

## مدلسازی و بهینه‌سازی مشخصات هندسی در طراحی مبدل‌های حرارتی صفحه‌ای موجدار با استفاده از روش تاگوچی

الهام حسینی راد<sup>۱</sup>، وحید بیداریان<sup>۲</sup>، فرامرز هرمزی<sup>۳</sup>، مرتضی خوشوقت علی آبادی<sup>۴\*</sup>

<sup>۱</sup> دانش آموخته دکتری تخصصی، دانشکده مهندسی شیمی، نفت، گاز و پتروشیمی، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران

<sup>۲</sup> دانش آموخته کارشناسی ارشد، گروه مهندسی شیمی، واحد شاهرود، دانشگاه آزاد اسلامی، شاهرود، ایران

<sup>۳</sup> استاد، دانشکده مهندسی شیمی، نفت، گاز و پتروشیمی، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران

<sup>۴</sup> دانشیار، گروه مهندسی شیمی، واحد شاهرود، دانشگاه آزاد اسلامی، شاهرود، ایران

مقاله مستقل، تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۶/۱۱؛ تاریخ بازنگری: ۱۳۹۹/۰۱/۱۲؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۱۰/۱۳

### چکیده

در مطالعه حاضر، به منظور بهینه‌سازی عملکرد مبدل‌های حرارتی با کانال‌های موجدار، طراحی آزمایشی با استفاده از روش تاگوچی برای ۲۵ مدل هندسی متفاوت انجام است. برای هر یک از این مشخصات پنج مقدار متفاوت در نظر گرفته شد. در هر یک از این مدل‌ها، رفتار حرارتی و هیدرولیکی هوا به عنوان سیال خنک‌کننده توسط دینامیک سیالات محاسباتی در سه بعد شبیه‌سازی شد. با استفاده از روش آنالیز واریانس، مقدار بهینه هر یک از مشخصات هندسی و همچنین تاثیر آنها بر میزان انتقال حرارت و افت فشار هوا در محدوده وسیعی از اعداد رینولدز مشخص شد. نتایج نشان دادند که مقدار سطوح بهینه برای ارتفاع پره، گام پره، طول موج، ضخامت پره، دامنه موج و طول مشخصه (طول پره به طول موج) در عدد رینولدز ۲۰۰ برای ضریب  $z$  به ترتیب ۱۰، ۳/۵، ۰/۵، ۲ و ۵، برای ضریب  $f$  به ترتیب ۶، ۱/۵، ۱۱، ۰/۲، ۰/۵ و ۹ و برای  $z/f$  به ترتیب ۶، ۳/۵، ۱۱، ۰/۲، ۰/۵ و ۵ است. دامنه موج برای ضریب  $z$  در ناحیه آرام بیشترین تأثیر را داشت، ولی در اعداد رینولدز بالاتر، به تدریج از اهمیت آن کاسته شده و بر اهمیت گام پره افزوده می‌شود.

**کلمات کلیدی:** مبدل حرارتی صفحه‌ای فشرده؛ کانال‌های موجدار؛ شبیه‌سازی CFD؛ بهینه‌سازی؛ روش تاگوچی.

## Modelling and Optimization of Geometrical Parameters in Design of the Wavy-Fin-Plate Compact Heat Exchanger by Taguchi method

E. Hosseinirad<sup>1</sup>, V. Bidarian<sup>2</sup>, F. Hormozi<sup>3</sup>, M. Khoshvaght-Aliabadi<sup>4\*</sup>

<sup>1</sup> Ph.D., Chem. Eng., Semnan Univ., Semnan, Iran

<sup>2</sup> MSc, Chem. Eng., Islamic Azad Shahrood Univ., Shahrood, Iran

<sup>3</sup> Assoc. Prof., Chem. Eng., Semnan Univ., Semnan, Iran

<sup>4</sup> Assoc. Prof., Islamic Azad Shahrood Univ., Shahrood, Iran

### Abstract

In the present study, to optimum the performance of wavy-plate heat exchangers, a Taguchi method is utilized for 25 models in five levels. Thermal-hydraulic performance of the models is investigated using an appropriate 3D-CFD simulation. Then, the variance analysis is applied to detect the optimum values and more effective parameters on heat transfer rate and pressure drop of air in a wide range of Reynolds numbers. The results indicated that the optimum levels for height, pitch, wave-length, thickness, wave-amplitude and characteristic length (fin length to wave-length) for the  $z$  factor are 10, 3.5, 7, 0.5, 2 and 5 mm (with "larger is better" method for computing the signal to noise ratio), for  $f$  factor are 6, 1.5, 11, 0.2, 0.5 and 9 mm (with "smaller is better" method) and for  $z/f$  are 6, 3.5, 11, 0.2, 0.5 and 5 mm (with "larger is better" method) at  $Re=200$ , respectively. The wavy-amplitude on  $z$  factor has the most influence in the laminar regime, but its importance is gradually reduced at higher Reynolds numbers and the importance of pitch is increased. The wavelength is the second effective characteristic for  $z$ ,  $f$ , and  $z/f$  factors in all Reynolds numbers.

**Keywords:** Compact plate Heat Exchanger; Wavy channels; CFD simulation; Optimization; Taguchi method.

## ۱- مقدمه

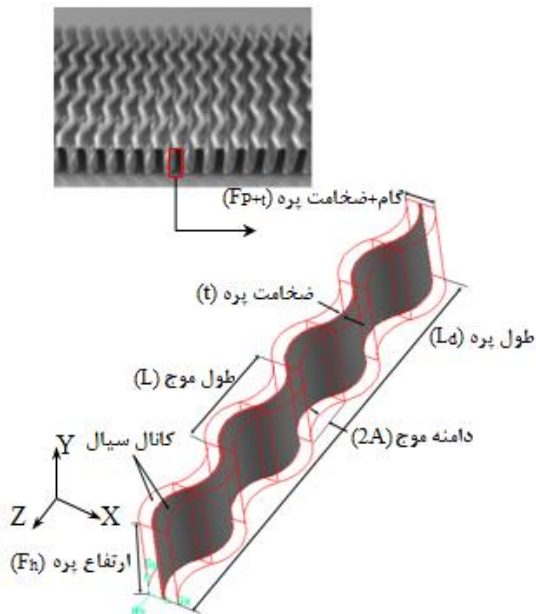
در سال‌های اخیر، در مطالعات بسیاری از روش‌های غیر فعال گوناگونی برای بهبود عملکرد حرارتی در مبدل‌های حرارتی مختلف استفاده شده است [۸-۱۱]. از جمله این روش‌ها، اصلاح طراحی هندسی گذرگاه‌های عبور سیال است. مبدل - حرارتی صفحه‌ای، یکی از پر کاربردترین مبدل‌های حرارتی فشرده است که با اصلاح طراحی هندسی کانال‌های سیال، دارای سطح انتقال حرارت بزرگ، وزن کم و عملکرد حرارتی بالا است. این مبدل‌های حرارتی در اتومبیل‌ها، دستگاه‌های تهویه هوا، کولرهای الکتریکی، دستگاه‌های برودتی و واحدهای شیمیایی به کار برده می‌شوند. برای افزایش انتقال حرارت در مبدل‌های حرارتی صفحه پره‌دار از کانال‌های مختلفی استفاده می‌شود. در این میان کانال‌های موجدار، عملکرد قابل توجه‌ای دارند [۹]؛ همچنین مبدل حرارتی صفحه‌ای موجدار، به دلیل ساخت آسان، یکی از رایج‌ترین نوع مبدل‌های صفحه‌ای است. کیز و لاندن در سال ۱۹۸۴ نخستین افرادی بودند که سیال هوا را در سه نوع پره موجدار بررسی کردند [۱۰].

ژانگ و همکاران، افزایش انتقال حرارت را در پره‌های موجدار سینوسی مطالعه کردند. آنها مشاهده کردند که مقدار ضرایب  $z$  و  $f$  با افزایش نسبت  $F_p/F_h$  کاهش و با افزایش نسبت  $F_p/2A$  افزایش می‌یابد [۱۱]. مانگلیک و همکاران در سال ۲۰۰۵، جابجایی اجباری جریان هوا را در شدت جریان‌های کم به صورت سه بعدی شبیه‌سازی کردند [۱۲]. مولی و همکاران در سال ۲۰۰۶، کانال‌های موجدار سینوسی را به صورت آزمایشگاهی و عددی بررسی کردند. ضرائب عددی  $z$  و  $f$ ، میزان انحراف قابل قبولی از داده‌های آزمایشگاهی داشتند [۱۳]. جانکی و همکاران در سال ۲۰۰۷، تاثیر مشخصه‌های هندسی را بر عملکرد هیدرولیکی و حرارتی هوا در یازده مدل مبدل حرارتی با کانال‌های موجدار و لوله‌های صاف بررسی کردند و در نهایت روابطی برای ضرائب  $z$  و  $f$  پیشنهاد دادند [۱۴]. آنها همچنین در سال ۲۰۱۰ به صورت عددی، اثر مشخصه‌های شدت حالت موجی و نوع سطح مقطع را در پره موجدار بررسی کردند. آنها مشاهده کردند که اثر شکل سطح مقطع کانال کم، ولی دامنه موج اثر قابل توجه‌ای بر میزان انتقال حرارت و افت فشار سیال در پره موجدار داشتند [۱۵].

خوشوقت و همکاران در سال ۲۰۱۱، شبیه‌سازی عددی سه بعدی مبدل حرارتی صفحه‌ای موجدار را انجام دادند. آنها همچنین ضرائب  $z$  و  $f$  را با استفاده از شبکه عصبی محاسبه و در نهایت دو رابطه برای این دو ضریب پیشنهاد دادند [۱۶]. شیک و همکاران در سال ۲۰۰۹، در بررسی عددی خود ضرائب  $z$  و  $f$  هوا را در مبدل حرارتی فشرده برحسب عدد رینولدز در ناحیه آشفته محاسبه کردند [۱۷]. آنها همچنین در سال ۲۰۱۰ مطالعات انجام شده روی مبدل‌های حرارتی فشرده را مرور کردند. آنها بیان کردند که تعداد مقالات مربوط به شبیه‌سازی سه بعدی و روابط موجود برای پره‌های موجدار محدود است [۱۸]؛ بنابراین، نیاز به ارائه روابط جامعی برای پیش‌بینی میزان انتقال حرارت و افت فشار سیال‌های مختلف با مشخصه‌های هندسی موثر در کانال‌های موجدار وجود دارد.

بدین منظور لازم است که مدل‌ها با مشخصه‌های هندسی مختلف بررسی شوند. نویسندگان این مقاله در مطالعه قبلی، به بررسی اثر مشخصات هندسی از جمله: گام، ارتفاع، طول موج، ضخامت، دامنه موج و طول کانال موجدار بر ضرائب  $z$  و  $f$  در محدوده گسترده‌ای از اعداد رینولدز ۲۰۰ تا ۷۵۰۰ پرداختند. نتایجشان نشان داد که مشخصات هندسی و میزان شدت جریان ورودی به کانال، عملکرد مبدل را تحت تاثیر قرار می‌دهند. نهایتاً، روابطی برای ضرائب  $z$  و  $f$  در ناحیه جریان آرام و آشفته پیشنهاد دادند [۱۹]. در کاری دیگر، خوشوقت و هرمزی، کانال‌های موجدار را با تغییر در طول موج اصلاح کردند. نتایجشان نشان دادند که روند افزایشی طول موج، باعث افزایش عملکرد کانال‌های موجدار می‌شود [۲۰]. خوشوقت علی‌آبادی و همکاران در سال ۲۰۱۶، به صورت آزمایشگاهی اثر منافذ، زائده‌های مثلثی و نانوسیال را بر عملکرد حرارتی و اصطکاکی مبدل حرارتی صفحه‌ای موجدار بررسی کردند. آنها گزارش دادند که عملکرد کلی با استفاده از پره‌های موجدار با زائده‌های مثلثی به مراتب بیشتر از آن برای پره‌های منفذ دار و ساده بود [۳].

نیلپونگ و همکاران در سال ۲۰۱۹، به صورت آزمایشگاهی به بررسی اثر تغییر زاویه، سرعت هوا و دمای سطح پایه بر انتقال حرارت و افت فشار مبدل حرارتی صفحه‌ای پره موجدار سینوسی و سینوسی منقطع پرداختند.



شکل ۱- هندسه پره موجدار سینوسی، جانکی و همکاران ۲۰۰۷ [۱۴] و بخشی از پره شبیه‌سازی شده

بخش شبیه‌سازی شده شامل: ضخامت پره و سیال در تماس با دو سمت آن و دیواره‌های بالایی و پایینی است. جنس دیواره‌ها از مس با ضریب هدایت حرارتی  $387/6 W/(m.k)$  و ارتفاع صفحات پوشاننده بالا و پایین کانال  $0/5mm$  است. سیال مورد بررسی هوا، با فرض نیوتنی، تراکم ناپذیری و خواص فیزیکی ثابت است. درجه حرارت هوای ورودی  $30/15$  کلوین است. از جابجایی طبیعی و تشعشع حرارتی هم صرف نظر شد.

### ۳- شبیه‌سازی عددی

#### ۳-۱- معادلات حاکم

معادلات حاکم عبارتند از:

معادله پیوستگی [۲۷]:

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0 \quad (1)$$

$u$  سرعت سیال و  $\rho$  چگالی آن است. معادلات حرکت [۲۷]:

$$\rho \frac{\partial}{\partial x_i}(u_i u_j) = -\frac{\partial P}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_j} \mu \quad (2)$$

$$\left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right) + \frac{\partial}{\partial x_i} (-\rho \bar{u}_i \bar{u}_j)$$

آنها مشاهده کردند که با افزایش زاویه، انتقال حرارت و همچنین افت فشار افزایش یافتند؛ همچنین پره‌های سینوسی منقطع، عملکرد حرارتی بالاتری در مقایسه با پره های سینوسی داشتند [۲۱]. بهینه‌سازی مشخصات هندسی منجر به افزایش بازدهی مبدل حرارتی می‌شود [۲۲-۲۴]. سانگ و همکاران در سال ۲۰۱۵، با هدف بهبود انتقال حرارت و کاهش افت فشار، به بهینه‌سازی مشخصات هندسی پره موجدار از جمله: فاصله گذاری، نسبت های طول موج و دامنه موج در مبدل حرارتی فشرده پرداختند [۲۵]. ون و همکاران در سال ۲۰۱۹، به صورت عددی با استفاده از آنالیز برهم کنش ساختار سیال، به بهینه‌سازی مشخصات هندسی مبدل حرارتی صفحه‌ای پره موجدار پرداختند [۲۶]. در مطالعه حاضر، بهینه‌سازی نتایج شبیه‌سازی مبدل حرارتی صفحه‌ای موجدار با استفاده از روش تاگوچی انجام شد و در نهایت مقادیر بهینه‌ای برای مشخصات هندسی، با توجه به نسبت سیگنال به نویز، در اعداد رینولدز مختلف ارائه شد. با این مقادیر، هندسه‌های بهینه‌ای برای مبدل حرارتی فشرده صفحه موجدار پیشنهاد داده شدند. این هندسه‌ها در مطالعه حاضر مجدداً شبیه‌سازی شدند و مقادیر مطلوبی برای ضرائب  $z$  و  $f$  محاسبه شدند؛ همچنین، موثرترین مشخصه هندسی بر عملکرد حرارتی و هیدرولیکی مبدل، تعیین شد و میزان تاثیر مشخصات هندسی بر ضرائب  $f, z$  و  $f/z$  تعیین شدند. این مطالعه راهنمای مناسب در طراحی مبدل‌های حرارتی با صفحات موجدار است.

### ۲- هندسه صفحه موجدار

در شکل ۱، صفحات موجدار مبدل حرارتی فشرده و همچنین، بخش انتخاب شده برای شبیه‌سازی نشان داده شده است. در صفحات موجدار به طور منظم الگوی سینوسی موج تکرار می‌شود، بنابراین برای کاهش زمان محاسبات تنها یک بخش از پره صفحه‌ای موجدار شبیه‌سازی شد. مشخصات طراحی و هندسی عبارتند از: گام پره  $(F_p)$ ، ارتفاع پره  $(F_n)$ ، طول موج  $(L)$ ، ضخامت پره  $(t)$ ، دامنه موج  $(2A)$  و طول پره  $(L_d)$ ، بطوری که در شکل ۱ نشان داده شده است.

### ۳-۲- روابط ریاضی

در سطوح فشرده، عملکرد حرارتی و افت فشار به ترتیب با دو ضریب  $f$  و  $f$  بررسی می‌شوند. ضریب  $f$  معیاری از شدت انتقال حرارت و ضریب  $f$  متناسب با افت فشار است. بدین ترتیب، افزایش  $f$  باعث افزایش انتقال حرارت و کاهش  $f$  موجب کمتر شدن افت فشار می‌شود. این دو ضریب به صورت تعریف می‌شوند:

$$j = StPr^{2/3} = \frac{h}{\rho u c_p} Pr^{2/3} \quad (11)$$

$$f = \frac{\Delta P}{L} \frac{D_h}{\rho u^2} \quad (12)$$

$St$  عدد استانتون و  $Pr$  عدد پرانتل است که در اینجا  $0.7$  است. رابطه عدد رینولدز و قطر هیدرولیکی کانال به این صورت است [۱۹].

$$Re = \frac{\rho u D_h}{\mu} \quad (13)$$

$$D_h = \frac{2(F_h \times F_p)}{F_h + F_p} \quad (14)$$

### ۳-۳- روش حل عددی

معادلات حاکم بر جریان و انتقال حرارت در مختصات دکارتی در سه بعد، با استفاده از روش حجم محدود حل شدند. در اینجا، از شبیه‌سازی توأم با در نظر گرفتن انتقال حرارت در سیال خنک‌کننده و جامد استفاده شد. طرح استاندارد برای گسسته‌سازی فشار و همچنین روش نیمه‌ضمنی برای معادلات مرتبط با فشار (SIMPLE) برای کوپلینگ فشار-سرعت استفاده شدند. به منظور حل عددی دقیق‌تر، از گسسته‌سازی طرح آپویند مرتبه دوم برای ترم‌های جابجایی استفاده شد. معادلات حاکم مکرراً تا زمان همگرا شدن حل شدند. معیار همگرایی به ترتیب برای جرم، سرعت و انرژی  $10^{-6}$ ،  $10^{-8}$  و  $10^{-10}$  بودند. مدل‌سازی با استفاده از نرم‌افزار فلونت ۶.۳ در سروری با ۲۴ هسته پردازنده، حافظه محاسباتی ۸ گیگابایت، ۶۴ بایتی انجام شد.

### ۳-۴- شرایط مرزی

در ورودی کانال، ضخامت پره باعث غیر یکنواخت شدن پروفایل سرعت می‌شود. برای یکنواخت شدن و همچنین جلوگیری از چرخش هوا در خروجی از کانال، دو کانال

$$-\rho \bar{u}_i \bar{u}_j = \mu_t \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \left( \rho k + \mu_t \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right) \delta_{ij} \quad (3)$$

$\mu$  فشار، ویسکوزیته دینامیکی مولکولی یا آشفته و  $\delta_{ij}$  دلتای کرانکر است. برای جریان آشفته، مدل  $k-\varepsilon$  RNG توصیه شده است. در این مدل، دو معادله به دامنه حل اضافه می‌شود که عبارتند از: انرژی جنبشی جریان آشفته [۲۷] و [۲۸]:

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \alpha_k \mu_{eff} \frac{\partial k}{\partial x_i} \right) + \mu_t S^2 - \rho \varepsilon \quad (4)$$

و نرخ اتلاف [۲۷] و [۲۸]:

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\rho \varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \alpha_\varepsilon \mu_{eff} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right) + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} \mu_t S^2 - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} - R_\varepsilon \quad (5)$$

که  $\mu_t = \rho C_\mu k^2 / \varepsilon$  و  $\mu_{eff} = \mu + \mu_t$  در  $C_\mu = 0.0845$  و  $S$  ضریب نرخ متوسط تانسور کرنش است که به صورت زیر تعریف می‌شود [۲۷] و [۲۸]:

$$S = (2S_{ij}S_{ij})^{1/2} \quad (6)$$

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) \quad (7)$$

مقادیر  $\alpha_k$  و  $\alpha_\varepsilon$ ، معادل با عکس مقدار پرانتل برای  $k$  و  $\varepsilon$  است. نرخ کرنش عبارت است از [۲۷] و [۲۸]:

$$R_\varepsilon = \frac{C_\mu \rho \eta^3 \left( 1 - \frac{\eta}{\eta_0} \right) \varepsilon^2}{1 + \beta \eta^3} \quad (8)$$

که  $\eta = Sk / \varepsilon$ ،  $\eta_0 = 4/38$  و  $\beta = 0/012$  است. مقادیر ثابت مدل  $k-\varepsilon$  RNG،  $C_{1\varepsilon} = 1/42$  و  $C_{2\varepsilon} = 1/68$  است. معادله بقای انرژی برای سیال [۲۷]:

$$\frac{\partial}{\partial x_i} [u_i (\rho E + P)] = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( k_{eff} \frac{\partial T}{\partial x_i} \right) \quad (9)$$

معادله بقای انرژی برای جامد [۲۷]:

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \left( k_s \frac{\partial T}{\partial x_i} \right) = 0 \quad (10)$$

$E$  انرژی کل و  $k_{eff}$  ضریب هدایت حرارتی موثر است که از حاصل جمع ضریب هدایت مولکولی و آشفته ( $k + k_t$ ) بدست می‌آید.  $k_t$  و  $\mu_t$  از مدل  $k-\varepsilon$  RNG تعیین می‌شوند [۲۷] و [۲۸].

جدول ۱- مشخصات شبکه های مورد بررسی

| نام شبکه  | تعداد شبکه | ضریب $z$ | خطا $f$ (%) | ضریب $f$ | خطا (%) |
|-----------|------------|----------|-------------|----------|---------|
| درشت      | ۳۲۹۸۶۸     | ۰/۰۰۶۰۸  | -           | ۰/۰۷۰۸۷  | -       |
| متوسط     | ۶۶۳۲۶۴     | ۰/۰۰۶۱۱  | ۲/۵         | ۰/۰۷۰۴۶  | ۲/۰۰    |
| ریز       | ۸۷۲۷۱۲     | ۰/۰۰۶۱۸  | ۱/۹         | ۰/۰۶۹۹۵  | ۱/۳     |
| بسیار ریز | ۱۱۳۶۴۳۰    | ۰/۰۰۶۲۳  | ۰/۸         | ۰/۰۶۹۶۰۲ | ۰/۵     |

#### ۴- طراحی آزمایش با روش تاگوچی

طراحی آزمایش با روش تاگوچی، نوعی طراحی فاکتوریل با آرایه‌های متعامد است. این روش این امکان را فراهم می‌سازد که تاثیر فاکتورها با تعداد سطوح مختلف را روی پاسخ در تعداد مراحل آزمایش نسبتاً کم بررسی کرد. بدین منظور، باید فاکتورهای موثر بر فرآیند، تعداد سطح آنها و پارامترهای پاسخ را مشخص کرد. روش تاگوچی، یک روش موثر برای رسیدن به مقدار بهینه سطوح فاکتورها است. با کمک آنالیز واریانس یا نسبت سیگنال به نویز، می‌توان فاکتورهای مهم که تاثیر قابل توجهی بر پاسخ دارند را مشخص و نیز مقادیر بهینه سطوح را تعیین کرد [۲۲].

#### ۴-۱- فاکتورهای موثر، پارامترهای پاسخ و نسبت $S/N$

در این بررسی، فاکتورهای موثر بر عملکرد مبدل حرارتی صفحه‌ای موجدار، مشخصات هندسی آن است. هر یک از مشخصه‌ها، پنج مقدار مختلف دارد. برای بررسی اثر این مشخصه‌ها بر عملکرد مبدل، نیاز به طراحی مدل‌های هندسی مختلفی است که در هر مدل، مقدار هر یک از این مشخصه‌ها متفاوت است. این کار با استفاده از طراحی آزمایش با روش تاگوچی انجام شد که در جدول ۲ نشان داده شده است. در این طرح آزمایش، ۲۵ مدل هندسی مختلف پیشنهاد شد. هر مدل در ۱۰ عدد رینولدز مختلف بررسی شد. نتایج شبیه‌سازی نشان دادند که عملکرد حرارتی و هیدرولیکی هوا به شدت تحت تاثیر مقدار مشخصات هندسی است [۱۹]. برای داشتن بهترین عملکرد در مبدل، باید مقدار مطلوب این مشخصات تعیین شود. بهینه‌سازی مشخصات هندسی، بازدهی مبدل حرارتی را افزایش می‌دهد. برای این منظور، نتایج شبیه‌سازی با استفاده از روش تاگوچی مورد بررسی قرار گرفت. در این روش، باید تعداد فاکتورهای موثر بر عملکرد و همچنین تعداد مقادیر مختلف آنها مشخص

مستقیم به ابتدا و انتهای کانال موجدار اضافه شدند. در سطحی که هوا وارد کانال می‌شود، شرط مرزی سرعت و دما ثابت استفاده شد.

$$u_x = 0, u_y = 0, u_z = u_{in} = \frac{Re\mu_f}{\rho_f d_h}, T = T_m \quad (15)$$

برای سطح انتهایی کانال که هوا از آنجا خارج می‌شود، شرط صفر بودن گرادیان دما و سرعت به کار رفت.

$$\frac{\partial u_x}{\partial z} = 0, \frac{\partial u_y}{\partial z} = 0, \frac{\partial u_z}{\partial z} = 0, \frac{\partial T}{\partial z} = 0 \quad (16)$$

برای سطوح جانبی، سطوح بالا و پایین دو کانال ورودی و خروجی هوا، شرط مرزی عایق حرارتی و عدم لغزش به کار رفت. برای سطوح بالا و پایین:

$$u_x = u_y = u_z = 0, \frac{\partial T}{\partial y} = 0 \quad (17)$$

سطوح جانبی:

$$u_x = u_y = u_z = 0, \frac{\partial T}{\partial x} = 0 \quad (18)$$

برای سطوح جانبی کانال، شرط مرزی تناوبی استفاده شد. برای دو سطح بالا و پایین، شرایط عدم لغزش و دما ثابت به کار رفت.

$$u_x = u_y = u_z = 0, T = T_{wall} \quad (19)$$

مقدار دمای دیواره گرم  $363/15$  در نظر گرفته شد. سطوح میانی، پره موجدار است که برای آن شرط مرزی عدم لغزش و عدم پرش دمایی استفاده شد.

$$u_x = u_y = u_z = 0, T_{f,r} = T_{wall,r} \quad (20)$$

$\Gamma$  فصل مشترک بین سیال و جامد است [۱۹]. شرایط مرزی به کار رفته، مدل را به حالت واقعی نزدیک می‌کند.

#### ۳-۵- استقلال شبکه

برای بررسی اثر ابعاد شبکه بر نتایج محاسبه شده، از چهار شبکه مختلف برای مدل هندسی با گام پره ۲ میلی متر، ارتفاع پره ۸ میلی متر، طول پره  $64/8$  میلی متر و دامنه موج  $1/5$  میلی متر استفاده شد. از ضرایب  $z$  و  $f$  به عنوان عامل مقایسه استفاده شد. نتایج بررسی استقلال شبکه، در جدول ۱ نشان داده شده است. میزان اختلاف بین ضرایب محاسبه شده با شبکه‌های ریز و بسیار ریز، کمتر از یک درصد است؛ بنابراین، به منظور کاهش زمان محاسبات، از شبکه ریز استفاده شد.

جدول ۲- طراحی آزمایش با استفاده از روش تاگوچی (میلی‌متر)

| شماره آزمایش | ارتفاع پره | گام پره | طول موج | ضخامت پره | دامنه موج | طول مشخصه |
|--------------|------------|---------|---------|-----------|-----------|-----------|
| ۱            | ۱۰         | ۳/۵     | ۱۰      | ۰/۳       | ۱         | ۵         |
| ۲            | ۸          | ۱/۵     | ۹       | ۰/۵       | ۱         | ۸         |
| ۳            | ۱۰         | ۲/۵     | ۸       | ۰/۱       | ۲/۵       | ۸         |
| ۴            | ۹          | ۱/۵     | ۱۰      | ۰/۲       | ۲/۵       | ۷         |
| ۵            | ۱۰         | ۲       | ۷       | ۰/۵       | ۲         | ۷         |
| ۶            | ۱۰         | ۳       | ۹       | ۰/۲       | ۰/۵       | ۹         |
| ۷            | ۷          | ۳/۵     | ۷       | ۰/۲       | ۱/۵       | ۷         |
| ۸            | ۷          | ۳       | ۱۱      | ۰/۱       | ۱         | ۷         |
| ۹            | ۶          | ۱/۵     | ۷       | ۰/۱       | ۰/۵       | ۵         |
| ۱۰           | ۹          | ۲/۵     | ۷       | ۰/۴       | ۱         | ۹         |
| ۱۱           | ۷          | ۲/۵     | ۱۰      | ۰/۵       | ۰/۵       | ۶         |
| ۱۲           | ۶          | ۲/۵     | ۹       | ۰/۳       | ۱/۵       | ۷         |
| ۱۳           | ۸          | ۳/۵     | ۸       | ۰/۴       | ۰/۵       | ۷         |
| ۱۴           | ۹          | ۳/۵     | ۹       | ۰/۱       | ۲         | ۶         |
| ۱۵           | ۶          | ۲       | ۸       | ۰/۲       | ۱         | ۶         |
| ۱۶           | ۹          | ۲       | ۱۱      | ۰/۳       | ۰/۵       | ۸         |
| ۱۷           | ۶          | ۳/۵     | ۱۱      | ۰/۵       | ۲/۵       | ۹         |
| ۱۸           | ۱۰         | ۱/۵     | ۱۱      | ۰/۴       | ۱/۵       | ۶         |
| ۱۹           | ۸          | ۲/۵     | ۱۱      | ۰/۲       | ۲         | ۵         |
| ۲۰           | ۸          | ۲       | ۱۰      | ۰/۱       | ۱/۵       | ۹         |
| ۲۱           | ۶          | ۳       | ۱۰      | ۰/۴       | ۲         | ۸         |
| ۲۲           | ۷          | ۲       | ۹       | ۰/۴       | ۲/۵       | ۵         |
| ۲۳           | ۷          | ۱/۵     | ۸       | ۰/۳       | ۲         | ۹         |
| ۲۴           | ۹          | ۳       | ۸       | ۰/۵       | ۱/۵       | ۵         |
| ۲۵           | ۸          | ۳       | ۷       | ۰/۳       | ۲/۵       | ۶         |

این شکل نشان می‌دهد که سطوح بهینه برای ارتفاع پره، گام پره، طول موج، ضخامت پره، دامنه موج و طول مشخصه ( $L_d/L$ ) به ترتیب ۶، ۱/۵، ۱۱، ۰/۲، ۰/۵ و ۹ است که با این مقادیر بهینه، برای ضریب  $f$  مقدار مطلوب ۰/۱۹۰۹ محاسبه شد. سایر مقادیر بهینه در اعداد رینولدز مختلف در جدول ۳ ارائه شده است. در ناحیه آشفته (در اعداد رینولدز ۲۵۰ تا ۷۵۰۰)، روش تاگوچی برای ارتفاع پره، گام پره، طول موج، ضخامت پره، دامنه موج و طول مشخصه مقادیر بهینه یکسانی را ارائه می‌دهد که به ترتیب ۶، ۱/۵، ۱۱، ۰/۲، ۰/۵ و ۹ است. تنها در اعداد رینولدز ۷۰۰ و ۱۲۰۰، مقدار بهینه برای ارتفاع پره ۹ میلی‌متر است، درحالی‌که مقدار بهینه سایر مشخصات هندسی در این اعداد رینولدز مشابه با سایر اعداد رینولدز گزارش شده در بالاست. با این مقادیر بهینه، مدل-

شود. در این مطالعه، ۶ فاکتور موثر و ۵ سطح وجود دارد. در بخش‌های بعدی، میزان تاثیر هر یک از این فاکتورها بر ضرائب  $z$ ،  $f$  و  $z/f$  همچنین مقدار بهینه هر یک از آنها در هر عدد رینولدز مشخص شد.

در این مطالعه، پارامترهای پاسخ مورد بررسی ضریب  $z$ ، ضریب اصطکاک  $f$  و معیار ارزیابی عملکرد مبدل  $z/f$  است. مقادیر بهینه برای حداکثر انتقال حرارت، حداقل میزان افت فشار و بیشترین میزان ضریب  $z/f$  ارائه شدند. در این مقاله، از دو روش به منظور محاسبه  $S/N$  استفاده شد. روش اول که معادله (۲۱) است، روش "بزرگتر بهتر است" نامیده می‌شود. این روش زمانی استفاده می‌شود که برای افزایش بازدهی مبدل، مقدار پاسخ بزرگتر مد نظر باشد. هر چه مقدار ضریب  $z$  و معیار  $z/f$  بزرگتر باشد، بازدهی مبدل حرارتی افزایش می‌یابد. بنابراین، برای محاسبه‌ی این دو ضریب، از این روش استفاده می‌شود. روش دوم که معادله (۲۲) است، روش "کوچکتر بهتر است" نام دارد. این روش هم زمانی کاربرد دارد که پاسخ کوچک‌تر مورد نظر باشد، لذا برای محاسبه ضریب  $f$  از این روش استفاده می‌شود [۲۲]

## ۵- نتایج و بحث

### ۵-۱- بررسی تاثیر فاکتورهای مختلف بر ضریب $f$

عملکرد هیدرولیکی سیال در مبدل‌های حرارتی فشرده، با ضریب اصطکاک فاینینگ ( $f$ ) بررسی می‌شود که در معادله (۱۲) تعریف شد. این ضریب متناسب با افت فشار سیال درون مبدل است. در کار شبیه‌سازی مشاهده شد که ضریب اصطکاک درون مبدل تحت تاثیر مقدار مشخصات هندسی است [۱۹].

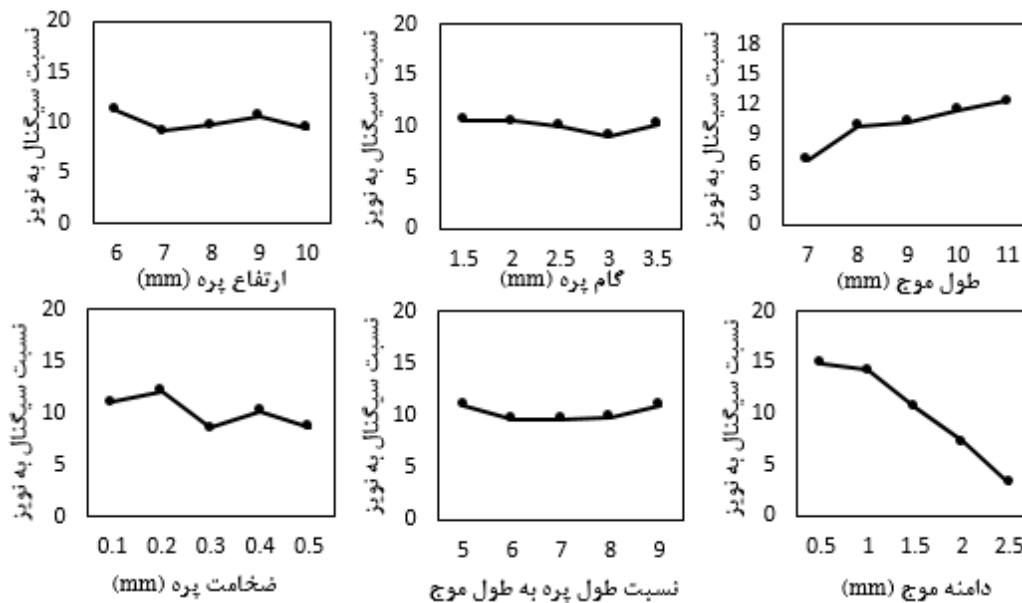
$$SNR_L = -10 \log \left( \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2} \right) \quad (21)$$

$$SNR_S = -10 \log \left( \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \right) \quad (22)$$

برای کاهش ضریب اصطکاک در محاسبه نسبت سیگنال به نویز، از روش "کوچکتر بهتر است" استفاده شد. سطح بهینه هر فاکتور، سطحی است که دارای بیشترین مقدار نسبت  $S/N$  است. در شکل ۲، مقادیر متوسط نسبت سیگنال به نویز برای عدد رینولدز ۲۰۰ نشان داده شده است.

ضریب اصطکاک در حدود ۳۰۰ درصد و در ناحیه آشفته در حدود ۶۶ درصد است. برای مشخص کردن موثرترین فاکتور بر عملکرد هیدرولیکی هوا درون مبدل، در جدول ۴ درجه اهمیت هر مشخصه بر ضریب  $f$  در رینولدزهای مختلف ارائه شده است.

های هندسی بهینه مجدداً شبیه‌سازی شدند و مقادیر مطلوب ضریب  $f$  محاسبه شد. نتایج، همانطور که در جدول ۳ مشاهده می‌شود، نشان می‌دهند که با افزایش عدد رینولدز، مقدار ضریب اصطکاک درون مبدل کاهش می‌یابد. بطوریکه، در ناحیه جریان آرام، با افزایش عدد رینولدز، شدت کاهش



شکل ۲- نمودار نسبت سیگنال به نویز برای ضریب  $f$  بر حسب سطوح مختلف مشخصات هندسی طول موج، گام، ارتفاع، دامنه‌ی موج، نسبت طول پره به طول موج و ضخامت پره در عدد رینولدز ۲۰۰

جدول ۳- سطوح بهینه مشخصات هندسی و مقادیر بهینه ضریب  $f$

| عدد رینولدز | ارتفاع پره | گام پره | طول موج | ضخامت پره | دامنه موج | طول مشخصه | ضریب $f$ |
|-------------|------------|---------|---------|-----------|-----------|-----------|----------|
| ۲۰۰         | ۶          | ۱/۵     | ۱۱      | ۰/۲       | ۰/۵       | ۹         | ۰/۱۹۰۹۷۱ |
| ۷۰۰         | ۹          | ۱/۵     | ۱۱      | ۰/۲       | ۰/۵       | ۹         | ۰/۰۶۹۶۶۳ |
| ۱۲۰۰        | ۹          | ۱/۵     | ۱۱      | ۰/۲       | ۰/۵       | ۹         | ۰/۰۴۹۰۷۵ |
| ۱۷۰۰        | ۶          | ۱/۵     | ۱۱      | ۰/۲       | ۰/۵       | ۹         | ۰/۰۴۴۸۵۶ |
| ۲۵۰۰        | ۶          | ۱/۵     | ۱۱      | ۰/۲       | ۰/۵       | ۹         | ۰/۰۴۵۱۴۶ |
| ۳۵۰۰        | ۶          | ۱/۵     | ۱۱      | ۰/۲       | ۰/۵       | ۹         | ۰/۰۳۵۸۴۲ |
| ۴۵۰۰        | ۶          | ۱/۵     | ۱۱      | ۰/۲       | ۰/۵       | ۹         | ۰/۰۳۱۲۹۱ |
| ۵۵۰۰        | ۶          | ۱/۵     | ۱۱      | ۰/۲       | ۰/۵       | ۹         | ۰/۰۲۹۳۱۶ |
| ۶۵۰۰        | ۶          | ۱/۵     | ۱۱      | ۰/۲       | ۰/۵       | ۹         | ۰/۰۲۸۱۰۴ |
| ۷۵۰۰        | ۶          | ۱/۵     | ۱۱      | ۰/۲       | ۰/۵       | ۹         | ۰/۰۲۷۲۰۵ |

رینولدز، دیگر فاکتورهای مؤثر به ترتیب میزان تاثیرشان بر ضریب  $f$ ، گام پره، ضخامت پره، ارتفاع پره و طول مشخصه است. طول مشخصه، با درجه اهمیت ۶، کمترین تأثیر را دارد.

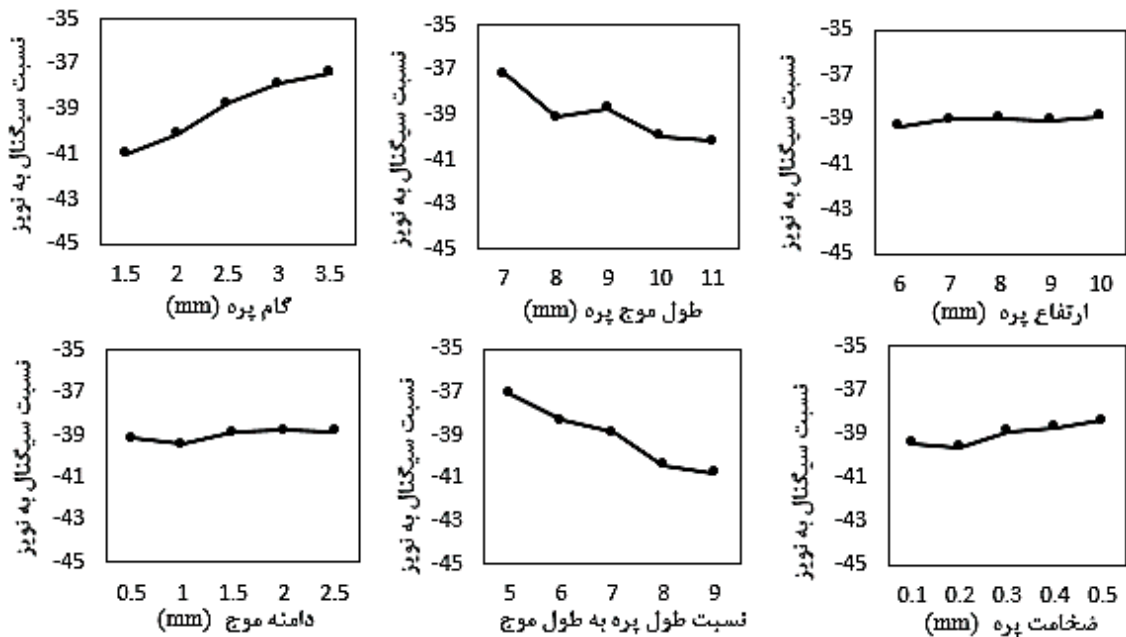
نتایج نشان می‌دهد که در تمام اعداد رینولدز ارائه شده، دامنه موج، با درجه اهمیت ۱، دارای بیشترین تاثیر است، فاکتور مؤثر بعدی بر مقدار  $f$ ، طول پره است که پس از دامنه موج، بیشترین تأثیر را بر ضریب  $f$  دارد. تقریباً در تمامی اعداد

جدول ۴- درجه اهمیت مشخصات هندسی بر ضریب  $f$

| مشخصه       | مقدار (میلی متر) |      |      |      |      |      |      |      |     |     |
|-------------|------------------|------|------|------|------|------|------|------|-----|-----|
| عدد رینولدز | ۷۵۰۰             | ۶۵۰۰ | ۵۵۰۰ | ۴۵۰۰ | ۳۵۰۰ | ۲۵۰۰ | ۱۷۰۰ | ۱۲۰۰ | ۷۰۰ | ۲۰۰ |
| ارتفاع پره  | ۵                | ۶    | ۵    | ۴    | ۴    | ۴    | ۶    | ۶    | ۵   | ۴   |
| گام پره     | ۶                | ۴    | ۳    | ۳    | ۳    | ۳    | ۳    | ۳    | ۳   | ۵   |
| طول موج     | ۲                | ۲    | ۲    | ۲    | ۲    | ۲    | ۲    | ۲    | ۲   | ۲   |
| ضخامت پره   | ۴                | ۳    | ۴    | ۵    | ۵    | ۵    | ۴    | ۴    | ۴   | ۳   |
| دامنه موج   | ۱                | ۱    | ۱    | ۱    | ۱    | ۱    | ۱    | ۱    | ۱   | ۱   |
| طول مشخصه   | ۳                | ۵    | ۶    | ۶    | ۶    | ۶    | ۵    | ۵    | ۶   | ۶   |

سطح بهینه هر فاکتور سطحی است که دارای بیشترین مقدار  $S/N$  باشد. همانطور که در شکل ۳ مشاهده می‌شود، در عدد رینولدز ۲۰۰ سطوح بهینه مشخصات هندسی ارتفاع، گام، طول موج، ضخامت، دامنه موج و طول مشخصه به ترتیب ۱۰، ۳/۵، ۷، ۰/۵، ۲ و ۵ است.

۵-۲- بررسی تاثیر فاکتورهای مختلف بر ضریب  $f$   
در مبدل‌های حرارتی فشرده، عملکرد حرارتی با ضریب بدون بعد کلبرن ( $j$ ) بیان می‌شود که در معادله (۱۱) تعریف شد. برای افزایش بازدهی عملکرد مبدل، مقدار ضریب  $j$  بزرگتر مطلوب است، لذا از روش "بزرگتر بهتر است" برای محاسبه نسبت سیگنال به نویز استفاده می‌شود. برای این منظور



شکل ۳- نمودار نسبت سیگنال به نویز برای ضریب  $f$  بر حسب سطوح مختلف مشخصات هندسی ارتفاع، طول موج، گام،

ضخامت، نسبت طول مشخصه به طول موج و دامنه موج در عدد رینولدز ۲۰۰

شد. در جدول ۵، سطوح بهینه مشخصات هندسی و مقادیر بهینه در اعداد رینولدز ۲۰۰ تا ۷۵۰۰ ارائه شده است. با

با این مقادیر، مدل بهینه مبدل حرارتی صفحه موجدار شبیه-سازی شد و برای ضریب  $f$  مقدار بهینه ۰/۰۲۱۷ محاسبه



همچنین مقدار بهینه ارتفاع پره در اعداد رینولدز ۲۰۰، ۴۵۰۰، ۵۵۰۰ و ۶۵۰۰، برابر با ۱۰ میلی متر، در اعداد رینولدز ۷۰۰، ۱۲۰۰ و ۱۷۰۰، برابر با ۶ میلی متر، در اعداد رینولدز ۲۵۰۰ و ۳۵۰۰، برابر با ۹ و در عدد رینولدز ۷۵۰۰، برابر با ۷ میلی متر است، در حالی که مقدار بهینه گام پره، طول موج، ضخامت پره، دامنه موج و طول مشخصه به ترتیب ۳/۵، ۷، ۰/۵، ۲ و ۵ میلی متر است. در جدول ۶، درجه تاثیر هر مشخصه در اعداد رینولدز مختلف نشان داده شده است. در عدد رینولدز ۲۰۰، تاثیر دامنه موج کم است، ولی، با افزایش عدد رینولدز تأثیر آن زیاد می شود.

افزایش عدد رینولدز، مقدار ضریب ز کاهش می یابد. بطوریکه، در ناحیه جریان آرام، با افزایش عدد رینولدز، شدت کاهش ضریب اصطکاک در حدود ۴۸ درصد و در ناحیه آشفته، در حدود ۶۹ درصد است. مطابق جدول ۵، در تمامی اعداد رینولدز، مقدار بهینه برای دامنه موج، ضخامت پره، طول موج، گام پره و طول مشخصه به ترتیب ۲، ۰/۵، ۷، ۳/۵ و ۵ میلی متر با مقادیر بهینه مختلف ارتفاع پره در اعداد رینولدز رینولدز مختلف است. البته، مقدار بهینه گام پره در عدد رینولدز ۷۵۰۰، برابر با ۳ میلی متر و برای طول مشخصه در عدد رینولدز ۱۷۰۰، برابر با ۶ میلی متر است؛

جدول ۵- سطوح بهینه مشخصات هندسی و مقادیر بهینه ضریب  $z$

| عدد رینولدز | ارتفاع پره | گام پره | طول موج | ضخامت پره | دامنه موج | طول مشخصه | ضریب $z$ |
|-------------|------------|---------|---------|-----------|-----------|-----------|----------|
| ۲۰۰         | ۱۰         | ۳/۵     | ۷       | ۰/۵       | ۲         | ۵         | ۰/۰۲۱۷۸  |
| ۷۰۰         | ۶          | ۳/۵     | ۷       | ۰/۵       | ۲         | ۵         | ۰/۰۲۰۴۳۱ |
| ۱۲۰۰        | ۶          | ۳/۵     | ۷       | ۰/۵       | ۲         | ۵         | ۰/۰۱۸۲۱۷ |
| ۱۷۰۰        | ۶          | ۳/۵     | ۷       | ۰/۵       | ۲         | ۶         | ۰/۰۱۴۸۴۷ |
| ۲۵۰۰        | ۹          | ۳/۵     | ۷       | ۰/۵       | ۲         | ۵         | ۰/۰۱۴۷۱۵ |
| ۳۵۰۰        | ۹          | ۳/۵     | ۷       | ۰/۵       | ۲         | ۵         | ۰/۰۱۲۵۹  |
| ۴۵۰۰        | ۱۰         | ۳/۵     | ۷       | ۰/۵       | ۲         | ۵         | ۰/۰۱۱۲۷  |
| ۵۵۰۰        | ۱۰         | ۳/۵     | ۷       | ۰/۵       | ۲         | ۵         | ۰/۰۱۰۲۷۹ |
| ۶۵۰۰        | ۱۰         | ۳/۵     | ۷       | ۰/۵       | ۲         | ۵         | ۰/۰۰۹۵۸۵ |
| ۷۵۰۰        | ۷          | ۳       | ۷       | ۰/۵       | ۲         | ۵         | ۰/۰۰۸۷   |

افزایش عدد رینولدز، میزان تأثیر گام پره افزایش می یابد. تغییرات درجه تأثیر ضخامت پره در ناحیه آرام به طور نوسانی بوده، ولی در ناحیه گذار و آشفته، ثبات پیدا می کند. تأثیر طول مشخصه در ناحیه آرام ( $Re < 1700$ )، با افزایش عدد رینولدز کاهش و پس از آن دارای روند نسبتاً ثابتی است. در این میان، ارتفاع پره کمترین تأثیر را بر ضریب  $z$  دارد.

در اعداد رینولدز کمتر از ۱۷۰۰ (در ناحیه آرام)، مشخصه ها به ترتیب درجه تأثیرشان بر ضریب  $z$ ، دامنه موج، طول موج، گام پره، طول مشخصه، ضخامت پره و ارتفاع پره هستند، در اعداد رینولدز ۲۵۰۰ تا ۴۵۰۰ گام پره، طول موج، دامنه موج، طول مشخصه، ضخامت پره و ارتفاع پره و همچنین در اعداد رینولدز ۵۵۰۰ تا ۷۵۰۰، دامنه موج، طول موج، گام پره، طول مشخصه، ضخامت و ارتفاع پره هستند. با

جدول ۶- درجه اهمیت مشخصات هندسی بر ضریب  $z$

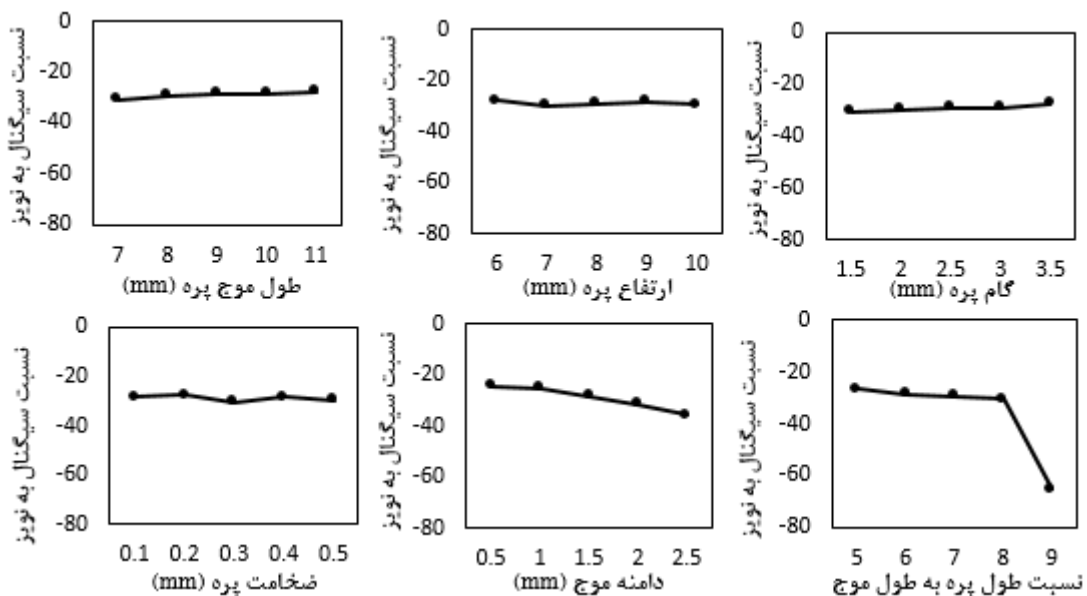
| مشخصه       | مقدار (میلی متر) |      |      |      |      |      |      |      |     |     |
|-------------|------------------|------|------|------|------|------|------|------|-----|-----|
|             | ۷۵۰۰             | ۶۵۰۰ | ۵۵۰۰ | ۴۵۰۰ | ۳۵۰۰ | ۲۵۰۰ | ۱۷۰۰ | ۱۲۰۰ | ۷۰۰ | ۲۰۰ |
| عدد رینولدز | ۶                | ۶    | ۶    | ۶    | ۶    | ۶    | ۶    | ۶    | ۶   | ۶   |
| ارتفاع پره  | ۶                | ۶    | ۶    | ۶    | ۶    | ۶    | ۶    | ۶    | ۶   | ۶   |
| گام پره     | ۳                | ۳    | ۲    | ۱    | ۱    | ۱    | ۳    | ۳    | ۳   | ۲   |
| طول موج     | ۲                | ۲    | ۳    | ۳    | ۲    | ۲    | ۲    | ۲    | ۲   | ۳   |
| ضخامت پره   | ۵                | ۵    | ۵    | ۵    | ۵    | ۵    | ۵    | ۵    | ۵   | ۴   |
| دامنه موج   | ۱                | ۱    | ۱    | ۲    | ۳    | ۴    | ۱    | ۱    | ۱   | ۵   |
| طول مشخصه   | ۴                | ۴    | ۴    | ۴    | ۴    | ۳    | ۴    | ۴    | ۴   | ۱   |

### ۳-۵- بررسی تأثیر فاکتورهای مختلف بر معیار ارزیابی

#### عملکرد $z/f$

محاسبه نسبت سیگنال به نویز از روش "بزرگتر بهتر است" استفاده می‌شود. سطح بهینه هر فاکتور، سطحی است که دارای بیشترین مقدار  $S/N$  باشد. در شکل ۴، متوسط مقادیر نسبت سیگنال به نویز در عدد رینولدز ۲۰۰ نشان داده است.

ضریب  $z/f$ ، معیار ارزیابی عملکرد مبدل حرارتی، نسبتی از میزان انتقال حرارت به میزان اصطکاک درون مبدل است. با افزایش این ضریب، میزان بازدهی مبدل افزایش می‌یابد؛ بنابراین، مقدار ضریب  $z/f$  بزرگتر مطلوب است. برای



شکل ۴- نمودار نسبت سیگنال به نویز برای ضریب  $z/f$  بر حسب سطوح مختلف مشخصات هندسی گام، ارتفاع، طول موج، نسبت طول پره به طول موج، دامنه موج و ضخامت پره در عدد رینولدز ۲۰۰

طول مشخصه به ترتیب ۶، ۳/۵، ۱۱، ۰/۲، ۰/۵ و ۹ شد که با افزایش عدد رینولدز، مقدار ضریب  $z/f$  افزایش می‌یابد. مطابق جدول ۷، با مقادیر بهینه مشخصات هندسی، با افزایش عدد رینولدز، عملکرد کلی در حدود ۵۵ درصد افزایش یافته است. در جدول ۸، میزان تأثیر مشخصات هندسی بر ضریب  $z/f$  در هر عدد رینولدز ارائه شده است. مشاهده می‌شود که در تمامی اعداد رینولدز دامنه موج، با درجه اهمیت ۱، موثرترین مشخصه است، مشخصه موثر بعدی، طول موج پره است که در اعداد رینولدز کم، در مقایسه با اعداد رینولدز بالا، تأثیرش بر ضریب  $z/f$  کمتر است. سومین مشخصه موثر در اعداد رینولدز بیشتر از ۱۷۰۰، ارتفاع پره است که میزان تأثیر آن در اعداد رینولدز کمتر از ۱۷۰۰ (در ناحیه آرام)، کمتر است.

مطابق شکل، مقادیر بهینه برای ارتفاع پره، گام پره، طول موج، ضخامت پره، دامنه موج و طول مشخصه به ترتیب ۶، ۳/۵، ۱۱، ۰/۲، ۰/۵ و ۵ شد و برای ضریب  $z/f$  مقدار بهینه ۰/۰۵۶۶ محاسبه شد. سایر مقادیر بهینه برای ضریب  $z/f$  در اعداد رینولدز مختلف در جدول ۷ نشان داده شده است. همانطور که در جدول ۷ نشان داده شده است، روش تاگوچی مقادیر بهینه‌ی یکسانی را برای مشخصات هندسی در اعداد رینولدز ۲۰۰ تا ۴۵۰۰ و همچنین در عدد رینولدز ۷۵۰۰ ارائه داد. مشاهده می‌شود که با افزایش عدد رینولدز مقدار ضریب  $z/f$  افزایش و در نتیجه عملکرد حرارتی افزایش داده می‌شود. در اعداد رینولدز ۵۵۰۰ و ۶۵۰۰، مقادیر بهینه برای ارتفاع پره، گام پره، طول موج، ضخامت پره، دامنه موج و

تقریباً دیگر مشخصه‌ها، بر اساس میزان تاثیرشان بر ضریب  $z/f$  در تمامی اعداد رینولدز به ترتیب ضخامت پره، طول مشخصه و گام پره است. گام پره، با درجه اهمیت ۶، کمترین تأثیر را بر ضریب  $z/f$  دارد.

جدول ۷- سطوح بهینه مشخصات هندسی و مقادیر بهینه ضریب  $z/f$

| عدد رینولدز | ارتفاع پره | گام پره | طول موج | ضخامت پره | دامنه موج | طول مشخصه | ضریب $z/f$ |
|-------------|------------|---------|---------|-----------|-----------|-----------|------------|
| ۲۰۰         | ۶          | ۳/۵     | ۱۱      | ۰/۲       | ۰/۵       | ۵         | ۰/۰۵۶۶۹۸   |
| ۷۰۰         | ۶          | ۳/۵     | ۱۱      | ۰/۲       | ۰/۵       | ۵         | ۰/۰۷۳۳۲۹   |
| ۱۲۰۰        | ۶          | ۳/۵     | ۱۱      | ۰/۲       | ۰/۵       | ۵         | ۰/۰۷۶۷۶۶   |
| ۱۷۰۰        | ۶          | ۳/۵     | ۱۱      | ۰/۲       | ۰/۵       | ۵         | ۰/۰۷۸۲۶۵   |
| ۲۵۰۰        | ۶          | ۳/۵     | ۱۱      | ۰/۲       | ۰/۵       | ۵         | ۰/۱۰۷۳۵    |
| ۳۵۰۰        | ۶          | ۳/۵     | ۱۱      | ۰/۲       | ۰/۵       | ۵         | ۰/۱۱۰۲۰۴   |
| ۴۵۰۰        | ۶          | ۳/۵     | ۱۱      | ۰/۲       | ۰/۵       | ۵         | ۰/۱۱۰۶۹۷   |
| ۵۵۰۰        | ۶          | ۳/۵     | ۱۱      | ۰/۲       | ۰/۵       | ۹         | ۰/۱۲۳۳۲۴   |
| ۶۵۰۰        | ۶          | ۳/۵     | ۱۱      | ۰/۲       | ۰/۵       | ۹         | ۰/۱۲۴۰۸۴   |
| ۷۵۰۰        | ۶          | ۳/۵     | ۱۱      | ۰/۲       | ۰/۵       | ۵         | ۰/۱۱۶۴۳۳   |

جدول ۸- درجه اهمیت مشخصات هندسی بر ضریب  $z/f$

| مشخصه       | مقدار (میلی متر) |     |      |      |      |      |      |      |      |      |
|-------------|------------------|-----|------|------|------|------|------|------|------|------|
|             | ۲۰۰              | ۷۰۰ | ۱۲۰۰ | ۱۷۰۰ | ۲۵۰۰ | ۳۵۰۰ | ۴۵۰۰ | ۵۵۰۰ | ۶۵۰۰ | ۷۵۰۰ |
| عدد رینولدز | ۲۰۰              | ۷۰۰ | ۱۲۰۰ | ۱۷۰۰ | ۲۵۰۰ | ۳۵۰۰ | ۴۵۰۰ | ۵۵۰۰ | ۶۵۰۰ | ۷۵۰۰ |
| ارتفاع پره  | ۶                | ۴   | ۴    | ۳    | ۳    | ۳    | ۳    | ۳    | ۳    | ۳    |
| گام پره     | ۳                | ۶   | ۶    | ۶    | ۶    | ۶    | ۶    | ۶    | ۶    | ۶    |
| طول موج     | ۴                | ۲   | ۲    | ۲    | ۲    | ۲    | ۲    | ۲    | ۲    | ۲    |
| ضخامت پره   | ۵                | ۵   | ۳    | ۴    | ۵    | ۴    | ۴    | ۴    | ۴    | ۵    |
| دامنه موج   | ۱                | ۱   | ۱    | ۱    | ۱    | ۱    | ۱    | ۱    | ۱    | ۱    |
| طول مشخصه   | ۲                | ۳   | ۵    | ۵    | ۴    | ۵    | ۵    | ۵    | ۵    | ۴    |

پیدا کرد. دومین عامل مؤثر بر ضرایب  $z$ ،  $f$  و  $z/f$  در تمام اعداد رینولدز، طول موج بود. گام پره، بر ضرایب  $z$  و  $f$  مؤثر بوده، در حالیکه، این مشخصه بر  $z/f$ ، کمترین تأثیر را داشت. ارتفاع پره بر ضرایب  $z$  و  $f$ ، کمترین تأثیر را داشت، ولی روی نسبت این دو ضریب، تأثیر آن افزایش می‌یابد. سایر مشخصات هندسی هم بر هر سه ضریب مؤثر بوده ولی درجه اهمیت آنها تغییر چندانی نداشت؛ همچنین با روش تاگوچی، مقادیر بهینه برای مشخصات هندسی ارائه شد. با این مقادیر، مدل‌های هندسی بهینه، مجدداً شبیه‌سازی شدند و مقدار مطلوبی برای ضرایب  $z$ ،  $f$  و  $z/f$  در اعداد رینولدز ۲۰۰ تا ۷۵۰۰ محاسبه شد. نتایج نشان دادند که با افزایش عدد رینولدز، مقدار ضریب  $z$  و  $f$  کاهش و مقدار ضریب  $z/f$  افزایش می‌یابد.

### ۶- نتیجه‌گیری

در مطالعه حاضر، به بررسی اثر مشخصات هندسی: گام پره، ارتفاع پره، طول موج، ضخامت پره، دامنه موج و طول مشخصه بر ضرایب  $z$ ،  $f$  و  $z/f$  پرداخته شد. برای این منظور، روش تاگوچی، طرح آزمایشی با ۲۵ مدل هندسی مختلف ارائه داد. این مدل‌ها طراحی و در محدوده گسترده‌ای از عدد رینولدز ۲۰۰ تا ۷۵۰۰ شبیه‌سازی شدند. نتایج نشان دادند که میزان انتقال حرارت و افت فشار هوا در مبدل حرارتی صفحه موجدار، تحت تأثیر مشخصات هندسی و عدد رینولدز بود. نتایج نشان دادند که دامنه موج، مؤثرترین فاکتور بر ضرایب  $f$  و  $z/f$  بود. برای ضریب  $z$  در ناحیه آرام و گذرا (تا عدد رینولدز ۱۷۰۰)، دامنه موج، دارای بیشترین تأثیر بوده، ولی به تدریج از اهمیت آن کاسته شده و گام پره، اهمیت

۷- علائم

|                            |               |  |            |
|----------------------------|---------------|--|------------|
| عدد پراتل                  | $Pr$          | دو برابر دامنه موج، mm                 | $2A$       |
| عدد رینولدز                | $Re$          | گرمای ویژه در فشار ثابت، j/kg.K        | $C_p$      |
| عدد استانتون               | $St$          | قطر هیدرولیکی ورودی پره، m             | $D_h$      |
| نسبت سیگنال به نویز        | $S/N$         | انرژی کل، W                            | $E$        |
| ضخامت پره، mm              | $t$           | ضریب بدون بعد اصطکاک فانیگ             | $f$        |
| سرعت هوای ورودی، m/s       | $u$           | گام پره، mm                            | $F_p$      |
| مقادیر پارامتر پاسخ        | $y_i$         | ارتفاع پره، mm                         | $F_h$      |
| دلتای کرانکر               | $\delta_{ij}$ | ضریب انتقال حرارت، W/m <sup>2</sup> .K | $h$        |
| ویسکوزیته دینامیکی، kg/m.s | $\mu$         | ضریب بدون بعد کلبرن                    | $j$        |
| دانسیته، kg/m <sup>2</sup> | $\rho$        | معیار ارزیابی عملکرد مبدل              | $j/f$      |
|                            | زیرنویس       | ضریب هدایت حرارتی، w/m.k               | $k$        |
| موثر                       | $eff$         | طول موج پره موجدار، mm                 | $L$        |
| سیال                       | $f$           | طول پره موجدار، mm                     | $L_d$      |
| آشفته                      | $t$           | تعداد پارامترهای پاسخ                  | $n$        |
| دیواره جامد                | $wall$        | فشار، Pa                               | $P$        |
| فصل مشترک سیال و جامد      | $\Gamma$      | افت فشار در جهت جریان، Pa              | $\Delta P$ |

مراجع

- [۶] خاکی جامعی م، عباسی م (۱۳۹۶) بررسی عددی تأثیر نانوسیال بر راندمان چاه حرارتی میکرو کانالی با استفاده از روش تاگوچی. مجله علمی پژوهشی مکانیک سازه‌ها و شاره‌ها ۲۸۷-۲۷۵ (۱): ۷.
- [۷] هوشمند ا، صداقت ا، سلیم پور م ر، زرگوشی ع، محسنی ع (۱۳۹۴) بررسی تجربی انتقال حرارت جریان نانوسیال آب/TiO<sub>2</sub> در لوله افقی با نوار پیچیده تحت شرایط دمای ثابت دیواره. مجله علمی پژوهشی مکانیک سازه‌ها و شاره‌ها ۱۷۲-۱۶۵ (۳): ۵.
- [۸] قاضی خانی م، نوری فر ع، شرف بایگی ا (۱۳۹۱) بررسی آزمایشگاهی تأثیر انواع مختلف زائده‌های تولید گردابه روی عملکرد مبدل‌های حرارتی پره لوله‌ای آب- هوا با استفاده از تحلیل آگرززی. مجله علمی پژوهشی مکانیک سازه‌ها و شاره‌ها ۷۵-۶۱ (۴): ۲.
- [9] Khoshvaght-Aliabadi M, Hormozi F, Zamzamin A (2014) Role of channel shape on performance of plate fin heat exchangers: Experimental assessment. Int J Therm Sci 79: 183-193.
- [10] Kays WM, London AL (1984) Compact Heat Exchangers. 3rd edn. Kreiger Publishing, Melbourne.
- [1] Ahmed HE, Mohammed HA, Yusoff MZ (2012) An overview on heat transfer augmentation using vortex generators and nanofluids: Approaches and applications. Renew Sust Energ Rev 16: 5951-5993.
- [2] Tullius JF, Tullius TK, Bayazitoglu Y (2012) Optimization of short micro pin fins in minichannels. Int J Heat Mass Transf 55: 3921-3932.
- [3] Khoshvaght-Aliabadi M, Jafari A, Sartipzadeh O, Salami M (2016) Thermal-hydraulic performance of wavy plate-fin heat exchanger using passive techniques: Perforations, winglets, and nanofluids. Int Commun Heat Mass Transf 78: 231-240.
- [4] Khoshvaght Aliabadi M, Hormozi F (2013) Performance Analysis of Plate-Fin Heat Exchangers: Different Fin Configurations and Coolants. J Thermophys Heat Trans 27: 515-525.
- [۵] براتی بنی س، پیشکار ا، سلیم‌پور م ر (۱۳۹۷) مطالعه اثر نانو سیال در تبادلگر حرارتی خنک کاری روغن موتور دیزل دریایی. مجله علمی پژوهشی مکانیک سازه‌ها و شاره‌ها ۲۲۳-۲۲۱ (۲): ۸.

- exchangers: Different working fluids. *Int J Numer Method H* 24: 1086-1108.
- [20] Khoshvaght-Aliabadi M, Hormozi F (2013) Effect of wave-and-lance length variations on performance of wavy and offset strip plate fin heat exchangers. *Arab J Sci Eng* 38: 3515–3529.
- [21] Nilpueng K, Ahn HS, Jerng DW, Wongwises S (2019) Heat transfer and flow characteristics of sinusoidal wavy plate fin heat sink with and without crosscut flow control. *Int J Heat Mass Transf* 137: 565–572.
- [22] Wang J, Wan W (2009) Experimental design methods for fermentative hydrogen production: A review. *Int J Hydrogen Energ* 34: 235-244.
- [23] Lee J, Lee KS, Yook SJ (2011) Shape optimization of a plate heat exchanger with a dimpled surface. *Int Symposium Transp Phenom, Netherlands* 8-11.
- [24] Zeng M, Tang LH, Lin M, Wang QW (2010) Optimization of heat exchangers with vortex-generator fin by Taguchi method. *Appl Therm Eng* 30: 1775-1783.
- [25] Song Y, Asadi M, Xie G, Rocha LAO (2015) Constructal wavy-fin channels of a compact heat exchanger with heat transfer rate maximization and pressure losses minimization. *Appl Therm Eng* 75: 24-32.
- [26] Wen J, Li K, Wang C, Zhang X, Wang S (2019) Optimization investigation on configuration parameters of sine wavy fin in plate-fin heat exchanger based on fluid structure interaction analysis. *Int J Heat Mass Transf* 131: 385–402.
- [27] FLUENT Incorporated (2004) FLUENT 6.2 User's Guide. Fluent Incorporated Lebanon, NH, USA.
- [28] Tian L, He Y, Tao Y, Tao W (2009) A comparative study on the air-side performance of wavy finandtube heat exchanger with punched delta winglets in staggered and in-line arrangements. *Int J Therm Sci* 48: 1765-1776.
- [11] Jiao A, Zhang R, Jeong S (2003) Experimental investigation of header configuration on flow maldistribution in plate-fin heat exchange. *Appl Therm Eng* 23: 1235-1246.
- [12] Manglik RM, Zhang J, Muley A (2005) Low Reynolds number forced convection in three-dimensional wavy-plate-fin compact channels: fin density effects. *Int J Heat Mass Transf* 48: 1439-1449.
- [13] Muley A, Borghese JB, White SL, Manglik RM (2006) Enhanced thermal-hydraulic performance of a wavy-plate fin compact heat exchanger: effect of corrugation severity. *Proc. Chicago, Int Mech Eng Congress Expo* 1:701-707.
- [14] Junqi D, Jiangping C, Zhijiu Z, Yimin Z, Wenfeng Z (2007) Heat transfer and pressure drop correlation for the wavy fin and flat tube heat exchangers. *Appl Therm Eng* 27: 2066-2073.
- [15] Junqi D, Jiangping C, Wenfeng Z, Jinwei H (2010) Experimental and numerical investigation of thermal-hydraulic performance in wavy fin-and-flat tube heat exchangers. *Appl Therm Eng* 30: 1377-1386.
- [16] Khoshvaght-Aliabadi M, Gholam Samani M, Hormozi F, Haghighi Asl A (2011) 3D-CFD Simulation and Neural Network Model for the j and f Factors of the Wavy Fin and-Flat Tube Heat Exchangers. *Braz J Chem Eng* 28: 505-520.
- [17] Sheik Ismail L, Ranganayakulu C, Ramesh KS (2009) Numerical study of flow patterns of compact plate fin heat exchangers and generation of design data for offset and wavy fins. *Int J Heat Mass Transf* 52: 3972–3983.
- [18] Sheik Ismail L, Velraj R, Ranganayakulu C (2010) Studies on pumping power in terms of pressure drop and heat transfer characteristics of compact plate-fin heat exchangers-A review. *Renew Sust Energ Rev* 14: 478-485.
- [19] Khoshvaght-Aliabadi M, Hormozi F, Hosseini-rad E (2014) New correlations for wavy plate-fin heat