

## اثر دامنه موج بر عملکرد مبدل حرارتی فشرده صفحه‌ای پره موجی:

## بررسی عددی و ارائه روابط جدید\*

سیده الهام حسینی راد<sup>(۱)</sup> مرتضی خوشوقت علی‌آبادی<sup>(۲)</sup> فرامرز هرمزی<sup>(۳)</sup>

**چکیده** دامنه موج یکی از مشخصه‌های هندسی موثر بر عملکرد مبدل حرارتی فشرده صفحه‌ای پره موجی است. روابط جدیدی برای لحاظ کردن دامنه موج در طراحی این نوع مبدل‌ها مورد نیاز است. در این مقاله، اثر دامنه موج بر ضریب کلبرن (j) و ضریب اصطکاک فانیگ (f) بررسی می‌شود. ضریب j معیاری از شدت انتقال حرارت و ضریب f متناسب با افت فشار است. در این بررسی، شبیه‌سازی سه بعدی دینامیک سیالات محاسباتی کانال موجی یک مبدل انجام شد. این کانال دارای ارتفاع ۸، گام ۲ و طول‌های ۴۳/۲ و ۶۴/۸ میلی‌متر است. اطلاعات تجربی منتشر شده در مورد این کانال با دامنه موج ۱/۵ در دسترس است. بنابراین، ابتدا شبیه‌سازی با این دامنه موج و در اعداد رینولدز ۶۰۰ تا ۶۵۰۰ انجام شد. نتایج شبیه‌سازی با اطلاعات تجربی تطابق خوبی داشته و مقادیر متوسط خطا برای j و f به ترتیب ۷ و ۴ درصد شد. در مرحله دوم، شبیه‌سازی کانال با دامنه موج‌های ۰/۵، ۱، ۲، ۲/۵ و ۳ میلی‌متر انجام شد. نتایج نشان می‌دهد که دامنه موج روی ضرایب j و f موثر است. با افزایش دامنه موج، در جریان‌های آرام و آشفته، هر دو ضریب بیشتر می‌شوند. اما، تاثیر دامنه موج بر ضریب f بیشتر است. با روش پردازش منحنی چند متغیره، دو رابطه برای j و f برحسب عدد رینولدز و ابعاد هندسی مختلف کانال موجی به ویژه دامنه موج به دست آمد. برای تعیین هر یک از این روابط از اطلاعات آزمایشگاهی و محاسبه شده قبلی و نتایج محاسبه جدید استفاده گردیده و با لحاظ اثر دامنه موج لحاظ شد. این روابط برای مبدل‌های حرارتی فشرده صفحه‌ای پره موجی که از هوا به عنوان سیال خنک کننده استفاده می‌کنند کاربرد دارد.

**واژه‌های کلیدی** مبدل حرارتی فشرده، پره‌های موجی، دامنه موج، ضریب کلبرن، ضریب فانیگ، شبیه‌سازی CFD.

## Effect of Wave Amplitude on Thermal Performance of the Wavy-Fin-Plate Compact Heat Exchanger: A Numerical Study and Presentation of New Correlations

S. E. Hosseinirad

M. Khoshvaght Aliabadi

F. Hormozi

**Abstract** One of the most effective geometrical parameters on performance of the wavy fin plate compact heat exchanger (CHE) is the wave amplitude. New correlations are required to consider the wave amplitude for designing this type of exchangers. In this paper, the effect of wave amplitude on Colburn factor (j) and Fanning friction factor (f) was investigated. The j factor is a criterion of heat transfer rate and the f factor is proportional to pressure drop. In this study, the three dimensional computational fluid dynamics simulation of an exchanger's wave channel was performed. The channel's height was 8 mm, its pitch was 2 mm, and its lengths were 43.2 and 64.8 mm. The published experimental data of this channel with wave amplitude of 1.5 mm is available. Therefore, the simulation was firstly carried out using this wave amplitude in Reynolds number range of 600 to 6500. The simulation results were in good agreement with the experimental data and the mean error values obtained for j and f were 7% and 4% respectively. In the second step, the channel simulation was implemented using wave amplitudes of 0.5, 1, 2, 2.5, and 3 mm. The results indicated that the wave amplitude is effective on j and f factors. Both factors increase with increasing the wave amplitude in laminar and turbulent flows; however, the wave amplitude is more effective on the f factor. Using the multiple curve fitting method, two correlations were obtained for j and f versus Reynolds number and different geometric dimensions of the wavy channel, especially the wave amplitude. In order to determine these correlations, previous experimental and calculated data and new calculated results were applied and the effect of wave amplitude was considered. These equations are useful for wavy fin plate compact heat exchanger using air as the cooling fluid.

**Key Words** Compact Heat Exchanger, Wavy Fins, Wave Amplitude, Colburn Factor (j), Fanning Factor (f), CFD simulation.

\* نسخه نخست مقاله در تاریخ ۹۰/۵/۱۴ و نسخه پایانی آن در تاریخ ۹۰/۷/۱۱ به دفتر نشریه رسیده است.

(۱) نویسنده‌ی مسوول: دانشجوی کارشناسی ارشد، نفت و گاز، دانشکده مهندسی شیمی، دانشگاه سمنان

(۲) دانشجوی دکتری، نفت و گاز، دانشکده مهندسی شیمی، دانشگاه سمنان

(۳) استادیار، نفت و گاز، دانشکده مهندسی شیمی، دانشگاه سمنان

## مقدمه

چین ۲۰ درجه انتخاب شد. نتایج با داده‌های تجربی مقایسه و تطابق خوبی گزارش شد. در این مقاله بر مزایای روش‌های عددی بررسی جریان درون کانال نسبت به روش‌های آزمایشگاهی تاکید شد [6]. در سال ۲۰۰۴ انتقال حرارت جابجایی اجباری و آرام هوادر شدت جریان‌های، مختلف ( $1000 \leq Re \leq 10$ ) در کانال صفحه موجی توسط زانگ و همکاران در دو بعد، شبیه سازی شد. آنها مشاهده کردند که ضریب کلی انتقال حرارت کانال‌های موجی چند برابر کانال‌های مستقیم است در حالی که میزان افزایش افت فشار کانال‌های موجی در مقایسه با کانال‌های مستقیم، زیاد نیست [7].

در سال ۲۰۰۵ با روش حجم محدود سه بعدی، انتقال حرارت هوا در مبدل صفحه موجی در جریان آرام ( $1000 \leq Re \leq 10$ ) و پایا توسط مانگ لیک و همکاران بررسی شد. نتایج نشان داد تراکم موج‌ها بر میدان‌های درجه حرارت، سرعت و ضرایب  $f$  و  $z/f$  اثر دارد [8]. انتقال حرارت جابجایی اجباری هوا در مبدل صفحه موجی، در محدوده‌ی بزرگ‌تری از شدت جریان  $5000 \leq Re \leq 50$  توسط مولی و همکاران اندازه‌گیری شد. علاوه بر این، از روش حجم کنترل سه بعدی در  $1000 \leq Re \leq 10$ ، شدت انتقال حرارت شبیه‌سازی گردیده و گزارش شد که تطابق خوبی میان نتایج دو روش تجربی و شبیه‌سازی وجود دارد [9]. دانگ و همکاران در سال ۲۰۰۷، یازده مبدل صفحه موجی را مورد آزمایش قرار داده و با استفاده از روش تاثیر تعداد واحدهای انتقال (NTU)، اثر مشخصه‌های هندسی نظیر ارتفاع، گام و طول کانال بر میزان انتقال حرارت را تعیین کردند. آنها تغییر ضرایب  $f$  و  $z/f$  در محدوده‌ی بزرگی از اعداد رینولدز ( $6400 \leq Re \leq 800$ ) را بررسی و دو رابطه تجربی برای ضرایب  $f$  و  $z/f$  ارائه کردند. در اینکار دامنه موج ثابت بود اما بر اهمیت آن تاکید شد [3]. مطالعات انجام شده در مورد ضریب انتقال حرارت و افت فشار مبدل صفحه موجی توسط

مبدل حرارتی فشرده صفحه‌ای پره موجی (Wavy-Plate-Fin Compact Heat Exchanger) یا به اختصار مبدل صفحه موجی، یکی از انواع مبدل‌های حرارتی فشرده است که دارای سطح حرارتی بزرگ، ضریب انتقال حرارت زیاد و افت فشار کم است. در شکل (۱) تصویر صفحه‌ی موجی این نوع مبدل با دامنه موج کم و دامنه موج زیاد نشان داده شده است [۱]. برای بررسی عملکرد حرارتی مبدل‌های فشرده معمولاً از ضریب کلبرن ( $j$ ) و ضریب اصطکاک فاینینگ ( $f$ ) استفاده می‌شود [2].

دامنه موج، باعث تغییر مسیر جریان و تغییر شدت اختلاط سیال عبوری از درون صفحات مبدل می‌شود. در نتیجه، میزان انتقال حرارت یا ضریب  $j$  و افت فشار یا ضریب  $f$  مبدل تغییر می‌کند. میزان و چگونگی تغییر هر یک از این ضرایب و یا نسبت  $j/f$  با دامنه موج، به طور کامل بررسی نشده و تاکنون در مورد مبدل صفحه موجی، تعداد کمی مقاله منتشر شده است [3]. میزان انتقال حرارت و افت فشار هوا بین پره‌های شیاردار، موجی و تخت، توسط یان و همکاران در سال ۲۰۰۰ اندازه‌گیری گردیده و مشاهده شد که در اعداد رینولدز یکسان، پره‌ی شیاردار ضرایب  $f$  و  $z/f$  بزرگتری در مقایسه با پره‌ی تخت دارد و مبدل صفحه موجی دارای بزرگ‌ترین نسبت  $j/f$  در اعداد رینولدز ( $Re$ ) کمتر از ۱۵۰۰ است [4]. اندازه‌گیری تجربی و مدل‌سازی عددی انتقال حرارت پایا و افت فشار آب در جریان آرام ( $70 \leq Re \leq 830$ )، در کانال موجی یک مبدل حرارتی توسط مولی و همکاران بررسی شد. آنها گزارش کردند که کانال موجی، نسبت  $j/f$  بالاتری در مقایسه با کانال مستقیم مشابه دارد و میزان انتقال حرارت کانال موجی در شرایط یکسان، تقریباً سه برابر بیشتر است [5]. انتقال حرارت و افت فشار در یک کانال موجی با روش عددی توسط یاسر اسلام‌اغلو و همکار او بررسی شد. ارتفاع کانال ۵ و ۱۰ میلی‌متر و زاویه

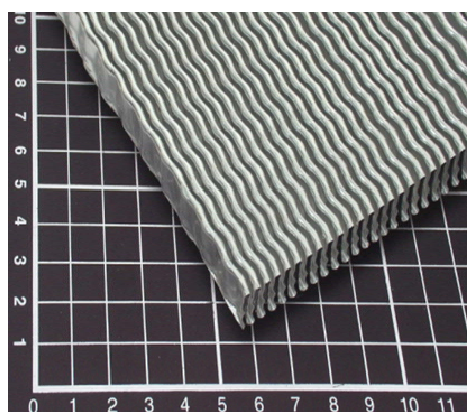
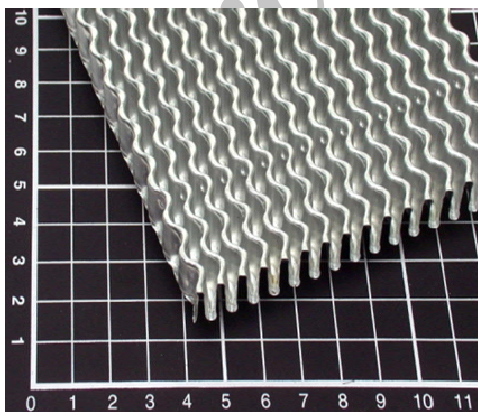
### مشخصات صفحه موجی

معمولاً در صفحات موجی، الگوی موج به طور منظم تکرار می‌شود. برای کاهش محاسبات، تنها یک قسمت از کانال موجی بررسی شد. این قسمت در شکل (۲) نشان داده شده است. مشخصات هندسی کانال، ارتفاع (Fh)، گام (Fp)، طول کانال (Ld)، طول موج (L) و دامنه‌ی موج (2A) می‌باشد. در جدول (۱) مقادیر این مشخصه‌های هندسی آورده شده است. ضخامت صفحه موجی و طول موج کانال ثابت و به ترتیب برابر با ۰/۲ و ۱۰/۸ میلی‌متر است. یازده مدل اول جدول (۱)، مشخصات صفحات موجی آزمایشگاهی و شبیه‌سازی قبلی انجام شده توسط نویسندگان این مقاله است [3,12]. ده مدل بعدی برای بررسی اثر دامنه موج در این مقاله، انتخاب شده است. در اینجا شش دامنه‌ی موج از نیم تا سه میلیمتر بررسی شد. طرح ساده‌ای از نحوه تغییرات دامنه موج در مدل‌های بررسی شده در این مقاله در شکل (۳) آمده است.

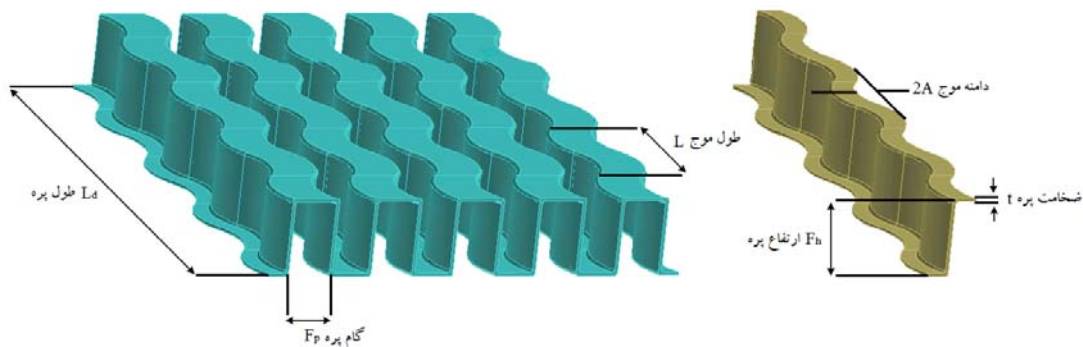
سیال مورد بررسی هوا و با فرض تراکم ناپذیری و خواص فیزیکی ثابت است. درجه حرارت هوای ورودی ۳۰۰/۱۵ کلوین و هوا با هر دو طرف صفحه موجی در تماس است. در این جا از تشعشع حرارتی و جابجایی طبیعی صرف نظر شد.

شیک و همکاران مرور و بیان شد که در تحقیقاتی که تا آن زمان انجام گرفته بود، بررسی اثر دامنه موج روی ضرایب  $z$  و  $f$  و معادله‌ای که این اثر را لحاظ کند، وجود ندارد [10,11]. شبیه‌سازی عددی مبدل صفحه موجی در سال ۲۰۱۱ توسط خوشوقت و همکاران توسعه داده شد. آنها از شبکه عصبی برای تعیین روابط  $z$  و  $f$  استفاده کردند [12].

با بررسی مقالات، نویسندگان این مقاله به این نتیجه رسیدند که شبیه‌سازی عددی ابزار مناسبی برای بررسی عملکرد مبدل صفحه موجی و تعیین عوامل موثر بر آن است. اثر دامنه‌ی موج بر عملکرد مبدل صفحه موجی، به طور کامل بررسی نشده و لازم است روابطی جدید برای تعیین اثر دامنه موج بر ضریب انتقال حرارت و افت فشار ارائه شود. بنابراین هدف اصلی این مقاله، تعیین نوع و میزان اثر تغییرات دامنه موج صفحات مبدل روی ضرایب  $z$  و  $f$  در شدت جریان‌های مختلف است. این کار با شبیه‌سازی سه بعدی دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) کانال موجی یک مبدل صفحه موجی انجام می‌شود. با استفاده از نتایج محاسبه شده، روابط جدیدی برای ضرایب  $z$  و  $f$ ، با در نظر گرفتن دامنه موج ارائه می‌شود.



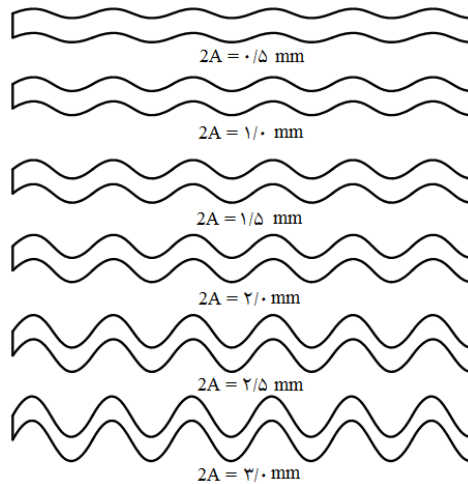
شکل ۱ تصویر صفحه‌ی موجی مبدل حرارتی فشرده با دامنه موج کم و دامنه موج زیاد [۱].



شکل ۲ کانال‌های موجی و بخش انتخاب شده برای شبیه‌سازی کانال

جدول ۱ مشخصات هندسی ۲۱ مبدل صفحه موجی (ابعاد برحسب میلی‌متر)

شماره مبدل	گام پره ( $F_p$ )	ارتفاع پره ( $F_h$ )	طول پره ( $L_d$ )	دامنه موج (2A)
۱	۲	۸	۶۴/۸	۱/۵
۲	۲/۲۵	۸	۶۴/۸	۱/۵
۳	۲/۵	۸	۶۴/۸	۱/۵
۴	۲	۸	۵۴	۱/۵
۵	۲/۲۵	۸	۵۴	۱/۵
۶	۲/۵	۸	۵۴	۱/۵
۷	۲	۷	۴۳/۲	۱/۵
۸	۲/۲۵	۷	۴۳/۲	۱/۵
۹	۲/۵	۷	۴۳/۲	۱/۵
۱۰	۲	۸	۴۳/۲	۱/۵
۱۱	۲	۱۰	۴۳/۲	۱/۵
۱۲	۲	۸	۶۴/۸	۰/۵
۱۳	۲	۸	۶۴/۸	۱
۱۴	۲	۸	۶۴/۸	۲
۱۵	۲	۸	۶۴/۸	۲/۵
۱۶	۲	۸	۶۴/۸	۳
۱۷	۲	۸	۴۳/۲	۰/۵
۱۸	۲	۸	۴۳/۲	۱
۱۹	۲	۸	۴۳/۲	۲
۲۰	۲	۸	۴۳/۲	۲/۵
۲۱	۲	۸	۴۳/۲	۳



شکل ۳ نمای بالایی از صفحات موجی با دامنه‌های مختلف موج مورد بررسی در این مقاله

### شبیه‌سازی

معادلات حاکم. معادلات حاکم در مختصات دکارتی

سه بعدی عبارتند از:

معادله‌ی پیوستگی:

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

u در این رابطه، سرعت و ρ چگالی است.

معادلات حرکت:

$$\rho \frac{\partial}{\partial x_i}(u_i u_j) = -\frac{\partial P}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \mu \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial x_i}(-\rho \overline{u_i u_j}) \quad (2)$$

که:

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

P در این معادلات، فشار و μ ضریب لزجت

مولکولی یا آشفته است. برای محاسبه ضریب لزجت

آشفته، مدل RNG k-ε توصیه شده است [12,10,9,8].

معادله‌ی انرژی:

$$\frac{\partial}{\partial x_i} [u_i (\rho E + P)] = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( k_{eff} \frac{\partial T}{\partial x_i} \right) \quad (4)$$

E انرژی کل (بر حسب وات) و k<sub>eff</sub> ضریب

هدایت حرارتی موثر است که از حاصل جمع ضریب

هدایت حرارتی مولکولی و ضریب هدایت حرارتی

آشفته (k+kt) به دست می‌آید. kt، با مدل آشفتگی RNG

k-ε تعیین می‌شود. عملکرد انتقال حرارت و افت فشار

با دو ضریب بدون بعد Z و f، به صورت زیر بیان

می‌شود. ضریب Z متناسب با شدت انتقال حرارت و

ضریب f متناسب با افت فشار است. افزایش ضریب Z،

باعث بیشتر شدن انتقال حرارت و کاهش ضریب f

موجب کمتر شدن افت فشار مبدل می‌شود.

$$j = \frac{h}{\rho u c_p} Pr^{2/3} \quad (4)$$

$$f = \frac{\Delta P}{2 \rho u^2} \frac{D_h}{L_d} \quad (5)$$

رابطه‌ی عدد رینولدز و قطر هیدرولیکی در این کانال

موجی به صورت زیر است:

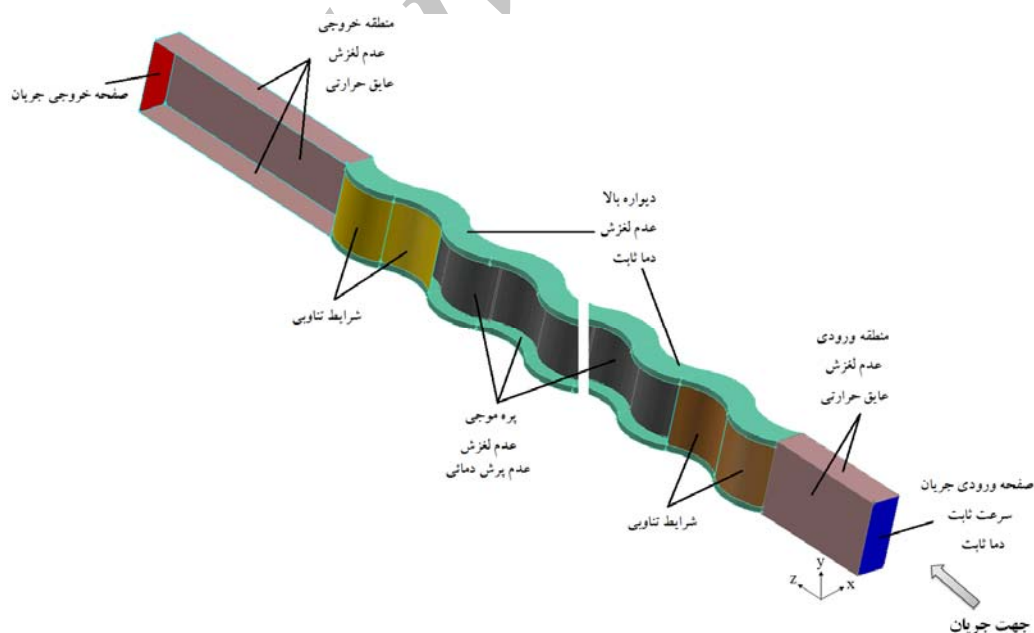
$$Re = \frac{\rho u D_h}{\mu} \quad (6)$$

استفاده شد.

$$D_h = \frac{2(F_h \times F_p)}{(F_h + F_p)} \quad (7)$$

**مشخصات شبکه.** مدل‌های محاسباتی در این مقاله دارای طول‌های ۴۳/۲ و ۶۴/۸ میلی‌متر و مشابه مدل‌های ۱ و ۱۰ هستند. برای بررسی اثر ابعاد شبکه بر نتایج محاسبه شده، از نتایج مدل‌های ۱ و ۱۰ استفاده شد. برای هر یک از مدل‌های ۱ و ۱۰، چهار شبکه به نام‌های شبکه درشت، متوسط، ریز و بسیار ریز انتخاب شد. تعداد نقاط هر یک از این شبکه‌ها در جدول (۲) ارائه شده‌است. از ضرایب  $z$  و  $f$  به عنوان عامل مقایسه استفاده شد. نتایج محاسبه شده در جدول (۲) گزارش شده‌است. میزان اختلاف بین ضرایب محاسبه شده با شبکه‌های ریز و خیلی ریز برای مدل ۱، کمتر از یک درصد است. این اختلاف برای مدل ۱۰، در حد یک درصد است. بنابراین، به منظور کاهش زمان محاسبات، از شبکه ریز استفاده شد. بخشی از شبکه در شکل (۵) نشان داده شده‌است.

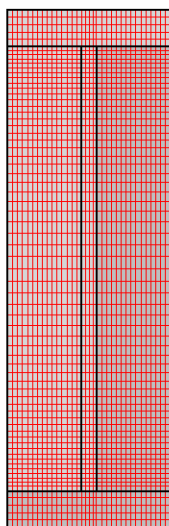
**شرایط مرزی.** برای یکنواخت شدن و جلوگیری از چرخش‌های مجدد جریان هوا در مرزهای ورود و خروج، دو کانال مستقیم به ابتدا و انتهای کانال موجی اضافه شد (شکل ۴). طول مناسب برای کانال مستقیم ورودی، یک برابر طول موج و در خروجی، دو برابر طول موج انتخاب شد [12]. برای سطحی که هوا وارد کانال می‌شود، شرط مرزی، سرعت و درجه حرارت ثابت استفاده شد. هوا از سطح انتهایی کانال خارج می‌شود، که در آنجا شرایط صفر بودن گرادیان سرعت و درجه حرارت به کار رفت. برای سطوح جانبی، بالا و پایین در دو کانال مستقیم ورودی و خروجی هوا، شرایط عایق حرارتی و عدم لغزش انتخاب شد. برای سطوح جانبی چپ و راست، شرط مرزی تناوبی استفاده شد. برای دو سطح بالا و پایین، شرایط عدم لغزش و درجه حرارت ثابت تعریف شد. سطوح میانی مدل، مربوط به پره موجی است. برای این سطوح از شرایط مرزی عدم پخش درجه حرارت و عدم لغزش



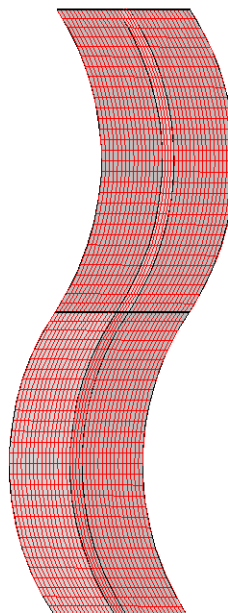
شکل ۴ شرایط مرزی در قسمت‌های مختلف

جدول ۲ مشخصات شبکه‌های مورد استفاده در این مقاله

شماره مدل	نام شبکه	تعداد شبکه	ضریب $\bar{z}$	خطای متوسط (%)	ضریب $f$	خطای متوسط (%)
مدل ۱	درشت	۳۲۹۸۶۸	۰/۰۰۶۰۸۹	۲/۴۳	۰/۰۷۰۸۷۸	۱/۸۳
	متوسط	۶۶۳۲۶۴	۰/۰۰۶۱۱۸	۱/۹۴	۰/۰۷۰۴۶	۱/۲۳
	ریز	۸۷۲۷۱۲	۰/۰۰۶۱۸۹	۰/۷۷	۰/۰۶۹۹۵	۰/۴۹
	بسیار ریز	۱۱۳۶۴۳۰	۰/۰۰۶۲۳۷	۰	۰/۰۶۹۶۰۲	۰
مدل ۱۰	درشت	۳۶۵۳۱۰	۰/۰۰۶۸۰۵	۴/۰۸	۰/۰۷۴۵۴	۳/۲۱
	متوسط	۶۱۰۴۸۸	۰/۰۰۶۸۷۷	۲/۹۹	۰/۰۷۳۵۶۶	۱/۸۶
	ریز	۸۷۳۱۲۰	۰/۰۰۶۹۹۵	۱/۲۵	۰/۰۷۳۱۰۳	۱/۲۲
	بسیار ریز	۱۰۵۶۷۲۰	۰/۰۰۷۰۸۳	۰	۰/۰۷۲۲۱۹	۰



نمای روبرو



نمای بالا

شکل ۵ بخشی از شبکه از نمای بالا و روبرو

صفحات بالا و پائین) استفاده شد. از الگوریتم سیمپل (SIMPLE) برای تعیین میدان‌های فشار-سرعت استفاده شد. برای رسیدن به حل عددی دقیق در شبیه‌سازی پایدار، از طرح مرتبه دوم بالادست (Upwind) برای گسسته‌سازی معادلات حاکم استفاده گردید. این روش برای گسسته‌سازی جملات جابجائی

### روش حل

برای هر مدل، معادلات حاکم بر جریان و انتقال حرارت، در سه بعد و با استفاده از روش حجم محدود به طور همزمان حل شدند. در این‌جا از شبیه‌سازی توام (Conjugate simulation) با در نظر گرفتن انتقال حرارت در فاز سیال خنک‌کننده (هوا) و جامد (پره و

در محدوده اعداد رینولدز کمتر از ۱۵۰۰، جریان سیال آرام و بیشترین مقدار خطای نسبی برای  $f$  و  $z$  به ترتیب ۱۲ و ۱۰ درصد است. در جریان آشفته با اعداد رینولدز بزرگتر از ۲۵۰۰، حداکثر خطای نسبی برای  $f$  و  $z$  به ترتیب به ۹ و ۶ درصد می‌رسد. در اعداد رینولدز بین ۱۵۰۰ تا ۲۵۰۰ که جریان سیال از حالت آرام به آشفته تبدیل می‌شود، هر دو مدل آرام و آشفته موثر هستند. بنابراین مقادیر متوسط حسابی ضرایب  $f$  حاصل از مدل‌های آرام و آشفته محاسبه شد. بیشترین مقدار خطا در این محدوده برای  $z$  برابر با ۱۷ و برای  $f$  برابر با ۱۰ درصد است. مقدار متوسط خطا برای  $f$  نیز محاسبه شد، محدوده مقدار متوسط خطا از این مقادیر کمتر است. به‌طور کلی، مقدار متوسط اختلاف ضرایب  $z$  و  $f$  محاسبه شده در محدوده جریان آرام و آشفته با نتایج آزمایشگاهی، به ترتیب ۷ و ۴ درصد است. دقت مدل‌های محاسباتی توسط سایر محققان نیز در حدود ۱۰ درصد است. بنابراین، روند تغییرات نتایج مدل محاسباتی با مقادیر تجربی موافقت خوبی دارد و نتایج شبیه‌سازی معتبر است.

**بررسی دامنه موج.** در شکل (۷)، نتایج شبیه‌سازی مدل‌های ۱۷ تا ۲۱ و مدل ۱۰ با طول کانال برابر با ۴۳/۲ میلی‌متر، ترسیم شده است. این مدل‌ها دارای دامنه موج از ۰/۵ تا ۳ میلی‌متر هستند. محور افقی در این شکل، عدد رینولدز است. برای اجتناب از تداخل منحنی‌ها در منطقه انتقالی، نتایج برای اعداد رینولدز بزرگتر از ۲۵۰۰ ترسیم شده است. محور عمودی در این شکل‌ها، ضرایب  $f$  و  $z$  است. با افزایش عدد رینولدز، در هر مدل، هر دو ضریب کمتر می‌شوند. اثر عدد رینولدز بر ضریب  $z$  بیشتر است و با تغییر عدد رینولدز از ۲۵۰۰ تا ۶۵۰۰، این ضریب در هر مدل، تا ۴۰ درصد کوچکتر می‌شود. ضریب  $f$  در این محدوده، حدود ۲۰ درصد کاهش می‌یابد.

مفید است. معادلات به روش تکرار تا همگرایی کامل حل می‌شوند. معیار همگرایی برای جرم، سرعت و انرژی به ترتیب ۶-۱۰، ۶-۱۰ و ۸-۱۰ بود.

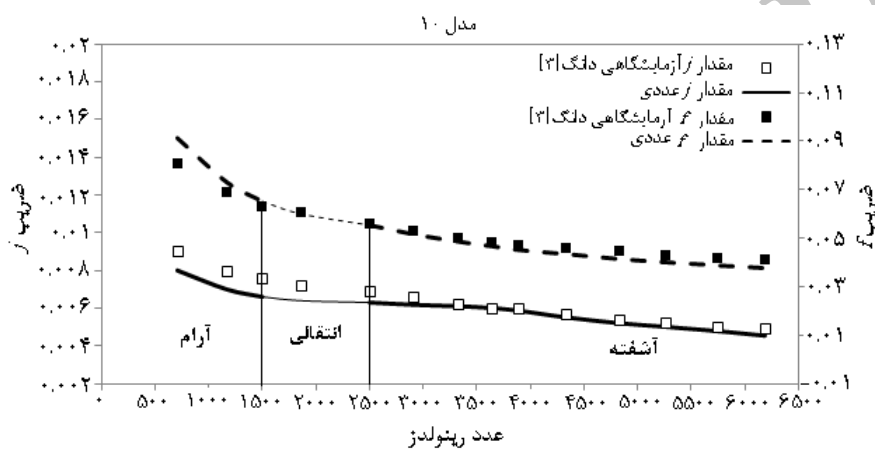
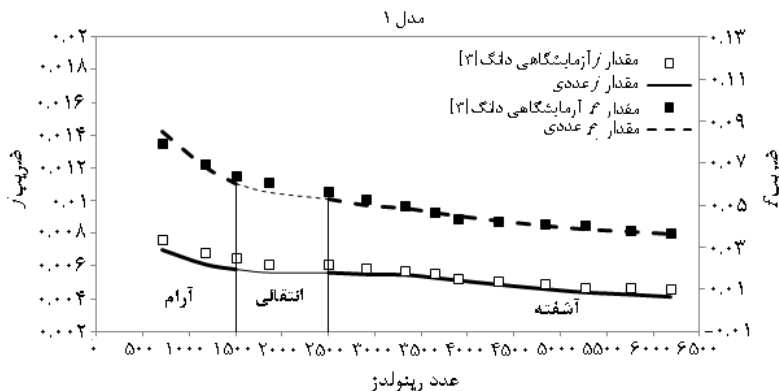
شبیه‌سازی برای هر مدل در اعداد رینولدز مختلف برای هر دو رژیم آرام و آشفته انجام شد. بدین ترتیب در این مقاله، ۱۲ مدل محاسباتی (مدل‌های ۱، ۱۰، ۱۲ تا ۲۱) مورد بررسی قرار گرفت. برای هر مدل در ۱۴ شدت جریان مختلف، محاسبات انجام شد و نتایج ۱۶۸ مدل محاسباتی، مورد بررسی قرار گرفت. این حجم محاسبات از اکثر مقالات منتشر شده تاکنون، بیشتر است.

برای انجام محاسبات، از یک رایانه با حافظه محاسباتی (RAM) چهار گیگابایت، ۳۲ بایتی و با یک هسته پردازنده، استفاده شد. زمان محاسبات برای هر مدل در جریان آرام تقریباً یک ساعت و در جریان آشفته ۹ تا ۱۰ ساعت بود. ضمناً از سرور با ۲۴ هسته‌ی پردازنده، حافظه محاسباتی ۸ گیگابایت، ۶۴ بایتی نیز، به منظور کاهش زمان محاسباتی، در بخشی از کار استفاده شد.

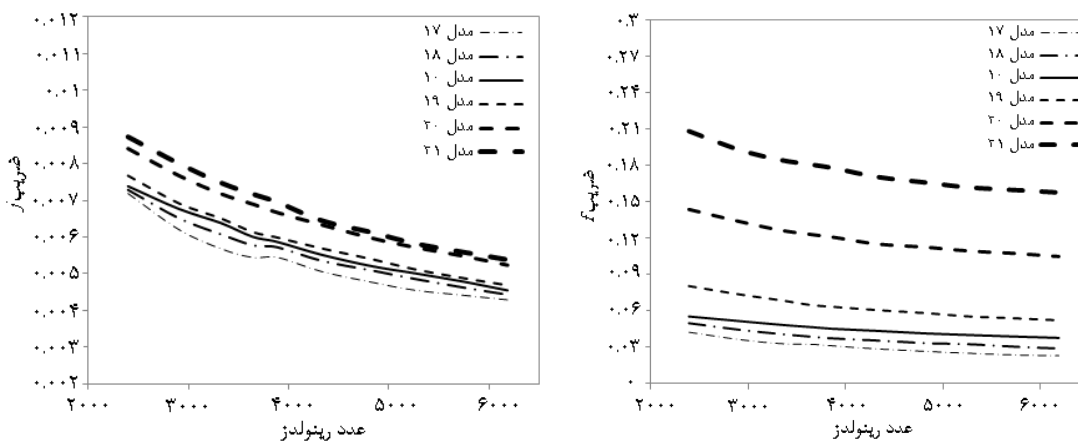
## نتایج و بحث

**اعتبار نتایج.** ضرایب  $f$  و  $z$ ، به عنوان نتایج محاسبه شده برای هر مدل استفاده شد. برای تعیین اعتبار مقادیر  $f$  و  $z$  محاسبه شده، اطلاعات تجربی مورد نیاز است. داده‌های آزمایشگاهی برای مدل‌های ۱۲ تا ۲۱ از جدول (۱) وجود ندارد، اما برای مدل‌های ۱ و ۱۰ این اطلاعات موجود است [3]. ابعاد و شرایط حاکم بر مدل‌های ۱ و ۱۰ با مدل‌های ۱۲ تا ۲۱ مشابه است. تفاوت در دامنه موج این مدل‌ها است. بنابراین برای تعیین اعتبار شبیه‌سازی، ضرایب  $f$  و  $z$  محاسبه شده با مدل‌های ۱ و ۱۰ با اطلاعات تجربی گزارش شده در شکل (۶) مقایسه شد. محور افقی در این شکل، عدد رینولدز و محور عمودی سمت چپ ضریب  $z$  و محور عمودی سمت راست، ضریب  $f$  است.





شکل 6 اعتبار نتایج شبیه سازی با داده های آزمایشگاهی برای مدل های 1 و 10



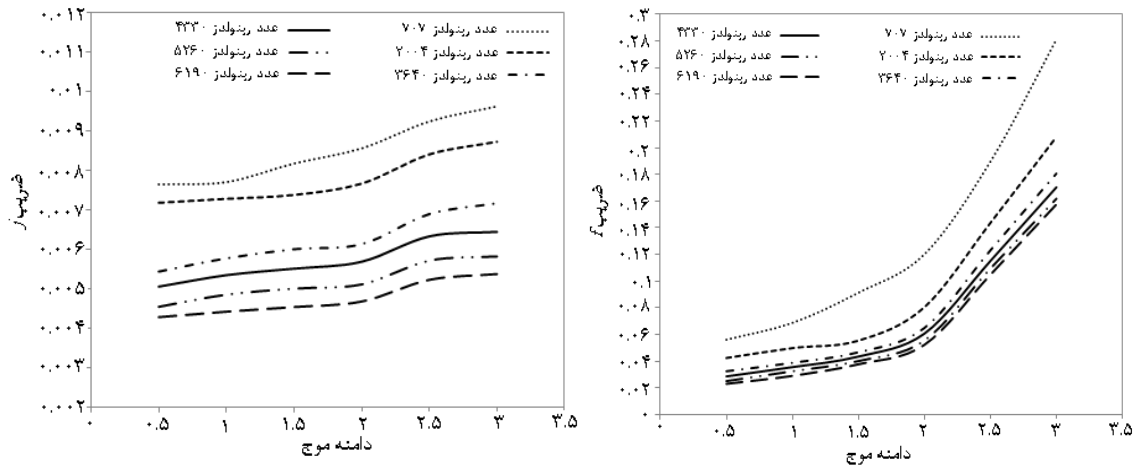
شکل 7 اثر عدد رینولدز بر ضرایب  $f$  و  $\lambda$  در دامنه های مختلف موج

شکل دامنه موج بر حسب میلی متر و محور عمودی هر یک از این ضرایب است. با افزایش دامنه موج، هر دو

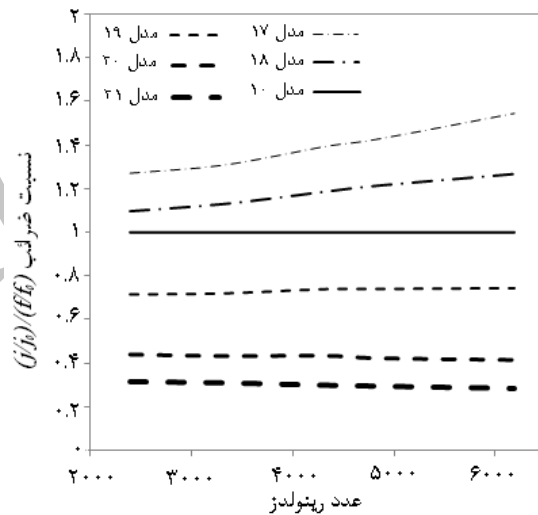
در شکل (8) اثر دامنه موج بر ضرایب  $f$  و  $\lambda$  در اعداد رینولدز مختلف ترسیم شده است. محور افقی این

نیم میلی متر، هر دو ضریب کوچکتر می شود. مقدار کاهش ضریب ز در حدود ۱۵ درصد و مقدار کاهش ضریب  $f$ ، ۷۵ درصد است. این نتایج نشان می دهد دامنه موج اثر بیشتری بر تغییرات ضریب  $f$  دارد.

ضریب  $z$  و  $f$  بزرگتر می شوند. میزان تغییر ضریب  $f$ ، یا شیب منحنی، از دامنه موج دو میلی متر به بعد افزایش می یابد. تغییرات ضریب  $z$  با تغییر دامنه موج، یکنواخت است. با کاهش دامنه موج از سه میلی متر تا



شکل ۸ اثر دامنه موج بر ضرایب  $z$  و  $f$  در اعداد رینولدز مختلف



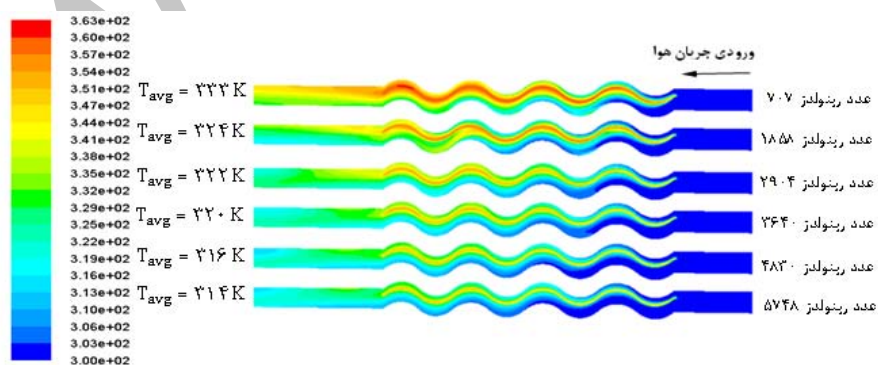
شکل ۹ اثر تغییر دامنه موج بر معیار جدید بررسی عملکرد حرارتی و هیدرولیکی

می‌شود. با افزایش شدت جریان هوا، سرعت متوسط هوا درون کانال بیشتر شده و زمان اقامت هوا در کانال کمتر می‌شود. بنابراین درجه حرارت هوای خروجی افزایش کمتری می‌یابد اما میزان انرژی منتقل شده میان هوا و جداره کانال بیشتر است.

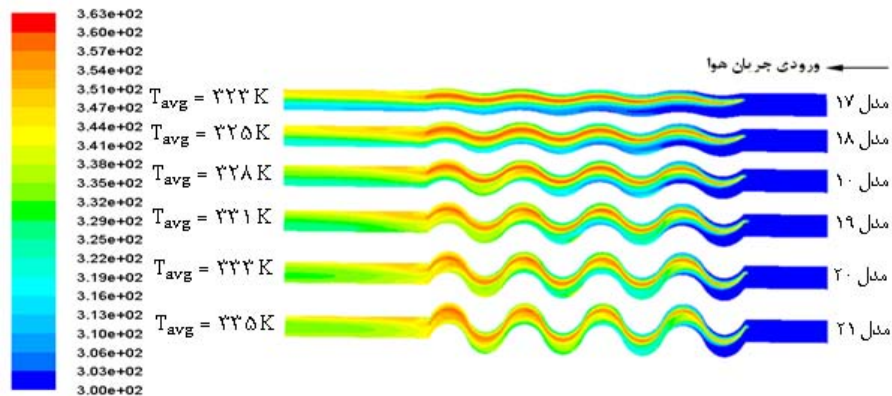
در شکل (۱۱) تغییرات درجه حرارت با مناطق رنگی در طول کانال مدل ۱۰ و مدل‌های ۱۷ تا ۲۱ و در ارتفاع ۷/۳ میلی‌متری از کف کانال هوا ترسیم شده‌است. در تمامی این مدل‌ها، هوا با درجه حرارت ۳۰۰/۱۵ کلوین وارد کانال می‌شود. مقدار درجه حرارت هوا در خروجی پره در دامنه‌های موج کوچک تا بزرگ، به ترتیب ۳۲۳، ۳۲۵، ۳۲۸، ۳۳۱، ۳۳۳، ۳۳۵ کلوین است. با توجه به شکل، لایه مرزی حرارتی در دامنه موج‌های بزرگ‌تر، به عنوان مثال ۳ میلی‌متر، در مقایسه با دامنه‌های موج کوچک‌تر، به عنوان مثال ۰/۵ میلی‌متر، نازک‌تر شده و در نتیجه ضریب انتقال حرارت افزایش می‌یابد، که به تدریج با حرکت در جهت جریان، به دلیل هندسه‌ی موجی شکل کانال، مقدار درجه حرارت هوا افزایش می‌یابد. علت این امر، افزایش شدت اختلاط و ایجاد جریان‌های چرخشی است. بدین ترتیب، با افزایش دامنه‌ی موج مقدار درجه حرارت هوا خروجی افزایش یافته و عملکرد حرارتی مبدل بهبود می‌یابد.

عملکرد مبدل‌های حرارتی فشرده با نسبت دو ضریب،  $z/f$ ، و یا نسبت توانی آنها به شکل  $(j/f)^{1/3}$  به نام معیارهای ارزیابی بررسی می‌شود. چون اثر دامنه موج بر ضرایب  $z$  و  $f$  متفاوت است، در این مقاله از شکل دیگری از این معیار استفاده می‌شود. در این شکل جدید، ضریب  $z/j_0$  بر ضریب  $f/f_0$  تقسیم می‌شود. پانویس صفر مربوط به ضرایب با دامنه موج اولیه (در اینجا ۱/۵ میلی‌متر) است. این معیار به این سوال پاسخ می‌دهد که آیا تغییرات ایجاد شده در دامنه موج، باعث بهبود عملکرد حرارتی مبدل نسبت به عملکرد هیدرولیکی آن شده‌است؟ روند تغییرات این معیار برای دامنه‌های مختلف موج برحسب عدد رینولدز در شکل (۹) نمایش داده شده‌است. این شکل نشان می‌دهد در تمام محدوده‌ی اعداد رینولدز مورد مطالعه، کاهش دامنه موج باعث بهبود عملکرد حرارتی نسبت به عملکرد هیدرولیکی آن می‌شود.

**میدان درجه حرارت در دامنه‌های مختلف موج.** در شکل (۱۰) تغییرات درجه حرارت با مناطق رنگی در طول کانال مدل (۱۰) در ارتفاع ۷/۳ میلی‌متری از کف کانال ترسیم شده است. رنگ آبی کمترین درجه حرارت و رنگ قرمز، بیشترین درجه حرارت را نشان می‌دهد. جهت جریان هوا از سمت راست به چپ و شدت جریان‌ها یا اعداد رینولدز، از بالا به پایین بیشتر



شکل ۱۰ تغییرات درجه حرارت با مناطق رنگی در طول کانال مدل (۱۰) در ارتفاع ۷/۳ میلی‌متری از کف کانال



شکل ۱۱ توزیع درجه حرارت در دامنه موج‌های مختلف در رینولدز ۲۰۰۰ و در ارتفاع ۷/۳ میلی متری از کف کانال

مربع خطاها، ضرایب و توان‌های هر یک از این روابط

به صورت زیر به دست آمد:

$$j = 0.08398 \text{Re}^{-0.21222} \left(\frac{F_p}{F_h}\right)^{0.18579} \left(\frac{F_p}{2A}\right)^{-0.12368} \left(\frac{L_d}{L}\right)^{-0.42818} \quad (8)$$

$$f = 5.17572 \text{Re}^{-0.28457} \left(\frac{F_p}{F_h}\right)^{1.09318} \left(\frac{F_p}{2A}\right)^{-1.69692} \left(\frac{L_d}{L}\right)^{-0.16001} \quad (9)$$

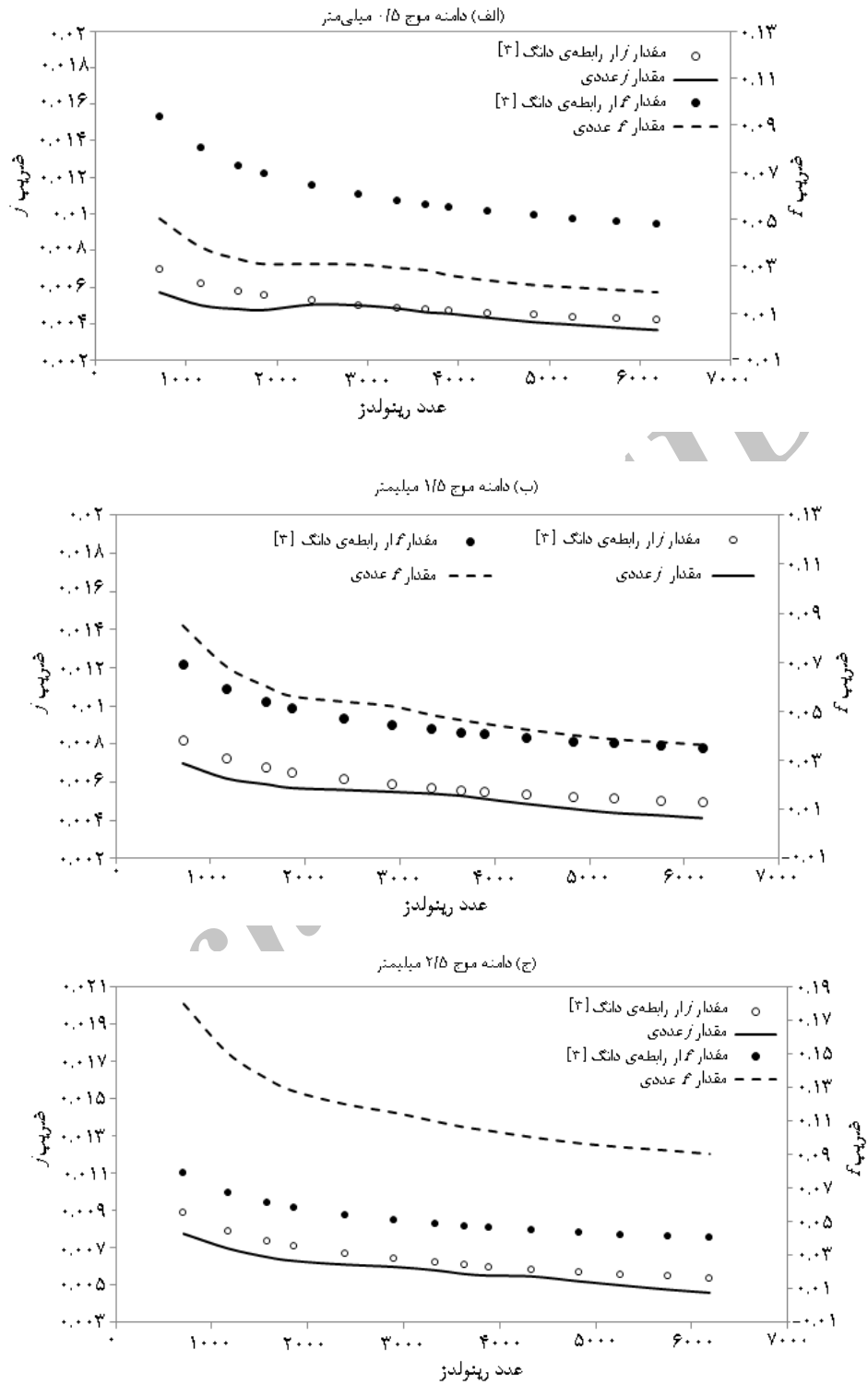
نتایج روابط جدید با داده‌های آزمایشگاهی موجود برای مدل‌های ۱، ۲، ۳، ۴، ۷، ۱۰ و ۱۱ مقایسه شده و مقدار اختلاف در حدود ده درصد است.

در شکل (۱۳) مقایسه‌ای بین نتایج حاصل از روابط جدید با داده‌های آزمایشگاهی برای دامنه موج ۱/۵ میلی متر نشان داده شده است. مقدار خطای ضریب  $j$  از رابطه‌ی جدید با داده‌های آزمایشگاهی ۴٪ و همچنین مقدار خطای ضریب  $f$  برابر با ۷٪ می‌باشد. این مقادیر نشان دهنده‌ی آن است که روابط جدید قادرند با میزان خطای قابل قبولی نتایج تجربی را پیش‌گویی کنند.

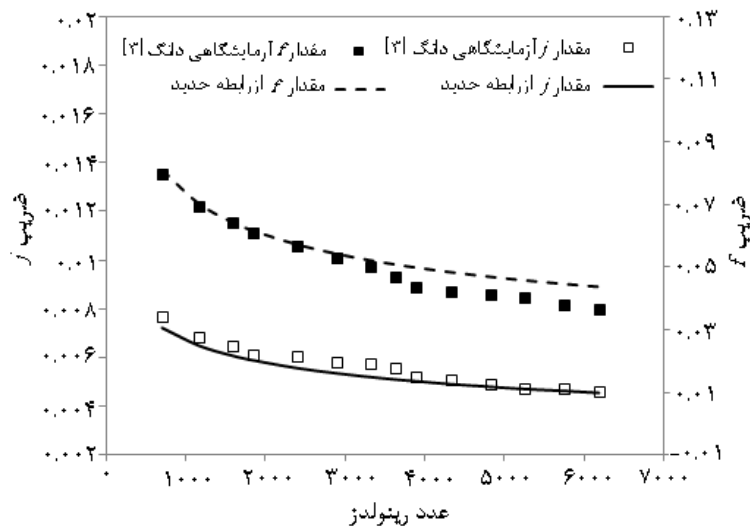
**روابط جدید.** دانگ و همکاران دو رابطه برای

ضرایب  $j$  و  $f$  ارائه کردند. این روابط از نتایج یازده مدل آزمایشگاهی به دست آمد. در تمام این مدل‌ها، دامنه موج ثابت و ۱/۵ میلی متر بود. در شکل (۱۲) مقادیر محاسبه شده برای ضرایب  $j$  و  $f$  در این مقاله و مقادیر محاسبه شده با روابط تجربی دانگ، در دامنه موج‌های ۰/۵، ۱/۵ و ۲/۵ میلی متر مقایسه شده است. مقدار خطای ضرایب  $j$  و  $f$  شبیه سازی شده در اینجا با رابطه‌ی دانگ، به ترتیب ۸ و ۱۱ درصد است که قابل قبول است. با افزایش یا کاهش دامنه موج، مقدار اختلاف بیشتر شده و به بیش از ۱۲۰ درصد می‌رسد. بررسی‌های انجام شده در این مقاله، نشان می‌دهد که روابط پیشنهادی آنها نمی‌تواند اثر دامنه موج را در محاسبه ضرایب  $j$  و  $f$  لحاظ کند.

شکل روابط جدید برای محاسبه هر یک از ضرایب  $j$  و  $f$ ، به صورت یک رابطه توانی و با یک ضریب ثابت انتخاب شد. عوامل موثر در این روابط عدد رینولدز، نسبت گام به ارتفاع، نسبت گام به دامنه موج و نسبت طول موج به طول کانال انتخاب شد. با استفاده از روش برازش چند متغیره و حداقل کردن



شکل ۱۲ مقایسه مقادیر محاسبه شده برای ضرایب  $\alpha$  و  $\beta$  توسط شبیه سازی در این مقاله و توسط روابط دانگ در دامنه های مختلف موج



شکل ۱۳ مقایسه ضرایب  $f$  و  $z$  حاصل از رابطه جدید و مقادیر تجربی دانگ

طوری که، با افزایش عدد رینولدز عملکرد این پره ها نیز بهبود می یابد. افزایش دامنه موج باعث کاهش معیار ارزیابی و در نتیجه عملکرد هیدرولیکی و حرارتی در این نوع پره ها می شود و با افزایش عدد رینولدز مقدار این معیار کاهش می یابد.

### نتیجه گیری

در این مقاله، اثر تغییرات دامنه موج صفحات مبدل روی ضرایب  $z$  و  $f$  در شدت جریان های مختلف، بررسی شد. این کار با شبیه سازی دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) کانال موجی یک مبدل صفحه موجی در سه بعد انجام گرفت. نتایج شبیه سازی با داده های تجربی منتشر شده مقایسه شد. پس از تایید نتایج اولیه، ضرایب  $z$  و  $f$  در دامنه های موج و اعداد رینولدز مختلف محاسبه شد. با استفاده از نتایج، روابط جدیدی برای ضرایب  $z$  و  $f$  حاوی دامنه موج ارائه شد. نتایج شبیه سازی نشان دادند که با افزایش عدد رینولدز، ضرایب  $z$  و  $f$  کاهش می یابند و تغییر این دامنه موج، بر ضرایب  $z$  و  $f$  تاثیر دارد. با در نظر گرفتن یک معیار جدید ارزیابی برای عملکرد حرارتی مبدل، شبیه به نسبت اعداد بدون بعد کلبرن به فانینگ ( $z/f$ )، شاخص ارزیابی سطح پره، عملکرد حرارتی بهتر در پره هایی با دامنه موج کم ( $0/5$  و  $1$  میلی متر) در تمام محدوددهی اعداد رینولدز مورد مطالعه مشاهده شد. به

### فهرست علائم

دو برابر دامنه موج (m)	2A
قطر هیدرولیکی ورودی پره (m)	$D_h$
گام پره (mm)	$F_h$
ضریب انتقال حرارت ( $W/m^2.K$ )	$h$
طول پره موجدار (mm)	$L_d$
فشار (Pa)	$P$
عدد پرانتل	$Pr$
درجه حرارت (K)	$T$
نسبت فاصله کانال پره موجدار	$\varepsilon$
دانسیته ( $Kg/m^3$ )	$\rho$
ضخامت پره (mm)	$\delta$

		گرمای ویژه در فشار ثابت (J/Kg.K)	$C_p$
پره			
سرعت هوای ورودی (m/s)	$u$	ارتفاع پره (mm)	$F_h$
ویسکوزیته دینامیکی (Kg/m.s)	$\mu$	ضریب اصطکاک فاینینگ	$f$
ضریب $z$ یا ضریب $f$	$\phi$	ضریب کلبرن	$j$
		طول موج پره موجدار (mm)	$L$
		تعداد واحدهای انتقال	NTU
		افت فشار در جهت جریان (Pa)	$\Delta P$
		عدد رینولدز هوا مبنی بر قطر ورودی	Re

## مراجع

- حسینی راد، س. ا.، "بررسی اثر نوع سیال بر عملکرد حرارتی-هیدرولیکی مبدل حرارتی تخت-پره موجدار"، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه سمنان، (۱۳۹۰).
- Naphon, P. "Laminar convective heat transfer and pressure drop in the corrugated channels", Int. commun. Heat Mass Tran. 34, pp. 62-71, (2007).
- Dong, J., Chen, J., Chen, Z., Zhou, Z. and Zhang W., "Heat transfer and pressure drop correlations for the wavy fin and flat tube heat exchangers", Appl. Therm. Eng. 27, pp. 2066-2073, (2007).
- Yan, W. M. and Sheen, P. J., "Heat transfer and friction characteristics of fin-and-tube heat exchangers", Int. J Heat Mass Tran. 43, pp. 1651-1659, (2000).
- Muley, A., Borghese, J., Manglik, R. M., and Kundu, J., "Experimental and numerical investigation of thermal-hydraulic characteristics of wavy-channel compact heat exchanger", Proc. 12th Int. Heat Transfer Conf., France, Vol. 4, pp. 417-422, (2002).
- Islamoglu, Y. and Parmaksizoglu, C., "Numerical investigation of convective heat transfer and pressure drop in a corrugated heat exchanger channel", Applied Thermal Engineering 24, pp. 141-147, (2004).
- Zhang, J., Kundu, J., and Manglik, R. M., "Effect of fin waviness and spacing on the lateral vortex structure and laminar heat transfer in wavy-plate-fin cores", Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 47, pp. 1719-1730, (2004).
- Manglik, R. M., Zhang, J., and Muley, A., "Low Reynolds number forced convection in three-dimensional wavy-platefin compact channels: fin density effects", Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 48, pp. 1439-1449, (2005).
- Muley, A., Borghese, J. B., White, S. L., and Manglik, R. M., "Enhanced thermal-hydraulic performance of a wavy-platefin compact heat exchanger: effect of corrugation severity", Proc. 2006

ASME Int. Mechanical Engineering Congress and Exposition (IMECE2006), Chicago, IL, USA, IMECE2006-14755, (2006).

10. Sheik Ismail, L., Ranganayakulu, C., and Shah, R. K., "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 Transfer*, Vol. 52, pp. 3972–3983, (2009).
11. Sheik Ismail, L., Velraj, R., and Ranganayakulu, C., "Studies on pumping power in terms of pressure drop and heat transfer characteristics of compact plate-fin heat exchangers—A review", *Renewable Sustainable Energy Rev.*, Vol. 14, pp. 478–485, (2010).
12. Khoshvaght Aliabadi, M., Gholam Samani, M., Hormozi, F., Haghghi Asl, A., "3D-CFD Simulation and Neural Network Model on  $j$  and  $f$  factors of the Wavy Fin-and-Flat Tube Heat Exchangers", *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, Vol. 28, pp. 505 - 520, (2011).

Archive of SID