اثر دامنه موج بر عملکرد مبدل حرارتی فشرده صفحهای پره موجی: بررسی عددی و ارائه روابط جدید* سیده الهام حسینی راد ^(۱) مرتضی خوشوقت علی آبادی ^(۳) فرامرز هرمزی^(۳)

چکیده دامنه موج یکی از مشخصه های هندسی موثر بر عمل کرد مبدل حرارتی فشرده صفحه ای پره موجی است. روابط جدیدی برای لحاظ کردن دامنه موج در طراحی این نوع مبدل ها مورد نیاز است. در این مقاله، اثر دامنه موج بر ضریب کلبرن(j) و ضریب اصطکاک فانینگ (f) بررسی می شود. ضریب j معیاری از شدت انتقال حرارت و ضریب f متناسب با افت فشار است.در این بررسی، شبیه سازی سه بعدی دینامیک سیالات محاسباتی کانال موجی یک مبدل انجام شد. این کانال دارای ارتفاع ۸، گام ۲ و طول های ۲۳/۲ و ۸۶ میلی موج و در اعلاعات تجربی منتشر شده در مورد این کانال با دامنه موج ۱/۵ در دسترس است. بنابراین، ابتدا شبیه سازی با این دامنه موج و در اعداد رینولـدز ۲۰۰۰ تحربی منتشر شده در مورد این کانال با دامنه موج ۱/۵ در دسترس است. بنابراین، ابتدا شبیه سازی با این دامنه موج و در اعداد رینولـدز ۲۰۰۰ تحربی منتشر شده در مورد این کانال با دامنه موج ۱/۵ در دسترس است. بنابراین، ابتدا شبیه سازی با این دامنه موج و در اعداد رینولـدز ۲۰۰۰ تحربی منتشر شده در مورد این کانال با دامنه موج ۱/۵ در ۲۰۰ ۲ م/۲ و ۳ میلی متر انجام شد. نتایج نسیه سازی با و ۲ معیاری از و ۲۰۰ مرحله دوم، شبیه سازی کانال با دامنه موج های ۲۰،۱۰ ۲ م/۲ و ۳ میلی متر انجام شد. نتایج نشان می دهد که دامنه موج روی ضرایب زو f موثر است. با افزایش دامنه موج های آرام و آشفته، هر دو ضریب بیشتر می شوند. اما، تاثیر دامنه موج بر ضریب f بیشتر است. با روش پردازش منحنی چند منعیره، دو رابطه برای j و f برحسب عدد رینولدز و ابعاد هندسی مختلف کانال موجی به ویژه دامنه موج به دست. زمون پردازش منحنی چند منعیره، دو رابطه برای j و f برحسب عدد رینولدز و ابعاد هندسی مختلف کانال موجی به ویژه دامنه موج به درست. روش پردازش منحنی چند منعیره، دو رابطه برای j و f برحسب عدد رینولدز و ابعاد هندسی مختلف کانال موجی به ویژه دامنه موج به موجه در بر روش پردازش منحنی چند منعیره، دو رابطه برای j و f برحسب عدد رینولدز و ابعاد هندسی مختلف کانال موجی به ویژه دامنه موج به دست. بر روش پردازش موجی به دانه موجی دو رابطه برای و موری ی و موجی که از هوا به عنوان سیال خنک کننده استفاده می کنند کاربر در درد.

واژههای کلیدی مبدل حرارتی فشرده، پرههای موجی، دامنهی موج، ضریب کلبرن، ضریب فانینگ، 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 ۹۰/۵/۱٤ 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

چین ۲۰ درجه انتخاب شد. نتایج با داده های تجربی مقایسه و تطابق خوبی گزارش شد. در این مقاله بر مزایای روش های عددی بررسی جریان درون کانال نسبت به روش های آزمایشگاهی تاکید شد[6]. در سال ۲۰۰٤ انتقال حرارت جابجایی اجباری و آرام هوادر شدت جریانهای، مختلف (۲۰۰۰ ≥R≥۰۰) 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 فشارکانالهای موجی در مقایسه با کانالهای مستقیم، زیاد نیست[7].

در سال ۲۰۰۵ با روش حجم محدود سه بعدی، انتقال حرارت هوا در مبدل صفحه موجى در جريان آرام(۱۰۰۰ ≥Re≤ ۱۰) و پاياتوسط مانگ ليک و همکاران بررسی شد. نتایج نشان داد تراکم موجها بـر میدانهای درجه حرارت، سرعت و ضرایبj وf اثر دارد[8]. انتقال حرارت جابجایی اجباری هوا در مبدل صفحه موجی، در محدودهی بزرگتری از شدت جريان ٥٠٠٠ <a>Re دوسط مولى و همكاران اندازه گیری شد. علاوه بر این، از روش حجم کنترل سه بعدی در ۱۰۰۰ <re>Re ۱۰۰ 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 مبدلصفحه موجی را مورد آزمایش قرارداده و با استفاده از روش تاثیر تعداد واحدهای انتقال (NTU)، اثر مشخصه های هندسی نظیر ارتفاع، گام و طول کانال بر میزان انتقال حرارت را تعیین کردند.آنهاتغییرضرایبj و f در محدودہی بزرگے از اعداد رینولدز (۲٤۰۰ <u>Ees</u> ۲۰۰ را بررسی و دو رابطه تجربی برای ضرایب j و f ارائه کردند.در اینکار دامنه موج ثابت بود اما بر اهمیت آن تاکید شد[3]. مطالعات انجام شده در موردضریب انتقال حرارت و افت فشار مبدل صفحه موجى توسط

مقدمه

مبدل حرارتی فشرده صفحهای پره موجی (-Wavy) یا به اختصار (Plate-Fin Compact Heat Exchanger) یا به اختصار مبدل صفحه موجی، یکی از انواع مبدل های 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 مبدل های فشرده معمولاً از ضریب کلبرن (j) وضریب اصطکاک فانینگ (f) استفاده می شود[2].

دامنه موج، باعث تغییر مسیر جریان و تغییر شدت اختلاط سیال عبوری از درون صفحات مبدل می شود. در نتیجه، میزان انتقال حرارت یا ضریب j وافت فشار یا ضریب f مبدل تغییرمی کند. 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 مـوجي، تعـداد كمـي مقالـه منتشـر شدهاست[3]. ميزان انتقال حرارت و افت فشار هوا بين یرههای شیاردار، موجی و تخت،توسط یان و همکار او در سال ۲۰۰۰ اندازهگیری گردیده و مشاهده شد که در اعـداد رينولـدز يكسـان، يـرمى شـياردار ضـرايبj وf بزرگتری در مقایسه با پرهی تخت دارد و مبدل صفحه موجی دارای بزرگترین نسبت j/f در اعداد رینولدز (Re) کمتر از ۱۵۰۰است[4]. اندازه گیری تجربی و مدلسازی عددی انتقال حرارت پایا و افت فشار آب در جریان آرام (۸۳۰<u><Re</u>۸۳۰)،در کانال موجی یک مبدل حرارتی توسط مولی و همکاران بررسی شد. آنها گزارش کردندکه کانال موجی، نسبت j/f بالاتری در مقایسه باکانال مستقیم مشابه دارد و میزان انتقال حرارت کانال موجی در شرایط یکسان، تقریباً سه برابر بيشتراست[5]. انتقال حرارت و افت فشار در يک کانال موجی با روش عددی توسط یاسر اسلاماغلو و همکار او بررسی شد. ارتفاع کانال ۵ و ۱۰ میلیمتر و زاویه شیک و همکاران مرور و بیان شد که در تحقیقاتی که تا آن زمان انجام گرفته بود، بررسی اثر دامنه موج روی ضرایب j و f ومعادلهای که این اثر را لحاظ کند، وجود ندارد[10,11]. شبیهسازی عددی مبدلصفحه موجی در سال ۲۰۱۱ توسط خوشوقت و همکاران توسعه داده شد. آنها از شبکه عصبی برای تعیین روابط j 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 دامنه ی موج بر عملکرد مبدل صفحه موجی، به طور کامل بررسی نشده و لازم است روابطی جدید برای تعیین اثر دامنه موج بر ضریب اسلی این مقاله، تعیین نوع و میزان اثر تغییرات دامنه موج صفحات مبدل روی ضرایب ز و f در شدت جریانهای مختلف است. اینکار با شبیهسازی سه بعدی دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) کانال موجی یک مبدل صفحه موجی انجام می شود. با استفاده از یک مبدل صفحه موجی انجام می شود. با استفاده از با در نظر گرفتن دامنه موج ارائه می شود.

مشخصات صفحه موجى

معمولاً در صفحات موجي، الگوي موج به طور منظم تكرار می شود. برای كاهش محاسبات، تنها یک قسمت از کانال موجی بررسی شد. این قسمت در شکل (۲) نشان داده شدهاست. مشخصات هندسی کانال، ارتفاع (Fh)، گام (Fp)، طول کانال(Ld)، طول موج (L) و دامنه ی موج (2A) می باشد. در جدول (۱) مقادیر این مشخصه های هندسی آورده شدهاست. ضخامت صفحه موجى و طول موج كانال ثابت و به ترتيب برابر با ١/٢ و ۱۰/۸ میلیمتر است. یازده مدل اول جدول (۱)، مشخصات صفحات موجی آزمایشگاهی و شبیهسازی قبلی انجام شدہ توسط نویسندگان ایے مقالے است [3,12]. ده مدل بعدی برای بررسی اثر دامنه موج در این مقاله،انتخاب شدهاست. 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) آمدهاست.

سیال مورد بررسی هوا و با فرض تراکم ناپذیری و خواص فیزیکی ثابت است. درجـه حـرارت هـوای ورودی ۳۰۰/۱۵ کلوین و هوا با هر دو طـرف صـفحه موجی در تماس است. در اینجا از تشعشع حرارتی و جابجایی طبیعی صرف نظر شد.





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



شکل ۲ کانال،های موجی و بخش انتخاب شده برای شبیهسازی کانال

دامنه موج (2A)	طول پره (L _d)	ارتفاع پره (F _h)	گام پره (F _P)	شماره مدل
1/0	٦٤/٨	٨	٢	١
1/0	٦٤/٨	٨	۲/۲٥	٢
1/0	٦٤/٨	٨	۲/٥	٣
1/0	٥٤	٨	۲	٤
1/0	٥٤		۲/۲۵	٥
1/0	٥٤	A	۲/٥	٦
1/0	٤٣٦٢	v	٢	v
1/0	٤٣٦٢	v	۲/۲٥	٨
1/0	٤٣/٢	v	۲/٥	٩
1/0	٤٣٦٢	٨	٢	۱.
1/0	٤٣/٢	۱.	٢	11
•/0	٦٤/٨	٨	٢	١٢
	٦٤/٨	٨	٢	١٣
۲	٦٤/٨	٨	٢	12
۲/٥	٦٤/٨	٨	٢	١٥
٣	٦٤/٨	٨	٢	١٦
•/0	237/2	٨	٢	١٧
١	237/2	٨	٢	١٨
۲	٤٣/٢	٨	٢	١٩
۲/٥	٤٣/٢	٨	٢	۲.
٣	٤٣/٢	٨	٢	۲۱
1	1	1		

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



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

معادلات حاکم. معادلات حاکم در مختصات دکـارت_و سه بعدی عبارتند از:

سه بعدی عبارتند ار

معادلەي پيوستگى:

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

$$\rightarrow \rho \frac{\partial}{\partial x_{i}} (u_{i}u_{j}) = -\frac{\partial P}{\partial x_{j}} + \frac{\partial}{\partial x_{i}} \left[\mu \left(\frac{\partial u_{i}}{\partial x_{j}} + \frac{\partial u_{j}}{\partial x_{i}} - \frac{2}{3} \delta_{ij\frac{\partial u_{k}}{\partial x_{k}}} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial x_{i}} (-\rho \overline{u_{i}u_{j}})$$

(٢)

$$-\rho \overline{u_i u_j} = \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right)$$

$$- \frac{2}{3} \left(\rho k + \mu_t \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right) \delta_{ij}$$
(7)

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:

$$\rightarrow \frac{\partial}{\partial x_i} [u_i(\rho E + P)] = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(k_{eff} \frac{\partial T}{\partial x_i} \right) \tag{(1)}$$

E انرژی کل (بر حسب وات) و k_{eff} ضریب هدایت حرارتی موثر است که از حاصل جمع ضریب هدایت حرارتی مولکولی و ضریب هدایت حرارتی آشفته (k+kt) بهدست میآید. kt با مدل آشفتگی RNG آشفته (k+kt) بهدست میآید. th با مدل آشفتگی SNG B-Arتعیین میشود. عملکرد انتقال حرارت و افت فشار با دو ضریب بدون بعد j و f به صورت زیر بیان میشود. ضریب j متناسب با شدت انتقال حرارت و باعث بیشترشدن انتقال حرارت و کاهش ضریب j موجب کمترشدن افت فشار مبدل میشود. (٤) $\Delta P D_h$

$$f = \frac{\Delta P}{2\rho u^2} \frac{D_h}{L_d} \tag{6}$$

رابطهی عدد رینولدز و قطر هیدرولیکی در ایـن کانـال موجی به صورت زیر است: $Re = \frac{\rho u D_h}{\mu}$ (٦) $D_{h} = \frac{2 \left(F_{h} \times F_{P}\right)}{\left(F_{h} + F_{P}\right)} \tag{V}$

شرايط مرزي. براي يكنواخت شدن وجلوگيري از چرخشهای مجدد جریان هوا در مرزهای ورود و خروج، دو کانال مستقیم به ابتدا و انتهای کانال موجی اضافه شد (شکل ٤). طول مناسب برای کانال مستقیم ورودي، يک برابر طول موج و در خروجي، دو برابر طول موج انتخاب شد[12]. برای سطحی که هـوا وارد کانال می شود،شرط مرزی، سرعت و درجـه حـرارت ثابت استفاده شد. هوا از سطح انتهایی کانال خارج می شود، 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 هـوا، شرایط عایق حرارتی و عدم لغزش انتخاب شد. برای سطوح جانبي چـپ و راسـت، شـرط مرزي تنـاوبي استفاده شد. برای دو سطح بالا و پایین، شرایط عـدم لغزش و درجه حرارت ثابت تعريف شد. سطوح مياني مدل، مربوط به پره موجي است. بـراي ايـن سـطوح از شرایط مرزی عدم پرش درجه حرارت و عـدم لغـزش



استفاده شد.



شکل ٤ شرایط مرزی در قسمتهای مختلف

٥٦

خطاي متوسط (٪)	ضريب f	خطاي متوسط (٪)	ضريب j	تعداد شبكه	نام شبکه	شماره مدل
١/٨٣	•/•V•AVA	۲/٤٣	•/••٦•٨٩	٣٢٩٨٦٨	درشت	
١/٢٣	•/•٧•٤٦	1/92	•/••٦١١٨	773778	متوسط	
٠/٤٩	•/•٦٩٩٥	• /VV	•/••٦١٨٩	AVTV17	ريز	مدل ۱
•	•/•٦٩٦•٢	•	•/••٦٢٣٧	118758.	بسيار ريز	
۳/۲۱	•/•V£0£	٤/٠٨	•/••٦٨•٥	۳٦٥٣١٠	درشت	
١/٨٦	•/•٧٣٥٦٦	४/९९	•/••٦٨٧٧	71.200	متوسط	مدل ۱۰
1/77	•/•٧٣١•٣	١/٢٥	•/••٦٩٩٥	AVT17.	ريز	
•	•/•٧٢٢١٩	•	•/••٧•٨٣	1.0777.	بسيار ريز	

جدول ۲ مشخصات شبکههای مورد استفاده در این مقاله



شکل ٥ بخشي از شبکه از نماي بالا و روبرو

صفحات بالا و پائین) استفاده شد. از الگوریتم سیمپل (SIMPLE) برای تعیین میدان های فشار-سرعت استفاده شد. برای رسیدن به حل عددی دقیق در شبیهسازی پایدار، از طرح مرتبه دوم بالادست (Upwind) برای گسسته سازی معادلات حاکم استفاده گردید. این روش برای گسسته سازی 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 این جا از شبیه سازی توام (Conjugate simulation) با در نظر گرفتن انتقال حرارت در فاز سیال خنک کننده (هوا) و جامد (پره و مفید است. معادلات به روش تکرار تا همگرائی کامل حل میشوند. معیار همگرائی برای جرم، سرعت و انرژی به ترتیب ۲-۱۰، ۲-۱۰ و ۸-۱۰ بود.

شبیه سازی برای هر مدل در اعداد رینول دز مختلف برای هر دو رژیم آرام و آشفته انجام شد. بدین ترتیب در این مقاله، ۱۲ مدل محاسباتی (مدل های ۱، ۱۰، ۱۲ تا ۲۱) مورد بررسی قرار گرفت. برای هر مدل در ۱۶ شدت جریان مختلف، محاسبات انجام شد و نتایج ۱۲۸ 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 ۲۶ هستهی پردازنده، حافظه محاسباتی ۸ گیگابایت، ۲۶ بایتی نیز، به منظور کاهش زمان محاسباتی، در بخشی از کار استفاده شد.

نتايج و بحث

عدد رینولدز و محور عمودی سمت چـپ ضـریب j و محور عمودی سمت است. محور عمودی سمت راست، ضریب f است.

در محدوده اعداد رینولدز کمتر از ۱۵۰۰، جریان سیال آرام و بیشترین مقدار خطای نسبی برای j و f به ترتیب ۱۲ و ۱۰ درصد است. در جریان آشفته با اعداد رینولدز بزرگتر از ۲۵۰۰، حداکثر خطای نسبی برای f رf به ترتیب به ۹ و٦درصد می رسد. در اعداد رینولدز بین ۱۵۰۰ تا ۲۵۰۰ که جریان سیال از حالت آرام به آشفته تبدیل میشود، هر دو مدل آرام و آشفته مـوثر هسـتند. بنابراین مقادیر متوسط حسابی ضرایب j و f حاصل از مدلهای آرام و آشفته محاسبه شد. بیشترین مقدار خطا در این محدوده برای j برابر با ۱۷ و برای f برابر با ۱۰ درصد است. مقدار متوسط خطا برای j و f نیز محاسبه شد، محدوده مقدار متوسط خطا از این مقادیر كمتر است. به طوركلي، مقدار متوسط اختلاف ضرايب j و f محاسبه شده در محدوده جریان آرام و آشفته با نتایج آزمایشگاهی، به ترتیب ۷ و ٤ درصد است.دقت مدلهای محاسباتی توسط سایر محققان نیز در حدود ۱۰ درصد است. بنابراین، رونـد تغییرات نتایج مـدل محاسباتی با مقادیر تجربی موافقت خوبی دارد و نتایج شبیهسازی معتبر است.

بررسی دامنه موج. در شکل (۷)، نتایج شبیه سازی مدل های ۱۷ تا ۲۱ و مدل ۱۰ با طول کانال برابر با ۲۳/۲ میلی متر، ترسیم شده است. این مدل ها دارای دامنه موج از ۰/۰ تا ۳ میلی متر هستند. محور افقی در این شکل، عدد رینول دز است. برای اجتناب از تداخل منحنی ها در منطقه انتقالی، نتایج برای اعداد رینول دز بزرگ تر از ۲۰۰۰ ترسیم شده است. محور عمودی در این شکل ها، ضرایب j و f است. با افزایش عدد رینول دز بر ضریب j بیشتر است و با تغییر عدد رینول دز از ۲۰۰۰ تا ۲۰۰۰، این ضریب در هر مدل، تا ۰.۲ درصد کوچکتر می شود. ضریب f در این محدوده، حدود ۲۰ درصد کاهش می یابد.



در شکل (۸) اثر دامنه موج بر ضرایب j و f در اعـداد شکل دامنه موج بر حسب میلیمتر و محور عمودی هر رينولدز مختلف ترسيم شـدهاسـت. محـور افقـي ايـن يك از اين ضرايب است. با افزايش دامنه موج، هـر دو

www.SID.ir

نیم میلیمتر، هر دو ضریب کوچکتر میشود. مقدار کاهش ضریب j در حدود ۱۵ درصد و مقدار کاهش ضریب f ، ۷۵ درصد است. این نتایج نشان میدهد دامنه موج اثر بیشتری بر تغییرات ضریب f دارد. ضریب j و f بزرگتر میشوند. میزان تغییر ضریب f ، یا شیب منحنی، از دامنه موج دو میلیمتر به بعـد افـزایش مـییابـد. تغییـرات ضـریب j بـا تغییـر دامنـه مـوج، یکنواخت است. با کاهش دامنه موج از سه میلیمتر تـا



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

عملکرد مبدل های حرارتی فشرده با نسبت دو ضریب،j/f، و یا نسبت توانی آنها به شکل(j/f)به نام معیارهای ارزیابی بررسی می شود. چون اثر دامنه موج بر ضرایب j و f متفاوت است، در ایـن مقالـه از شکل دیگری از این معیار استفاده میشود. در این شکل جدید، ضریب j/j₀ بر ضریب f /f₀ تقسیم می شود. پانویس صفر مربوط به ضرایب با دامنه موج اوليه (در اينجا ١/٥ ميلي متر) است. اين معيار به اين سوال ياسخ ميدهد كه آيا تغييرات ايجاد شده در دامنه موج، باعث بهبود عملکرد حرارتی مبدل نسبت به عملکرد هیدرولیکی آن شدهاست؟ روند تغییرات این معیار برای دامنه های مختلف موج برحسب عدد رينولدز در شكل (۹) نمايش داده شدهاست. اين شكل نشان میدهد در تمام محدودهی اعداد رینولدز مورد مطالعه، كاهش دامنه موج باعث بهبود عملكرد 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 می دهد. جهت جریان هوا از سمت راست به چپ و شدت جریانهایا 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

٦1

می شود. 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 می یابد اما میزان انرژی منتقل شده

رنگی در طول کانال مدل ۱۰ و مدل های ۱۷ تــا ۲۱ و

در ارتفاع ۷/۳ میلیمتری از کے کانال ہوا ترسیم

شدهاست. در تمامی این مدلها، هوا با درجه حرارت

۳۰۰/۱۵ کلوین وارد کانال میشود. مقدار درجه

حرارت هوا در خروجی پره در دامنه های موج کوچک تا بزرگ، به ترتیب ۳۲۳، ۲۵۵، ۳۸۸، 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 هندسه ی موجی

شکل کانال، مقدار درجه حرارت هوا افزایش می یابد.

علت اين امر، افزايش شدت اختلاط و ايجاد

جریان های چرخشی است. بدین ترتیب، با افزایش

دامنیهی موج مقدار درجیه حرارت هوا خروجی

افزایش یافته و عملکرد حرارتی مبدل بهبود می یابد.

در شکل (۱۱) تغییرات درجه حرارت با مناطق

میان هوا و جداره کانال بیشتر است.



روابط جدید. دانگ و همکاران دو رابط ه برای ضرایب j و f ارائه کردند. این روابط از نتایج یازده مدل آزمایشگاهی بهدست آمد. در تمام این مدلها، دامنه موج ثابت و ۱/۵ میلیمتر بود. در شکل (۱۲) مقادیر محاسبه شده برای ضرایب j و f در این مقاله و مقادیر محاسبه شده با روابط تجربی دانگ، دردامنه موجهای ۱۰/۰، ۱/۵ و ۲/۵ میلیمتر مقایسه شدهاست. 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 می رسد. بررسیهای انجام شده در این مقاله، نشان می دهد که روابط پیشنهادی آنها نمی تواند اثر دامنه موج را در محاسبه ضرایب j و f لحاظ کند.

شکل روابط جدید برای محاسبه هر یک از ضرایب j وf، به صورت یک رابط ه 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

مربع خطاها، ضرایب و توانهای هر یک از این روابط
به صورت زیر بهدست آمد:
$$j = 0.08398 \text{ Re}^{-0.21222} \left(\frac{F_P}{F_h}\right)^{0.18579}$$
 (۸)
 $\left(\frac{F_P}{2A}\right)^{-0.12368} \left(\frac{L_d}{L}\right)^{-0.42818}$

$$\begin{split} f &= 5.17572 Re^{-0.28457} \left(\frac{F_P}{F_h}\right)^{1.09318} \\ & \left(\frac{F_P}{2A}\right)^{-1.69692} \left(\frac{L_d}{L}\right)^{-0.16001} \end{split}$$

نتایج روابط جدید با داده های آزمایشگاهی موجود برای مدل های ۱، ۲، ۳، ٤، ۷، ۱۰ و ۱۱مقایسه شده و مقدار اختلاف در حدود ده درصد است.

در شکل (۱۳) مقایسهای بین نتایج حاصل از روابط جدید با داده های آزمایشگاهی برای دامنه موج ۱/۵ میلی متر نشان داده شده است. مقدار خطای ضریب j از رابطهی جدید با داده های آزمایشگاهی ٤٪ و همچنین مقدار خطای ضریب f برابر با ۷٪ می باشد. این مقادیر نشان دهنده ی آن است که روابط جدید قادرند با میزان خطای قابل قبولی نتایج تجربی را پیش گویی کنند.



شکل ۱۲ مقایسه مقادیر محاسبه شده برای ضرایب fو j توسط شبیه سازی در این مقاله و توسط روابط دانگ در دامنه های مختلف موج

www.SID.ir

شکل ۱۳ مقایسه ضرایبf و j حاصل از رابطه جدید و مقادیر تجربی دانگ

طوری که، با افزایش عدد رینولدز عملکرد این پره ها نیز بهبود مییابد. افزایش دامنه موجب 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 مییابد.

(mm) گام پره F_h

(mm) طول یره موجدار
$$L_d$$

Р

δ

در این مقاله، اثر تغییرات دامنه موج صفحات مبدل روی ضرایب j و f در شدت جریان های مختلف، بررسی شد. اینکار با شبیهسازی دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) کانال موجی یک مبدل صفحه موجی در سه بعد انجام گرفت. نتایج شبیهسازی با داده های تجربی منتشر شده مقایسه شد. پس از تایید نتایج اولیه، ضرایب j و f در دامنههای موج و اعداد رينولدز مختلف محاسبه شد. با استفاده از نتايج، روابط جدیدی برای ضرایب j و f حاوی دامنه موج ارائه شد. نتایج شبیهسازی نشان دادند که با افزایش عدد رینولدز، ضرایب j و f کاهش می یابند و تغییر این دامنه موج،برضرایبj و f تاثیر دارد. با در نظرگرفتن یک معيار جديد ارزيابي براي عملكرد حرارتي مبدل، شبيه به نسبت اعداد بدون بعد کلبرن به فانینگ (j/f) شاخص ارزیابی سطح پره)، عملکردحرارتی بهتر دریره هایی با دامنه موجکم (۰/۰ و ۱ میلیمتر) درتمام محدودهی اعداد رینولدز مورد مطالعه مشاهده شد. به

سیده الهام حسینی راد- مرتضی خوشوقت علی آبادی- فرامرز هرمزی

پره u سرعت هوای ورودی (m/s) سرعت هوای ورودی (Kg/m.s) پ ویسکوزیته دینامیکی f فریبزیا ضریب f (j/Kg.K) گرمای ویژه در فشار ثابت (J/Kg.K)
 ۲ أرتفاع پره (mm)
 ۴ ضريب اصطکاک فانينگ
 ۲ ضريب کلبرن
 ۵ ضريب کلبرن
 ۲ طول موج پره موجدار (mm)
 ۲ تعداد واحدهای انتقال
 ΔP
 ۱ فشار در جهت جريان (Pa)

Re عدد رینولدز هوا مبنی بر قطر ورودی

مراجع

۱. حسینی راد،س. ۱.، "بررسی اثر نوع سیال بر عملکرد حرارتی-هیدرولیکی مبدل حرارتی تخت-پره موجدار"، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه سمنان ، (۱۳۹۰).

- 2. Naphon,P. "Laminar convective heat transfer and pressure drop in the corrugated channels", Int. commun. Heat Mass Tran.34, pp. 62-71, (2007).
- 3.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).
- 4. 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. 12thInt. Heat Transfer Conf., France, Vol. 4, pp. 417–422, (2002).
- Islamoglu, Y. andParmaksizoglu ,C.,"Numerical investigation of convective heat transfer and pressure drop in a corrugated heat exchanger channe", 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 threedimensional wavy-platefin compact channels: fin density effects", Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 48, pp. 1439–1449, (2005).
- 9. 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).

- 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).
- 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).
- Khoshvaght Aliabadi, M., Gholam Samani, M., Hormozi, F., Haghighi 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).

77