

## تاثیر نانوذرات بر بهینه‌سازی چند هدفه مبادله‌کن گرمایی پوسته و لوله

بابک معصوم پور\*

محمد عطایی زاده

احسان نصوحی دهنوی

حسن حاج عبداللهی

دانش آموخته‌ی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه ولی عصر رفسنجان، رفسنجان، ایران  
دانش آموخته‌ی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه ولی عصر رفسنجان، رفسنجان، ایران  
دانش آموخته‌ی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه ولی عصر رفسنجان، رفسنجان، ایران  
دانشیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه ولی عصر رفسنجان، رفسنجان، ایران

### چکیده

در این مقاله اثر نانوذرات مختلف بر بهینه‌سازی فنی-اقتصادی مبادله‌کن گرمایی پوسته و لوله بررسی شده است. اکسید آلومینیوم ( $Al_2O_3$ ) و اکسید سیلیسیوم ( $SiO_2$ ) به عنوان نانوذرات بکار گرفته شده است. مدل‌سازی حرارتی بر اساس روش  $\epsilon$ -NTU و بهینه‌سازی توسط الگوریتم ژنتیک چندهدفه برای افزایش کارایی و کاهش هزینه کلی سالیانه استفاده شده است. جانمایی لوله، قطر لوله، نسبت گام لوله، طول لوله، تعداد لوله، نسبت فاصله‌ی بفل، نسبت برش بفل، اختصاص جریان، تعداد گذر لوله و همچنین غلظت حجمی نانوذرات به عنوان ده متغیر طراحی در نظر گرفته شده است. نتایج به صورت یک مجموعه حل (جبهه بهینه پرتو) نمایش داده شده است. نتایج نشان می‌دهد که کارایی و هزینه کلی سالیانه در حالت نانوذرات بهبود یافته است. به عنوان مثال  $4.174\%$  و  $2.028\%$  بهبود کارایی به ترتیب برای نانوذرات اکسید آلومینیوم و اکسید سیلیسیوم نسبت به حالت بدون نانوذرات در مقادیر ثابت هزینه کلی سالیانه برابر با  $5000 \text{ \$/year}$ ، مشاهده شده است. علاوه بر این اثر نانوذرات بر برخی از مشخصه‌های مبادله‌کن گرمایی مطالعه و نتایج ارائه شده است.

**واژه‌های کلیدی:** بهینه‌سازی چند هدفه، کارایی، مبادله‌کن گرمایی پوسته و لوله، نانوذرات، هزینه کلی سالیانه.

## The effect of nanoparticles on multi-objective optimization of a shell and tube heat exchanger

B. Maasoumpour  
M. Ataiezhadeh  
E. Nosoohi dehnavi  
H. Hajabdollahi

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

### Abstract

Effect of different nanoparticle on thermo-economic optimization of a shell and tube heat exchanger (STHE) is investigated in this paper. Aluminum oxide ( $Al_2O_3$ ) and silicon dioxide ( $SiO_2$ ) are used as nanoparticles. Thermal modeling by " $\epsilon$ -NTU" method and multi-objective optimization using genetic algorithm is used to increase effectiveness and reduce total annual cost. Tube arrangement, tube diameter, tube pitch ratio, tube length in each pass, tube number, baffle spacing ratio, baffle cut ratio, cold stream flow allocation, tube pass number and particles volumetric concentration are considered as ten design parameters. The results as a set of solutions (Pareto optimal front) is displayed. The results showed that efficiency and total annual cost improved in the case with nanoparticles. For example, 4.174% and 2.028%, improvement in the effectiveness are found respectively for aluminum oxide and silicon oxide compared with base fluid and for a fixed value of annual cost=5000 \$/year. Furthermore, the effect of nanoparticle on some of heat exchanger specifications is studied and results are reported.

**Keywords:** Multi-objective optimization, Effectiveness, Shell and tube heat exchanger, Nanoparticles, Total annual cost.

شد یک گروه جدید از مایع‌ها به نام نانوسیال‌ها بوجود آید که در ابتدا توسط چوی مطرح شد. به محلول حاوی ذرات جامد نانومتری در سیال پایه، نانوسیال گفته می‌شود. نانوذرات خواص ترموفیزیکی مطلوب‌تری نسبت به سیال پایه دارند و سبب بهبود خواص گرمایی سیال پایه می‌شوند. برای تعیین خواص ترموفیزیکی نانوسیال‌ها روابط متنوعی توسط محققان ارائه شده است [۱ و ۲]. استفاده از تحقیق‌های گذشته شارما و همکاران را به خود واداشت تا با جمع آوری داده‌های حاصل از مطالعات گذشته و با استفاده از رگرسیون غیرخطی، روابط واحدی را برای خواص ترموفیزیکی نانوسیال‌ها (شامل رسانایی گرمایی و لزجت) و همچنین ضرایب انتقال گرما و اصطکاک ارائه دهد، به نحوی که برای تعداد قابل توجهی از نانوذرات با دقت مناسب قابل استفاده باشد [۳]. سلیمان و همکاران ضمن ارائه خلاصه‌ای از روابط موجود برای خواص نانوسیال‌ها، به مقایسه نتایج حاصله از روابط مختلف نیز پرداخته

### ۱- مقدمه

با توجه به کاربرد مبادله‌کن‌های گرمایی در صنایع مختلف، مسئله افزایش کارایی مبادله‌کن‌ها (آهنگ انتقال گرما) اهمیت ویژه‌ای دارد. رسانایی گرمایی از جمله خواصی است که مستقیماً بروی ضریب انتقال گرما تاثیر می‌گذارد. رسانایی گرمایی بسیار بالای جامدات در مقایسه با سیالات پایه رایج همچون آب و اتیل گلیکول محققان را به سمت استفاده از ذرات جامد در این سیالات به منظور افزایش رسانایی گرمایی جریان سیال سوق می‌داد. البته استفاده از ذرات جامد در اندازه میلیمتری و میکرومتری هرچند که رسانایی گرمایی جریان سیال را افزایش می‌داد اما مشکلاتی از قبیل افت فشار بالاتر، ته نشینی ذرات جامد و گرفتگی مجاری را نیز به همراه داشت. تحقیقات به منظور بهبود مشکلات ذکر شده ادامه داشت تا پیشرفت‌های اخیر در نانو تکنولوژی و امکان تولید ذرات جامد در اندازه معمول کوچکتر از ۱۰۰ نانومتر منجر

\* نویسنده مکاتبه کننده، آدرس پست الکترونیکی: m94189013@post.vru.ac.ir

است [۴].

هزینه کلی سالیانه) را به همراه دارد. همچنین آن‌ها نتیجه‌گیری کردند که مبادله‌کن گرمایی در حضور نانوذرات علاوه بر سطح انتقال گرما، حجم کمتری نیاز دارد.

این مقاله، تاثیر نانوذرات مختلف شامل اکسید آلومینیوم و اکسید سیلیسیوم را بر بهینه‌سازی چندهدفه مبادله‌کن گرمایی پوسته و لوله بررسی می‌کند. بهینه‌سازی توسط الگوریتم ژنتیک با مرتب سازی ناغالب (NSGA-II) برای افزایش کارایی و کاهش هزینه کلی سالیانه (توابع هدف متعارض) استفاده شده است. جانمایی لوله، قطر لوله، نسبت گام لوله، طول لوله، تعداد لوله، نسبت فاصله بفل، نسبت برش بفل، اختصاص جریان، تعداد گذر لوله‌ها و غلظت حجمی نانوذرات به عنوان ده متغیر طراحی انتخاب شده است و ایمنی سازه‌ای به عنوان قید در نظر گرفته شده است. در پایان آنالیز حساسیت برخی از پارامترهای طراحی بر توابع هدف در حالات با و بدون نانوذرات مطالعه و نتایج بررسی شده است.

## ۲- مدل‌سازی

با توجه به اینکه مبادله‌کن انتخاب شده بر اساس استاندارد TEMA و شکل پوسته از نوع E می‌باشد، کارایی مبادله‌کن گرمایی از رابطه زیر بدست می‌آید [۱۵]:

$$\varepsilon = \frac{2}{(1-C^*) + \sqrt{(1+C^*)^2 \coth\left(\frac{NTU}{2} \sqrt{(1+C^*)^2}\right)}} \quad (1)$$

که در آن NTU تعداد واحد انتقال و  $C^*$  نسبت ظرفیت گرمایی هستند و به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$NTU = \frac{U_0 A_0}{C_{\min}} \quad (2)$$

$$C^* = C_{\min} / C_{\max} \quad (3)$$

که  $A_0$  و  $U_0$  به ترتیب مساحت کلی انتقال گرما و ضریب کلی انتقال گرما و به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$A_0 = A_1 = \pi L d_0 N_t \quad (4)$$

$$U_0 = \frac{1}{\frac{1}{h_0} + R_{0,f} + \frac{d_0 \ln(d_o/d_i)}{2k_w} + \frac{d_o}{d_i} R_{i,f} + \frac{d_o}{d_i} \frac{1}{h_i}} \quad (5)$$

که در آن  $N_t$ ،  $d_0$ ،  $L$ ،  $R_{i,f}$ ،  $R_{0,f}$  و  $k_w$  به ترتیب تعداد لوله، قطر خارجی لوله، طول لوله، مقاومت رسوب سمت لوله، مقاومت رسوب سمت پوسته و مقاومت حرارتی جداره لوله تعریف می‌شوند. همچنین  $h_0$  و  $h_i$  به ترتیب ضریب انتقال گرمای جابجایی در سمت پوسته و لوله می‌باشد که در ادامه توضیح داده شده است.

### ۲-۱- سمت لوله

در کار حاضر به منظور بهبود مشخصه‌های انتقال گرمای مبادله‌کن گرمایی از نانوذرات مختلف پخش شده در سیال پایه آب در سمت لوله استفاده شده است. نانوذرات مورد استفاده اکسید آلومینیوم ( $Al_2O_3$ ) و اکسید سیلیسیوم ( $SiO_2$ ) می‌باشد. در پژوهش انجام شده فرض شده که نانوذرات با سیال پایه به خوبی مخلوط شده است. خواص نانوسیال-ها از روابط زیر محاسبه می‌شود [۳]:

$$\rho_{NF} = (1-\phi)\rho_{BF} + \phi\rho_{NP} \quad (6)$$

با تغییر خواص ترموفیزیکی، مشخصه‌های گرمایی و هیدرولیکی جریان سیال نیز تغییر می‌کند، بکارگیری نانوسیال در مبادله‌کن‌های گرمایی مختلف توسط محققان به صورت عددی و آزمایشگاهی بررسی شده است. تاثیرگذاری استفاده از نانوذرات بر مشخصه‌های انتقال گرما در یک مبادله‌کن گرمایی خورشیدی به صورت آزمایشگاهی و عددی توسط ابراهیم نیا و همکارانش مطالعه شده است [۵]. پراساد و همکاران به مطالعه آزمایشگاهی جریان نانوسیال گذرا از یک مبادله‌کن گرمایی دولوله‌ای U شکل با نوار برش خورده دوزنقه‌ای نصب شده بر روی لوله داخلی پرداختند و نشان دادند که استفاده از نانوذرات اکسید آلومینیوم اثر قوی بر بهبود عملکرد کلی مبادله‌کن گرمایی دارد [6]. اثر استفاده از نانوذرات بر بهینه‌سازی یک هدفه مبادله‌کن گرمایی پوسته و لوله توسط آزاد و همکاران بررسی شده و نتایج آن‌ها کاهش محسوس هزینه (تابع هدف) را نشان می‌داد [7]. الیاس و همکاران به مطالعه اثر شکل‌های مختلف نانوذرات شامل استوانه‌ای، آجری، بشقابی و سهموی بر انتقال گرما و عملکرد مبادله‌کن گرمایی پرداختند [۸]. نتایج آن‌ها تایید می‌کرد که بهترین عملکرد حرارتی در حالت نانوذرات استوانه‌ای شکل بدست آمده است. ژائو و همکاران استفاده از نانوذرات در داخل کانال تحت رژیم جریان لایه‌ای را مورد پژوهش قرار دادند و چنین گزارش کردند که اگر عملکرد حرارتی کانال ثابت بماند توان مصرفی در حضور نانوذرات کاهش می‌یابد [۹]. شاهر و همکاران اثر پارامترهای عملکردی نانوسیال شامل دبی جریان جرمی، غلظت ذرات و همچنین نوع نانوذره را در مبادله‌کن گرمایی پوسته و لوله بررسی کردند، یافته نتیجه می‌داد که بیشترین و کمترین تاثیر در کارایی به ترتیب مربوط به نانوذرات ZnO و  $SiO_2$  می‌باشد [۱۰]. انتقال گرما و افت فشار نانوسیال آب-مس در یک مبادله‌کن گرمایی دولوله‌ای مجهز به قابلیت چرخش لوله داخلی تحت جریان آشفته به صورت آزمایشگاهی توسط مقالاتی بررسی شده است [۱۱]. خروجی آن‌ها شرح داد که پخش کردن نانوذرات به سیال پایه باعث بهبود کارایی مبادله‌کن گرمایی 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 جزئی افت فشار نسبت به حالت بدون نانوذرات در مبادله‌کن می‌شود. از دیگر نتایج آن‌ها می‌توان به رابطه مستقیم سرعت چرخش لوله داخلی با افت فشار و کارایی مبادله‌کن گرمایی اشاره نمود. الیاس و همکاران به منظور بهبود بازده حرارتی مبادله‌کن گرمایی پوسته و لوله سیستم تولید همزمان برق و گرما از نانوذرات  $Al_2O_3$  و CuO استفاده کردند [۱۲]. طبق نتایج آنها بازده حرارتی برای نانوذرات  $Al_2O_3$  و CuO به ترتیب ۱۱٪ و ۱۷٪ بهبود پیدا کرده بود. تغییر مشخصه‌های انتقال گرمای مبادله‌کن گرمایی پوسته و لوله در حضور نانوذرات نقره توسط گادسون و همکاران بررسی و نشان دادند که ضریب انتقال گرما و کارایی حداکثر به ترتیب ۱۲٪ و ۶٫۴٪ افزایش یافته است [۱۳]. بهینه‌سازی فنی و اقتصادی مبادله‌کن گرمایی پره و لوله با شبیه‌سازی نانوذرات  $Al_2O_3$  توسط حاج‌عبداللهی و همکاران بررسی شده است [۱۴]. در پژوهش یاد شده کارایی و هزینه کلی سالیانه توابع هدف را شامل می‌شد. یافته‌ها نتیجه می‌داد که استفاده از نانوسیال اکسید آلومینیوم-آب به جای سیال پایه در مبادله‌کن گرمایی بهبود مجموعه حل بهینه (منحنی کارایی در برابر

$$h_{id} = \left( j_s C_p \frac{\dot{m}}{A_s} \right) \left( \frac{k}{C_p \mu_s} \right)^{2/3} \left( \frac{\mu_s}{\mu_w} \right)^{0.14} \quad (16)$$

که در آن  $\dot{m}$  و  $A_s$  به ترتیب دبی جریان جرمی، مساحت جریان متقاطع در ردیف مرکزی لوله‌ها و نسبت لزجت توده‌گی سیال به لزجت در دمای دیواره می‌باشد. زیرنویس  $s$  مربوط به سمت پوسته است. همچنین  $j$  ضریب کلبرن ایده‌آل به صورت زیر تعریف می‌شود [۱۵]:

$$j_s = a_1 \left( \frac{1.33}{P_i/d_o} \right)^{a_1} (Re_s)^{a_2} \quad (17)$$

$$a = \frac{a_3}{1 + 0.14(Re_s)^{a_4}} \quad (18)$$

$$A_s = \frac{D_s}{P_i} (P_i - d_o) BS \quad (19)$$

$$Re_s = \frac{d_o \dot{m}}{\mu_s A_s} \quad (20)$$

که در آن  $BS$  و  $P_i$  به ترتیب فاصله بفل و گام لوله می‌باشد. ثابت  $a_1 - a_4$  با توجه به آرایش لوله و عدد رینولدز بدست می‌آید. علاوه بر این  $D_s$  قطر پوسته و از رابطه زیر تخمین زده شده است [۱۶]:

$$D_s = P_i \sqrt{4CL \times N_i / (\pi \times CTP)} \quad (21)$$

که  $CL$  ثابت جانمایی لوله و برای جانمایی ۳۰ و ۶۰ برابر ۰/۷۸ و جانمایی ۴۵ و ۹۰ برابر با مقدار واحد می‌باشد. همچنین  $CTP$  ثابت گذر لوله و دارای مقادیر ۰/۹۳ و ۰/۸۷ بترتیب برای یک گذر لوله و دو گذر لوله می‌باشد.

ضریب انتقال گرمای سمت پوسته با استفاده از ضریب انتقال گرمای ایده‌آل و ضرایب تصحیح، از رابطه زیر محاسبه شده است [۱۶]:

$$h_s = h_{id} J_c J_p J_b J_r \quad (22)$$

که در آن  $J_c$  ضریب تصحیح مربوط به شکل‌بندی بفل (فاصله بین بفل‌ها و نسبت برش بفل) است.  $J_r$  ضریب تصحیح ناشی از نشت سیال بین بفل و لوله و همچنین بین بفل و پوسته می‌باشد.  $J_b$  ضریب تصحیح ناشی از حرکت سیال بین دایره مماس بر مجموعه لوله و پوسته است.  $J_s$  ضریب تصحیح بواسطه تفاوت بین فاصله بفل در ورودی و در خروجی نسبت به فاصله سایر بفل‌ها و همچنین  $J_r$  ضریب تصحیح در صورت وجود گردان‌دایمانی (در جریان لایه‌ای) باید لحاظ شود. ضریب اصطکاک سمت پوسته به صورت زیر تعریف شده است [۱۶]:

$$f_s = b_1 \left( \frac{1.33}{P_i/d_o} \right)^{b_1} (Re_s)^{b_2} \quad (23)$$

که در آن ثوابت  $b_1$  و  $b_2$  با توجه به عدد رینولدز جریان و آرایش لوله‌ها بدست می‌آید.

افت فشار سمت لوله ناشی از افت فشار در ورودی و خروجی مبادله‌کن  $(\Delta p_{i-o})$ ، افت فشار جریان متقاطع  $(\Delta p_{cr})$  و افت فشار جریان در پنجره‌ها  $(\Delta p_w)$  می‌باشد و از رابطه زیر قابل محاسبه است [۱۶]:

$$\Delta p_s = \Delta p_{cr} + \Delta p_{i-o} + \Delta p_w \quad (24)$$

### ۳- توابع هدف، متغیرهای طراحی، قید

در طراحی مبادله‌کن گرمایی هزینه و کارایی بسیار مهم می‌باشد. افزودن نانوذرات از یک طرف باعث بهبودی ضریب انتقال گرما و به تبع آن کارایی مبادله‌کن گرمایی را بهتر می‌کند و از طرف دیگر باعث

$$C_{PNF} = \frac{(1-\phi)(\rho C_p)_{BF} + \phi(\rho C_p)_{NP}}{(1-\phi)\rho_{BF} + \phi\rho_{NP}} \quad (7)$$

$$\frac{k_{NF}}{k_{BF}} = 0.8938(1+\phi)^{1.37} \left( 1 + \frac{T_{NF}}{70} \right)^{0.277} \left( 1 + \frac{d_{NP}}{150} \right)^{-0.0336} \left( \frac{\alpha_{NP}}{\alpha_{BF}} \right)^{0.01737} \quad (8)$$

$$\frac{\mu_{NF}}{\mu_{BF}} = C_1(1+\phi)^{11.3} \left( 1 + \frac{T_{NF}}{70} \right)^{-0.038} \left( 1 + \frac{d_{NP}}{170} \right)^{-0.061} \quad (9)$$

که در آن  $\rho$ ،  $\mu$ ،  $k$  و  $C_p$  خواص ترموفیزیکی و به ترتیب چگالی، لزجت، رسانایی گرمایی و ظرفیت حرارتی تعریف می‌شود. همچنین  $\phi$ ،  $\alpha$ ،  $T$ ،  $d$  و  $C_1$  به ترتیب غلظت حجمی ذرات، پخشندگی گرمایی، قطر نانوذرات، دما و مقدار ثابتی نوع نانوذره می‌باشد. بعلاوه زیرنویس‌های  $BF$  و  $NF$  و  $NP$  بترتیب مربوط به نانو سیالات، سیال پایه و نانوذرات می‌باشد. دقت شود که روابط (8) و (9) برای سیال پایه آب و محدوده  $20 < T_{NF} < 70$ ،  $20 < d_p < 100$  و اعتبار دارد.

روابط مربوط به عدد ناسلت و ضریب اصطکاک به نوع نانوذرات و محدوده جریان بستگی دارد. در کار حاضر، از روابط زیر به منظور تخمین عدد ناسلت و ضریب اصطکاک فایننگ استفاده شده است [۲]:

$$Nu_{NF} = 0.065(Re_{NF}^{0.65} - 60.22)(1 + 0.0169\phi^{0.15}) Pr_{NF}^{0.542} \quad (10)$$

$$f_{NF} = 0.3164 Re_{NF}^{-0.25} \left( \frac{\rho_{NF}}{\rho_{BF}} \right)^{0.797} \left( \frac{\mu_{NF}}{\mu_{BF}} \right)^{0.108} \quad (11)$$

که در آن  $Pr$  عدد پرانتل می‌باشد. دقت شود روابط (10) و (11) برای محدوده  $4000 < Re < 16000$  اعتبار دارد. علاوه بر این، عدد رینولدز به صورت زیر تعریف شده است:

$$Re = \frac{4\dot{m}}{\pi d_i \mu} (n_p / N_i) \quad (12)$$

که  $\dot{m}$  و  $n_p$  به ترتیب دبی جریان جرمی و تعداد گذر لوله است. همچنین زیرنویس  $t$  مربوط به سمت لوله می‌باشد.

در نهایت ضریب انتقال گرمای سمت لوله از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$h_{NF} = (Nu_{NF} \times k_{BF}) / d_i \quad (13)$$

افت فشار سمت لوله ناشی از افت فشار اصطکاک جریان، افت فشار ورودی و افت فشار خروجی می‌باشد و از رابطه زیر بدست می‌آید [۱۴]:

$$\Delta p_i = \frac{\dot{m} \times n_p}{2\rho A_o^2} \left[ \frac{4fL}{d_i} + (1 - \sigma^2 + k_e) - (1 - \sigma^2 - k_e) \right] \quad (14)$$

که در آن  $k_e$ ،  $k_c$  و  $\sigma$  به ترتیب ضریب افت فشار ورودی، ضریب افت فشار خروجی و نسبت حداقل مساحت جریان آزاد به مساحت ورودی می‌باشد. علاوه بر این،  $A_o$  بیانگر نسبت مساحت سطح مقطع جریان سمت لوله بر تعداد گذر لوله و به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$A_o = \frac{\pi d_i^2}{4} (N_i / n_p) \quad (15)$$

### ۲-۲- سمت پوسته

در کار حاضر برای محاسبه ضرایب انتقال گرما و افت فشار سمت پوسته از روش Bell-Delaware استفاده شده است. در این روش ابتدا ضریب انتقال گرمای جریان ایده‌آل (جریان عمود بر مجموعه لوله‌ها) محاسبه شده و سپس توسط چند ضریب تصحیح می‌شود. ضریب انتقال گرمای ایده‌آل از رابطه زیر بدست می‌آید [۱۵]:

#### ۴- مورد مطالعاتی

در کار حاضر روغن با دبی  $8 \text{ kg/s}$  و دمای  $78.3^\circ\text{C}$  به عنوان ورودی جریان گرم و آب تازه با دبی  $3 \text{ kg/s}$  و دمای  $30^\circ\text{C}$  به عنوان ورودی جریان سرد می‌باشد. همچنین نانوذرات مختلف شامل اکسید آلومینیوم و اکسید سیلیسیوم با قطر  $45 \text{ nm}$  به صورت مجزا در سمت لوله استفاده شده است. خواص ترموفیزیکی برای هر دو سمت به عنوان تابعی از دما و در متوسط دمای ورود و خروج محاسبه شده است. جدول ۲ پارامترهای ورودی برای مدل‌سازی و جدول ۳ خواص ترموفیزیکی دو نوع نانوذرات را نشان می‌دهد.

جدول ۲- ثوابت فرض شده برای پارامترهای ورودی در بهینه سازی

ضریب رسوب روغن ( $\text{m}^2 \text{ W/K}$ )	۰/۰۰۰۱۵
ضریب رسوب آب ( $\text{m}^2 \text{ W/K}$ )	۰/۰۰۰۰۷۴
نرخ بهره	۰/۱۰
عمر تجهیزات (year)	۱۰
ارزش الکتریکی ( $\$/\text{MW h}$ )	۰/۰۲
ساعات کاری در سال (h)	۵۰۰۰
بازده آیزونتروپیک پمپ	۰/۶۰

جدول ۳- خواص ترموفیزیکی نانوذرات مطالعه شده در این پژوهش

خاصیت ترموفیزیکی	نانوذرات $\text{Al}_2\text{O}_3$ [۲]	نانوذرات $\text{SiO}_2$ [۳]
رسانایی گرمایی ( $\text{W/m K}$ )	۳۶	۱/۴
چگالی ( $\text{kg/m}^3$ )	۳۶۰۰	۲۲۲۰
ظرفیت گرمایی ( $\text{J/kg K}$ )	۷۶۵	۷۴۵

#### ۵- روند حل

در ابتدا پارامترهای طراحی و محدوده تغییرات 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 بر اساس روند زیر انجام شده تا در نهایت مقادیر کارایی و هزینه کلی سالیانه به عنوان دو تابع هدف برای آن عضو بدست آید.

۱- در فرض اولیه هر دو دمای خروجی سمت گرم سمت سرد با دماهای ورودی برابر فرض شده است.

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

۳- عدد رینولدز و ضریب انتقال گرما برای هر جریان محاسبه شده و پس از آن ضریب کلی انتقال گرما،  $\text{NTU}$  و کارایی مبادله‌کن گرمایی بدست آمده است.

۴- با توجه به کارایی، دمای خروجی هر جریان محاسبه و جایگزین فرض اولیه شده و این روند از گام دوم تکرار شده و تا همگرایی ادامه دارد. فلوجارت مدل‌سازی در شکل ۱ نشان داده شده است.

پس از تحلیل نهایی مبادله‌کن و بدست آوردن مقادیر کارایی و هزینه کلی سالیانه، این دو مقدار به عنوان خروجی مدل‌سازی به الگوریتم بهینه‌سازی داده می‌شوند. بدست آوردن بهترین مجموعه حل بهینه توسط الگوریتم تا رسیدن به شرط توقف ادامه دارد. قابل ذکر است که برنامه بهینه‌سازی برای هر حالت مطالعه شده، سه بار اجرا شده و پس

افزایش افت فشار در مبادله‌کن و به تبع آن هزینه‌های عملکردی را افزایش می‌دهد. در حقیقت می‌توان گفت استفاده از نانوذرات در سیال پایه اثرات متناقضی بر مبادله‌کن گرمایی دارد. برای بررسی این اثرات به صورت همزمان، از تکنیک الگوریتم ژنتیک با در نظر گرفتن کارایی و هزینه کلی سالیانه به عنوان توابع هدف استفاده شده است. کارایی مبادله‌کن از طریق رابطه (۱) بدست می‌آید.

در این مطالعه هزینه کلی سالیانه شامل هزینه اولیه سالیانه و هزینه‌های عملکردی (هزینه برق مصرفی جهت پمپاژ سیال‌های سرد و گرم) در نظر گرفته شده و به صورت زیر محاسبه می‌شود [۱۷]:

$$\text{TAC}(\$/\text{year})=a_i C_{in}+C_{op} \quad (25)$$

$$a_i=1/1-(1+i)^{-n} \quad (26)$$

که در آن  $a_i$  و  $i$  به ترتیب ضریب سالیانه کننده، نرخ بهره و عمر تجهیزات می‌باشد.

$C_{in}$  هزینه اولیه مبادله‌کن گرمایی و با توجه به اینکه لوله‌ها و پوسته هر دو از جنس stainless steel می‌باشد، از رابطه زیر بدست می‌آید [۱۸]:

$$C_{in}=8500+409A_i^{0.85}+C_{np} \quad (27)$$

که در آن  $C_{np}$  هزینه مربوط به تامین نانوذرات (هزینه خرید نانوذرات) جهت استفاده در مبادله‌کن گرمایی است.

$C_{op}$  مربوط به هزینه برق مصرفی جهت پمپاژ جریان می‌باشد و به صورت زیر محاسبه شده است [۱۷]:

$$C_{op}=\left(\left(\frac{\dot{m}}{\rho\eta_p}\Delta P\right)_t+\left(\frac{\dot{m}}{\rho\eta_p}\Delta P\right)_s\right)\tau\varphi_e \quad (28)$$

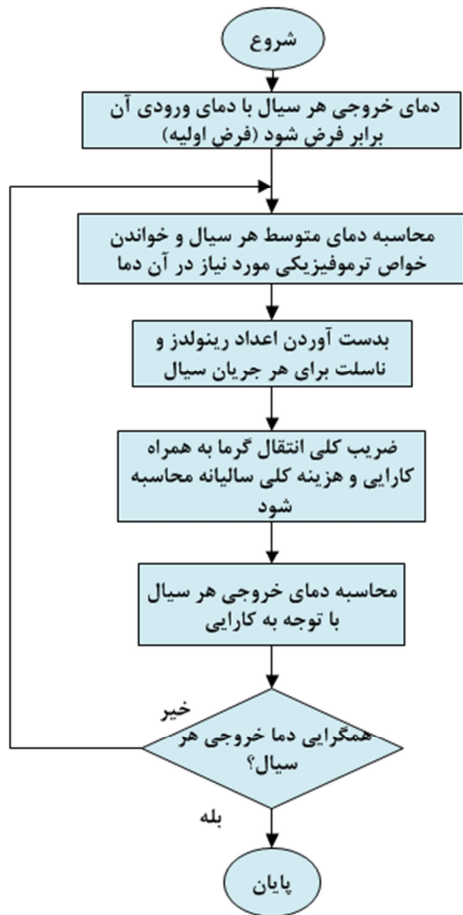
که  $\tau$  و  $\varphi_e$  به ترتیب بازده آیزونتروپیک پمپ، ساعات کاری در طول سال و ارزش الکتریکی می‌باشد.

در پژوهش حاضر جانمایی لوله، قطر لوله، نسبت گام لوله، طول لوله در هر گذر، تعداد لوله، نسبت فاصله بفل، نسبت برش بفل، اختصاص جریان، تعداد گذر لوله و غلظت حجمی ذرات به عنوان ده پارامتر طراحی در نظر گرفته شده است. محدوده تغییرات پارامترها در جدول ۱ نشان داده شده است. علاوه بر این در جهت اطمینان بخشی به سازه مبادله‌کن گرمایی نسبت طول لوله به قطر پوسته به عنوان قید و محدوده آن به صورت زیر در الگوریتم بهینه‌سازی لحاظ شده است.

$$3<L/D_s<12 \quad (29)$$

جدول ۱- محدوده تغییرات پارامترهای طراحی

متغیر طراحی	حد پایین	حد بالا
جانمایی لوله ( $^\circ$ )	۳۰-۴۵-۹۰	-
قطر داخلی لوله (m)	۰/۰۱۳۰	۰/۰۱۷۳
نسبت گام لوله	۱/۲۵	۲
طول لوله در هر گذر (m)	۳	۸
تعداد لوله	۱۰۰	۸۰۰
نسبت فاصله بفل	۰/۲	۱/۴
نسبت برش بفل	۰/۱۹	۰/۳۲
اختصاص جریان سرد	سمت لوله	سمت پوسته
تعداد گذر لوله	۱	۲
غلظت حجمی ذرات	۰	۰/۰۴



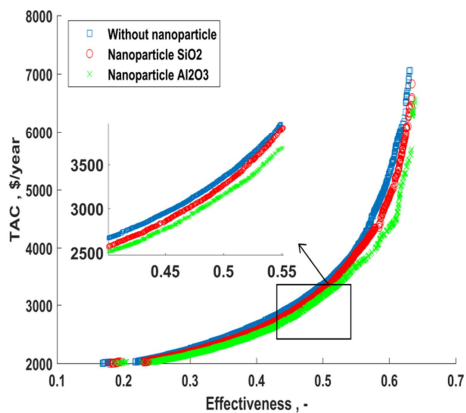
شکل ۱- فلوچارت مدل سازی

از آن، نتایج بدست آمده بر اساس مفهوم ناغالب بودن رتبه بندی مجدد شده و بهترین رتبه (رتبه اول) به عنوان نتایج بهینه نهایی در نظر گرفته شده است. بهینه سازی توسط الگوریتم ژنتیک چندهدفه برای در نظر گرفتن توابع هدف به صورت همزمان و با پارامترهای ژنتیک شامل اندازه جمعیت، تعداد تکرار، احتمال ادغام، احتمال جهش و احتمال نخبه گرایی بترتیب برابر با ۰/۱۵۰، ۰/۱۰۰۰، ۰/۰۸، ۰/۵۵ و ۰/۰۳۵ انجام شده است.

## ۶- بحث و نتایج

نتایج بهینه بدست آمده از الگوریتم ژنتیک به صورت یک مجموعه حل که جبهه بهینه پرتو نامیده می شود در شکل ۲ قابل مشاهده است. شکل ۲ همچنین یک تعارض آشکار بین کارایی و هزینه کلی سالیانه را نشان می دهد. در واقع هر تغییر در هندسه مبادله کن گرمایی که منجر به افزایش کارایی شود، افزایش هزینه را همراه دارد (و بالعکس). علاوه بر این شکل ۲ برای بهینه سازی یک هدفه با پارامترهای طراحی و قید ذکر شده نیز قابل استفاده می باشد. به عنوان مثال در صورتی که تابع هدف کارایی باشد، نقطه دارای بیشترین کارایی در مجموعه حل بدست آمده، به عنوان حل بهینه می باشد.

همانطور که از شکل ۲ قابل مشاهده است، به صورت کلی جبهه بهینه پرتو در حالات نانو ذرات غالب بر جبهه بهینه پرتو در حالت بدون نانو ذرات می باشد که بیانگر این موضوع است علاوه بر بهبود عملکرد حرارتی مبادله کن (افزایش کارایی مبادله کن)، هزینه کلی سالیانه آن نیز به صورت همزمان کاهش یافته است. برای داشتن بینش بهتر نسبت به این موضوع برای چند نقطه نمونه ارائه شده در شکل ۲، مقادیر توابع هدف و همچنین میزان بهبودی آن ها به صورت مجزا محاسبه شده است.



شکل ۲- جبهه بهینه پرتو برای حالات مختلف مطالعه شده

جدول ۴ مقادیر هزینه کلی سالیانه و همچنین میزان بهبودی آن را برای چند نقطه نمونه با کارایی ثابت نشان می دهد. به عنوان نمونه در کارایی ثابت برابر با ۵۰٪، هزینه کلی سالیانه در غیاب نانو ذرات دارای مقدار ۳۳۵۵٫۸ \$/year است که این هزینه با اضافه کردن ذرات

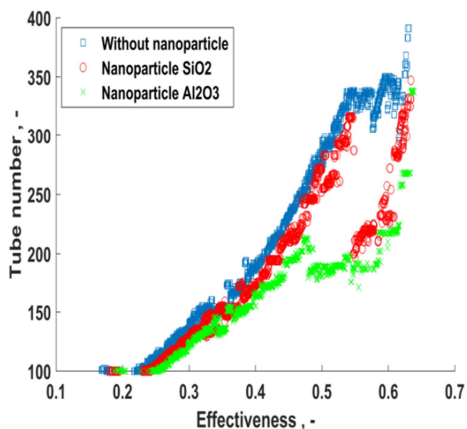
نانومتري اکسید آلومینیوم و اکسید سیلیسیم به ترتیب به مقدار \$/year ۳۱۵۵ و \$/year ۳۲۷۲/۸ نزول پیدا می‌کند. همچنین درصد کاهش هزینه کلی سالیانه در نقاط نمونه ذکر شده به ترتیب برابر با ۲/۸۵ و ۷/۱۴ می‌باشد.

جدول ۵ مقادیر کارایی و همچنین میزان بهبودی آن را برای چند نقطه نمونه با هزینه کلی سالیانه ثابت نشان می‌دهد. به عنوان نمونه برای مقدار هزینه کلی سالیانه \$/year ۵۰۰۰، کارایی در حالت بدون نانوذرات برابر با ۰/۵۹۱۸ است که با بکارگیری ذرات نانومتري این پارامتر برای نانوذرات اکسید آلومینیوم و اکسید سیلیسیم به ترتیب به مقدار ۰/۶۱۶۵ و ۰/۶۰۳۸ افزایش پیدا می‌کند. همچنین درصد رشد کارایی نسبت به حالت بدون نانوذرات برای نقاط نمونه ذکر شده به ترتیب برابر با ۴/۱۷۴ و ۲/۰۲۸ می‌باشد که کارآمدی نانوذرات در افزایش راندمان حرارتی مبادله‌کن ها را تایید می‌کند. با توجه به نتایج ارائه شده در جداول ۴ و ۵، مشخص می‌شود که به طور کلی استفاده از نانوذرات در سیال پایه باعث بهبودی در پهنه‌سازی فنی و اقتصادی مبادله‌کن گرمایی پوسته و لوله می‌شود و میزان بهبودی در حالت نانوذرات  $Al_2O_3$  نسبت به حالت نانوذرات  $SiO_2$  بیشتر می‌باشد. البته با توجه به بالا بودن رسانایی گرمایی نانوذرات اکسید آلومینیوم نسبت به نانوذرات اکسید سیلیسیم، بهبودی بیشتر نتایج پهنه در این نوع نانوذره قابل پیش‌بینی بود. تاثیرپذیری نتایج پهنه در حضور نانوذرات ریشه در تغییرات خواص سیال دارد و ممکن است به این دلیل باشد با توجه به اینکه که ضریب رسانایی گرمایی نانوذرات در مقایسه با سیال پایه بسیار بالا می‌باشد، استفاده از نانوذرات باعث افزایش رسانایی گرمایی سیال می‌شود و با توجه به رابطه (۱۳) با افزایش رسانایی گرمایی سیال، ضریب انتقال گرما افزایش یافته و به تبع آن کارایی مبادله‌کن گرمایی افزایش می‌یابد.

شکل ۳ توزیع تعداد لوله در برابر کارایی برای مجموعه حل ارائه شده در شکل ۲ را نمایش می‌دهد. در شکل ۳ به وضوح قابل مشاهده است که با افزایش تعداد لوله کارایی مبادله‌کن گرمایی افزایش می‌یابد. در حقیقت می‌توان ذکر نمود که مبادله‌کن برای داشتن مقادیر بالای کارایی، به تعداد لوله بیشتری نیاز دارد. قابل بیان است که با افزایش تعداد لوله، سطح انتقال گرما رشد کرده و به تبع آن تعداد واحد انتقال و کارایی مبادله‌کن افزایش می‌یابد. از دیگر نتایج قابل استنتاج از شکل ۳ می‌توان به کاهش تعداد لوله در حالت نانوذرات نسبت به حالت بدون آن برای مقادیر ثابت کارایی عنوان کرد. از آنجایی که استفاده از نانوذرات باعث افزایش ضریب انتقال گرمای اجباری سمت لوله و به تبع آن رشد ضریب کلی انتقال گرما و نهایتاً افزایش NTU و کارایی مبادله‌کن گرمایی می‌شود، بنابراین برای داشتن مقادیر ثابت کارایی نسبت به حالت بدون نانوذرات احتیاج به سطح تبادل حرارتی کمتری بوده و به تبع آن تعداد لوله کمتری نیاز می‌باشد. همچنین با توجه به اینکه نانوذرات  $Al_2O_3$  نسبت به نانوذرات  $SiO_2$  تاثیر بیشتری در بهبود عملکرد حرارتی و کارایی مبادله‌کن گرمایی دارند (شکل ۲)، کمترین تعداد لوله مربوط به این نوع نانوذره است.

شکل ۴ توزیع طول لوله در برابر کارایی مبادله‌کن گرمایی برای مجموعه حل بدست آمده را نمایش می‌دهد. بر اساس این شکل، اضافه کردن نانوذرات به سیال پایه تاثیری چندانی بر روی طول لوله ندارد و این پارامتر با پراکنده کردن نانوذرات در سیال پایه چندان تحت تاثیر قرار نمی‌گیرد. با افزایش طول لوله، ضریب انتقال گرمای اجباری ثابت بوده (به غیر از رژیم جریان لایه‌ای)، اما سطح انتقال گرما طبق رابطه (۴) افزایش یافته و در نهایت منجر به رشد NTU و کارایی مبادله‌کن گرمایی می‌شود. نیاز به طول لوله بیشتر در مقادیر بالای کارایی قابل مشاهده در شکل ۴، این موضوع را نیز تایید می‌کند.

شکل ۵ توزیع نسبت گام لوله در برابر کارایی برای مجموعه حل ارائه شده در شکل ۲ را نشان می‌دهد. با توجه به اینکه نسبت گام لوله از تقسیم گام لوله بر قطر خارجی بدست می‌آید، وابسته به تغییرات گام و قطر خارجی لوله ممکن است که نسبت گام لوله در حالت نانوذرات نسبت به حالت بدون نانوذرات بزرگتر یا کوچکتر بدست آید. به صورت کلی می‌توان ذکر کرد که با کاهش گام لوله قطر پوسته کاهش یافته و سرعت سیال ورودی به پوسته افزایش



شکل ۳- توزیع تعداد لوله در برابر کارایی برای مجموعه حل ارائه شده در شکل ۲

جدول ۴- مقادیر هزینه کلی سالیانه و میزان بهبودی در حالت

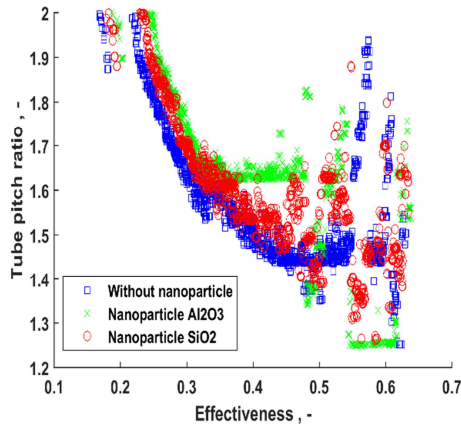
نانوذرات برای چند نقطه نمونه با کارایی ثابت

کارایی (-)	هزینه کلی سالیانه (\$/year)				درصد کاهش هزینه (-)
	بدون نانوذرات	نانوذرات $SiO_2$	نانوذرات $Al_2O_3$	نانوذرات $Al_2O_3$	
۳۰٪	۲۲۵۲٫۸	۲۱۹۵	۲۱۸۵	۴٫۲۰۸	۲٫۵۶۶
۴۰٪	۲۶۶۰٫۷	۲۵۶۳٫۳	۲۵۰۴٫۸	۵٫۸۵۹	۳٫۶۶۱
۵۰٪	۳۳۵۵٫۸	۳۲۷۲٫۸	۳۱۵۵	۵٫۹۸۴	۲٫۴۷۳

جدول ۵- مقادیر کارایی و میزان بهبودی در حالت نانوذرات برای

چند نقطه نمونه با هزینه کلی سالیانه ثابت

هزینه کلی سالیانه (\$/year)	کارایی (-)				درصد رشد کارایی (-)
	بدون نانوذرات	نانوذرات $SiO_2$	نانوذرات $Al_2O_3$	نانوذرات $Al_2O_3$	
۳۰۰۰	۰٫۴۵۷۲	۰٫۴۶۸۵	۰٫۴۸۰۱	۵٫۰۰۹	۳٫۴۷۳
۴۰۰۰	۰٫۵۵۰۵	۰٫۵۵۶۷	۰٫۵۷۸۹	۵٫۱۵۹	۱٫۱۲۶
۵۰۰۰	۰٫۵۹۱۸	۰٫۶۰۳۸	۰٫۶۱۶۵	۴٫۱۷۴	۲٫۰۲۸



شکل ۵- توزیع نسبت گام لوله در برابر کارایی برای مجموعه حل ارائه شده در شکل ۱

### ۸- نمادها

$a_f$	ضریب سالیانه کننده (-)
$A_0$	مساحت جریان متقاطع سمت لوله ( $m^2$ )
$C_{max}$	بیشترین مقدار بین ظرفیت گرمایی سرد و گرم ( $W/K$ )
$C^*$	نسبت ظرفیت حرارتی (-)
$C_{min}$	کمترین مقدار بین ظرفیت گرمایی سرد و گرم ( $W/K$ )
$C_{in}$	هزینه سرمایه گذاری (\$)
$C_{NP}$	هزینه نانوذره (\$)
$C_{op}$	هزینه عملکردی (\$/year)
$d_i$	قطر داخلی لوله (m)
$d_0$	قطر خارجی لوله (m)
$f_s$	ضریب اصطکاک (-)
$H$	ضریب انتقال گرما ( $W/m^2K$ )
$I$	نرخ بهره (-)
$J$	ضریب کلبرن (-)
$K$	ضریب افت فشار در ورودی و خروجی (-)
$L$	طول لوله (m)
$NTU$	تعداد واحد انتقال (-)
$Nu$	عدد ناسلت (-)
$n_p$	تعداد گذر لوله (-)
$N_t$	تعداد لوله در قسمت متقاطع (-)
$P_t$	گام لوله (m)
$Pr$	عدد پرانتل (-)
$Re$	عدد رینولدز (-)
$T$	دما (K)
$U_0$	ضریب کلی انتقال گرما ( $W/m^2K$ )

### علائم یونانی

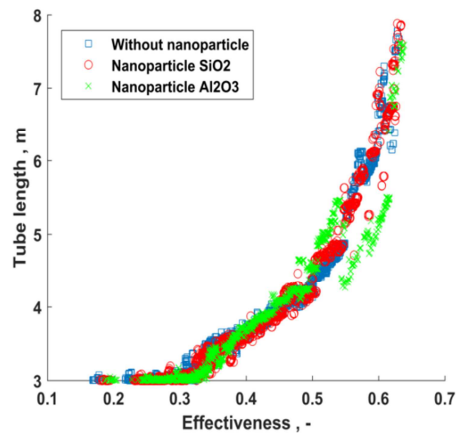
$\mu$	لزجت دینامیکی ( $kg/m s$ )
$\rho$	چگالی ( $kg/m$ )
$\tau$	ساعت کارکرد در سال (h)
$E$	کارایی (-)

می‌باید که با افزایش سرعت، عدد رینولدز جریان و ضریب انتقال گرمای جابجایی رشد کرده و نهایتاً با افزایش کارایی در مبادله‌کن گرمایی همراه است.

### ۷- نتیجه‌گیری

در کار حاضر اثر نانوذرات  $Al_2O_3$  و  $SiO_2$  بر بهینه‌سازی فنی و اقتصادی مبادله‌کن گرمایی پوسته و لوله بررسی شده است. بدین منظور کارایی و هزینه کلی سالیانه به عنوان توابع هدف و ده پارامتر طراحی از جمله غلظت حجمی نانوذرات در نظر گرفته شده است. نتایج بدست آمده به صورت زیر می‌باشد:

- پراکنده‌سازی نانوذرات در سیال پایه با بهبودی مجموعه حل بهینه همراه است.
- نانوذرات  $Al_2O_3$  نسبت به نانوذرات  $SiO_2$  تاثیر بیشتری در بهبود کارایی و هزینه کلی سالیانه مبادله‌کن گرمایی دارد.
- نتایج بدست آمده بکارگیری نانوذرات را به عنوان یک روش کارآمد در بهبود راندمان حرارتی و همچنین کاهش هزینه‌های مبادله‌کن گرمایی عنوان می‌کند.
- با توجه به افزایش عملکرد حرارتی مبادله‌کن گرمایی پوسته و لوله در حالت نانوذرات، برای مقادیر ثابت کارایی در این حالت، احتیاج به سطح تبادل حرارت کمتر و نتیجه‌ی آن کاهش تعداد لوله می‌باشد و این کاهش در حالت نانوذرات اکسید آلومینیوم نسبت به نانوذرات اکسید سیلیسیوم بیشتر است.
- اضافه کردن نانوذرات به سیال پایه اثر قابل توجه‌ای بر طول لوله ندارد.
- با توجه به تغییرات گام و قطر خارجی لوله ممکن است که نسبت گام لوله در حالت نانوذرات نسبت به حالت بدون نانوذرات، بزرگتر یا کوچکتر بدست آید.



شکل ۴- توزیع طول لوله در برابر کارایی برای مجموعه حل ارائه شده در شکل ۱

- [11] EL-MAGHLANY, Wael M., Experimental study of Cu-water nanofluid heat transfer and pressure drop in a horizontal double-tube heat exchanger. *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 78, pp. 100-111, 2016.
- [12] Kazemi-Beydokhti A. and Heris S. Z., Thermal Optimization of Combined Heat and Power (CHP) Systems Using Nanofluids. *Energy*, Vol. 4, No.1, pp. 241-247, 2012.
- [13] Godson L., Deepak K., Enoch C., Jefferson B. and Raja B., Heat Transfer Characteristics of Silver/Water Nanofluids in a Shell and Tube Heat Exchanger. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, Vol. 1, No.3, pp. 489-496, 2014.
- [14] Hajabdollahi H. and 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*.
- [15] Shah R.K., and Sekulic P. Fundamental of Heat Exchanger Design. *John Wiley and Sons Inc.* 2003.
- [16] Kakac S., Liu H., and Pramuanjaroenkij A. Heat Exchangers: Selection, Rating, and Thermal Design. *CRC Press*, 2003.
- [17] Delfani S., Karami M. and Akhavan-Behabadi M. A., Performance Characteristics of a Residential-Type Direct Absorption Solar Collector Using MWCNT Nanofluid. *Renewable Energy*, Vol. 87, pp. 754-764, 2016.
- [18] Taal M., Bulatov I., Klemeš J. and Stehlik P., Cost Estimation and Energy Price Forecasts for Economic Evaluation of Retrofit Projects. *Applied Thermal Engineering*, Vol. 23, No.14, pp. 1819-1835, 2003.

ارزش الکتریکی ( $\$/\text{kW h}$ )	$\varphi_e$
غلظت حجمی ذره (-)	$\phi$
افت فشار (kPa)	$\Delta p$
<b>زیر نویس ها</b>	
سیال پایه	BF
لوله	T
کلی	Tot
پوسته	S
نانوسیال	NF
نانوذرات	NP

## ۹- مراجع

- [1] Corcione M., Empirical Correlating Equations for Predicting the Effective Thermal Conductivity and Dynamic Viscosity of Nanofluids. *Energy Conversion and Management*, Vol. 52, No.1, pp. 789-793, 2010.
- [2] Vajjha R. S., Das D. K. and Kulkarni D. P., Development of New Correlations for Convective Heat Transfer and Friction Factor in Turbulent Regime for Nanofluids. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 53, No.21, pp. 4607-4618, 2010.
- [3] Sharma K. V., Sarm P. K., Azmi W. H., Mamat, R. and 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*, Vol. 3, No.4, pp. 283-308, 2012.
- [4] Suleiman Akilu., Sharman K. V., Aklilu. Tesfamichael Baheta. and Rizalman Mamat., A Review of Thermos Physical Properties of Water Based Composite Nanofluids. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 66, pp. 654-678, 2016.
- [5] Ebrahimnia Bajestan. E., Moghadam M. C., Niazmand H., Daungthongsuk W. and Wongwises S., Experimental and Numerical Investigation of Nanofluids Heat Transfer Characteristics for Application in Solar Heat Exchangers. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 92, pp. 1041-1052, 2016.
- [6] Prasad, P. D., Gupta, A. V. S. S. K. S., & Deepak, K., Investigation of trapezoidal-cut twisted tape insert in a double pipe U-tube heat exchanger using Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/water nanofluid. *Procedia Materials Science*, Vol. 10, pp. 50-63, 2015.
- [7] Azad A., V. and Azad N. V., Application of Nanofluids for the Optimal Design of Shell and Tube Heat Exchangers Using Genetic Algorithm. *Case Studies in Thermal Engineering*, Vol. 8, pp. 198-206, 2016.
- [8] Elias M. M., Miqdad M., Mahbubul I. M., Saidur R., Kamalifarvestani M., Sohel M. R. and Amalina M. A., Effect of Nanoparticle Shape on the Heat Transfer and Thermodynamic Performance of a Shell and Tube Heat Exchanger. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 44, pp. 93-99, 2013.
- [9] Zhao N., Yang J., Li S., and Wang Q. Numerical Investigation of Laminar Thermal-hydraulic Performance of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Water Nanofluids in Offset Strip Fins Channel. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 75, pp. 42-51, 2016.
- [10] Shahrul I. M., Mahbubul I. M., Saidur R. and Sabri M. F. M., Experimental Investigation on Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-W, SiO<sub>2</sub>-W and ZnO-W Nanofluids and Their Application in a Shell and Tube Heat Exchanger. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 97, pp. 547-558, 2016.