

بررسی تجربی انتقال حرارت و افت فشار در کانال گرمکن هوای خورشیدی دارای دندان‌های سوراخ دار

فراز میرالی، الهام محمدی نقده، محمد انصاری، مجید بازارگان*

دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۸/۰۷/۲۸
بازنگری: ۱۳۹۸/۱۲/۱۵
پذیرش: ۱۳۹۹/۰۲/۱۴
ارائه آنلاین: ۱۳۹۹/۰۳/۰۳

کلمات کلیدی:

انتقال حرارت جابهجایی
دندان‌های سوراخ
افت فشار
گرمکن هوای خورشیدی
بررسی تجربی

خلاصه: در مطالعه حاضر انتقال حرارت و افت فشار جریان هوا در داخل کانال مربعی با دندان‌های دارای سوراخ به شکل تجربی بررسی می‌شود و فرضیه تأثیر ایجاد سوراخ در ازبین‌بردن یا کاهش اثر مخرب ناحیه‌ی کم فشار در پشت دندان که باعث کاهش افت فشار می‌شود، مورد واکاوی قرار گرفت. محدوده رینولدز ۱۵۰۰۰ تا ۵۰۰۰۰، نسبت ارتفاع دندان به قطر هیدرولیکی کانال ۰/۱۱ و ۰/۱۴، نسبت قطر سوراخ به ارتفاع دندان ۰/۳ و ۰/۵ و نسبت گام دندان به قطر کانال در مقادیر ۲۰، ۲۵ و ۳۰ بررسی شد. نتایج به منظور اعتبارسنجی با نتایج دندان‌های معمولی مطالعات پیشین مقایسه شدند که صحت نتایج تجربی تأیید شد. نتایج نشان داد که با ایجاد سوراخ در دندان، افت فشار و مقدار ناسلت توأمان کاهش می‌یابد؛ این تأثیر نامطلوب در گام‌های کوچکتر مشهودتر است. از طرف دیگر، ایجاد سوراخ در دندان‌های بلندتر باعث بهبود عملکرد حرارتی می‌شود. ضریب عملکرد در بهترین حالت تا ۱۷ درصد افزایش یافت. در مواردی که گام دندان‌ها بزرگتر است، دندان‌های دارای سوراخ می‌تواند در کاربردهایی که نیاز به افزایش انتقال حرارت یا کاهش دمای دیواره است و مصرف انرژی دمنده اهمیت کمتری دارد، عملکرد سیستم مربوطه نظیر گرمکن خورشیدی را تا حد چشمگیری افزایش دهند.

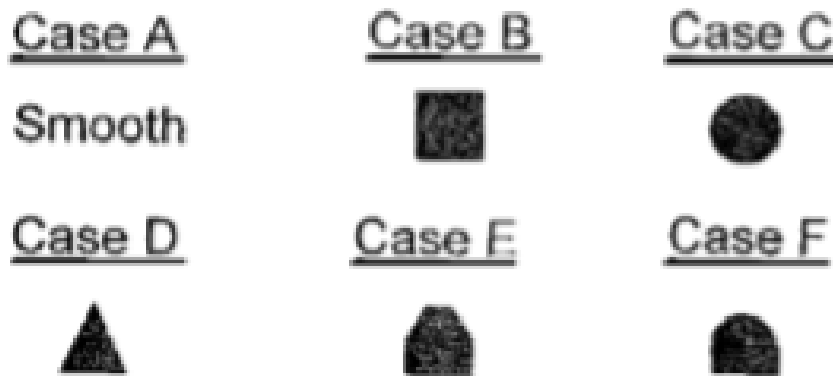
۱- مقدمه

صورت گرفته است.
هان و همکاران [۱] به بررسی اثرات دندان‌های متفاوت گام دندان به ارتفاع آن و همچنین زاویه‌های حمله‌ی گوناگون در محدوده‌ی رینولدز ۷۰۰۰ تا ۹۰۰۰۰ پرداختند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که بهترین عملکرد حرارتی مربوط به زاویه‌ی ۳۰ و ۴۵ درجه دندان‌ها می‌باشد. جین و همکاران [۲] به صورت عددی انتقال حرارت صفحه‌ی جاذب یک گرمکن خورشیدی با دندان‌های V شکل را در محدوده‌ی رینولدز ۲۰۰۰ تا ۸۰۰۰ مورد بررسی قرار دادند و دریافتند با افزایش گام، عدد ناسلت، ضریب افت فشار و بازده حرارتی کاهش می‌یابد. ناسلت متوسط و ضریب افت فشار با افزایش ارتفاع دندان‌ها افزایش پیدا می‌کنند در حالی که بازده حرارتی کاهش می‌یابد.

بهبود انتقال حرارت در خنک‌کاری پره‌های توربین و گرمکن‌های هوای خورشیدی همواره از اهمیت ویژه برخوردار بوده است. یکی از راه‌های افزایش انتقال حرارت در کانال‌ها، استفاده از دندان‌ها است. بر خلاف پره که با افزایش سطح انتقال حرارت به افزایش نرخ انتقال حرارت کمک می‌کند، در دندان‌ها مکانیزم افزایش نرخ انتقال حرارت، ایجاد آشفتگی و ازبین‌بردن و برهم‌زدن لایه مرزی در سطح است. حضور دندان‌ها معمولاً باعث دو اثر متضاد می‌گردد. اثر مطلوب آن افزایش انتقال حرارت و اثر نامطلوب آن افزایش افت فشار است. در زمینه تأثیر دندان‌ها بر جریان داخل کانال‌ها مطالعات گسترده‌ای

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: bazargan@kntu.ac.ir





شکل ۱: شکل دندانه‌ها در مطالعه‌ی چاندرا و همکاران [۹]

Fig 1. The shapes of ribs on Chandra et al. studies

قطر هیدرولیکی کانال، دست به تغییر ارتفاع کانال زدند. آن‌ها با ثابت در نظر گرفتن عرض کانال، آزمایش‌ها را برای چند ارتفاع مختلف کانال انجام دادند. بررسی‌ها در دو حالت دبی جرمی و رینولدز ثابت صورت گرفت. نتایج نشان داد که در یک دبی جرمی ثابت با کاهش ارتفاع کانال، انتقال حرارت بهتر صورت می‌گیرد. همچنین در رینولدز ثابت بیشترین مقدار ناسلت برای ارتفاع 0.10 متر گزارش شد. دسروس و همکاران [۶] به صورت عددی، انتقال حرارت و افت فشار در یک کانال با دندانه‌های یک در میان را مورد مطالعه قرار دادند. جریان آرام، تراکم‌ناپذیر و محدوده‌ی رینولدز بین 75 تا 2000 بود و به این نتیجه رسیدند که در این محدوده، ضریب افت فشار با افزایش رینولدز به صورت یکنواخت کاهش می‌یابد. در حالی که انتقال حرارت فقط در صورتی که رینولدز بزرگتر از یک مقدار بحرانی باشد به صورت یکنواخت افزایش می‌یابد.

سریرمرون و همکاران [۷] مطالعه‌ی عددی و تجربی بر روی کانال‌های دندانه‌دار با زائده‌های زیگزاگی شکل انجام دادند. مقادیر مختلف از نسبت گام و عرض زائده در زاویه حمله 45 درجه مورد بررسی قرار داده شد. آزمایش‌ها در محدوده‌ی رینولدز 4400 - 20400 انجام گرفت. نتایج نشان داد بهترین عملکرد حرارتی مربوط به نسبت عرض 0.1 و نسبت گام $1/5$ می‌باشد. ژی و همکاران [۸] به صورت عددی مطالعه بر روی جریان آشفتگی در کانال‌های دندانه‌دار را بررسی کردند و این کار را با دندانه‌های کوتاه‌شده در محدوده‌ی

بیشترین مقدار عدد ناسلت و بازدهی حرارتی در زاویه‌ی حمله‌ی 45 درجه و بیشترین ضریب افت فشار مربوط به زاویه‌ی حمله‌ی 60 درجه می‌باشد.

لیو و همکاران [۳] با بررسی نسبت گام به ارتفاع دندانه و نسبت ارتفاع دندانه به قطر هیدرولیکی کانال در محدوده‌ی رینولدز 5000 تا 5400 به این نتیجه رسیدند که در یک رینولدز ثابت با افزایش نسبت ارتفاع دندانه به قطر هیدرولیکی کانال، مقادیر ضریب افت فشار و عدد ناسلت کاهش پیدا کرد. این مقادیر در یک نسبت ارتفاع دندانه به قطر هیدرولیکی کانال، با افزایش نسبت گام به ارتفاع دندانه کاهش پیدا کرد. تاندا و همکاران [۴] مطالعه‌ای تجربی بر روی اثر فاصله‌ی دندانه بر انتقال حرارت و افت فشار در کانال مستطیلی انجام دادند. آزمایش‌ها با قراردادن دندانه‌ها روی یک سطح و دو سطح کانال و در محدوده‌ی رینولدز بین 9000 تا 35500 ترتیب داده شدند. نتایج آزمایش آن‌ها نشان داد زمانی که فاصله‌ی بین دندانه‌ها از هم زیاد است عدد ناسلت در پایین‌دست دندانه شروع به افزایش کرده تا در یک نقطه به مقدار بیشینه می‌رسد. برای فواصل کم، ابتدا عدد ناسلت در پایین‌دست دندانه کاهش می‌یابد و سپس تا دندانه‌ی جلویی افزایش می‌یابد. آن‌ها مقدار بهینه برای یک سطح دندانه‌دار را در نسبت گام به ارتفاع $13/33$ و برای حالتی که دندانه‌ها روی دو سطح کانال قرار داشتند این نسبت را برابر با 10 به دست آوردند. چانگ و همکاران [۵] به منظور بررسی نسبت بی‌بعد دندانه به

پشت دندانها می‌باشد. ایجاد سوراخ در دندان می‌تواند با عبور جریان پرفشار شدت ناحیه‌ی کم فشار را کاهش دهد. این ایده در این مقاله مورد واکاوی قرار گرفته است که با ایجاد سوراخ در سطح دندان چه تغییراتی در افت فشار و نرخ انتقال حرارت داخل کانال گرمکن هوای خورشیدی پدید می‌آیند. این پرسش به روش تجربی مورد پژوهش قرار گرفته است.

۲- روش تحقیق

مقاله حاضر عمدتاً بر مبنای اندازه‌گیری آزمایشگاهی می‌باشد. به منظور توجیه مشاهدات تجربی به توصیف فیزیکی پارامترها و فرایندهای موثر بر افت فشار و انتقال حرارت پرداخته شده است.

۲-۱- شرح دستگاه آزمایشی

دستگاه آزمایش شامل فن، اوریفیس و مانومتر، گرمکن الکتریکی، کانال عایق شده‌ی هوا، مانومتر مربوط به افت فشار داخل کانال و سنسورهای اندازه‌گیری دما می‌باشد. این تجهیزات برای پیدا کردن ضریب انتقال حرارت و ضریب افت فشار و افت فشار استفاده می‌شوند. تصاویری از قسمت‌های مختلف دستگاه و همچنین شماتیکی از دستگاه در شکل‌های ۲-الف و ۲-ب قابل رویت است. هوا از طریق دمند در کانال جریان می‌یابد و دبی آن از طریق اوریفیس اندازه‌گیری شده و وارد ناحیه‌ی ورودی می‌شود تا توسعه‌یافته گردد. سپس هوا وارد محفظه آزمایش که دندانها در سطح بالایی آن قرار گرفته‌اند و دیواره بالایی آن تحت شار گرمایی ثابت و یکنواخت می‌باشد، می‌شود. در این محفظه دما با نصب ترمیستورها در محل‌های مشخص از سطح اندازه‌گیری می‌شود.

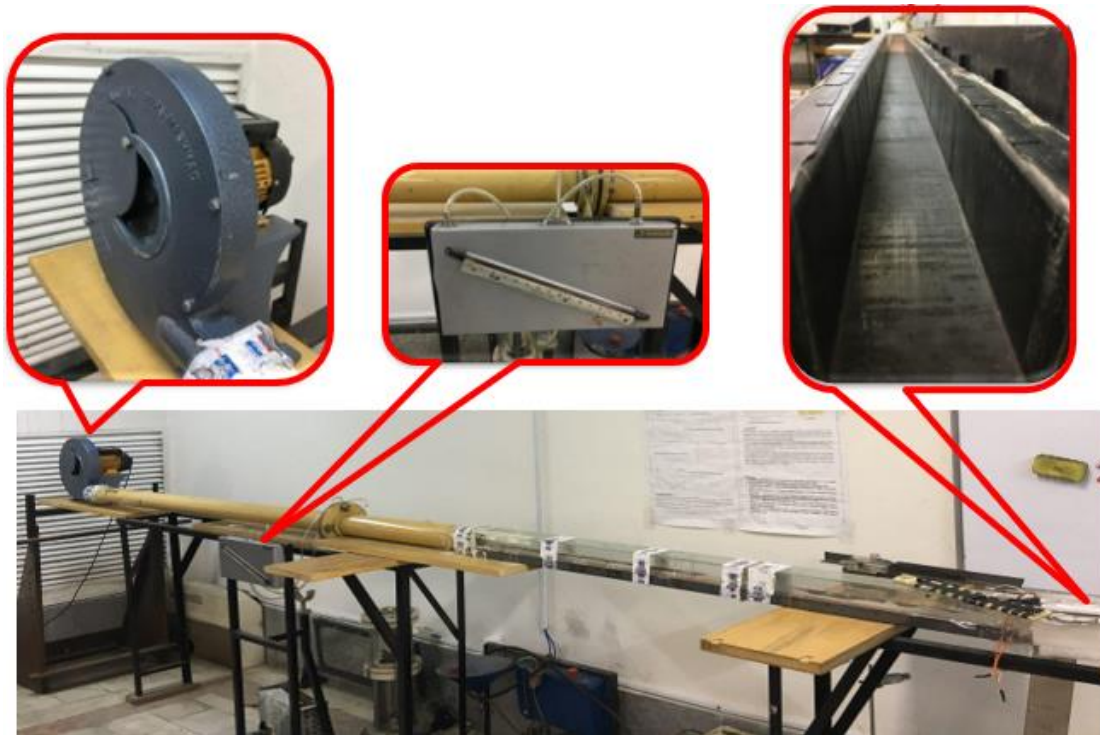
در این آزمایش از فن سانتریفوژ استفاده شد. دبی هوای عبوری را می‌توان با باز و بسته کردن دریچه در سمت مکش کنترل کرد. مجموعه فن در شکل ۲ قابل مشاهده است. بیشترین دبی خروجی فن برابر با ۶۰ لیتر بر دقیقه است. برای اندازه‌گیری دبی هوای عبوری از اوریفیس نصب شده بر لوله به قطر ۰/۰۷۶ سانتی‌متر استفاده شده است. در شکل ۳ اوریفیس نمایش داده شده است. اساس کار سیستم‌های اندازه‌گیری اریفیس بر اساس رابطه برنولی است که روابط بین انرژی استاتیکی و جنبشی داخل جریان یک سیال را توضیح می‌دهد. سیال عبوری از یک مانع، شتاب می‌گیرد و انرژی

رینولدز ۸۰۰۰ تا ۲۴۰۰۰ انجام دادند. چهار حالت چیدمان مورد بررسی قرار گرفت که در همه، درصد مشخصی از سطح بالای دندان به شکل ایجاد پله از دندان کاسته شد. مکان سطوح کاسته شده در حالت‌های مختلف، متفاوت بود. نتایج آن‌ها نشان داد بیشترین انتقال حرارت مربوط به حالتی بود که پله کوتاه در مرکز دندان واقع شده بود و بهترین افت فشار مربوط به حالتی بود که سه پله با مجموع عرض مشابه پله‌های قبلی به شکل متقارن در سه طرف دندان ایجاد شده بود.

چاندرا و همکاران [۹] به صورت تجربی بر شکل سطح مقطع دندان متمرکز شدند. آن‌ها در محدوده‌ی رینولدز ۱۰۰۰۰ تا ۱۰۰۰۰۰ برای پنج شکل مختلف به علاوه‌ی سطح صاف بدون دندان، همان گونه که در شکل ۱ نشان داده شده است، آزمایش انجام دادند. نتایج نشان داد که بیشترین افت فشار مربوط به دندان‌های با سطح مقطع دایروی و مربعی و بیشترین افزایش انتقال حرارت برای مقاطع مربعی و تقریباً نیم‌دایره‌ای می‌باشد.

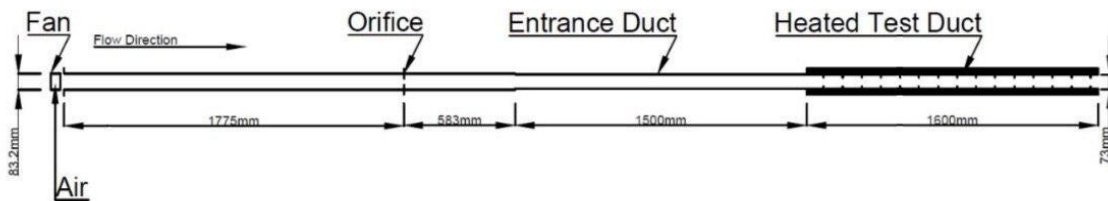
انصاری و بازارگان [۱۰، ۱۱] به بررسی استفاده از دندان در بهبود عملکرد گرمکن خورشیدی و بهینه‌سازی پارامترهای هندسی دندان پرداختند. آن‌ها مدل ریاضی گرمکن هوای خورشیدی با دندانها را توسعه دادند و سپس به بهینه‌سازی هندسه و چیدمان دندانها به کمک الگوریتم ژنتیک پرداختند. نتایج مطالعات آن‌ها نشان داد که استفاده از دندان در گرمکن خورشیدی می‌تواند تا ۹٪ عملکرد گرمکن خورشیدی را افزایش دهد.

با توجه به این که کاربرد دندانها در گرمکن هوای خورشیدی مورد توجه مطالعه حاضر است، شرایط آزمایش از قبیل شار حرارتی و محدوده رینولدز بر اساس مقادیر متداول در گرمکن هوای خورشیدی صفحه‌ای با دمند انتخاب شدند. معادل شار حرارتی خورشید به وسیله گرمکن الکتریکی تأمین شده است. در مطالعات تجربی که تاکنون صورت یافته پژوهشگران به دنبال یافتن شکل بهینه‌ای از دندان با مناسب‌ترین طراحی و چیدمان بوده‌اند. اما به دلیل تجربی بودن و تنوع بررسی‌ها، معیار روشنی که به صورت یک رابطه‌ی ریاضی بیان شود برای این مسئله وجود ندارد. به همین دلیل تحقیقات در زمینه‌ی یافتن شکل بهینه‌ی دندانها هنوز ادامه دارد. یک عامل مهم ایجاد محدودیت در کاربرد دندانها، افزایش قابل توجه افت فشار است. بخش عمده‌ی افت فشار بر اثر گردابه‌ها و ناحیه‌ی فشار پایین در



شکل ۲-الف: نمای کلی دستگاه آزمایش

Fig 2a. Overview of the test rig



شکل ۲-ب: شماتیک دستگاه آزمایش

Fig 2b. Schematic of the test rig

متر مربع به گونه‌ای قرار گرفته است که از هرگونه ناپایداری و لغزش در طول جلوگیری کند. جریان خروجی از اوریفیس ابتدا وارد کانال شیشه‌ای جهت توسعه یافتگی جریان شده و سپس وارد محفظه‌ی آزمایش می‌شود. محفظه‌ی آزمایش از کانالی به طول $1/6$ متر و سطح مقطع $0/073$ در $0/073$ مترمربع و از جنس فولاد به ضخامت $0/002$ متر که مدت زمان آزمایش تا رسیدن به حالت پایدار را کم کند. همچنین قسمت بالایی کانال به منظور دسترسی به داخل آن جهت قراردادن دندان، متحرک است که در شکل ۴ نمایش داده شده

جنبشی آن افزایش می‌یابد که این افزایش به واسطه کاهش انرژی پتانسیل سیال است. سوراخهایی بر روی کانال آزمایش تعبیه شده است که بتوان به وسیله آن افت فشار را بر روی مانومتر اندازه‌گیری کرد، دقت شد تا ابعاد سوراخها و نحوه ایجاد آنها به نحوی باشد که بر جریان داخل کانال تأثیر ناچیزی داشته باشد. دبی هوا نیز با کمک اوریفیس و مانومتر مربوطه محاسبه شد. ضریب اوریفیس بر اساس مشخصات فنی سازنده برابر با $0/62$ است.

میز آزمایشگاه در ارتفاع ۱ متر از سطح زمین و سطح $0/15$ در ۲



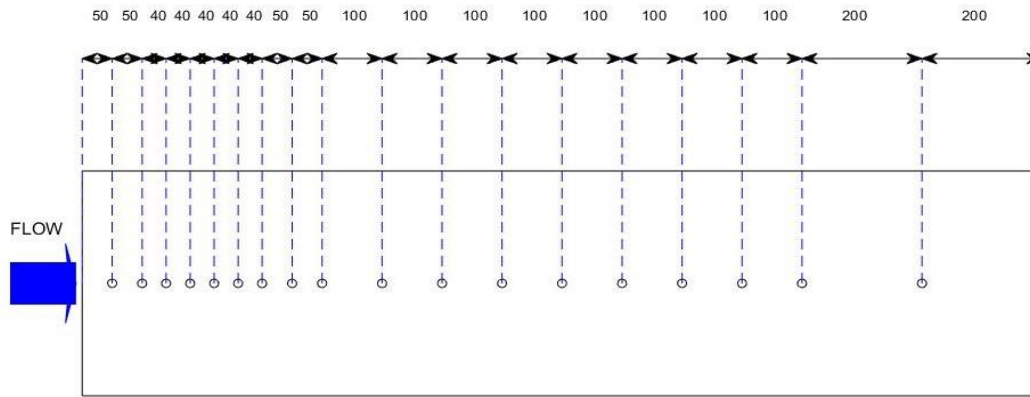
شکل ۳: کانال های دایره ای و اوریفیس

Fig 3. Circular channels and orifice



شکل ۴: محفظه آزمایش با مقطع مربع و جنس فولاد

Fig 4. Test section with square cross section and steel material



شکل ۵: محل قرارگیری ترمیستورها در سطح دندانه دار

Fig 5. Schematic of the placement of thermistors in the ribbed surface

جدول ۱: دقت ابزارهای اندازه‌گیری

Table 1. The accuracy of the measuring tools

ابزار	دقت (%)	محدوده	واحد
اوریفیس	۱	۷۵-۰	میلی‌متر آب
مانومتر	۱	۵۰-۰	پاسکال
ترمیستور	۱	۲۰-۲	کیلو اهم
اهم‌متر	۱	-	-
ترموکوپل	۲	۱۰۰-۰	درجه سانتی‌گراد
طول کانال	۱	۴-۰	متر
عرض و ارتفاع مقطع کانال	۰/۱	۰/۵-۰	متر

در هر دمایی یک نوع مقاومت الکتریکی از خود نشان می‌دهند. ترمیستورها معمولاً از مواد نیمه رسانا تشکیل شده‌اند از این رو در دماهای بالاتر زودتر دچار آسیب می‌شوند و عمر کوتاه‌تری دارند. به منظور کالیبره کردن ترمیستورها و دقت بالاتر از رابطه‌ی ۱ زیر که دارای سه ثابت می‌باشد جهت به دست آوردن دما از روی مقاومت استفاده شده‌است.

$$\frac{1}{T} = a + b \ln(R) + c (\ln(R))^3 \quad (1)$$

برای به دست آوردن سه ضریب a ، b و c نیاز به داشتن سه مقاومت در سه دمای مشخص است که به وسیله اهم‌متر در سه دمای مشخص مقدار مقاومت ترمیستور اندازه‌گیری شد. در شکل ۵ محل قرارگیری ترمیستورها در سطح دندانه‌دار مشخص شده‌است. به منظور بررسی تغییرات دما در عرض سطح در مقاطعی سنسورهای دما به شکل عرضی نیز قرار داده شدند. دمای هوای ورودی و خروجی با استفاده از

است.

برای دستیابی به شار ثابت از المنتهایی استفاده شده‌است که این المنت‌ها دارای مقاومت ثابت در واحد طول می‌باشند. المنت‌ها به صورت یکنواخت و به موازات طول کانال بر روی سطح قرار گرفته‌اند. المنت‌ها علاوه بر این که هادی حرارت می‌باشند در مقابل جریان الکتریسته عایق هستند تا خطر برق‌گرفتگی را کاهش دهند. همچنین با توجه به این که عایق سیم و همینطور کانال در دماهای بالا ذوب می‌شوند اختلاف دما در محدوده کمتر از ۱۰۰ ایجاد و کنترل شد. در مجموع مقدار مقاومت کلی المنت‌ها برابر با ۱۳۱ اهم به ازای هر واحد سطح می‌باشد. شارژ حرارتی توسط یک دستگاه اتوترانس تنظیم و محدوده دما برای جلوگیری از آسیب دیدن عایق‌ها به شکل دستی در محدوده کمتر از ۱۰۰ کنترل می‌شد.

به منظور اندازه‌گیری دما از ترمیستورهایی با ضریب دمایی منفی استفاده شده‌است. این سنسورها نوعی مقاومت متغیر می‌باشند که

۲-۲- معادلات حاکم و کاهش داده‌ها

به منظور کاهش حجم داده‌های اندازه‌گیری شده و مقایسه حالت‌های مختلف به کمک مقادیر معنی‌دار، پس از اندازه‌گیری دمای سطح در طول کانال و میزان افت فشار در ابتدا و انتهای کانال، انتقال حرارت متوسط و ضریب افت فشار متوسط محاسبه شدند. تعریف اعداد بی‌بعد ناسلت و ضریب افت فشار به ترتیب در روابط ۲ و ۳ ارائه شده است.

$$\bar{f} = \frac{\Delta p}{4 \left(\frac{L}{D} \right) \left(\frac{G^2}{\rho g_c} \right)} \quad (2)$$

$$Nu = \frac{q''}{\bar{T}_w - \bar{T}_b} \left(\frac{D}{K} \right) \quad (3)$$

که در روابط فوق Δp افت فشار، L و D به ترتیب طول و قطر کانال، g_c ضریب تبدیل، G و ρ به ترتیب دبی جرمی و چگالی سیال، q'' شار حرارتی در واحد سطح، \bar{T}_w و \bar{T}_b به ترتیب متوسط دمای دیواره و سیال و k ضریب هدایت حرارتی سیال می‌باشند. هدایت \bar{f} و Nu به ترتیب ضریب افت فشار و عدد ناسلت هستند.

در جریان داخل کانال دمای بالک سیال دمای میانگین سیال در حرکت در طول کانال و در واقع یک مرجع مناسب برای سنجش خصوصیات انتقال حرارت جابه‌جایی به‌خصوص در کانال‌ها و لوله‌ها می‌باشد و در آزمایش مورد نظر از رابطه ۴ محاسبه می‌گردد:

$$\bar{T}_b = \frac{T_{outlet} - T_{inlet}}{160} l + T_{inlet} \quad (4)$$

که در این رابطه و به ترتیب دمای ورودی و خروجی و طول نقطه‌ای از کانال است که دمای بالک در آن نقطه محاسبه می‌شود. از آن جایی که شار حرارتی ثابت است، تغییرات دمای هوا بین ورودی و خروجی به شکل خطی می‌باشد. در محاسبه ضرایب فوق، خواص هوا برحسب تابعی از دما در نظر گرفته شدند. کلیه مقادیر در دمای میانگین سطح و هوا مورد محاسبه قرار گرفتند. با توجه به این که شار ثابت و مشخص به سطح اعمال می‌شود در نتیجه برای محاسبه‌ی ناسلت تنها مجهول دمای سطح کانال است.

ترموکوپل‌های تایپ K اندازه‌گیری و ثبت شدند.

از آنجا که تعداد ترمیستورها زیاد بود اقدام به تهیه بردی شد تا زمان ثبت دماها کاهش یابد. از هر دو سر ترمیستور به وسیله دو رشته سیم با عایق لاک‌ی که دارای مقاومت بسیار کمی می‌باشد به بیرون از کانال هدایت شد و سپس با استفاده از اهم‌تر مقدار مقاومت اندازه‌گیری شد. به منظور اندازه‌گیری مقاومت در ترمیستورها از اهم‌تری استفاده شده است که دارای دقت ۱٪ می‌باشد که این دقت در مقاومت جهت اندازه‌گیری دما مناسب است. برای اندازه‌گیری اختلاف فشار در دو نقطه و مقایسه بین حالت‌های مختلف کانال دنداندار از دستگاه مانومتر مایع استفاده شد که فاصله‌ی دو نقطه‌ی اندازه‌گیری از هم ۰/۵ متر می‌باشد. به دلیل اختلاف فشار کم در کانال دستگاه انتخاب شده دارای دقت ۰/۲۵ پاسکال می‌باشد. در شکل ۶ دستگاه اندازه‌گیری فشار قابل رویت است.

آزمایش برای صحت‌سنجی تکرارپذیری در مواردی دوباره انجام شدند. سنسورهای دما در دوره‌های زمانی مشخص در محدوده ۰ تا ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد کالیبره می‌شدند. دقت ابزارهای اندازه‌گیری در جدول ۱ ارائه شده است.

جهت اطمینان از عایق‌بودن کانال بر روی هر صفحه از فوم پلی‌اورتان به ضخامت ۰/۰۳ متر استفاده شده است. این فوم به خوبی از انتقال حرارت جلوگیری می‌کند. به منظور کاهش افت فشار و افزایش انتقال حرارت ایده استفاده از تیغه‌هایی مستطیلی شکل به جنس پلاستیک سخت که در وسط آن سوراخ یا سوراخ‌هایی ایجاد شده است، مورد بررسی قرار گرفت. علت انتخاب ایده سوراخ‌کردن دندانها این است که در رابطه با این موضوع پژوهش‌های مفصلی صورت نگرفته است. به نظر می‌رسد که وجود سوراخ می‌تواند باعث از بین رفتن ناحیه با فشار منفی در پشت دندانها شود، از طرف دیگر در نگاه اول تأثیر دندانها در از بین بردن لایه مرزی و ایجاد آشفتگی همچنان مانند حالت بدون سوراخ است. با توجه به مزایای احتمالی ایجاد سوراخ که ممکن است باعث کاهش افت فشار در کانال شود و از طرف دیگر تأثیر آن بر انتقال حرارت قابل توجه نباشد، این ایده مورد بررسی قرار گرفت. در آزمایش‌ها دو نسبت قطر سوراخ به ارتفاع دندانها بررسی شد که به ترتیب برابر ۰/۳ و ۰/۵ بوده است. در شکل ۷ - الف نمایی از دندانها قابل رویت است.



شکل ۶: مانومتر اندازه‌گیری اختلاف فشار داخل کانال

Fig 6. The manometer used to measure the pressure drop

دندانه به ارتفاع آن از یکدیگر به ترتیب برابر ۲۰، ۲۵ و ۳۰ فرض شد.

۱-۳- اعتبارسنجی نتایج

به منظور اعتبارسنجی یک حالت خاص از گام ۲۰ با نتایج رابطه دیتوس بولتر، بلازیوس و همینطور مطالعه هان و همکاران [۱] در مورد دندانه بدون سوراخ مورد مقایسه قرار گرفت. البته رابطه دیتوس بولتر و بلازیوس مربوط به سطح بدون دندانه است و تنها به منظور مقایسه و مشاهده میزان افزایش ناسلت یا ضریب افت فشار ارائه شده است. ناسلت و ضریب افت فشار در شکل ۸ و ۹ به ترتیب ارائه شده است. میزان افزایش ناسلت تا ۷۰٪ و ضریب افت فشار تا ۳۰٪ مشاهده شد. در مطالعات قبلی نیز میزان افزایش بین ۲۰٪ تا ۳۰٪ مشاهده شده است [۱، ۱۰]. به دلیل اینکه در رینولدزهای پایین مقدار افت فشار در کانال مقدار کوچکی است، در نتیجه تأثیر خطای اندازه‌گیری قابل توجه است. اما با افزایش رینولدز و به تبع آن افزایش مقدار افت فشار درصد خطای اندازه‌گیری کاهش پیدا می‌کند.

عدم قطعیت در محاسبه‌ی مقادیر ناسلت و ضریب افت فشار با توجه به روابط ۲ و ۳ و قراردادن مقدار تقریبی خطای ارائه‌شده در جدول ۱ به دست آمد.

۲-۳- بررسی اثر گام و ارتفاع دندانه‌ها

در شکل ۱۰ و ۱۱ ضریب افت فشار برای دندانه با ارتفاع ۱۰ میلی‌متر و ۸ میلی‌متر بر حسب رینولدز رسم شده است. با افزایش

رابطه دیتوس بولتر [۱۲] که طبق رابطه ۵ می‌باشد و تابعی از عدد رینولدز و عدد پرانتل است. آزمایش‌ها در چهار رینولدز مختلف و در سه حالت از تعداد دندانه‌ها انجام گرفت. در شکل ۷- ب پارامترهای ارتفاع دندانه و گام بین دو دندانه متوالی قابل مشاهده است. نسبت گام به ارتفاع دندانه یا به اختصار نسبت گام دندانه، پارامتر هندسی بی‌بعدی است که فاصله‌ی بین دو دندانه را مشخص می‌کند در این آزمایش گام ۲۰، ۲۵ و ۳۰ بررسی شدند.

$$Nu = 0.023Re^{0.8} Pr^{0.4} \quad (5)$$

مبنای طول ورودی براساس توسعه یافتگی از رابطه‌ی ۶ استفاده شد، البته با توجه به چیدمان دندانه‌ها مقدار این فاصله توسعه‌یافتگی تغییر می‌یابد اما به صورت تقریبی می‌توان مقدار آن را برابر با رابطه‌ی ۶ در نظر گرفت. همچنین می‌توان این پارامتر را با اندازه‌گیری دما و محاسبه‌ی ناسلت در بین هر دو دندانه‌ی پشت سرهم بررسی کرد [۱۳، ۱۴].

$$\frac{X}{D} > 3 \quad (6)$$

که در آن D قطر هیدرولیکی کانال و X طول ورودی کانال است.

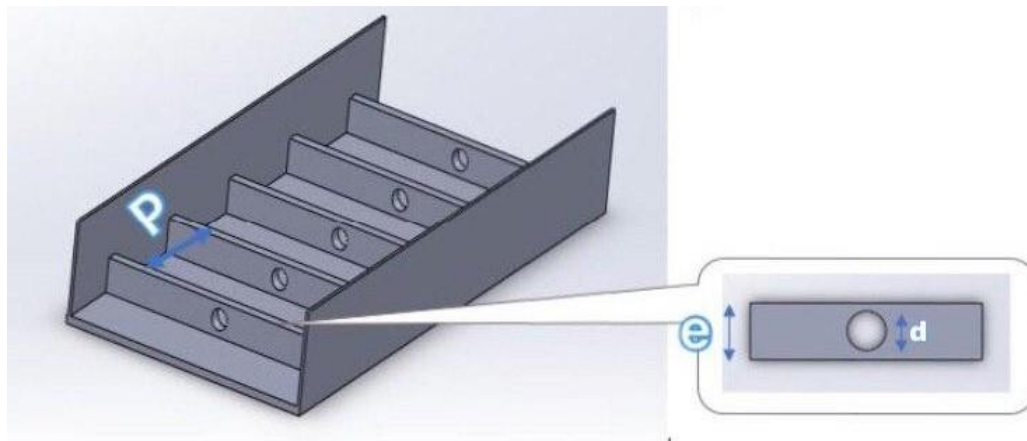
۳- نتایج و تفسیر فیزیکی

آزمایش در سه گام مختلف از پره انجام شد که نسبت فاصله



شکل ۷ - الف: دندانهای دارای سوراخ، قبل و بعد از نصب روی صفحه

Fig 7a. The perforated ribs, before and after being placed on the surface



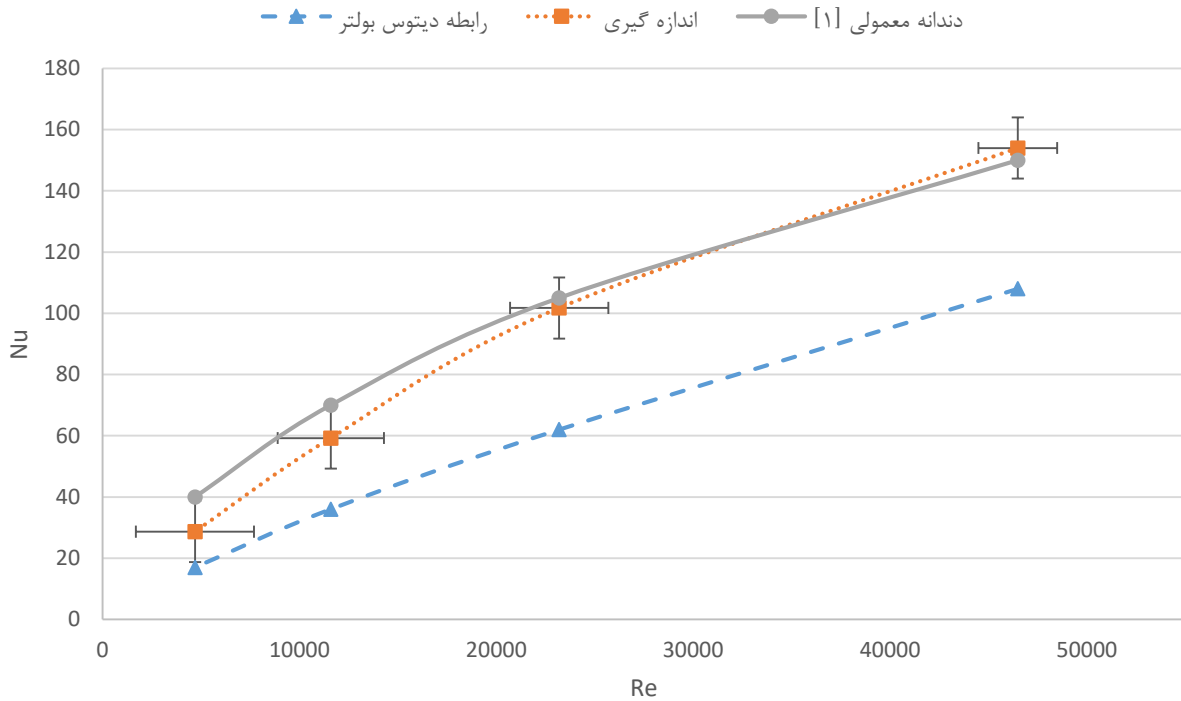
شکل ۷ - ب: منطقه ی مطالعاتی

Fig 7b. Study area

افت فشار در مقایسه با ارتفاع دندان ۱۰ میلی‌متر کمتر است. نکته دیگری که مشاهده شد این بود که با افزایش رینولدز جریان تأثیر سوراخ بر ضریب افت فشار کمتر می‌شد. این موضوع به ویژه در دندان کوتاه‌تر قابل مشاهده است. در توجیه علت کاهش تأثیر سوراخ با افزایش رینولدز می‌توان به افزایش میزان تلفات ناشی از عبور جریان از سوراخ و انبساط جریان در پشت دندان اشاره نمود.

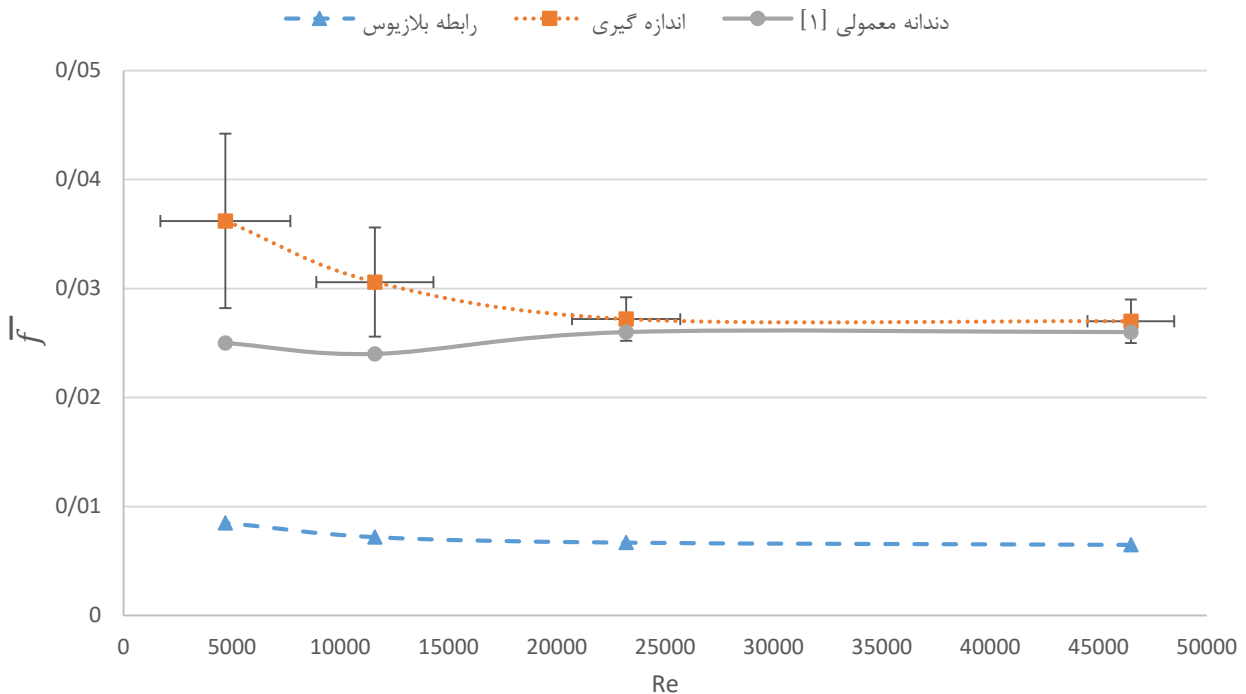
ارتفاع دندانها همانگونه که انتظار می‌رود ضریب افت فشار افزایش پیدا می‌کند. به طور میانگین با کاهش ارتفاع دندان میزان افت فشار بیش از ۳۰٪ کاهش پیدا می‌کند.

در شکل ۱۱، شکل ۱۲ و شکل ۱۳ ضرایب افت فشار برای دندانهای با ارتفاع ۸ میلی‌متر که معادل نسبت ارتفاع به قطر هیدرولیکی کانال ۰/۱۱ است، نمایش داده شده است. میزان ضریب



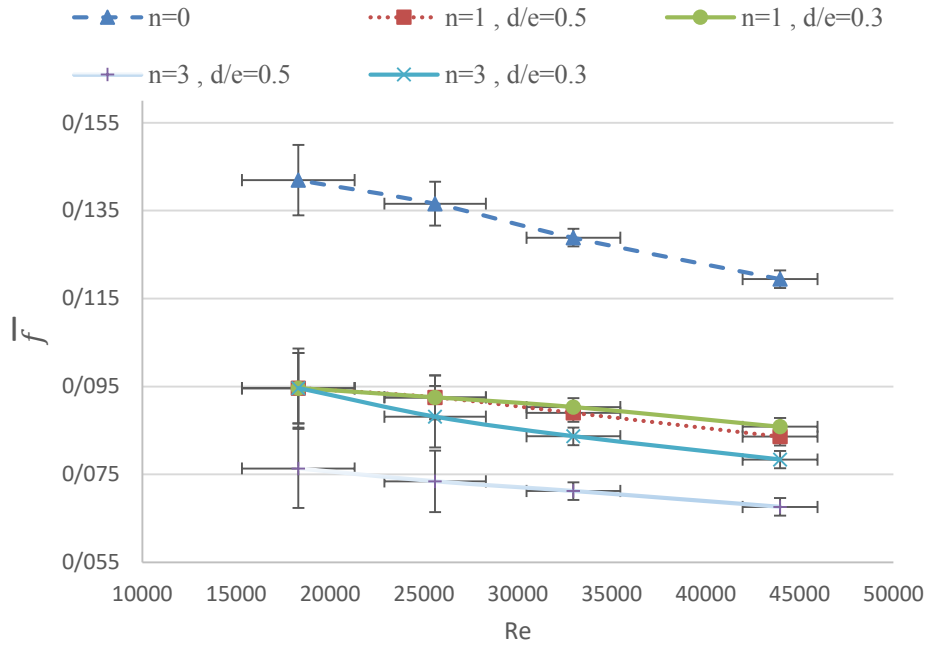
شکل ۸: ناسلت بر حسب رینولدز، اعتبارسنجی دندانه‌ها با گام ۲۰ و نتایج کانال هموار بر اساس رابطه دیتوس بولتر

Fig 8. Variation of Nusselt number with Reynolds number, data validation for ribbed channel in pitch 20 and besides, results of smooth channel according to Dittus-boelter equation



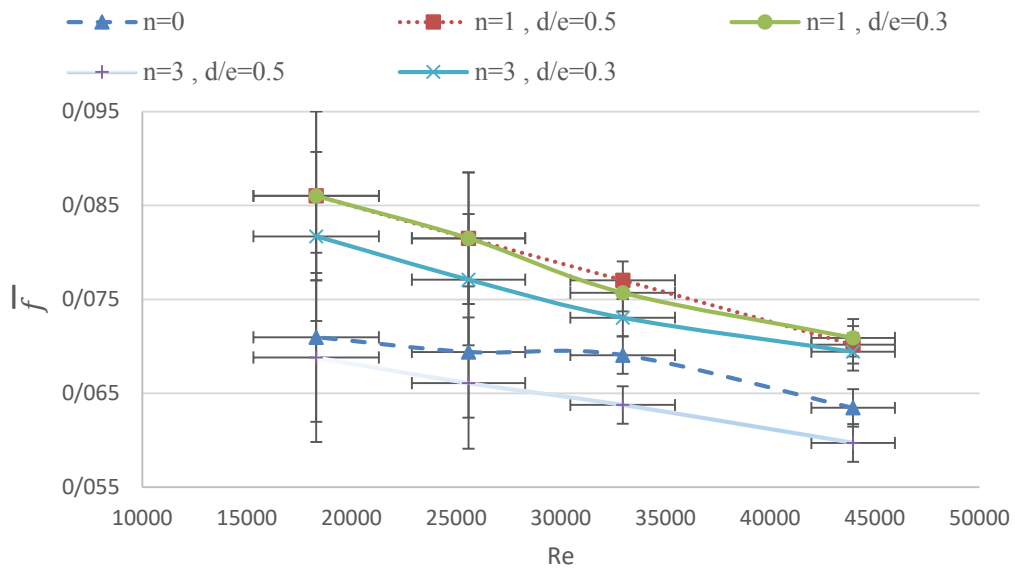
شکل ۹: ضریب افت فشار بر حسب رینولدز، اعتبارسنجی دندانه‌ها با گام ۲۰ و نتایج کانال هموار بر اساس رابطه ی بلازیوس

Fig 9. Variation of Pressure drop coefficient with Reynolds number, data validation for ribbed channel in pitch 20 and besides, results of smooth channel according to Blasius equation



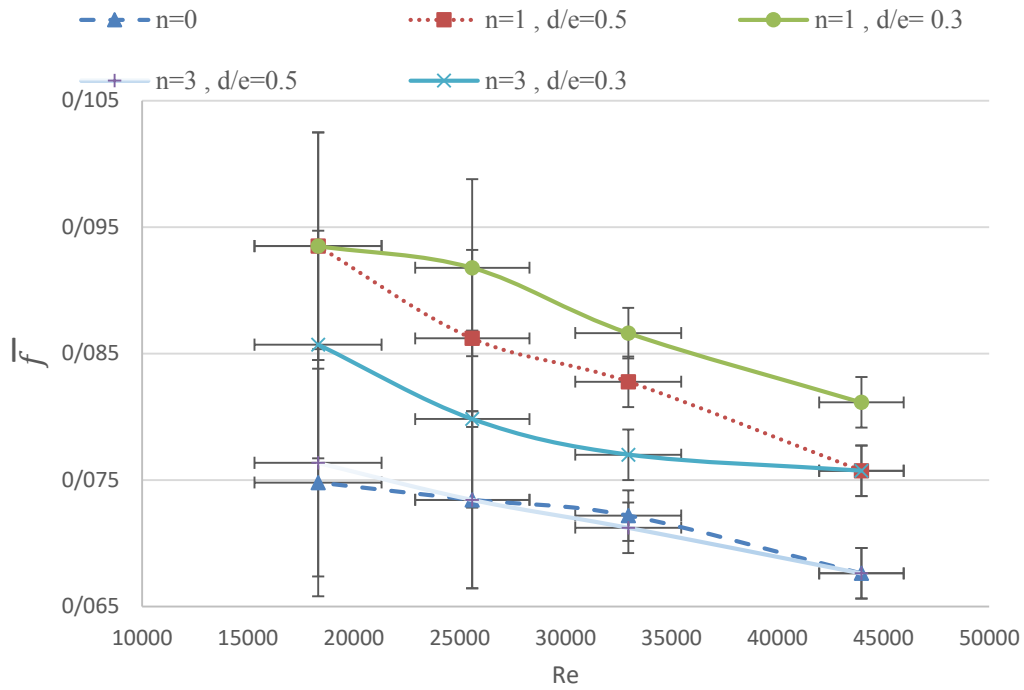
شکل ۱۰: ضریب افت فشار بر حسب رینولدز در دندانه با ارتفاع ۱۰ میلی متر، دندانه‌ها با گام ۲۵

Fig 10. Variation of Pressure drop coefficient with Reynolds number and ribs with height of 10mm and pitch 25



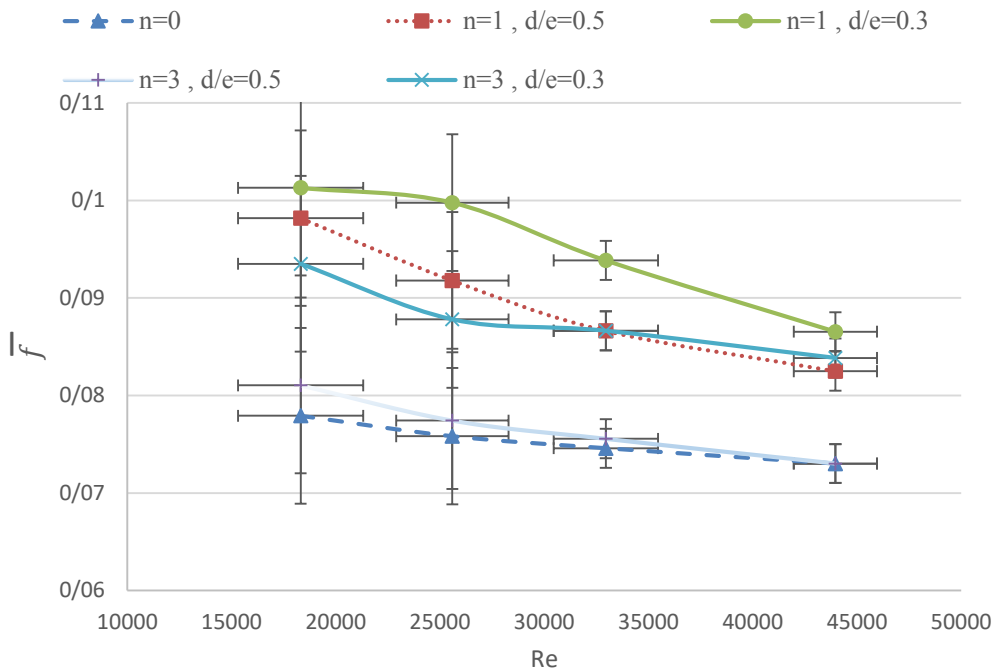
شکل ۱۱: ضریب افت فشار بر حسب رینولدز در دندانه با ارتفاع ۸ میلی متر، دندانه‌ها با گام ۳۰

Fig 11. Variation of Pressure drop coefficient with Reynolds number and ribs with height of 8mm and pitch 30



شکل ۱۲: ضریب افت فشار بر حسب رینولدز در دندان‌ها با ارتفاع ۸ میلی‌متر، دندان‌ها با گام ۲۵

Fig 12. Variation of Pressure drop coefficient with Reynolds number and ribs with height of 8mm and pitch 25



شکل ۱۳: ضریب افت فشار بر حسب رینولدز در دندان‌ها با ارتفاع ۸ میلی‌متر، دندان‌ها با گام ۲۰

Fig 13. Variation of Pressure drop coefficient with Reynolds number and ribs with height of 8mm and pitch 20

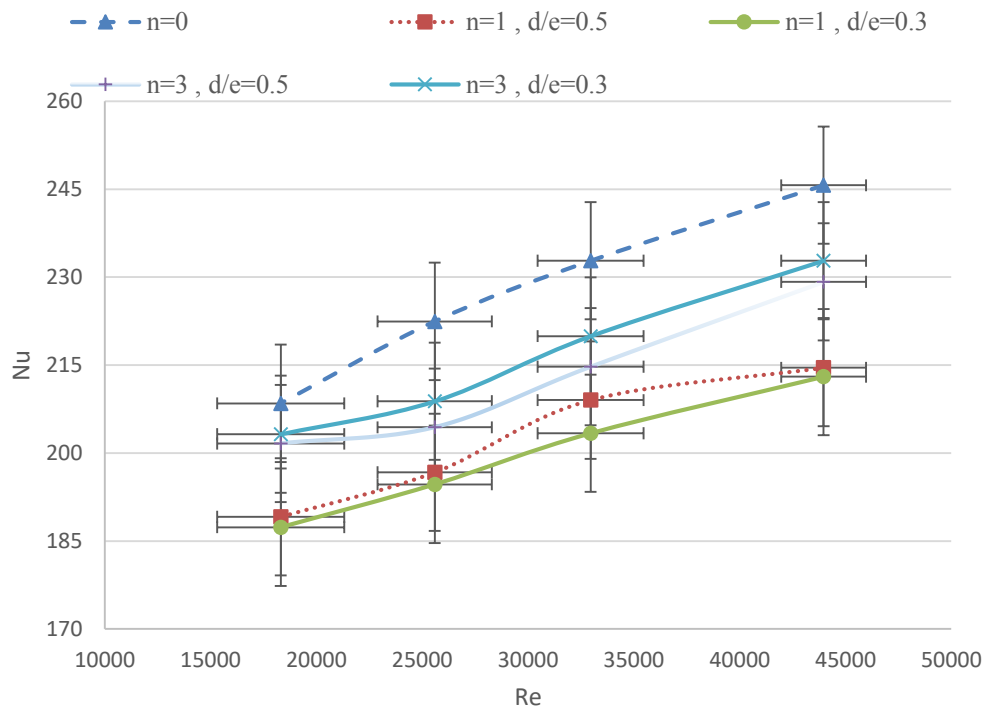
ایجاد می‌کنند. به نظر می‌رسد ناسلت نیز باید کاهش پیدا کند. از طرف دیگر عبور جریان از سوراخ کوچک و سپس باز شدن ناگهانی سوراخ به فضای پشت دندان افت فشار قابل توجهی به همراه دارد. تأثیر کلی ایجاد سوراخ بر افت فشار از موازنه این دو فرایند حاصل خواهد شد. این فرضیات در مشاهدات تجربی مورد اعتبارسنجی قرار گرفتند.

با توجه به شکل‌های ۱۰ و ۱۱، تأثیر سوراخ تفاوت چشمگیری بر میزان افت فشار دارد. در گام ۲۰ و ۲۵ ایجاد سوراخ با قطر کوچک نه تنها تأثیر مثبتی ندارد، بلکه باعث افزایش ضریب افت فشار می‌شود. در گام ۳۰ نیز مقدار اندکی تفاوت بین دندان بدون سوراخ و دندان با یک سوراخ با قطر کم وجود دارد. با این حال کاربرد دندان با سه سوراخ با نسبت قطر ۰/۵ در همه حالات باعث کاهش ضریب افت فشار می‌شود، که در حدود ۲۰٪ است. ایجاد سوراخ با قطر ۵ میلی‌متر در دندان با ارتفاع ۱۰ میلی‌متر باعث کاهش افت فشار

تأثیر گام دندانها بر افت فشار در محدوده مطالعه حاضر کمتر از تأثیر ارتفاع بود. با کاهش گام دندانها از ۳۰ به ۲۵، ضریب افت فشار در حدود ۱۰٪ افزایش پیدا می‌کند؛ با کاهش گام به ۲۰ میزان متوسط افزایش ضریب افت فشار نسبت به گام ۳۰ در حدود ۱۵٪ می‌باشد.

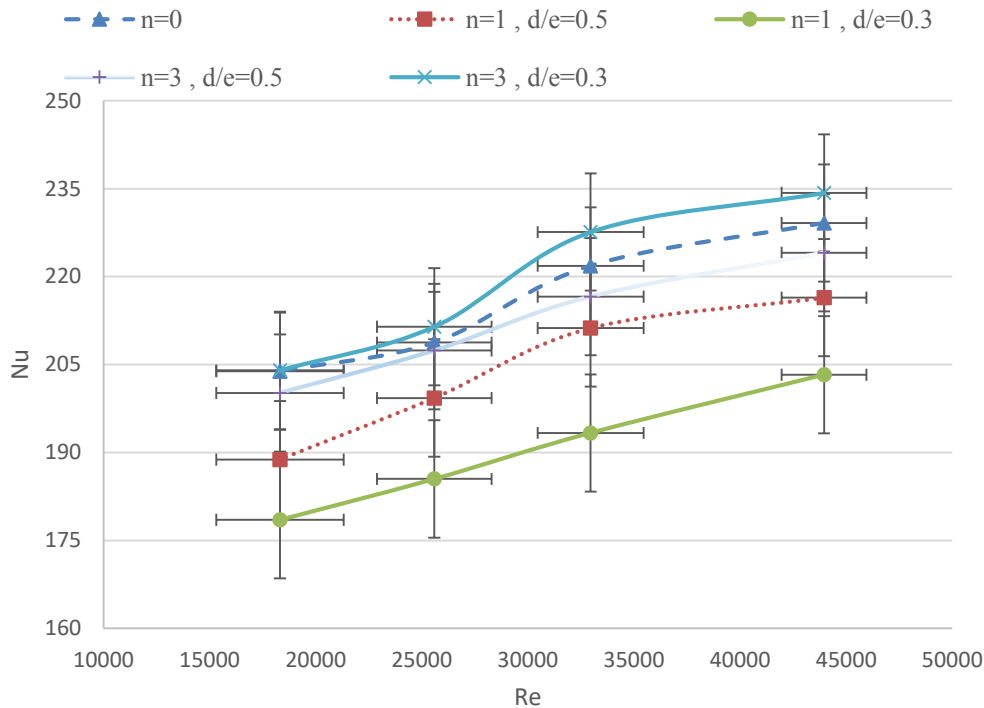
۳-۳- بررسی اثر ایجاد سوراخ بر روی دندان

برای بررسی تأثیر ایجاد سوراخ بر فیزیک جریان باید به طور همزمان به فرایندهای اصلی که در نتیجه ایجاد سوراخ اهمیت بیشتری دارند، توجه نمود. ابتدا به دلیل وجود سوراخ ناحیه فشار منفی در اطراف دندان تا حدی افزایش فشار خواهد داشت. در نتیجه گردابه‌هایی که در این ناحیه به وجود می‌آیند ضعیف‌تر خواهند شد. این موضوع افت فشار را باید به شکل قابل ملاحظه‌ای کاهش دهد. اما به طور همزمان به دلیل کاهش اثر گردابه‌ها که اغتشاش در جریان



شکل ۱۴: تغییرات ناسلت بر حسب رینولدز در دندان با ارتفاع ۱۰ میلی‌متر، دندانها با گام ۲۵

Fig 14. Variation of Nusselt number with Reynolds number for ribs with height of 10mm and pitch 25



شکل ۱۵: تغییرات ناسلت بر حسب رینولدز در دندانه با ارتفاع ۸ میلی‌متر، دندانه‌ها با گام ۳۰

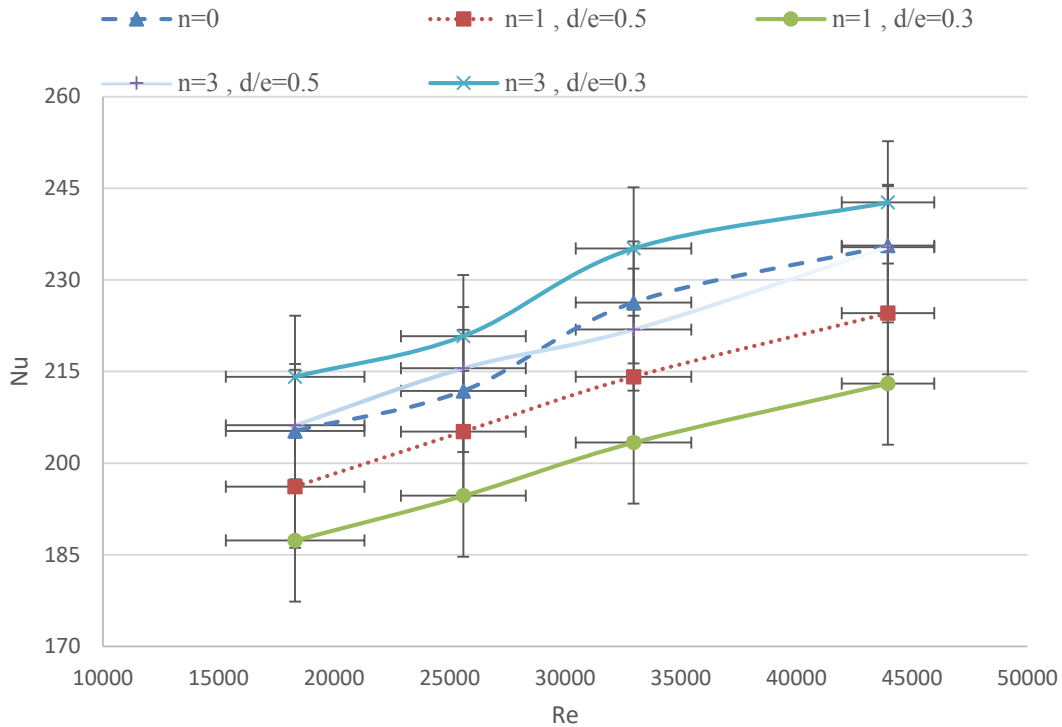
Fig 15. Variation of Nusselt number with Reynolds number for ribs with height of 8mm and pitch 30

ناسلت نیز شود. این موضوع در شکل ۱۴ به وضوح مشاهده می‌شود. به دلیل اختصار و عدم تفاوت چشمگیر در روند نتایج بین گام‌های مختلف، در دندانه با ارتفاع ۱۰ میلی‌متر تنها نتایج نسبت گام ۲۵ ارائه شده است. البته جالب توجه است که دندانه با یک سوراخ، کمترین ناسلت را دارد و دندانه با سه سوراخ در حدود ۱۰٪ کاهش نسبت به حالت بدون سوراخ دارد.

در شکل ۱۵ تغییرات ناسلت بر حسب رینولدز در دندانه با ارتفاع ۸ میلی‌متر و نسبت گام ۳۰ ارائه شده است. در مقایسه با دندانه با ارتفاع ۱۰ میلی‌متر، ناسلت در تمام موارد دچار افت کمتری می‌شود. این روند در گام‌های دیگر نیز قابل مشاهده است. تغییرات ناسلت بر حسب رینولدز در گام ۲۵ و گام ۲۰ به ترتیب در شکل ۱۶ و شکل ۱۷ نمایش داده شده است. به عنوان نمونه در گام ۲۰، عدد ناسلت در حالتی که دندانه با سه سوراخ و قطر بزرگتر است به طور متوسط در حدود ۵٪ کاهش می‌یابد. این در حالی است که در مورد ضریب افت فشار، میزان کاهش ضریب تقریباً مستقل از گام دندانه‌ها بود.

در تمام گام‌های مورد بررسی شد. همان‌طور که اشاره شد به دلیل ورود جریان هوا از داخل سوراخ به ناحیه کم‌فشار پشت دندانه، فشار افزایش یافته و گردابه‌ها ضعیف‌تر خواهند شد. در نتیجه تأثیر کاهش افت فشار در اثر وجود سوراخ، بیش از افت فشار عبور جریان هوا از داخل سوراخ است. این موضوع باید با توجه به ارتفاع بالاتر دندانه و اهمیت ناحیه پشت دندانه در افت فشار کل مورد توجه قرار گیرد. اما در مورد دندانه با ارتفاع ۸ میلی‌متر برخلاف حالت قبل افت فشار در اثر وجود دندانه افزایش می‌یابد. در نتیجه به دلیل اهمیت کمتر ناحیه پشت دندانه در این حالت، افت فشار ناشی از عبور جریان هوا از سوراخ باعث افزایش افت فشار کلی می‌شود.

بدون در نظر گرفتن تغییرات انتقال حرارت به واسطه‌ی ایجاد سوراخ روی دندانه نمی‌توان به نتیجه‌گیری جامعی دست یافت. در ادامه تغییرات ناسلت در سطح کانال با تغییر پارامترها بررسی خواهد شد. انتظار می‌رود ایجاد سوراخ، که منجر به کاهش ضریب افت فشار می‌شود بر اساس آنالوژی انتقال حرارت و افت فشار، باعث کاهش



شکل ۱۶: تغییرات ناسلت بر حسب رینولدز در دندانه با ارتفاع ۸ میلی‌متر، دندانه‌ها با گام ۲۵

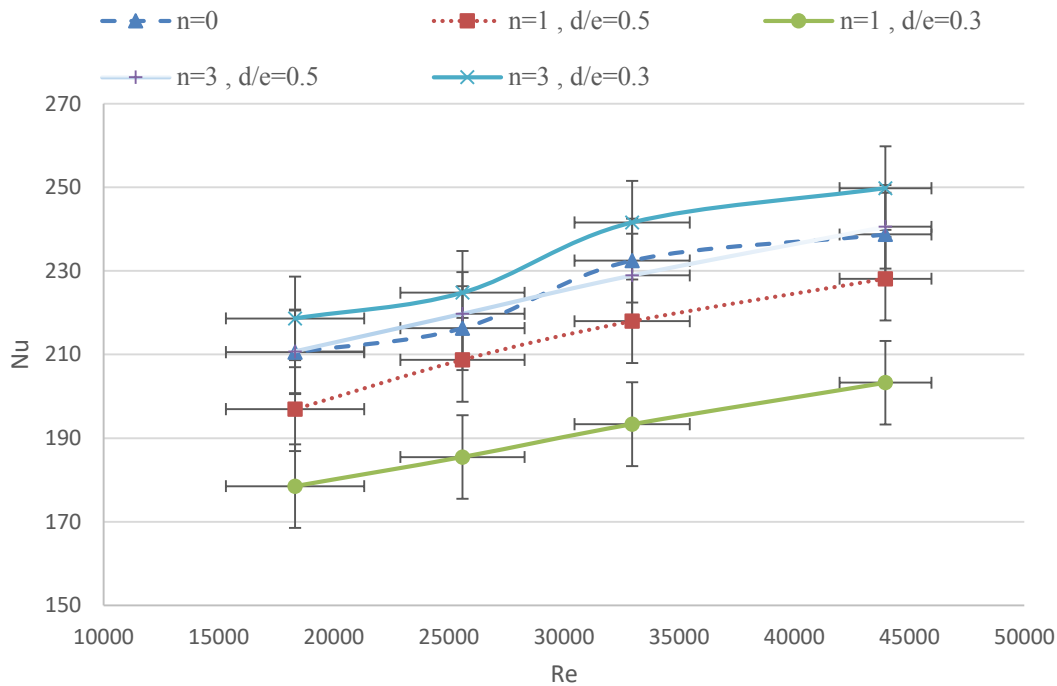
Fig 16. Variation of Nusselt number with Reynolds number for ribs with height of 8mm and pitch 25

است.

با کم‌شدن فاصله‌ی بین دو دندانه عدد ناسلت افزایش می‌یابد. در توجیه این مشاهده می‌توان گفت زیادشدن دندانه‌ها در کانال به تولید آشفتگی در جریان کمک می‌کند. همچنین وقتی جریان از سطح دندانه عبور می‌کند پس از برخورد مجدد به سطح، قبل از برخورد به دندانه بعدی، لایه‌ی مرزی فرصت توسعه را نمی‌یابد که این امر باعث بهبود انتقال حرارت می‌شود. این مورد برای دندانه‌های سه سوراخ نیز صادق است. با کاهش گام از ۳۰ به ۲۵ عدد ناسلت افزایش و به طور کلی افزایش انتقال حرارت به طور محسوسی بیشتر از کاهش گام از ۲۵ به ۲۰ است. بنابراین می‌توان گفت که کاهش گام باعث بهبود انتقال حرارت می‌گردد. اما باید خاطر نشان کرد که اگر گام از حد معینی کمتر شود فضای کافی جهت برخورد مجدد جریان به سطح وجود ندارد و در نتیجه پس از برخورد جریان با سطح بلافاصله جدایش رخ می‌دهد که باعث کاهش انتقال حرارت می‌گردد. بیشترین مقدار افزایش عدد ناسلت نسبت به سطح صاف در گام ۲۰ و در کمترین رینولدز ۱۸۳۱۶ به میزان ۳۲۶ درصد افزایش گزارش

در نتیجه در گام‌های کوچکتر، ایجاد سوراخ توجیه بیشتری خواهد داشت. با نزدیک‌شدن فاصله گام دندانه‌ها، ناسلت به ناسلت حالت بدون سوراخ نزدیک می‌شود. تغییرات ضریب افت فشار کمتر از گام دندانه‌ها تأثیر می‌پذیرد. به عنوان مثال در گام ۲۰ و سه سوراخ، ناسلت در حدود ۱۰٪ کاهش دارد، در حالی که ضریب افت فشار در حدود ۳۰٪ کاهش پیدا می‌کند. با افزایش تعداد سوراخ میزان افت فشار کاهش می‌یابد، از طرف دیگر در مورد ناسلت در حالت ایجاد یک سوراخ بیش از ۲۰٪ افت مشاهده می‌شود، اما در حالت سه سوراخ افت در محدوده ۵ تا ۱۰٪ قرار دارد.

با مقایسه شکل‌های ۱۷-۱۵ مشخص است که شکل کلی منحنی در هر سه حالت به نسبت یکسان است، با کاهش مقدار ناسلت افزایش پیدا می‌کند. مقدار ناسلت حداکثر از ۲۳۵ در گام ۳۰ به ۲۵۰ در گام ۲۰ می‌رسد. همان طور که اشاره شد برخلاف میزان افت ناسلت که در گام کمتر کاهش می‌یابد، افزایش افت فشار به گونه‌ای نامناسب مشاهده می‌شود. بررسی تأثیر توأم ایجاد سوراخ بر ناسلت و افت فشار در ادامه بر اساس ضریب عملکرد مورد بررسی قرار گرفته



شکل ۱۷: تغییرات ناسلت بر حسب رینولدز در دندانه با ارتفاع ۸ میلی‌متر، دندانه‌ها با گام ۲۰

Fig 17. Variation of Nusselt number with Reynolds number for ribs with height of 8mm and pitch 20

۰/۱۴ است، مقدار ضریب افت فشار در حدود ۳۰٪ و ۴۰٪ به ترتیب برای یک سوراخ و سه سوراخ کاهش نشان می‌دهد. بیشترین کاهش مربوط به حالت سه سوراخ و با نسبت قطر ۰/۵ مشاهده شد. با کاهش گام همان‌طور که از شکل ۱۰ مشخص است، ضریب افت فشار اندکی افزایش می‌یابد. روند تأثیر تعداد و قطر سوراخ کم و بیش در گام‌های ۲۰، ۲۵ و ۳۰ یکسان است و روند تغییرات مشابه است، به همین علت و برای اختصار از گزارش نتایج سایر نسبت گام‌ها صرف‌نظر شد. بیشترین کاهش مربوط به حالت سه سوراخ و قطر بزرگتر است و درصد کاهش نیز تقریباً در محدوده ذکر شده قرار دارد.

در شکل ۱۸ ضریب عملکرد برای چهار حالت مقایسه شده است که برای دو دندانه با ارتفاع ۱۰ و ۸ میلی‌متر و در دو حالت بدون سوراخ و دارای سه سوراخ با نسبت قطر ۰/۵ می‌باشد. همان‌طور که مشخص است، در حالت دندانه بلند ایجاد سوراخ تأثیر بیشتری در مقدار ضریب عملکرد دندانه دارد، اما در حالت دندانه کوتاه ایجاد سوراخ تأثیر مثبتی ندارد، و همان‌طور که مشاهده شد ایجاد سوراخ در حالت‌های دیگر از قبیل تعداد کمتر یا قطر کوچکتر حتی باعث

می‌شود.

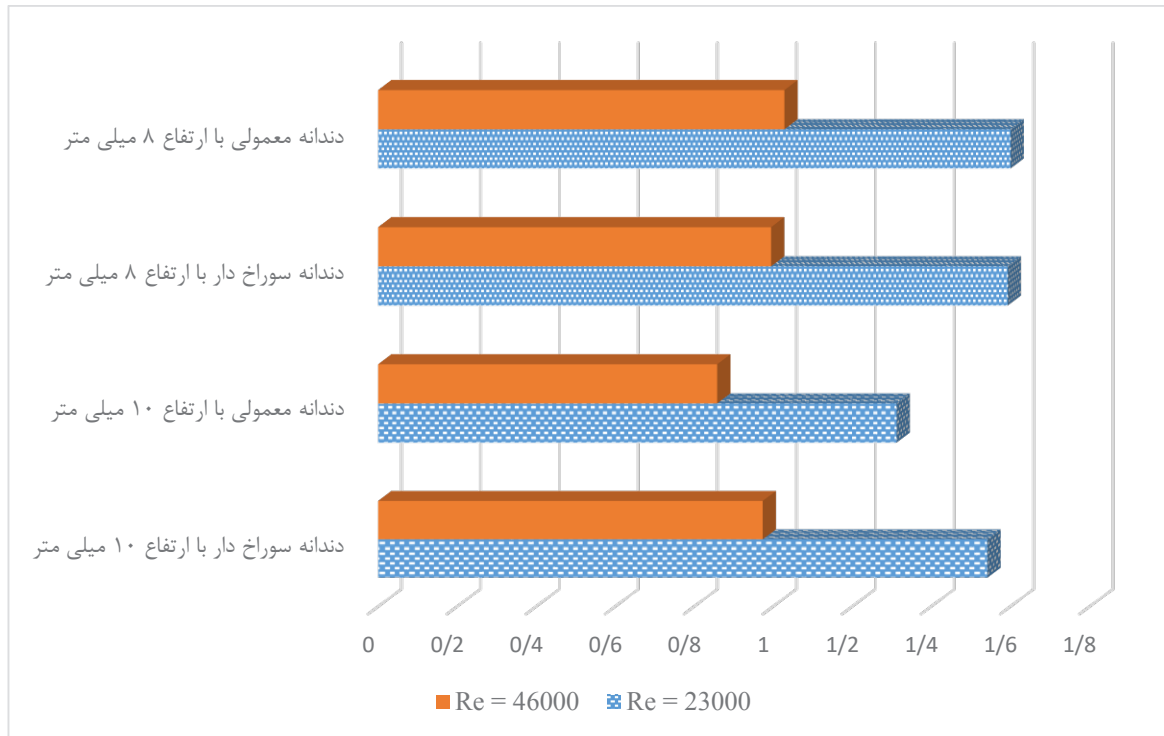
۳-۴- مقایسه ضریب عملکرد

ضریب عملکرد که در برگیرنده اثر انتقال حرارت و افت فشار به صورت همزمان می‌باشد به شکل رابطه ۷ تعریف می‌شود، تا مبنایی برای مقایسه نتایج معیار واحدی در اختیار داشته باشیم.

$$Pc = \frac{Nu}{\left(\frac{f}{f_s}\right)^{\frac{1}{3}}} \quad (7)$$

که در رابطه فوق Pc ضریب عملکرد و زیرنویس S مربوط به سطح صاف است.

ضریب افت فشار تابعی از پارامترهای مورد بررسی شامل ارتفاع دندانه، گام دندانه، تعداد سوراخ‌ها و قطر سوراخ‌ها می‌باشد. تأثیر تعداد سوراخ‌ها با نسبت گام ۲۵ در شکل ۱۰ ارائه شده است. در ارتفاع دندانه ۱۰ میلی‌متر که معادل نسبت ارتفاع به قطر هیدرولیکی کانال



شکل ۱۸: مقایسه ضریب عملکرد در حالت دندانه معمولی و دندانه دارای سوراخ

Fig 18. Performance evaluation criterion value comparison between normal ribs and perforated ribs

قطر ۰/۵، بیشترین کاهش اصطکاک را دارد، اما میزان افت ناسلت در حدود ۱۰٪ است. این موضوع، تأثیر مثبت ایجاد سوراخ در دندانه بلند را نمایش می‌دهد. مشاهده گردید که میزان کاهش ضریب افت فشار تقریباً مستقل از گام دندانه‌ها بود. در نتیجه در گام‌های کوچکتر، ایجاد سوراخ توجیه بیشتری خواهد داشت.

در نتیجه با استفاده از دندانه‌های دارای سوراخ در برخی از کاربردها که ارتفاع دندانه بالاتر است، می‌توان کارایی دستگاه را به شکل قابل توجه افزایش داد. کاهش ضریب افت فشار نیز با کاهش توان مصرفی سیستم انتقال هوا همراه خواهد شد. ایجاد سوراخ روی سطح دندانه اگرچه نرخ انتقال حرارت را مقداری در مقایسه با دندانه معمولی کاهش می‌دهد، اما میزان افت فشار به شکل معنی‌دار کاهش پیدا می‌کند و در بیشتر موارد بیش از حالت دندانه معمولی است. به منظور استفاده از این روش باید سیستمی که دندانه قرار است در آن به کار گرفته شود، مدل‌سازی شده و در صورت توجیه فنی-اقتصادی از این روش استفاده شود. در غیر اینصورت بخصوص در مورد دندانه‌های کوتاه‌تر این روش به شکل عمومی بر کاربرد دندانه

افت ضریب عملکرد خواهد شد. با توجه به این نکته که نسبت ارتفاع دندانه‌ها به قطر کانال معمولاً کمتر از ۰/۱ می‌باشد، در نتیجه استفاده از ایجاد سوراخ در دندانه تنها در حالتی توجیه‌پذیر خواهد بود که ارتفاع دندانه از دندانه‌های متداول بیشتر باشد و در غیر اینصورت مزیتی به شکل کلی وجود نخواهد داشت.

در این مطالعه به بررسی تجربی تأثیر ایجاد سوراخ روی دندانه‌ها پرداخته شد. دندانه‌ها در دو ارتفاع ۱۰ و ۸ میلی‌متر بررسی شدند. در هر حالت، سه گام از چیدمان دندانه‌ها، در دو وضعیت ۱ سوراخ و ۳ سوراخ و همینطور با نسبت قطر سوراخ به ارتفاع دندانه ۰/۳ و ۰/۵ در رینولدزهای بین ۱۵۰۰۰ تا ۵۰۰۰۰ مورد بررسی قرار گرفتند. مشخص شد که در دندانه با ارتفاع بیشتر، وجود سوراخ در دندانه افت فشار را به شکل چشمگیری کاهش می‌دهد. هنگامی که سه سوراخ در طول دندانه با نسبت قطر به ارتفاع ۰/۵ وجود دارد، میزان اصطکاک تا ۳۰٪ کاهش پیدا می‌کند. از طرف دیگر میزان ناسلت نیز در اثر ایجاد سوراخ تا ۲۰٪ کاهش می‌یابد. نکته جالب توجه این است که در دندانه با ارتفاع ۱۰ میلی‌متر، وجود دندانه‌ها با سه سوراخ و نسبت

- [1] J. HAN, J. PARK, C. LEI, Heat transfer enhancement in channels with turbulence promoters, Journal of engineering for gas turbines and power, (1985) (3)107 635-628.
- [2] D. Jin, M. Zhang, P. Wang, S. Xu, Numerical investigation of heat transfer and fluid flow in a sar air heater duct with multi V-shaped ribs on the absorber plate, Energy, 89 190-178 (2015).
- [3] T.-M. LIOU, J.-J. HWANG, Turbulent heat transfer augmentation and friction in periodic fully deloped channel flows, Journal of heat transfer, -56 (1992) (1)114 64.
- [4] G. Tanda, Effect of rib spacing on heat transfer and friction in a rectangular channel with °45 aled rib turbulators on one/two walls, International Journal of Heat and Mass Transfer, 1090-1081 (2011) (5)54.
- [5] S.-W. Chang, T.M. Liou, W.C. Juan, Influence of channel height on heat transfer augmentation in rectangular channels with two opposite rib-roughened walls, International Journal of Heat and Mass Transfer, (13)48 2813-2806 (2005).
- [6] T. Desrues, P. Marty, J.F. Fourmigué, Numerical prediction of heat transfer and pressure drop in three-dimensional channels with alternated opposed ribs, Applied Thermal Engineering, 63-52 (2012) 46-45.
- [7] P. Sriromreun, C. Thianpong, P. Promvonge, Experimental and numerical study on heat transfer enhancement in a channel with Z-shaped baffles, International Communications in Heat and Mass Transfer, (2012) (7)39 952-945.
- [8] G. Xie, J. Liu, W. Zhang, G. Lorenzini, C. Biserni, Numerical prediction of turbulent flow and heat transfer enhancement in a square passage with various truncated ribs on one wall, Journal of heat transfer, 2014) (1)136).
- [9] P.R. Chandra, M.L. Fontenot, J.-C. Han, Effect of rib profiles on turbulent channel flow heat transfer, Journal of thermophysics and heat transfer, 118-116 (1998) (1)12.
- [10] M. Ansari, M. Bazargan, Optimization of flat plate solar air heaters with ribbed surfaces, Applied Thermal Engineering, 363-356 (2018) 136.

معمولی ارجحیت نخواهد داشت.

فهرست علائم

D	قطر هیدرولیکی معادل (m)
E	ارتفاع دندانان (m)
F	ضریب افت فشار
g_c	ضریب تبدیل
G	دبی جرمی (kg s^{-1})
K	ضریب رسانش گرمایی ($\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$)
L	طول کل کانال (m)
l	طول دلخواه از کانال (cm)
Nu	عدد ناسلت
P	فشار ($\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-2}$)
p	گام دندانان (m)
Pr	عدد پراتنل
q''	شار حرارتی در واحد سطح (W m^{-2})
Re	عدد رینولدز
T	دما (K)
\bar{T}_b	دمای بالک (K)
T_{inlet}	دمای ورودی کانال (K)
T_{outlet}	دی خروجی کانال (K)
\bar{T}_w	متوسط دمای دیواره (K)
V	سرعت (ms^{-1})

علائم یونانی

μ	ویسکوزیته دینامیکی سیال ($\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$)
ρ	چگالی (kg m^{-3})

مراجع

- and heat transfer in ducts having streamwise-periodic variations of cross-sectional area, *Journal of Heat Transfer*, 186-180 (1977) (2)99.
- [14] J. HAN, Heat transfer and friction characteristics in rectangular channels with rib turbulators, *Journal of heat transfer*, 328-321 (1988) (2)110.
- [11] M. Ansari, M. Bazargan, Optimization of flat plate solar air heaters with ribbed surfaces, *Amirkabir Journal of Mechanical Engineering*, 146-137 (2017) (1)49.
- [12] F.P. Incropera, A.S. Lavine, T.L. Bergman, D.P. DeWitt, *Fundamentals of heat and mass transfer*, Wiley, 2007.
- [13] S. Patankar, C. Liu, E.M. Sparrow, Fully developed flow

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

F. Mirali, E. Mohammadi, M. Ansari, M. Bazargan. Experimental investigation of heat transfer and pressure drop in perforated ribs in the solar air heater channel . Amirkabir J. Mech Eng., 53(special issue 3) (2021). 1981-2000.

DOI: [10.22060/mej.2020.17255.6552](https://doi.org/10.22060/mej.2020.17255.6552)



