(\frac{\mu_{NF}}{\mu_{BF}} \right)^{-0.1248} \right] \quad (12)$$

روابط فوق برای محدوده $3000 < Re < 63000$ با حداکثر خطا ۱۵٪ اعتبار دارد. همچنین Pr و Re معرف اعداد بدون بعد پرانتل و رینولدز هستند. عدد رینولدز جریان سیال در یک لوله تابعی از نرخ جریان جرمی ورودی، قطر لوله، تعداد لوله و ویسکوزیته جریان است که از رابطه ۱۳ به دست می‌آید:

$$Re_t = \frac{4\dot{m}}{\pi d_i \mu} (N_t / n_p) \quad (13)$$

۲-۲ آنالیز سمت فضای حلقوی (پوسته)

برای تخمین ضرایب انتقال حرارت و اصطکاک سمت فضای حلقوی، می‌توان از روابط قابل استفاده برای سمت لوله استفاده

سمت سرد و سمت گرم از مجموعه مبادله‌کن‌ها است. علاوه بر این T_{hi} و T_{ci} دمای ورودی جریان سرد و گرم به مجموعه مبادله‌کن‌ها است. در کار حاضر وابستگی خواص ترموفیزیکی با دما لحاظ و خواص مورد نیاز در دمای متوسط ورود و خروج هر مبادله‌کن حرارتی محاسبه شده است. از آنجایی که در ابتدا دما خروجی هر مبادله‌کن حرارتی نامشخص بوده، روش سعی و خطا نیز مورد نیاز است. برخلاف هزینه اولیه برابر تمام مبادله‌کن‌ها به دلیل یکسان بودن آنها از لحاظ هندسه، کارایی و افت فشار هر یک از مبادله‌کن حرارتی به دلیل تغییرات خواص ترموفیزیکی ناشی از تغییر دمای متوسط، با یکدیگر تفاوت دارد. پس از محاسبه افت فشار هر یک از مبادله‌کن‌ها هزینه عملکردی کل مجموعه با استفاده از رابطه ۲۴ به صورت زیر تصحیح شده است:

$$C_{op, total} = \left(\left(\frac{\dot{m}}{\rho \eta_p} \Delta P_{total} \right)_t + \left(\frac{\dot{m}}{\rho \eta_p} \Delta P_{total} \right)_s \right) \tau k_e \quad (29)$$

که در آن ΔP_{total} مجموع افت فشار جریان در هر یک از مبادله‌کن‌های حرارتی است. به علاوه هزینه اولیه کلی نیز به صورت زیر محاسبه شده است:

$$C_{in, total}(\$) = C_{in}(\$) * \quad (30)$$

N_{HE} که تعداد مبادله‌کن حرارتی را نشان می‌دهد. قابل بیان است که خواص مورد نیاز برای محاسبه کارایی و هزینه کلی سالیانه مجموعه مبادله‌کن‌های حرارتی در متوسط دمای ورودی به مجموعه و دمای خروجی نهایی (خروجی مجموعه مبادله‌کن‌های حرارتی) به دست آمده است. در این مقاله هندسه مبادله‌کن شامل قطر لوله (قطر داخلی و خارجی)، جانمایی لوله، نسبت گام لوله، طول لوله در هر گذر، تعداد لوله و همچنین اختصاص جریان در سمت لوله یا سمت فضای حلقوی، تعداد مبادله‌کن حرارتی و غلظت حجمی نانوذرات به عنوان هشت پارامتر طراحی در نظر گرفته شد. پارامترهای طراحی و همچنین محدود تغییرات آنها در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول ۱) متغیرهای طراحی و محدوده تغییرات آنها

متغیرهای طراحی	حد پایین	حد بالا
آرایش لوله (۱)	۳۰-۴۵-۹۰	-
قطر داخلی لوله (میلی‌متر)	۴/۹	۱۶/۹
نسبت گام لوله (-)	۱/۲	۲
طول لوله (متر)	۰/۵	۸
تعداد لوله (-)	۱	۲۰۰
اختصاص جریان سرد (-)	سمت لوله	سمت پوسته
تعداد مبادله‌کن حرارتی (-)	۱	۵
غلظت حجمی ذرات (%)	۰	۰/۰۴

از آنجایی که سرعت بالای سیال‌ها درون مبادله‌کن حرارتی سبب ارتعاش لوله‌ها و احتمال پیدایش ترک و به تبع شکستگی لوله‌ها را افزایش می‌دهد و در طرف مقابل سرعت پایین آنها نیز احتمال رسوب‌گذاری سیال‌ها را درون مبادله‌کن حرارتی تقویت می‌کند و کاهش عملکرد حرارتی را به همراه دارد، بدین منظور سرعت متوسط درون لوله و فضای حلقوی مجموعه مبادله‌کن‌ها به صورت جداگانه به عنوان قید و محدوده آن به صورت زیر انتخاب شده است:

$$1 \leq v_{t,s} \leq 4 \quad (31)$$

۵- مورد مطالعاتی

در کار حاضر به منظور بهبود عملکرد کلی مبادله‌کن حرارتی

مبادله‌کن حرارتی و به صورت زیر تخمین زده شده است:

$$C_{NP}(\$) = m_{NF} * k_{NP} \quad (23)$$

که در آن m_{NF} و k_{NP} به ترتیب مربوط به جرم نانوذرات مورد استفاده و قیمت پایه نانوذرات است.

هزینه عملکردی هر یک از مبادله‌کن مربوط به هزینه پمپاژ دو جریان سرد و گرم به صورت زیر به دست آمده است [6]:

$$C_{op} (\$/year) = \left(\left(\frac{\dot{m}}{\rho \eta_p} \Delta P \right)_t + \left(\frac{\dot{m}}{\rho \eta_p} \Delta P \right)_s \right) \tau k_{el} \quad (24)$$

که در آن η_p بازده ایزونتروپیک پمپ، τ ساعات عملکرد سیستم در سال و k_{el} تعرفه برق است. علاوه بر این ΔP معرف افت فشار است و به ترتیب برای سمت لوله و سمت پوسته، توسط روابط زیر به دست می‌آید [26]:

$$\Delta P_t = \frac{\dot{m}_t n_p}{2 \rho_t A_t^2} \left(\frac{4 f_t l}{d_i} + (1 - \sigma_t^2 + K_{c,t}) - (1 - \sigma_t^2 - K_{e,t}) \right) \quad (25)$$

$$\Delta P_s = \frac{\dot{m}_s n_p}{2 \rho_s A_c^2} \left(\frac{4 f_s l}{D_h} + (1 - \sigma_s^2 + K_{c,s}) - (1 - \sigma_s^2 - K_{e,s}) \right) \quad (26)$$

که در آن n_p ، σ ، K_c و K_e تعداد گذر لوله، حداقل مساحت جریان آزاد به جریان پیشانی، ضریب افت فشار ورودی و ضریب افت فشار جریان در خروجی مبادله‌کن حرارتی است. علاوه بر این A_t نسبت مساحت سطح مقطع جریان سمت لوله بر تعداد گذر آن است و از رابطه ۲۷ محاسبه می‌شود:

$$A_t = \frac{\pi d_i^2}{4} (N_t / n_p) \quad (27)$$

۴- توابع هدف، متغیرهای طراحی و قیود

طراحی مبادله‌کن حرارتی به نحوی که بیشترین کارایی و کمترین هزینه را داشته باشد، اهمیت فوق‌العاده‌ای دارد. معمولاً در مبادله‌کن‌های حرارتی بهبود کارایی، افزایش هزینه را به همراه دارد. در حقیقت یک تعارض بین کارایی و هزینه وجود دارد. استفاده از نانوذرات در سیال پایه موجب افزایش ضریب انتقال حرارت و در نتیجه آن کارایی مبادله‌کن حرارتی افزایش خواهد یافت. همچنین اضافه کردن نانوذرات به سیال پایه علاوه بر افزایش هزینه اولیه ناشی از تامین نانوذرات، ضریب اصطکاک را افزایش داده و به تبع آن افت فشار و هزینه عملکردی نیز افزایش می‌یابد و سرانجام افزایش هزینه کلی را به همراه دارد. در حقیقت می‌توان گفت که استفاده از نانوذرات به تعارض موجود بین کارایی و هزینه مبادله‌کن حرارتی کمک می‌کند. به عنوان نتیجه، انتخاب کارایی و هزینه کلی سالیانه به عنوان دو تابع هدف علاوه بر اینکه هر دو جنبه مدل‌سازی فنی و اقتصادی مبادله‌کن حرارتی را می‌پوشاند، دو اثر ذکر شده نیز به صورت همزمان بررسی می‌شود. کارایی برای هر مبادله‌کن حرارتی از طریق رابطه ۱ به دست می‌آید اما کارایی کل مجموعه مبادله‌کن‌های حرارتی از شکل دیگر آن محاسبه شده است [24]:

$$\varepsilon = \frac{Q}{Q_{max}} = \frac{C_h (T_{ho, final} - T_{hi})}{C_{min} (T_{hi} - T_{ci})} = \frac{C_c (T_{co, final} - T_{ci})}{C_{min} (T_{hi} - T_{ci})} \quad (28)$$

که در آن $T_{ho, final}$ و $T_{co, final}$ به ترتیب دمای نهایی خروجی

(۲) دما متوسط هر جریان محاسبه و خواص مورد نیاز در آن دما خوانده شده است.

(۳) عدد رینولدز و ضریب انتقال حرارت برای هر جریان محاسبه شده و پس از آن ضریب کلی انتقال حرارت، NTU و کارایی مبادله‌کن حرارتی به دست آمده است.

(۴) با توجه به کارایی، دمای خروجی هر جریان محاسبه و جایگزینی فرض اولیه شده و این روند از گام دوم تکرار شد و تا همگرایی ادامه دارد.

(ب) تحلیل مجموعه مبادله‌کن‌ها

نحوه اتصال مبادله‌کن‌ها به یکدیگر به صورت سری و همچنین آرایش جریان علاوه بر هر مبادله‌کن حرارتی برای مجموعه مبادله‌کن‌ها نیز آرایش مخالف جهت در نظر گرفته شده است. در واقع سیال سمت گرم از اولین مبادله‌کن وارد و از آخرین آن خارج می‌شود در حالی که سیال سمت سرد به صورت بالعکس، از آخرین مبادله‌کن حرارتی وارد و از اولین مبادله‌کن خارج می‌شود. روند تحلیل شبکه مبادله‌کن‌ها به صورت زیر است:

(۱) در فرض اولیه دمای خروجی در هر دو سمت برای تک‌تک مبادله‌کن‌ها برابر با دمای ورودی به آن مبادله‌کن در نظر گرفته شده است. بنابراین در سمت سرد، دمای خروجی سمت سرد تمام مبادله‌کن‌ها برابر با دمای ورودی به مجموعه مبادله‌کن‌ها (ورودی آخرین مبادله‌کن) لحاظ، در حالی که برای سمت گرم فقط در اولین مبادله‌کن حرارتی دما خروجی سمت گرم برابر با دمای ورود آن (دمای ورودی به کل مجموعه) در نظر گرفته شده است.

(۲) تحلیل اولین مبادله‌کن حرارتی براساس گام‌های ذکرشده در قسمت قبلی انجام شده تا اولین دمای خروجی سمت گرم به دست آید. این تحلیل مبادله‌کن‌ها در جهت جریان سمت گرم ادامه پیدا کرده تا دمای خروجی سمت گرم تمام مبادله‌کن‌ها مشخص شود.

(۳) با تحلیل آخرین مبادله‌کن، دمای خروجی سمت گرم (خروجی نهایی سمت گرم مجموعه) محاسبه و همچنین اولین دمای خروجی سمت سرد تصحیح می‌شود. در ادامه تحلیل، این بار در جهت جریان سرد و دمای خروجی سمت سرد تمام مبادله‌کن‌ها تا اولین مبادله‌کن اصلاح شده و سرانجام در اولین مبادله‌کن تصحیح هر دو دمای خروجی سمت سرد (خروجی نهایی سمت سرد مجموعه) و اولین دمای خروجی سمت گرم صورت می‌پذیرد.

(۴) تکرار این روند از گام دوم و تا همگرایی هر دو دمای خروجی نهایی سمت گرم و سمت سرد ادامه دارد.

(۵) پس از همگرایی دمای خروجی نهایی و مشخص شدن هر دو دمای خروجی برای تک‌تک مبادله‌کن‌ها، افت فشار محاسبه و هزینه عملکردی به دست می‌آید. نهایتاً با استفاده از رابطه ۱۹ هزینه کلی سالیانه محاسبه می‌شود. فلوچارت مدل‌سازی شبکه مبادله‌کن‌ها در شکل ۲ نشان داده شده است.

پس از تحلیل نهایی کل مجموعه مبادله‌کن‌ها و به دست آوردن مقادیر کارایی و هزینه کلی سالیانه، این دو مقدار به همراه مقادیر سرعت هر دو سمت گرم و سرد (قید در نظر گرفته شده) به عنوان خروجی مدل‌سازی به الگوریتم بهینه‌سازی داده می‌شوند. به دست آوردن بهترین مجموعه حل بهینه توسط الگوریتم، تا رسیدن به شرط توقف ادامه دارد. قابل ذکر است که برنامه بهینه‌سازی برای هر حالت مطالعه، سه بار اجرا شده و پس از آن، نتایج به دست آمده براساس مفهوم ناغالب بودن رتبه‌بندی مجدد شده و بهترین رتبه (رتبه اول) به عنوان نتایج بهینه نهایی در نظر گرفته شده است.

چندلوله‌ای با خم U از نانوذرات CuO ، Al_2O_3 و ZrO_2 با قطر متوسط ۲۹ نانومتر پخش شده در سیال پایه و عبوری از سمت لوله به عنوان سیال سرد استفاده شده است. روغن با دما و نرخ جریان جرمی ورودی به ترتیب 80°C و 3 kg/s بر ثانیه به عنوان جریان گرم در نظر گرفته شده است. خواص نانوذرات مورد استفاده، در جدول ۲ نشان داده شده است [16]. علاوه بر این پارامترهای لیست شده در جدول ۳ به عنوان پارامترهای ورودی مدل‌سازی اقتصادی در نظر گرفته شد.

جدول ۲) خواص ترموفیزیکی نانوذرات استفاده شده در این پژوهش [16]

خواص ترموفیزیکی	CuO	ZrO_2	Al_2O_3
هدایت حرارتی (W/m K)	۶۹	۱/۷	۳۶
ظرفیت گرمایی (J/kg K)	۶۳۵۰	۵۵۰۰	۳۸۸۰
چگالی (کیلوگرم بر مترمکعب)	۵۳۵	۵۰۲	۷۷۳

جدول ۳) ثوابت در نظر گرفته شده برای مدل‌سازی اقتصادی

پارامتر	مقدار
نرخ بهره (-)	۰/۱
ساعات کاری در سال (ساعت)	۵۰۰۰
عمر مفید تجهیزات (سال)	۱۰
بازده پمپ (-)	۰/۶
ارزش الکتریکی ($\$/\text{kWh}$)	۰/۰۲
قیمت پایه نانوذرات ($\$/\text{kg}$)	۳۰۰

۶- بحث و نتایج

۶-۱- اعتبارسنجی مدل

پس از مدل‌سازی به منظور بررسی دقت و قابلیت اطمینان از شبیه‌سازی، نتایج کد حاضر با نتایج متناظر گزارش شده در مرجع [26] با پارامترهای ورودی یکسان مقایسه و در جدول ۴ ارایه شده است. از جدول ۴ قابل استنباط است که اختلاف بین نتایج کد حاضر و نتایج مرجع با دقت قابل قبول و حداکثر خطا $8/165\%$ وجود دارد که کد حاضر را اعتبار می‌بخشد.

جدول ۴) مقایسه نتایج کار حاضر با نتایج متناظر در مرجع

پارامتر	مرجع [26]	کار حاضر	اختلاف (%)
ضریب انتقال حرارت لوله ($\text{W m}^{-2} \text{K}^{-1}$)	۴۶۴۸	۴۵۵۱/۷	-۲/۰۷۲
ضریب انتقال حرارت پوسته ($\text{W m}^{-2} \text{K}^{-1}$) ^۱	۱۳۴۵	۱۴۶۱/۴	۸/۶۵۴
ضریب کلی انتقال حرارت ($\text{W m}^{-2} \text{K}^{-1}$)	۶۲۲	۶۳۷	۲/۴۱۲
ضریب اصطکاک سمت لوله (-)	۰/۰۰۴۱	۰/۰۰۴۲	۲/۴۳۹
ضریب اصطکاک سمت پوسته (-)	۰/۰۰۷۰	۰/۰۰۷۴	۵/۷۱۴
افت فشار سمت لوله (کیلوپاسکال)	۰/۴۶۰	۰/۴۶۴۵	۰/۹۷۸
افت فشار سمت پوسته (کیلوپاسکال)	۲/۸۷۶۴	۳/۱۱۰	۸/۱۲۱

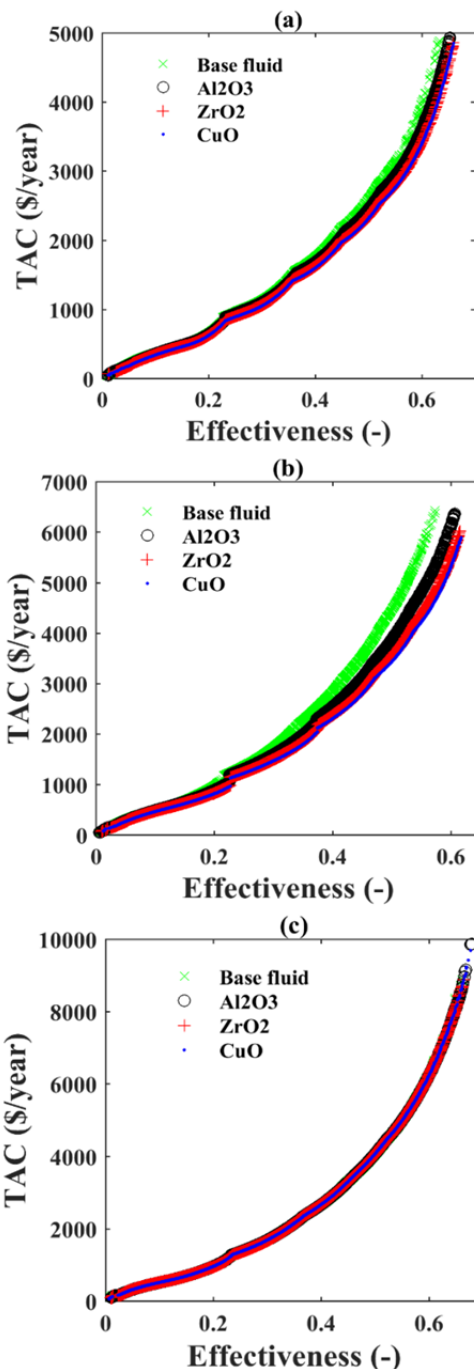
۶-۲- روند حل

در ابتدا پارامترهای طراحی و محدوده تغییرات آنها به همراه شرایط عملکردی جریان‌های هر دو سمت و همچنین ثوابت در نظر گرفته شده، در ورودی الگوریتم تعریف شده است. مدل‌سازی هر عضو جمعیتی براساس روند زیر انجام شد تا در نهایت مقادیر کارایی و هزینه کلی سالیانه به عنوان دو تابع هدف برای آن عضو به دست آید:

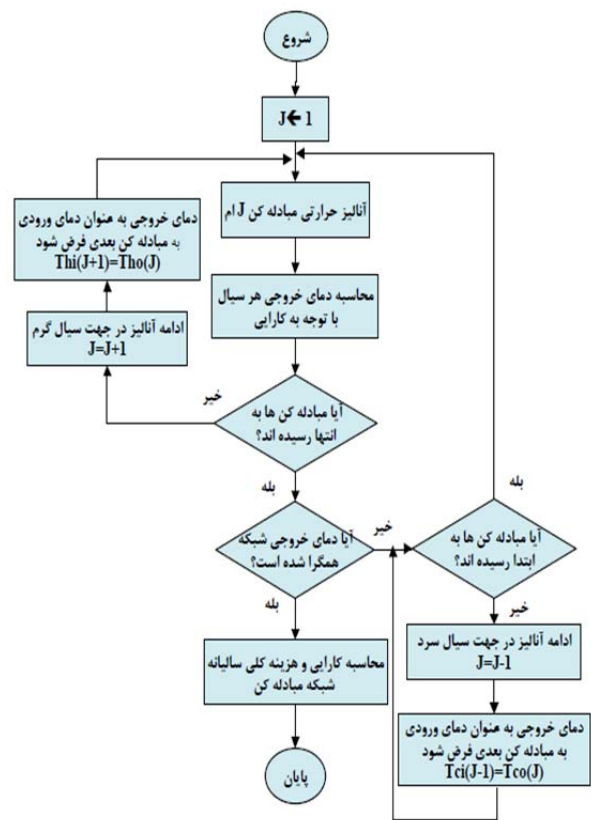
(الف) تحلیل هر مبادله‌کن حرارتی

(۱) در فرض اولیه دو دمای خروجی سمت گرم و سمت سرد با دماهای ورودی برابر فرض شده است.

بیشترین میزان بهبودی بهینه‌سازی فنی اقتصادی مبادله‌کن حرارتی برای نانوذرات در نرخ جریان جرمی سمت سرد ۱/۵ کیلوگرم بر ثانیه اتفاق می‌افتد در حالی که با کاهش این مقدار به یک کیلوگرم بر ثانیه از میزان تاثیرگذاری ذرات کاسته شده و همچنین با افزایش این نرخ جریان جرمی به ۲ کیلوگرم بر ثانیه می‌توان چنین گفت که تقریباً هیچ بهبودی در نتایج بهینه‌سازی رخ نمی‌دهد. می‌توان گفت که در نرخ جریان جرمی بالای سمت سرد ضریب انتقال حرارت به اندازه کافی بالا است و بهبودی بیشتر در آن باعث بهبودی محسوس در ضریب کلی انتقال حرارت نمی‌شود و به تبع آن کارایی مبادله‌کن حرارتی نیز تغییر محسوسی نمی‌کند.



نمودار ۱) مجموعه حل‌های بهینه در حالات متفاوت مورد مطالعه برای نرخ جریان جرمی مختلف سمت سرد: (a) یک کیلوگرم بر ثانیه، (b) ۱/۵ کیلوگرم بر ثانیه، (c) ۲ کیلوگرم بر ثانیه



شکل ۲) فلوچارت مدل‌سازی فنی اقتصادی مجموعه مبادله‌کن‌ها

۳-۶- بهینه‌سازی

پس از مدل‌سازی نانوسیال‌ها مختلف در سمت لوله، هندسه مبادله‌کن حرارتی به منظور داشتن حداکثر کارایی و حداقل هزینه وارد فرآیند بهینه‌سازی شده است. در این مطالعه برای بهینه‌سازی از تکنیک الگوریتم ژنتیک با مرتب‌سازی ناغالب با ۱۰۰ تکرار و تعداد جمعیت ۱۰۰ استفاده شد. علاوه بر این احتمال ادغام ۰/۹، احتمال جهش ۰/۵۵ و احتمال نخبه‌گرایی ۰/۳۵ در نظر گرفته شده است.

بهینه‌سازی در سه نرخ جریان جرمی مختلف سمت سرد شامل ۱، ۱/۵ و ۲ کیلوگرم بر ثانیه به همراه نانوذرات Al_2O_3 ، CuO و ZrO_2 به صورت جداگانه انجام شده و نتایج به دست آمده با حالت بدون نانوذرات در همان نرخ جریان جرمی سمت سرد مقایسه شد. در نهایت نتایج بهینه (جبهه بهینه پرتو) به دست آمده در حالت نانوذرات مختلف و بدون آن، در نمودار ۱ نمایش داده شده است. به صورت کلی جبهه بهینه پرتو به دست آمده در حالت نانوذرات باید غالب یا معادل جبهه بهینه پرتو به دست آمده در حالت بدون نانوذرات باشد زیرا حل‌های بهینه در حالت بدون نانوذرات، زیرمجموعه و یک حالت خاص نسبت به حالت با نانوذرات است ($\emptyset =$). نتایج نشان داده شده در نمودار ۱ مشخص می‌کند که ابتدا الگوریتم استفاده شده به درستی همگرا شده است و سپس به صورت کلی جبهه بهینه پرتو به دست آمده در حالت نانوذرات غالب بر جبهه بهینه پرتو در حالت بدون آن است. غالب بودن نتایج بهینه در حالت نانوذرات گویای این موضوع است علاوه بر اینکه کارایی مبادله‌کن حرارتی بهبود یافته، به صورت همزمان هزینه کلی سالیانه آن نیز کاهش یافته است. با مقایسه نمودار ۱ الف، ب و پ مشاهده می‌شود که تفاوت به دست آمده در نرخ جریان جرمی سمت سرد ۱/۵ کیلوگرم بر ثانیه دارای بیشترین مقدار است. در حقیقت

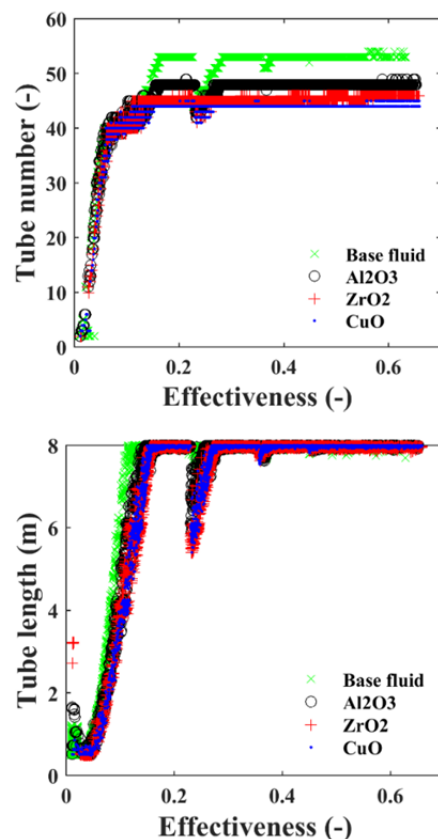
برای داشتن بینش بهتر نسبت به اثر نانوذرات بر هندسه مبادله‌کن حرارتی حاصله از فرآیند بهینه‌سازی، توزیع پراکنده تعدادی از پارامترهای هندسی در حالت بهینه برای هر دو حالت با و بدون نانوذرات نمایش و مقایسه شده است. توزیع تعداد لوله و طول لوله در برابر کارایی برای نقاط ارایه‌شده در نمودار ۱ الف، در نمودار ۲ نمایش داده شده است. مشاهده می‌شود که افزایش هر دو پارامتر طول لوله و تعداد لوله با افزایش کارایی مبادله‌کن حرارتی همراه است. در حقیقت مبادله‌کن حرارتی در کارایی بالاتر به مقادیر بیشتر طول لوله و تعداد لوله نیاز دارد. با مقایسه نتایج بهینه ارایه‌شده در نمودار ۲ مشخص می‌شود که تفاوت به‌دست‌آمده در تعداد لوله برای مقادیر ثابت کارایی در حالت نانوذرات CuO به بیشترین مقدار می‌رسد. از آنجایی که در این نانوذره حداکثر بهبودی در ضریب کلی انتقال حرارت به‌دست‌آمده، بنابراین برای مقادیر ثابت کارایی به کمترین سطح تبادل حرارت نیاز است و به تبع آن کمترین تعداد لوله از فرآیند بهینه‌سازی انتخاب شده است. با استفاده از همین دیدگاه نانوذرات ZrO_2 و Al_2O_3 در مرتبه‌های بعدی قرار دارند و در حالت سیال پایه، بیشترین تعداد لوله به‌دلیل پایین‌بودن ضریب انتقال حرارت، مورد نیاز است. علاوه بر این نمودار ۲ نتیجه می‌دهد که به‌کارگیری نانوذرات تاثیر چندانی بر طول لوله ندارد.

توزیع تعداد مبادله‌کن حرارتی و نسبت گام لوله در برابر کارایی برای نتایج بهینه ارایه‌شده در نمودار ۱ الف، در نمودار ۳ نشان داده شده است. با افزایش تعداد مبادله‌کن حرارتی، دو جریان سمت گرم و سمت سرد به دفعات بیشتر با یکدیگر تبادل حرارت انجام می‌دهند، پس بنابراین دمای خروجی سمت سرد افزایش و دمای خروجی سمت گرم کاهش می‌یابد و با در نظر گرفتن کل مجموعه به‌عنوان یک مبادله‌کن حرارتی واحد، طبق رابطه ۲۸ کارایی مبادله‌کن حرارتی افزایش می‌یابد که این روند برای هر دو حالت با و بدون نانوذرات صادق است. همچنین از نمودار ۳ قابل استنباط است که در یک تعداد مشخص مبادله‌کن حرارتی، با کاهش نسبت گام لوله، کارایی افزایش پیدا می‌کند. در حقیقت با کاهش نسبت گام لوله و تغییرات قابل نظر قطر خارجی لوله، از یک طرف قطر پوسته کاهش و به تبع آن عدد رینولدز سمت پوسته و ضریب انتقال حرارت آن افزایش یافته و رشد ضریب کلی انتقال حرارت، NTU و کارایی مبادله‌کن حرارتی را به‌همراه دارد و از طرف دیگر با افزایش عدد رینولدز، افزایش افت فشار سمت پوسته و به تبع آن هزینه عملکردی و هزینه کلی سالیانه افزایش می‌یابد. برای حل‌های بهینه به‌دست‌آمده، رشد کارایی بیشتر از افزایش هزینه کلی سالیانه بوده و بنابراین در کارایی بالاتر گام کمتری در نظر گرفته شده است. اما در حالت نانوذرات با کاهش قابل توجه تعداد لوله و اثرات مستقیم آن بر قطر پوسته، گام لوله نسبت به حالت سیال پایه کمی افزایش یافته است تا کاهش قطر پوسته را تا حدودی جبران کند.

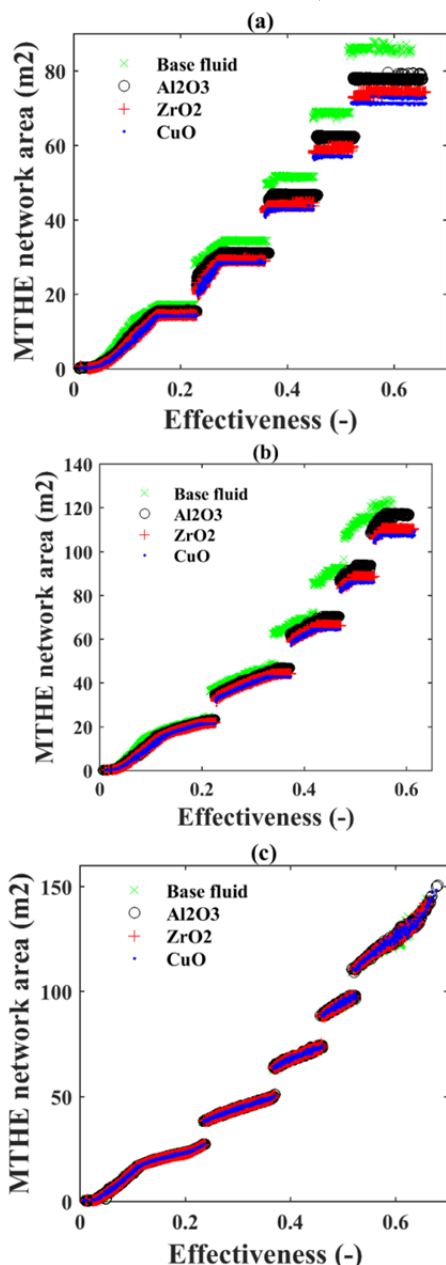
توزیع سطح انتقال حرارت شبکه مبادله‌کن حرارتی در برابر کارایی در نمودار ۴ نمایش داده شده است. با اضافه‌کردن نانوذرات به سیال پایه ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی سمت لوله افزایش یافته و به تبع آن ضریب کلی انتقال حرارت و NTU رشد می‌کند. بنابراین در مقادیر ثابت کارایی، سطح انتقال حرارت بهبود می‌یابد. به‌صورت کلی می‌توان گفت در حالت نانوذرات علاوه بر بهبودی فنی اقتصادی، سطح انتقال حرارت نیز کاهش یافته است. همچنین از نمودار ۴ مشاهده می‌شود که میزان بهبود سطح انتقال حرارت بهینه، در نرخ‌های جریان جرمی پایین سمت سرد و به‌خصوص در

از نمودار ۱ قابل مشاهده است که در تمامی نرخ جریان جرمی سمت سرد مطالعه شده، نانوذرات CuO بیشترین تاثیرگذاری را بر نتایج کارایی در برابر هزینه کلی سالیانه نسبت به سیال پایه از خود نشان داده است و پس از آن نانوذرات ZrO_2 و نهایتاً نانوذرات Al_2O_3 قرار دارد. بهبود عملکرد حرارتی مبادله‌کن ممکن است به این دلیل باشد که استفاده از نانوذرات، افزایش هدایت حرارتی جریان نانوسیال را به‌همراه دارد. افزایش هدایت حرارتی و همچنین تاثیرگذاری ترم $(1+\phi)$ برای حالت نانوذرات (رابطه ۱۱)، سبب افزایش ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی سمت لوله می‌شود و به تبع ضریب کلی انتقال حرارت و همچنین تعداد واحد انتقال حرارت افزایش یافته و نهایتاً کارایی مبادله‌کن حرارتی بهبود می‌یابد. همچنین از آنجایی که نانوذرات CuO بالاترین ضریب هدایت حرارتی را نسبت به دیگر نانوذرات دارد، بیشترین میزان بهبودی در این حالت قابل پیش‌بینی است.

رشد هزینه کلی سالیانه در برابر افزایش کارایی برای همه نرخ جریان جرمی سمت سرد مطالعه‌شده را می‌توان از دیگر نتایج ارایه‌شده در نمودار ۲ عنوان نمود. قابل ذکر است که در جایگاه بهینه بین کارایی و هزینه کلی سالیانه طبق انتظار تعارض وجود دارد و هر تغییر در تجهیزات مبادله‌کن حرارتی که به رشد کارایی منجر شود، افزایش هزینه را نیز به‌همراه دارد و بالعکس. به همین دلیل برای مشخص‌کردن روند تعارض در حل بهینه بین دو پارامتر ذکرشده از بهینه‌سازی چندهدفه با قابلیت بررسی توابع هدف به‌صورت همزمان استفاده شده است. علاوه بر این با افزایش نرخ جریان جرمی سمت سرد، افت فشار مربوط به این سمت افزایش یافته و هزینه عملکردی مبادله‌کن حرارتی و به تبع آن هزینه کلی سالیانه همان‌طور که در نمودار ۱ مشخص است، افزایش می‌یابد.



نمودار ۲) توزیع تعداد و طول لوله در برابر کارایی برای نقاط بهینه به‌دست‌آمده در شکل ۳-ا

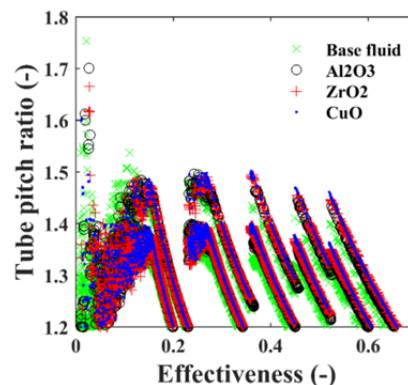
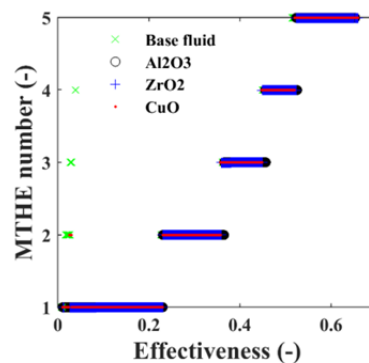


نمودار ۴) توزیع سطح انتقال حرارت شبکه برابر کارایی برای نقاط ارائه شده در شکل ۳: (a) یک کیلوگرم بر ثانیه، (b) ۱/۵ کیلوگرم بر ثانیه، (c) ۲ کیلوگرم بر ثانیه

حجم شبکه مبادله‌کن‌های حرارتی برای نقاط بهینه نمایش داده شده در نمودار ۲ محاسبه و توزیع آن در برابر کارایی در نمودار ۵ نشان داده شده است. به صورت کلی نمودار ۵ آشکار می‌کند که حجم بهینه در حالت نانوذرات نسبت به حالت بدون نانوذرات بهبود یافته و میزان بهبودی با افزایش کارایی و کاهش نرخ جریان جرمی سمت سرد ارتباط مستقیم دارد. در حقیقت حجم بهینه نشان داده شده در نمودار ۵ الف به صورت محسوسی کاهش یافته است در حالی که اثر استفاده از نانوذرات بر حجم بهینه در نرخ جریان جرمی سمت سرد ۲ کیلوگرم بر ثانیه (نمودار ۵ پ) قابل چشم‌پوشی است. براساس نتایج به دست آمده در قسمت‌های قبلی، پخش کردن نانوذرات در سیال پایه نسبت به حالت بدون نانوذرات با کاهش سطح انتقال حرارت همراه بود. بنابراین برای مقادیر ثابت کارایی، مبادله‌کن حرارتی در حالت نانوذرات، حجم بهینه کمتری دارد. در تمام نرخ جریان جرمی سمت سرد مطالعه شده بیشترین میزان بهبودی حجم بهینه در حالت نانوذرات اکسیدمس مشاهده

کارایی بالاتر، آشکارتر است. در حقیقت بیشترین تاثیرگذاری نانوذرات بر سطح انتقال حرارت بهینه در نرخ جریان جرمی سمت سرد یک کیلوگرم بر ثانیه رخ می‌دهد و با افزایش این نرخ جریان جرمی از میزان تاثیرگذاری کاسته شده به نحوی که در نرخ جریان جرمی سمت سرد دو کیلوگرم بر ثانیه بهبودی قابل توجه‌ای مشاهده نمی‌شود. با استفاده از نمودار ۴ این حقیقت آشکار می‌شود که هر تغییری در هندسه مبادله‌کن حرارتی که سبب افزایش سطح انتقال حرارت شود، رشد کارایی را به دنبال دارد. می‌توان چنین گفت که با افزایش سطح انتقال حرارت، NTU رشد کرده و به تبع آن کارایی مبادله‌کن حرارتی افزایش می‌یابد. انتخاب تعداد بالای لوله و طول حداکثری لوله برای کارایی بالاتر مبادله‌کن حرارتی، نشان داده شده در نمودار ۲ نیز این موضوع را تایید می‌کند.

از آنجایی که حداکثر بهبود عملکرد حرارتی در حالت نانوذرات اکسیدمس است، بنابراین در این حالت مبادله‌کن به کمترین سطح تبادل حرارت نیاز دارد و به ترتیب نانوذرات اکسیدزیرکونیوم و اکسیدآلومینیوم در مرتبه بعدی قرار دارند. به عنوان مثال سطح انتقال حرارت بهینه در مقادیر ثابت کارایی ۰/۵۵ و نرخ جریان جرمی سمت سرد یک کیلوگرم بر ثانیه، ۱۷/۴۷۱٪، ۱۳/۶۹۹٪ و ۹/۵۲۲٪ به ترتیب برای نانوذرات CuO ، ZrO_2 و Al_2O_3 نسبت به حالت سیال پایه بهبود یافته است، در حالی که این میزان بهبودی در نرخ جریان جرمی سمت سرد ۱/۵ کیلوگرم بر ثانیه برای همان کارایی ثابت به مقادیر ۱۱/۱۲۲٪، ۹/۳۴۷٪ و ۴/۴۵۶٪ کاهش یافته است. از نمودار ۲ مشخص است تعداد لوله و طول لوله در کارایی بالا و نرخ جریان جرمی سمت سرد یک کیلوگرم بر ثانیه تقریباً ثابت هستند و همین عامل پله‌ای بودن نتایج را به همراه داشته است. همچنین از نمودار ۲ نیز می‌توان چنین برداشت نمود که بهبود عملکرد حرارتی مبادله‌کن در عین ثابت بودن سطح انتقال حرارت امکان‌پذیر است و با تغییر پارامترها می‌توان این امر را تحقق بخشید.

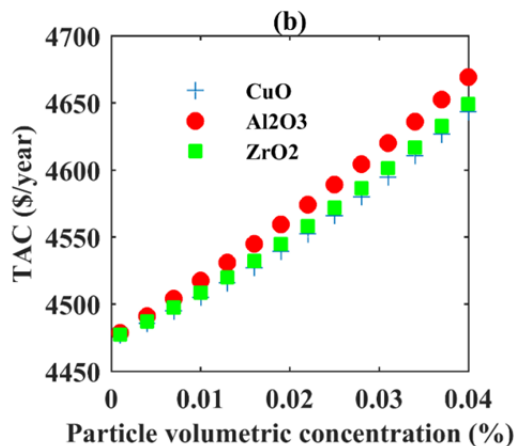
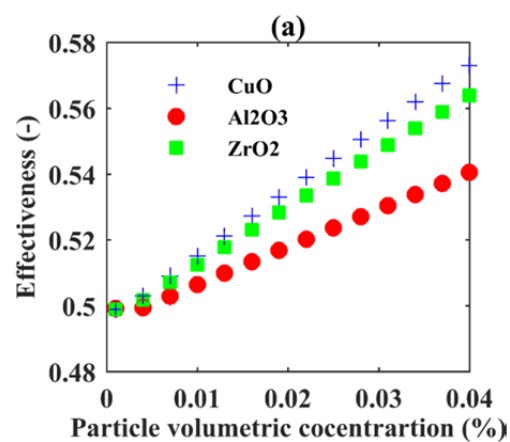


نمودار ۳) توزیع تعداد مبادله‌کن حرارتی و نسبت گام لوله در برابر کارایی برای نقاط بهینه به دست آمده در شکل ۳- a

رفتار کارایی و هزینه کلی سالیانه در برابر تغییرات غلظت ذرات برای نقطه بهینه نمونه در حالت سیال پایه در نمودار ۶ نمایش داده شده است. روند صعودی افزایش هزینه با غلظت به دلیل رشد هزینه عملکردی (رابطه ۱۹) است که ناشی از افت فشار بالاتر و چگالی پایین‌تر نانوسیال رخ می‌دهد و همان‌طور که در نمودار ۶ قابل ملاحظه است ماکزیمم هزینه در غلظت ۰/۰۴ برای هر سه نانوسیال رخ می‌دهد. چگالی نانوسیال از جمله خواص ترموفیزیکی است که هزینه عملکردی را به‌صورت ویژه‌ای تحت تاثیر خود قرار می‌دهد. در میان سه نوع نانوذره، ذرات اکسیدمس در مقادیر ثابت غلظت ذرات، بیشترین چگالی را دارد که طبق رابطه ۱۲ منجر به کمترین ضریب اصطکاک و همچنین نزول افت فشار می‌شود و کاهش هزینه عملکردی و به تبع کمترین هزینه کلی سالیانه را به‌همراه دارد. با استفاده از همین دیدگاه ذرات اکسیدزیرکونیوم و اکسیدآلومینیوم به‌ترتیب در مرتبه‌های بعدی قرار دارند.

جدول ۵) پارامترهای طراحی در حل‌های بهینه با کارایی ۰/۵۰ برای شکل ۳ ب

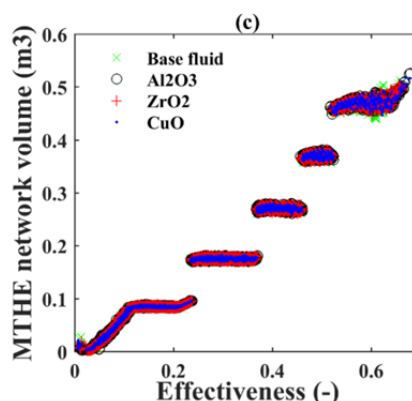
متغیرهای طراحی	CuO	ZrO ₂	Al ₂ O ₃	BF
آرایش لوله	۳۰	۳۰	۳۰	۳۰
قطر داخلی لوله	۴/۹	۴/۹	۴/۹	۵/۱۹
نسبت گام لوله	۱/۴۰۴	۱/۴۸۶	۱/۲۶	۱/۲۴
طول لوله	۷/۹۹	۷/۹۷	۷/۹۹	۷/۹۸
تعداد لوله	۶۶	۶۷	۷۰	۷۰
اختصاص جریان سرد	لوله	لوله	لوله	لوله
تعداد مبادله‌کن	۴	۴	۴	۵
غلظت حجمی ذرات	۰/۰۴	۰/۰۴	۰/۰۴	-
هزینه کلی سالیانه	۳۴۳۹/۲	۳۵۵۲/۸	۳۸۷۷/۶	۴۴۶۹



نمودار ۶) آنالیز حساسیت توابع هدف با غلظت حجمی ذرات؛ (a) کارایی، (b) هزینه کلی سالیانه

می‌شود در حالی که نانوذرات اکسیدآلومینیوم کمترین تاثیر در بهبودی حجم بهینه را از خود نشان داده‌اند. به‌عنوان مثال در مقادیر ثابت کارایی ۰/۶ حجم بهینه در نمودار ۵ الف و حالت بدون نانوذرات برابر با ۰/۳۳۱۷ مترمکعب است، در حالی که این میزان برای نانوذرات اکسیدآلومینیوم، اکسیدزیرکونیوم و اکسیدمس به مقادیر ۰/۳۲۴۷ مترمکعب، ۰/۳۱۸۱ مترمکعب و ۰/۳۰۵۴ مترمکعب کاهش یافته است. درصد میزان بهبودی حجم بهینه برای نقاط مذکور به‌ترتیب برابر با ۲/۱۱، ۴/۱۰ و ۷/۹۲۹ است.

از نمودار ۵ به‌صورت کلی قابل درک است که یک رابطه مستقیم بین کارایی و حجم مبادله‌کن در حل بهینه وجود دارد. در حقیقت می‌توان ذکر کرد که رشد کارایی با افزایش حجم آن همراه است. اما همان‌طور که در نمودار ۵ الف و ب نشان داده شده است، در هر تعداد معین مبادله‌کن به‌خصوص در کارایی بالا، با افزایش این پارامتر حرارتی، حجم بهینه کاهش می‌یابد. این موضوع بدین‌صورت قابل توجیه است که در هر تعداد مشخص مبادله‌کن با توجه به این که تعداد و طول لوله به‌ویژه در کارایی بالا تقریباً ثابت می‌ماند، سطح انتقال حرارت بهینه تغییرات چندانی نمی‌کند (نتیجه نمودار ۴ الف)، اما کاهش گام لوله به‌صورت همزمان افزایش کارایی (نتیجه نمودار ۳) و کاهش قطر پوسته و به تبع آن کاهش حجم بهینه را نتیجه می‌دهد.



نمودار ۵) توزیع حجم شبکه مبادله‌کن حرارتی برابر کارایی برای نقاط ارایه‌شده در شکل ۳؛ (a) یک کیلوگرم بر ثانیه، (b) ۱/۵ کیلوگرم بر ثانیه، (c) ۲ کیلوگرم بر ثانیه

در جهت موشکافی بیشتر اثر نانوذرات بر طراحی سیستم مورد بررسی، در این قسمت ابتدا پارامترهای طراحی برای حل‌های بهینه به‌دست‌آمده در چهار حالت مختلف مطالعه شده، با کارایی برابر با ۰/۵ در جدول ۵ لیست شده است و پس از آن آنالیز حساسیت هر یک از توابع هدف با غلظت حجمی برای حل بهینه در حالت سیال پایه و با به‌کارگیری ذرات ارایه شده است. همان‌طور که در جدول ۵ ذکر شده پارامترهایی مانند قطر لوله، آرایش لوله، طول لوله و اختصاص جریان دارای مقادیر یکسان در دو حالت با و بدون نانوذرات هستند که بی‌اثری ذرات بر این پارامترها را نتیجه می‌دهد. این در حالیست که نسبت گام لوله و تعداد لوله به‌ترتیب با افزایش و کاهش در حالت ذرات روبه‌رو است و پارامتر دیگری به نام تعداد مبادله‌کن در حالت ذرات با بهبودی همراه است و غلظت حجمی در تمامی ذرات برابر با حداکثر مقدار در نظر گرفته‌شده که چنین نتیجه می‌دهد برای دستیابی به مجموعه حل بهینه به مقادیر بالای از غلظت ذرات نیاز است. بررسی تغییرات از دیدگاه اقتصادی حاکی از اثربخشی مناسب ذرات دارد و هزینه کلی سالیانه با به‌کارگیری نانوذرات به‌صورت قابل توجه‌ای کاهش می‌یابد.

C_{min}	کمترین مقدار بین ظرفیت حرارتی سرد و گرم (WK^{-1})
C_{NP}	هزینه تامین نانوذرات (\$)
C_{op}	هزینه عملکردی (\$/year)
C_p	ظرفیت گرمایی ($J kg^{-1} K^{-1}$)
C_T	مجموع ضرایب تصحیح هزینه (-)
d	قطر لوله (متر)
D_e	قطر معادل (متر)
D_h	قطر هیدرولیکی (متر)
f	ضریب اصطکاک (-)
h	ضریب انتقال حرارت ($W m^{-2} K^{-1}$)
k_{el}	هزینه پایه برق ($\$kW^{-1} h^{-1}$)
k_{NP}	هزینه پایه نانوذرات ($\$kg^{-1}$)
L	طول لوله (متر)
N_t	تعداد لوله (-)
NTU	تعداد واحد انتقال (-)
Nu	عدد ناسلت (-)
Pr	عدد پرانتل (-)
Q	نرخ انتقال حرارت (کیلووات)
Q_{max}	ماکزیمم نرخ انتقال حرارت (کیلووات)
R	شعاع خم لوله (متر)
Re	عدد رینولدز (-)
U_0	ضریب کلی انتقال حرارت ($W m^{-2} K^{-1}$)
علامه یونانی	
μ	لزجت دینامیکی ($kgm^{-1}s^{-1}$)
$\emptyset$	غلظت حجمی ذرات (-)
Δp	افت فشار (کیلوپاسکال)
ρ	چگالی (کیلوگرم بر مترمکعب)
α	ضریب پخش حرارتی ()
ε	کارایی (-)
σ	نسبت حداقل مساحت جریان آزاد به مساحت پیشانی (-)

زیر نویس‌ها

BF	سیال پایه
NF	نانوسیال
NP	نانوذرات
NF	نانوسیال
S	فضای حلقوی
T	لوله
W	دیواره

منابع

- 1- Swamee PK, Aggarwal N, Aggarwal V. Optimum design of double pipe heat exchanger. International Journal of Heat and Mass Transfer. 2008;51(9-10):2260-2266.
- 2- Wei X, Dai C, Tai Y, Zhao F. Multi-objective optimization of double-tube once-through steam generator. Journal of Heat Transfer. 2012;134(7):071801.
- 3- Amini M, Bazargan M. Two objective optimization of heat transfer rate and total cost decrement in shell-and-tube heat exchangers. Modares Mechanical Engineering. 2014;13(15):159-168. [Persian]
- 4- Sanaye S, Hajabdollahi H. Multi-objective optimization of shell and tube heat exchangers. Applied Thermal Engineering. 2010;30(14-15):1937-1945.
- 5- Sotoodeh AF, Amidpour M, Ghazi M. Hydraulic and thermal modeling and optimization of rectangular finned multi stream plate-fin heat exchangers by genetic algorithm. Modares Mechanical Engineering. 2015;15(12):121-131. [Persian]
- 6- Hajabdollahi H. Investigating the effect of non-similar fins in thermoeconomic optimization of plate fin heat exchanger. Applied Thermal Engineering. 2015;82:152-161.

افزودن بیشتر ذرات به سیال پایه (مقادیر بالاتر غلظت) از یک سمت هدایت حرارتی موثر را افزایش می‌دهد و ضریب انتقال حرارت اجباری نانوسیال و به تبع ضریب کلی انتقال حرارت را بهبود می‌دهد و از سمت دیگر C_{min} را پایین می‌آورد و به تبع Q_{max} را کاهش می‌دهد که دو عامل فوق افزایش NTU را به همراه دارد و منجر به رشد کارایی می‌شود. نانوذرات اکسید آلومینیوم اگر چه در مقادیر ثابت غلظت، هدایت حرارتی بالاتری را نسبت به ذرات اکسید زیرکونیوم دارند، اما به دلیل بیشتر بودن C_{min} ، به کارگیری این نوع ذرات راندمان حرارتی پایین‌تر را در مقادیر ثابت غلظت حجمی ذرات نتیجه می‌دهد.

۷- نتیجه‌گیری

به منظور یافتن اثر نانوذرات بر طراحی بهینه مبادله‌کن حرارتی، بهینه‌سازی چندهدفه شبکه مبادله‌کن چندلوله‌ای، با در نظر گرفتن نانوسیال‌های مختلف شامل $CuO/Water$ ، $Al_2O_3/Water$ و $ZrO_2/Water$ به عنوان سیال سرد در سمت لوله بررسی شده است. هدف از انجام بهینه‌سازی، یافتن بیشترین کارایی و کمترین هزینه کلی سالیانه در سه نرخ جریان جرمی مختلف سمت سرد است. نتایج به دست آمده به صورت زیر قابل بیان است:

- ۱) با اضافه کردن نانوذرات به سیال پایه به خصوص در نرخ جریان جرمی‌های پایین سمت سرد علاوه بر رشد کارایی مبادله‌کن به صورت همزمان، هزینه کلی سالیانه آن نیز کاهش یافته است.
- ۲) در همه نرخ جریان جرمی مطالعه شده، تاثیرگذارترین نانوذر بر مجموعه حل بهینه مربوط به اکسیدمس است، در حالی که اکسید اکسید زیرکونیوم و اکسید آلومینیوم در مرتبه بعدی قرار دارند.
- ۳) به دلیل بهبود عملکرد حرارتی مبادله‌کن در حالت نانوذرات، برای مقادیر ثابت کارایی سطح کلی انتقال حرارت و به تبع آن حجم مبادله‌کن حرارتی کاهش یافته است و میزان بهبودی در کارایی‌های بالاتر و نانوذرات اکسیدمس محسوس‌تر دیده می‌شود.
- ۴) در حالت نانوذرات به تعداد لوله کمتر و نسبت گام لوله بالاتر نیاز است.

- ۵) پخش کردن نانوذرات در سیال پایه اثر چندانی بر طول لوله ندارد.
- ۶) آنالیز حساسیت غلظت حجمی ذرات بر عملکرد فنی اقتصادی نشان می‌دهد که با افزایش غلظت، کارایی به مقادیر بالاتری رسیده در حالی که هزینه کلی سالیانه به دلیل بالا رفتن هزینه عملکردی ناشی از افزایش افت فشار سمت لوله نیز روند صعودی پیموده است.

- ۷) استفاده از ذرات اکسیدمس برای مقادیر ثابت غلظت حجمی بیشترین کارایی و کمترین هزینه را به همراه دارد در حالی که ذرات اکسید آلومینیوم در نقطه مقابل آن قرار دارد.

تشکر و قدردانی: موردی از سوی نویسندگان ذکر نشده است.

تأییدیه اخلاقی: موردی از سوی نویسندگان ذکر نشده است.

تعارض منافع: موردی از سوی نویسندگان ذکر نشده است.

سهم نویسندگان: حسن حاج‌عبداللهی (نویسنده اول)، نگارنده مقدمه/روش‌شناسی/پژوهشگر اصلی (...%); بابک معصوم‌پور (نویسنده دوم)، پژوهشگر اصلی/تحلیلگر آماری/نگارنده بحث (...%۵۰)

منابع مالی: موردی از سوی نویسندگان ذکر نشده است.

۸- پی‌نوشت

علامه

A_0	مساحت جریان متقاطع سمت لوله (مترمربع)
b	هزینه پایه مبادله‌کن ($\$ (m^2)^{-1}$)

- 17- El-Maghlany WM, Hanafy AA, Hassan AA, El-Magid MA. Experimental study of Cu-water nanofluid heat transfer and pressure drop in a horizontal double-tube heat exchanger. *Experimental Thermal and Fluid Science*. 2016;78:100-111.
- 18- Durga Prasad PV, Gupta AVSSKS, Deepak K. Investigation of trapezoidal-cut twisted tape insert in a double pipe u-tube heat exchanger using Al_2O_3 /water nanofluid. *Procedia Materials Science*. 2015;10:50-63.
- 19- Zamzaman AH, Nasseri Oskouie Sh, Doosthoseini A, Joneidi AA, Pazouki M. Experimental investigation of forced convective heat transfer coefficient in nanofluids of Al_2O_3 /EG and CuO /EG in a double pipe and plate heat exchangers under turbulent flow. *Experimental Thermal and Fluid Science*. 2011;35(3):495-502.
- 20- Asadi AA, Heyhat MM. Investigation of using nanofluid in horizontal shell and tube heat exchangers with different sizes. *Modares Mechanical Engineering*. 2017;17(3):455-458. [Persian]
- 21- Mohammed HA, Hasan HA, Wahid MA. Heat transfer enhancement of nanofluids in a double pipe heat exchanger with louvered strip inserts. *International Communications in Heat and Mass Transfer*. 2013;40:36-46.
- 22- Hajabdollahi H, Hajabdollahi Z. Assessment of nanoparticles in thermoeconomic improvement of shell and tube heat exchanger. *Applied Thermal Engineering*. 2016;106:827-837.
- 23- Hajabdollahi H, Hajabdollahi Z. Investigating the effect of nanoparticle on thermo-economic optimization of fin and tube heat exchanger. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part E Journal of Process Mechanical Engineering*. 2017;231(6):1127-1140.
- 24- Shah RK, Sekulic DP. *Fundamentals of heat exchanger design*. Hoboken: John Wiley & Sons; 2003.
- 25- Hajabdollahi F, Hajabdollahi Z, Hajabdollahi H. Thermo-economic modeling and optimization of underfloor heating using evolutionary algorithms. *Energy and Buildings*. 2012;47:91-97.
- 26- Kakaç S, Liu H, Pramuanjaroenkij A. *Heat exchangers: Selection, rating, and thermal design*. Boca Raton: CRC Press; 2012.
- 27- Mc Ketta Jr JJ, editor. *Heat transfer design methods*. Boca Raton: CRC Press; 1991.
- 7- Ahmadi P, Hajabdollahi H, Dincer I. Cost and entropy generation minimization of a cross-flow plate fin heat exchanger using multi-objective genetic algorithm. *Journal of Heat Transfer*. 2010;133(2):021801.
- 8- Sadighi Dizaji H, Jafarmadar S, Mobadersani F. Experimental studies on heat transfer and pressure drop characteristics for new arrangements of corrugated tubes in a double pipe heat exchanger. *International Journal of Thermal Sciences*. 2015;96:211-220.
- 9- Pourahmad S, Pesteei SM. Effectiveness-NTU analyses in a double tube heat exchanger equipped with wavy strip considering various angles. *Energy Conversion and Management*. 2016;123:462-469.
- 10- Houshmand A, Sedaghat A, Salimpour MR, Zargoushi A, Mohseni I. Experimental study on heat transfer of water/ TiO_2 nanofluid in a straight tube with twisted tapes at constant wall temperature. *Journal of Solid and Fluid Mechanics*. 2015;5(3):151-158. [Persian]
- 11- Omid M, Farhadi M, Jafari M. A comprehensive review on double pipe heat exchangers. *Applied Thermal Engineering*. 2017;110:1075-1090.
- 12- Shahriari AR. Effect of magnetic field on natural convection heat transfer of nanofluid in wavy cavity with non-uniform temperature distribution. *Modares Mechanical Engineering*. 2017;17(4):29-40. [Persian]
- 13- Choi SUS, Eastman JA. Enhancing thermal conductivity of fluids with nanoparticles. *International Mechanical Engineering Congress & Exposition*, 12-17 Nov, 1995, San Francisco CA. New York City: ASME; 1995.
- 14- Huminic G, Huminic A. Application of nanofluids in heat exchangers: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2012;16(8):5625-5638.
- 15- Izadkhah MSh, Erfan Niya H, Moradkhani H. A study on the thermophysical properties of water/ethylene glycol based nanofluids using non-equilibrium molecular dynamics and computational fluid dynamics methods. *Modares Mechanical Engineering*. 2016;16(7):153-162. [Persian]
- 16- Sharma KV, Sarm PK, Azmi WH, Mamat R, Kadirgama K. Correlations to predict friction and forced convection heat transfer coefficients of water based nanofluids for turbulent flow in a tube. *International Journal of Microscale and Nanoscale Thermal and Fluid Transport Phenomena*. 2012;3(4):1-25.