تحلیل گرمایی و هیدرولیکی مبدلهای گرمایی فشرده صفحهای با پرههای موجدار

هانيه قنبر خرقاني نژاد

تهران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات، دانشکده فنی و مهندسی، گروه مهندسی شیمی

محمد رضا جعفری نصر *+ تهران، پژوهشگاه صنعت نفت

چکیده: مقاله حاضر به تحلیل گرمایی و هیدرولیکی مبدلهای گرمایی فشرده ی صفحه ای با پرههای موجدار می پردازد. این بررسی نشان می دهد که چگونه عملکرد یک مبدل گرمایی فشرده به شدت به نوع و پارامترهای هندسی سطوح انتقال گرما وابسته است و می تواند در قالب ضریبهای گرمایی کلبورن و هیدرولیکی فنینگ ارایه شود. به همین رو، ابتدا اثرهای ۴ پارامتر هندسی ارتفاع پره، فاصله بندی بین پره، دامنه و طول موج پرههای موجدار در قالب پارامترهای هندسی بدون بعد (۵ β و ۲) بر روی این ضریبها در بازه گسترده ای از عدد رینولدز در هندسه، دو نوع پره موجدار با دیواره های ناپیوسته ی (افست دار) ۶ و ۲ شکل مورد مطالعه قرار گرفت. نتیجه های این بررسی نشان می دهد که افزایش پارامتر هندسی باون بعد ۵ و کاهش دو پارامتر ۹ و ۲ سبب افزایش در هندسه، دو نوع پره موجدار با دیواره های ناپیوسته ی (افست دار) ۶ و ۲ شکل مورد مطالعه قرار گرفت. ضریبهای کلبورن و اصطکاک فنینگ می شود. همچنین یک شاخص مناسب برای سنجش عملکرد مبدلهای با پرههای موجدار ناپیوسته ی 3 و ۲ شکل در مقایسه با پرههای موجدار پیوسته (بلون افست) ارایه می شود. است می موجدار ناپیوسته می دهد که افزایش پارامتر هندسی به وز بعد ۵ و کاهش دو پارامتر ۹ و ۲ سبب افزایش نیوبهای موجدار ناپیوسته ی 5 و ۲ شکل در مقایسه با پرههای موجدار پیوسته (بلون افست) ارایه می شود. استفاده از این شاخص نشان می دهد، حجم مبدلها با پرههای موجدار ناپیوسته به مرات کمتر از مبدلهای است که از این شاخص نشان می دهد، حجم مبدلها با پرههای موجدار ناپیوسته به مرات کمتر از مبدلهایی است که با پرههای موجدار پیوسته طراحی می شوند.

واژه های سلیدی: مبدل های گرمایی فشرده، تحلیل گرمایی و هیدرولیکی، ضریب کلبورن، ضریب اصطکاک فنینگ، پره های موجدار.

KEY WORDS: Compact heat exchangers, Thermo-hydraulic analysis, Colburn factor, Fanning friction factor, Wavy fins.

مقدمه

که نقش صفحههای تفکیک کننده را بازی میکنند، عبور کرده و تبادل گرما مینمایند. این مبدلها از جنسهای گوناگونی چون آلومینیوم، استنلس استیل، نیکل، مس و... با توجه به فشار و دما مبدلهای گرمایی صفحهای پرهدار نوعی از مبدلهای گرمایی فشرده محسوب می شوند که در آن هاجریان سرد و گرم از میان بلوکی از لایه های متناوب از پره های موجدار و جداکننده های تخت *عبده دار مکاتات

+E-mail: nasrmrj@ripi.ir

عملیاتی ساخته میشوند و به طور گستردهای در صنایع نفت و گاز، اتومبیل و فضایی به کارگرفته میشوند. این مبدلها به دلیل فشردگیشان (یعنی نسبت سطح به حجم بالای انتقال گرما) و عملکرد گرمایی دلخواه منجر به کاهش حجم، وزن، ساختار جانبی و سرانجام نیاز به انرژی و هزینه کمتری میشوند[۱]. سطوح پرهدار یا توسعهیافته به طور گستردهای در مبدلهای گرمایی فشرده برای بهبود انتقال گرما و کاهش اندازه این مبدلها استفاده میشوند. اغلب پرههای اصلاح شده از نظر هندسی افزون بر افزایش دانسیتهی میدهند. هستههای فشردهی بهبود یافته شامل پرههای صاف^(۱)، میدهند. هستههای فشردهی بهبود یافته شامل پرههای صاف^(۱)، موجدار به دلیل سادگی در ساخت، دارای پتانسیل بالاتری برای موجدار به دلیل سادگی در ساخت، دارای پتانسیل بالاتری برای موجدار به دلیل سادگی در ساخت، دارای پتانسیل بالاتری برای موجدار به دلیل سادگی در ساخت، دارای پتانسیل الاتری برای

در زیر، تعدادی از مطالعههای اخیر گزارش شده در مورد بررسیهای عددی و تجربی صورت گرفته روی ضریبهای j و f برای پرههای به کاربرده شده در مبدلهای گرمایی فشرده مرور میشوند. *لندن* و ش*اه*^(ع) (۱۹۶۸ میلادی) عملکرد هستهی پرهی نواری با استفاده از چهار پارامتر هندسی بدون بعد را مورد بررسی قرار دادند که چهار پارامتر هندسی عبارت است از: ضخامت بدون بعد پره (δ^*) ، نسبت تصویر گذرگاه جریان^(۷) (نسبت پهنا به ارتفاع گذرگاه) در یک گام پره (α^*) ، مساحت سطح پره به مساحت سطح کلی در سمت پرهدار (A_f/A) ، طول بدون بعد پره $(\overset{L}{})$. آنها به این δ^* نتیجه رسیدند که با افزایش مقدار پارامترهای هندسی و کاهش * ، ضریبهای j و f افزایش می یابند و $A_{\mathrm{f}}/\mathrm{A}$ ، $lpha^{*}$ به دلیل شعاع هیدرولیکی کوچک این نوع پرهها، مشخصهی بدون بعد زبری به مقدار زیادی روی ضریب اصطکاک فنینگ اثر می گذارد[۳]. یکی از مشکلهای بهدست آوردن ضریبهای j و f برحسب عدد رینولدز به روش عددی، اثرهای ورودی در داخل پره است. به منظور غلبه بر این مشکل، پاتانکار و همکاران^(۸) (۱۹۷۷ میلادی)

مفهوم انتقال گرما و جریان به طور کامل توسعهیافته تناوبی را مطرح کردند. مفهوم اصولی و اساسی این بود که برای یک جریان با ویژگیهای ثابت در یک مجرا با سطح مقطع ثابت، توزیع دما و سرعت در فاصلهی کافی از ورودی مستقل از مختصات جریان شوند [۴]. *لندن* و *شاه* (۱۹۷۸ میلادی) نتیجههای تحلیلی جریان آرام به صورت عدد ناسلت و ضریب اصطکاک فنینگ بر حسب عدد رینولدز را برای نسبتهای گوناگون طول به عرض لولههای هوا با شکل مستطیلی گزارش کردند[۵].

کیز و لندن^(۹) (۱۹۸۴ میلادی) با استفاده از هوا به عنوان سیال عامل از پیشگامان در ارایهی دادههای پرههای موجی بودند. آنها تنها سه نوع از پرههای موجی را مورد آزمایش قرار دادند. بعد از این گزارش، پژوهش بسیار کمی در سطح کامل آزمایشگاهی انجام شد[۶]. گاف و آل _ شمیری^(۱۰) (۱۹۹۴ میلادی) سه نوع آرایش گوناگون از پرههای موجی را داخل یک تونل بادی آزمایش کردند که در آن، هندسههای پرههای آزمایش شده با پرههای کیز و *لندن* همانند بودند [۲].

cĉ(iz) و همکاران^(۱۱) (۱۹۹۸ میلادی) شبیهسازی عددی و تجربی برای بهدست آوردن رابطهای برای ضریبهای j و f انجام دادند و اختلافهای بین کار تجربی و عددی را مشخص کردند. آنها نتیجه گرفتند که فرض دوبعدی و نادیده گرفتن اثرهای ورودی و خروجی ممکن است به این اختلافها کمک کرده باشد. همچنین نشان دادند که در بازهی عددهای رینولدز کم، ضریب کلبورن تخمین زده شده به واسطهی کار عددی به مقدار دو برابر از کار تجربی بزرگتر است، در حالی که در بازهی عددهای رینولدز بالا، از کار تجربی بزرگتر است، در حالی که در بازهی عددهای رینولدز بالا، از کار تجربی بزرگتر است، در حالی که در بازهی عددهای رینولدز بالا، ای تخمین ضریب کلبورن از حل عددی با دقت $1.1 \pm$ امکان پذیر است[۸].

شی و شاه^(۱۱) (۱۹۹۹ میلادی) محاسبههای عددی سهبعدی و دوبعدی برای پرههای نواری خارج از محور را در دو رژیم جریان آرام و گذرا برای بررسی اختلافهای پین دادههای تجربی و عددی انجام دادند و نتیجههای عددی آنها به جز ناحیههای دارای رینولدز بالا، با نتیجههای تجربی همبستگی خوبی داشت[۹].

⁽V) Aspect Ratio of Flow Passage

⁽A) Patankar et al.

⁽٩) Kays & London

^(1.) Gough & Al-Shemmeri

⁽¹¹⁾ DoJong et al.

⁽¹⁷⁾ Xi & Shah

⁽¹⁾ Plain Fins

⁽Y) Wavy Fins

^(*) Perforated Fins

⁽۴) Offset Strip Fins

⁽d) Louvered Fins

^(%) London & Shah

ژانگ و ه*مکاران*^(۱) (۲۰۰۴ میلادی) انتقال گرما و جریان آرام هوا (Pr = ٠/٧) را به طور تناوبی توسعه یافته در داخل کانال های صفحه ای موجدار سینوسی برای درجه گرمای یکنواخت دیواره مدل کردند. نتیجههای عددی را برای بازهی گستردهای از رژیم جریان آرام و انواع گوناگون هندسهی مجرا ($\Lambda_{\rm w} \leq 1/\lambda_{\rm w} \leq 1/\lambda_{\rm w}$ و کارایی کردند. آنها نتیجه گرفتند که بیشترین کارایی $(\cdot, 1 \le S/TA \le T)$ با داشتن هندسه با مشخصهی ۲/۱≤S/۲A≤۱ بهدست میآید[۲]. مت*والی و منگلیک*^(۲) (۲۰۰۴ میلادی) رامحل های عددی را برای انتقال گرمای جابهجایی اجباری با ویژگیهای ثابت و به صورت تناوبی توسعهیافته، تکفازی و تراکمنایذیر در رژیم جریان آرام داخل کانالهای صفحهای موجدار سینوسی برای دیوارههای کانالی که در گرمای یکنواخت نگه داشته شدند، بهدست آوردند. آنها دیدند که گردابههای عرضی در ناحیههای کمینه موج سینوسی تولید می شود و این چرخش با افزایش مقدارهای Pr، Re، ۲۸/۸_w رشد می کند. همچنین مشخص کردند که عملکرد بهینه پره (j/f) برای این نوع کانالها در بازهی $\mathcal{F}_{\rm w} \leq \mathcal{F}_{\rm w}$ در بازهی $\mathcal{F}_{\rm w} \leq \mathcal{F}_{\rm w}$ در بازهی

منگلیک و همکاران^(۳) (۲۰۰۵ میلادی) مفهوم کاملی را از رفتار انتقال گرمای جابهجایی اجباری در درون کانالهای صفحهای با پرهی موجدار فراهم کردند و اثر دانسیته پره در ناحیه عدد رینولدز پایین و حالت یکنواخت را برای جریان هوا (۲۰۰–۲) بررسی کردند. آنها دیدند که سطح موجدار، جریان ثانویه را در ناحیههای کمینه موج تولید میکند و فضای پوشش داده شده توسط این جریان ثانویه با افزایش عدد رینولدز و پارامتر هندسی ۲۲۸ افزایش مییابد. همچنین نتیجه گرفتند که عملکرد گرمایی با شرط مرزی شار گرمایی ثابت نسبت به شرط مرزی دمای دیواره ثابت بالاتر است [۱۱]. گرمایی– هیدرولیکی مبدلهای گرمایی لولهای تخت با پرهی موجدار در ۱۱ مدل گوناگون را بررسی کردند. آنها اثرهای تمام پارامترهای در ۱۱ مدل گوناگون را بررسی کردند. آنها اثرهای تمام پارامترهای مندسی به جز دامنهی موج را مورد مطالعه قرار دادند و رابطههایی برای ضریب کلبورن و ضریب اصطکاک فنینگ ارایه کردند[۲۲]. *شیخ اسماعیل*

(11) Huzayyin

و ۱۸ پرهی موجدار را برای بهدست آوردن رابطهای برای ضریبهای j و ۱۸ و مورد مطالعه قرار دادند[۱]. *شیخ اسماعیل* و همکار*ان*⁽³⁾ (شیخ /سماعیل و همکار*ان*⁽³⁾ فشردهی صفحهای پرهدار را برای تعیین اثرهای توزیع بد جریان فشردهی صفحهای پرهدار را برای تعیین اثرهای توزیع بد جریان در ورودی هسته برای بهبود در توزیع جریان طراحی کردند. آنها تابت کردند که غیریکنواختی جریان به دلیل به کار گرفتن صفحههای بافل مناسب برای و را برای تعدادی از بافل مناسب برای قرار دادن مابت کردند. آنها تابت کردند که غیریکنواختی جریان به دلیل به کار گرفتن صفحههای بافل مناسب زای و محکار*ان* (۱۰۶ میلادی) بافل به شدت کاهش می یابد. همچنین آنها دادههای j و ۲۰۱۰ میلادی) بافل به شدت کاهش می یابد. همچنین آنها دادههای j و ۲۰۱۰ میلادی) بود بریان چرخشی سیال در اعداد رینولدز پایین را در کانالهای حمدهای باین زاد در کانالهای معدهای با استفاده از روش اندازه گیری سرعتسنجی دوپلری لیزری^(۸) (LVD) مورد بررسی قرار دادند و اثرهای دو پارامتر هندسی کا۲۲ و ۲۰۲۸ را مشخص کردند. آنها دادهای دو پارامتر هندسی کردند.

خوشوقت و *همکاران*^(۹) (۲۰۱۱ میلادی) شبیهسازی دینامیک سیالهای محاسباتی به صورت سهبعدی و مدل شبکهی عصبی را برای تخمین ضریبهای j و f برای مبدلهای لولهای تخت پرهدار در محدودهی Re ≤۷۰۰۰ انجام دادند. آن ها رابطههای جدیدی برای تخمین مقدارهای ضریبهای j و f به ترتیب با انحراف نسبی میانگین مطلق ۳/۲۲ و ۳/۶۸ درصد پیشنهاد کردند[۱۵]. تائو و همکاران^(۱۰) (۲۰۱۱ میلادی) مطالعههای عددی به صورت سهبعدی برای بررسی عملکرد میدلهای گرمایی لولهای با پرهی موجدار را انجام دادند. آنها اثرهای پارامترهای هندسی بر روی ویژگیهای جریان سیال و انتقال گرما را در طرف هوا بررسی کردند. آنها نتیجه گرفتند که افزایش عدد رینولدز، ضخامت، زاویهی پرهی موجدار و کاهش گام عرضی لوله عملکرد انتقال گرما را بهبود می بخشد. اما افتفشار را نیز افزایش میدهد. همچنین بهتر است که زاویهی موجی بین ۱۰ تا ۲۰ درجه و گام پره بین mm ۱/۲ و mm ۲ قرار گیرد [۱۶]. *هوزین^(۱۱)* (۲۰۱۱) پرههای ذوزنقهای و پرههای موجدار S شکل و C شکل به صورت دو بعدی و عددی بررسی کرد[۱۷].

⁽V) Vyas et al.

⁽A) Laser Doppler Velocimetry

⁽٩) Khoshvaght et al.

^(1.) Tao et al.

⁽¹⁾ Zhang et al.

⁽Y) Metwally & Manglik

⁽*****) Manglik et al.

⁽۴) Junqi et al.

⁽d) Sheik Ismail & Velraj

⁽ $\boldsymbol{\hat{\gamma}}$) Sheik Ismail et al.

جعفری نصر و سعیدان (۱۳۸۷) به منظور محاسبه ی سطح انتقال گرمای بهینه تر برای مبدل های گرمایی قاب و صفحه ای از رویه ی طراحی سریع^(۱) استفاده کردند که استفاده از این روش نقش عمده ای در کاهش هزینه های سرمایه گذاری داشته است. همچنین توزیع دمایی را در این مبدل ها مورد بررسی قرار دادند و تغییرهای دما را در صفحه های متفاوت مبدل و نیز تغییرها در طول هر صفحه آن را تعیین کردند [۱۸].

بر پایهی بررسیهای صورت گرفته در این مقالهها ، مبدل های گرمایی صفحه ای پرهدار با پره موجدار نیازمند به مطالعه بیشتری برای توسعهی مدل تئوری معتبر میباشند. همچنین مطالعه های بسیار کمی بر روی اصلاح هندسه این نوع پرهها برای بهبود عملکرد گرمایی و هیدرولیکی صورت گرفته است. از این رو، این مقاله به تحلیل مبدل گرمایی صفحهای پرهدار که دارای پرهی موجدار سینوسی است، می پردازد. تحلیل گرمایی و هیدرولیکی برای یک مبدل گرمایی فشرده به شدت به عملکرد سطوح انتقال گرما وابسته است که به صورت ضریبهای کلبورن و اصطکاک فنینگ بر حسب عدد رینولدز بیان می شوند. در این مطالعه ابتدا اثر ۴ پارامتر هندسی ارتفاع پره، فاصلهبندی بین پره، دامنه و طول موج پرههای موجدار سینوسی در قالب پارامترهای f و j هندسی بدون بعد (α) و β و (γ) روی ضریبهای j در بازهی گستردهای از عدد رینولدز (۱۵۰۰≤Re≤۱) ا تحليل شد. سپس به منظور بهبود هندسهي اين نوع پرهها و افزایش انتقال گرما، دو پرهی موجدار سینوسی با دیوارههای ناپیوسته (افستدار) C شکل و S شکل مورد مطالعه قرار گرفت. برای دو پرهی موجدار C شکل و S شکل نیز اثر پارامترهای هندسی روی ضریبهای j و f مورد بررسی قرار گرفت و برای انجام این تحلیل، هر یک از پرهها ۱۸ بار با ابعاد هندسی گوناگون رسم شدند. مطالعههای بسیار کمی با این ابعاد هندسی گوناگون روی پرههای موجدار صورت گرفته است. پرههای موجدار C شکل و S شکل در حقیقت ترکیب دو پرهی موجدار و پره با دیوارههای ناپیوسته و کوتاهتر هستند که عملکرد گرمایی بهتری را ایجاد مینمایند و با استفاده از یک شاخص مناسب بهبود عملکرد این دو پرهی موجدار ناپیوسته نسبت به پرهی موجدار پیوسته نشان داده می شود. برای انجام این تحلیل، از هوا به عنوان سیال عامل استفاده شد. جریان هوا هم در رژیم جریان آرام و هم در رژیم آشفته تحت شرایط دمای ثابت دیوارهی پره (Tw

مورد بررسی قرار گرفت. با بررسی این مقالهها روشن است که مدل سازی رژیم جریان آشفته در داخل پرههای موجدار بسیار کم مورد مطالعه قرار گرفته است که در این مقاله هم برای پره موجدار سینوسی با دیوارههای پیوسته و هم دو نوع پره موجدار با دیوارههای ناپیوسته C شکل و S شکل به طور کامل مورد مطالعه قرار گرفت. خطهای جریان و چگونگی توزیع دما برای هر سه پره به طور کامل تحلیل شد. شبیه سازی دینامیک سیالهای محاسباتی به صورت سه بعدی توسط نرمافزار انسیس فلوئنت ویرایش ۱۵ برای انجام این مدل سازی استفاده شد.

شبیه سازی عددی ناحیه محاسباتی

مبدل گرمایی مورد مطالعه، مبدل گرمایی صفحهای پرهدار با پرههای موجدار سینوسی پیوسته و پرههای موجدار سینوسی ناپیوسته S شکل و C شکل میباشد. پرههای موجدار با دیوارههای ناپیوسته S شکل و C شکل دو نمونهی بهبودیافته از پرههای موجدار با دیوارههای پیوسته هستند.

این دو شکل از پرههای ناپیوسته، انتقال گرما را به واسطهی به هم زدن جریان و ایجاد اختلاط اضافی افزایش میدهند و همچنین با شکستن پیوسته و پشتسر هم لایه مرزی گرمایی، میانگین بالاتری از ضریب انتقال گرمای سطح را ایجاد میکنند. پرهی ۲ شکل در نقطههای بیشینه و کمینه و پرهی ۲ شکل در نقطههای عطف، منقطع می شود. به منظور تحلیل گرمایی و هیدرولیکی این سه نوع پره، هر یک از آنها به میزان یک تناوب برش داده می شوند.

شکلهای ۱، ۲ و ۳ ویژگیهای هندسی پرهها را نمایش میدهند که هر سه پره دارای ارتفاع H، فاصلهبندی بین پره S، طول موج تناوبی L_p و دامنه ی A هستند که اثر این پارامترها روی ضریبهای j و f در قالب پارامترهای هندسی بدون بعد (موی ضریبهای j و f در قالب پارامترهای هندسی می شوند. برای بررسی این اثر، هر کدام از پرههای موجدار با دیوارههای پیوسته و بارسی این اثر، هر کدام از پرههای موجدار با دیوارههای پیوسته و ناپیوسته، ۱۸ بار جداگانه کشیده و مش زده می شوند. پارامترهای هندسی بدون بعد برای این ۱۸ هندسه در جدول ۱ آورده شده است. هندسی اندازههای هندسی از مرجع [۱] استخراج شده است. در ۶ هندسه ی اول (پرههای شماره ی ۱ تا ۶) به منظور بررسی اثر α روی ضریبهای j و f، β و γ ثابت نگه داشته می شوند، در ۶ هندسه ی دوم (پرههای شماره ۲ تا ۲۲) برای بررسی اثر

(1) Rapid Design Algorithm

	ارامترهای هندسی بدون بعد	پا	قطر هیدرولیکی (mm)	سطح پرہ	شماره پره
$\gamma = L/\Upsilon A$	β=۲A/s	α=H/s			
۵	١/٣٠٠	۲۰/۸۳۳	۲/۲۹۰۰۸	TOW-TI	١
۵	١/٣٠٠	۱۵/۳۸۵	7/44121	۲۰W-۲۰	٢
۵	١/٣٠٠	۱۰/۷۱۴	2/22+91	۱۵W-۱۸	٣
۵	١/٣٠٠	۶/۶۲۰	۲/۶۰۸۷۰	۱•W-۱۷	۴
۵	١/٣٠٠	۳/۱۲۵	7/47474	۵W-۱۶	۵
۵	١/٣٠٠	١/١٧۶	1/87784	۲w-۱۵	۶
۵	۲/۶۰۰))	1/24	۹/۲۴W–۳۰	٧
۵	۲/۱۰۰))	1/ЛТТТ	11W-70	٨
۵	۱/۳۵۰))	४/۴९९९۴	۱۵W-۱۸	٩
۵	•/٩۴۴))	٣/٣٠٠٠	۱۹/۸W-۱۴	١٠
۵	۰/۷۵۰))	r/8889	77W-18))
۵	•/۶٣۶))	٣/٩٩٩٩٧	74W-17	١٢
٧/۶٩٣	١/٣٠٠))	7/18884	18W-61	١٣
۶/۵۰۰	١/٣٠٠))	۲/ ۳ ۸ ۳۳۳	۱۴/۳W-۲۰	14
۵/۴۹۰	١/٣٠٠))	2/08881	۱۵/۴W-۱۸	۱۵
۴/۳۲۷	١/٣٠٠))	۲/۷۵۰۰۰	<i>۱۶/۵</i> W-۱۲	١۶
۴/۱۰۳	١/٣٠٠))	7/9888	۱۷/۶W-۱۶	١٧
٣/٨۴۶	۱/۳۰۰))	r/11884	۱۸/۲w–۱۵	۱۸

جدول ۱_ پارامترهای هندسی بدون بعد پرههای موجدار.



شکل ۱_ پره موجدار. الف) تصویر دوبعدی، ب) تصویر سه بعدی و ج) ناحیه محاسباتی.



شکل ۲_ پرهی c شکل. الف)تصویر سهبعدی، ب) تصویر دوبعدی، ج)دامنهی محاسباتی.

β, β و γ ثابت نگه داشته و در ۶ هندسه آخر (پرههای شماره ۱۳ تا ۱۸) برای بررسی اثر γ, β و β ثابت نگه داشته می شوند. رسم هندسه و عمل مش زنی در نرم افزار ICEM CFD 15.0 انجام شده است.

ملاحظات مشبندي

در این بخش برای انجام مشربندی سه بعدی از مش با ساختار از نوع شش وجهی استفاده شده است. به دلیل وجود گرادیان بالا در جهت Y و ارتقای کیفیت مشربندی، مش کنار دیواره در جهت Y ریز می شود. شکل ۴ آزمون استقلال از شبکه را برای پرهی شمارهی ۱ در ۴۰۰= Re نمایش می دهد. این نمودار بین تعداد سلول ها و پارامتر عملکردی افت فشار رسم می شود. کمترین تعداد سلول های مورد نیاز برای نتیجه های ثابت ۲۲۸۳۸۹ شبکه می باشد. بنابراین این تحلیل با ۲۲۸۳۸۹ سلول انجام می شود.





شکل ۳ـ پرهی s شکل. الف)تصویر سهبعدی، ب) تصویر دوبعدی، ج)دامنهی محاسباتی.

معادلههای حاکم

همان گونه که گفته شد، نرم افزار CFD، انسیس فلوئنت ۱۵، برای این شبیهسازی به کار گرفته شد. جریان هوا به صورت یکنواخت، بهطور کامل توسعهیافته تناوبی، تراکم ناپذیر و با ویژگیهای ثابت در نظر گرفته شد.

رژیم جریان قبل از عدد رینولدز ناحیهی گذار، آرام (۲۰۰۸ $\geq Re \geq 10$) و بعد از عدد رینولدز ناحیهی گذار، آشفته (۲۰۰۰ $\geq Re \geq 1000$) و بعد از عدد رینولدز ناحیهی گذار، آشفته مومنتوم و انرژی با استفاده از روش حجم محدود حل میشوند. در این مطالعه، معیار همگرایی برای معادلههای جرم و مومنتوم کمتر از ^{۲–} ۱۰ در نظر گرفته شد. برای پیش بینی جریان آشفته داخل هندسهی پره از مدل k-٤

٨٢

$$u\frac{\partial T}{\partial x} + v\frac{\partial T}{\partial y} + w\frac{\partial T}{\partial z} = (\frac{k}{\rho.c_p}).(\frac{\partial^{\mathsf{r}}T}{\partial x^{\mathsf{r}}} + \frac{\partial^{\mathsf{r}}T}{\partial y^{\mathsf{r}}} + \frac{\partial^{\mathsf{r}}T}{\partial z^{\mathsf{r}}}) \qquad (\Delta)$$

در معادلههای بالا، ρ دانسیته، μ گرانروی، p فشار، k ضریب هدایت گرمایی، T دما، Cp ظرفیت گرمایی و همچنین به ترتیب u، v و w سرعت جریان در راستای x، y و z می باشند. معادلهی انرژی جنبشی آشفتگی در جریان یکنواخت به صورت زیر نوشته می شود:

$$\frac{\partial(\rho u \varepsilon)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v \varepsilon)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w \varepsilon)}{\partial z} =$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\mu_{t}}{\sigma_{\varepsilon}} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\mu_{t}}{\sigma_{\varepsilon}} \frac{\partial \varepsilon}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\mu_{t}}{\sigma_{\varepsilon}} \frac{\partial \varepsilon}{\partial z}\right) +$$

$$C_{v \varepsilon} \mu_{t} \frac{\varepsilon}{k'} \phi - C_{v \varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^{v}}{k'}$$

$$(Y)$$

 σ_{ϵ} و σ_{k} , $C_{\gamma\epsilon}$, $C_{\lambda\epsilon}$, C_{μ} و σ_{ϵ} و σ_{ϵ} , σ_{k} , $\sigma_{\gamma\epsilon}$, $\sigma_{\lambda\epsilon}$, σ_{μ} در نرم افزار فلوئنت به ترتیب دارای مقدارهای پیش فرض ۲/۰۹، ۱/۴۴، ۱/۹۲، ۱، ۱/۳۲ هستند که در این مدل سازی از این مقدارهای پیش فرض استفاده می شود. همچنین برای حل معادلات، تمامی دقتها از مرتبه ی دوم در نظر گرفته می شود و به منظور کوپل کردن فشار و سرعت از الگوریتم SIMPLE استفاده می شود.

شرايط مرزي

برای تحلیل جریان داخل پرههای موجدار با دیوارههای پیوسته، مطابق شکل ۵ به منظور غلبه بر اثرهای ورودی، مفهوم جریان به طور کامل توسعه یافتهی تناوبی که پیشنهاد شده به واسطهی پ*اتانکار* و همکار*ان*^(۱) [۴] در ورودی و خروجی به کار برده می شود. همچنین استفاده از این شرط مرزی در ورودی و خروجی، امکان مدلسازی چند دوره تنها با مدل کردن یک دوره فراهم می کند. همان گونه که در شکل دیده می شود،

(1) Patankar et al.

شکل ۴ ـ نمودار استقلال از شبکه برای پره شمارهی ۱.

مدل
$$k$$
-8 استاندارد یک مدل نیمه تجربی است و معادلههای آن
بر اساس مشاهدههای تجربی و ملاحظههای پدیدهشناختی به وجود
آمدهاند. k و ³ به ترتیب انرژی جنبشی آشفتگی و نرخ از بین رفتن
آشفتگی میباشند[۱۹].
معادلههای بقا در مختصات دکارتی به صورت زیر بیان
معادله ی بیوستگی:
معادله ی پیوستگی:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0$$
(1)

معادلهي مومنتوم:

معادلهی مومنتوم در راستای X :

$$\rho(\mathbf{u}\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial \mathbf{x}} + \mathbf{v}\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial \mathbf{y}} + \mathbf{w}\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial \mathbf{z}}) = -\frac{\partial \mathbf{p}}{\partial \mathbf{x}} + \mu(\frac{\partial^{\mathsf{r}}\mathbf{u}}{\partial \mathbf{x}^{\mathsf{r}}} + \frac{\partial^{\mathsf{r}}\mathbf{u}}{\partial \mathbf{y}^{\mathsf{r}}} + \frac{\partial^{\mathsf{r}}\mathbf{u}}{\partial \mathbf{z}^{\mathsf{r}}}) \quad (\mathsf{Y})$$

معادلهی مومنتوم در راستای y:

$$\rho(u\frac{\partial v}{\partial x} + v\frac{\partial v}{\partial y} + w\frac{\partial v}{\partial z}) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \mu(\frac{\partial^{\mathsf{v}} v}{\partial x^{\mathsf{v}}} + \frac{\partial^{\mathsf{v}} v}{\partial y^{\mathsf{v}}} + \frac{\partial^{\mathsf{v}} v}{\partial z^{\mathsf{v}}}) \quad (\texttt{V})$$

معادلهی مومنتوم در راستای Z :

$$\rho(\mathbf{u}\frac{\partial \mathbf{w}}{\partial \mathbf{x}} + \mathbf{v}\frac{\partial \mathbf{w}}{\partial \mathbf{y}} + \mathbf{w}\frac{\partial \mathbf{w}}{\partial \mathbf{z}}) =$$

$$-\frac{\partial \mathbf{p}}{\partial \mathbf{z}} + \mu(\frac{\partial^{\mathsf{v}}\mathbf{w}}{\partial \mathbf{x}^{\mathsf{v}}} + \frac{\partial^{\mathsf{v}}\mathbf{w}}{\partial \mathbf{y}^{\mathsf{v}}} + \frac{\partial^{\mathsf{v}}\mathbf{w}}{\partial \mathbf{z}^{\mathsf{v}}})$$

$$\operatorname{aulcho} iii(co):$$



شکل ۵ ـ دامنه محاسباتی و شرایط مرزی پره موجدار با دیوارههای پیوسته برای تحلیل جریان.

برای سطحهای جلویی و پشتی از شرط مرزی تقارن استفاده می شود. زمانی که هندسه فیزیکی و الگوی جریان سیال و دما دارای تقارن آینهای باشند، این شرط مرزی اعمال می شود. برای سطحهای بالا و پایین، شرط مرزی دیوار بدون لغزش اعمال می شود. خروجیهای این تحلیل افت فشار و نیمرخ سرعت^(۱) میباشند که با استفاده از معادلهی (۱۰) ارایه شده در بخش بعدی، ضریب اصطکاک از افت فشار بهدست آمده در این مرحله محاسبه شد. همچنین نیمرخ سرعت بهدست آمده به عنوان ورودی برای تحلیل گرمایی استفاده شد. همین روند برای بازهی اعداد رینولدز از ۱۰۰ تا ۱۵۰۰۰ تکرار شد. مدل جریان آرام برای محدودهی اعداد رینولدز ۱۰۰ تا ۸۰۰ استفاده شد و مدل جریان آشفته برای محدودهی اعداد رینولدز ۱۰۰۰ تا ۱۵۰۰۰ مورد استفاده قرار گرفت. این تحلیل برای تمام ۱۸ پرهی موجدار دیگر تکرار شده است. در تحلیل گرمایی، شرط مرزی ورودی سرعت (بهدست آمده از تحلیل جریان) و شرط مرزی خروجی فشار به ترتیب در ورودی و خروجی هندسهی پره استفاده شدند. مقدارهای سرعت برای هر پره وابسته به عدد رینولدز است که در این مقاله، عدد رینولدز از ۱۰۰ تا ۱۵۰۰۰ تغییر یافته و دمای جریان برگشتی ۳۰۵/۱۵K در نظر گرفته شد. در تحلیل گرمایی همانند تحلیل جریان، برای سطحهای جلویی و پشتی شرط مرزی تقارن به کار برده شد و برای سطحهای بالایی و پایینی، شرط مرزی دیوار با دمای ثابت اعمال شد. خروجی این تحلیل دمای خروجی میباشد که با استفاده از میانگین گیری جرمی بهدست می آید. ضریب j با استفاده از معادلهی (۱۱) و دمای خروجی بهدست آمده از این تحلیل،

محاسبه می شود. این رویه برای بازه ی اعداد رینولدز از ۱۰۰ تا ۱۵۰۰۰ تکرار شد. برای دو پره موجدار با دیواره های ناپیوسته ۶ شکل و C شکل هم مانند پره موجدار پیوسته، ابتدا تحلیل جریان و سپس تحلیل گرمایی انجام شد. در تحلیل جریان، مطابق شکل ۶ برای سطحهای ورودی و خروجی شرط مرزی تناوبی استفاده شد. در حالی که برای تحلیل گرمایی برای سطح ورودی از شرط مرزی ورودی سرعت و برای سطح خروجی ز شرط مرزی خروجی فشار استفاده شد. برای دیواره های پره شرط مرزی نبود لغزش همراه با دمای دیواره ی ثابت به کاربرده شد. برای سطوح بالایی و پایینی جایی که دیواره وجود ندارد، شرط مرزی تناوبی اعمال و همچنین، برای سطوح جلویی و پشتی از شرط مرزی تقارن استفاده شد.

تعريف پارامترها

پارامترهای به کار گرفته شده در این مطالعه به صورت زیر تعریف می شوند:

$$Re = \frac{\rho u d_h}{\mu} \tag{A}$$

 μ در معادلهی بالا u سرعت ورودی هوا، ρ دانسیتهی هوا، μ گرانروی هوا و d_h قطر هیدرولیکی است که قطر هیدورلیکی برای یک پره موجدار در حالت سهبعدی به صورت زیر تعریف می شود:

$$d_{h} = \frac{\mathbf{f}A_{c}}{p} = \frac{\mathbf{f}(s.H)}{\mathbf{f}(s+H)} = \frac{\mathbf{f}sH}{s+H}$$
(9)

(1) Velocity Profile



شکل ۶ ـ دامنه محاسباتی و شرایط مرزی پرههای موجدار با دیوارههای ناپیوسته برای تحلیل جریان. الف)S شکل، ب)C شکل.

ضریب اصطکاک فنینگ (f) مبنی بر نیروی برشی معادل در جریان به ازای مساحت سطح انتقال گرما واحد به واسطهی معادلهی زیر تعریف می شود:

$$f = \frac{1}{\gamma} \Delta P \cdot \frac{d_{h}}{\rho_{air} v^{\gamma}}$$
 (1.)

و ضریب کلبورن بدون بعد (j) با معادلهی زیر ارایه می شود:

$$j = St \times Pr^{\tau/\tau} = \frac{d_h}{r} ln(\frac{T_{i-}T_w}{T_o - T_w}) Pr^{\tau/\tau}$$
(11)

در معادلهی بالا، T_o , T_i , T_v و T_o , T_i دمای ورودی هوا، دمای خروجی هوا و دمای دیوارهی پره بوده و St، عدد استانتون است که به صورت زیر محاسبه می شود:

$$St = \frac{Nu}{Re.Pr} = \frac{h}{C_{p}.u.\rho}$$
(17)

اگر معادلهی (۱۲) جایگزین قسمت اول معادلهی (۱۱) شود، آنگاه معادلهی j به صورت زیر نوشته می شود:

$$j = \frac{h}{C_{p}.u.\rho}.Pr^{r/r}$$
 (17)

همان گونه که از معادلهی (۱۳) دیده می شود، ضریب j و ضریب انتقال گرما (h) دارای رابطهی مستقیم هستند، یعنی پرههایی که دارای مقدارهای j بیشتری هستند، ضریب انتقال گرمای بالاتری را ایجاد میکنند و ضریب انتقال گرما توسط معادلهی زیر محاسبه می شود:

علمی _ پژوهشی

$$h = \frac{Q}{\eta_{o} \cdot A \cdot \Delta T_{LMTD}}$$
(14)

در معادله ی بالا A مساحت سطح، η_o بازدهی سطح و ΔT_{LMTD} اختلاف درجه گرمای متوسط لگاریتمی است و اختلاف درجه گرمای متوسط لگاریتمی از معادله ی زیر بهدست می آید:

$$\Delta T_{LMTD} = \frac{(T_i - T_w) - (T_o - T_w)}{\ln(\frac{T_i - T_w}{T_o - T_w})}$$
(10)

نتیجهها و بحث اعتبارسنجی نرمافزار CFD استفاده شده

به منظور اعتبارسنجی نرم افزار CFD (فلوئنت) مورد استفاده در تحلیل حاضر، یکی از پرههای موجدار *کیز و لندن* با شمارهی سطح $\frac{7}{N} - \frac{7}{N}$ C در نظر گرفته می شود و ضریبهای j و f این پره با استفاده از نرمافزار فلوئنت به دست آورده می شود و سپس با مقدارهای تجربی j و f به دست آمده توسط *کیز و لندن* [۶] مقایسه می شوند. روش مدل سازی و شرایط مرزی اعمال شده برای این پره برای به دست آوردن ضریبهای j و f همانند پرههای تحلیل شده در این مطالعه می باشند که در بخشهای پیشین توضیح داده شده است. همان گونه که شکل ۷ نشان می دهد، نتیجههای به دست آمده از حل عددی برای تمامی نقطهها ضریبهای f با نتیجههای تجربی دارای تطابق خوبی می باشند. Re=۱۰۰۰ و Re=۵۰۰ و داده دارد.



شکل ۷_ مقایسهی دادههای تجربی بهدست آمده توسط ک*یز و لندن* با دادههای CFD بهدست آمده از این مطالعه برای پره موجدار با شماره سطح W - ^۳ ۸۱/۴۴ الف)ضریب j، ب)ضریب f.

دلیل خطای بیش تر در دو نقطه ی یاد شده می تواند به دلیل اختلاف بین دو هندسه ی پره ی موجدار مدل سازی شده در این مقاله و پره موجی کیز و لندن باشد. هندسه ی پره موجی مدل سازی شده در این مقاله به طور کامل سینوسی در نظر گرفته شده است در حالی در مورد هندسه ی پره ی کیز و لندن سینوسی بودن آن در مرجع [۶] ذکر نشده است.

اثر پارامترهای هندسی بدون بعد روی ضریبهای j و f

در این قسمت، بررسی اثر پارامترهای هندسی بدون بعد $\beta = TA/s$ ($\alpha = H/s$ و $\beta = TA/s$ ($\alpha = H/s$) پرهی موجدار پیوسته و سپس برای پرههای موجدار ناپیوسته S شکل و C شکل به طور جداگانه انجام می شود.

اثر پارامتر هندسی بدون بعد نسبت ارتفاع به فاصلهبندی پرهی موجدار پیوسته (۵)

به منظور بررسی اثر پارامتر هندسی نسبت ارتفاع به فاصلهبندی پره (α =H/s) روی ضریبهای j و f شش هندسه (پرههای شمارهی ۱ تا ۶ در جدول ۱) در نظر گرفته شده است که این شش هندسه دارای مقدارهای یکسان ۲/۳= β و $\beta = \gamma$ هستند و α در محدودهی ۲۰/۸۳۳ $\geq 1/1$ تغییر می کند.

lpha شکل ۸ تغییر ضریبهای f و j با پارامتر هندسی بدون بعد lpha برای اعداد رینولدز گوناگون را نمایش میدهد. همانگونه که

دیده می شود، پره با بالاترین مقدار α ، بیشترین مقدارها برای ضریبهای اصطکاک و کلبورن سرتاسر محدودهی عدد رینولدز بررسی شده را نتیجه می دهد. با افزایش پارامتر α یا به عبارت دیگر با افزایش ارتفاع، مساحت سطح انتقال گرما افزایش می یابد که این مطلب منجر به انتقال گرما بیشتر و در نتیجه مقدارهای بالاتر ضریب کلبورن می شود.

شکل ۹ تفاوت خطهای جریان بین دو پره ۱ و ۶ نشان می دهد که هر کدام از پرهها به ترتیب دارای $\pi - 1/18$ و $\alpha = 1/108$ هستند. همان گونه که از این شکل دیده می شود، ناحیههای چرخش سیال برای پره شماره ۱ در نزدیکی ناحیههای بیشینه و کمینه ظاهر می شود. این نواحی چرخش سیال، سرعت جریان را کاهش می دهند. سرعت در پره شماره ی ۶ بیشتر می باشد. جریان را کاهش می دهند. سرعت در پره شماره ی ۶ بیشتر می باشد. در این مطلب می تواند دلیلی برای کاهش ناحیه های چرخش سیال در پره شماره ی ۱ مقدارهای بیشتری را دارا می باشند، مشخص می شود که نواحی چرخش سیال بیشتر افت فشار و نرخ انتقال گرما افزایش می دهند.

اثر پارامتر هندسی بدون بعد نسبت دامنه به فاصلهبندی پره موجدار پیوسته(β)

جهت بررسی اثر پارامتر هندسی نسبت دامنه به فاصلهبندی جهت بررسی اثر پارامتر هندس
ی ($\beta = TA/s$) روی ضریبهای j و f

8٨



شکل ۸ ـ اثر پارامتر هندسی بدون بعد α برای پرهی موجدار پیوسته. الف) روی ضریب j، ب) روی ضریب f.



شکل ۹_ خطوط جریان در سطح مقطع (H/۲) برای پره موجدار پیوسته. الف) پره ۱، ب) پره ۶ .

(پرههای شمارهی ۷ تا ۱۲ در جدول ۱) در نظر گرفته شده است که این شش هندسه دارای مقدارهای یکسان $\alpha = 11$ و $\alpha = \gamma$ هستند و β در محدوده ی ۲/۶ $\geq \beta \geq 778$ تغییر داده می شود.

شکل ۱۰ وابستگی ضریبهای f و j را به پارامتر هندسی بدون بعد β نشان میدهد.

از این نمودارها، تشخیص داده می شود که با کاهش پارامتر β، ضریبهای j و f افزایش می یابند.

با کاهش پارامتر β، فاصلهبندی بین پرهها یعنی S افزایش مییابد که افزایش فاصلهبندی بین پرهها رشد جریان گردابی را در ناحیههای کمینه پره موجدار ترویج میکند و جریان گردابی فضای بیشتری از هسته را میچرخاند، در نتیجه انتقال مومنتوم و اختلاط جریان افزایش مییابند که این پدیده باعث افزایش ضریبهای j و f میشود.

هنگامی که فاصله ی بین صفحه ها کاهش می یابد، اثرهای ویسکوز مانع از تشکیل جریان چرخشی می شوند و جریان با خطهای مستقیم غالب می شوند. درنتیجه، انتقال گرما و مومنتوم کاهش می یابند. شکل ۱۱ خطوط جریان برای دو پره شماره ی ۷ و ۱۲ نشان می دهد. پرههای ۷ و ۱۲ به ترتیب دارای مقدارهای و ۲/۶ نشان می دهد. پرههای ۷ و ۱۲ به ترتیب دارای مقدارهای دیده می شود، در پره ۱۲ که دارای β کمتری می باشد، جریان گردابی فضای بیشتری از هسته را پوشانده است.

اثر پارامتر هندسی بدون بعد نسبت طول موج به دامنهی پره موجدار پیوسته (γ)

برای بررسی اثر پارامتر هندسی نسبت طول موج به دامنه
ی پره برای بررسی اثر پارامتر هندسی قبلی، (
 $\gamma=L/TA$)



.f شکل ۱۰ – اثر پارامتر هندسی بدون بعد eta برای پرهی موجدار پیوسته. الف) ضریب j، ب)ضریب f.



شکل ۱۱_ خطهای جریان در سطح مقطع (H/۲) برای پره موجدار پیوسته در ۲۰۰=Re، الف) پره ۷، ب) پره ۱۲.

شش هندسه (پرههای شمارهی ۱۳ تا ۱۸ در جدول ۱) در نظر گرفته شده است که این شش هندسه دارای مقدارهای یکسان $\alpha=11$ و $\alpha=1/F$ هستند و γ در محدودهی $\gamma=\gamma/Fq \geq \gamma \geq \gamma/Fq$ تغییر داده می شود. شکل ۱۲ تغییر ضریبهای f و f با تغییر پارامتر هندسی بدون بعد γ نشان می دهد.

ضریبهای j و f با کاهش γ در محدودهی تعریف شده برای عدد رینولدز افزایش مییابند.

با کاهش طول موج یا افزایش دامنه یپره مقدار پارامتر γ کاهش می یابد که کاهش پارامتر γ شدت حالت موجی و مساحت جانبی تحت پوشش جریان چرخشی افزایش می دهد. بنابراین ضریب اصطکاک افزایش می یابد. همراه با توسعه ی چرخش سیال در ناحیههای کمینه پره موجدار، لایه ناز کی از لایه مرزی وجود دارد و این میدان جریان نواحی اختلاط گرمایی نشان می دهد.

این مطلب منجر به انتقال گرما بیشتر می شود. خطهای جریان برای پرههای شمارهی ۱۳ و ۱۸ که به ترتیب دارای بیشترین و کمترین مقدارهای γ هستند، در شکل ۱۳ نشان داده می شود. همان گونه که از این شکل دیده می شود، در پره ۱۸ ناحیههای چرخش سیال نسبت به پره ۱۳ بسیار بیشتر است.

اثر پارمترهای هندسی بدونبعد β،α و γ برای پرههای موجدار ناپیوسته

شکلهای ۱۴ تا ۱۶ اثر پارمترهای هندسی بدون بعد α، β و γ روی ضریبهای j و f برای پرههای موجدار ناپیوستهی S شکل و شکلهای ۱۷ تا ۱۹ این اثر را برای پرههای موجدار ناپیوستهی C شکل نشان میدهند. اثر این پارامترها روی ضریبهای j و f برای هر دو پرهی موجدار ناپیوسته مانند پره موجدار پیوسته است.

علمی _ پژوهشی

٨٨



شکل ۱۲_ اثر پارامتر هندسی بدون بعد γ برای پرهی موجدار پیوسته. الف) روی ضریبj ، ب) روی ضریب f.



شکل ۱۳_ خطهای جریان در سطح مقطع (H/۲) برای پرهی موجدار پیوسته در ۲۰۰=Re. الف) پره ۱۳، ب) پره ۱۸.



شکل ۱۴ ـ اثر پارامتر هندسی بدون بعد α برای پره موجدار ناپیوستهی S شکل. الف)روی ضریب j ، ب)روی ضریب f.



شکل 1۵_ اثر پارامتر هندسی بدون بعد β برای پره موجدار ناپیوستهی S شکل. الف) روی ضریب j ، ب) روی ضریب f.





به عبارت دیگر با افزایش پارامتر هندسی α و کاهش دو پارامتر β و γ ضریبهای j و f افزایش مییابند.

مقایسهی مقدارهای j و f بین دو رژیم آرام و آشفته برای پره موجدار پیوسته

شکل ۲۰ اثر عدد رینولدز را روی ضریبهای f و j نشان میدهد. همانگونه که دیده میشود، با افزایش عدد رینولدز مقدارهای دو ضریب j و f کاهش مییابد و مقدارهای آنها

در رژیم جریان آرام نسبت به رژیم آشفته بیشتر است. برای پره ۱۲، خطهای جریان در شکل ۲۱ برای دو مقدار رینولدز ۵۰۰ (رژیم آرام) و ۵۰۰۰ (رژیم آشفته) نشان شده است. از این شکل دیده می شود که در ۹۵۰–Re، ناحیههای چرخش سیال و بی ثباتی لایه مرزی در مقایسه ی با چرخش سیال و بی ثباتی لایه مرزی در مقایسه ی با مقدارهای ز و f در رژیم جریان آشفته نسبت به جریان آرام باشد.



شکل ۱۷_ اثر پارامتر هندسی بدون بعد α برای پره موجدار ناپیوستهی C شکل. الف) روی ضریب j ، ب) روی ضریب f.



شکل ۱۸_ اثر پارامتر هندسی بدون بعد eta برای پره موجدار ناپیوستهی C شکل. الف) روی ضریب j ، ب) روی ضریب f.

بررسی خطهای مسیر برای پرههای موجدار ناپیوسته

شکلهای ۲۲ و ۲۳ خطوط جریان به ترتیب داخل پرههای ناپیوستهی S شکل و C شکل برای پره شمارهی ۱۲ (Δ=γ، β=۰/۶۳۶ در دو رژیم جریان آرام و آشفته نمایش میدهند.

همانگونه که از شکل ۲۲ دیده می شود، در رژیم جریان آرام، داخل پره ناپیوستهی S شکل زمانی که عدد رینولدز افزایش مییابد، ناحیههای چرخش سیال و درهم ریختگی تشدید می شود.

علمی _ پژوهشی

درحالی که در رژیم جریان آشفته، این نواحی چرخش سیال با افزایش عدد رینولدز کاهش مییابد. همچنین داخل کانالهای S شکل، ناحیههای چرخش سیال و در هم ریختگی لایه مرزی نسبت به کانالهای C شکل متناظر بیشتر است.

به طور کلی اختلاط جریان و در هم ریختگی لایه مرزی و خطهای جریان شکسته داخل این پرههای موجدار ناپیوسته نسبت به پرههای موجدار پیوسته بیشتر هستند. این مطلب، یکی از دلیلهای اصلی بهبود عملکرد به واسطهی این طراحی جدید است.



شکل ۱۹_ اثر پارامتر هندسی بدون بعد γ برای پره موجدار ناپیوستهی C شکل. الف) روی ضریب j ، ب) روی ضریب f.



شکل ۲۰_ مقایسهی مقادیر j و f در دو رژیم آرام و أشفته برای پره موجدار پیوسته.

شکلهای ۲۴ تا ۲۶ اثر پارامترهای هندسی بدون بعد α , β و شکلهای ۲۴ تا ۲۶ اثر پارامترهای هندسی بدون بعد β و γ را بر روی خطهای جریان و توزیع دما در عدد رینولدز (Re=A۰۰) داخل کانالهای S شکل و شکلهای ۲۲ تا ۲۹ این اثر را برای پرههای C شکل نشان میدهند. از این شکلها دیده میشود که کاهش مقدارهای پارامترهای هندسی β و γ و افزایش پارامتر α اختلاط جریان و ناحیههای چرخش سیال بهویژه برای کانالهای S شکل افزایش میدهد که این افزایش مقدارهای خانال می مدهد که این از ان ان از این میال بهویژه برای کانالهای S شکل و کلبورن را بالا می برد. هر دو کانال مقدارهای نیوسته به علت داشتن ضریب انتقال گرما بالاتر نسبت به کانالهای پیوسته متمایز هستند. از این شکلها همچنین دیده می شود

که پرههای ۶ ۷ و ۱۳ پایین ترین اختلاط گرمایی هسته در مقایسه با موارد دیگر دارند که این مطلب منجر به ضریبهای انتقال گرما پایین تر آن ها می شود.

مقایسه توزیع دما و جریان بین پرههای موجدار پیوسته و ناپیوسته

در شکل ۳۰، مقایسهی توزیع جریان و دما داخل یک پرهی موجدار با دیوارههای پیوسته و دو پرهی موجدار با دیوارههای ناپیوسته S شکل و C شکل با ابعاد یکسان (پره شماره ۱۲ با پارامترهای هندسی $\alpha=\gamma$ ، $\beta=\gamma/\delta$ ($\alpha=11$ م هندسی (Re=۵۰۰) نشان داده می شود.

97



شکل ۲۱_ خطهای جریان در سطح مقطع (H/۲) برای پره موجدار پیوستهی شمارهی ۱۲. الف) Re=۵۰۰۰، ب) Re=۵۰۰۰.



شکل ۲۲_ خطهای جریان برای پره S شکل ناپیوستهی شمارهی ۱۲ در مقدارهای گوناگون عدد رینولدز. الف)رژیم جریان آرام، ب)رژیم جریان آشفته.



شکل ۲۳_ خطهای جریان برای پره C شکل ناپیوستهی شمارهی ۱۲ در مقدارهای گوناگون عدد رینولدز. الف)رژیم جریان آرام، ب)رژیم جریان آشفته.

بررسی تغییرهای جریان و دما به ترتیب به واسطه ی خطهای جریان و چگونگی توزیع دما نشان داده می شود. همان گونه که در شکل دیده می شود، بازههای جدایی به یک اندازه از هم گسیخته و به یکدیگر نزدیک می شوند. به عبارت دیگر با یک الگو منتقل می شوند که همچنین بر روی توزیع دما منعکس می شود. در قسمت میانی پرههای موجدار با دیوارههای ناپیوسته، گذرگاه جریان به واسطه ی برش ایجاد شده منقطع می شود که این مطلب پیشین اختلاط سیال را بالا می برد و دمای سیال یکنواخت تر می سازد. این اختلاط تقویت شده به واسطه ی از هم گسیختن لایه مرزی، انتقال گرما را بهبود می بخشد.

اما اثرهای گوناگونی روی ضریب اصطکاک میگذارند. در مورد این اثرها در بخش بعدی بحث خواهد شد.

مقایسه ضریبهای j و f بین کانالهای موجدار با دیوارههای پیوسته و ناپیوسته

در این بخش، ضریبهای j و f پرههای موجدار ناپیوسته و پیوسته مقایسه می شوند. پرههای ۱، ۱۱، ۱۷ و ۱۸ که ویژگیهای هندسی شان در جدول ۱ درج شده است، برای این مقایسه انتخاب شدند. شکل ۳۱ مقایسه ی ضریبهای j بین پرههای موجدار ناپیوسته و پیوسته برای پرههای ۱، ۱۱، ۱۷ و ۱۸ نشان می دهد. از این شکلها دیده می شود که پرههای موجدار با دیوارههای ناپیوستهی C شکل



شکل ۲۴_ خطهای جریان و توزیع دما در سطح مقطع (H/۲) برای پره موجدار ناپیوستهی S شکل در Re=۸۰۰. الف) پره ۱، ب) پره ۶.



شکل ۲۵_ خطهای جریان و توزیع دما در سطح مقطع (H/۲) برای پره ناپیوستهی S شکل در ۸۰۰-Re. الف)پره ۷، ب)پره ۱۲.



شکل ۲۶_ خطهای جریان و توزیع دما در سطح مقطع (H/۲) برای پره ناپیوستهی S شکل در Re=۸۰۰. الف)پره۱۳، ب)پره ۱۸.



شکل ۲۷_ خطهای جریان و توزیع دما در سطح مقطع (H/۲) برای پره ناپیوستهی C شکل در Re=۸۰۰. الف)پره ۱، ب)پره ۶.

٩۶



شکل ۲۸_ خطهای جریان و توزیع دما در سطح مقطع (H/۲) برای پره ناپیوستهی C شکل در Re=۸۰۰. الف)پره ۷، ب)پره ۱۲.



شکل ۲۹_ خطهای جریان و توزیع دما در سطح مقطع (H/۲) برای پره ناپیوستهی C شکل در ۸۰۰ =Re. الف)پره ۱۳، ب)پره ۱۸.



شکل ۳۰- مقایسهی توزیع دما و خطهای جریان بین پرههای موجدار ناپیوسته و پیوسته در سطح مقطع (H/۲) برای پره شمارهی ۱۲.

و S شکل دارای ضریبهای j بیشتری نسبت به پرههای موجدار پیوسته هستند. از آنجایی که ضریب j دارای رابطه مستقیم با ضریب انتقال گرما می باشد، در نتیجه پرههای موجدار ناپیوسته انتقال گرمای بیشتری را فراهم می کنند.

دلیل افزایش انتقال گرما در پرههای موجدار ناپیوسته، شکست خطهای جریان در ابتدای پره میباشد که این شکست جریان اختلاط سیال را بالا میبرد و دمای سیال را یکنواخت تر میسازد. این مطلب به روشنی در شکل ۳۰ نمایش داده میشود. همچنین پرههای C شکل دارای ضریبهای J شکل از نظر ضریب J دارای شکل میباشند. در نتیجه پرههای C شکل از نظر ضریب J دارای

عملکردی بهتری میباشند. شکل ۳۲ مقایسهی ضریبهای f بین پرههای موجدار ناپیوسته و پیوسته نشان میدهد. در این شکل دیده میشود که پرههای S شکل دارای ضریبهای f بیشتری نسبت به پرههای موجدار پیوسته و کانالهای C شکل میباشند. افزایش ضریب f در پرههای S شکل، به دلیل شکست خطهای جریان و جریانهای گردابی است که در این هندسه تشکیل میشوند. داخل پرههای موجدار پیوسته به دلیل وجود خطوط مستقیم بیشتر، ضریب f نسبت به پرههای S شکل کمتر هستند. در پرههای ضریب f نسبت به دو پره دیگر میشود. شکلهای خطهای جریان ضریبهای f نسبت به دو پره دیگر میشود. شکلهای خطهای جریان



شکل ۳۱_ مقایسه ضرایب j کانال موجدار سینوسی پیوسته و دو پره ناپیوستهی S شکل و C شکل. الف) برای پره شماره ۱، ب)برای پره شماره ۱۱، ج)برای پره شماره۱۷، د)برای پره شماره ۱۸.

در قسمت پیشین این مطالب را تأیید میکنند. پرههای C شکلی که دارای اندازههای هندسی پرههای ۱۱، ۱۷ و ۱۸ هستند، دارای ضریبهای f بسیار کمتری نسبت به دو پره موجدار پیوسته و C شکل میباشند. اما در حالتی پره C شکل دارای ابعاد هندسی پره ۱ است، ضریبهای f به میزان کمتری کاهش مییابند. این مطلب به این دلیل است که زمانی که پرههای موجدار پیوسته و S شکل دارای اندازه پرههای ۱۱، ۱۷ و ۱۸ هستند، ناحیههای چرخش سیال نسبت به پرههای C شکل بسیار شدیدتر است. در حالی که در پرههای موجدار پیوسته و S شکل دارندهی اندازههای پره ۱، ناحیههای چرخش سیال بسیار کوچکتر است.

علمی _ پژوهشی

با توجه به این مطالب، کاهش ضریب اصطکاک در پرههای ناپیوستهی C شکل باعث بهبود چشمگیری در عملکرد این پره می شود.

مقایسه عملکرد پرههای موجدار ناپیوسته و پیوسته از نظر شاخص عملکرد حجم

یک هدف منطقی در طراحی مبدل گرمایی فشرده تولید کوچک ترین واحدی (از نظر وزن و حجم و در محدوده اندازههای مورد نظر هسته) است که نیاز گرمایی را در محدوده افت فشار مشخص شده تأمین کند. حجمهای کوچکتر مبدل با به کار بردن سطحهایی که عملکرد بالایی را ارایه می دهند، امکان پذیر می باشد.



شکل ۳۲_ مقایسه ضرایب f کانال موجدار سینوسی پیوسته و دو پره ناپیوستهی S شکل و C شکل. الف)برای پره شماره ۱، ب)برای پره شماره ۱۱، ج)برای پره شماره ۱۷، د)برای شماره ۱۸.

در این قسمت عملکرد پرههای موجدار ناپیوسته و پیوسته از نظر شاخص عملکرد حجم (VPI) مقایسه می شود و مانند بخش پیشین، پرههای ۱، ۱۱، ۱۷ و ۱۸ که ویژگیهای هندسی شان در جدول ۱ درج شده است، برای این مقایسه انتخاب شدند. هر چقدر VPI بزرگتر باشد حجم مبدل کوچکتر است که از معادلهی زیر محاسبه می شود.

$$VPI = \frac{\left(\frac{St^{\vee}}{f}\right)^{\frac{1}{\vee}}}{d_{h}}$$
(15)

شکل ۳۳ نشان میدهند که پرههای موجدار ناپیوستهی C و S شکل دارای VPI بیشتری نسبت به پرههای موجدار پیوسته

هستند که در نتیجه حجم کمتری اشغال میکنند و عملکرد بهتری را دارند. همچنین پرههای ناپیوستهی C شکل، دارای VPI بالاتری نسبت به پرههای S شکل هستند که این مطلب نشان میدهد، پرههای C شکل از نظر شاخص عملکرد حجم نسبت به پرههای S شکل بهتر عمل میکنند.

نتيجهگيري

در این مطالعه، شبیه سازی CFD برای مبدل گرمایی صفحه ای پرهدار با پرهی موجدار در بازهی گسترده ای از عدد رینولدز

علمی _ پژوهشی

1++



شکل ۳۳_ مقایسه عملکرد پرههای موجدار ناپیوسته و پیوسته از نظر شاخص عملکرد حجم. الف)برای پره شماره ۱، ب)برای پره شماره ۱۱،ج)برای پره شماره ۱۷، د) برای پره شماره ۱۸.

(۱۵۰۰۰ $\geq R \geq 10$) انجام شده است که هوا به عنوان سیال عامل در نظر گرفته می شود. جریان هوا به طور کامل توسعهیافته تناوبی فرض می شود و شرط مرزی دمای ثابت دیوار اعمال می شود. اثر ۴ پارامتر هندسی ارتفاع پره، فاصلهبندی بین پره، دامنه و طول موج پرههای موجدار در قالب پارامترهای هندسی بدون بعد ($\alpha \ e \ g \ e_\gamma$) روی ضریبهای j و f بررسی شد. همچنین به منظور بهبود هندسهی این نوع پرهها و افزایش انتقال گرما، دو پره موجدار سینوسی ناپیوستهی C شکل و S شکل مطالعه شدند. نتیجههای به دست آمده از این بررسیها به صورت زیر می باشند:

علمی _ پژوهشی

• برای پره موجدار پیوسته، اثر تغییر α سرتاسر بازهی $\gamma = 0$ و $\beta = 1/7$ در مقدارهای ثابت $\gamma = 0$ و $\beta = 1/7$ و $\beta = 5/7/4$ بررسی و دیده شد که افزایش α سبب افزایش مقدارهای j و f می شود. همچنین اثر تغییر $\beta = 1/7 = 0$ و اثر تغییر γ سرتاسر می شود. همچنین اثر تغییر $\beta = 1/7 = 0$ و اثر تغییر γ سرتاس محدودهی ثابت $1 = \alpha$ و 1/7 = 0 و اثر تغییر γ سرتاس معدارهای ثابت $1 = \alpha$ و 1 = 0 و اثر تغییر γ سرتاس می شود. همچنین اثر تغییر $\beta = 1/7$ و 1/7 = 0 و اثر تغییر γ سرتاس محدودهی 1 = 0 و 1/7 = 0 و اثر تغییر 1 = 0 و 1/7 = 0 و اثر تغییر 1 = 0 و 1/7 = 0 و اثر تغییر 1 = 0 و 1 = 0 e

برای پرههای موجدار پیوسته بررسی میشوند. اثر این پارامترها روی ضریبها j و f برای هر دو پره موجدار ناپیوسته مانند پرهی موجدار پیوسته میباشند. به عبارت دیگر با افزایش α و کاهش دو پارمتر β و γ ضریبها j و f افزایش مییابند.

 از مطالعه اثر پارامترهای هندسی، دیده می شود که توسعه جریان گردابی عرضی، نقش مهمی را در افزایش انتقال گرما و مومنتوم بازی می کند.

برش دادن و کوتاه کردن طول دیوارهی پرههای موجدار
 به طور چشمگیری ضریب انتقال گرما را بهبود میبخشد.
 همچنین برش دادن دیوارهی پره اختلاط گرمایی و تخریب
 پیوسته لایههای مرزی گرمایی و جریان افزایش میدهد.

 پرههای موجدار ناپیوستهی C شکل و S شکل با پرهی موجدار پیوسته از نظر شاخص عملکرد حجم مقایسه می شوند. این مقایسه نشان میدهد که پرههای موجدار ناپیوسته دارای VPI بیشتری می باشند و در نتیجه حجم کمتری نسبت به پرههای پیوسته در طراحی اشغال می کنند.

L _p	طول موج پره موجدار، m
Pr	عدد پرانتل
ΔP	افت فشار، Pa/m
Re	عدد رینولدز
S	فاصلهبندی بین پره، m
St	عدد استانتون
T _i	دمای هوای ورودی، K
To	دمای هوای خروجی، K
T_w	دمای دیوارهی پره، K
ΔT_{LMTD}	اختلاف درجه گرمایی متوسط لگاریتمی، K
v	سرعت جریان، m/s
U	$rac{W}{\mathrm{m}^{r}\mathrm{K}}$ ضریب انتقال گرمای کلی،
V	حجم مبدل، ^m
VPI	شاخص عملكرد حجم
\mathbf{Y}^+	فاصلهی بدون بعد از دیواره، $\sqrt{ au_{ m w}}/ heta$

حروف يوناني

α	نسبت ارتفاع به فاصلهبندی پره، h/s	۲A
β	نسبت دامنه به فاصلهبندی پره، ۲A/s	C
γ	نسبت طول موج به دامنهی پره، Lp/TA	Cp
μ	گرانروی، kg/ms	d_h
ρ	دانسیته، kg/m ^۳	f
κ	انرژی جنبشی آشفتگی، m ^۲ /s ^v	h
3	نرخ از بین رفتن آشفتگی، m ^۳ /s ^۳	н
		i

تاريخ دريافت : ۱۳۹۳٬۸/۱۸ ؛ تاريخ پذيرش : ۱۳۹۴٬۳/۱۸

نمادها

دو برابر دامنهی پره موجدار، m
ظرفیت گرمایی سیال، J kgK
قطر هيدروليكي، m
ضریب اصطکاک فنینگ
ضریب انتقال گرما، <mark>W</mark> m [×] K
ارتفاع پره موجدار، m
ضريب گرمايي كلبورن
$rac{W}{m^{^{\intercal}}K}$ ضریب هدایت گرمایی،

مراجع

 [1] Sheik Ismail L., Velraj R., Studies on Fanning Friction (f) and Colburn (j) Factors of Offset and Wavy Fins Compact Plate Fin Heat Exchanger-A CFD Approach, *Numerical Heat Transfer*, *Part A: Applications*, 56(12): 987-1005 (2009).

k

[2] Zhang J., Kundu J., Manglik R.M., Effect of Fin Waviness and Spacing on Lateral Vortex Structure and Laminar Heat Transfer in Wavy-Plate-Fin Cores, *International Journal of Heat* and Mass Transfer, 47(8): 1719-1730 (2004).

علمی _ پژوهشی

1+1

- [3] London A.L., Shah R.K., Offset Rectangular Plate-Fin Surfaces–Heat Transfer and Flow Friction Characteristics, *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, **90**(3): 218–228 (1968).
- [4] Patankar S.V., Liu C.H., Sparrow E.M., Fully Developed Flow and Heat Transfer in Ducts Having Streamwise-Periodic Variations of Cross- Sectional Area, *Journal of Heat Transfer*, 99(2): 180-186 (1977).
- [5] Shah R.K., London A.L., "Laminar Flow Forced Convection in Ducts: A Source Book for Compact Heat Exchanger Analytical Data", Supplement 1 to Advances in Heat Transfer, Academic Press, New York (1978).
- [6] Kays W.M., London A.L., "Compact Heat Exchangers", McGraw Hill (1984).
- [7] Gough R.J., Al-Shemmeri T.T., Thermal and Friction Factor Data for Three Packed Block Construction Wavy Fin Surfaces, *Journal of Power and Energy*, 208(3): 225-229 (1994).
- [8] DeJong N.C., Zhang L.W., Jacobi A.M., Balachandar S., Tafti D.K., A Complementary Experimental and Numerical Study of the Flow and Heat Transfer in Offset Strip-Fin Heat Exchangers, *Journal of Heat Transfer*, **120**(3): 690–698 (1998).
- [9] Xi G., Shah R.K., Numerical Analysis of Offset Strip Fin Heat Transfer and Flow Friction Characteristics, In "Proc. Int. Conf. Computational Heat and Mass Transfer", Eastern Mediterranean University Printinghouse Gazimagusa, Cyprus, pp. 75-87 (1999).
- [10] Metwally H.M., Manglik R.M., Enhanced Heat Transfer due to Curvature-Induced Lateral Vortices in Laminar Flows in Sinusoidal Corrugated-Plate Channels, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 47(10): 2283-2292 (2004).
- [11] Manglik R.M., Zhang J., Muley A., Low Reynolds Number Forced Convection in Three-Dimensional Wavy-Plate-Fin: Fin Density Effects, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 48(8): 1439-1449 (2005).
- [12] Junqi D., Jiangping C., Zhijiu C., Yimin Z., Wenfeng Z., Heat Transfer and Pressure Drop Correlations for the Wavy Fin and Flat Tube Heat Exchangers, *Applied Thermal Engineering*, 27(11): 2066-2073 (2007).
- [13] Sheik Ismail L., Ranganayakulu C., Shah R.K., Numerical Study of Flow Patterns of Compact Plate-Fin Heat Exchangers and Generation of Design Data for Offset and Wavy Fins, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, **52**(17): 3972-3983 (2009).
- [14] Vyas S., Manglik R.M., Jog M.A., Visualization and Characterization of a Lateral Swirl Flow Structure in Sinusoidal Corrugated-Plate Channels, *Journal of Flow Visualization and Image Processing*, 17(4): 281–296 (2010).
- [15] Khoshvaght Aliabadi M., Gholam Samani M., Hormozi F., Haghighi Asl A., 3D-CFD Simulation and Neural Network Model for the j and f Factors of the Wavy Fin-and-Flat Tube Heat Exchangers, *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, 28(3): 505-520 (2011).
- [16] Tao Y., He Y., Qu Z., Tao W., Numerical Study on Performance and Fin Efficiency of Wavy Fin-and-Tube Heat Exchangers, *Progress in Computational Fluid Dynamics, an International Journal*, 11(3): 246-254 (2011).

[17] Huzayyin O.A., "Computational Modeling of Convective Heat Transfer in Compact and Enhanced Heat Exchangers", Doctoral dissertation, University of Cincinnati, (2011).

[۱۸] جعفرینصر، محمدرضا؛ سعیدان، مهسا؛ طراحی بهینه و مدلسازی مبدلهای حرارتی قاب و صفحهای، نشریه شیمی مهندسی شیمی ایران، (۴) ۲۷: ۲۹ تا ۹۲ (۱۳۸۷).

[19] Cen Z.L., Zhao J.G., Shen B.X., A Comparative Study of Omega RSM and RNG k–ε Model for the Numerical Simulation of a Hydrocyclone, *Iranian Journal of Chemistry and Chemical Engineering (IJCCE)*, **33**(3): 53-61 (2014).

[20] FLUENT User's Guide, Fluent Incorporated Lebanon, NH, USA. (2004).

