



انتقال حرارت در بررسی عددی تأثیر لایه پوششی متخلخل روی صفحه‌ی جریان آرایه جت‌های بر خوردی

سعید خادمی، مجید بازارگان*

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران.

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۴۰۱/۰۵/۰۹
بازنگری: ۱۴۰۱/۱۲/۱۵
پذیرش: ۱۴۰۱/۱۲/۱۶
ارائه آنلاین: ۱۴۰۲/۰۱/۲۶

کلمات کلیدی:

آرایه جت بر خوردی
ضریب عملکرد حرارت
یکنواختی انتقال حرارت
محیط متخلخل
بررسی پارامتری

خلاصه: آرایه جت‌های بر خوردی قادر به افزایش انتقال حرارت در سراسر سطح برخورد هستند. یکی از چالش‌های اساسی در این روش، دشواری تأمین توزیع یکنواخت گرما روی صفحه هدف است. پژوهش عددی کنونی، تأثیر خصوصیات صفحه متخلخل در بستر کانال جریان را بر یکنواختی توزیع گرما روی سطح برخورد جت‌ها بررسی می‌کند. پارامترهای مورد مطالعه شامل تخلخل، نفوذپذیری و ضخامت لایه متخلخل است. ضریب ارزیابی عملکرد برای در نظر گرفتن هم‌زمان مقدار انتقال حرارت و میزان یکنواختی توزیع آن روی صفحه‌ی هدف پیشنهاد شده است. نتایج نشان می‌دهند در میان انواع سناریوهای مطالعه شده، پایین‌ترین ضریب عملکرد کلی انتقال حرارت برابر 0.0731 و مربوط به موردی است که لایه متخلخل به طور کامل بستر کانال را پوشش داده و ضرایب نفوذپذیری و تخلخل هر دو در کمترین مقدار خود به ترتیب $12-10 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ و $k = 0.2$ هستند. با این حال هنگامی که ضخامت لایه متخلخل نیمی از عمق کانال را در بر می‌گیرد و ضرایب تخلخل و نفوذپذیری محیط متخلخل به ترتیب در بالاترین $(\epsilon = 0.8)$ و پایین‌ترین $(k = 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s})$ مقادیر خود هستند، بهترین عملکرد کلی انتقال گرما معادل با مقدار $23/45$ فراهم می‌شود. این پژوهش نشان می‌دهد به کارگیری چیدمان مختلف برای محیط متخلخل می‌تواند روشی موثر برای تأمین توزیع یکنواخت‌تر گرما با حفظ نرخ انتقال حرارت بالا در جریان جت‌های بر خوردی چندگانه باشد.

۱- مقدمه

می‌کند و سپس با فاصله گرفتن از نقطه سکون در جهت شعاعی، ضریب انتقال حرارت به سرعت در منطقه جت دیواری کاهش می‌یابد. در بسیاری از کاربردها، انتقال حرارت بالا در کل سطح هدف مورد نیاز است و یک جت به تنهایی کافی نیست. علاوه بر این، صرف نظر از میزان گرمای منتقل شده، تغییرات زیاد آنها در سطح برخورد مطلوب نیست. نرخ انتقال حرارت موضعی نسبتاً زیاد می‌تواند با استفاده از آرایه جت‌های بر خوردی، به سطح وسیع‌تری گسترش یابد [۵].

تفاوت‌هایی بین رفتار جریان در تک جت بر خوردی و جت بر خوردی چندگانه وجود دارد [۶]. یکی از این تفاوت‌ها تداخل بین جت‌های مجاور قبل از برخورد به سطح، در شرایطی است که فاصله جت‌ها از یکدیگر کم یا فاصله نازل تا صفحه برخورد زیاد باشد. نتایج گزارش‌ها نشان می‌دهند که این برهم‌کنش‌ها قبل از برخورد جت‌ها منجر به کاهش قابل ملاحظه ضریب عملکرد انتقال حرارت نسبت به جت تک می‌شوند. بازگشت فواره جت و برهم‌کنش آن با جت مجاور در فواصل بین نازل‌ها می‌تواند منبع دیگری از رفتار متفاوت باشد [۷ و ۸]. علاوه بر این، جریان سیال از جت‌های بالادستی

به دلیل سهولت اجرا و قابلیت اطمینان و همچنین هزینه کم و طراحی ساده، جت‌های بر خوردی در طیف گسترده‌ای از کاربردها در صنعت مورد استفاده قرار گرفته‌اند [۱]. صنعت کاغذسازی برای افزایش فرایندهای خشک کردن، موتورهای توربین گازی برای خنک‌سازی پرها و دیگر اجزای گرم توربین و سیستم‌های هواپیمایی جهت جلوگیری از یخ‌زدایی از جمله کاربردهای صنعتی است که از مزایای جت بر خوردی بهره‌مند می‌شوند [۲ و ۳]. اخیراً از مکانیزم جت بر خوردی به هدف خنک‌سازی دستگاه‌های الکترونیکی برای پاسخگویی به مدیریت حرارت بهتر در جهت افزایش طول عمر و همچنین بهبود عملکرد استفاده شده است [۴].

یک جت بر خوردی منفرد دارای سه قسمت است، (الف) منطقه جت آزاد که در فضای بین خروجی نازل و قبل از برخورد قرار می‌گیرد، (ب) ناحیه برخورد و (ج) ناحیه جت دیواری [۵]. جریان یک جت میزان انتقال حرارت بالایی به صورت موضعی در نقطه رکود روی سطح برخورد فراهم

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



سرچشمه می‌گیرد و در نهایت جریان متقاطع^۱ را ایجاد می‌کند که می‌تواند جت‌های پایین دست را تحت تأثیر قرار دهد [۹ و ۱۰]. در آرایه جت‌های برخوردی، تغییرات متناوبی از نرخ انتقال حرارت موضعی در امتداد سطح برخورد با مقادیر بیشینه و کمینه به ترتیب متناظر با ناحیه سکون و مابین جت‌های مجاور وجود دارد [۱۱].

به دلیل مهیا نمودن نرخ انتقال حرارت بالا، جت‌های برخوردی چندگانه توجه بسیاری از محققان و مهندسان را در دهه‌های گذشته به خود جلب کرده است. با این حال، دستیابی به توزیع یکنواخت انتقال حرارت در کل سطح برخورد، همراه با نرخ حرارت مورد نیاز در بسیاری از کاربردها، هنوز یک چالش قلمداد می‌شود. در سال‌های اخیر، تلاش‌های بیشتری با انگیزه‌ی ایجاد توزیع یکنواخت‌تر انتقال حرارت روی صفحه‌ی هدف صورت پذیرفته است. روش‌های مختلفی مانند تغییر هندسه و فواصل نازل‌ها [۱۲]، استفاده از جت‌های چرخشی [۱۳]، به کار بردن سطح برخورد غیرمسطح [۱۴]، ایجاد سوراخ‌های مقعر یا محدب در صفحه برخوردی [۱۵] و صفحه شیردار یا موج‌دار [۱۶] از جمله ایده‌های مورد علاقه پژوهشگران بوده است. بنابراین با به کار بردن برخی روش‌های مناسب می‌توان فرصتی برای مدیریت بهتر توزیع انتقال گرما روی سطح ایجاد نمود.

مطالعات بسیاری وجود دارد که روی ویژگی‌های میدان جریان و انتقال حرارت آرایه جت‌های برخوردی روی سطح صاف به ویژه در شرایط دبی جریان بالا تمرکز دارند. تکنیک‌های مختلفی برای افزایش انتقال حرارت تا به امروز توسعه یافته‌اند و استفاده از محیط‌های متخلخل یکی از آن‌هاست [۱۷]. به کارگیری یک لایه متخلخل روی سطح انتقال حرارت یکی از روش‌های مؤثر برای افزایش نرخ انتقال حرارت است که همواره مورد توجه پژوهشگران در کاربردهای صنعتی بوده است [۱۸]. دلایل افزایش قابل ملاحظه انتقال حرارت با استفاده از محیط متخلخل را می‌توان ایجاد حرکات نامنظم در سیال و در نتیجه، افزایش اختلاط سیال و همچنین هدایت حرارتی بالای شبکه متخلخل برشمرد [۱۹]. در سال‌های اخیر تعدادی از مقاله‌ها و طیف وسیعی از تحقیقات، پیکربندی مربوط به یک جت تک عمود بر یک لایه متخلخل متصل به سطوح صاف را تحت پوشش قرار داده‌اند [۲۰ و ۲۱]. با این حال، پژوهش‌های اندکی در مورد کاربرد یک محیط متخلخل متصل به سطح جامد تحت برخورد آرایه‌ای از جت‌ها صورت پذیرفته است. به عنوان نمونه، کیم^۲ و همکاران [۲۲] اولین تحقیق در مورد عملکرد گرمایی ناشی از جت برخورد چندگانه روی یک محیط متخلخل را به صورت آزمایشگاهی

انجام دادند. آنها اثر عدد رینولدز و تراکم منافذ را با در نظر گرفتن فاصله‌ی بین دو جت و همچنین فاصله یک جت تا صفحه گرم را تحت شرایط شار حرارتی ثابت مورد ارزیابی قرار دادند. در این مطالعه هر دو آرایه‌ی مربعی جت برخوردی و همچنین تک جت در شرایط دبی جریان بالا بررسی شدند. در نتایج تجربی آنها آمده است که برای حالت تک جت، سطح با لایه متخلخل نسبت به سطح صاف افزایش قابل ملاحظه‌ای در نرخ خنک‌کاری دارد. درصد پایبندی از این نرخ افزایش برای آرایه جت‌های برخوردی نیز وجود دارد. با این حال، نتایج آنها نشان داد که آرایه‌ی جت‌های برخوردی نسبت به تک جت در اعداد رینولدز بالا و فواصل کوچک بین جت‌ها عملکرد بهتری دارد.

مطالعه دیگری در این زمینه وجود دارد که توسط ربانی^۳ و همکاران به صورت تجربی [۲۳] و همچنین در نرخ جریان بالا انجام شده است. آنها ویژگی‌های انتقال حرارت و افت فشار در یک کانال مستطیل شکل تحت شرایط جریان موازی کانال و همچنین برای جریان جت را بررسی کردند. هدف اصلی آنها ارزیابی عملکرد انتقال حرارت یک محیط متخلخل در مقایسه با دنده‌های محوری متصل به بستر کانال بود. آنها اذعان می‌کنند که اگر چه تمرکز مطالعه بر روی تغییر پارامترهای محیط متخلخل نیست، با این وجود بررسی پارامترهایی مانند هدایت حرارتی، تخلخل و نفوذپذیری محیط متخلخل باید بیشتر مورد توجه قرار گیرد. نتایج آنها نشان داد که سطح تحت پوشش محیط متخلخل انتقال گرمای بالاتری را برای جت برخوردی و همچنین برای جریان معمول فراهم می‌کند. علاوه بر این، در شرایط برابر و با هزینه‌ی افت فشار بیشتر، ضریب انتقال حرارت محیط متخلخل به طور قابل توجهی بالاتر از حالت دنده‌های محوری است.

در یک نمونه دیگر به بررسی تجربی تأثیر محیط متخلخل و نقش موقعیت مکانی آن در یک کانال مستطیلی پرداخته شده است. در این بررسی، سه حالت آرایه‌ی جت‌های برخوردی با اعداد رینولدز مقادیر بالا در نظر گرفته شده است [۲۴]. آنها نتیجه گرفتند که اگر چه با توجه به داده‌های موجود در مقالات، نرخ کلی انتقال حرارت با افزودن محیط متخلخل افزایش می‌یابد، اما انتقال حرارت موضعی صفحه برخوردی کاهش می‌یابد. این نتیجه را به دلیل ممانعت محیط متخلخل و در نتیجه کاهش جریان هسته جت بیان می‌کنند. ضریب انتقال حرارت با افزایش نسبت پر شدن کانال کاهش می‌یافت و برای مثال میانگین عدد ناسلت برای مورد کانال کاملاً پر شده نصف مورد پر نشده بود. آنها پیشنهاد دادند که برای بهبود بیشتر

1 Cross flow

2 Kim

۰/۷۵ و ۱، در شبیه‌سازی‌های عددی در نظر گرفته شده است. چهار مورد نیز ضریب نفوذپذیری می‌باشد که به ترتیب عبارت است از $10^{-12} \times 1/76$ ، 10^{-11} ، $10^{-10} \times 1/76$ ، $10^{-9} \times 1/76$ و همچنین سه مورد تداخل مختلف $0/2$ ، $0/5$ ، $0/8$ که برای میدان جریان شامل آرایه جت‌های برخوردی ارزیابی می‌شود. تمام شبیه‌سازی‌ها در جریان با عدد رینولدز ۱۵۰ انجام می‌شود. برای ارزیابی عملکرد انتقال حرارت، میانگین عدد ناسلت روی سطح فعال برای سنجش کمیت نرخ انتقال حرارت به کار می‌رود. برای سنجش یکنواختی توزیع انتقال حرارت، حداکثر اختلاف بین عدد ناسلت موضعی در طول جریان و همچنین نوسانات کلی توزیع عدد ناسلت روی سطح فعال در نظر گرفته می‌شوند. بر همین اساس، شاخص انحراف معیار نرمالایز شده‌ی مقادیر موضعی نرخ انتقال حرارت و اختلاف بیشینه‌ی نرمالایز عدد ناسلت موضعی روی سطح هدف به کار برده شده‌اند. علاوه بر این، با بهره‌گیری از کانتورهای سرعت و دما، درک بهتری از فیزیک جریان حاصل می‌شود و توضیح اینکه چگونه پارامترها بر نتایج انتقال حرارت تأثیر می‌گذارند ارائه شده است. با مطالعه‌ی فیزیک جریان، درک بهتری از دو پدیده‌ای که از عوامل اصلی غیریکنواختی انتقال حرارت روی صفحه‌ی هدف به شمار می‌روند، ارائه می‌شود. این دو پدیده، عبارت از اثرات جریان متقاطع و تداخل جت‌های مجاور هستند. سرانجام، برای کمک به طراحی و بهینه‌سازی هندسه‌ی سیستم که شامل آرایه جت برخوردی می‌باشد و همچنین انتخاب مناسب پارامترهای تداخل، یک شاخص برای ارزیابی عملکرد حرارتی کلی معرفی و محاسبه می‌شود. این شاخص هم کمیت (مقدار کل انتقال حرارت) و هم کیفیت (یکنواختی توزیع دما) را در نظر می‌گیرد. مقایسه ترکیب‌بندی‌های گوناگون جریان با استفاده از ضریب عملکرد حرارتی صورت می‌پذیرد.

۲- مدل‌سازی عددی و روش حل

در این پروژه از کد تجاری انسیس فلونت نسخه ۱۸/۲ با استفاده از سیستم محاسباتی سریع موازی با ۶ تا ۸ پردازنده برای شبیه‌سازی جریان سیال و ویژگی‌های انتقال حرارت میدان جریان آرایه جت‌های برخوردی در کانال پوشیده شده از لایه‌ی متخلخل استفاده می‌شود. نرم‌افزار فلونت مبتنی بر روش حجم محدود با گسسته‌سازی مرتبه دوم است که برای حل معادلات حاکم استفاده می‌شود. الگوریتم سیمپل^۱ برای زوج (کوپل) کردن سرعت و فشار انتخاب شده است. علاوه بر این، از طرح بالادست (آپویند) مرتبه دوم^۲

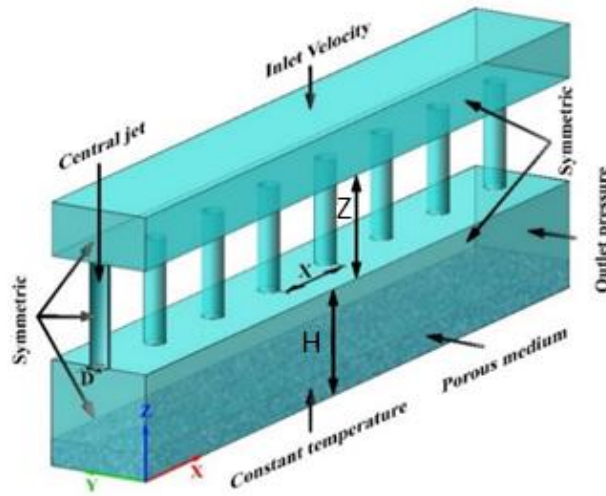
نرخ انتقال حرارت، باید پارامترهای محیط متخلخل تنظیم شوند تا شدت تلاطم را بدون شکستن جریان هسته جت افزایش دهند [۲۴]. عملکرد انتقال حرارت بر روی سطح برخوردی شامل یک لایه متخلخل در یک آرایش جریان جت برخوردی چندگانه تحت تأثیر پارامترهای بسیاری قرار دارد. برخی از این پارامترها تداخل، نفوذپذیری و ارتفاع لایه متخلخل و عدد رینولدز جت‌ها هستند [۲۵ و ۲۶].

با توجه به پژوهش‌های پیشین می‌توان دریافت که داده‌های اندکی در ارتباط با بررسی آرایه‌ی جت برخوردی، با در نظر گرفتن یک سطح متخلخل در بستر کانال، وجود دارد و نیاز است که در این زمینه مطالعات بیشتری انجام گیرد. همچنین در پژوهش‌های در دسترس، بررسی‌های انجام گرفته تجربی بوده‌اند و تحلیل‌های عددی که می‌تواند جزئیات را آشکار کند وجود ندارند. علاوه بر این، در تحقیقات قبلی فقط شرایط مرزی دیوار با شار حرارتی ثابت در اعداد رینولدز بالا مورد مطالعه قرار گرفته‌اند که با وضعیت واقعی در بسیاری از کاربردها متفاوت است. این در حالی است که اگر چه بسیاری از کاربردها شامل جت‌های متلاطم می‌شوند، اما جت‌های آرام در مواردی که سیال چسبناک است یا برای مثال در اجزای موجود در سیستم‌های میکروالکترونیک که هندسه مینیاتوری دارند، به وجود می‌آیند. بنابراین انجام یک مطالعه عددی به منظور تجزیه و تحلیل ویژگی‌های میدان جریان و انتقال حرارت در یک کانال شامل آرایه جت‌های برخوردی که به یک محیط متخلخل متصل است ضروری به نظر می‌رسد. به علاوه، در این مطالعه، عدد رینولدز پایین برای رژیم جریان و شرایط مرزی سطح با دمای ثابت لحاظ می‌گردند.

افزایش انتقال حرارت دغدغه و تمرکز اصلی بیشتر مطالعاتی است که در مورد جت‌های برخوردی چندگانه، انجام می‌گیرد. این در حالی است که یکنواختی نرخ انتقال حرارت روی سطح برخوردی در بسیاری از کاربردها از اهمیت زیادی برخوردار است. هدف از پژوهش کنونی، کاهش دادن اختلاف بین تغییرات متناوب در انتقال حرارت موضعی روی یک سطح است در عین حال که بتوان به کمترین افت در انتقال کلی گرما نیز دست یافت. برای رسیدن به این هدف، یک مطالعه پارامتری جامع پیرامون تأثیر محیط متخلخل بر عملکرد انتقال حرارت در محدوده‌ی عدد رینولدز پایین صورت پذیرفته است. شناسایی میزان تأثیر تداخل، نفوذپذیری و ضخامت لایه متخلخل در چنین جریانی پیش از این مورد مطالعه قرار نگرفته است.

در مجموع، ۴۸ ترکیب ناشی از تغییر پارامترهای لایه‌ی متخلخل از جمله ۴ تغییر که عبارت است از نسبت ضخامت به عمق کانال: ۰/۲۵، ۰/۵،

1 SIMPLE algorithm
2 Second-order upwind



شکل ۱. نمای شماتیک ۳ بعدی دامنه محاسباتی متشکل از کانال پوشیده شده با بستر لایه متخلخل تحت شرایط آرایه جت‌های برخوردی

Fig. 1. 3D schematic view of the computational domain consisting of a channel covered with a porous layer substrate under impinging jet array conditions

سوراخ دایره‌ای یکسان در یک آرایه مربعی شکل متشکل از جت‌های برخوردی با چیدمان خطی را مطابق با آنچه در شکل ۲ آورده شده است، نشان می‌دهد. از آنجا که شبیه‌سازی آرایه‌ای متشکل از ۲۲۵ جت برخوردی منجر به هزینه‌ی محاسباتی بسیار بالایی می‌شود، مدل محاسباتی با استفاده از شرایط مرزی متقارن مطابق پیشنهاد راثو و پنومادو [۵] در امتداد یک خط با ۷/۵ جت، ساده می‌شود.

قطر نازل‌ها $D=0/4$ mm و نسبت فاصله بین جت‌ها در جهت‌های هم‌راستا (X/D) و عمود بر جریان (Y/D) ، همچنین نسبت ارتفاع نازل (Z/D) و فاصله نازل تا صفحه هدف (H/D) ثابت و برابر ۵ است.

۲-۲- معادلات حاکم و مدل ریاضی

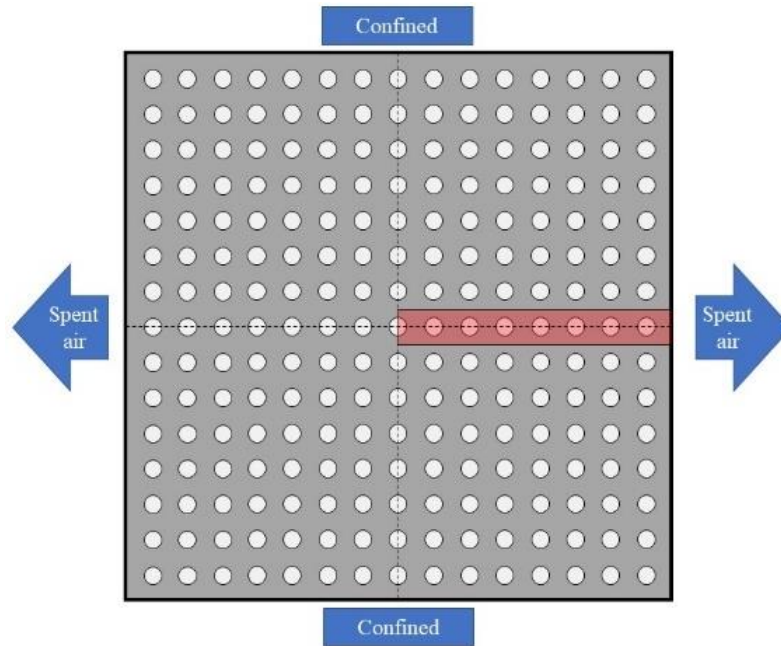
برای یافتن ویژگی‌های میدان جریان و انتقال حرارت در یک کانال تحت شرایط آرایه‌ی جت‌های برخوردی، معادلات پیوستگی، مومنتوم و انرژی در نواحی بدون تخلخل و متخلخل باید گسسته‌سازی و حل شوند. از آنجا که جزئیات مربوط به مشتقات معادلات در بسیاری از مقالات موجود است، در اینجا فقط معادلات حاکم برای جریان سه بعدی تراکم‌ناپذیر با شرایط پایا در مختصات کارتزین ارائه می‌شود.

برای در نظر گرفتن پایداری همگرایی حل استفاده می‌شود. دقت همگرایی برای معادله انرژی و سایر موارد بین 10^{-4} تا 10^{-6} در نظر گرفته شده است. برای تأیید همگرایی تکرارهای عددی، یک شرط دوم نیز در نظر گرفته شده است که بر مبنای آن لازم است تغییر شار گرمای میانگین روی صفحه برخورد با دو تکرار پشت سر هم کمتر از یک درصد باشد. هندسه جریان، شرایط مرزی و پارامترهای به کار گرفته شده، معادلات حاکم، مدل‌های تلاطم، روش حل عددی، بررسی شبکه محاسباتی و استقلال از شبکه و همچنین اعتبارسنجی نتایج عددی در این بخش توضیح داده می‌شود.

۲-۱- هندسه جریان و مدل فیزیکی

شکل ۱، نمای سه بعدی یک مدل فیزیکی کانال جریان تحت شرایط آرایه جت‌های برخوردی را نشان می‌دهد. در این هندسه، یک کانال به طول ۱۵ میلی‌متر و سطح مقطع عرضی مربع شکل دیده می‌شود که بستر پایین آن با یک محیط متخلخل همگن و ایزوتروپیک پوشش داده شده است. این هندسه که توسط راثو^۱ و همکارانش استفاده شده است [۲۷]، مدل محاسباتی بازایی شده از یک مجموعه آزمایشی بزرگتر با تعداد کل 15×15

1 Rao



شکل ۲. شماتیک آرایه جت‌های برخوردی با چیدمان خطی نازل‌های دایره‌ای و شرایط خروجی مدل

Fig. 2. Schematic of impinging jets array with linear arrangement of circular nozzles and model outlet conditions

(ب) ناحیه متخلخل (لایه پخش کننده گاز)

۲-۲-۱ معادله پیوستگی

$$\rho U_i \frac{\partial U_j}{\partial x_i} = -\frac{\partial P}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_i} \times \left[\mu \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) - \rho \overline{u'_i u'_j} \right] - \frac{\mu}{k} \varepsilon U_i \quad (3)$$

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

۲-۲-۲ معادله مومنتوم
الف) ناحیه بدون تخلخل

آخرین عبارت در معادله بالا، ترم دارسی مربوط به محیط متخلخل را نشان می‌دهد. نمادهای ε و k در این عبارت، به ترتیب مربوط به تخلخل و نفوذپذیری هستند.

$$\rho U_i \frac{\partial U_j}{\partial x_i} = -\frac{\partial P}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\mu \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) - \rho \overline{u'_i u'_j} \right] \quad (2)$$

۲-۲-۳ معادله انرژی

الف) ناحیه بدون تخلخل

$$\rho U_i \frac{\partial T}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\frac{k_f}{C_p} \frac{\partial T}{\partial x_i} - \rho \overline{u'_i T'} \right] \quad (4)$$

در معادله بالا، ρ ، P و U_i به ترتیب چگالی، فشار متوسط و سرعت سیال هستند. علاوه بر این، u'_i مربوط به مؤلفه نوسانی سرعت و $\overline{u'_i u'_j}$ ترم تنش رینولدز را نشان می‌دهد.

[۳۲] پیشنهاد شده است، در پیش بینی دقیق ترین نتایج با هزینه محاسباتی مناسب بسیار موثر بوده است [۲۹ و ۳۱]. از این رو، در این مطالعه نیز مدل $k-w$ SST استفاده شده است. این مدل، از الگوی دو معادله ای $k-w$ در نواحی نزدیک دیواره استفاده می کند و در نواحی دورتر به مدل $k-\epsilon$ تبدیل می شود. مدل تلاطم $k-w$ SST نیز از دو معادله انتقال تشکیل شده است، یکی برای انرژی جنبشی تلاطم (k) و دیگری برای میزان اتلاف خاص (w) که به شرح زیر محاسبه می شوند:

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_k \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + G_k - Y_k + S_k \quad (7)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho w u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_w \frac{\partial w}{\partial x_j} \right) + G_w - Y_w + D_w + S_w \quad (8)$$

در این معادلات، Γ ، G و Y به ترتیب نفوذ، تولید و اتلاف متغیرهای مربوطه هستند. D_w ترم مربوط به پخش متقابل است. S_k و S_w ترم های منبع تعریف شده توسط کاربر را نشان می دهند. جزئیات بیشتر و تعریف هر اصطلاح را می توان در مرجع [۳۲] یافت. در رابطه با حل معادله پیوستگی، مومنتوم و انرژی برای محیط متخلخل نیز عمدتاً دو مدل وجود دارد که هر دو توسط محققان مختلف به کار برده شده اند و هر یک معایب و مزایای خاص خود را دارد [۱۷ و ۳۳]. در مدل اول، به اصطلاح مدل تعادلی، ماتریس سیال و جامد متغیرهای یکسانی دارند و بنابراین، هیچ انتقالی بین این دو اتفاق نمی افتد. با این حال در رویکرد دوم، هیچ تعادل حرارتی بین ماتریس سیال و جامد وجود ندارد و بنابراین دو مجموعه معادلات انرژی (یکی برای هر فاز) در محیط متخلخل بایستی حل شوند [۳۴]. در مدل سازی های انجام شده در این مطالعه، مدل تعادلی برای مرز واسط در حالتی که نیمی از محیط متخلخل است به کار برده شده است.

۲-۳- شرایط مرزی

هوا از سطح مقطع بالای هندسه با سرعت ورودی یکنواخت $V=0.2 \text{ m/s}$ و همچنین دمای یکسان $T=298\text{K}$ وارد محفظه می شود. پس از ورود به محفظه، هوا از سوراخ های جت می گذرد تا جریان در کانال تسریع شود و سپس به صفحه گرم شده برخورد می کند. صفحه هدف (سطح

در معادله انرژی، T ، C_p و k_f به ترتیب دما، ظرفیت گرمایی ویژه و ضریب هدایت حرارتی سیال می باشد. در این معادله، $\overline{\rho u_i' T'}$ شار گرمای آشفته را نشان می دهد. ترم های شار گرمای آشفته و تنش رینولدز که با میانگین گیری زمانی معرفی می شوند، ضروری است که با یک مدل آشفته مشخص شوند.
(ب) ناحیه متخلخل (لایه پخش کننده گاز)

$$\rho U_i \frac{\partial T}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_k} \left[\frac{k_{eff}}{C_p} \frac{\partial T}{\partial x_k} - \overline{\rho u_i' T'} \right] \quad (5)$$

نماد k_{eff} ، ضریب هدایت حرارتی موثر محیط متخلخل نامیده می شود [۱۷] و توسط رابطه زیر تعیین می شود:

$$k_{eff} = \epsilon k_f + (1 - \epsilon) k_s \quad (6)$$

که در این معادله نسبت رسانندگی جامد k_s به رسانندگی سیال k_f ، ۱۳/۵ در نظر گرفته شده است [۲۸].

۲-۲-۴ مدل آشفته

اگرچه شبیه سازی ها در محدوده جریان با عدد رینولدز پایین انجام می شود، به دلیل تلاطم و پیچیدگی ذاتی جت برخوردی، مدل های دو معادله ای آشفته پیش بینی های دقیق تری را نسبت به مدل جریان آرام انجام می دهند و به همین منظور در تحقیقات عددی مربوط به جت های برخوردی به طور گسترده ای مورد استفاده قرار می گیرند. بنابراین، دو معادله انتقال برای حل معادلات حاکم و پیش بینی خصوصیات جریان متلاطم جت برخوردی اضافه می شود. معمولاً، اجرای یک مدل تلاطم پایدار از دغدغه های مهم در شبیه سازی جریان جت برخوردی محسوب می شود. مجموعه ای از تحقیقات در مورد قابلیت اطمینان مدل های مختلف آشفته برای شبیه سازی جریان جت های برخوردی توسط محققان مختلف انجام گرفته است [۲۹، ۳۰ و ۳۱]. پژوهشگران مختلف گزارش کرده اند که در مقایسه با سایر مدل های آشفته، مدل $k-w$ SST که توسط منتر

در اینجا زیرنویس i برای نمایش مرز رابط^۱ به کار گرفته شده است. U_{if} سرعت داری در فصل مشترک روی سمت متخلخل و U_{ip} سرعت در فصل مشترک روی سمت جریان آزاد است.

معادله انرژی نیز باید در هر دو حوزه سیال و متخلخل حل شود. در حالی که این معادله برای ناحیه سیال به شکل استاندارد آن است، در ناحیه متخلخل وضعیت پیچیده‌تری دارد. در این مطالعه چون مدل تعادلی حرارتی محلی به منظور مدل‌سازی عملکرد حرارتی توسط معادله انرژی در حوزه متخلخل اتخاذ شده است، شرایط حرارتی سطح متخلخل/سیال به صورت زیر نوشته شده است که برای دما و شار حرارتی می‌باشد:

$$T_{if} = T_{ip}, k_f \frac{\partial T}{\partial n} = k_{eff} \frac{\partial T}{\partial n} (k_f = k_{eff}) \quad (13)$$

که T_{if} و T_{ip} به ترتیب دمای سیال در سمت سیال خالص روی متخلخل در سطح مشترک می‌باشد.

خروجی

$$\frac{\partial T}{\partial n} = 0, P = P_{atm} \quad (14)$$

علاوه بر این شرایط مرزی، همان‌طور که در شکل ۱ مربوط به مدل فیزیکی نشان داده شده است، شرط مرزی متقارن برای سایر صفحات کانال و همچنین صفحات کناری محفظه بالا در نظر گرفته می‌شود. شرط مرزی متقارن در دیواره‌های جانبی ایجاب میکند که یک ردیف از جت‌ها به عنوان نمایندگی آرایه‌ی جت‌های برخوردی معرفی شوند. همچنین از شرط مرزی فشار $\frac{\partial P}{\partial n}$ برای تمام مرزهایی که n عمود بر مرز است، استفاده می‌شود. در این دیوارها شرایط مرزی بی‌دررو و شرط سطوح بدون لغزش به کار می‌رود

۲-۴- تعریف پارامترها

تعریف پارامترهای به کار گرفته شده برای تحلیل نتایج، در این بخش ارائه شده است. عدد رینولدز با استفاده از جریان جرم متوسط حجمی مجموع جت‌های برخوردی به صورت زیر تعیین می‌شود:

برخورد) به عنوان دیواری با دمای ثابت $T=353 \text{ K}$ و شرایط مرزی بدون لغزش در نظر گرفته می‌شود. پس از برخورد، هوای گرم شده در جهت جریان حرکت کرده و سپس از دهانه خروجی خارج می‌شود. یک فاصله‌ی اضافی از نقطه برخورد آخرین جت لحاظ شده تا اطمینان حاصل شود که شرایط مرز خروجی تأثیری بر میدان جریان ندارد. بنابراین، شرایط مرزی برای هندسه‌ی کانال مربوط به شکل ۱ به شرح زیر بیان می‌شود:

ورودی (ورودی محفظه)

$$T = T_{in}, U = U_{in} \quad (9)$$

دیوارها

الف) دیوار بالا

$$\frac{\partial T}{\partial n} = 0, U = 0 \quad (10)$$

ب) دیوار پایین (سطح فعال یا صفحه برخورد)

$$T = T_w, U = 0 \quad (11)$$

سطح مابین جریان آزاد و محیط متخلخل (مرز واسط)

با توجه به انتخاب مدل تعادلی برای مدل‌سازی، شرایط تعادل جرم، تکانه و انرژی باید در سطح مشترک متخلخل/سیال برآورده شوند. در فصل مشترک متخلخل/سیال، شرط پیوستگی برای متغیرها و شار آنها بایست برقرار باشد. شرط تعادل جرم و پیوستگی تنش برشی به شرح زیر نشان داده شده است:

$$U_{if} = U_{ip}, \mu_f \frac{\partial U}{\partial n} = \mu_{eff} \frac{\partial U}{\partial n} (\mu_f = \mu_{eff}) \quad (12)$$

۲-۵- تولید شبکه محاسباتی و تحلیل استقلال از شبکه

تمام مش‌های استفاده شده در این مطالعه برای شبیه‌سازی‌های عددی با در نظر گرفتن محیط متخلخل در بستر کانال، با نرم‌افزار گمیت ۲,۴,۶ تولید شده‌اند. شکل ۳ نمای جانبی دامنه محاسباتی مشبک را نشان می‌دهد. به دلیل کمبود فضا و وضوح بیشتر، فقط هندسه کانال نشان داده شده است. همان‌طور که در این شکل مشخص است، برای تمام شبیه‌سازی‌ها از یک شبکه بدون ساختار با عناصر چهاروجهی استفاده شده است. این مش به گونه‌ای ایجاد شده است که می‌تواند تمام ویژگی‌های میدان جریان جت برخوردی چندگانه را ارائه نماید. این شبکه در مجاورت نازل‌ها و امتداد آنها و همچنین منطقه سکون که شیب فشار و سرعت زیاد است بسیار متراکم است. علاوه بر این، به دلیل حساسیت زیاد مدل تلاطم $SST k-w$ به مش‌های نزدیک دیواره، از مش‌های با وضوح بالاتر در سلول‌های مجاور دیوار استفاده می‌شود. دامنه محاسباتی شبکه نشان داده شده در اینجا مربوط به نسبت ارتفاع محیط متخلخل به ارتفاع کانال با اندازه ۰/۲۵ است. تولید مش متناسب با تغییر ارتفاع لایه متخلخل یا هر تغییر دیگری در هندسه مدل انجام می‌شود. بنابراین آنالیز استقلال از شبکه از ضرورت‌های نتایج عددی است که در این پژوهش برای هر تغییر رعایت شده است. برای بررسی استقلال از شبکه در حل عددی، یک مطالعه انجام شده است که در آن اندازه‌های مختلف شبکه محاسباتی از نیم میلیون تا سه میلیون سلول متغیر هستند. براساس میانگین عدد ناسلت روی سطح برخورد، نتایج مطالعه استقلال از شبکه در جدول ۱ نشان داده شده است.

$$Re = \frac{U_j D}{\nu} = \frac{4\dot{m}}{N\pi D\mu} \quad (15)$$

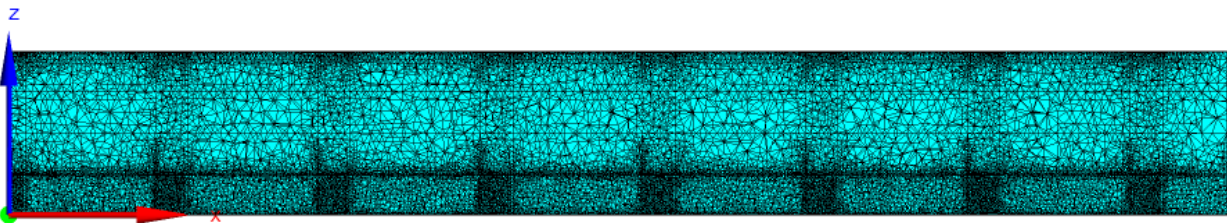
در معادله بالا، D و U_j ، به ترتیب قطر سوراخ جت و سرعت متوسط جت در خروجی نازل است. همچنین \dot{m} ، کل جریان جرمی هوای ورودی به حوزه محاسباتی و N تعداد نازل‌ها را نشان می‌دهد. علاوه بر این، عدد موضعی ناسلت و ضریب انتقال حرارت به ترتیب در رابطه (۱۶) و (۱۷) به شرح زیر محاسبه می‌شوند:

$$Nu = \frac{hD}{k_{eff}} \quad (16)$$

$$h = \frac{\dot{q}}{T_w - T_{in}} \quad (17)$$

که T_w و T_{in} به ترتیب میانگین دمای ورودی و دمای صفحه برخورد هستند. علاوه بر این، شار حرارتی موضعی در صفحه هدف به شرح زیر است:

$$\dot{q} = -k_{eff} \left. \frac{\partial T}{\partial z} \right|_{z=0} \quad (18)$$



شکل ۳. تولید مش و ایجاد شبکه محاسباتی برای شبیه‌سازی‌های عددی کانال که به طور جزئی با محیط متخلخل پوشش داده شده است

Fig. 3. Mesh generation and computational grid creation for numerical simulations of channels partially covered with porous media

جدول ۱. نتایج استقلال از شبکه

Table 1. The results of mesh independence

ردیف	تعداد سلول‌ها	Y^+ در اولین گره	ناسلت متوسط
۱	۵۲۸۶۹۶	۲/۸۵	۱۳/۲۰
۲	۱۰۳۶۲۲۱	۲/۳۷	۱۲/۴۵
۳	۱۹۵۹۱۳۵	۱/۷۳۵	۱۱/۹۰
۴	۳۰۳۳۶۴۷	۱/۴۵	۱۱/۸۰

بررسی عددی رآئو آمده است، یکسان می‌باشد [۵]. در شرایطی که کانال با لایه‌ی متخلخل به عنوان لایه پخش کننده گاز پوشش داده می‌شود، شرط شار حرارتی ثابت با مقدار 14268 W/m^2 روی صفحه برخوردی که به کار برده‌اند با شرط دمای ثابت 353 K بهبود یافته و برای این مطالعه جایگزین می‌شود. همان‌طور که در شکل ۴ نشان داده شده است، نتایج عددی مطالعه کنونی برای عدد ناسلت متوسط روی سطح برخوردی در اعداد رینولدز ۴۱۸، ۸۳۶، ۱۲۵۴ و ۱۶۷۲ با داده‌های عددی و تجربی موجود مقایسه شده است.

از این شکل مشهود است که نتایج عددی این پروژه برای میانگین ضریب انتقال حرارت با نتایج عددی و تجربی پیشین اختلاف بسیار ناچیزی دارد. در اعداد رینولدز پایین‌تر عدد ناسلت در مقایسه با داده‌های تجربی مطابقت بهتری دارند. علاوه بر این، در شکل ۴، تأثیر عدد رینولدز بر روی عدد متوسط ناسلت نیز دیده می‌شود که چنان که انتظار می‌رود با افزایش عدد رینولدز، مقدار متوسط عدد ناسلت به طور قابل توجهی افزایش می‌یابد.

۳- نتایج و بحث

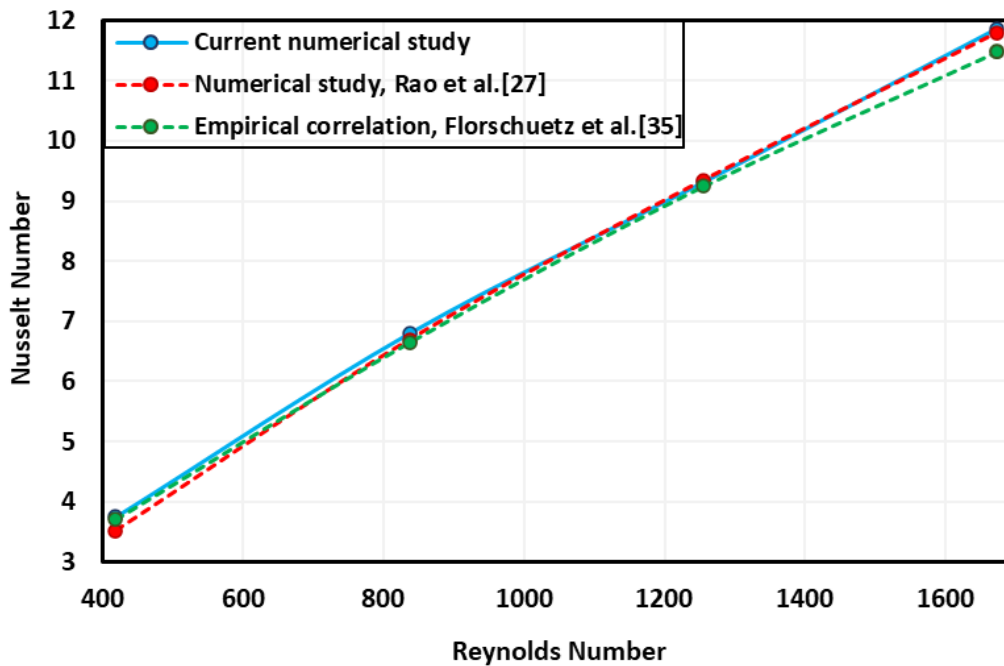
هدف اصلی این بخش دستیابی به یک دیدگاه جامع از نقش پارامترهای مؤثر محیط متخلخل بر عملکرد انتقال حرارت تحت تأثیر آرایه جت‌های برخوردی در جریان رینولدز پایین است. این پارامترها شامل تخلخل، نفوذپذیری و ضخامت لایه متخلخل است. به طور کلی محیط متخلخل بر اساس چندین پارامتر از جمله نوع ماده پایه، نفوذپذیری، تخلخل و هدایت حرارتی مؤثر مشخص می‌شود [۳۳ و ۳۴]. نوع ماده متخلخل در این مطالعه، آلومینیوم با رسانندگی گرمایی 0.3523 ، در نظر گرفته شده است. برای

همان‌طور که از جدول ۱ مشهود است، با افزایش تعداد سلول‌ها از نیم میلیون به ۲ میلیون و از ۲ به ۳ میلیون، نتایج میانگین عدد ناسلت روی سطح برخوردی به ترتیب در حدود ۱۰ و 0.85 درصد متفاوت است. بنابراین، شبکه بهینه با ۲ میلیون المان برای اطمینان از هزینه محاسباتی پایین و همچنین وضوح کافی در نظر گرفته شده است. علاوه بر این، الزامات مدل $SST k-w$ در مورد وضوح نزدیک دیواره و به ویژه وضوح در نزدیک دیوار صفحه برخوردی $Y^+ \geq 2$ ، گزارش شده است. یافته‌ها در آنالیز استقلال از شبکه نشان می‌دهند، نزدیکترین گره محاسباتی به دیوار در $Y^+ = 1.74$ ، اتفاق می‌افتد که شرایطی را که مش‌های متصل به دیوار درون لایه زیرین چسبناک قرار می‌دهند، برآورده می‌کند. برای این مورد، ارتفاع سلول اول از سطح برخوردی حدود 10^{-6} متر اعمال شد.

۲-۶- اعتبارسنجی نتایج عددی

داده‌های فراوانی در خصوص ارزیابی آرایه‌ی جت‌های برخوردی چندگانه در رژیم جریان با اعداد رینولدز پایین (حتی در شرایطی که لایه متخلخلی در بستر کانال نباشد) وجود ندارد. برای مقایسه و اعتبارسنجی روش عددی در پژوهش کنونی، نتایج عددی رآئو و همکارانش [۲۷] و رابطه تجربی ارائه شده توسط فلورشتز^۱ و همکارانش [۳۵] مورد استناد قرار گرفته است. آنها مدل‌سازی در محدوده اعداد رینولدز پایین را برای آرایه‌ای از جت‌های برخوردی چندگانه مورد ارزیابی قرار داده‌اند. هندسه و شرایط مرزی مدل جت برخوردی چندگانه که با جزئیات در بخش مدل‌سازی برای پژوهش حاضر ارائه شد با آنچه در کار تجربی فلورشتز و

1 Florschuetz



شکل ۴. اعتبارسنجی نتایج عددی

Fig. 4. Validation of numerical results

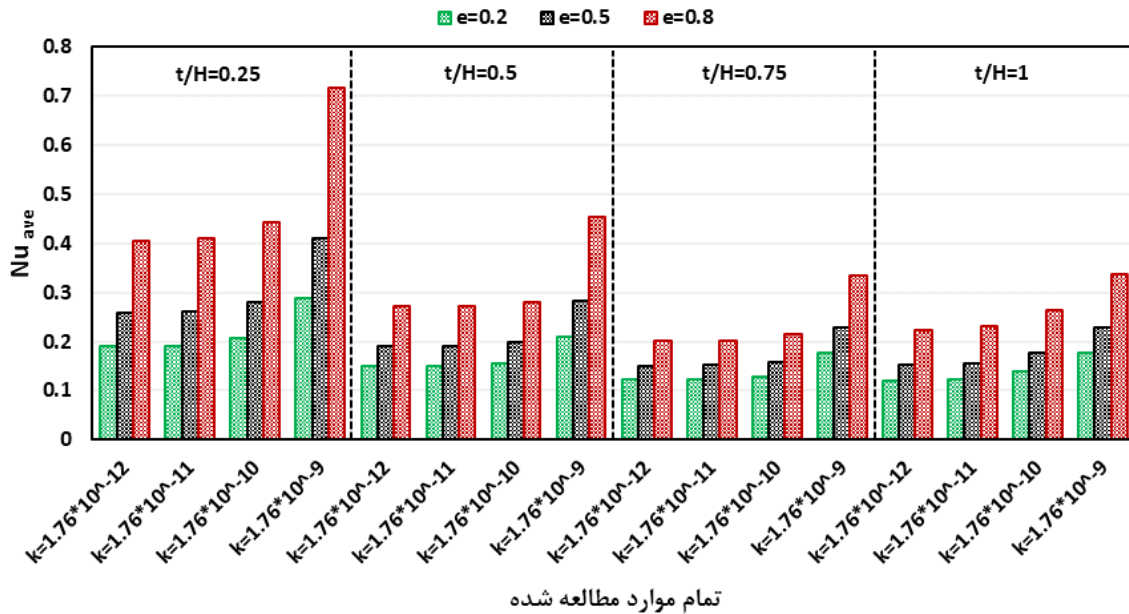
سطح برخورد با ضرایب وزنی مختلف برای مقایسه عملکرد کلی سناریوهای متفاوت چیدمان معرفی می‌شود.

۳-۱- مقدار متوسط انتقال حرارت

عدد ناسلت متوسط، Nu ، روی سطح هدف در موارد مختلف در شکل ۵ نشان داده می‌شود. برای سهولت مقایسه، خطوط نقطه چین به منظور جداسازی نسبت ضخامت‌های گوناگون لایه متخلخل ترسیم شده است. در این نمودار عدد ناسلت متوسط بر حسب موارد مختلف و طیفی از ضریب نفوذپذیری و تخلخل نمایش داده شده است.

با توجه به شکل ۵، آشکار است که ویژگی‌های محیط متخلخل تأثیر زیادی بر روی عملکرد شدت انتقال حرارت میدان جریان جت برخوردی دارند. چگونگی روند تغییرات و مقایسه عدد ناسلت متوسط در موارد مختلف خیلی پیچیده نیست. با افزایش تخلخل تحت شرایط ثابت، عدد ناسلت متوسط برای تمام موارد افزایش می‌یابد. با این حال دیده می‌شود که نسبت افزایش عدد ناسلت متوسط برای حالتی که افزایش تخلخل از ۰/۵ به ۰/۸ است بالاتر از آن برای افزایش تخلخل از ۰/۲ به ۰/۵ است. به طور مشابهی همین فرایند افزایشی با رشد ضریب نفوذپذیری نیز اتفاق می‌افتد. از مقایسه

دستیابی به هدف پژوهش حاضر، برای این نوع ماده متخلخل، چهار مقدار برای ضریب نفوذپذیری به ترتیب $1/76 \times 10^{-11}$ ، $1/76 \times 10^{-10}$ ، $1/76 \times 10^{-9}$ و $1/76 \times 10^{-8}$ و همچنین سه مورد تخلخل مختلف $\epsilon = 0/2$ ، $\epsilon = 0/5$ و $\epsilon = 0/8$ در نظر گرفته و بررسی شده است. علاوه بر این، چهار تغییر نسبت ضخامت به عمق کانال $0/25$ ، $0/5$ ، $0/75$ و 1 در شبیه‌سازی‌های عددی در نظر گرفته شده است. تجزیه و تحلیل ویژگی‌های میدان جریان روی صفحه متقارن هندسه به صورت خطوط جریان نمایش داده شده است. همچنین نحوه توزیع ضریب انتقال حرارت موضعی روی سطح فعال بر حسب چیدمان مختلف پارامترها تحت شرایط آرایه جت‌های برخوردی به صورت عددی بررسی و مقایسه می‌شود. این مقایسه‌ها هم به صورت کیفی و با نمایشی از کانتورهای میدان جریان و ترسیم نمودارهای عدد ناسلت موضعی بررسی می‌شود و هم به صورت کمی و با استفاده از شاخص‌های ارزیابی عملکرد انجام می‌شود. عدد ناسلت متوسط به منظور اندازه‌گیری میزان انتقال حرارت به کار می‌رود. انحراف معیار و اختلاف بیشینهی نرمال شدهی عدد ناسلت موضعی روی سطح هدف به عنوان شاخص‌های ارزیابی یکنواختی انتقال حرارت در سطح برخورد استفاده می‌شوند. علاوه بر این، یک شاخص عملکرد به منظور ارزیابی هم‌زمان اندازه و یکنواختی توزیع انتقال حرارت بر روی



شکل ۵. عدد ناسلت متوسط روی سطح هدف با مشخصه‌های گوناگون محیط متخلخل در $Re=150$

Fig. 5. Average Nusselt number on the target surface with different characteristics of the porous medium at $Re=150$

ناسلت موضعی نرمالایز شده σ_{Nu}^* و اختلاف بیشینه‌ی عدد ناسلت موضعی نرمال شده ΔNu ، در امتداد خط عبوری از مراکز جت‌ها در سطح برخورد به شرح زیر تعریف و استفاده می‌شود:

$$\sigma_{Nu}^* = \frac{\sigma_{Nu}}{\overline{Nu}} \quad (19)$$

که در آن \overline{Nu} و σ_{Nu} به ترتیب عدد ناسلت میانگین و انحراف معیار اعداد ناسلت موضعی اندازه‌گیری شده در امتداد خط میانی صفحه برخورد هستند.

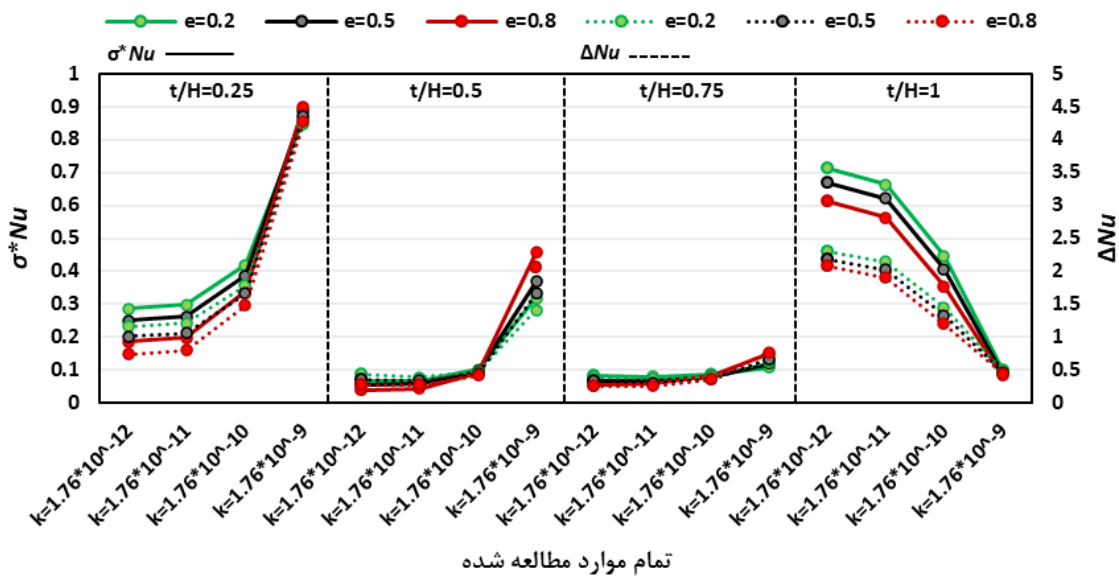
$$\Delta Nu = \frac{Nu_{max} - Nu_{min}}{Nu_{ave}} \quad (20)$$

به طور همزمان، انحراف معیار نرمالایز شده و همچنین اختلاف عدد ناسلت موضعی در حالات مختلف پارامترهای محیط متخلخل در نمودار شکل ۶ نشان داده شده است. روند کیفی تقریباً مشابهی برای هر دو شاخص ارزیابی یکنواختی تحت تأثیرات پارامترهای محیط متخلخل وجود دارد.

ضرایب نفوذپذیری نیز می‌توان دریافت که تفاوت نتایج هنگامی که ضریب نفوذپذیری بالاتر است قابل ملاحظه‌تر می‌شود. بنابراین میدان جریان جت برخوردی تحت لایه متخلخل با ضریب نفوذپذیری و درصد تخلخل بیشتر همیشه منجر به افزایش متوسط نرخ انتقال حرارت می‌شوند. بر خلاف اثرات دو متغیر تخلخل و نفوذپذیری، با افزایش نسبت ضخامت لایه متخلخل، ضریب انتقال حرارت متوسط روی کل سطح فعال کاهش می‌یابد. در مجموع از نتایج محاسبه شده مشخص است که بالاترین نرخ انتقال حرارت میانگین روی سطح فعال، برای نسبت ضخامت، ضریب نفوذپذیری و تخلخل به ترتیب $0/25$ ، $1/76 \times 10^{-9}$ و $0/8$ به دست می‌آید. همچنین نسبت ضخامت $0/75$ ، ضریب نفوذپذیری $1/76 \times 10^{-12}$ و تخلخل $0/2$ پایین‌ترین عدد ناسلت میانگین را ارائه می‌دهد. بنابراین، تغییر نوع آرایش پارامترهای محیط متخلخل می‌تواند ابزاری مفید برای کنترل شدت عدد ناسلت و همچنین مدیریت نرخ انتقال حرارت روی سطح هدف باشد.

۳-۲- یکنواختی انتقال حرارت

یکنواختی انتقال گرما را نمی‌توان با یک شاخص ساده قضاوت کرد. نحوه توزیع انتقال حرارت به وسیله‌ی انحراف معیار مجموعه‌ای از اعداد ناسلت موضعی در طول جریان و همچنین میزان تغییرات مقدار بیشینه‌ی انتقال حرارت موضعی ارزیابی شده است. برای این کار، انحراف معیار اعداد



تمام موارد مطالعه شده

شکل ۶. انحراف معیار و حداکثر اختلاف نرمالایز شده‌ی عدد ناسلت موضعی روی سطح فعال برای نفوذپذیری، درصد تخلخل و ضخامت‌های متفاوت لایه‌ی متخلخل در $Re=150$

Fig. 6. Standard deviation and maximum normalized difference of the local Nusselt number on the active surface for permeability, percentage of porosity and different thicknesses of the porous layer at $Re=150$

کاملاً متفاوتی دیده می‌شود. به این ترتیب که با افزایش نفوذپذیری، هر دو سنج‌های انحراف معیار σ_{Nu}^* و ΔNu کاهش یافته و در نتیجه یکنواختی انتقال حرارت افزایش می‌یابد. مستقل از اینکه درصد تخلخل محیط چقدر باشد، همواره بالاترین ضریب نفوذپذیری، کوچکترین σ_{Nu}^* و ΔNu و در نتیجه یکنواختی بیشتر انتقال حرارت را به همراه می‌آورد.

تأثیر پارامتر تخلخل بر ضرایب انحراف معیار عدد ناسلت موضعی کمی پیچیده‌تر است. همان‌طور که از شکل ۶ مشهود است در نسبت‌های ضخامت مختلف، حتی زمانی که کانال به طور کامل از محیط متخلخل پر شده است، در ضرایب نفوذپذیری خیلی پایین، با افزایش تخلخل، یکنواختی بیشتری رخ می‌دهد. با این حال در نفوذپذیری‌های خیلی بالا برای مثال $1/76 \times 10^{-9}$ با افزایش تخلخل، شاخص‌های σ_{Nu}^* و ΔNu افزایش یافته و در نتیجه یکنواختی کمتری در توزیع انتقال حرارت حاصل می‌شود. بنابراین، نقش افزایش تخلخل در ضرایب نفوذپذیری پایین همواره مثبت است ولی در نفوذپذیری‌های بالا تأثیر نامطلوبی را در توزیع یکنواخت انتقال حرارت بر جای می‌گذارد.

در مجموع، از نمودار شکل ۶ و مقایسه انحرافات معیار نرمالایز شده مشاهده می‌شود که بالاترین انحرافات در هر دو شاخص ارزیابی برای موردی است که در آن نسبت ضخامت $0/25$ و ضریب نفوذپذیری و تخلخل

با این حال، این اثرات بر روی هر دو شاخص در برخی موارد بسیار پیچیده است و از نظر کمی گاه تفاوت زیادی بین موارد مختلف دیده می‌شود. همان‌طور که برای چیدمان‌های $t/H = 0/25$ ، $t/H = 0/5$ و $t/H = 0/75$ در شکل ۶ مشاهده می‌شود، با افزایش نسبت ضخامت لایه متخلخل، هر دو شاخص σ_{Nu}^* و ΔNu کاهش می‌یابند. یادآوری می‌شود که کاهش این متغیرها به معنای یکنواخت‌تر شدن انتقال حرارت سراسری روی صفحه‌ی هدف است. این بدان معنی است که نسبت ضخامت بالاتر باعث بهبود یکنواختی کلی انتقال گرما و توزیع دما می‌شود. در مورد تأثیر نفوذپذیری محیط متخلخل چنین می‌توان گفت که برای همه‌ی ضخامت‌های لایه‌ی متخلخل، با افزایش نفوذپذیری، یکنواختی توزیع دما کاهش می‌یابد. بنابراین برای چیدمان‌های $t/H = 0/25$ ، $t/H = 0/5$ و $t/H = 0/75$ که لایه‌ی متخلخل به طور جزئی کانال را پوشانده است، پایین‌ترین نفوذپذیری منجر به بیشترین یکنواختی انتقال حرارت می‌شود. ضریب نفوذپذیری بالا تا حد زیادی به یکنواختی انتقال حرارت روی سطح آسیب می‌رساند. با افزایش ضخامت مضاعف لایه‌ی متخلخل به سوی شرایطی که به تدریج تمام کانال را در برگیرد، شیب تغییرات σ_{Nu}^* و ΔNu ناشی از تغییر ضریب نفوذپذیری نیز به تدریج کاهش می‌یابد. هنگامی که تمام کانال از محیط متخلخل پوشیده شده است، چنانچه از شکل ۶ آشکار است، روند

همان‌طور که در این موارد دیده می‌شود، نرخ انتقال حرارت پایین می‌آید و لیکن یکنواختی بیشتری روی سطح انتقال حرارت فراهم می‌شود.

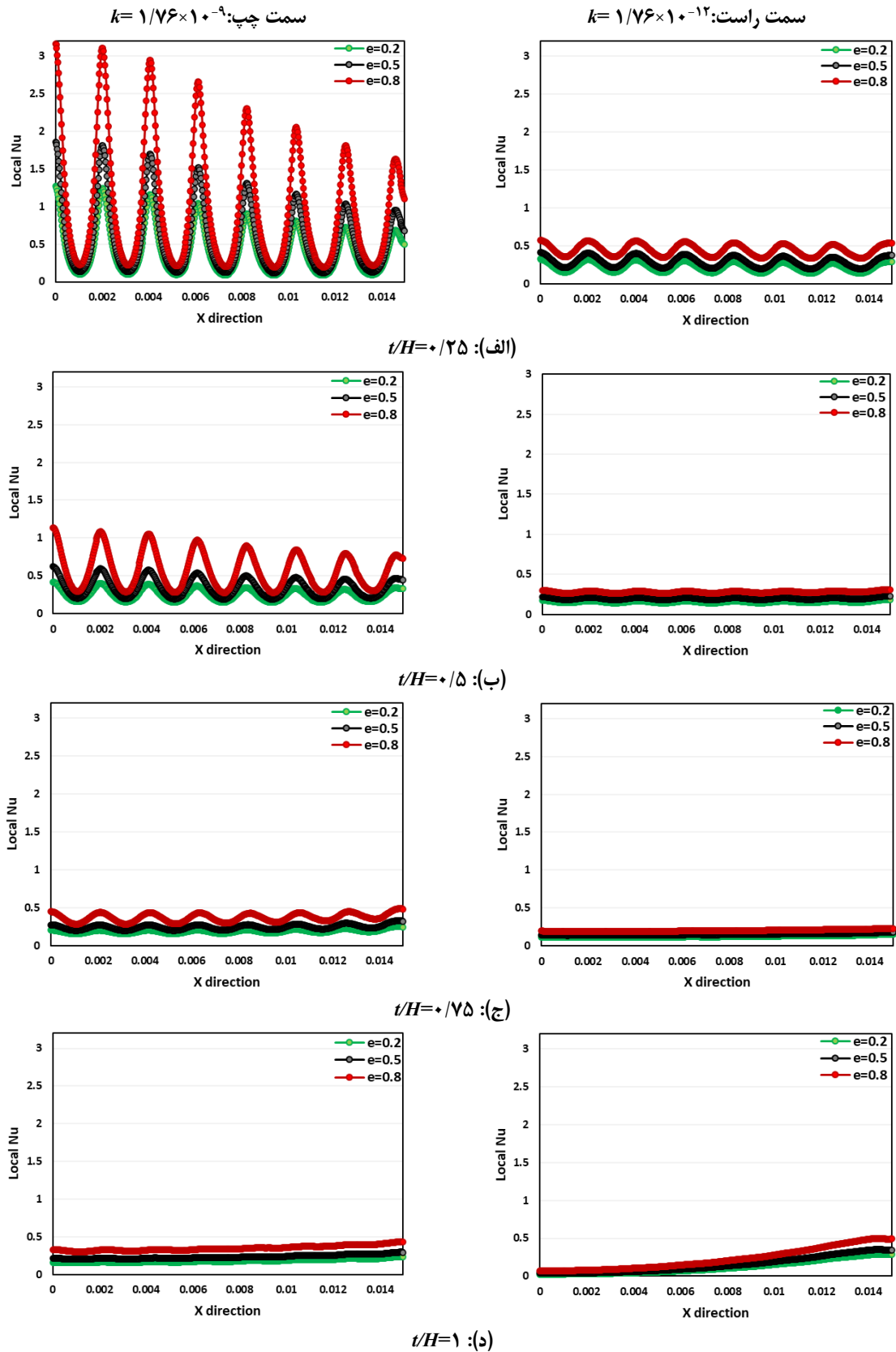
نکته‌ی قابل توجه دیگر مربوط به شکل ۷ این است که در موردی که $t/H = 1$ است، به خصوص در ضریب نفوذپذیری پایین‌تر، نرخ انتقال حرارت به تدریج در راستای محور x رو به افزایش است. این روند صعودی منجر به بیشینه مقدار عدد ناسلت موضعی در انتهای کانال می‌شود که ناشی از افزایش جریان عرضی متقاطع است که از سیال تجمع شده مربوط به جت‌های بالادست حاصل شده است. با مشاهده نمودارهای شکل ۷، روشن می‌شود که در تمامی حالات، با افزایش تخلخل، نرخ انتقال حرارت افزایش می‌یابد. درصد تخلخل در نسبت ضخامت‌های پایین و به ویژه نفوذپذیری‌های بالا بسیار مؤثر است و با افزایش نسبت ضخامت و کاهش نفوذپذیری از تأثیر آن کاسته می‌شود. با مقایسه نمودارهای مختلف، بسته به آن که در کاربرد مورد نظر میزان اهمیت کمیت (نرخ کلی انتقال حرارت) یا کیفیت (توزیع یکنواخت انتقال حرارت) هر کدام چقدر است می‌توان چیدمان مناسب را گزینش کرد. برای مثال در حالت $t/H = 0.25$ و ضریب نفوذپذیری پایین‌تر، نسبت به حالت $t/H = 0.5$ و ضریب نفوذپذیری بالاتر، نرخ انتقال حرارت کمتری مشاهده می‌شود. با این وجود در شرایط دبی جریان برابر، یکنواختی توزیع انتقال حرارت روی سطح فعال برای حالت دوم نسبت به اولی به مراتب بیشتر است. همین نتیجه برای حالت $t/H = 0.5$ با ضریب نفوذپذیری پایین‌تر در مقایسه با حالت $t/H = 0.75$ با نفوذپذیری بالاتر دیده می‌شود. در مجموع می‌توان گفت، افزایش تخلخل و میزان نفوذپذیری منجر به افزایش نرخ انتقال حرارت روی سطح فعال می‌شوند. علاوه بر این، مشهود است با افزایش ضخامت لایه متخلخل تا اندازه‌ای، توزیع عدد ناسلت همگن‌تر می‌شود که نشانه‌ای از توزیع انتقال حرارت بهتر در امتداد صفحه است. مقادیر بیشینه و کمینه عدد ناسلت موضعی با افزایش لایه متخلخل کاهش می‌یابد و برای ضخامت‌های بیشتر از $t/H = 0.75$ به حداقل و نزدیک به صفر نیز می‌رسد.

برای شناخت بهتر رفتار جریان و دلیل تغییرات ضرایب انتقال حرارت، توزیع عدد ناسلت موضعی روی سطح هدف برای حالات مختلف نشان داده می‌شود. کانتور توزیع عدد ناسلت موضعی برای هر دو ضریب نفوذپذیری بیشینه و کمینه، به ترتیب برای تخلخل‌های مختلف در شکل‌های ۸ الف-ج ارائه شده است. در تمامی این نتایج نسبت ضخامت لایه متخلخل ثابت و برابر با $t/H = 0.5$ می‌باشد.

به ترتیب $10^{-9} \times 1/76$ و 0.8 است. این حالت غیریکنواخت‌ترین توزیع سراسری دما را روی سطح انتقال حرارت نمایش می‌دهد. از سوی مقابل، بالاترین یکنواختی نرخ انتقال حرارت روی سطح برای حالتی که محیط متخلخل تا نیمه کانال را پوشش داده است و ضریب نفوذپذیری و تخلخل آن به ترتیب $10^{-12} \times 1/76$ و 0.8 است، مشاهده می‌شود. در شکل ۶ همچنین دیده می‌شود که در مورد نسبت ضخامت 0.75 ، اثرات ترکیبی پارامترهای محیط متخلخل با تغییرات σ_{Nu}^* و ΔNu خیلی قابل توجه نیست. برای تحلیل این موضوع به درک بهتری از جزئیات میدان جریان و توزیع عدد ناسلت روی سطح انتقال حرارت نیاز است.

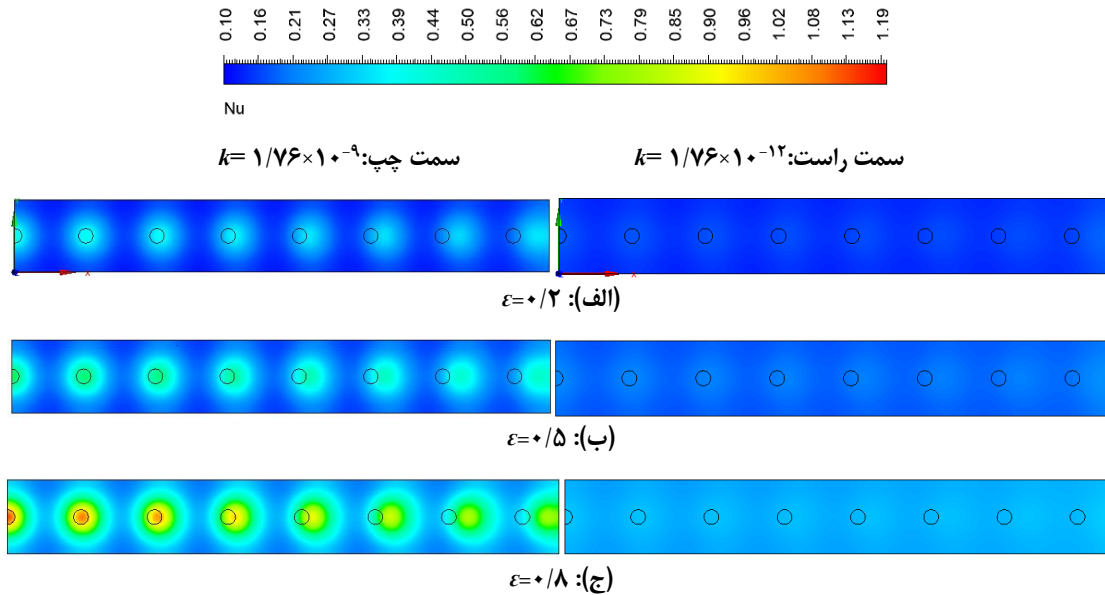
۳-۳- شناخت بهتر فیزیک جریان

نمودارهای عدد ناسلت موضعی در راستای خط مرکزی سطح انتقال حرارت هدف، برای ضخامت‌های گوناگون و درصد‌های مختلف تخلخل لایه متخلخل در دو ضریب نفوذپذیری بیشینه و کمینه در شکل ۷ نشان داده شده است. با توجه به این شکل دیده می‌شود که مقادیر بیشینه موضعی Nu در موقعیت‌های نزدیک به نازل‌ها به ویژه وقتی x کوچک است ظاهر می‌شوند. سپس با افزایش x جریان متقاطع تولید شده توسط هوای انباشته شده به سمت خروجی، قوی‌تر شده و تعامل با هسته جت‌ها بیشتر صورت می‌گیرد و در نتیجه کاهش عدد ناسلت نیز مشهود است. همچنین، انحراف بین موقعیت‌های بیشینه عدد ناسلت موضعی و موقعیت نازل در جهت x ناشی از تأثیر جریان عرضی متقاطع افزایش می‌یابد. این اثرات در نسبت ضخامت‌های پایین‌تر و نفوذپذیری‌های بالاتر به اوج می‌رسد و با افزایش نسبت ضخامت و کاهش ضریب نفوذپذیری کاهش می‌یابد. برای مثال هنگامی که لایه متخلخل نیمه پر ($t/H = 0.5$) در کانال است، جریان جت بدون مزاحمت به داخل لایه متخلخل هدایت می‌شود و منجر به ایجاد یک کانتور با نوسانات قابل توجه عدد ناسلت موضعی می‌شود. با این حال تفاوت بین بیشینه و کمینه عدد ناسلت موضعی در مقایسه با حالتی که نسبت ضخامت کوچک‌تر است، بسیار کمتر است. با افزایش نسبت ضخامت لایه متخلخل، از اثرات مستقیم جت‌ها و تعاملات بین آنها کم می‌شود تا جایی که روند کاملاً متفاوتی در حالتی که $t/H = 1$ ، دیده می‌شود به طوری که گویی از مکانیزم جت تبعیت نمی‌کند و اثرات جت دیده نمی‌شود. این رفتار تا حدی برای مواردی که کانال و در نسبت ضخامت‌های لایه متخلخل بالا پوشش داده شده است و ضرایب نفوذپذیری پایین دارند، هم دیده می‌شود.



شکل ۷. تأثیر پارامترهای مختلف محیط متخلخل بر توزیع عدد ناسلت موضعی روی خط مرکزی سطح هدف در $Re=150$

Fig. 7. The effect of different parameters of the porous medium on the local Nusselt number distribution on the center line of the target surface at $Re=150$



شکل ۸. توزیع عدد ناسلت موضعی روی صفحه برخوردی تحت تأثیر نفوذپذیری و تخلخل‌های مختلف برای $t/H=0.5$ و $Re=150$

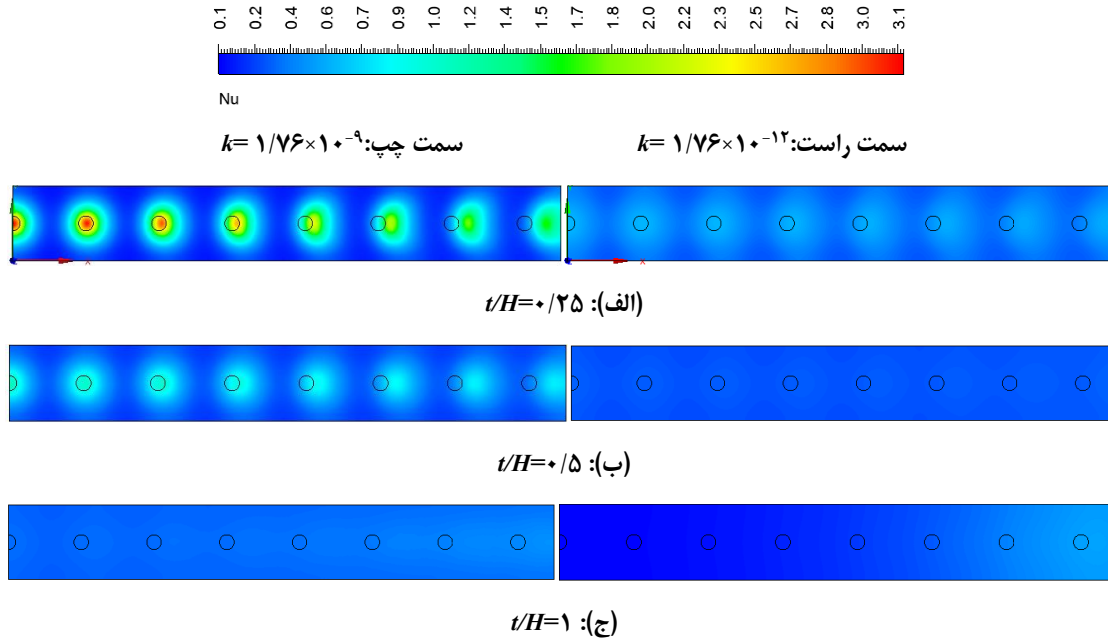
Fig. 8. Local Nusselt number distribution on the impact surface under the influence of different permeability and porosities for $t/H=0.5$ and $Re=150$

که در ضریب نفوذپذیری پایین، با افزایش تخلخل، جت به راحتی به لایه متخلخل نفوذ می‌کند و به سطح فعال می‌رسد و در عین حال میدان توزیع با سرعت بیشتری همگن می‌شود.

برای مطالعه دقیق‌تر تأثیرات ضخامت لایه متخلخل، توزیع عدد ناسلت موضعی در طول جریان برای سه نسبت ضخامت لایه متخلخل در دو ضریب نفوذپذیری متفاوت در شکل ۹ نمایش داده شده است. شکل ۹ نشان می‌دهد که ضخامت لایه متخلخل به شدت بر میزان نرخ انتقال حرارت و همچنین نحوه توزیع ضریب انتقال حرارت تأثیر می‌گذارد. وجود لایه متخلخل هم فاکتورهای مثبت و هم منفی بر عملکرد انتقال حرارت دارد. با افزایش ارتفاع لایه متخلخل، از یک طرف، اثر مانع لایه متخلخل باعث کاهش بازده انتقال حرارت ناشی از اثرات مستقیم جت‌های برخوردی به سطح هدف می‌شود. از طرف دیگر، افزایش پخش گاز و توزیع مؤثر روی سطح فعال ناشی از محیط متخلخل باعث بهبود عملکرد کلی انتقال حرارت می‌شود. عملکرد مؤثر انتقال حرارت در سطح فعال به این دو جنبه بستگی دارد.

همان‌طور که از شکل ۹ مشاهده می‌شود، برای نسبت ضخامت لایه متخلخل در $t/H=0.25$ اثرات مستقیم جریان جت‌ها در مناطقی که نرخ انتقال حرارت بالاست به وضوح دیده می‌شود. توزیع عدد ناسلت موضعی با مقادیر بیشینه در مکان‌های ابتدایی سطح فعال اتفاق افتاده و به تدریج در امتداد مسیر جریان خروجی به علت افزایش جریان متقاطع عرضی کاهش

ستون چپ شکل ۸ دربرگیرنده نفوذپذیری‌های بالا و در سمت راست نمودارهای مربوط به حالات با نفوذپذیری کم ارائه شده است. همان‌گونه که دیده می‌شود برای حالتی که نفوذپذیری وجود دارد، بیشترین ضریب انتقال حرارت موضعی معمولاً حول نقطه‌ی سکون متناظر با هر جت پدیدار می‌شود. با این حال، سطح انتقال حرارت در طول جریان توسط جریان عرضی متقاطع تحت تأثیر قرار می‌گیرد. فعل و انفعال بین جریان متقاطع و جت‌ها در دو جنبه نهفته است. یکی از آنها تغییر شکل موضعی منطقه با ضریب انتقال حرارت بالا متناظر با هر جت و دیگری کاهش مقادیر اوج عدد ناسلت موضعی است. برای موارد با ضریب نفوذپذیری بالا، جریان نفوذی به اندازه کافی قوی است تا میدان عدد ناسلت موضعی را به طور قابل توجهی تغییر شکل دهد. در ضریب نفوذپذیری پایین، گرما از طریق مواد متخلخل تقریباً توسط هدایت حرارتی منتقل می‌شود. همان‌طور که از شکل ۸ سمت چپ دیده می‌شود، در ضریب نفوذپذیری بالا، بین مقادیر عدد ناسلت بیشینه و کمینه تفاوت زیادی وجود دارد و هر اندازه تخلخل افزایش می‌یابد، این تفاوت نیز آشکارتر می‌شود. با این حال در ضریب نفوذپذیری پایین، تفاوت بین نواحی بیشینه و کمینه توزیع عدد ناسلت موضعی به حداقل می‌رسد. در این موارد نرخ انتقال حرارت کاهش می‌یابد اما یکنواختی بسیار بیشتر می‌شود و این یکنواختی توزیع با افزایش تخلخل لایه متخلخل که منجر به افزایش نرخ انتقال حرارت نیز شده است، حفظ می‌شود. این رفتار بدان دلیل است



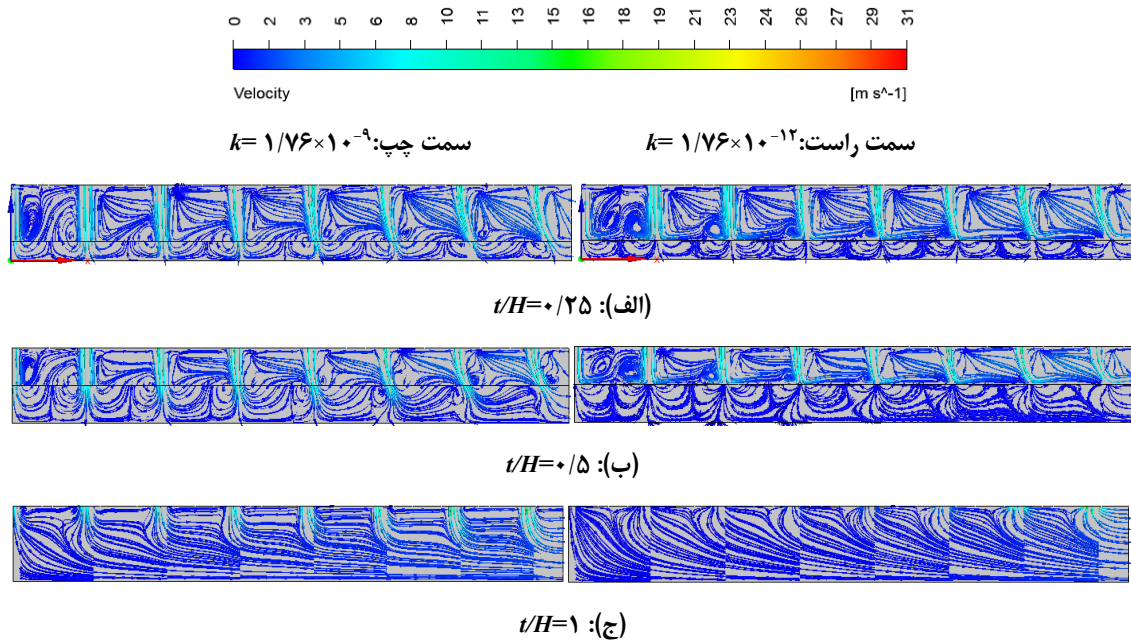
شکل ۹. توزیع عدد ناسلت موضعی روی صفحه برخوردی تحت تأثیر نفوذپذیری و ضخامت‌های مختلف برای $\epsilon=0.8$ و $Re=150$

Fig. 9. Local Nusselt number distribution on the impact surface under the influence of permeability and different thicknesses for $\epsilon=0.8$ and $Re=150$

شامل لایه متخلخل با ضخامت بیشتر منجر به کاهش نرخ انتقال حرارت و همچنین کاهش نرخ رشد یکنواختی در امتداد سطح خواهد شد. به منظور توضیح رفتار عملکرد انتقال حرارت، خطوط جریان به عنوان نمایشی از میدان جریان برای هر دو ضریب نفوذپذیری بیشنه و کمینهی لایه متخلخل و در برخی نسبت‌های مختلف ضخامت لایه متخلخل در شکل ۱۰ ارائه شده است. این تغییرات در راستای صفحه‌ی متقارن عبوری از مراکز جت‌ها می‌باشد. لازم به ذکر است چون در مطالعات قبلی تغییرات ناشی از پارامتر تخلخل فقط برای یک جت نشان داده شده است که تأثیر قابل توجهی هم بر میدان جریان ندارد، در این پژوهش مورد ارزیابی قرار نگرفته است.

همان طور که از شکل ۱۰ مشاهده می‌شود، توزیع خطوط جریان به شدت تحت تأثیر ضخامت و نفوذپذیری لایه متخلخل قرار دارد. جریان جت به صورت هسته آزاد و محوری از روزنه خارج می‌شود اما تحت تأثیر محیط متخلخل به صورت شعاعی پراکنده می‌شود. از نتایج مشخص است که جریان جت توسط محیط متخلخل در ناحیه آزاد بسیار آشفته شده است. مواد متخلخل جریان جت را می‌شکافند و سرعت و در نتیجه مومنتوم جت‌ها را کاهش می‌دهند. حاصل این رفتار، کاهش انتقال گرما روی سطح هدف است. همان طور که در تمام موارد مشاهده می‌شود، جت‌های نزدیک مرکز

می‌یابد. با افزایش نسبت ضخامت محیط متخلخل این اثرات کم‌رنگ می‌شود تا آنجایی که برای موردی که کانال کاملاً از محیط متخلخل پر شده است، محو می‌شود. اثرهای جت‌های برخوردی حتی برای نسبت لایه متخلخل $t/H=0.5$ فقط برای ضریب نفوذپذیری بالا مشاهده می‌شود و پرواضح است که در نفوذپذیری پایین به طور قابل توجهی کاهش می‌یابد. کانالی که با محیط متخلخل کاملاً پر شده ($t/H=1$)، انتقال حرارت ناشی از برخورد را به علت ممانعت محیط متخلخل از برخورد هسته جریان با سطح هدف به شدت کاهش می‌دهد. با این حال استفاده از کانال نیمه پر شده با لایه متخلخل، اختلاط تلاطم را افزایش می‌دهد در حالی که از شکست جریان هسته جت می‌کاهد. علاوه بر این، در شکل ۹ با افزایش ضخامت لایه متخلخل تا نسبت $t/H=0.5$ ، توزیع یکنواخت‌تر انتقال حرارت مشاهده می‌شود و این یکنواختی در نفوذپذیری پایین‌تر به حداکثر رسیده است. برای موردی که کانال به طور کامل از محیط متخلخل پر شده است، اثرات جت‌های برخوردی نسبت به جریان متقاطع عبوری و مواد متخلخل قابل صرف‌نظر کردن است. بنابراین، جریان متقاطع نقش غالب را در چگونگی انتقال گرما در نزدیکی پایین دست ایفا می‌کند. همان طور که از شکل ۹ (ج) و به خصوص در نواحی نفوذپذیری پایین‌تر دیده می‌شود، عدد ناسلت به تدریج به دلیل افزایش میزان جریان عرضی، افزایش می‌یابد. بنابراین، موارد



شکل ۱۰. خطوط جریان روی صفحه متقارن کانال در دو ضریب نفوذپذیری متفاوت برای سه ضخامت تخلخل تحت شرایط $\epsilon = 0.8$ و $Re = 150$

Fig. 10. Flow streamlines on the symmetric surface of the channel in two different permeability coefficients for three porosity thicknesses under the conditions of $\epsilon=0.8$ and $Re=150$

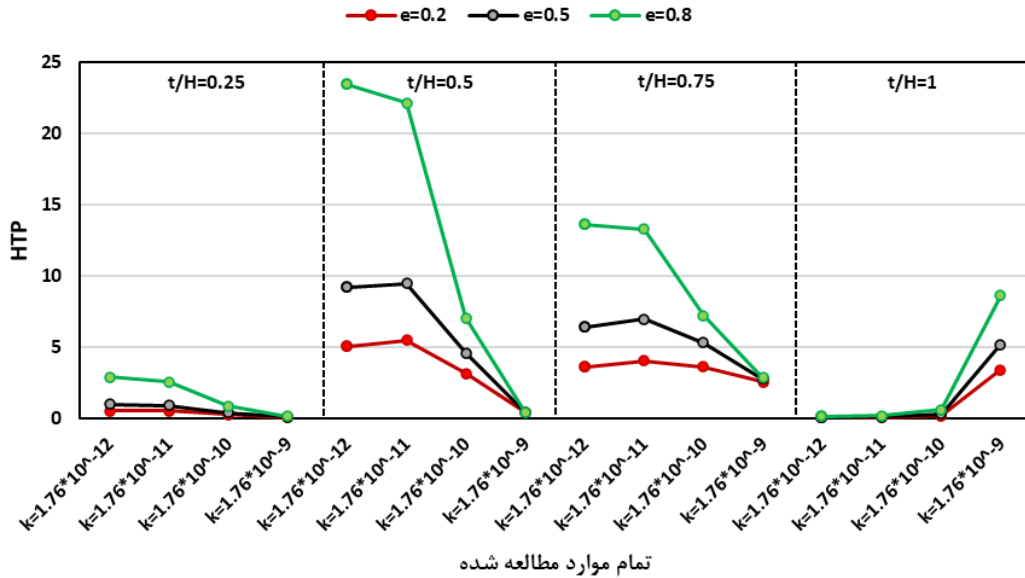
نفوذپذیری‌های پایین‌تر، توزیع یکنواخت‌تر جریان سیال روی سطح فعال رخ می‌دهد. روند خطوط جریان برای حالتی که محیط متخلخل به طور کامل کانال را پوشانده است ($t/H = 1$)، متفاوت است. در شکل (ج) ۱۰ مشاهده می‌شود، هیچ اثری از تشکیل گردابه و یا تعامل بین جت‌ها وجود ندارد. نمایش خطوط جریان به موازات هم رژیم جریان آرام‌تری را گواهی می‌کند. علاوه بر این، در قسمت نزدیک به خروجی، سرعت جریان متقاطع به دلیل هوای جمع شده از جهت بالادست که سطح هدف را جارو می‌کند، افزایش می‌یابد. مهم‌تر از همه، مومنتوم بالای جت‌های نزدیک خروجی، جریان متقاطع را بیشتر به سطح هدف فشرده می‌کنند که گرادیان سرعت نزدیک به سطح هدف و نرخ انتقال حرارت را در این نواحی افزایش می‌دهد.

۳-۴- ارزیابی عملکرد کلی انتقال حرارت

به منظور دستیابی به عملکرد مطلوب میدان جریان جت‌های برخوردی، آرایش پارامترهای محیط متخلخل باید با دقت طراحی و انتخاب شود. بر اساس نتایج به دست آمده برای عدد ناسلت متوسط از یک سو و شاخص‌های مربوط به یکنواختی توزیع انتقال حرارت از سوی دیگر، دیده شد که در اغلب چیدمان‌ها تأمین توام نرخ بالای انتقال حرارت و توزیع یکنواخت آن روی سطح هدف دشوار است. به عنوان مثال، در شکل ۵ مربوط به نمودار

دامنه محاسباتی ($x=0$) دارای هسته‌های قوی‌تری هستند که عمود بر سطح هدف جریان می‌یابند. جت‌های نزدیک به خروجی که بیشتر تحت تأثیر جریان متقاطع عرضی هستند، خم شده و از حالت عمود بر صفحه‌ی انتقال حرارت خارج می‌شوند. در این بین، باید توجه داشت که جت‌های پایین دست جریان با تغییر پارامترهای محیط متخلخل، به درجات متفاوت تحت تأثیر جریان عرضی متقاطع قرار می‌گیرند. به نظر می‌رسد علت این امر اختلاف در مومنتوم جت‌ها باشد که توسط چیدمان مختلف محیط متخلخل تعیین می‌شود. برای مثال در لایه‌ی متخلخل با ضخامت کمتر، فرصت بیشتری برای توسعه جریان هسته جت و غلبه آنها بر جریان متقاطع وجود دارد.

از مقایسه‌ی نتایج در شکل ۱۰ آشکار است که ضخامت و میزان نفوذپذیری لایه متخلخل تأثیرات مهمی را بر الگوی جریان و در نتیجه عملکرد انتقال حرارت دارند. با کاهش نفوذپذیری، اثر جت‌های برخوردی به درون ناحیه آزاد بیشتر نمود می‌یابند. برای مثال در نسبت ضخامت‌های $t/H = 0/25$ و $t/H = 0/5$ و مقدار حداقل نفوذپذیری، گردابه‌های قوی‌تری در ناحیه جریان آزاد تشکیل می‌شود. این در حالی است که برای بیشینه میزان نفوذپذیری، از شدت گردابه‌ها کاسته می‌شود و به داخل محیط متخلخل کشیده می‌شوند. بنابراین انتظار می‌رود که به سبب نفوذپذیری پایین‌تر، جریان ملایم‌تری در سطح فعال ایجاد شود. به عبارت دیگر در



شکل ۱۱. ضریب عملکرد حرارتی کل روی سطح انتقال حرارت برای چینش‌های گوناگون لایه‌ی متخلخل در $Re=150$

Fig. 11. The total thermal performance coefficient on the heat transfer surface for different arrangements of the porous layer at $Re=150$

هرچه این معیار ارزیابی در یک میدان جریان جت برخوردی با چیدمان لایه‌ی متخلخل بزرگتر باشد، یعنی عملکرد انتقال حرارت با در نظر گرفتن هم‌زمان کمیت و کیفیت بهتر است. در تعریف شاخص ارزیابی عملکرد در معادله (۲۱)، C_1 ، C_2 و C_3 عامل توزین هستند که می‌توانند با توجه به نیازهای خاص در طراحی مورد نظر تنظیم شوند. ممکن است در یک کاربرد، اهمیت مقدار کل حرارت انتقال یافته بسیار مهم‌تر از یکنواختی توزیع دما روی سطح انتقال حرارت باشد و در کاربردی دیگر یکنواختی انتقال حرارت واجد اهمیت بیشتری باشد. بر این اساس، مقادیر ضرایب وزنی مشخص می‌شوند. در این بخش فاکتورهای توزین C_1 ، C_2 و C_3 روی ۱ تنظیم می‌شوند که با این کار میانگین انتقال حرارت، یکنواختی کلی انتقال حرارت و حداکثر اختلاف ضریب انتقال حرارت موضعی همه در یک مرتبه از اهمیت قرار می‌گیرند. شکل ۱۱ نتایج ارزیابی عملکرد کلی انتقال حرارت تحت تأثیر پارامترهای مختلف لایه متخلخل را نشان می‌دهد.

همان‌طور که در شکل ۱۱ مشاهده می‌شود، برای موارد تحت مطالعه، با افزایش تخلخل، عملکرد کلی انتقال حرارت بهتر و با کاهش آن عملکرد تضعیف می‌شود. همچنین، غیر از حالتی که کل کانال با لایه‌ی متخلخل پوشانده شده ($t/H=1$)، هنگامی که ضریب نفوذپذیری حداکثر مقدار خود

عدد ناسلت متوسط در پارامترهای مختلف محیط متخلخل نشان داده شد که بالاترین عملکرد برای نرخ انتقال حرارت در حالتی به دست می‌آید که لایه متخلخل دارای نسبت ضخامت، ضریب نفوذپذیری و تخلخل به ترتیب 0.25 ، 0.000176×10^{-9} و 0.8 باشد. با این حال، در نتایج مربوط به نمودار شاخص یکنواختی در شکل ۶ مشاهده شد که همین چیدمان، بالاترین انحراف معیار ضرایب انتقال حرارت موضعی و همچنین بیشینه اختلاف عدد ناسلت موضعی را دارا است و در نتیجه غیریکنواخت‌ترین توزیع انتقال حرارت را نتیجه می‌دهد. از این رو برای ارزیابی عملکرد یک آرایه جت برخوردی برای کانال پوشیده با بستر متخلخل، شاخص عملکرد انتقال حرارت^۱ به صورت زیر تعریف می‌شود که سنج‌های کمی و کیفی انتقال حرارت روی صفحه را هم‌زمان در نظر می‌گیرد.

$$HTP = \frac{(\overline{Nu})^{C_1}}{(\sigma_{Nu}^*)^{C_2} * (\Delta Nu)^{C_3}} \quad (21)$$

1 Heat transfer performance (HTP)

به صورت خطوط جریان ترسیم شدند. اثرات چیدمان محیط متخلخل بر یکنواختی و شدت انتقال گرمای تحت آرایه‌ی جت‌های برخوردی چندگانه به صورت مشروح بحث شده است. در نهایت، برای مقایسه‌ی عملکرد انتقال حرارت در آرایش‌های مختلف لایه‌ی متخلخل و کمک به طراحی میدان جریان جت برخوردی، یک شاخص کلی ارزیابی عملکرد به کار گرفته شده است. نتایج اصلی به شرح زیر است:

- در میدان جریان جت برخوردی، عملکرد انتقال حرارت در شرایط مختلف آرایش‌های لایه‌ی متخلخل خیلی متفاوت است و بسیار به پارامترهای محیط متخلخل مانند ضخامت، ضریب نفوذپذیری و تخلخل بستگی دارد.
- روش به کار بردن چیدمان مختلف پارامترهای محیط متخلخل تحت شرایط آرایه‌ای از جت‌های برخوردی، یک روش کارآمد برای بهبود یکنواختی انتقال حرارت می‌باشد به نحوی که ضمن بهره‌مندی از مزیت نرخ بالای انتقال حرارت در جریان‌های جت‌های چندگانه، امکان توزیع یکنواخت‌تر دما در راستای صفحه‌ی انتقال حرارت فراهم می‌شود.
- ضرایب انتقال حرارت متوسط، انحراف معیار ضرایب انتقال حرارت موضعی نسبت به مقدار متوسط و بیشینه اختلاف بین مقادیر بیشینه و کمینه‌ی انتقال حرارت موضعی در حالات مختلف پیکربندی لایه متخلخل بسیار متفاوت است. با بررسی میدان جریان، مشخص شد که چیدمان محیط متخلخل به پیچیدگی میدان جت برخوردی چندگانه می‌افزاید. همچنین الگوها و طرز رفتار ضریب انتقال حرارت موضعی روی سطح هدف متناسب با این تغییرات، متنوع می‌شوند.

• تحت تأثیر میدان جریان جت برخوردی، ضخامت لایه متخلخل بیشترین تأثیر را بر روند کلی تغییرات عدد ناسلت متوسط و همچنین مقدار ضرایب انتقال حرارت موضعی در طول کانال دارد. با افزایش ضخامت لایه متخلخل، نرخ کلی انتقال حرارت کاهش می‌یابد. با این حال، با افزایش ضخامت، توزیع یکنواخت‌تری روی سطح هدف ارائه شد. علاوه بر این، ضخامت بیشتر لایه متخلخل در بستر کانال، اثرات ضربه جت را کاهش داده و یکنواختی را بهبود می‌بخشد. در نسبت انسداد $t/H = 0.75$ ، جریان متقاطع غالب است و بنابراین عدد ناسلت موضعی به سمت خروجی کانال افزایش می‌یابد.

• برای ارزیابی عملکرد کلی انتقال حرارت با چیدمان‌های مختلف محیط متخلخل، شاخص ارزیابی که بکار گرفته شد کارایی خوبی دارد. در کاربردهای گوناگون میتوان با بیشینه کردن شاخص ارزیابی کلی به طراحی بهینه دست یافت. بر اساس اینکه در یک کاربرد مشخص هر یک از دو

را دارد در همه حالات، تغییر درصد تخلخل خیلی تأثیرگذار نیست. چنین رفتاری برای موردی که تمام کانال با لایه متخلخل پوشش داده شده است، در ضریب نفوذپذیری پایین مشاهده می‌شود. تأثیر ضریب نفوذپذیری بر عملکرد کلی انتقال حرارت کمی پیچیده‌تر است. با افزایش نفوذپذیری، برای نسبت ضخامت لایه متخلخل $t/H = 0.25$ و $t/H = 1$ به ترتیب عملکرد کلی کاهش و افزایش می‌یابد. به عبارت دیگر در ضخامت کمتر، نفوذپذیری کمتر باعث بهبود عملکرد کلی می‌شود. با این حال در موردی که کانال به طور کامل از محیط متخلخل پر شده باشد، هر چه میزان نفوذپذیری بیشتر باشد، عملکرد بهتری فراهم می‌شود. برای مواردی که $t/H = 0.5$ و $t/H = 0.75$ است در دو تخلخل 0.2 و 0.5 ، ضریب نفوذپذیری برابر با $10^{-11} \times 1/76$ عملکرد بهتری را نشان می‌دهد. هنگامی که درصد تخلخل بالاترین مقدار خود 0.8 را دارد، عملکرد حرارتی بهتر با کمترین مقدار ضریب نفوذپذیری $10^{-12} \times 1/76$ به دست می‌آید. در مجموع از نمودار مربوط به شاخص عملکرد حرارتی کلی، بهترین عملکرد مربوط به چیدمانی است که کانال تا نیمه از لایه‌ی متخلخل پر شده است و ضرایب نفوذپذیری و تخلخل به ترتیب در پایین‌ترین و بالاترین مقادیر خود هستند. در مقابل، بدترین عملکرد حرارتی کلی برای حالتی است که لایه‌ی متخلخل به طور کامل کانال را پوشش داده است و ضریب نفوذپذیری و تخلخل هر دو در کمترین مقدار خود می‌باشند.

۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، شبیه‌سازی‌های عددی سه بعدی برای بررسی تأثیرات آرایش لایه متخلخل بر شدت و یکنواختی انتقال حرارت برای کمک به طراحی آرایه جت‌های برخوردی در کاربردهای گوناگون انجام شده است. یک کانال جریان با مجرای مربعی در نظر گرفته شده است که در حالات مختلف و در نظر گرفتن لایه‌های متخلخل با چهار ضخامت گوناگون نسبت به عمق کانال، 0.25 ، 0.5 ، 0.75 و 1 و همچنین چهار ضریب نفوذپذیری 10^{-12} ، 10^{-11} ، 10^{-10} و 10^{-9} و در کنار 3 مقدار متفاوت 0.2 ، 0.5 و 0.8 برای درصد تخلخل، مورد مطالعه قرار گرفته است. بنابراین در مجموع 48 پیکربندی مختلف محیط متخلخل در نظر گرفته شده است. بر اساس نتایج شبیه‌سازی‌های عددی، عملکرد حرارتی در حالات مختلف لایه‌ی متخلخل بدست آمده و با یکدیگر مقایسه شده‌اند. به منظور مشاهده‌ی بهتر رفتار جریان، عدد ناسلت موضعی روی سطح فعال و میدان جریان روی سطح متقارن که از مراکز جت‌ها می‌گذرند، برای برخی حالت‌ها

علائم یونانی

ρ	چگالی، (kg/m ³)
K	رسانایی گرمایی هوا، (W/m.K)
μ	ویسکوزیته دینامیکی، (kg/m.s)
ν	ویسکوزیته سینماتیکی، (m ² /s)
ε	اتلاف آشفستگی
ε	تخلخل
ω	اتلاف مخصوص آشفستگی
K	نفوذپذیری محیط متخلخل، (m ²)

زیرنویس

i	سطح مشترک
f	سیال
s	جامد
eff	مؤثر
in	ورودی
out	خروجی
min	مینیمم
max	ماکزیمم
ave	متوسط

منابع

- [1] G. Weinberger, Y. Yemane, Experimental and numerical study of entrainment phenomena in an impinging jet, the University of Gavle, Department of technology and the built environment, Master's thesis in energy systems, 2010.
- [2] J. Ferrari, N. Lior, J. Slycke, An evaluation of gas quenching of steel rings by multiple-jet impingement, Journal of materials processing technology, 136(1-3) (2003) 190-201.
- [3] J.-C. Han, Recent studies in turbine blade cooling, International journal of rotating machinery, 10(6) (2004) 443-457.
- [4] A. Pavlova, M. Amitay, Electronic cooling using synthetic jet impingement, International Journal of Heat Transfer, 128(9) (2006) 897-907.
- [5] P.S. Penumadu, A.G. Rao, Numerical investigations of heat transfer and pressure drop characteristics in multiple jet impingement system, Applied Thermal Engineering, 110 (2017) 1511-1524.

عنصر کمیت (مقدار انتقال حرارت کل) و کیفیت (میزان یکنواختی توزیع دما) چه اهمیت و اولویتی دارند، ضرایب وزنی در این شاخص ارزیابی قابل تنظیم می‌باشند.

• در میان انواع سناریوهای مطالعه شده برای لایه‌ی متخلخل در این پژوهش، موردی که کانال تا نیمه از لایه متخلخل ($t/H=0.5$) پر شده است و ضرایب نفوذپذیری و تخلخل به ترتیب در پایین‌ترین ($k=1/76 \times 10^{-12}$) و بالاترین ($\varepsilon=0.8$) مقادیر خود هستند، بهترین عملکرد گرمایی کلی معادل با مقدار شاخص ارزیابی کلی $23/45$ را فراهم می‌کند. از طرف دیگر، موردی که لایه متخلخل به طور کامل ($t/H=1$) سطح کانال را پوشش داده است و ضریب نفوذپذیری ($k=1/76 \times 10^{-12}$) و تخلخل ($\varepsilon=0.2$) هر دو در کمترین مقدار خود می‌باشند، منجر به ضعیف‌ترین عملکرد کلی انتقال حرارت برابر با مقدار شاخص ارزیابی عملکرد گرمایی کلی $0/731$ می‌شود.

۵- فهرست علائم

علائم انگلیسی

D_j	قطر جت، (m)
H/D	نسبت عمق کانال به قطر نازل
Z/D	نسبت طول به قطر نازل
X/D	نسبت طولی فاصله نازل
Y/D	نسبت عرضی فاصله نازل
t/H	نسبت ضخامت محیط متخلخل به عمق کانال
\dot{m}	نرخ جریان جرم، kg/s
N	تعداد جتها
h	ضریب انتقال حرارت
Nu	عدد ناسلت
\bar{q}	نرخ شار حرارتی، (W/m ²)
Re	عدد رینولدز
k	انرژی سینتیک آشفستگی، (m ² /s ²)
U	سرعت متوسط زمانی، (m/s)
u', v', w'	مؤلفه‌های سرعت نوسانی، (m/s)
y^+	فاصله بدون بعد دیواری
\overline{Nu}	عدد ناسلت متوسط
σ_{Nu}	انحراف معیار عدد ناسلت
σ_{Nu}^*	انحراف معیار عدد ناسلت نرمالایز
$\Delta \overline{Nu}$	اختلاف عدد ناسلت ماکزیمم نرمالایز
HTP	شاخص ارزیابی عملکرد کلی

- [15] A.S. Rattner, General characterization of jet impingement array heat sinks with interspersed fluid extraction ports for uniform high-flux cooling, *Journal of Heat Transfer*, 139(8) (2017).
- [16] Z. Chi, R. Kan, J. Ren, H. Jiang, Experimental and numerical study of the anti-crossflows impingement cooling structure, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 64 (2013) 567-580.
- [17] S. Pati, A. Borah, M.P. Boruah, P.R. Randive, Critical review on local thermal equilibrium and local thermal non-equilibrium approaches for the analysis of forced convective flow through porous media, *International communications in heat and mass Transfer*, 132 (2022) 105889.
- [18] M.R. Salimi, M. Taiebi-Rahni, H. Rostamzadeh, Heat transfer and entropy generation analysis in a three-dimensional impinging jet porous heat sink under local thermal non-equilibrium condition, *International Journal of Thermal Sciences*, 153 (2020) 106348.
- [19] H. Namadchian, I. Zahmatkesh, S.M.A. Alavi, Numerical simulation of nanofluid flow in an annulus with porous baffles based on combination of Darcy-Brinkman-Forchheimer model and two-phase mixture model, *Amirkabir Journal of Mechanical Engineering*, 53(3 (Special Issue) (2021) 1897-1914 [In Persian].
- [20] F.T. Dórea, M.J. De Lemos, Simulation of laminar impinging jet on a porous medium with a thermal non-equilibrium model, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 53(23-24) (2010) 5089-5101.
- [21] K. Yogi, M.M. Godase, M. Shetty, S. Krishnan, S. Prabhu, Experimental investigation on the local heat transfer with a circular jet impinging on a metal foamed flat plate, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 162 (2020) 120405.
- [22] S.Y. Kim, M.H. Lee, K.-S. Lee, Heat removal by aluminum-foam heat sinks in a multi-air jet impingement, *IEEE Transactions on components and packaging technologies*, 28(1) (2005) 142-148.
- [23] A.P. Rallabandi, D.-H. Rhee, Z. Gao, J.-C. Han, Heat [6] B. Weigand, S. Spring, Multiple jet impingement– a review, in: *TURBINE-09. Proceedings of International Symposium on Heat Transfer in Gas Turbine Systems*, Begel House Inc., 2009.
- [7] A.M. Huber, R. Viskanta, Effect of jet-jet spacing on convective heat transfer to confined, impinging arrays of axisymmetric air jets, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 37(18) (1994) 2859-2869.
- [8] J.-Y. San, M.-D. Lai, Optimum jet-to-jet spacing of heat transfer for staggered arrays of impinging air jets, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 44(21) (2001) 3997-4007.
- [9] D. Kercher, W. Tabakoff, Heat transfer by a square array of round air jets impinging perpendicular to a flat surface including the effect of spent air, *International Journal of Eng. Power*, 92(1) (1970) 37-82.
- [10] D. Metzger, L. Florschuetz, D. Takeuchi, R. Behee, R. Berry, Heat transfer characteristics for inline and staggered arrays of circular jets with crossflow of spent air, *International Journal of Heat Transfer*, 101(3) (1979) 526-531.
- [11] L.W. Florschuetz, R. Berry, D. Metzger, Periodic streamwise variations of heat transfer coefficients for inline and staggered arrays of circular jets with crossflow of spent air, *International Journal of Heat Transfer*, 102(1) (1980) 132-137.
- [12] Z.-X. Wen, Y.-L. He, X.-W. Cao, C. Yan, Numerical study of impinging jets heat transfer with different nozzle geometries and arrangements for a ground fast cooling simulation device, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 95 (2016) 321-335.
- [13] S. Debnath, M.H.U. Khan, Z.U. Ahmed, Turbulent swirling impinging jet arrays: A numerical study on fluid flow and heat transfer, *Thermal Science and Engineering Progress*, 19 (2020) 100580.
- [14] D. Qiu, C. Wang, L. Luo, S. Wang, Z. Zhao, Z. Wang, On heat transfer and flow characteristics of jets impinging onto a concave surface with varying jet arrangements, *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 141 (2020) 57-68.

- inline and staggered arrays of impinging jets, *Journal of Heat Transfer*, 132(9) (2010).
- [30] N. Zuckerman, N. Lior, Jet impingement heat transfer: physics, correlations, and numerical modeling, *Advances in heat transfer*, 39 (2006) 565-631.
- [31] N. Chougule, G. Parishwad, P. Gore, S. Pagnis, S. Sapali, CFD analysis of multi-jet air impingement on flat plate, in *Proceedings of the world congress on Engineering*, July 6 - 8, 2011, London, U.K, pp. 2078-0958.
- [32] F.R. Menter, Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications, *AIAA journal*, 32(8) (1994) 1598-1605.
- [33] M. Habibishandiz, M. Saghir, A critical review of heat transfer enhancement methods in the presence of porous media, nanofluids, and microorganisms, *Thermal Science and Engineering Progress*, (2022) 101267.
- [34] S.M. Hosseinalipour, S. Rashidzadeh, M. Moghimi, K. Esmailpour, Numerical study of laminar pulsed impinging jet on the metallic foam blocks using the local thermal non-equilibrium model, *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 141 (2020) 1859-1874.
- [35] L. Florschuetz, D.E. Metzger, C. Truman, Jet array impingement with crossflow-correlation of streamwise resolved flow and heat transfer distributions, *NASA Contractor Report* (1981): 3373.
- transfer enhancement in rectangular channels with axial ribs or porous foam under through flow and impinging jet conditions, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 53(21-22) (2010) 4663-4671.
- [24] H.-C. Sung, Y.-H. Liu, Heat transfer in rectangular channels with porous wire mesh under impinging jet conditions, *International Journal of Thermal Sciences*, 122 (2017) 92-101.
- [25] M.J. de Lemos, C. Fischer, Thermal analysis of an impinging jet on a plate with and without a porous layer, *Numerical Heat Transfer, Part A: Applications*, 54(11) (2008) 1022-1041.
- [26] H. Zhang, Z. Zou, Investigation of a confined laminar impinging jet on a plate with a porous layer using the preconditioned density-based algorithm, *Numerical Heat Transfer, Part A: Applications*, 61(4) (2012) 241-267.
- [27] G.A. Rao, Y. Levy, M. Kitron-Belinkov, Heat transfer characteristics of a multiple jet impingement system, in: *48th Israeli Aerospace Conference*, 2009, pp. 5-7.
- [28] H. Heidary, M. Kermani, Enhancement of heat exchange in a wavy channel linked to a porous domain; a possible duct geometry for fuel cells, *International communications in heat and mass transfer*, 39(1) (2012) 112-120.
- [29] Y. Xing, S. Spring, B. Weigand, Experimental and numerical investigation of heat transfer characteristics of

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

S. Khademi, M. Bazargan, Numerical investigation of the effect of the porous coating layer on the heat transfer plate in the flow of impinging jet array, *Amirkabir J. Mech Eng.*, 55(3) (2023) 337-358.

DOI: 10.22060/mej.2023.21640.7481

