

تحلیل گرمایی و هیدرولیکی مبدل‌های گرمایی فشرده صفحه‌ای با پره‌های موج‌دار

هانیه قنبر خرقانی 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 فشرده‌ی صفحه‌ای با پره‌های موج‌دار می‌پردازد. این بررسی نشان می‌دهد که چگونه عملکرد یک مبدل گرمایی فشرده به شدت به نوع و پارامترهای هندسی سطوح انتقال گرما وابسته است و می‌تواند در قالب ضریب‌های گرمایی کلبرن و هیدرولیکی فنینگ ارایه شود. به همین رو، ابتدا اثرهای ۴ پارامتر هندسی ارتفاع پره، فاصله‌بندی بین پره، دامنه و طول موج پره‌های موج‌دار در قالب پارامترهای هندسی بدون بعد (α ، β و γ) بر روی این ضریب‌ها در بازه گسترده‌ای از عدد رینولدز ($100 \leq Re \leq 15000$) بررسی شد. سپس به منظور افزایش انتقال گرما و با هدف بهبود بازده مبدل به واسطه‌ی تغییر در هندسه، دو نوع پره موج‌دار با دیواره‌های ناپیوسته‌ی (افست‌دار) S و C شکل مورد مطالعه قرار گرفت. نتیجه‌های این بررسی نشان می‌دهد که افزایش پارامتر هندسی بدون بعد α و کاهش دو پارامتر β و γ سبب افزایش ضریب‌های کلبرن و اصطکاک فنینگ می‌شود. همچنین یک شاخص مناسب برای سنجش عملکرد مبدل‌های با پره‌های موج‌دار ناپیوسته‌ی S و C شکل در مقایسه با پره‌های موج‌دار پیوسته (بدون افست) ارایه می‌شود. استفاده از این شاخص نشان می‌دهد، حجم مبدل‌ها با پره‌های موج‌دار ناپیوسته به مراتب کمتر از مبدل‌هایی است که با پره‌های موج‌دار پیوسته طراحی می‌شوند.

واژه‌های کلیدی: مبدل‌های گرمایی فشرده، تحلیل گرمایی و هیدرولیکی، ضریب کلبرن، ضریب اصطکاک فنینگ، پره‌های 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 می‌شوند که در آن‌ها جریان سرد و گرم از میان بلوکی از لایه‌های متناوب از پره‌های موج‌دار و جداکننده‌های تخت

*عقدار مکتوبات

+E-mail: nasrmrj@ripi.ir

علمی - پژوهشی

مفهوم انتقال گرما و جریان به طور کامل توسعه یافته 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 فینینگ 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 [۷].

دژانگ و همکاران^(۱۱) (۱۹۹۸ میلادی) شبیه‌سازی عددی و تجربی برای به دست آوردن رابطه‌ای برای ضریب‌های f و z 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، تخمین ضریب کلبورن از حل عددی با دقت $\pm 10\%$ امکان‌پذیر است [۸].

شی و شاه^(۱۲) (۱۹۹۹ میلادی) محاسبه‌های عددی سه‌بعدی و دوبعدی برای پره‌های نواری خارج از محور را در دو رژیم جریان آرام و گذرا برای بررسی اختلاف‌های بین داده‌های تجربی و عددی انجام دادند و نتیجه‌های عددی آن‌ها به جز ناحیه‌های دارای رینولدز بالا، با نتیجه‌های تجربی همبستگی خوبی داشت [۹].

عملیاتی ساخته می‌شوند و به طور گسترده‌ای در صنایع نفت و گاز، اتومبیل و فضایی به کار گرفته 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 توسعه یافته 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 مساحت سطح مبدل، ضریب انتقال گرمای جابه‌جایی را نیز افزایش می‌دهند. هسته‌های فشرده‌ی بهبود یافته شامل پره‌های صاف^(۱)، پره‌های موج‌دار^(۲)، پره‌های سوراخ‌دار^(۳)، پره‌های نواری خارج از محور^(۴) و پره‌های کنگره‌ای^(۵) هستند. از میان این پره‌ها، پره‌های موج‌دار به دلیل سادگی در ساخت، دارای پتانسیل بالاتری برای بهبود عملکرد گرمایی - هیدرولیکی و به دلیل سادگی به کارگیری دارای جذابیت ویژه‌ای می‌باشند [۲].

در زیر، تعدادی از مطالعه‌های اخیر گزارش شده در مورد بررسی‌های عددی و تجربی صورت گرفته روی ضریب‌های f و z برای پره‌های به کار برده شده در مبدل‌های گرمایی فشرده مرور می‌شوند. لندن و شاه^(۶) (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 (L^*) . آن‌ها به این نتیجه رسیدند که با افزایش مقدار پارامترهای هندسی δ^* ، α^* ، A_f/A و کاهش L^* ، ضریب‌های f و z افزایش می‌یابند و به دلیل شعاع هیدرولیکی کوچک این نوع پره‌ها، مشخصه‌ی بدون بعد زبری به مقدار زیادی روی ضریب اصطکاک فینینگ اثر می‌گذارد [۳]. یکی از مشکل‌های به دست آوردن ضریب‌های f و z بر حسب عدد رینولدز به روش عددی، اثرهای ورودی در داخل پره است. به منظور غلبه بر این مشکل، پاتانکار و همکاران^(۸) (۱۹۷۷ میلادی)

(۱) Plain Fins

(۲) Wavy Fins

(۳) Perforated Fins

(۴) Offset Strip Fins

(۵) Louvered Fins

(۶) London & Shah

(۷) Aspect Ratio of Flow Passage

(۸) Patankar et al.

(۹) Kays & London

(۱۰) Gough & Al-Shemmeri

(۱۱) DoJong et al.

(۱۲) Xi & Shah

و ۱۸ پرهی موج‌دار را برای به‌دست آوردن رابطه‌ای برای ضریب‌های f و z مورد مطالعه قرار دادند [۱]. شیخ اسماعیل و همکاران^(۶) (۲۰۰۹ میلادی) با استفاده از نرم‌افزار CFD دو نوع مبدل گرمایی فشرده‌ی صفحه‌ای پره‌دار را برای تعیین اثرهای توزیع بد جریان تحلیل کردند. همچنین صفحه‌های بافل مناسب برای قرار دادن در ورودی هسته برای بهبود در توزیع جریان طراحی کردند. آن‌ها ثابت کردند که غیریکنواختی جریان به دلیل به کار گرفتن صفحه‌های بافل به شدت کاهش می‌یابد. همچنین آن‌ها داده‌های f و z را برای تعدادی از پره‌ها گزارش کردند [۱۳]. ویاس و همکاران^(۷) (۲۰۱۰ میلادی) جریان چرخشی سیال در اعداد رینولدز پایین را در کانال‌های صفحه‌ای با پرهی موج‌دار سینوسی با استفاده از روش اندازه‌گیری سرعت‌سنجی دوپلری لیزری^(۸) (LVD) مورد بررسی قرار دادند و اثرهای دو پارامتر هندسی $2A/L$ و $S/2A$ را مشخص کردند. آن‌ها دیدند که جریان چرخشی به طور چشمگیری با افزایش نرخ جریان و دو پارامتر هندسی $2A/L$ و $S/2A$ تغییر می‌کند [۱۴]. خوشوقت و همکاران^(۹) (۲۰۱۱ میلادی) شبیه‌سازی دینامیک سیال‌های محاسباتی به صورت سه‌بعدی و مدل شبکه‌ی عصبی را برای تخمین ضریب‌های f و z برای مبدل‌های لوله‌ای تخت پره‌دار در محدوده‌ی $600 \leq Re \leq 7000$ انجام دادند. آن‌ها رابطه‌های جدیدی برای تخمین مقدارهای ضریب‌های f و z به ترتیب با انحراف نسبی میانگین مطلق $3/22$ و $3/68$ درصد پیشنهاد کردند [۱۵]. تائو و همکاران^(۱۰) (۲۰۱۱ میلادی) مطالعه‌های عددی به صورت سه‌بعدی برای بررسی عملکرد مبدل‌های 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 می‌بخشد. اما افت فشار را نیز افزایش می‌دهد. همچنین بهتر است که زاویه‌ی موجی بین ۱۰ تا ۲۰ درجه و گام پره بین $1/2$ mm و 2 mm قرار گیرد [۱۶]. هوزین^(۱۱) (۲۰۱۱) پره‌های دوزنقه‌ای و پره‌های موج‌دار S شکل و C شکل به صورت دو بعدی و عددی بررسی کرد [۱۷].

زانگ و همکاران^(۱) (۲۰۰۴ میلادی) انتقال گرما و جریان آرام هوا ($Pr = 0.7$) را به طور تناوبی توسعه‌یافته در داخل کانال‌های صفحه‌ای موج‌دار سینوسی برای درجه گرمایی یکنواخت دیواره مدل کردند. نتیجه‌های عددی را برای بازه‌ی گسترده‌ای از رژیم جریان آرام و انواع گوناگون هندسه‌ی مجرا ($0.5 \leq 2A/\lambda_w \leq 2.5$) و $0.1 \leq S/2A \leq 3$) ارائه کردند. آن‌ها نتیجه گرفتند که بیش‌ترین کارایی با داشتن هندسه با مشخصه‌ی $1/2 \leq S/2A \leq 1$ به‌دست می‌آید [۲]. متوالی و منگلیک^(۳) (۲۰۰۴ میلادی) راه‌حل‌های عددی را برای انتقال گرمایی جابه‌جایی اجباری با ویژگی‌های ثابت و به صورت تناوبی توسعه‌یافته، تک‌فازی و تراکم‌ناپذیر در رژیم جریان آرام داخل کانال‌های صفحه‌ای موج‌دار سینوسی برای دیواره‌های کانالی که در گرمایی یکنواخت نگه داشته شدند، به‌دست آوردند. آن‌ها دیدند که گردابه‌های عرضی در ناحیه‌های کمینه موج سینوسی تولید می‌شود و این چرخش با افزایش مقدارهای Pr ، Re ، $2A/\lambda_w$ رشد می‌کند. همچنین مشخص کردند که عملکرد بهینه پره (f/z) برای این نوع کانال‌ها در بازه‌ی $0.6 \leq 2A/\lambda_w \leq 0.3$ به‌دست می‌آید [۱۰].

منگلیک و همکاران^(۳) (۲۰۰۵ میلادی) مفهوم کاملی را از رفتار انتقال گرمایی 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 ($Pr = 0.7$) 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 $S/2A$ افزایش می‌یابد. همچنین نتیجه گرفتند که عملکرد گرمایی با شرط مرزی شار گرمایی ثابت نسبت به شرط مرزی دمای دیواره ثابت بالاتر است [۱۱]. جانکی و همکاران^(۴) (۲۰۰۷ میلادی) به صورت تجربی عملکرد گرمایی-هیدرولیکی مبدل‌های گرمایی لوله‌ای تخت با پرهی موج‌دار در ۱۱ مدل گوناگون را بررسی کردند. آن‌ها اثرهای تمام پارامترهای هندسی به جز دامنه‌ی موج را مورد مطالعه قرار دادند و رابطه‌هایی برای ضریب کلبورن و ضریب اصطکاک فینگ ارائه کردند [۱۲]. شیخ اسماعیل و ولراج^(۵) (۲۰۰۹ میلادی) یک پرهی نواری خارج از محور

(۱) Zhang et al.

(۲) Metwally & Manglik

(۳) Manglik et al.

(۴) Junqi et al.

(۵) Sheik Ismail & Velraj

(۶) Sheik Ismail et al.

(۷) Vyas et al.

(۸) Laser Doppler Velocimetry

(۹) Khoshvaght et al.

(۱۰) Tao et al.

(۱۱) Huzayyin

مورد بررسی قرار گرفت. با بررسی این مقاله‌ها روشن است که مدل‌سازی 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. شبیه‌سازی دینامیک سیال‌های محاسباتی به صورت سه‌بعدی توسط نرم‌افزار انسیس فلونت ویرایش ۱۵ برای انجام این مدل‌سازی استفاده شد.

شبیه‌سازی 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 S شکل در نقطه‌های بیشینه و کمینه و پره‌ی C شکل در نقطه‌های عطف، منقطع می‌شود. به منظور تحلیل گرمایی و هیدرولیکی این سه نوع پره، هر یک از آن‌ها به میزان یک تناوب برش داده می‌شوند.

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 دامنه‌ی A هستند که اثر این پارامترها روی ضریب‌های Z و f در قالب پارامترهای هندسی بدون بعد برای بررسی این اثر، هر کدام از پره‌های موج‌دار با دیواره‌های پیوسته و ناپیوسته، ۱۸ بار جداگانه کشیده و مش زده می‌شوند. پارامترهای هندسی بدون بعد برای این ۱۸ هندسه در جدول ۱ آورده شده است. این اندازه‌های هندسی از مرجع [۱] استخراج شده است. در ۶ هندسه‌ی اول (پره‌های شماره‌ی ۱ تا ۶) به منظور بررسی اثر α روی ضریب‌های Z و f، β و γ ثابت نگه داشته می‌شوند، در ۶ هندسه‌ی دوم (پره‌های شماره‌ی ۷ تا ۱۲) برای بررسی اثر

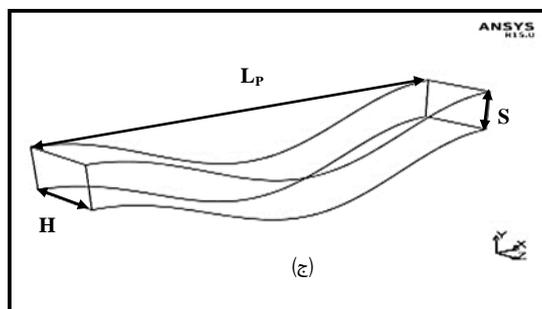
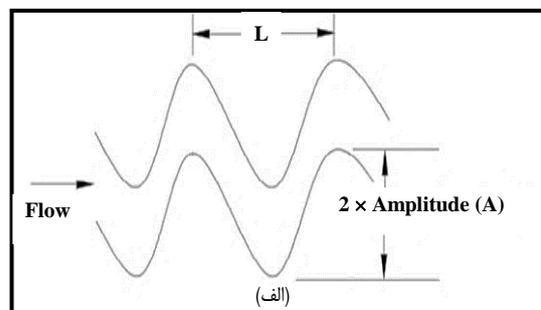
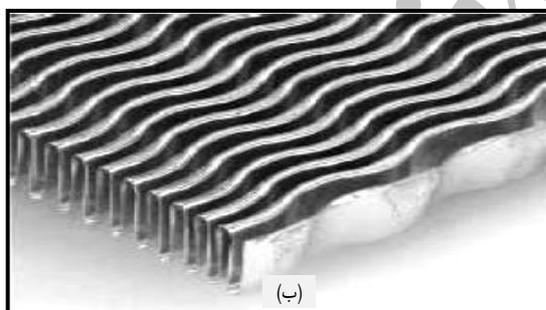
جعفری نصر و سعیدان (۱۳۸۷) به منظور محاسبه‌ی سطح انتقال گرمایی بهینه‌تر برای مبدل‌های گرمایی قاب و صفحه‌ای از رویه‌ی طراحی سریع^(۱) استفاده کردند که استفاده از این روش نقش عمده‌ای در کاهش هزینه‌های سرمایه‌گذاری داشته است. همچنین توزیع دمایی را در این مبدل‌ها مورد بررسی قرار دادند و تغییرهای دما را در صفحه‌های متفاوت مبدل و نیز تغییرها در طول هر صفحه آن را تعیین کردند [۱۸].

بر پایه‌ی بررسی‌های صورت گرفته در این مقاله‌ها، مبدل‌های گرمایی صفحه‌ای پره‌دار با پره موج‌دار نیازمند به مطالعه بیشتری برای توسعه‌ی مدل تئوری معتبر می‌باشند. همچنین مطالعه‌های 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، می‌پردازد. 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 فینینگ بر حسب عدد رینولدز بیان می‌شوند. در این مطالعه ابتدا اثر ۴ پارامتر هندسی ارتفاع پره، فاصله‌بندی بین پره، دامنه و طول موج پره‌های موج‌دار سینوسی در قالب پارامترهای هندسی بدون بعد (α و β و γ) روی ضریب‌های Z و f در بازه‌ی گسترده‌ای از عدد رینولدز ($100 \leq Re \leq 15000$) تحلیل شد. سپس به منظور بهبود هندسه‌ی این 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 Z 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 می‌شود. 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 دمایی ثابت دیواره‌ی پره (T_w)

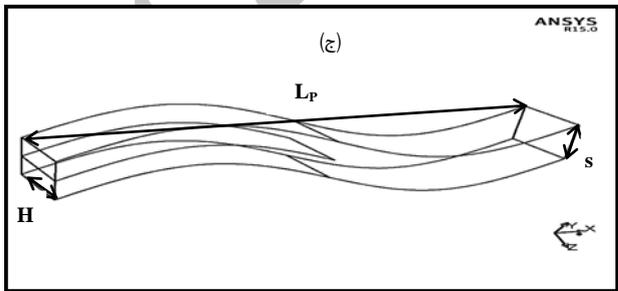
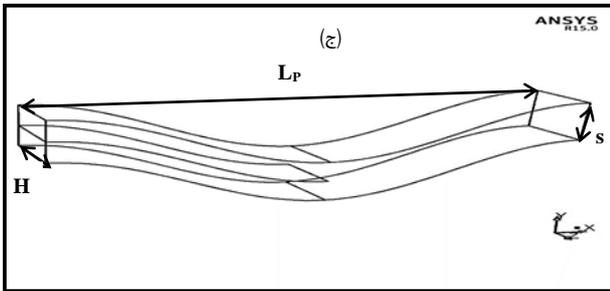
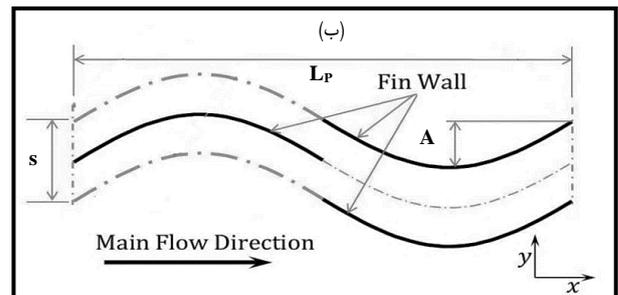
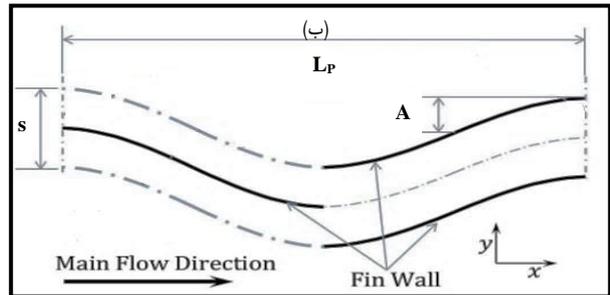
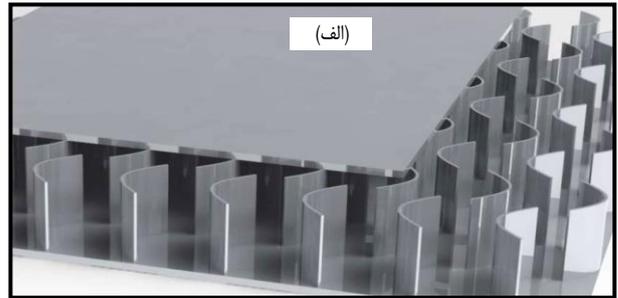
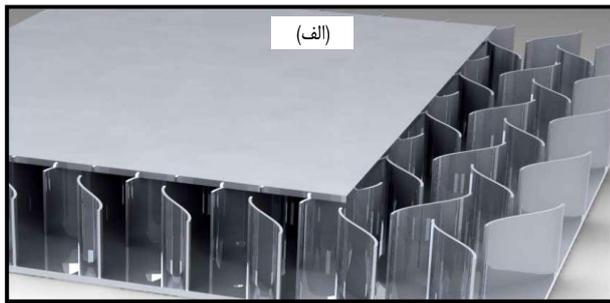
(۱) Rapid Design Algorithm

جدول ۱- پارامترهای هندسی بدون بعد پره‌های موج‌دار.

پارامترهای هندسی بدون بعد			قطر هیدرولیکی (mm)	سطح پره	شماره پره
$\gamma=L/2A$	$\beta=2A/s$	$\alpha=H/s$			
۵	۱/۳۰۰	۲۰/۸۳۳	۲/۲۹۰۰۸	۲۵W-۲۱	۱
۵	۱/۳۰۰	۱۵/۳۸۵	۲/۴۴۱۳۱	۲۰W-۲۰	۲
۵	۱/۳۰۰	۱۰/۷۱۴	۲/۵۶۰۹۸	۱۵W-۱۸	۳
۵	۱/۳۰۰	۶/۶۷۰	۲/۶۰۸۷۰	۱۰W-۱۷	۴
۵	۱/۳۰۰	۳/۱۲۵	۲/۴۲۴۲۴	۵W-۱۶	۵
۵	۱/۳۰۰	۱/۱۷۶	۱/۸۳۷۸۴	۳W-۱۵	۶
۵	۲/۶۰۰	۱۱	۱/۵۴۰۰۰	۹/۲۴W-۳۰	۷
۵	۲/۱۰۰	۱۱	۱/۸۳۳۳۳	۱۱W-۲۵	۸
۵	۱/۳۵۰	۱۱	۲/۴۹۹۹۴	۱۵W-۱۸	۹
۵	۰/۹۴۴	۱۱	۳/۳۰۰۰۰	۱۹/۸W-۱۴	۱۰
۵	۰/۷۵۰	۱۱	۳/۶۶۶۶۷	۲۲W-۱۳	۱۱
۵	۰/۶۳۶	۱۱	۳/۹۹۹۹۷	۲۴W-۱۲	۱۲
۷/۶۹۳	۱/۳۰۰	۱۱	۲/۱۶۶۶۴	۱۳W-۲۱	۱۳
۶/۵۰۰	۱/۳۰۰	۱۱	۲/۳۸۳۳۳	۱۴/۳W-۲۰	۱۴
۵/۴۹۰	۱/۳۰۰	۱۱	۲/۵۶۶۶۷	۱۵/۴W-۱۸	۱۵
۴/۳۲۷	۱/۳۰۰	۱۱	۲/۷۵۰۰۰	۱۶/۵W-۱۷	۱۶
۴/۱۰۳	۱/۳۰۰	۱۱	۲/۹۳۳۳۳	۱۷/۶W-۱۶	۱۷
۳/۸۴۶	۱/۳۰۰	۱۱	۳/۱۱۶۶۷	۱۸/۷W-۱۵	۱۸



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



شکل ۳- پرهی s شکل. الف) تصویر سه بعدی، ب) تصویر دوبعدی، ج) دامنه‌ی محاسباتی.

شکل ۲- پرهی c شکل. الف) تصویر سه بعدی، ب) تصویر دوبعدی، ج) دامنه‌ی محاسباتی.

معادله‌های حاکم

همان گونه که گفته شد، نرم افزار CFD، انسیس فلونت ۱۵، برای این شبیه سازی به کار گرفته شد. جریان هوا به صورت یکنواخت، به طور کامل توسعه یافته تناوبی، تراکم ناپذیر و با ویژگی‌های ثابت در نظر گرفته شد.

رژیم جریان قبل از عدد رینولدز ناحیه‌ی گذار، آرام $(1000 \leq Re \leq 10000)$ و بعد از عدد رینولدز ناحیه‌ی گذار، آشفته $(10000 \leq Re \leq 15000)$ فرض شد. در فلونت، معادله‌های بقای جرم، مومنتوم و انرژی با استفاده از روش حجم محدود حل می‌شوند. در این مطالعه، معیار همگرایی برای معادله‌های جرم و مومنتوم کمتر از 10^{-4} و برای معادله‌ی انرژی کمتر از 10^{-7} در نظر گرفته شد. برای پیش بینی جریان آشفته داخل هندسه‌ی پره از مدل $k-\epsilon$ استاندارد و رفتار دیوار پیشرفته استفاده شد.

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

ملاحظات مش بندی

در این بخش برای انجام مش بندی سه بعدی از مش با ساختار از نوع شش وجهی استفاده شده است. به دلیل وجود گرادیان بالا در جهت Y و ارتقای کیفیت مش بندی، مش کنار دیواره در جهت Y ریز می‌شود. شکل ۴ آزمون استقلال از شبکه را برای پرهی شماره‌ی ۱ در $Re=400$ نمایش می‌دهد. این نمودار بین تعداد سلول‌ها و پارامتر عملکردی افت فشار رسم می‌شود. کمترین تعداد سلول‌های مورد نیاز برای نتیجه‌های ثابت ۲۲۸۳۸۹ شبکه می‌باشد. بنابراین این تحلیل با ۲۲۸۳۸۹ سلول انجام می‌شود.

$$u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} + w \frac{\partial T}{\partial z} = \left(\frac{k}{\rho \cdot c_p}\right) \cdot \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2}\right) \quad (5)$$

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

$$\frac{\partial(\rho u k')}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v k')}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w k')}{\partial z} = \quad (6)$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\mu_t}{\sigma_k} \frac{\partial k'}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\mu_t}{\sigma_k} \frac{\partial k'}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\mu_t}{\sigma_k} \frac{\partial k'}{\partial z} \right) + \mu_t \phi - \rho \varepsilon$$

در معادله‌ی بالا μ_t ، k' و ϕ به ترتیب گرانیوی آشفتگی، انرژی جنبشی آشفتگی و جمله‌ی نابودی ویسکوز می‌باشند. معادله‌ی از بین رفتن انرژی جنبشی آشفتگی با معادله‌ی زیر نوشته می‌شود:

$$\frac{\partial(\rho u \varepsilon)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v \varepsilon)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w \varepsilon)}{\partial z} = \quad (7)$$

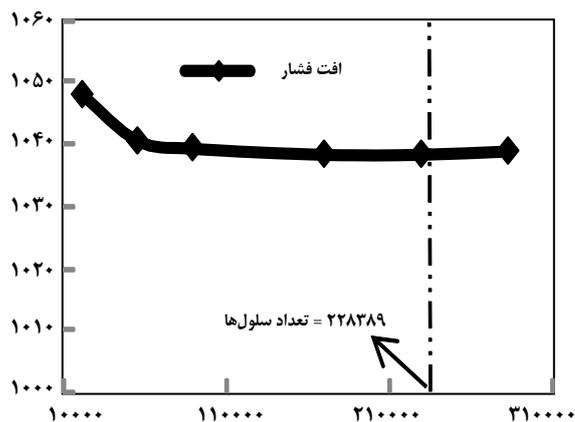
$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon}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

$$C_{1\varepsilon} \mu_t \frac{\varepsilon}{k'} \phi - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k'}$$

ثوابت مدل آشفتگی یعنی $C_{1\varepsilon}$ ، $C_{2\varepsilon}$ ، C_μ و σ_ε و σ_k در نرم افزار فلوئنت به ترتیب دارای مقدارهای پیش فرض ۰/۰۹، ۱/۴۴، ۱/۹۲، ۱، ۱/۳ هستند که در این مدل‌سازی از این مقدارهای پیش‌فرض استفاده می‌شود. همچنین برای حل معادلات، تمامی دقت‌ها از مرتبه‌ی دوم در نظر گرفته می‌شود و به منظور کوپل کردن فشار و سرعت از الگوریتم SIMPLE استفاده می‌شود.

شرایط مرزی

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 پاتانکار و همکاران^(۱) [۴] در ورودی و خروجی به کار برده می‌شود. همچنین استفاده از این شرط مرزی در ورودی و خروجی، امکان مدل‌سازی چند دوره تنها با مدل کردن یک دوره فراهم می‌کند. همان‌گونه که در شکل دیده می‌شود،



شکل ۴- نمودار استقلال از شبکه برای پره شماره ۱.

مدل $k-\varepsilon$ استاندارد یک مدل نیمه تجربی است و معادله‌های آن بر اساس مشاهددهای تجربی و ملاحظه‌های پدیده‌شناختی به وجود آمده‌اند. k و ε به ترتیب انرژی جنبشی آشفتگی و نرخ از بین رفتن آشفتگی می‌باشند [۱۹].

معادله‌های بقا در مختصات دکارتی به صورت زیر بیان می‌شوند [۲۰]:
معادله‌ی پیوستگی:

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

معادله‌ی مومنتوم:

معادله‌ی مومنتوم در راستای X :

$$\rho(u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z}) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \quad (2)$$

معادله‌ی مومنتوم در راستای Y :

$$\rho(u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z}) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) \quad (3)$$

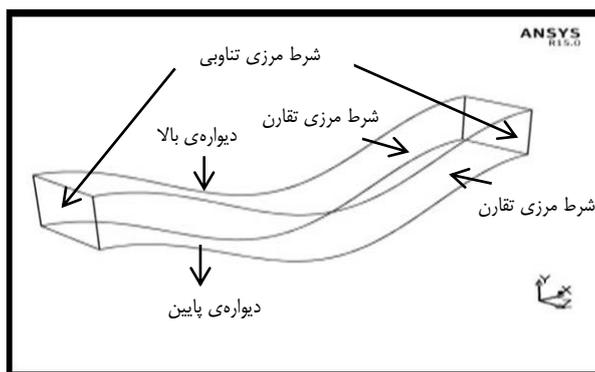
معادله‌ی مومنتوم در راستای Z :

$$\rho(u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z}) = \quad (4)$$

$$-\frac{\partial p}{\partial z} + \mu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right)$$

معادله‌ی انرژی:

(۱) Patankar et al.



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

محاسبه می‌شود. این رویه برای بازه‌ی اعداد رینولدز از ۱۰۰ تا ۱۵۰۰۰ تکرار شد. برای دو پره موج‌دار با دیواره‌های ناپیوسته S 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 از شرط مرزی خروجی فشار استفاده شد. برای دیواره‌های پره شرط مرزی نبود لغزش همراه با دمای دیواره‌ی ثابت به کار برده 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.

تعریف پارامترها

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

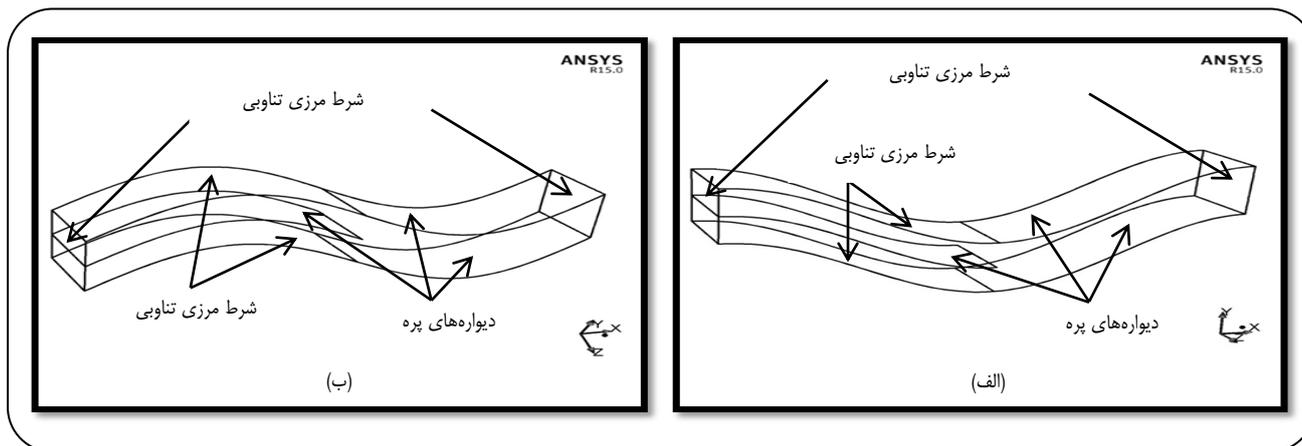
$$Re = \frac{\rho u d_h}{\mu} \quad (8)$$

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

$$d_h = \frac{4A_c}{p} = \frac{4(s.H)}{2(s+H)} = \frac{2sH}{s+H} \quad (9)$$

برای سطح‌های جلویی و پشتی از شرط مرزی تقارن استفاده می‌شود. زمانی که هندسه‌ی فیزیکی و الگوی جریان سیال و دما دارای تقارن آینه‌ای باشند، این شرط مرزی اعمال می‌شود. برای سطح‌های بالا و پایین، شرط مرزی دیوار بدون لغزش اعمال می‌شود. 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 به دست آمده در این مرحله محاسبه شد. همچنین نیمرخ سرعت به دست 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 (به دست 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 $305/15K$ 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 به دست می‌آید. ضریب z با استفاده از معادله‌ی (۱۱) و دمای خروجی به دست آمده از این تحلیل،

(۱) Velocity Profile



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

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

در معادله‌ی بالا A مساحت سطح، η_o بازدهی سطح و ΔT_{LMTD} اختلاف درجه گرمایی متوسط لگاریتمی است و اختلاف درجه گرمایی متوسط لگاریتمی از معادله‌ی زیر به‌دست می‌آید:

$$\Delta T_{LMTD} = \frac{(T_i - T_w) - (T_o - T_w)}{\ln\left(\frac{T_i - T_w}{T_o - T_w}\right)} \quad (15)$$

نتیجه‌ها و بحث

اعتبارسنجی نرم‌افزار CFD استفاده شده

به منظور اعتبارسنجی نرم‌افزار CFD (فلوئنت) مورد استفاده در تحلیل حاضر، یکی از پره‌های موج‌دار کبیر و لندن با شماره‌ی سطح $W - \frac{3}{8} - 11,44$ در نظر گرفته می‌شود و ضریب‌های z و f این پره با استفاده از نرم‌افزار فلوئنت به‌دست آورده می‌شود و سپس با مقادیرهای تجربی z و f به‌دست آمده توسط کبیر و لندن [۶] مقایسه می‌شوند. روش مدل‌سازی و شرایط مرزی اعمال شده برای این پره برای به‌دست آوردن ضریب‌های z و f همانند پره‌های تحلیل شده در این مطالعه می‌باشند که در بخش‌های پیشین توضیح داده شده است. همان‌گونه که شکل ۷ نشان می‌دهد، نتیجه‌های به دست آمده از حل عددی برای تمامی نقطه‌ها ضریب‌های f با نتیجه‌های تجربی دارای تطابق خوبی می‌باشند. ضریب‌های z نیز به جز دو نقطه‌ی $Re=500$ و $Re=1000$ با نتیجه‌های تجربی همخوانی لازم را دارد.

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

$$f = \frac{1}{\gamma} \cdot \frac{\Delta P \cdot d_h}{\rho_{air} \cdot v^2} \quad (10)$$

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

$$j = St \times Pr^{1/2} = \frac{d_h}{\gamma L_p} \ln\left(\frac{T_i - T_w}{T_o - T_w}\right) Pr^{1/2} \quad (11)$$

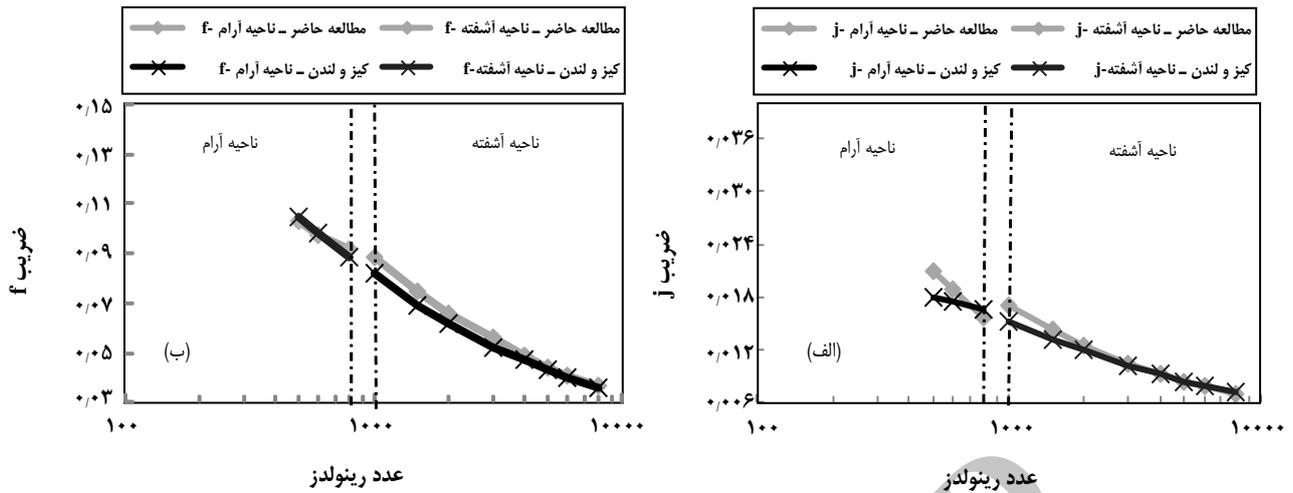
در معادله‌ی بالا، T_i ، T_o و T_w به ترتیب دمای ورودی هوا، دمای خروجی هوا و دمای دیواره‌ی پره بوده و St عدد استانتون است که به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$St = \frac{Nu}{Re \cdot Pr} = \frac{h}{C_p \cdot u \cdot \rho} \quad (12)$$

اگر معادله‌ی (۱۲) جایگزین قسمت اول معادله‌ی (۱۱) شود، آنگاه معادله‌ی زیر نوشته می‌شود:

$$j = \frac{h}{C_p \cdot u \cdot \rho} \cdot Pr^{1/2} \quad (13)$$

همان‌گونه که از معادله‌ی (۱۳) دیده می‌شود، ضریب z و ضریب انتقال گرما (h) دارای رابطه‌ی مستقیم هستند، یعنی پره‌هایی که دارای مقدارهای z بیشتری هستند، ضریب انتقال گرمایی بالاتری را ایجاد می‌کنند و ضریب انتقال گرما توسط معادله‌ی زیر محاسبه می‌شود:



شکل ۷- مقایسه‌ی داده‌های تجربی به دست آمده توسط کیز و لندن با داده‌های CFD به دست آمده از این مطالعه برای پره موج‌دار

$$\text{با شماره سطح } W - \frac{3}{8} - 0.11/44 \text{ (الف) ضریب } z, \text{ (ب) ضریب } f.$$

دیده می‌شود، پره با بالاترین مقدار α ، بیشترین مقادیر برای ضریب‌های اصطکاک و کلبورن سرتاسر محدوده‌ی عدد رینولدز بررسی شده را نتیجه می‌دهد. با افزایش پارامتر α یا به عبارت دیگر با افزایش ارتفاع، مساحت سطح انتقال گرما افزایش می‌یابد که این مطلب منجر به انتقال گرما بیشتر و در نتیجه مقادیرهای بالاتر ضریب کلبورن می‌شود.

شکل ۹ تفاوت خط‌های جریان بین دو پره ۱ و ۶ نشان می‌دهد که هر کدام از پرها به ترتیب دارای $\alpha = 20/833$ و $\alpha = 1/176$ هستند. همان‌گونه که از این شکل دیده می‌شود، ناحیه‌های چرخش سیال برای پره شماره ۱ در نزدیکی ناحیه‌های پیشینه و کمینه ظاهر می‌شود. این نواحی چرخش سیال، سرعت جریان را کاهش می‌دهند. سرعت در پره شماره ۶ بیشتر می‌باشد. این مطلب می‌تواند دلیلی برای کاهش ناحیه‌های چرخش سیال در این هندسه‌ی پره باشد. با توجه به اینکه ضریب‌های z و f در پره شماره ۱ مقادیرهای بیشتری را دارا می‌باشند، مشخص می‌شود که نواحی چرخش سیال بیشتر افت فشار و نرخ انتقال گرما افزایش می‌دهند.

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

جهت بررسی اثر پارامتر هندسی نسبت دامنه به فاصله‌بندی پره $(\beta = 2A/s)$ روی ضریب‌های z و f ، شش هندسه

دلیل خطای بیش‌تر در دو نقطه‌ی یاد شده می‌تواند به دلیل اختلاف بین دو هندسه‌ی پره‌ی موج‌دار مدل‌سازی شده در این مقاله و پره موجی کیز و لندن باشد. هندسه‌ی پره موجی مدل‌سازی شده در این مقاله به‌طور کامل سینوسی در نظر گرفته شده است در حالی در مورد هندسه‌ی پره‌ی کیز و لندن سینوسی بودن آن در مرجع [۶] ذکر نشده است.

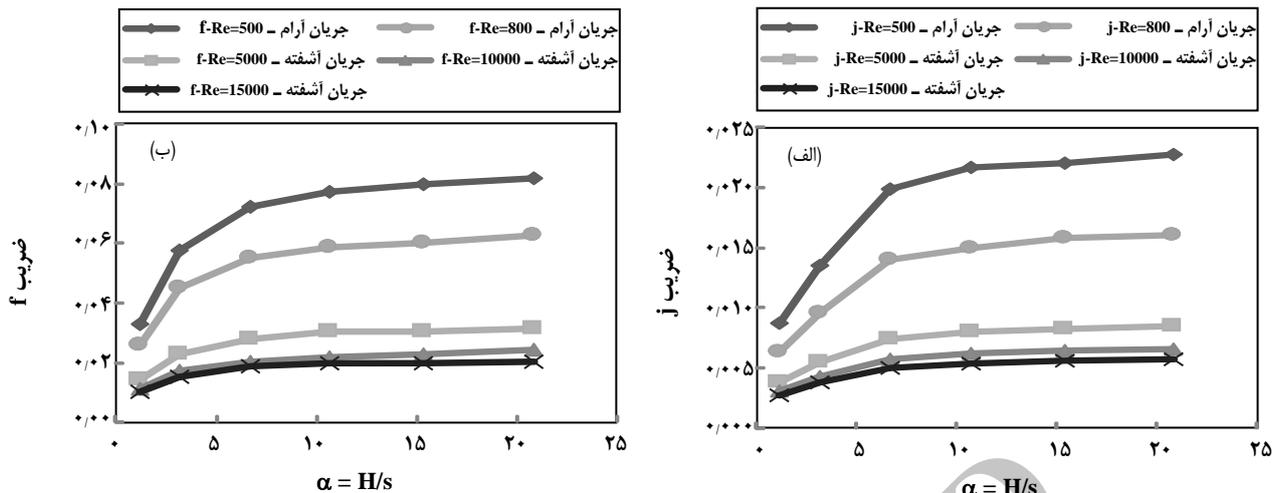
اثر پارامترهای هندسی بدون بعد روی ضریب‌های z و f

در این قسمت، بررسی اثر پارامترهای هندسی بدون بعد $\gamma = L/2A$ و $\beta = 2A/s$ ، $\alpha = H/s$ روی ضریب‌های z و f ابتدا برای پره‌ی موج‌دار پیوسته و سپس برای پره‌های موج‌دار ناپیوسته S شکل و C شکل به‌طور جداگانه انجام می‌شود.

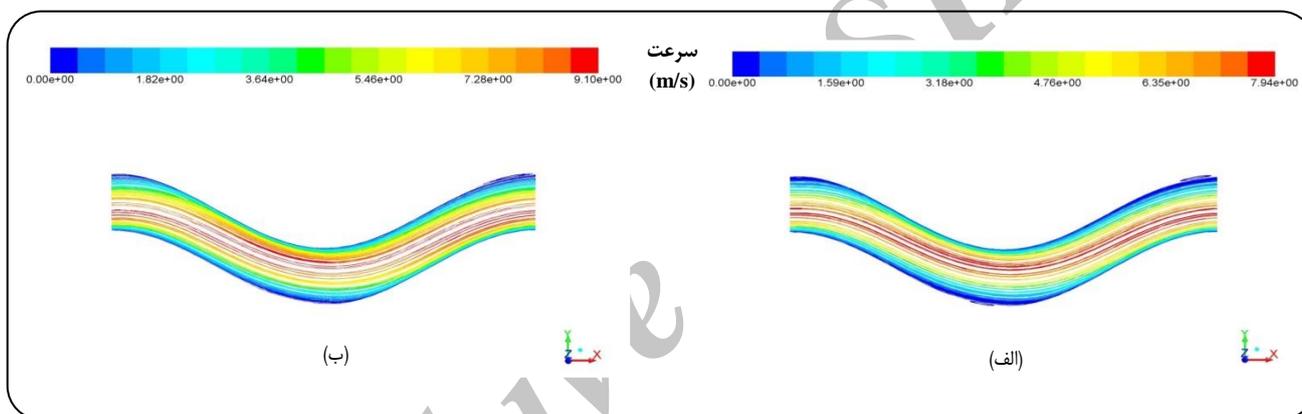
اثر پارامتر هندسی بدون بعد نسبت ارتفاع به فاصله‌بندی پره‌ی موج‌دار پیوسته (α)

به منظور بررسی اثر پارامتر هندسی نسبت ارتفاع به فاصله‌بندی پره $(\alpha = H/s)$ روی ضریب‌های z و f ، شش هندسه (پره‌های شماره ۱ تا ۶ در جدول ۱) در نظر گرفته شده است که این شش هندسه دارای مقادیرهای یکسان $\beta = 1/3$ و $\gamma = 5$ هستند و α در محدوده‌ی $1/176 \leq \alpha \leq 20/833$ تغییر می‌کند.

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



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



شکل ۹ - خطوط جریان در سطح مقطع ($H/2$) برای پره موج‌دار پیوسته. (الف) پره ۱، (ب) پره ۶.

هنگامی که فاصله‌ی بین صفحه‌ها کاهش می‌یابد، اثرهای ویسکوز مانع از تشکیل جریان چرخشی می‌شوند و جریان با خط‌های مستقیم غالب می‌شوند. در نتیجه، انتقال گرما و مومنتوم کاهش می‌یابند. شکل ۱۱ خطوط جریان برای دو پره شماره‌ی ۷ و ۱۲ نشان می‌دهد. پره‌های ۷ و ۱۲ به ترتیب دارای مقدارهای $\beta = 2/6$ و $\beta = 0/636$ می‌باشند. همان‌گونه که در این شکل دیده می‌شود، در پره ۱۲ که دارای β کمتری می‌باشد، جریان گردابی فضای بیشتری از هسته را پوشانده است.

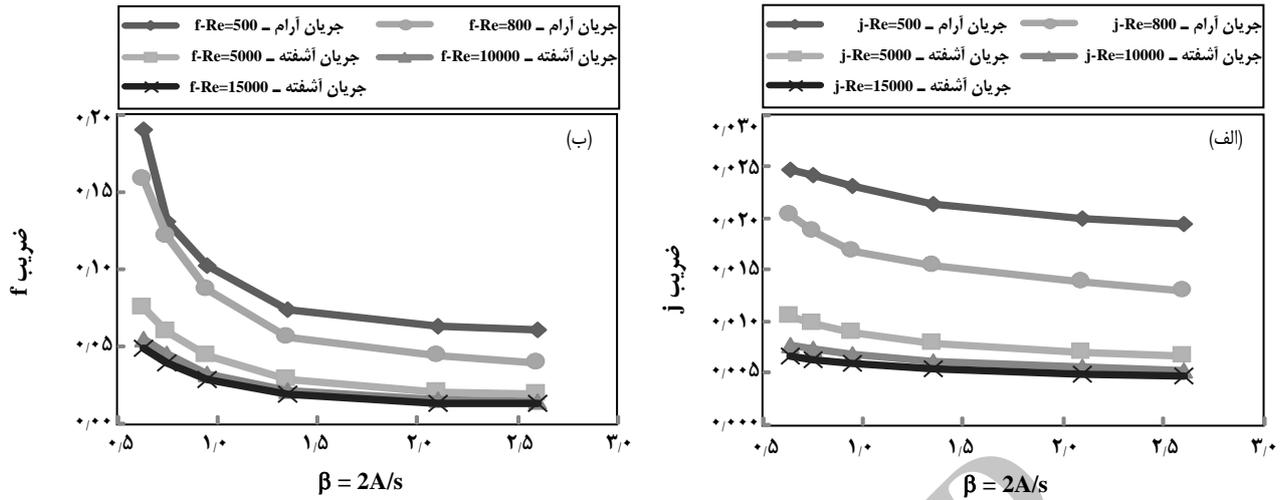
اثر پارامتر هندسی بدون بعد نسبت طول موج به دامنه‌ی پره موج‌دار پیوسته (۷)

برای بررسی اثر پارامتر هندسی نسبت طول موج به دامنه‌ی پره ضریب‌های z و f مانند دو پارامتر هندسی قبلی،

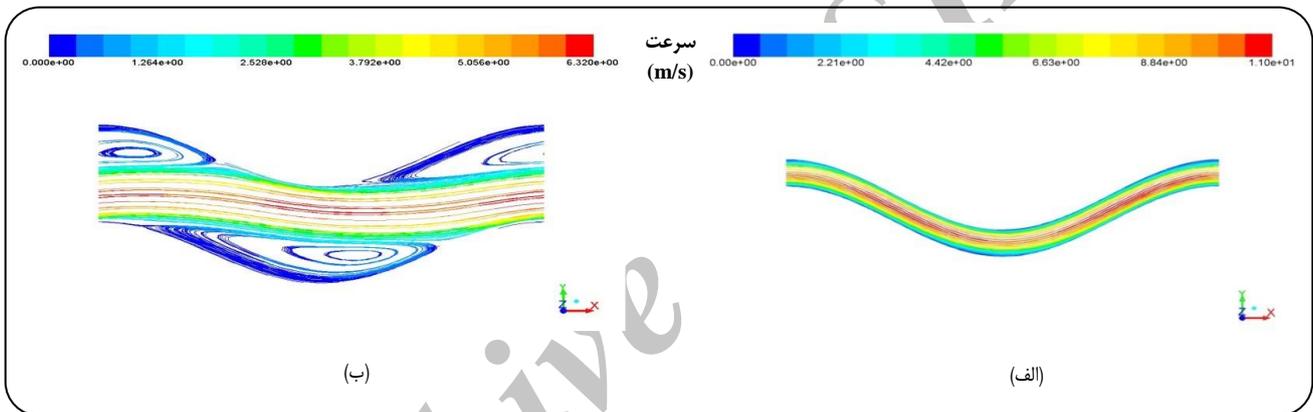
پره‌های شماره‌ی ۷ تا ۱۲ در جدول ۱) در نظر گرفته شده است که این شش هندسه دارای مقدارهای یکسان $\alpha = 11$ و $\gamma = 5$ هستند و β در محدوده‌ی $2/6 \leq \beta \leq 0/636$ تغییر داده می‌شود. شکل ۱۰ وابستگی ضریب‌های f و z را به پارامتر هندسی بدون بعد β نشان می‌دهد.

از این نمودارها، تشخیص داده می‌شود که با کاهش پارامتر β ، ضریب‌های z و f افزایش می‌یابند.

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 z و f می‌شود.



شکل ۱۰ - اثر پارامتر هندسی بدون بعد β برای پره‌ی موج‌دار پیوسته. (الف) ضریب z ، (ب) ضریب f .



شکل ۱۱ - خط‌های جریان در سطح مقطع $(H/2)$ برای پره موج‌دار پیوسته در $Re=500$ (الف) پره ۷، (ب) پره ۱۲.

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

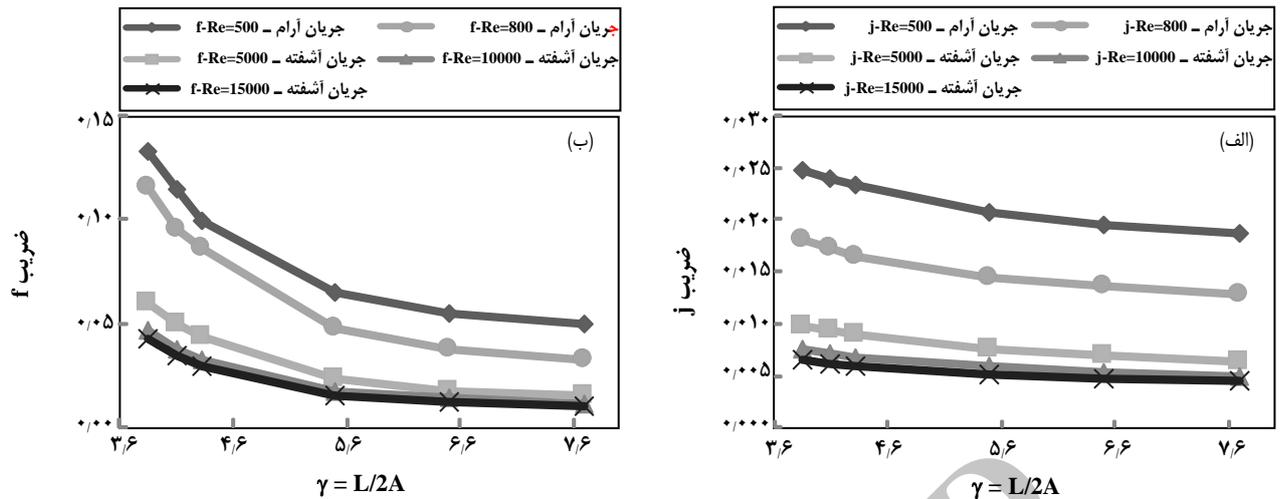
اثر پارامترهای هندسی بدون بعد α ، β و γ برای پره‌های موج‌دار ناپیوسته

شکل‌های ۱۴ تا ۱۶ اثر پارامترهای هندسی بدون بعد α ، β و γ روی ضریب‌های z 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 z و f برای هر دو پره‌ی موج‌دار ناپیوسته مانند پره موج‌دار پیوسته است.

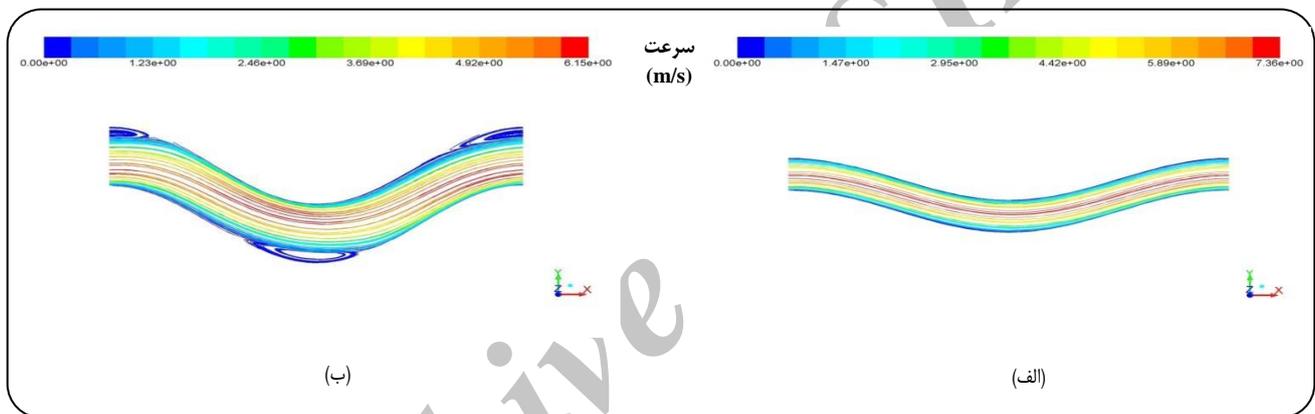
شش هندسه (پره‌های شماره‌ی ۱۳ تا ۱۸ در جدول ۱) در نظر گرفته شده است که این شش هندسه دارای مقدارهای یکسان $\alpha=11$ و $\beta=1/3$ هستند و $3,846 \leq \gamma \leq 7,693$ در محدوده‌ی تغییر داده می‌شود. شکل ۱۲ تغییر ضریب‌های f و z با تغییر پارامتر هندسی بدون بعد γ نشان می‌دهد.

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

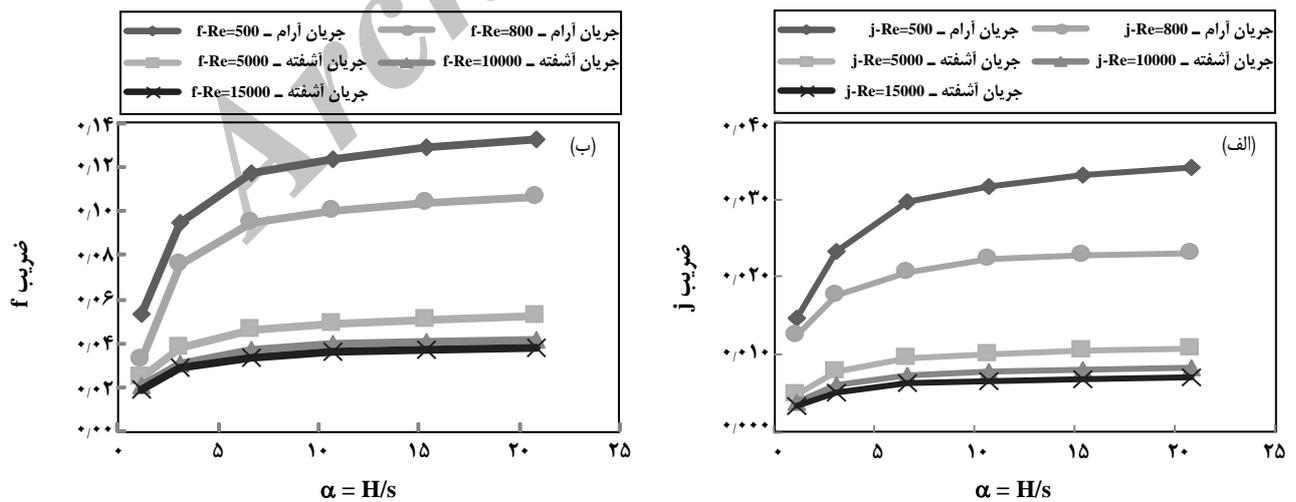
با کاهش طول موج یا افزایش دامنه‌ی پره مقدار پارامتر γ کاهش می‌یابد که کاهش پارامتر γ شدت حالت موجی و مساحت جانبی تحت پوشش جریان چرخشی افزایش می‌دهد. بنابراین ضریب اصطکاک افزایش می‌یابد. همراه با توسعه‌ی چرخش سیال در ناحیه‌های کمینه پره موج‌دار، لایه نازکی از لایه مرزی وجود دارد و این میدان جریان نواحی اختلاط گرمایی نشان می‌دهد.



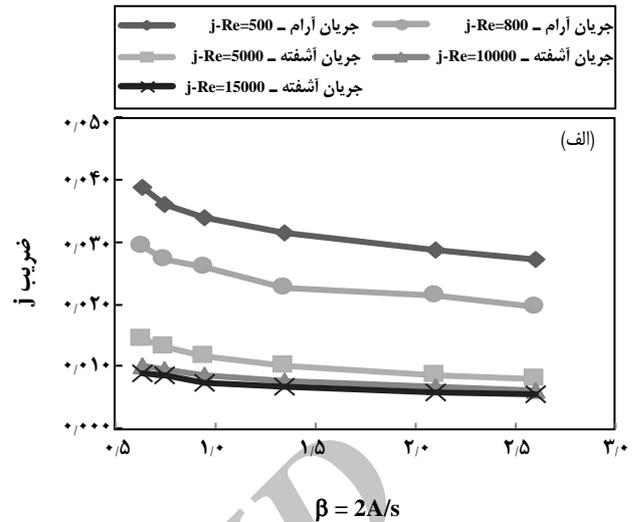
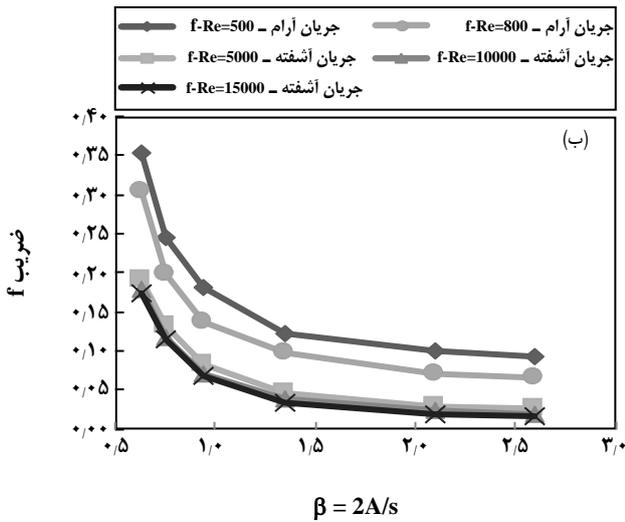
شکل ۱۲- اثر پارامتر هندسی بدون بعد γ برای پره‌ی موج‌دار پیوسته. الف) روی ضریب z ، ب) روی ضریب f .



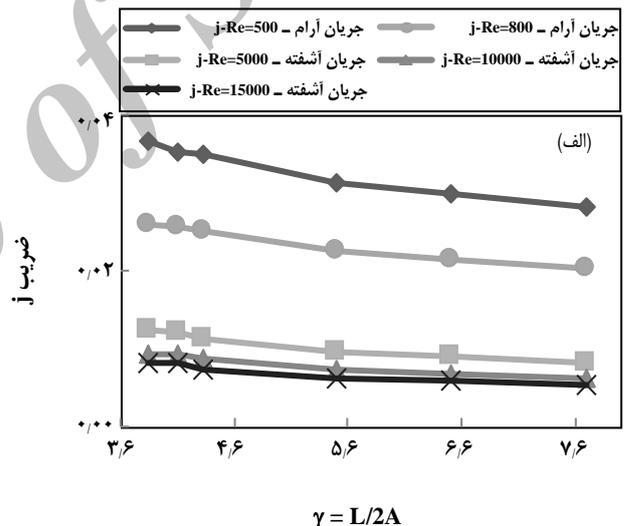
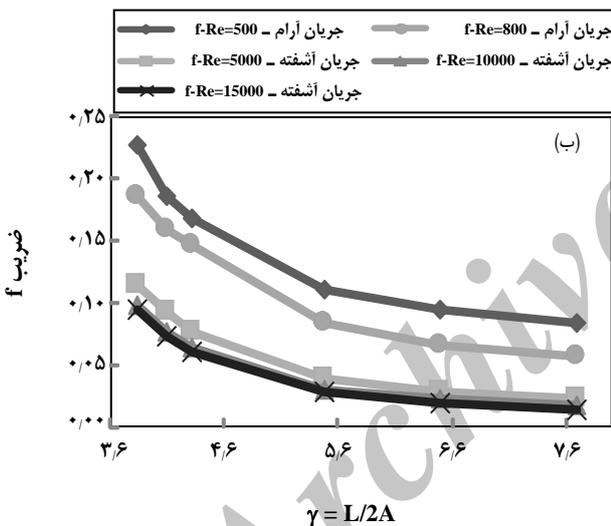
شکل ۱۳- خط‌های جریان در سطح مقطع $(H/2)$ برای پره‌ی موج‌دار پیوسته در $Re=500$. الف) پره ۱۳، ب) پره ۱۸.



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



شکل ۱۵- اثر پارامتر هندسی بدون بعد β برای پره موجدار نایبوسته‌ی S شکل. (الف) روی ضریب z ، (ب) روی ضریب f .



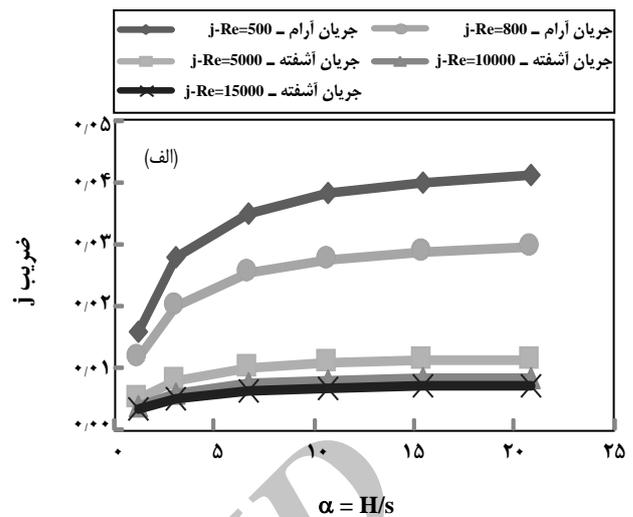
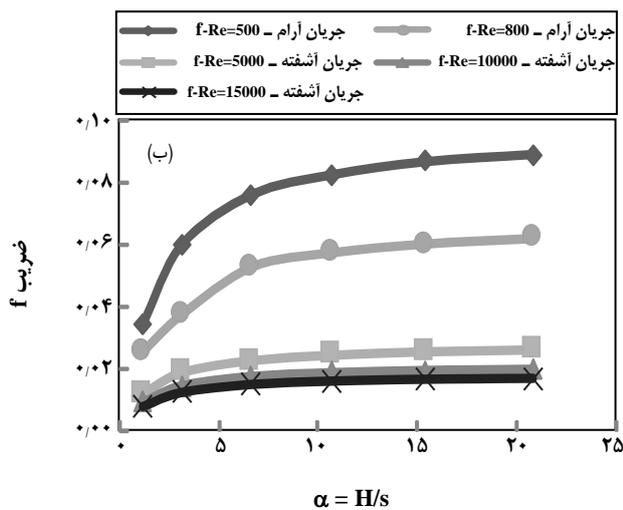
شکل ۱۶- اثر پارامتر هندسی بدون بعد γ برای پره موجدار نایبوسته‌ی S شکل. (الف) روی ضریب z ، (ب) روی ضریب f .

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 می‌شود که در $Re=500$ ، ناحیه‌های چرخش سیال و بی‌ثباتی لایه مرزی در مقایسه‌ی با $Re=5000$ بیشتر است. این مطلب می‌تواند دلیلی برای کم‌تر بودن مقدارهای z و f در رژیم جریان آشفته نسبت به جریان آرام باشد.

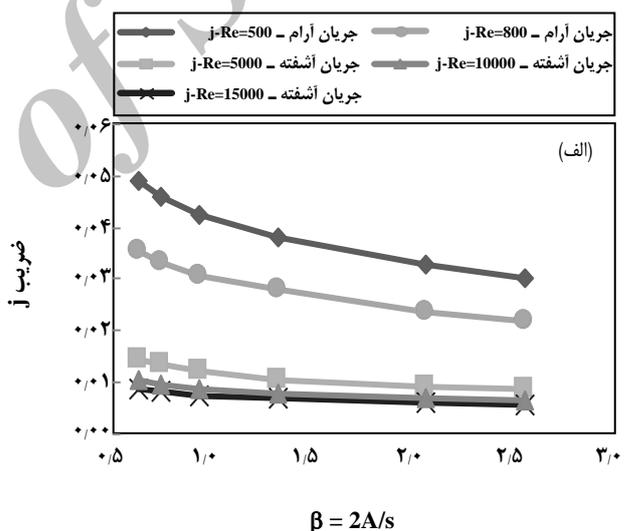
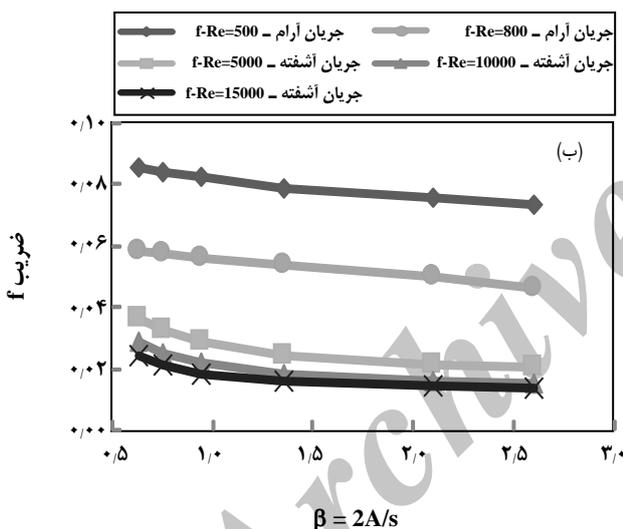
به عبارت دیگر با افزایش پارامتر هندسی α و کاهش دو پارامتر β و γ ضریب‌های z و f افزایش می‌یابند.

مقایسه‌ی مقدارهای z و f بین دو رژیم آرام و آشفته برای پره موج‌دار بیوسته

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



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



شکل ۱۸- اثر پارامتر هندسی بدون بعد β برای پره موج‌دار ناپیوسته‌ی C شکل. (الف) روی ضریب z ، (ب) روی ضریب f .

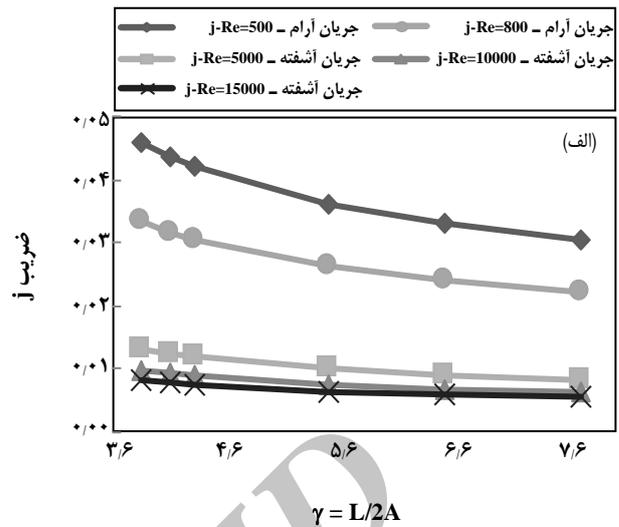
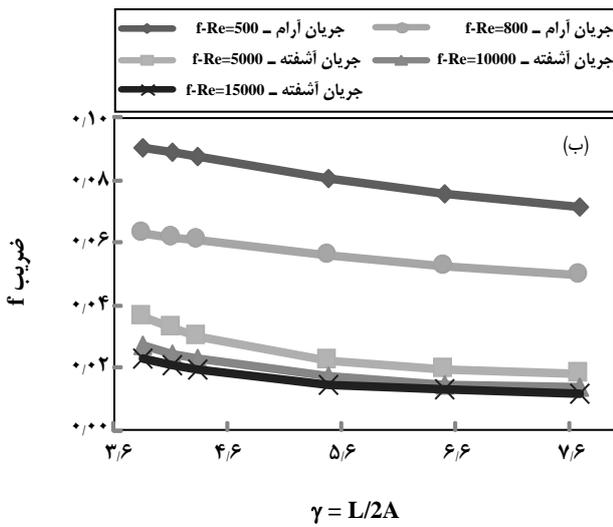
درحالی که در رژیم جریان آشفته، این نواحی چرخش سیال با افزایش عدد رینولدز کاهش می‌یابد. همچنین داخل کانال‌های S شکل، ناحیه‌های چرخش سیال و در هم ریختگی لایه مرزی نسبت به کانال‌های C شکل متناظر بیشتر است.

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 دلایل اصلی بهبود عملکرد به واسطه‌ی این طراحی جدید است.

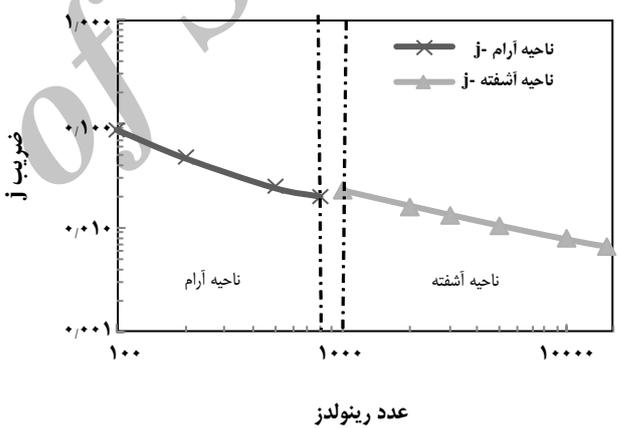
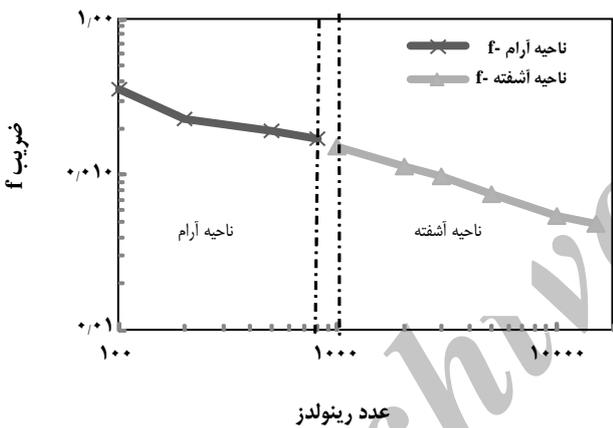
بررسی خط‌های مسیر برای پره‌های موج‌دار ناپیوسته

شکل‌های ۲۲ و ۲۳ خطوط جریان به ترتیب داخل پره‌های ناپیوسته‌ی S شکل و C شکل برای پره شماره‌ی ۱۲ ($\gamma = 5$)، $(\alpha = 11, \beta = 0.636)$ در دو رژیم جریان آرام و آشفته نمایش می‌دهند.

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



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



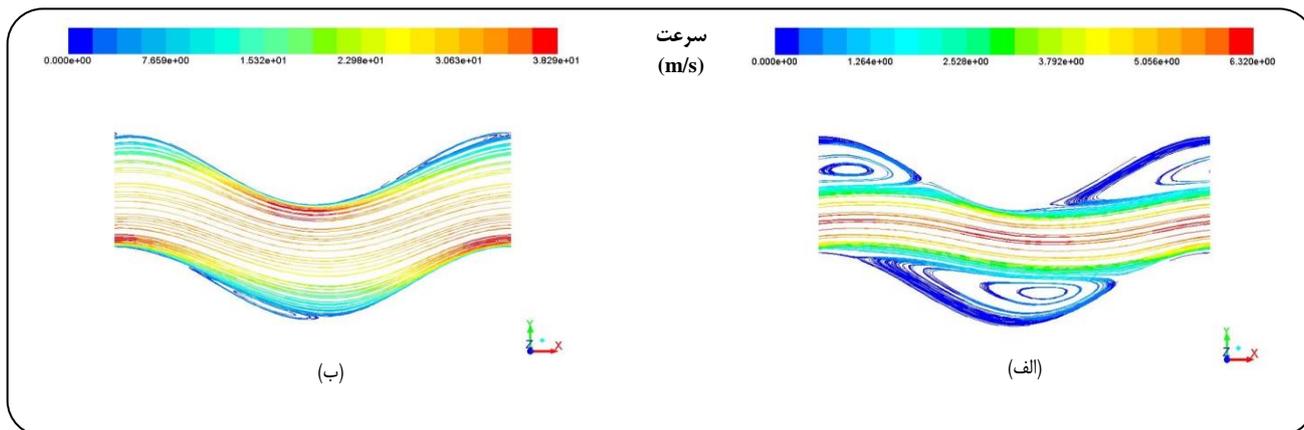
شکل ۲۰- مقایسه‌ی مقادیر z و f در دو رژیم آرام و آشسته برای پره موج‌دار پیوسته.

که پره‌های ۶، ۷ و ۱۳ پایین‌ترین اختلاط گرمایی هسته در مقایسه با موارد دیگر دارند که این مطلب منجر به ضریب‌های انتقال گرما پایین‌تر آن‌ها می‌شود.

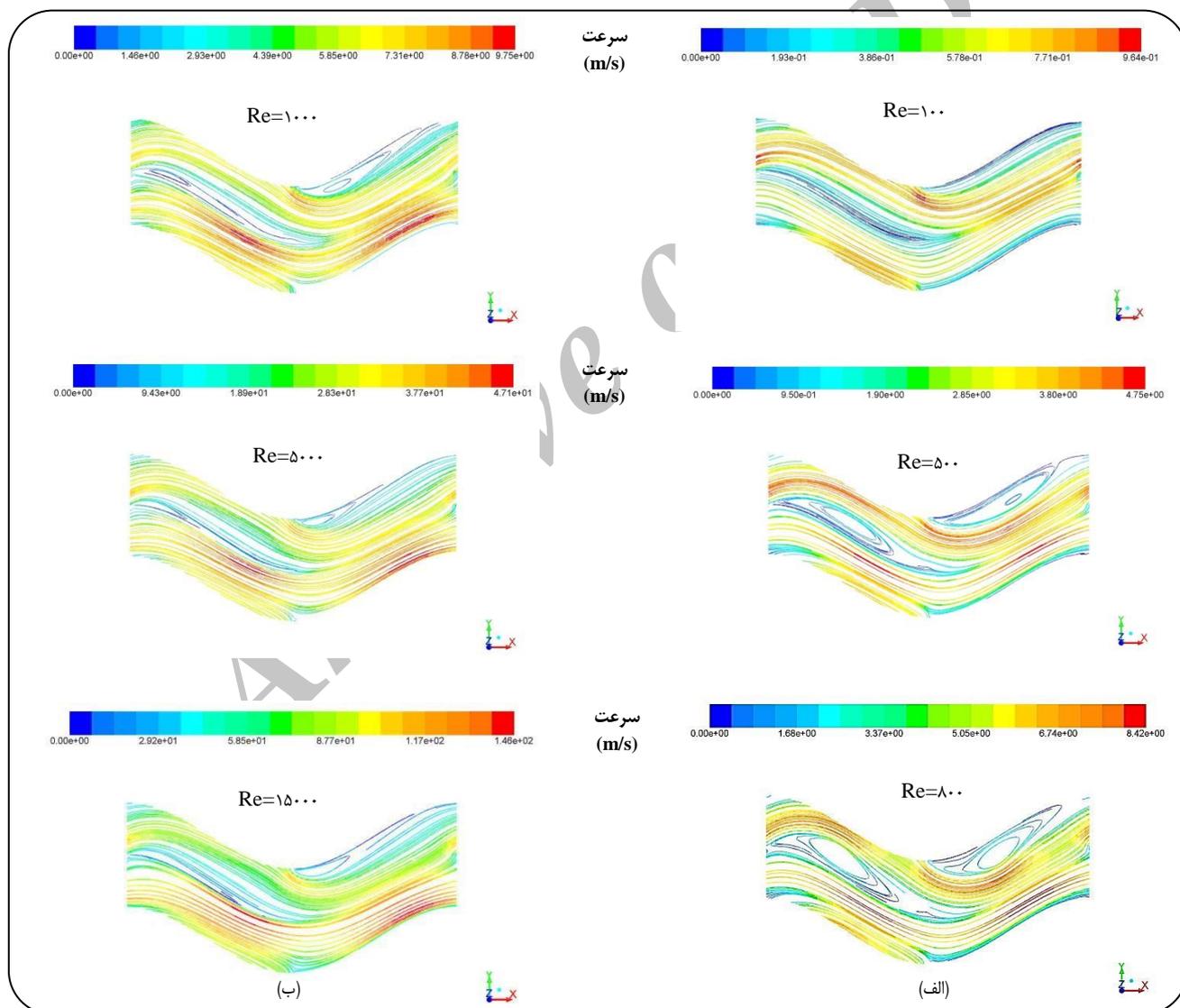
مقایسه توزیع دما و جریان بین پره‌های موج‌دار پیوسته و ناپیوسته

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 $\gamma=5$ ، $\beta=0.636$ ، $\alpha=11$) و در عدد رینولدز برابر $(Re=500)$ نشان داده می‌شود.

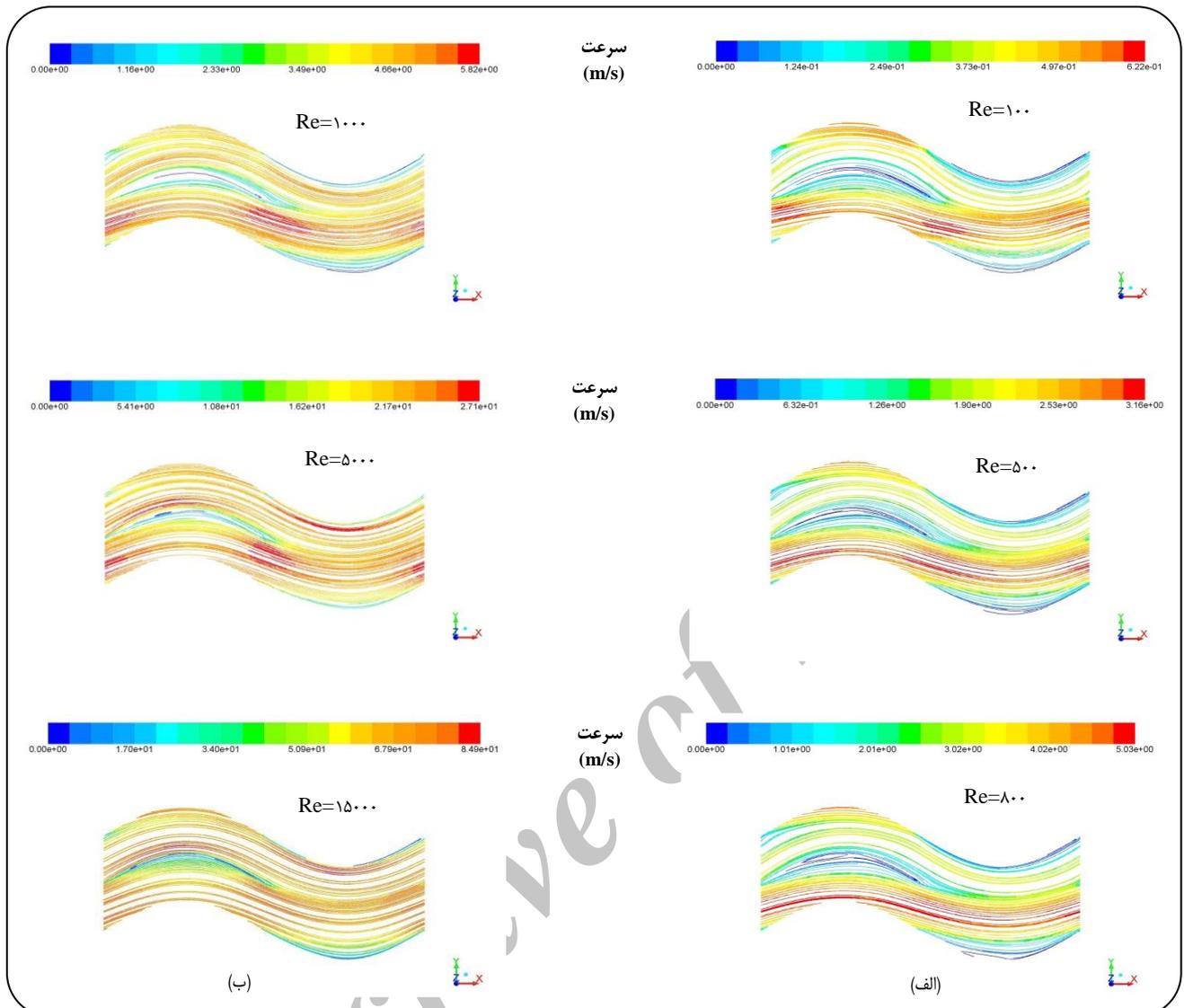
شکل‌های ۲۴ تا ۲۶ اثر پارامترهای هندسی بدون بعد α ، β و γ را بر روی خط‌های جریان و توزیع دما در عدد رینولدز ثابت $(Re=800)$ داخل کانال‌های S شکل و شکل‌های ۲۷ تا ۲۹ این اثر را برای پره‌های C شکل نشان می‌دهند. از این شکل‌ها دیده می‌شود که کاهش مقادیرهای پارامترهای هندسی β و γ و افزایش پارامتر α اختلاط جریان و ناحیه‌های چرخش سیال به‌ویژه برای کانال‌های S شکل افزایش می‌دهد که این افزایش مقادیرهای ضریب‌های اصطکاک و کلبورن را بالا می‌برد. هر دو کانال ناپیوسته به علت داشتن ضریب انتقال گرما بالاتر نسبت به کانال‌های پیوسته متمایز هستند. از این شکل‌ها همچنین دیده می‌شود



شکل ۲۱- خط‌های جریان در سطح مقطع (H/۲) برای پرده موج‌دار بی‌بسته‌ی شماره‌ی ۱۲. (الف) $Re=500$ ، (ب) $Re=500$.



شکل ۲۲- خط‌های جریان برای پرده S شکل نایبسته‌ی شماره‌ی ۱۲ در مقدارهای گوناگون عدد رینولدز. (الف) رژیم جریان آرام، (ب) رژیم جریان آشفته.



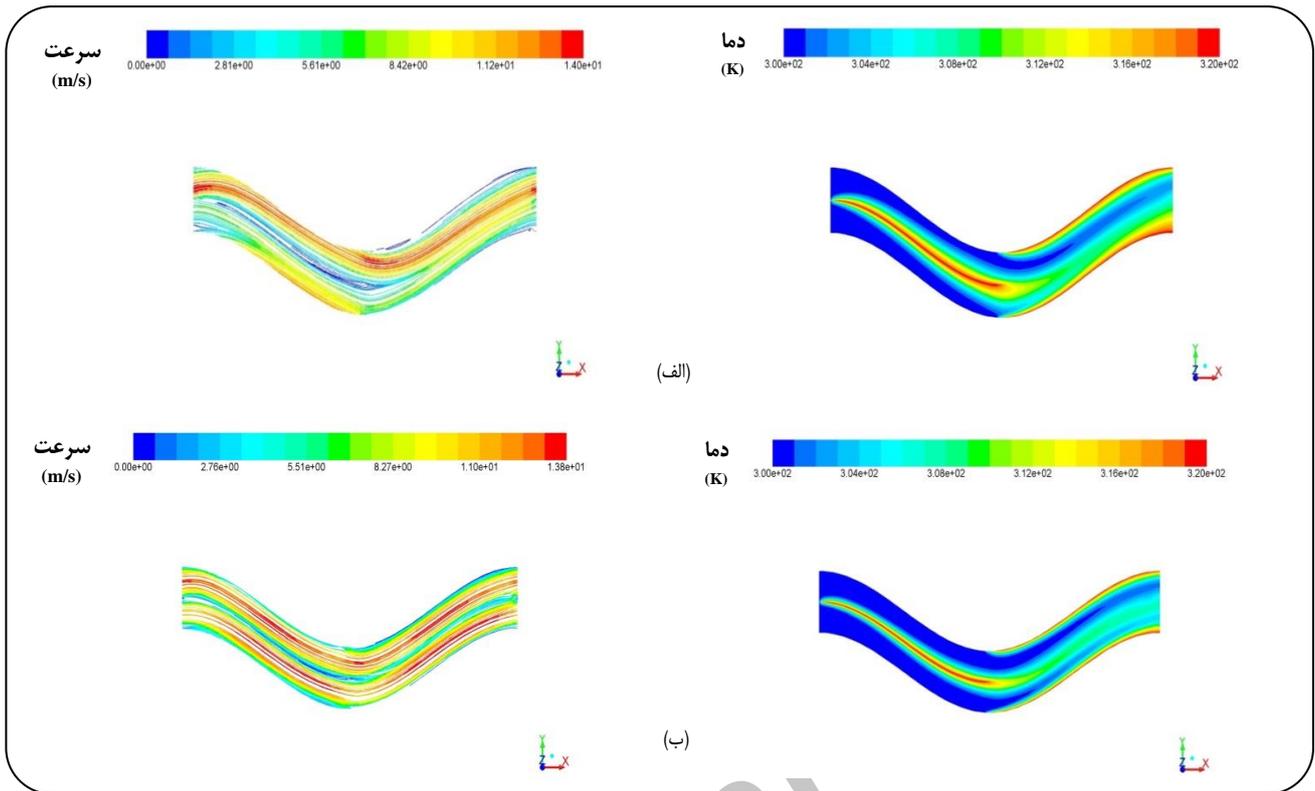
شکل ۲۳- خط‌های جریان برای پره C شکل ناپیوسته‌ی شماره‌ی ۱۲ در مقادیرهای گوناگون عدد رینولدز. الف) رژیم جریان آرام، ب) رژیم جریان آشفته.

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

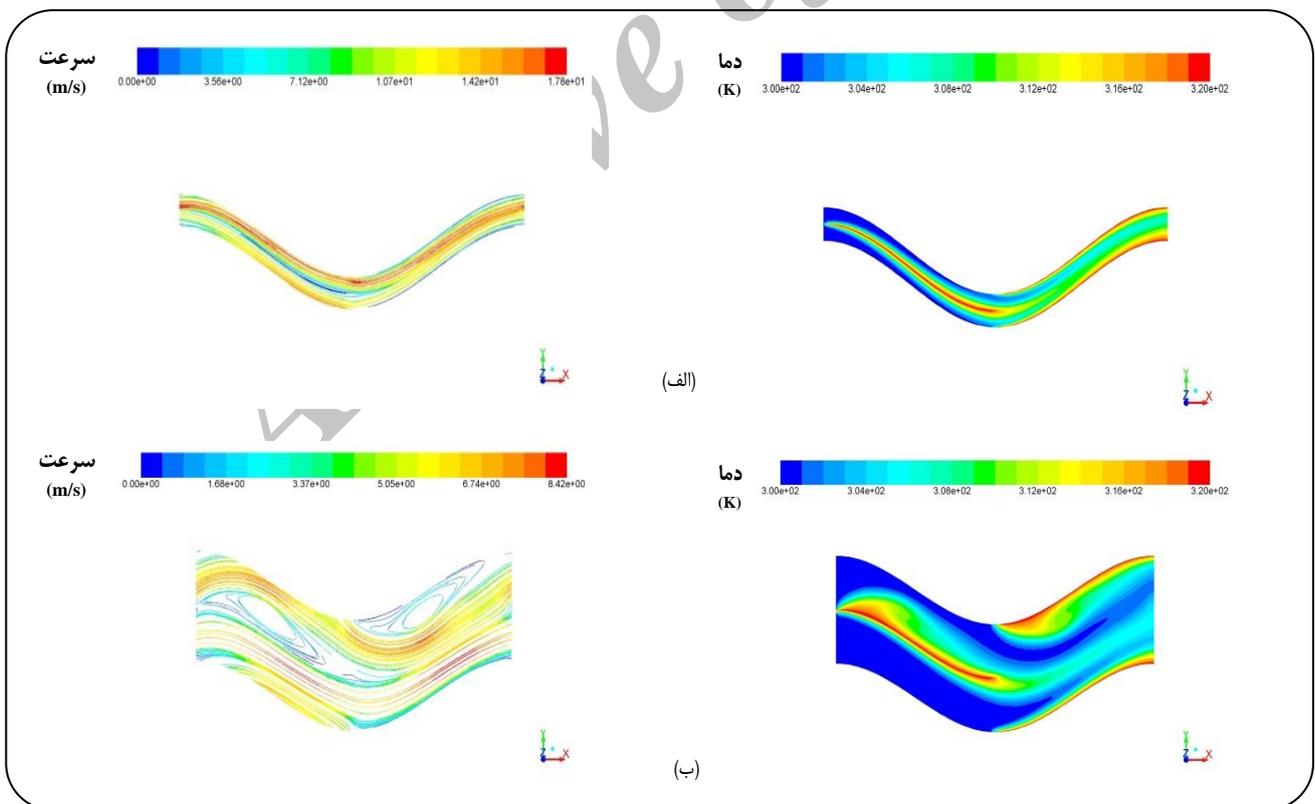
مقایسه ضریب‌های ز و f بین کانال‌های موج‌دار با دیواره‌های پیوسته و ناپیوسته

در این بخش، ضریب‌های ز و f پره‌های موج‌دار ناپیوسته و پیوسته مقایسه می‌شوند. پره‌های ۱، ۱۱، ۱۷ و ۱۸ که ویژگی‌های هندسی‌شان در جدول ۱ درج شده است، برای این مقایسه انتخاب شدند. شکل ۳۱ مقایسه‌ی ضریب‌های ز بین پره‌های موج‌دار ناپیوسته و پیوسته برای پره‌های ۱، ۱۱، ۱۷ و ۱۸ نشان می‌دهد. از این شکل‌ها دیده می‌شود که پره‌های موج‌دار با دیواره‌های ناپیوسته‌ی C شکل

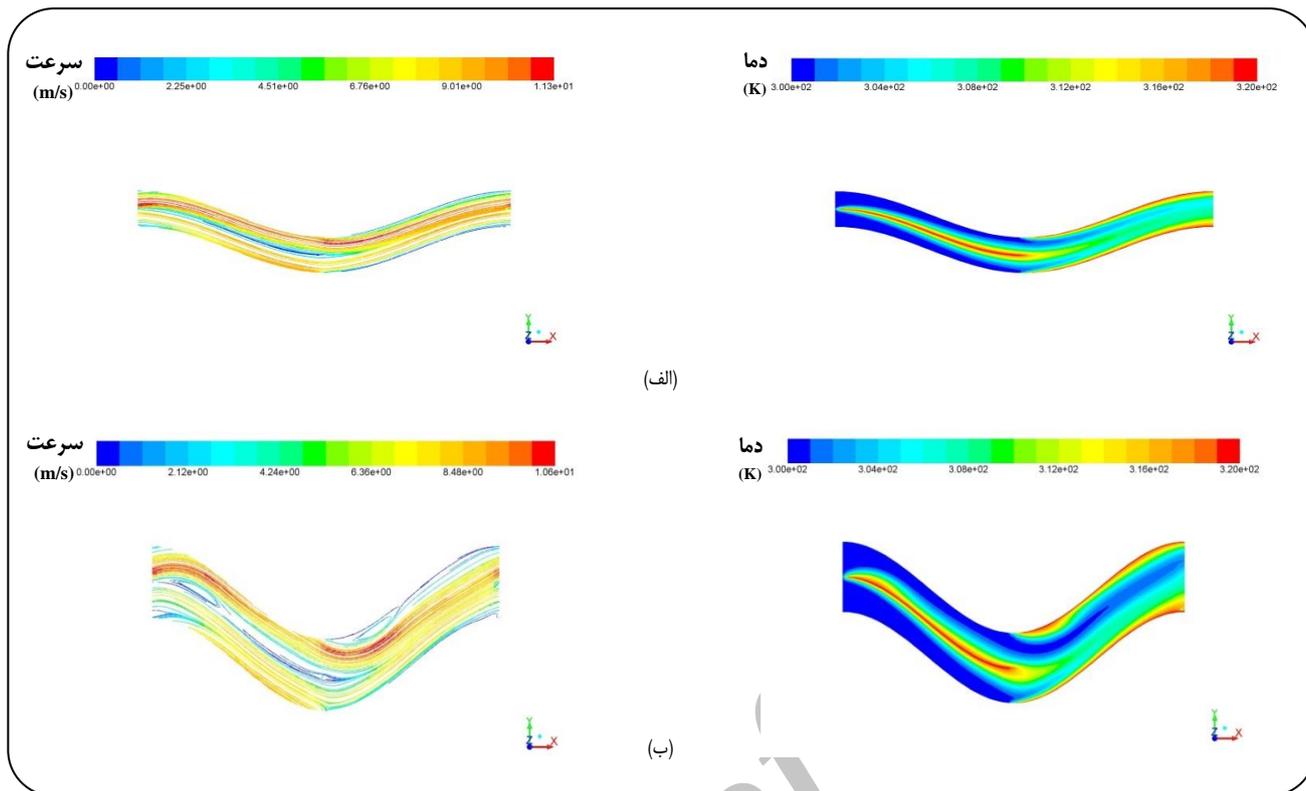
بررسی تغییرهای جریان و دما به ترتیب به واسطه‌ی خط‌های جریان و چگونگی توزیع دما نشان داده می‌شود. همان‌گونه که در شکل دیده می‌شود، بازه‌های جدایی به یک اندازه از هم گسیخته و به یکدیگر نزدیک می‌شوند. به عبارت دیگر با یک الگو منتقل می‌شوند که همچنین بر روی توزیع دما منعکس می‌شود. در قسمت میانی پره‌های موج‌دار با دیواره‌های ناپیوسته، گذرگاه جریان به واسطه‌ی برش ایجاد شده منقطع می‌شود که این مطلب پیشین اختلاط سیال را بالا می‌برد و دمای سیال یکنواخت‌تر می‌سازد. این اختلاط تقویت شده به واسطه‌ی از هم گسیختن لایه مرزی، انتقال گرما را بهبود می‌بخشد.



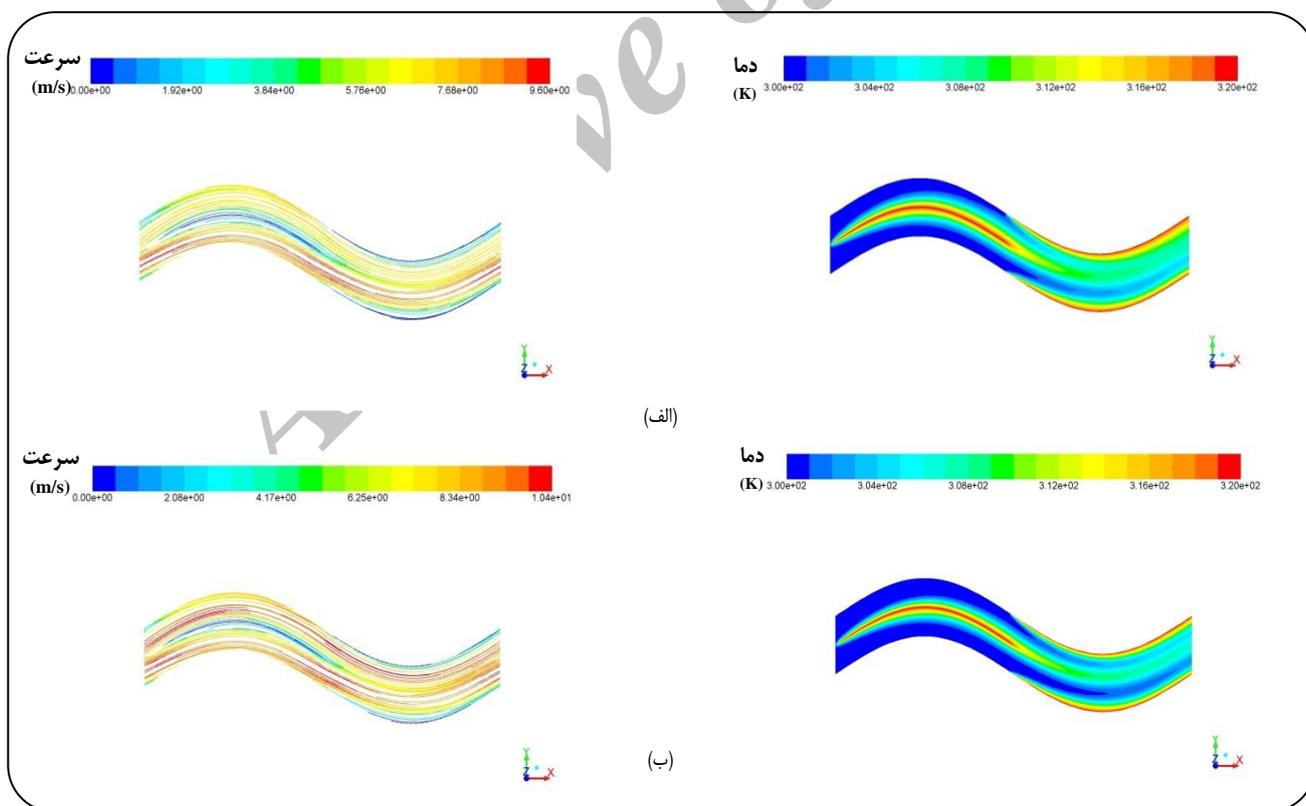
شکل ۲۴- خط‌های جریان و توزیع دما در سطح مقطع $(H/2)$ برای پره موج‌دار ناپیوسته‌ی S شکل در $Re=800$. الف) پره ۱، ب) پره ۶.



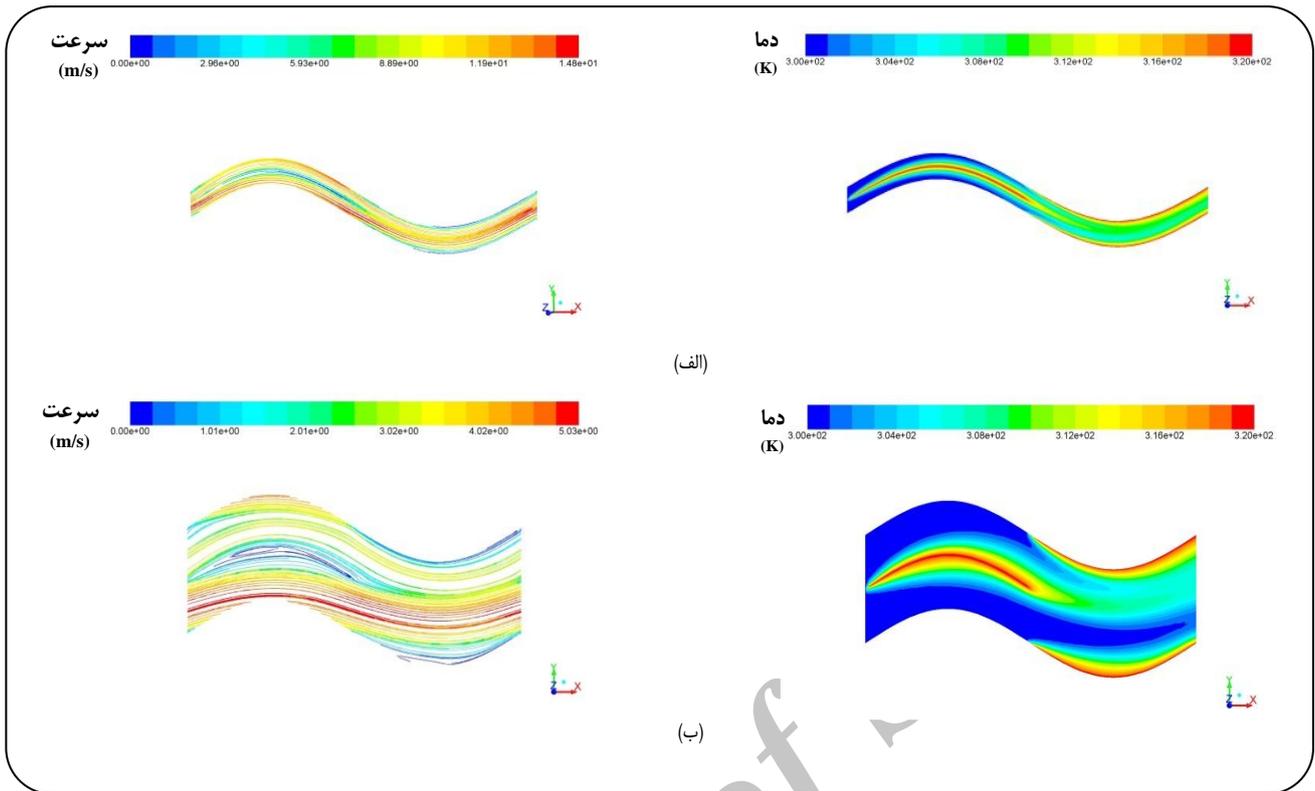
شکل ۲۵- خط‌های جریان و توزیع دما در سطح مقطع $(H/2)$ برای پره ناپیوسته‌ی S شکل در $Re=800$. الف) پره ۷، ب) پره ۱۲.



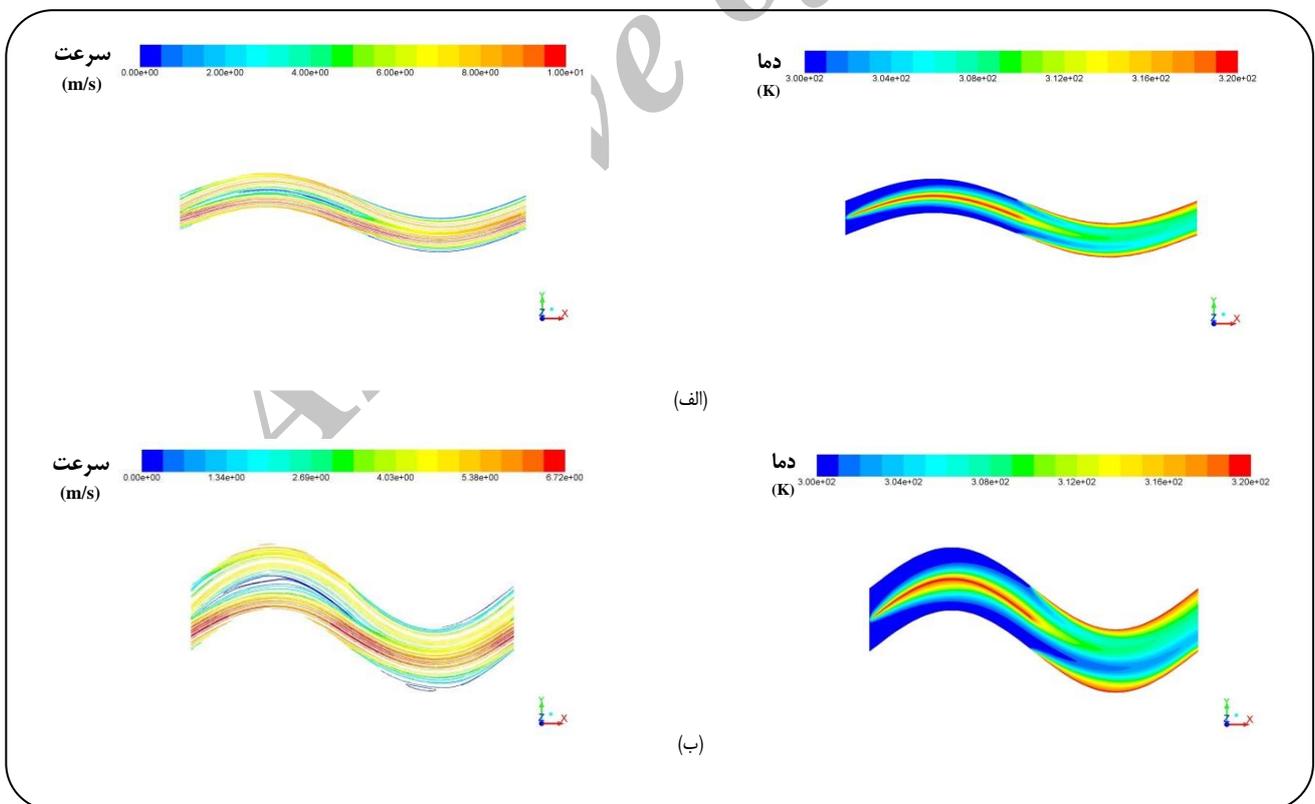
شکل ۲۶- خطهای جریان و توزیع دما در سطح مقطع (H/۲) برای پره ناپیوسته‌ی S شکل در $Re=800$. الف) پره ۱۳، ب) پره ۱۸.



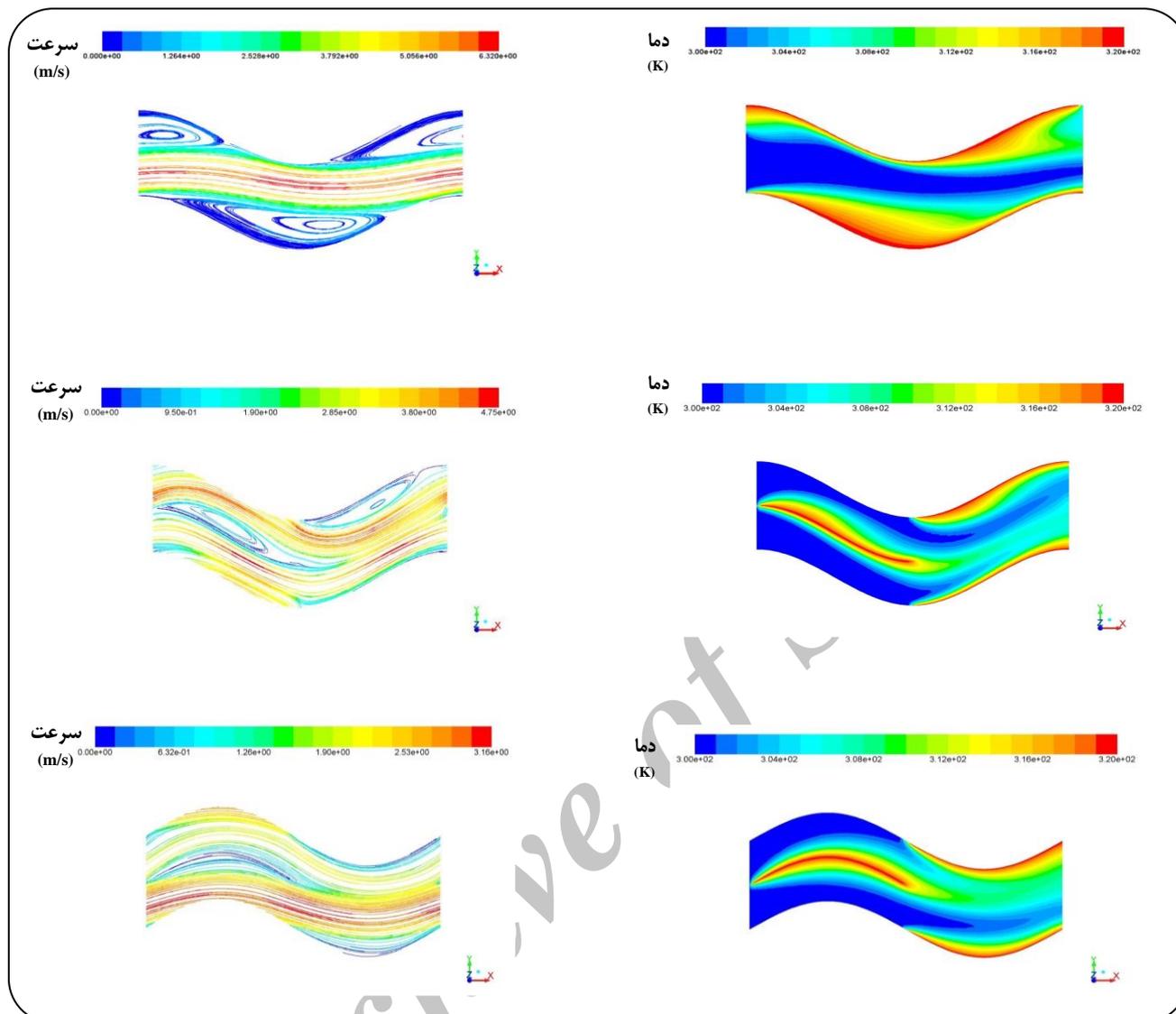
شکل ۲۷- خطهای جریان و توزیع دما در سطح مقطع (H/۲) برای پره ناپیوسته‌ی C شکل در $Re=800$. الف) پره ۱، ب) پره ۶.



شکل ۲۸- خط‌های جریان و توزیع دما در سطح مقطع $(H/2)$ برای پره ناپیوسته‌ی C شکل در $Re=800$ (الف) پره ۷، (ب) پره ۱۲.



شکل ۲۹- خط‌های جریان و توزیع دما در سطح مقطع $(H/2)$ برای پره ناپیوسته‌ی C شکل در $Re=800$ (الف) پره ۱۳، (ب) پره ۱۸.

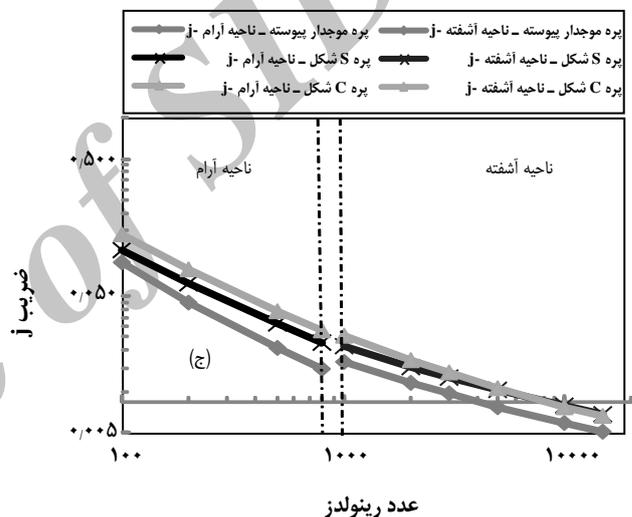
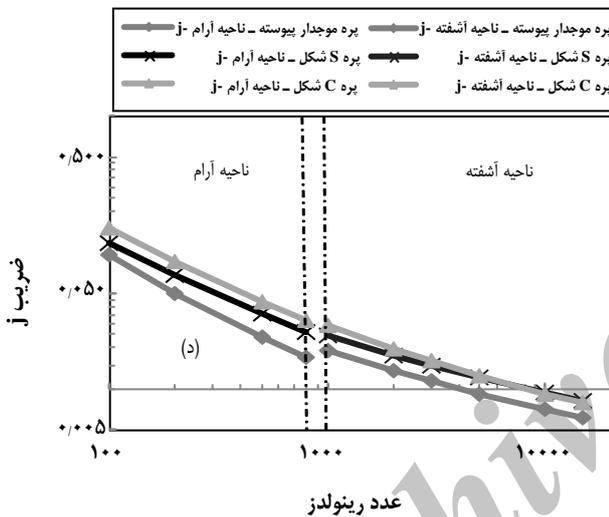
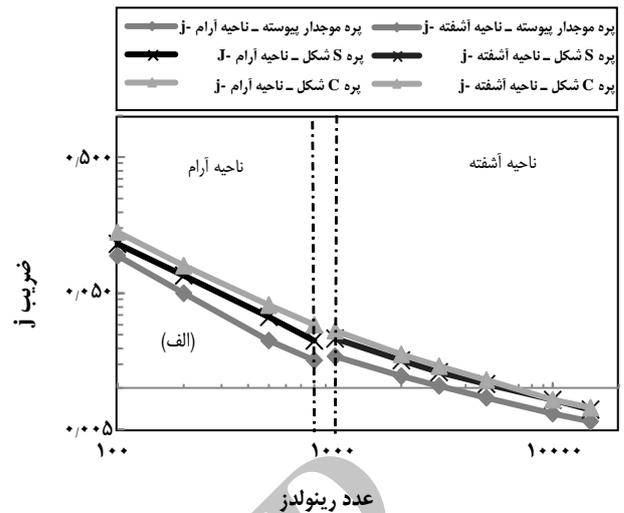
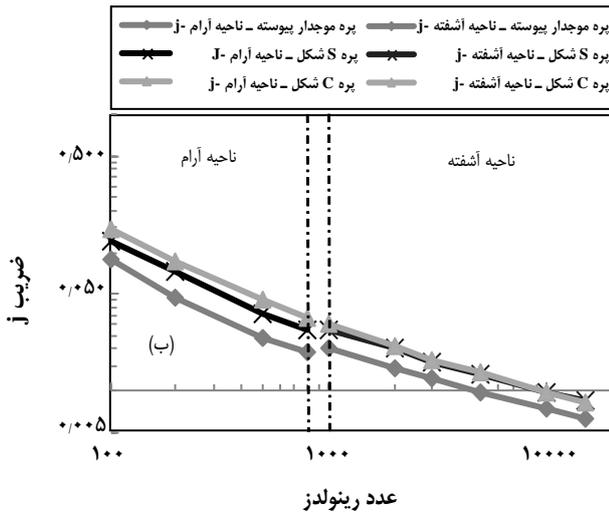


شکل ۳۰- مقایسه‌ی توزیع دما و خط‌های جریان بین پره‌های موج‌دار ناپیوسته و پیوسته در سطح مقطع $(H/2)$ برای پره شماره‌ی ۱۲.

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 C شکل، کاهش چشمگیر نواحی چرخش سیال سبب کاهش ضریب‌های f نسبت به دو پره دیگر می‌شود. شکل‌های خط‌های جریان

S شکل دارای ضریب‌های f بیشتری نسبت به پره‌های موج‌دار پیوسته هستند. از آنجایی که ضریب f دارای رابطه مستقیم با ضریب انتقال گرما می‌باشد، در نتیجه پره‌های موج‌دار ناپیوسته انتقال گرمای بیشتری را فراهم می‌کنند.

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 یکنواخت‌تر می‌سازد. این مطلب به روشنی در شکل ۳۰ نمایش داده می‌شود. همچنین پره‌های C شکل دارای ضریب‌های f بیشتری نسبت به پره‌های S شکل می‌باشند. در نتیجه پره‌های C شکل از نظر ضریب f دارای



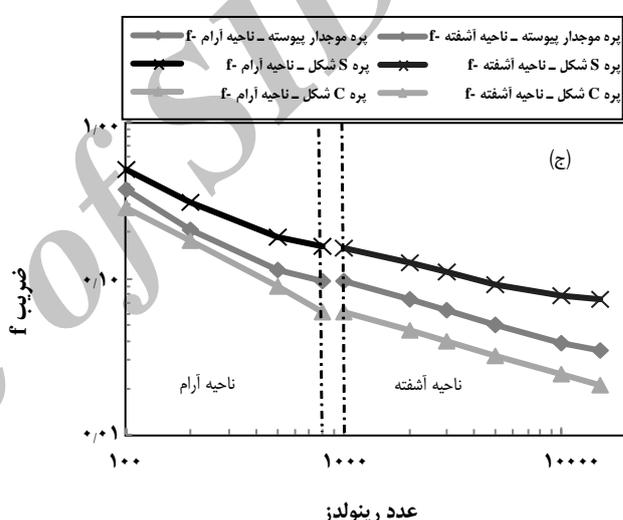
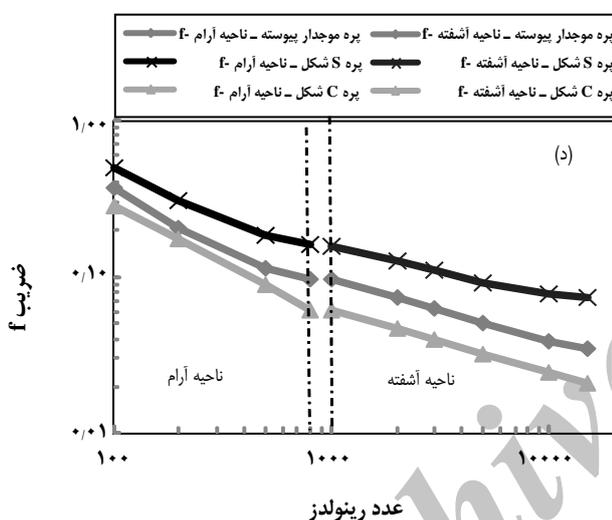
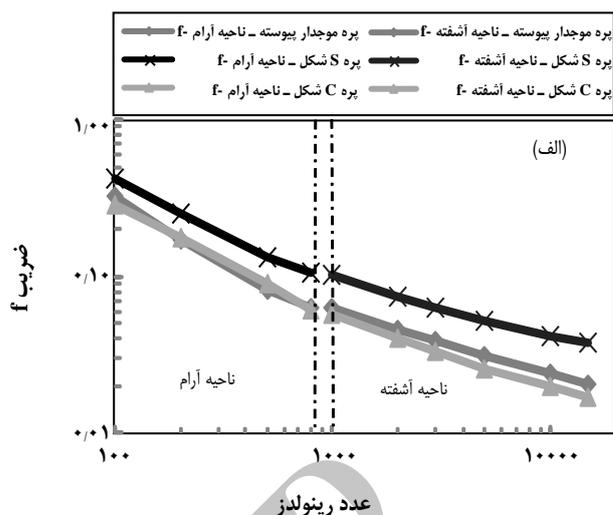
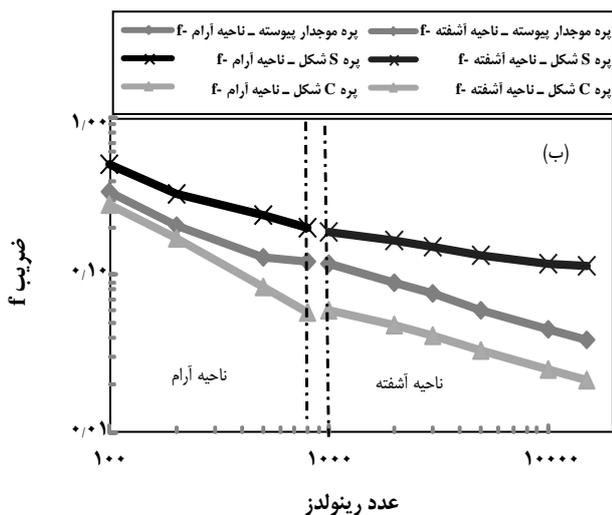
شکل ۳۱- مقایسه ضرایب f کانال موج‌دار سینوسی پیوسته و دو پره ناپیوسته‌ی S شکل و C شکل. (الف) برای پره شماره ۱، (ب) برای پره شماره ۱۱، (ج) برای پره شماره ۱۷، (د) برای پره شماره ۱۸.

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

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

یک هدف منطقی در طراحی مبدل گرمایی فشرده تولید کوچک‌ترین 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 ارائه می‌دهند، امکان‌پذیر می‌باشد.

در قسمت پیشین این مطالب را تأیید می‌کنند. پره‌های C شکلی که دارای اندازه‌های هندسی پره‌های ۱۱، ۱۷ و ۱۸ هستند، دارای ضرایب f بسیار کمتری نسبت به دو پره موج‌دار پیوسته و S شکل می‌باشند. اما در حالتی پره C شکل دارای ابعاد هندسی پره ۱ است، ضرایب‌های 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.



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.

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.

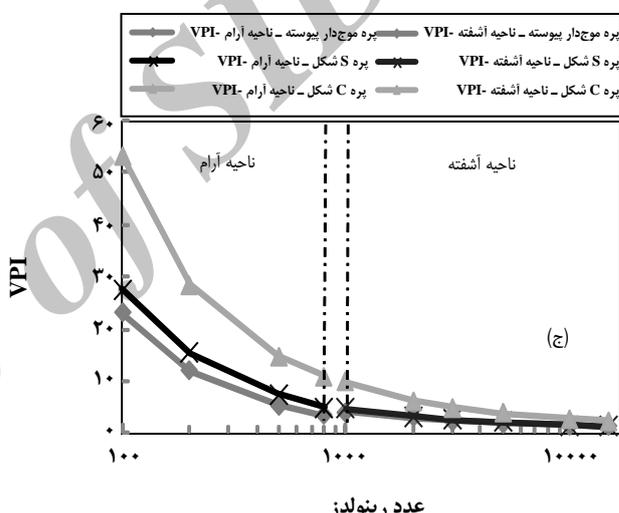
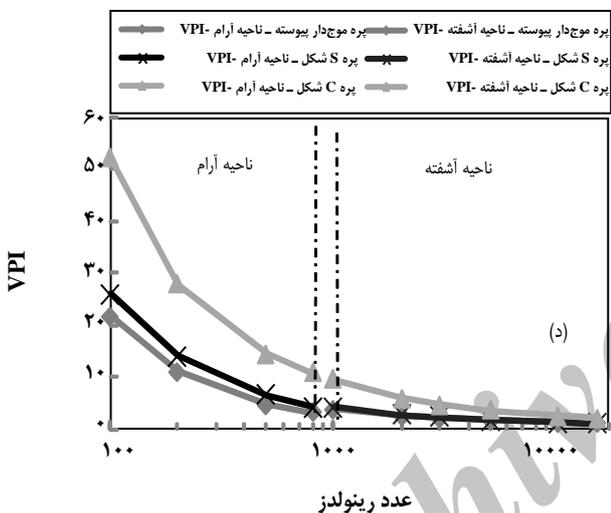
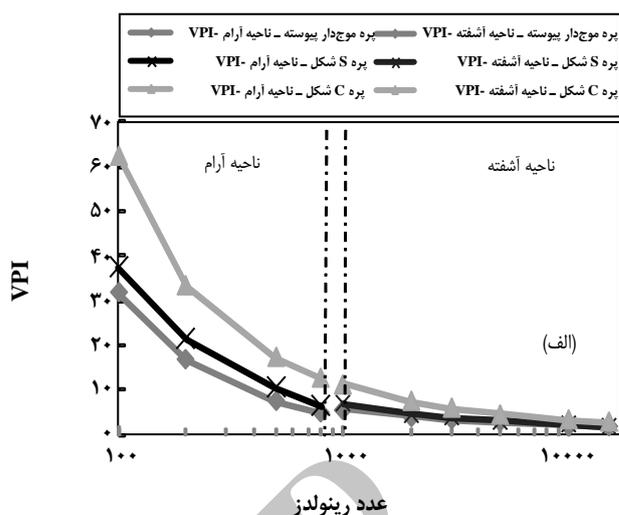
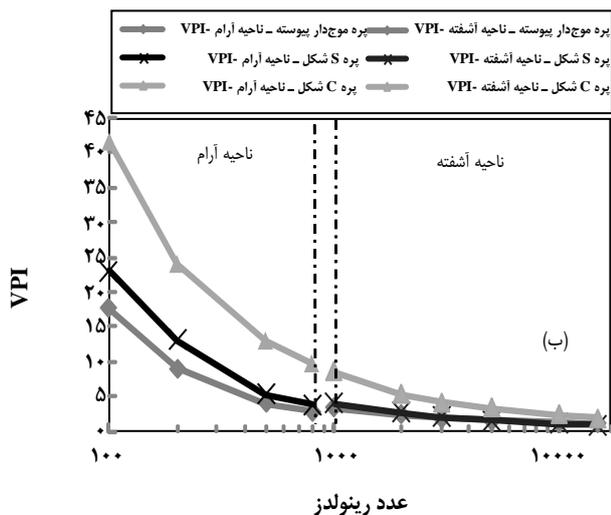
نتیجه‌گیری

در این مطالعه، شبیه‌سازی CFD برای مدل گرمایی صفحه‌ای پرده‌دار با پره‌ی موج‌دار در بازه‌ی گسترده‌ای از عدد رینولدز

در این قسمت عملکرد پره‌های موج‌دار ناپیوسته و پیوسته از نظر شاخص عملکرد حجم (VPI) مقایسه می‌شود و مانند بخش پیشین، پره‌های ۱، ۱۱، ۱۷ و ۱۸ که ویژگی‌های هندسی‌شان 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 می‌شود.

$$VPI = \frac{\left(\frac{St}{f}\right)^{\frac{1}{3}}}{d_h} \quad (16)$$

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



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.

• برای پره موج‌دار پیوسته، اثر تغییر α سرتاسر بازه‌ی $20/833 \leq \alpha \leq 1/176$ در مقدارهای ثابت $\beta = 1/3$ و $\gamma = 5$ بررسی و دیده شد که افزایش α سبب افزایش مقدارهای z و f می‌شود. همچنین اثر تغییر β سرتاسر بازه‌ی $0/636 \leq \beta \leq 2/6$ در مقدارهای ثابت $\alpha = 11$ و $\gamma = 1/3$ و اثر تغییر γ سرتاسر محدوده‌ی $3/846 \leq \gamma \leq 7/693$ در مقدارهای ثابت $\alpha = 11$ و $\beta = 1/3$ بررسی شد. این بررسی نشان می‌دهد که افزایش مقدارهای β و γ سبب کاهش مقدارهای z و f می‌شود. برای پره‌های موج‌دار ناپیوسته‌ی S شکل و C شکل، اثر پارامترهای هندسی بدون بعد α ، β و γ در بازه‌های یاد شده

($100 \leq Re \leq 15000$) انجام شده است که هوا به عنوان سیال عامل در نظر گرفته می‌شود. جریان هوا به طور کامل توسعه یافته تناوبی فرض می‌شود و شرط مرزی دمای ثابت دیوار اعمال می‌شود. اثر ۴ پارامتر هندسی ارتفاع پره، فاصله‌بندی بین پره، دامنه و طول موج پره‌های موج‌دار در قالب پارامترهای هندسی بدون بعد (α و β و γ) روی ضریب‌های z 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 می‌باشند:

L_p	طول موج پره موج‌دار، m	برای پره‌های موج‌دار پیوسته بررسی می‌شوند. اثر این پارامترها
Pr	عدد پراتل	روی ضریب‌ها z و f برای هر دو پره موج‌دار ناپیوسته مانند پره‌ی
ΔP	افت فشار، Pa/m	موج‌دار پیوسته می‌باشند. به عبارت دیگر با افزایش α و کاهش دو
Re	عدد رینولدز	پارمتر β و γ ضریب‌ها z و f افزایش می‌یابند.
s	فاصله‌بندی بین پره، m	• از مطالعه‌ی اثر پارامترهای هندسی، دیده می‌شود که توسعه
St	عدد استانتون	جریان گردابی عرضی، نقش مهمی را در افزایش انتقال گرما و
T_i	دمای هوای ورودی، K	مومنوم بازی می‌کند.
T_o	دمای هوای خروجی، K	• برش دادن و کوتاه کردن طول دیواره‌ی پره‌های موج‌دار
T_w	دمای دیواره‌ی پره، K	به طور چشمگیری ضریب انتقال گرما را بهبود می‌بخشد.
ΔT_{LMTD}	اختلاف درجه گرمایی متوسط لگاریتمی، K	همچنین برش دادن دیواره‌ی پره اختلاط گرمایی و تخریب
v	سرعت جریان، m/s	پیوسته لایه‌های مرزی گرمایی و جریان افزایش می‌دهد.
U	ضریب انتقال گرمای کلی، $\frac{W}{m^2 K}$	• پره‌های موج‌دار ناپیوسته‌ی C شکل و S شکل با پره‌ی
V	حجم مبدل، m^3	موج‌دار پیوسته از نظر شاخص عملکرد حجم مقایسه می‌شوند.
VPI	شاخص عملکرد حجم	این مقایسه نشان می‌دهد که پره‌های موج‌دار ناپیوسته دارای VPI
Y^+	فاصله‌ی بدون بعد از دیواره، $(\Delta y_p v) \sqrt{\tau_w / \rho}$	بیشتری می‌باشند و در نتیجه حجم کمتری نسبت به پره‌های
		پیوسته در طراحی اشغال می‌کنند.

حروف یونانی

نمادها

α	نسبت ارتفاع به فاصله‌بندی پره، h/s	$2A$	دو برابر دامنه‌ی پره موج‌دار، m
β	نسبت دامنه به فاصله‌بندی پره، $2A/s$	C_p	ظرفیت گرمایی سیال، $\frac{J}{kgK}$
γ	نسبت طول موج به دامنه‌ی پره، $L_p/2A$	d_h	قطر هیدرولیکی، m
μ	گرانروی، kg/ms	f	ضریب اصطکاک فینینگ
ρ	دانسیته، kg/m^3	h	ضریب انتقال گرما، $\frac{W}{m^2 K}$
κ	انرژی جنبشی آشفتگی، m^2/s^2	H	ارتفاع پره موج‌دار، m
ε	نرخ از بین رفتن آشفتگی، m^3/s^3	j	ضریب گرمایی کلورن
		k	ضریب هدایت گرمایی، $\frac{W}{m^2 K}$

تاریخ دریافت: ۱۳۹۳/۸/۱۸؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۴/۳/۱۸

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).
- [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).

- [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., Haghghi 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] جعفری نصر، محمدرضا؛ سعیدان، مهسا؛ طراحی بهینه و مدل سازی مبدل های حرارتی قاب و صفحه ای، نشریه شیمی و مهندسی شیمی ایران، (۴) ۲۷: ۷۹ 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).

Archive of SID