

## بهینه‌سازی مبادله‌کن گرمایی لوله پرده‌دار با استفاده از روش جدید شاهین هریس و بررسی تاثیر استفاده از نانوذره بر تحلیل ترمودینامیکی آن

سید احسان علوی\* استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه شهید چمران اهواز - پردیس صنعتی شهدای هویزه، دشت آزادگان، اهواز، ایران، e.alavi@scu.ac.ir

ناصر صادقیان استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه شهید چمران اهواز - پردیس صنعتی شهدای هویزه، دشت آزادگان، اهواز، ایران، saadeghian@gmail.com

خلیل هرمزی دانشجوی ارشد، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه شهید چمران اهواز - پردیس صنعتی شهدای هویزه، دشت آزادگان، اهواز، ایران، khalilhormozi1370@gmail.com

### چکیده

مبادله‌کن‌های گرمایی لوله پرده‌دار در بسیاری از کارخانجات صنعتی مورد استفاده قرار می‌گیرند. صرفه‌جویی در مصرف انرژی و کاهش برگشت‌ناپذیری‌ها در استفاده از این تجهیزات اهمیت بسیاری دارد. در این تحقیق دو نانوذره گرافن و نقره در سیال درون لوله مورد استفاده قرار می‌گیرند و تاثیر آن‌ها بر پارامترهای ترمودینامیکی مبادله‌کن گرمایی مطالعه می‌شود. همچنین بهینه‌سازی چندهدفه مبادله‌کن گرمایی لوله پرده‌دار با توابع هدف ضریب کلی انتقال گرما و افت فشار سیال سرد با استفاده از روش جدید الگوریتم شاهین هریس انجام می‌گیرد. نتایج تحقیق نشان داد که با افزایش کسر حجمی هر دو نانوذره، شاخص کارایی مبادله‌کن گرمایی کاهش می‌یابد. همچنین مشاهده شد که در یک کسر حجمی معین از نانوذره، استفاده از نانوذره نقره نسبت به نانوذره گرافن تلفات انرژی کمتری خواهد داشت. نتایج بهینه‌سازی نشان داد که در کسر حجمی نانوذره گرافن ۰.۰۲۲۳، ضریب کلی انتقال گرما در مقایسه با مقدار اولیه آن قبل از بهینه‌سازی حدود ۲/۵ برابر افزایش و افت فشار سیال سرد نیز به میزان ۵۸٪ کاهش می‌یابد.

**واژه‌های کلیدی:** نانوذره، بهینه‌سازی، مبادله‌کن گرمایی لوله پرده‌دار، افت فشار، برگشت‌ناپذیری، انتقال گرما.

### Optimizing of a finned tube heat exchanger using the novel method of Harris Hawks and investigation of nanoparticle effects on its thermodynamic analysis

**S. E. Alavi** Faculty of engineering, ShohadayeHoveizeh Campus of Technology, Shahid Chamran University of Ahvaz, DashtAzadegan, Iran.

**N. Sadeghian** Faculty of engineering, ShohadayeHoveizeh Campus of Technology, Shahid Chamran University of Ahvaz, DashtAzadegan, Iran.

**Kh. Hormozi** Faculty of engineering, ShohadayeHoveizeh Campus of Technology, Shahid Chamran University of Ahvaz, DashtAzadegan, Iran.

#### Abstract

Finned tube heat exchangers are used in many industrial factories. Saving energy and reducing irreversibility in using these equipments is very important. In this research, graphene and silver nanoparticles are used in the tube side's fluid and their effect on the thermodynamic parameters of the heat exchanger is studied. Also, a multi-objective optimization of the finned tube heat exchanger is conducted using the Harris Hawks Optimization algorithm, with the overall heat transfer coefficient and cold fluid pressure drop as objective functions. The results showed that increasing the volume fraction of both nanoparticles led to a decrease in the heat exchanger efficiency index. Furthermore, it was observed that at a given nanoparticle volume fraction, silver nanoparticles resulted in lower exergy losses compared to graphene nanoparticles. The optimization results indicated that with a graphene nanoparticle volume fraction of 0.0223, the overall heat transfer coefficient increased by approximately 2.5 times compared to its initial value before optimization, while the cold fluid pressure drop decreased by 58%.

**Keywords:** Nanoparticle, Optimization, Finned tube heat exchanger, Pressure drop, Irreversibility, Heat transfer.

هنگامی به کار می‌روند که یکی از جریان‌های سیال در یک فشار بالاتر و یا دارای ضریب انتقال گرما بیشتر در مقایسه با جریان سیال دیگر باشد. برای مثال در یک مبادله‌کن گاز به مایع، ضریب انتقال گرما سمت مایع در مقایسه با سمت گاز، به‌طور قابل ملاحظه‌ای بالاتر است. این مبادله‌کن‌ها به‌طور گسترده به عنوان چگالنده‌ها و تبخیرکن‌ها در تهیه مطبوع و تبرید، برای خنک‌کاری آب یا روغن در وسایط نقلیه یا موتورهای احتراق داخلی و به‌عنوان مبادله‌کن‌های هوا خنک در صنایع

#### ۱- مقدمه

مبادله‌کن‌های گرمایی لوله‌ای پرده‌دار کاربردهای گسترده‌ای در سرتاسر صنعت دارند. این مبادله‌کن‌ها معمولاً دارای فشردگی کمتری در مقایسه با مبادله‌کن‌های صفحه‌ای پرده‌دار می‌باشند. یک مبادله‌کن لوله‌ای پرده‌دار، ممکن است برای رنج دامنه‌ی گسترده‌ای از فشارهای عمل‌کردی سیال تیوب طراحی گردد. اگر بتوان لوله‌ها را تمیز کرد، رسوب قابل قبولی می‌تواند در سمت لوله تحمل شود. این مبادله‌کن‌ها

\* نویسنده‌گان مکاتبه کننده، آدرس پست الکترونیکی: e.alavi@scu.ac.ir

تاریخ دریافت: ۰۳/۰۶/۲۴

تاریخ پذیرش: ۰۳/۰۸/۱۴

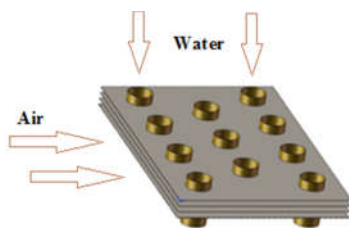
فرآیندی و تولید توانه کار گرفته می‌شوند. رادیاتورها، مبادله‌کن های گرمای فشرده‌ی مایع-گاز هستند، که به‌طور گسترده‌ای در خودرو مورد استفاده قرار می‌گیرند بسنجاکوچ و همکاران [۱] در تحقیق خود با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی به تحلیل مبادله‌کن گرمایی لوله‌ای پرده‌دار پرداختند. آن‌ها در این تحقیق با هدف کاهش جرم مبادله‌کن گرمایی از پرده‌های ستاره‌ای سوراخ‌دار استفاده کردند. نتایج نشان داد که سوراخ‌دار بودن پرده‌ها باعث متلاطم شدن جریان خواهد شد. بنابراین آهنگ انتقال گرما مبادله‌کن گرمایی لوله‌ای پرده‌دار سوراخ-دار از مبادله‌کن گرمایی لوله‌ای پرده‌دار بدون سوراخ بیشتر است. حاجی عبداللهی و همکاران [۲] در تحقیق خود به بهینه‌سازی ترمودینامیکی-اقتصادی مبادله‌کن گرمایی لوله‌ای پرده‌دار پرداختند. آن‌ها در این تحقیق کارایی و هزینه کل مبادله‌کن گرمایی دولوله‌ای پرده‌دار را به عنوان توابع هدف انتخاب کردند. همچنین نتایج نشان داد که افزایش طول جریان‌های سرد و گرم موجب افزایش کارایی مبادله‌کن گرمایی لوله‌ای پرده‌دار می‌شود. ژای و همکاران [۳] در تحقیق خود به کاربرد الگوریتم ژنتیک در بهینه‌سازی مبادله‌کن های گرمایی لوله‌ای پرده‌دار پرداختند. در این تحقیق وزن مبادله‌کن گرمایی لوله‌ای پرده‌دار و هزینه سالیانه به عنوان توابع هدف انتخاب شدند. نتایج بهینه‌سازی نشان داد که الگوریتم ژنتیک در یافتن نقاط بهینه الگوریتمی بسیار توانمند است و با هر تابع هدفی می‌تواند مبادله‌کن گرمایی لوله‌ای پرده‌دار را بهینه نماید. وانگ و همکاران [۴] در تحقیق خود به ارائه روش کاهش داده جهت محاسبه کارایی سمت هوا در مبادله‌کن گرمایی لوله‌ای پرده‌دار پرداختند. آن‌ها در این تحقیق بیان کردند که برای استخراج دقیق‌تر انتقال گرما سمت لوله با استفاده از این روش، کاهش دمای آب باید بیش از ۲ درجه سلسیوس باشد. راجا و همکاران [۵] در تحقیق خود به بهینه‌سازی ترمودینامیکی-اقتصادی مبادله‌کن گرمایی لوله‌ای پرده‌دار با استفاده از روش جستجوی انتقال گرما پرداختند. وزن مبادله‌کن گرمایی و هزینه سالیانه به عنوان توابع هدف و هفت پارامتر به عنوان متغیرهای طراحی در بهینه‌سازی انتخاب شدند. نتایج روش جستجوی انتقال گرما با سایر روش‌ها مقایسه شد و نشان داد که روش جستجوی انتقال گرما در بهینه‌سازی انواع مبادله‌کن گرمایی توانمند است. بهویبان و همکاران [۶] در تحقیق عددی خود به بررسی سه‌بعدی کارایی و انتقال گرما در مبادله‌کن گرمایی لوله‌ای پرده‌دار پرداختند. در این پژوهش اثر گام لوله، گام پره و عدد رینولدز بر آهنگ انتقال گرما و افت فشار مبادله‌کن گرمایی لوله‌ای پرده‌دار در رژیم جریان انتقالی مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج نشان داد که چیدمان لوله‌ها اثر قابل توجهی بر آهنگ انتقال گرما و ضریب اصطکاک دارد. ملاحظه شد که مبادله‌کن گرمایی لوله‌ای پرده‌دار با چیدمان لوله‌های زیگزاک در مقایسه با چیدمان خطی آهنگ انتقال گرما بیشتری دارد. رحیمی و همکاران [۷] در تحقیق خود به بررسی فرآیندهای ذوب و انجماد در مبادله‌کن های گرمایی لوله‌پرده‌دار پرداختند. نتایج نشان داد که افزایش دمای ورودی باعث کاهش زمان ذوب می‌شود. این پژوهشگران با تحلیل‌های دقیق دریافتند که تغییر آهنگ جرمی به شدت بر دمای انجماد موثر است. ژو و همکاران [۸] در پژوهش خود به تحلیل تأثیر پارامترهای مختلف جریان بر عملکرد مبادله‌کن های لوله‌پرده‌دار با استفاده از شبیه‌سازی‌های عددی پرداخته است. تحقیق شامل بررسی اثرات سرعت جریان، فشار و دما بر روی انتقال گرما و افت فشار در مبادله‌کن

ها بود. نتایج نشان داد که تغییر در این پارامترها می‌تواند تأثیرات قابل توجهی بر عملکرد کلی مبادله‌کن ها داشته باشد، و به بهینه‌سازی شرایط عملیاتی کمک می‌کند. کولاک و همکاران [۹] در مطالعه خود سرعت متوسط جریان در مبادله‌کن‌های گرمایی که پیش از این کمتر مورد توجه قرار داشت را با استفاده از روش‌های یادگیری ماشین بصورت کامل و دقیق بررسی نمودند. در این تحقیق، عوامل مهم مانند تعداد لوله، ضریب تمیزی و هزینه کلی به عنوان عوامل خروجی و با روش هوش مصنوعی با استفاده از تعداد زیادی داده برآورد شدند. همچنین تأثیر عوامل ورودی عدد رینولدز، رسانایی گرمایی، گرمای ویژه، لزجت و بازده سطح کل پره بر خروجی‌ها نیز مورد مطالعه قرار گرفت. اکبری و همکاران [۱۰] در تحقیق خود به شبیه‌سازی جریان تک فازی و دوفازی نانو سیال در مبادله‌کن گرمایی دولوله‌ای پرداختند. نتایج این تحقیق نشان داد که بیشترین میزان عدد ناسلت و ضریب انتقال گرما همرفتی در اعداد رینولدز بالا رخ می‌دهد.

از بررسی پژوهش‌های پیشین ملاحظه می‌شود که بهینه‌سازی مبادله‌کن گرمایی لوله پرده‌دار با توابع هدف ضریب کلی انتقال گرما و افت فشار سیال درون لوله تا کنون مورد بررسی قرار نگرفته است. همچنین الگوریتم شاهین هریس یک روش بهینه‌سازی جدید با دقت و سرعت بالا در همگرایی پاسخ‌های بهینه است که در این پژوهش مورد استفاده قرار می‌گیرد. تأثیر استفاده از نانوذرات نقره و گرافن بر پارامترهای ترمودینامیکی از قبیل شاخص کارایی، تلفات انترنزی، افت اگزرژی و غیره نیز از اهداف و نوآوری‌های این تحقیق است.

## ۲- مدل‌سازی ترمودینامیکی

در شکل ۱ نمای از مبادله‌کن گرمایی لوله پرده‌دار که در این پژوهش مورد بررسی قرار می‌گیرد نمایش داده شده است.



شکل ۱- مبادله‌کن گرمایی لوله پرده‌دار مورد مطالعه

فرضیات تحقیق:

- حالت پایا.
  - جریان یکنواخت دو سیال سرد و گرم در جهات مختلف.
  - اتلاف گرمایی ناچیز.
  - یکنواخت بودن دمای دو سیال سرد و گرم.
  - سرعت یکنواخت جریان در سطح مقطع ورودی و خروجی.
  - مقاومت رسوب ثابت.
- روابط ترمودینامیکی حاکم بر مبادله‌کن گرمایی لوله پرده‌دار در این قسمت تشریح می‌گردد.
- قطر هیدرولیکی و قطر معادل در مبادله‌کن گرمایی دولوله‌ای به ترتیب از روابط زیر حاصل می‌شوند [۱۱].

افت فشار سمت هوا از رابطه زیر بدست می‌آید [۱۱]:

$$\Delta p_h = \frac{G_a^2}{2\rho_i} \left[ \frac{A}{A_{\min}} \frac{\rho_{h,i}}{\rho_{h,m}} f_h + (1 + \sigma^2) \left( \frac{\rho_{h,m}}{\rho_{h,i}} - 1 \right) \right] \quad (22)$$

افت فشار سمت آب از رابطه زیر بدست می‌آید [۱۰]:

$$\Delta p_c = \frac{f_c \rho_c g L}{2d_i} \quad (23)$$

کارایی و آهنگ انتقال گرما مبادله‌کن گرمایی لوله‌ای پره دار بصورت زیر است [۱۲]:

$$\varepsilon = \frac{q}{q_{\max}} \quad (24)$$

$$q = (\dot{m} C_p \Delta T)_c = (\dot{m} C_p \Delta T)_h \quad (25)$$

$$q_{\max} = C_{\min} (T_{h,i} - T_{c,i}) \quad (26)$$

انترنزی یک مفهوم جدید به‌منظور بهینه‌سازی سیستم‌های انرژی می‌باشد. در واقع یک کمیت فیزیکی برای توصیف توانایی انتقال گرما در یک فرآیند است. همان‌طور که انترنزی الکتریکی ذخیره شده در یک خازن، توانایی انتقال بار آن را توصیف می‌کند، انترنزی، توانایی انتقال گرما یک جسم را معرفی می‌کند. انترنزی ناشی از دو عامل است. یکی بخش اصطکاکی و تلفات لزجی سیال و دیگری بخش متناسب با میزان انتقال گرما به واسطه‌ی یک اختلاف دمای محدود می‌باشد. تلفات انترنزی ناشی از رسانایی گرمایی از رابطه زیر حاصل می‌شود [۱۳]:

$$G_{\Delta T} = \frac{1}{2} (\dot{m} C_p)_h (T_{h,i}^2 - T_{h,o}^2) + \frac{1}{2} (\dot{m} C_p)_c (T_{c,i}^2 - T_{c,o}^2) \quad (27)$$

تلفات انترنزی بی بعد ناشی از رسانایی گرمایی از رابطه زیر حاصل می‌شود [۱۳]:

$$g_{\Delta T} = \frac{G_{\Delta T}}{Q(T_{h,i} - T_{c,i})} \quad (28)$$

تلفات انترنزی ناشی از اصطکاک سیال از رابطه زیر حاصل می‌شود [۱۴]:

$$G_{\Delta P} = - \int_i^o \frac{\dot{m} T}{\rho} dp = \left( \frac{\dot{m} \Delta P T_o - T_i}{\rho \ln \left( \frac{T_o}{T_i} \right)} \right)_{h,c} \quad (29)$$

تلفات انترنزی بی بعد ناشی از اصطکاک سیال از رابطه زیر حاصل می‌شود [۱۴]:

$$g_{\Delta P} = \frac{G_{\Delta P}}{Q(T_{h,i} - T_{c,i})} \quad (30)$$

تلفات انترنزی کل از رابطه زیر حاصل می‌شود [۱۴]:

$$g^* = g_{\Delta T} + g_{\Delta P} \quad (31)$$

تولید آنتروپی ناشی از اصطکاک سیال از رابطه زیر حاصل می‌شود [۱۵]:

$$\dot{S}_{gT} = \left( \frac{\dot{m} \Delta P}{\rho} \right)_h \frac{\ln(T_{h,o}/T_{h,i})}{T_{h,o} - T_{h,i}} + \left( \frac{\dot{m} \Delta P}{\rho} \right)_c \frac{\ln(T_{c,o}/T_{c,i})}{T_{c,o} - T_{c,i}} \quad (32)$$

تولید آنتروپی ناشی از اختلاف دمای محدود از رابطه زیر حاصل می‌شود [۱۵]:

$$\dot{S}_{gP} = \dot{m}_h C_{p,h} \ln(T_{h,o}/T_{h,i}) + \dot{m}_c C_{p,c} \ln(T_{c,o}/T_{c,i}) \quad (33)$$

تولید آنتروپی کل از رابطه زیر حاصل می‌شود [۱۵]:

$$\dot{S}_g = \dot{S}_{gT} + \dot{S}_{gP} \quad (34)$$

عدد تلفات پتانسیل آنتروپیک از رابطه زیر حاصل می‌شود [۱۵]:

$$N_{EPL} = \frac{\dot{S}_g T_o}{q} \quad (35)$$

$$D_h = 4 \frac{A_{\min} L}{W} \quad (1)$$

$$A_{\min} = \left[ \left( \frac{A}{P_t} - 1 \right) c + (P_t - d_o)(1 - t_f N_f) \right] H \quad (2)$$

اگر  $a < b$  باشد:

$$c = (P_t - d_o)(1 - t_f N_f) \quad (3)$$

اگر  $a > b$  باشد:

$$c = (0.5 P_t^2 + P_t^2)^{0.5} - d_o - (P_t - d_o)(t_f N_f) \quad (4)$$

جایی‌که  $A_{\min}$ ،  $L$ ،  $W$ ،  $H$  به ترتیب حداقل سطح مقطع جریان، سطح مقطع کلی انتقال گرما، طول، پهنا و ارتفاع مبادله‌کن گرمایی لوله‌ای پره‌دار است. همچنین  $P_t$ ،  $P_f$ ،  $t_f$  و  $N_f$  به ترتیب گام طولی لوله، گام لوله در راستای عمود بر جریان، ضخامت پره‌ها و تعداد پره‌ها است.

سطح مقطع کلی انتقال گرما شامل سطح مقطع اولیه  $A_p$  و سطح مقطع پره‌ها  $A_f$  است و از رابطه زیر حاصل می‌شود [۱۱]:

$$A = A_p + A_f \quad (5)$$

$$A_p = (\pi d_o N_t H) - \pi d_o N_t t_f (N_f - 1) \quad (6)$$

$$A_f = \frac{2H}{F_p} \left( LW - N_t \times \pi \frac{d_o^2}{4} \right) \quad (7)$$

در روابط فوق  $N_t$  و  $F_p$  به ترتیب تعداد لوله‌ها و گام پره است.

ضریب کولبرن برای سمت هوا از رابطه زیر حاصل می‌شود [۱۱]:

$$J_a = 0.086 Re_{d_c}^{1/3} N^{1/4} \left( \frac{F_p}{d_c} \right)^{1/5} \left( \frac{F_p}{d_h} \right)^{1/6} \left( \frac{F_p}{P_t} \right)^{-0.93} \quad \text{for } N > 1 \quad (8)$$

$$J_3 = -0.361 - \frac{0.042 N}{\ln Re_{d_c}} + 0.158 \ln [N(F_p/d_c)^{0.41}] \quad (9)$$

$$J_4 = -1.224 - \frac{0.076 (P_t/d_h)^{1.42}}{\ln Re_{d_c}} \quad (10)$$

$$J_5 = -0.083 + \frac{0.058 N}{\ln Re_{d_c}} \quad (11)$$

$$J_6 = -5.735 + 1.21 \ln \frac{Re_{d_c}}{N} \quad (12)$$

در روابط فوق  $d_c$ ، قطر بیرونی یقه پره است و از رابطه زیر بدست می‌آید [۱۱]:

$$d_c = d_o + 2t_f \quad (13)$$

ضریب انتقال گرما سمت هوا را می‌توان از رابطه زیر بدست آورد [۱۱]:

$$h_h = J_a \frac{4\rho_h g_h C_{p,h}}{Pr_h^{0.67}} \quad (14)$$

عدد ناسلت سمت آب از رابطه زیر حاصل می‌شود [۱۱]:

$$Nu_c = \frac{\frac{f_c}{8} (Re_c - 1000) Pr_c}{1 + 12.7 \left( \frac{f_c}{8} \right)^{0.5} (Pr_c^{2/3} - 1)} \quad (15)$$

ضریب اصطکاک سمت آب،  $f_w$ ، از رابطه زیر حاصل می‌شود [۴۳]:

$$f_c = (1.82 \log_{10} Re_c - 1.64)^{-2} \quad (16)$$

ضریب انتقال گرمای همرفتی سمت آب از رابطه زیر حاصل می‌شود [۱۱]:

$$h_c = \frac{Nu_c k_c}{d_i} \quad (17)$$

ضریب اصطکاک سمت هوا از رابطه زیر بدست می‌آید [۱۱]:

$$f_a = 0.0267 Re_{d_c}^{1/4} \left( \frac{P_t}{P_f} \right)^{1/2} \left( \frac{F_p}{d_c} \right)^{1/3} \quad (18)$$

$$f_1 = -0.764 + 0.739 (P_t/P_f) + 0.177 (F_p/d_c) - 0.00758/N \quad (19)$$

$$f_2 = -15.689 + 64.021/\ln Re_{d_c} \quad (20)$$

$$f_3 = 1.696 - 15.695/\ln Re_{d_c} \quad (21)$$

افت اکسرژی در مبادله‌کن گرمایی به صورت معادله‌ی زیر بیان می‌شود [۱۶]:

$$E = T_{sur} \left\{ \ln C_p \ln \frac{T_0}{T_1} \right\} \quad (۳۶)$$

عدد افت اکسرژی از رابطه زیر تعیین میگردد [۱۶]:

$$N_{EL} = \frac{E}{T_{sur} C_{min}} \quad (۳۷)$$

عدد رینولدز، عدد پرانتل و عدد پکله از روابط زیر قابل محاسبه هستند:

$$Re = \frac{\rho n D_h}{\mu} \quad (۳۸)$$

$$Pr = \frac{\mu C_p}{k} \quad (۳۹)$$

$$Pe = Re Pr \quad (۴۰)$$

پخشندگی گرمایی و عدد استانتون نیز از روابط زیر حاصل می‌شوند:

$$\alpha = \frac{k}{\rho C_p} \quad (۴۱)$$

$$St = \frac{Nu}{Re Pr} \quad (۴۲)$$

چگالی و گرمای ویژه نانوذره از روابط زیر محاسبه می‌شود [۱۷]:

$$\rho_{nf} = (1 - \Phi) \rho_f + \Phi \rho_p \quad (۴۳)$$

$$C_{p,nf} = \frac{(1 - \Phi) \rho_f C_{p,f} + \Phi \rho_p C_{p,p}}{\rho_{nf}} \quad (۴۴)$$

در روابط فوق  $\Phi$ ،  $\rho_f$ ،  $\rho_p$ ،  $C_{p,p}$  و  $C_{p,f}$  به ترتیب کسر حجمی نانوسیال، چگالی سیال پایه، چگالی نانوذره، گرمای ویژه سیال پایه و گرمای ویژه نانوذره است.

شکل نانوذره بر لزجت و رسانایی گرمایی اثر دارد. لزجت برای نانوذره کروی شکل از رابطه زیر حاصل می‌شود [۱۷]:

$$\mu_{nf} = \frac{\mu_f}{(1 - \Phi)^{2.5}} \quad (۴۵)$$

برای شکل‌های مختلف نانوذره رسانایی گرمایی از رابطه زیر حاصل می‌شود [۱۸]:

$$k_{nf} = \frac{k_p + 2k_f - 2\Phi(k_f - k_p)}{k_p + 2k_f + \Phi(k_f - k_p)} k_f \quad (۴۶)$$

در رابطه فوق  $k_p$  و  $k_f$  به ترتیب رسانایی گرمایی نانوذره و سیال پایه است.

### ۳- روش بهینه‌سازی شاهین هریس

روش بهینه‌سازی شاهین هریس (HHO) در سال ۲۰۱۹ معرفی شد. این الگوریتم به‌طور خاص برای حل مسائل بهینه‌سازی پیوسته و نامعین طراحی شده است و با الهام از رفتار شکار و همکاری گروهی شاهین‌های هریس (نوعی شاهین) در طبیعت توسعه یافته است. این روش در واقع یک روش بهینه‌سازی بدون گرادیان مبتنی بر جمعیت است که از سه مرحله تشکیل شده است. مرحله اول اکتشاف است. شاهین‌های هریس راه حل‌های کاندیدا هستند و بهترین راه حل کاندیدا در هر مرحله به عنوان طعمه مورد نظر یا نزدیک به بهینه در نظر گرفته می‌شود. در این روش شاهین‌های هریس به طور تصادفی در بعضی از مکان‌ها استقرار می‌یابند تا طعمه‌ای را بر اساس دو استراتژی شناسایی کنند. اگر شانس  $q$  برای هر استراتژی نشستن در نظر گرفته شود، بر اساس دو استراتژی، طعمه شناسایی می‌شود: الف: شاهین‌ها بر اساس موقعیت سایر شاهین‌ها و خرگوش نشسته و منتظر هستند (  $q < 0.5$  ). ب) شاهین‌ها بر روی درختان بلند بصورت تصادفی (مکان تصادفی در محدوده خانه گروه) نشسته و منتظر

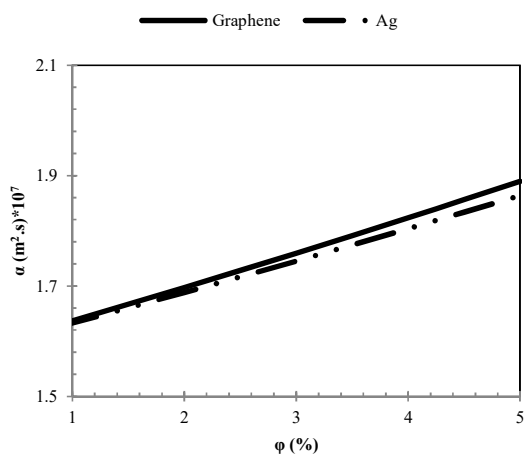
هستند (  $q \geq 0.5$  ). مرحله دوم انتقال از اکتشاف به بهره‌برداری نام دارد. انرژی یک طعمه در طول فرار به طور قابل توجهی کاهش می‌یابد. برای مدل سازی این واقعیت، انرژی یک طعمه به صورت زیر مدل می‌شود:

$$E = 2E_0 \left( 1 - \frac{t}{T} \right) \quad (۴۷)$$

که در آن  $E$  بیانگر انرژی فرار طعمه،  $T$  حداکثر تعداد تکرارها و  $E_0$  انرژی اولیه طعمه است. در الگوریتم شاهین هریس،  $E_0$  به طور تصادفی در بازه (۱، -۱) در هر تکرار تغییر می‌کند. هنگامی که مقدار  $E_0$  از ۰ به -۱ کاهش می‌یابد، خرگوش از نظر جسمی خسته می‌شود. هنگامی که مقدار  $E_0$  از ۰ به ۱ افزایش می‌یابد، بدان معنی است که خرگوش قدرت بدنی پیدا می‌کند. انرژی فرار دینامیکی  $E$  دارای روند کاهشی در طی تکرارها است. هنگامی که انرژی فرار  $|E| \geq 1$  باشد، شاهین‌ها برای کشف مکان خرگوش، مناطق مختلفی را جستجو می‌کنند. (مرحله اکتشاف) و هنگامی که  $|E| < 1$  باشد، الگوریتم سعی می‌کند در طول مراحل بهره‌برداری از همسایگی راه حل‌ها استفاده کند. مرحله سوم در روش بهینه‌سازی شاهین هریس، بهره‌برداری است. در این مرحله، شاهین‌های هریس حمله غافلگیرانه‌ای به طعمه مورد نظر کشف شده در مرحله قبلی انجام می‌دهند. با این حال، طعمه‌ها اغلب سعی در فرار از موقعیت‌های خطرناک دارند. از این رو، سبک‌های مختلف تعقیب و گریز در شرایط واقعی رخ می‌دهد. با توجه به رفتارهای فرار طعمه و استراتژی‌های تعقیب شاهین هریس، چهار استراتژی ممکن در این الگوریتم برای مدل سازی مرحله حمله پیشنهاد شده است. فرض کنید که  $r$  احتمال فرار موفقیت آمیز (  $r < 0.5$  ) یا فرار ناموفق (  $r \geq 0.5$  ) یک طعمه قبل از حمله غافلگیرانه باشد. هر کاری که طعمه انجام دهد، شاهین‌ها یک محاصره سخت یا نرم را برای شکار طعمه انجام می‌دهند. این امر بدان معناست که شاهین‌ها با توجه به انرژی باقیمانده طعمه، طعمه‌ها را از جهات مختلف به طور نرم یا سخت محاصره می‌کنند. در شرایط واقعی، شاهین‌ها به طعمه مد نظر نزدیک و نزدیک تر می‌شوند تا شانس خود را برای کشتن خرگوش به صورت مشارکتی با انجام حمله غافلگیرانه افزایش دهند. پس از چند دقیقه، طعمه در حال فرار انرژی بیشتر و بیشتری را از دست می‌دهد. سپس شاهین‌ها روند محاصره را تشدید می‌کنند تا به راحتی طعمه خسته را شکار کنند. برای مدل سازی این استراتژی و به منظور قادرسازی الگوریتم برای همرفتی بین فرآیندهای محاصره نرم و سخت، از پارامتر  $E$  استفاده می‌شود. زمانی که  $r \geq 0.5$  و  $|E| \geq 0.5$  باشد، خرگوش هنوز انرژی کافی دارد و سعی می‌کند با جهش‌های گمراه‌کننده تصادفی فرار کند اما در نهایت نمی‌تواند. در طی این تلاش‌ها، شاهین‌های هریس خرگوش را به طور نرم و ملایم محاصره می‌کنند تا خرگوش را خسته تر کند و سپس حمله غافلگیرانه را انجام می‌دهند. هنگامی که  $r \geq 0.5$  و  $|E| < 0.5$  باشد، طعمه بسیار خسته است و انرژی فرار اندکی دارد. علاوه بر این، شاهین‌های هریس به سختی طعمه مورد نظر را محاصره می‌کنند تا در نهایت حمله غافلگیرانه را انجام دهند. هنگامی که هنوز  $|E| \geq 0.5$  است اما  $r < 0.5$  می‌باشد، خرگوش از انرژی کافی برای فرار موفقیت آمیز برخوردار است و هنوز هم محاصره نرم قبل از حمله غافلگیرانه برقرار است. این روش محاصره نرم با شیرجه‌های سریع تصادفی نام دارد که از روش محاصره نرم هوشمندانه‌تر است. در واقع، شاهین‌ها

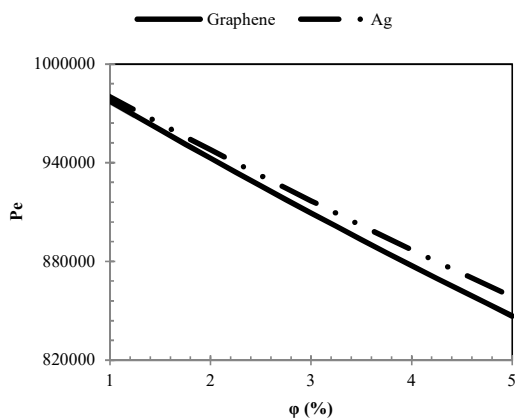
#### ۴-۱- تحلیل ترمودینامیکی

در شکل ۲ اثر افزایش کسر حجمی نانوذره بر پخشندگی گرمایی سیال سرد نشان داده شده است. ملاحظه می‌شود که با افزایش کسر حجمی هر دو نانوذره، پخشندگی گرمایی سیال سرد افزایش می‌یابد. زیرا با افزایش کسر حجمی نانوذره رسانایی گرمایی افزایش و حاصلضرب چگالی در گرمایی ویژه در فشار ثابت کاهش می‌یابد. همچنین مشاهده می‌شود که در یک کسر حجمی معین از نانوذره، استفاده از نانوذره گرافن نسبت به نانوذره نقره افزایش پخشندگی گرمایی بیشتری برای سیال سرد در پی خواهد داشت.



شکل ۲- پخشندگی گرمایی بر حسب کسر حجمی نانوذره.

در شکل ۳ اثر افزایش کسر حجمی نانوذره بر عدد پکله سیال سرد نشان داده شده است. ملاحظه می‌شود که با افزایش کسر حجمی هر دو نانوذره، عدد پکله سیال سرد کاهش می‌یابد. زیرا با افزایش کسر حجمی نانوذره عدد پراتل کاهش می‌یابد. همچنین مشاهده می‌شود که در یک کسر حجمی معین از نانوذره، استفاده از نانوذره نقره نسبت به نانوذره گرافن افزایش عدد پکله بیشتری برای سیال سرد در پی خواهد داشت.



شکل ۳- عدد پکله بر حسب کسر حجمی نانوذره.

چندین شیرجه سریع تیمی را در اطراف خرگوش انجام می‌دهند و سعی می‌کنند با توجه به حرکات فریبنده طعمه، مکان و جهت حمله خود را به تدریج تصحیح کنند. هنگامی که  $|E| < 0.5$  و  $r < 0.5$  خرگوش انرژی کافی برای فرار ندارد و محاصره سخت قبل از حمله غافلگیرانه برای شکار و کشتن طعمه انجام می‌شود. وضعیت این مرحله در سمت طعمه شبیه به شرایط موجود در محاصره نرم است، اما این بار شاهین‌ها سعی می‌کنند فاصله محل متوسط خود با طعمه در حال فرار را کاهش دهند. این روش محاصره سخت با شیرجه‌های سریع تصاعدی نام دارد [۱۴]. در حالت کلی می‌توان گفت الگوریتم و اصول عملکرد این روش به شرح زیر است: الف) رفتار شکار شاهین‌های هریس: شاهین‌های هریس به‌طور طبیعی در گروه‌های کوچک به شکار می‌پردازند و از روش‌های مختلفی برای پیدا کردن و شکار طعمه استفاده می‌کنند. شاهین‌ها به‌طور گروهی عمل می‌کنند و با همکاری و تقسیم وظایف، به شکار طعمه‌های خود می‌پردازند. آنها با تغییر مکان‌ها و جستجوی محیط‌های مختلف، به دنبال طعمه‌ها هستند. از طریق تجزیه و تحلیل مکان‌های مختلف، شاهین‌ها می‌توانند بهترین مکان‌ها را برای شکار شناسایی کنند. ب) فرآیند بهینه‌سازی: الگوریتم با یک جمعیت اولیه از نرم افزارهای شاهین هریس آغاز می‌شود که به‌طور تصادفی در فضای جستجو توزیع شده‌اند. در هر مرحله، شاهین‌ها به دنبال طعمه‌های خود هستند که در واقع به معنی جستجوی راه‌حل‌های بهینه برای تابع هدف است. موقعیت شاهین‌ها به‌طور دوره‌ای به‌روزرسانی می‌شود تا به مکان‌های بهینه‌تری در فضای جستجو برسند. این فرآیند شامل حرکت تصادفی و حرکت به سمت طعمه‌ها می‌شود. با تکرار مراحل فوق، الگوریتم به تدریج به سمت بهترین حل ممکن پیش می‌رود و همگرایی را بهینه می‌کند [۱۹].

#### ۴-۲ نتایج

در این بخش ابتدا نتایج تحلیل ترمودینامیکی اثر افزودن نانوذره گرافن و نقره تشریح خواهد شد. سپس در ادامه اعتبارسنجی نتایج بیان خواهد شد. در انتهای بخش نتایج نیز نتایج بهینه‌سازی ارائه خواهد شد. مشخصات فرآیندی هر دو سیال گرم و سرد در جدول ۱ و خواص نانوذرات مورد استفاده نیز در جدول ۲ ذکر شده است.

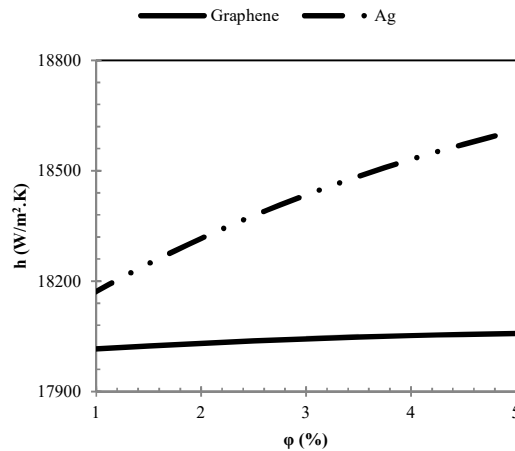
جدول ۱- مشخصات فرآیندی دو سیال.

مشخصات فرآیندی	سیال سرد	سیال گرم
چگالی ( $\text{kg/m}^3$ )	۹۸۴/۲۵	۰/۴۹۸
گرمای ویژه در فشار ثابت ( $\text{J/kg K}$ )	۴۱۸۴	۱۰۷۵
لزجت سیال (pa.s)	۰/۰۰۰۰۴۸۹	۰/۰۰۰۰۳۳۸۸
رسانایی گرمایی ( $\text{W/m.K}$ )	۰/۶۵	۰/۰۵۲۴
عدد پراتل	۳/۱۵	۰/۶۹۵

جدول ۲- خواص نانوذرات [۱۸].

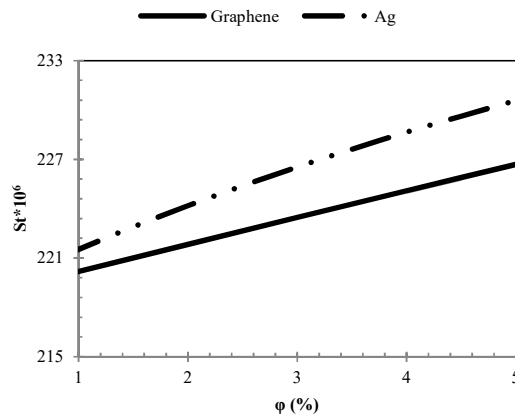
مشخصات فرآیندی	نقره	گرافن
چگالی ( $\text{kg/m}^3$ )	۲۲۰۰	۱۰۵۰۰
گرمای ویژه در فشار ثابت ( $\text{J/kg K}$ )	۶۴۳	۲۳۵
رسانایی گرمایی ( $\text{W/m.K}$ )	۳۰۰۰	۴۲۹

در شکل ۴ اثر افزایش کسر حجمی نانوذره بر ضریب انتقال گرمای همرفتی سیال سرد نشان داده شده است. ملاحظه می‌شود که با افزایش کسر حجمی نانوذره گرآفن، ضریب انتقال گرمای همرفتی سیال سرد با شیب کم افزایش می‌یابد. در حالی که با افزایش کسر حجمی نانوذره نقره، ضریب انتقال گرمای همرفتی سیال سرد با شیب بیشتری افزایش می‌یابد. همچنین مشاهده می‌شود که در یک کسر حجمی معین از نانوذره، استفاده از نانوذره نقره نسبت به نانوذره گرآفن افزایش ضریب انتقال گرمای همرفتی بیشتری برای سیال سرد در پی خواهد داشت.



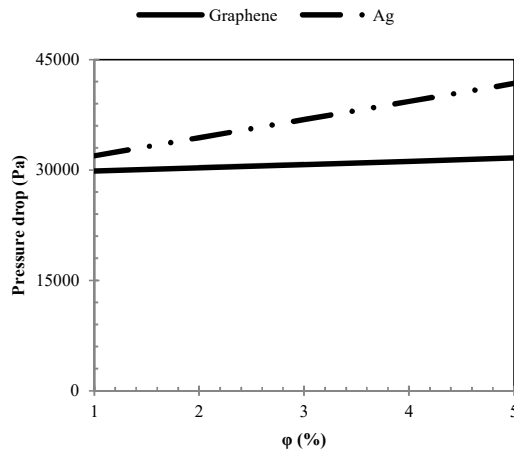
شکل ۴- ضریب انتقال گرمای همرفتی بر حسب کسر حجمی نانوذره.

در شکل ۵ اثر افزایش کسر حجمی نانوذره بر عدد استانتون سیال سرد نشان داده شده است. ملاحظه می‌شود که با افزایش کسر حجمی هر دو نانوذره، عدد استانتون سیال سرد افزایش می‌یابد. زیرا با افزایش کسر حجمی نانوذره عدد ناسلت افزایش و عدد پرانتل کاهش می‌یابد. همچنین مشاهده می‌شود که در یک کسر حجمی معین از نانوذره، استفاده از نانوذره نقره نسبت به نانوذره گرآفن افزایش عدد استانتون بیشتری برای سیال سرد در پی خواهد داشت.



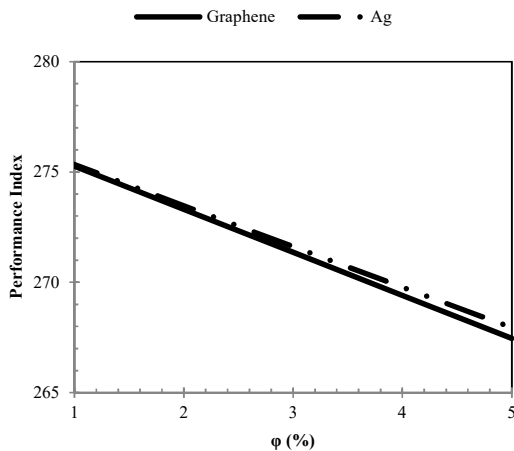
شکل ۵- عدد استانتون بر حسب کسر حجمی نانوذره.

در شکل ۶ اثر افزایش کسر حجمی نانوذره بر افت فشار سیال سرد نشان داده شده است. ملاحظه می‌شود که با افزایش کسر حجمی هر دو نانوذره، افت فشار سیال سرد افزایش می‌یابد. زیرا با افزودن کسر حجمی نانوذره چگالی سیال سرد افزایش می‌یابد. همچنین مشاهده می‌شود که در یک کسر حجمی معین از نانوذره، استفاده از نانوذره نقره نسبت به نانوذره گرآفن افت فشار سیال سرد کمتر خواهد بود.



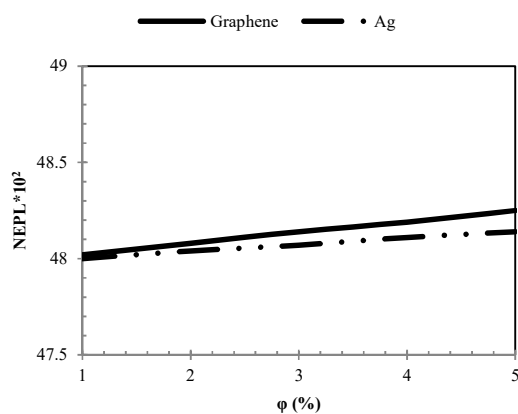
شکل ۶- افت فشار بر حسب کسر حجمی نانوذره.

در شکل ۷ اثر افزایش کسر حجمی نانوذره بر شاخص کارایی نشان داده شده است. ملاحظه می‌شود که با افزایش کسر حجمی هر دو نانوذره، شاخص کارایی کاهش می‌یابد. زیرا با افزودن کسر حجمی نانوذره به دلیل کاهش گرمای ویژه در فشار ثابت آهنگ انتقال گرما کاهش می‌یابد. همچنین به دلیل افزایش افت فشار توان پمپ کردن نیز افزایش می‌یابد. بنابراین شاخص کارایی کاهش می‌یابد. همچنین مشاهده می‌شود که در یک کسر حجمی معین از نانوذره، استفاده از نانوذره نقره نسبت به نانوذره گرآفن شاخص کارایی بالاتری خواهد داشت.



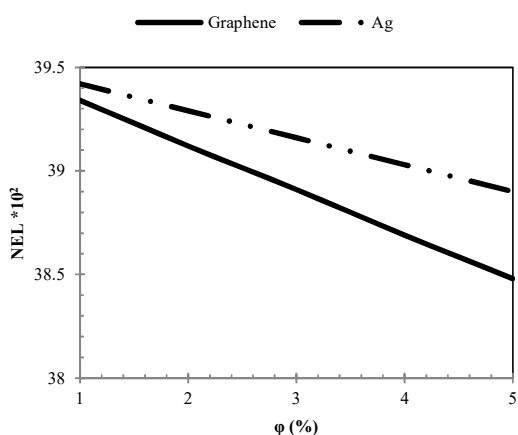
شکل ۷- شاخص کارایی بر حسب کسر حجمی نانوذره.

در شکل ۱۰ اثر افزایش کسر حجمی نانوذره بر عدد تلفات پتانسیل آنتروپیک نشان داده شده است. ملاحظه می‌شود که با افزایش کسر حجمی هر دو نانوذره، عدد تلفات پتانسیل آنتروپیک افزایش می‌یابد. زیرا با افزودن کسر حجمی نانوذره به دلیل کاهش آهنگ انتقال گرما و افزایش دمای خروجی سیال گرم و افت فشار سیال سرد نهایتاً تلفات انتروپی افزایش می‌یابد. همچنین مشاهده می‌شود که در یک کسر حجمی معین از نانوذره، استفاده از نانوذره نقره نسبت به نانوذره گرافن عدد تلفات پتانسیل آنتروپیک کمتری خواهد داشت.



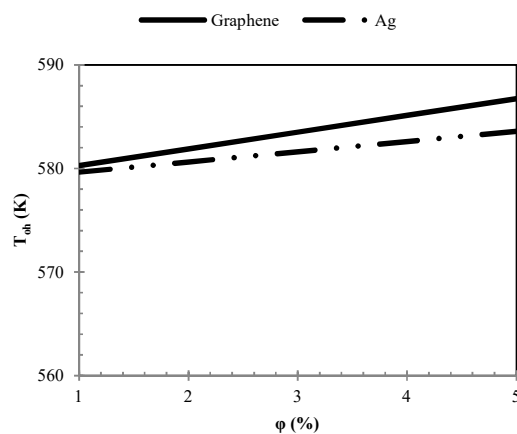
شکل ۱۰- عدد تلفات پتانسیل آنتروپیک بر حسب کسر حجمی نانوذره.

در شکل ۱۱ اثر افزایش کسر حجمی نانوذره بر عدد افت انرژی نشان داده شده است. ملاحظه می‌شود که با افزایش کسر حجمی هر دو نانوذره، عدد افت انرژی کاهش می‌یابد. زیرا با افزودن کسر حجمی نانوذره به دلیل کاهش گرما و ویژه گرما در فشار ثابت، افزایش دمای خروجی سیال گرم و چگالی سیال سرد نهایتاً عدد افت انرژی کاهش می‌یابد. همچنین مشاهده می‌شود که در یک کسر حجمی معین از نانوذره، استفاده از نانوذره گرافن نسبت به نانوذره نقره عدد افت انرژی کمتری خواهد داشت.



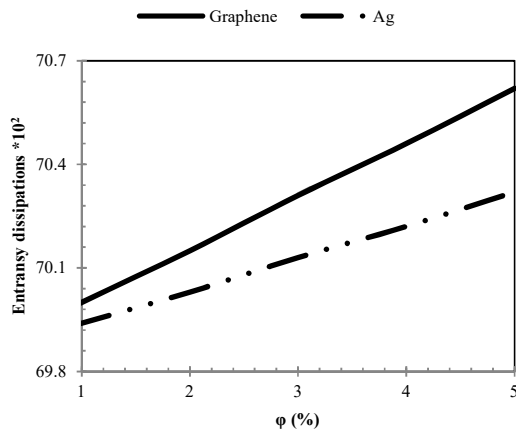
شکل ۱۱- عدد افت انرژی بر حسب کسر حجمی نانوذره.

در شکل ۸ اثر افزایش کسر حجمی نانوذره بر دمای خروجی سیال گرم نشان داده شده است. ملاحظه می‌شود که با افزایش کسر حجمی هر دو نانوذره، دمای خروجی سیال گرم افزایش می‌یابد. زیرا با افزودن کسر حجمی نانوذره به دلیل کاهش آهنگ انتقال گرما دمای خروجی سیال گرم افزایش می‌یابد. همچنین مشاهده می‌شود که در یک کسر حجمی معین از نانوذره، استفاده از نانوذره نقره نسبت به نانوذره گرافن دمای خروجی سیال گرم کمتری خواهد داشت.

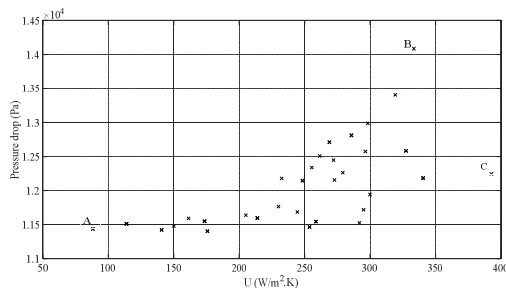


شکل ۸- دمای خروجی سیال گرم بر حسب کسر حجمی نانوذره.

در شکل ۹ اثر افزایش کسر حجمی نانوذره بر عدد تلفات انتروپی نشان داده شده است. ملاحظه می‌شود که با افزایش کسر حجمی هر دو نانوذره، تلفات انتروپی افزایش می‌یابد. زیرا با افزودن کسر حجمی نانوذره به دلیل کاهش آهنگ انتقال گرما و ویژه گرما در فشار ثابت و نیز افزایش دمای خروجی سیال گرم نهایتاً تلفات انتروپی افزایش می‌یابد. همچنین مشاهده می‌شود که در یک کسر حجمی معین از نانوذره، استفاده از نانوذره نقره نسبت به نانوذره گرافن تلفات انتروپی کمتری خواهد داشت.



شکل ۹- عدد تلفات انتروپی بر حسب کسر حجمی نانوذره.



شکل ۱۲- جبهه پرتو.

در جدول ۳ نتایج نقاط مختلف ذکر شده با نتایج قبل از بهینه‌سازی بیان شده است.

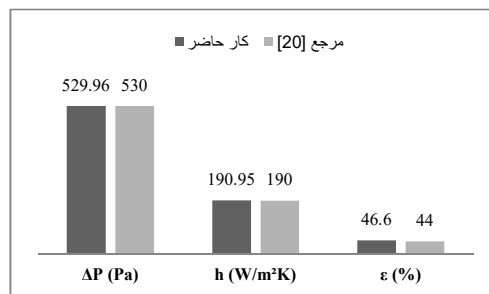
جدول ۳- نتایج قبل و بعد از بهینه‌سازی.

متغیر	نقطه A	نقطه B	نقطه C	نتایج اولیه
$d_i$ (m)	۰/۰۱۴	۰/۰۱۲۱	۰/۰۱۳۶	۰/۰۰۸
L (m)	۰/۴۰۲۶	۰/۴۰۶۹	۰/۴۱۲۷	۰/۵۵
W (m)	۰/۸۴۷۲	۰/۴۳۱۹	۰/۴۱۴۵	۰/۳
$\dot{m}_h$ (kg/s)	۱/۸۹۷۳	۹/۷۴۹۸	۷/۹۰۷۵	۱/۲۵
$\Phi$ (-)	۰/۰۱۱۸	۰/۰۳۳۷	۰/۰۲۲۳	۰
N (-)	۲	۵	۵	۵
U (W/m²K)	۸۸/۱۷۳۵	۳۳۲/۶۰۵۶	۳۹۲/۷۸۶۶	۱۵۴/۲۳۵۷
$\Delta P$ (Pa)	۱۱۴۳۳	۱۴۰۸۷	۱۲۲۴۵	۲۹۴۳۶

• سایر نتایج حالات خاص:

- در حالتی که نقطه A به عنوان نقطه بهینه انتخاب شود کارآیی مبادله‌کن گرمایی ۹۲٪ است که در بالاترین حد ممکن خود قرار خواهد داشت. در حالی که مقدار آن قبل از بهینه‌سازی حدود ۴۶٪ است.
- در حالتی که نقطه A به عنوان نقطه بهینه انتخاب شود آهنگ انتقال گرما ۱۰۰۲۷۰۰ وات است در حالی که مقدار آن قبل از بهینه‌سازی حدود ۳۳۱۰۳۰ وات است.
- در حالتی که نقطه A به عنوان نقطه بهینه انتخاب شود تلفات انرژی در مبادله‌کن گرمایی ۰/۴۷ است که در کمترین حد ممکن خود قرار خواهد داشت. در حالی که مقدار آن قبل از بهینه‌سازی حدود ۰/۷ است.
- در حالتی که نقطه A به عنوان نقطه بهینه انتخاب شود تلفات پتانسیل آنتروپیک در مبادله‌کن گرمایی ۰/۳۶ است که در کمترین حد ممکن خود قرار خواهد داشت. در حالی که مقدار آن قبل از بهینه‌سازی حدود ۰/۴۸ است.
- در حالتی که نقطه B به عنوان نقطه بهینه انتخاب شود عدد افت انرژی در مبادله‌کن گرمایی ۰/۱۴ است که در کمترین حد ممکن خود قرار خواهد داشت. در حالی که مقدار آن قبل از بهینه‌سازی حدود ۰/۴ است.

جهت اعتبارسنجی تحلیل ترمودینامیکی و تایید کد شبیه‌سازی شده در مورد مبادله‌کن گرمایی دولوله‌ای، پارامترهای گرمای و هیدرولیکی سیال گرم به دست آمده با نتایج مرجع در شکل ۱۲ مقایسه شده است. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود نتایج این تحقیق با مرجع ذکر شده مطابقت قابل قبولی دارد.



شکل ۱۲- اعتبارسنجی نتایج.

۲-۴- بهینه‌سازی

در این قسمت از تحقیق، ضریب کلی انتقال گرما و افت فشار سیال سرد به عنوان توابع هدف در بهینه‌سازی انتخاب می‌شوند. روش مورد استفاده جهت بهینه‌سازی روش الگوریتم شاهین هریس است. شش پارامتر قطر داخلی لوله، طول لوله، پهنای مبادله‌کن گرمایی، دبی جرمی سیال گرم، تعداد لوله‌ها و کسر حجمی نانوذره گرافن به عنوان متغیرهای طراحی انتخاب شدند که محدوده آن‌ها در جدول ۲ ذکر شده است.

جدول ۲- محدوده متغیرهای بهینه‌سازی.

متغیر	حد پایین	حد بالا
$d_i$ (m)	۰/۰۱	۰/۰۱۴
L (m)	۰/۴	۱
W (m)	۰/۴	۱
$\dot{m}_h$ (kg/s)	۱	۱۰
$\Phi$	۱	۵
N	۲	۵

شکل ۱۲ نتیجه بهینه‌سازی چندهدفه مبادله‌کن گرمایی لوله‌پره دار را نشان می‌دهد. در این نمودار که به نمودار پرتو موسوم است ملاحظه می‌شود که در بعضی نقاط نتیجه اهداف انتخاب شده دارای تضاد است. به عنوان مثال در نقطه A افت فشار سیال سرد در کمترین مقدار خود قرار دارد اما ضریب کلی انتقال گرما دارای مقدار بهینه نیست. در نقطه B ضریب کلی انتقال گرما به میزان قابل توجهی افزایش یافته است اما افت فشار سیال سرد بسیار بالا است. در نقطه C ضریب کلی انتقال گرما در بهینه‌ترین مقدار خود قرار دارد و افت فشار سیال سرد هم در مقدار مطلوبی قرار دارد. لذا در این تحقیق نقطه C به عنوان نقطه بهینه معرفی می‌گردد.

## ۵- نتیجه گیری

در این پژوهش تحلیلی ترمودینامیکی مبادله کن گرمایی لوله پره دار مورد مطالعه قرار گرفت. دو نانوذره گرافن و نقره به سیال درون لوله افزوده شد و تاثیر آن بر پارامترهای ترمودینامیکی مختلف مورد بررسی قرار گرفت. در ادامه تحقیق مبادله کن گرمایی لوله پره دار با توابع هدف بیشینه نمودن ضریب کلی انتقال گرما و کمینه نمودن افت فشار سیال سرد انجام شد. شش پارامتر قطر لوله داخلی، دبی جرمی سیال گرم، پهنای مبادله کن گرمایی، طول مبادله کن گرمایی، کسر حجمی نانوذره گرافن و تعداد لوله ها به عنوان متغیرهای بهینه سازی انتخاب شدند. نتایج مهم تحقیق به شرح زیر است:

- در یک کسر حجمی معین از نانوذره، هر دو نانوذره گرافن و نقره اثر گذاری تقریباً برابری بر سیال سرد خواهند داشت اما بطور دقیق تر می توان گفت استفاده از نانوذره گرافن نسبت به نانوذره نقره به میزان بسیار ناچیزی افزایش رسانایی گرمایی بیشتری برای سیال سرد در پی خواهد داشت.
- با افزایش کسر حجمی نانوذره گرافن، گرمای ویژه در فشار ثابت سیال سرد با شیب کم کاهش می یابد. در حالی که با افزایش کسر حجمی نانوذره نقره، گرمای ویژه در فشار ثابت سیال سرد با شیب بیشتری کاهش می یابد.
- در یک کسر حجمی معین از نانوذره، استفاده از نانوذره گرافن نسبت به نانوذره نقره افزایش پخشندگی گرمایی بیشتری برای سیال سرد در پی خواهد داشت.
- با افزایش کسر حجمی هر دو نانوذره، عدد پکله سیال سرد کاهش می یابد.
- در یک کسر حجمی معین از نانوذره، استفاده از نانوذره نقره نسبت به نانوذره گرافن دمای خروجی سیال گرم کمتری خواهد داشت.
- با افزایش کسر حجمی هر دو نانوذره، تلفات انترنزی افزایش می یابد.
- با افزایش کسر حجمی هر دو نانوذره، عدد تلفات پتانسیل آنتروپیک افزایش می یابد.
- با افزایش کسر حجمی هر دو نانوذره، عدد افت اگزرژی کاهش می یابد.
- نتایج بهینه سازی نشان داد هنگامی که کسر حجمی نانوذره گرافن به میزان ۰/۰۲۲۳ باشد، ضریب کلی انتقال گرما حدود ۲/۵ برابر در مقایسه با مقدار اولیه آن افزایش خواهد یافت. همچنین افت فشار سیال سرد نیز به میزان ۵۸٪ در مقایسه با مقدار آن قبل از بهینه سازی کاهش خواهد یافت.

## ۶- مراجع

- [1] Bošnjaković M, Muhić S. Numerical analysis of tube heat exchanger with perforated star-shaped fins. *Fluids*. 2020 Dec 13; 5(4):242.
- [2] Hajabdollahi H, Ahmadi P, Dincer I. Multi-objective optimization of plain fin-and-tube heat exchanger using evolutionary algorithm. *Journal of thermophysics and heat transfer*. 2011 Jul; 25(3):424-31.
- [3] Xie G, Wang Q, Sunden B. Application of a genetic algorithm for thermal design of fin-and-tube heat exchangers. *Heat Transfer Engineering*. 2008 Jul 1; 29(7):597-607.
- [4] Wang CC, Webb RL, Chi KY. Data reduction for air-side performance of fin-and-tube heat exchangers. *Experimental Thermal and Fluid Science*. 2000 May 1; 21(4):218-26.
- [5] Raja BD, Patel V, Jhala RL. Thermal design and optimization of fin-and-tube heat exchanger using heat transfer search algorithm. *Thermal Science and Engineering Progress*. 2017 Dec 1; 4:45-57.
- [6] Bhuiyan AA, Amin MR, Islam AS. Three-dimensional performance analysis of plain fin tube heat exchangers in transitional regime. *Applied Thermal Engineering*. 2013 Jan 10; 50(1):445-54.
- [7] Rahimi M, Ranjbar AA, Ganji DD, Sedighi K, Hosseini MJ. Experimental Investigation of Phase Change inside a Finned-Tube Heat Exchanger. *Journal of Engineering*. 2014 Oct; 2014(1):641954.
- [8] Zhao Y, Liu HY, Zhang L, Wang CC. Effect of chevron angle on the thermofluids performance of shell-and-plate heat exchangers—A numerical approach. *Applied Thermal Engineering*. 2024 Feb 15; 239:122061.
- [9] Çolak AB, Mercan H, Açıköz Ö, Dalkılıç AS, Wongwises S. Prediction of nanofluid flows' optimum velocity in finned tube-in-tube heat exchangers using artificial neural network. *Kerntechnik*. 2023 Feb 23; 88(1):100-13.
- [۱۰] اکبری کنگرلویی ر، عباسعلیزاده رنجبری م، پستهای س م، اسمعیلی سنگری م، شبیه سازی جریان تک فازی و دوفازی نانوسیال آب- اکسید تیتانیوم در مبادله کن گرمایی دولوله ای جریان مخالف و بررسی عملکرد انتقال گرما و افت فشار در آن. *مجله مهندسی مکانیک دانشگاه تبریز*. ۱۳۹۹، د. ۵، ش. ۴، ص ۲۹-۳۵.
- [11] Raja BD, Patel V, Jhala RL. Thermal design and optimization of fin-and-tube heat exchanger using heat transfer search algorithm. *Thermal Science and Engineering Progress*. 2017 Dec 1; 4:45-57.
- [12] Alavi SE, Moory Shirbani M. Multi-objective Optimization of Double pipe Heat Exchangers from the Point of View of Efficiency and Economics. *Iranian Journal of Chemistry and Chemical Engineering*. 2024 Jul 1; 43(7):2786-2799.
- [13] Alavi SE, Moory Shirbani M. Optimization and Comprehensive Investigation of the Effect of Geometrical Parameters on Entransy, Exergy and Entropy in Finned Tube Heat Exchangers. *Iranian Journal of Chemistry and Chemical Engineering*. 2024 Jul 1; 43(7):2800-2814.
- [14] Alavi SE, Shirbani MM, Tondro MK. Optimization of gasket-plate heat exchanger based on entransy principles using new method of Harris Hawks. *Multiscale and Multidisciplinary Modeling, Experiments and Design*. 2024 Mar; 7(1):83-96.
- [15] Moori Shirbani M, Alavi SE, Koochak Tondro M. Minimizing the entropic potential losses number in a gasket-plate heat exchanger. *Iran. J. Chem. Chem. Eng.* 2023 Mar; 42(3):1006-1016.
- [16] Alavi SE, Moori Shirbani M, Koochak Tondro M. Exergy-economic optimization of gasket-plate heat exchangers. *Journal of Computational Applied Mechanics*. 2023 Jun 1; 54(2):254-67.
- [17] Wang XQ, Mujumdar AS. A review on nanofluids-part I: theoretical and numerical investigations. *Brazilian journal of chemical engineering*. 2008 Dec; 25:613-30.
- [18] Fares M, Mohammad AM, Mohammed AS. Heat transfer analysis of a shell and tube heat exchanger operated with graphene nanofluids. *Case Studies in Thermal Engineering*. 2020 Apr 1; 18:100584.
- [۹] موری شیربانی م، علوی س ا، مقایسه عملکرد فرکانسی بهینه سازی شده برداشت کننده های انرژی تک لایه مگنتو-الکترو-الاستیک و پیزوالکتریک با استفاده از الگوریتم بهینه سازی شاهین هریس. *مجله مهندسی مکانیک دانشگاه تبریز*. ۱۴۰۳، د. ۱۰۷، ش. ۲، ص ۵۱-۶۰.
- [20] Incropera FP, DeWitt DP, Bergman TL, Lavine AS. *Fundamentals of heat and mass transfer*. New York: Wiley; 1996 Feb 16.