



شبیه‌سازی عددی جریان و انتقال حرارت آشفته در جت نوسانی برخوردی به سطح مقعر نامتقارن

احسان رضائی^۱، مهران رجبی زرگرآبادی^{۲*}^۱ کارشناس ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه سمنان^۲ استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه سمنان

تاریخ دریافت: ۱۳۹۳/۱۱/۲۲؛ تاریخ بازنگری: ۱۳۹۴/۰۷/۰۴؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۴/۱۱/۲۰

چکیده

این مقاله در مورد تحلیل عددی جریان و انتقال حرارت آشفته در یک جت شیاری برخوردی نوسانی به سطح مقعر نامتقارن بحث می‌کند. در این راستا، معادلات متوسط‌گیری شده برای جریان تراکم‌ناپذیر آشفته در حالت غیر دایم به همراه مدل آشفستگی $k-\epsilon$ RNG در یک فضای محاسباتی دو بعدی حل شده‌اند. تاثیر فرکانس نوسان، دامنه نوسان، انحنای سطح، فاصله جت تا سطح برخورد و عدد رینولدز جت بر توزیع متوسط زمانی عدد ناسلت سطح مقعر نامتقارن، مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که در مقایسه با جت پایا، استفاده از جت نوسانی در محدوده فرکانس ۴۰ تا ۱۶۰ هرتز، باعث افزایش میانگین انتقال حرارت از سطح می‌شود. همچنین با افزایش عدد رینولدز از ۴۰۰۰ به ۸۰۰۰ و افزایش دامنه نوسان از ۰/۴ تا ۱، متوسط زمانی عدد ناسلت افزایش می‌یابد. این در حالی است که افزایش فاصله ورودی جت از سطح برخورد، منجر به کاهش مقدار متوسط زمانی عدد ناسلت می‌شود.

کلمات کلیدی: جریان آشفته؛ موج سینوسی؛ جت برخوردی نوسانی؛ عدد ناسلت؛ سطح مقعر.

Numerical Simulation of Turbulent Flow and Heat Transfer from Pulsating Impinging Jet to Asymmetrical Concave Surface

E. Rezaei¹, and M. Rajabi-Zargarabadi^{2,*}¹ MSc Student, Mech. Eng., Semnan Univ., Semnan, Iran.² Assis. Prof., Mech. Eng., Semnan Univ., Semnan, Iran.

Abstract

In this study, the numerical analysis of turbulent flow and heat transfer of oscillating impinging slot jet on an asymmetric concave surface is investigated. In this way, the averaged Navier-Stokes equations for turbulent incompressible flow in an unsteady state are solved by the $k-\epsilon$ RNG turbulence model in a 2D computational space. The effects of oscillation frequency, oscillation period, curved surface, jet distance to surface, and jet Reynolds number on time-averaged Nusselt number distribution in the asymmetrical concave surface are also studied. The results obtained show that applying the pulsating jet in the range of 40-160 Hz can increase the heat transfer from the concave surface in comparison with the steady jet. Moreover, increasing Re Number from 4000 to 8000, and oscillation period from 0.4 to 1, lead to increase in the time-averaged Nusselt number, although with increase in the distance between jet and concave surface, the time-averaged Nusselt number decreases.

Keywords: Turbulent Flow; Sinusoidal Waveform; Impinging Pulsed Jet; Nusselt Number; Concave Surface.

۱- مقدمه

انتقال حرارت در جت‌های برخوردی به خوبی به عنوان یک روش با کارایی بالا برای گرمایش، خنک‌کاری یا خشک کردن سطوح، شناخته شده است. اصلی‌ترین کاربرد جت برخوردی به سطوح مقعر، مربوط به خنک‌کاری سطح داخلی لبه جلویی پره توربین گاز است. در موتورهای توربین گاز، هنگامی که دمای ورودی توربین افزایش می‌یابد، راندمان حرارتی موتور نیز افزایش می‌یابد. این بدان معنی است که مقدار حرارت منتقل شده به پره‌های توربین گاز نیز، افزایش خواهد یافت. برای توربین‌های گاز که بتوانند در دمای بیش از محدودیت‌های متالوژی حاضر کار کنند، امکان خنک‌کاری داخلی پره‌ها با استفاده از جت برخوردی، بسیار کارآمد به نظر می‌رسد. در این روش با تشکیل یک لایه نازک هیدرودینامیکی و حرارتی روی سطح برخورد و ایجاد جریان آشفته در لایه مرزی، انتقال حرارت بیشتری در مقایسه با سایر روش‌های خنک‌کاری انجام می‌شود.

بررسی‌های متعدد قبلی نشان می‌دهد که خنک‌کاری جت برخوردی در حالت پایا به عوامل مختلفی چون، عرض جت، عدد رینولدز جت، فاصله جت تا سطح برخورد، انحنای سطح، سطح مقطع جت برخوردی، زاویه جت برخوردی، تعداد جت و فاصله جت‌ها از هم بستگی دارد. در سال‌های اخیر، برای افزایش انتقال حرارت جت برخوردی از سطوح برخورد، از جت‌های نوسانی استفاده می‌شود. این نوسانات می‌توانند به شکل موج مربعی یا سینوسی و در فرکانس‌های مختلفی باشند. مطالعات متعددی به صورت تجربی و عددی در این زمینه انجام شده است. در سال ۱۹۹۵ شریف^۱ و زومبرون^۲ [۱] با استفاده از مدل ریاضی توسعه یافته‌ای به مطالعه دینامیک غیرخطی لایه مرزی هیدرودینامیکی و حرارتی داخل ناحیه سکون دو بعدی پرداختند. آنها نتیجه گرفتند که نوسانات با فرکانس بالا و دامنه کم از نوسانات با فرکانس پایین و دامنه زیاد بهتر هستند. در سال ۱۹۹۹ سیلر^۳ و همکاران [۲]، اهمیت چرخه کار (یعنی نسبت زمان چرخه نوسان به زمان کل تناوب) را برای یک جت برخوردی

نوسانی مورد بررسی قرار دادند. آنها نشان داده‌اند که سیکل کاری ۰/۲۵، اثر بهتری از سیکل کاری ۰/۳۳ یا ۰/۵، برای فرکانس تا حدود ۶۰ هرتز در محدوده عدد رینولدز ۲۱۰۰۰ تا ۳۱۰۰۰ و نسبت فاصله جت به دیواره در محدوده ۴ الی ۸ تولید می‌کند. در سال ۲۰۰۲ کمسی^۴ و هر^۵ [۳] روی جت برخوردی خودنوسان مطالعه کرده‌اند. آنها یک جت با فلپ دوره‌ای در امتداد محور عمودی نازل را مورد بررسی قرار دادند. آنها مشاهده کردند که تقریباً ۷۰٪ در عدد ناسلت ناحیه سکون افزایش رخ داده است؛ همچنین مشاهده کردند که جابجایی و پخش گرما به دلیل نوسانات افزایش یافته است. در سال ۲۰۰۶ روزلی^۶ و همکارش [۴]، اثر فرکانس‌های ضربان‌دار بر انتقال حرارت محلی و انتقال حرارت متوسط روی صفحه را بررسی کرده، پارامترهای آن را تحت برخورد جت هوای نوسانی دایره‌ای، مورد مطالعه قرار داده‌اند. آنها به این نتیجه رسیدند که متوسط عدد ناسلت جریان نوسانی به طور قابل ملاحظه‌ای، بیشتر از متوسط عدد ناسلت در حالت جت پایا است. این امر در نتیجه افزایش شدت تلاطم در اثر نوسان جریان است. نتیجه جالب توجه این است که انتقال حرارت در نقطه سکون در جت نوسانی برای همان محدوده فرکانس‌ها نسبت به حالت جت پایا کمتر است. دلیل این امر، کوچک بودن شدت آشفتگی در این موقعیت (نقطه سکون) از جریان است. در سال ۲۰۰۷ هافمن^۷ و همکارانش [۵]، تأثیر ضربان‌دار بودن جریان جت برخوردی به صفحه را بر انتقال حرارت و ساختار جریان بررسی کردند. فرکانس‌ها و دامنه‌های گوناگون به طور جداگانه بررسی و اثر هر یک از پارامترها برای اعداد رینولدز مختلف و فاصله نازل تا صفحه مورد آزمایش قرار گرفته است. مشاهده شده است که انتقال حرارت جابجایی به واسطه نوسانات دوره‌ای متوسط سرعت تحت تأثیر قرار می‌گیرد. در فرکانس‌های بالا برای فواصل کم نازل تا صفحه، زمانی که فرکانس نوسانات هم مرتبه با آشفتگی باشد، انتقال حرارت افزایش می‌یابد. آستانه فرکانس برای این حالت در عدد استروهال $St=0/2$ تعیین شده است.

⁴ Camci

⁵ Herr

⁶ Rozli

⁷ Hofmann

¹ Sheriff

² Zumbrennen

³ Sailor

افزایش فرکانس تا مقداری معین، عدد ناسلت در ناحیه سکون روند صعودی داشته، اما با افزایش بیشتر آن، عدد ناسلت در این ناحیه تغییرات محسوسی نخواهد داشت. در سال ۲۰۱۴ رجیبی و همکاران [۱۰]، تحلیل عددی جریان و انتقال حرارت آشفته در جت برخوردی نوسانی را به سطح مقعر انجام داده‌اند. آنها در این تحقیق، اثر نوسان‌های مربعی (ضربانی) و سینوسی را روی جریان و انتقال حرارت آشفته یک جت شیاری برخوردی به سطح مقعر بررسی کرده‌اند. آنها نشان دادند که در جت نوسانی، افزایش فرکانس در محدوده ۸۰-۲۰ هرتز و عدد رینولدز در محدوده ۷۲۰۰-۴۷۴۰، باعث افزایش متوسط زمانی عدد ناسلت در مقایسه با جت پایا می‌شود. در جت نوسانی، کاهش فاصله نازل تا صفحه باعث افزایش انتقال حرارت از سطح برخورد می‌شود. همچنین افزایش دامنه نوسان از ۰/۲ تا ۱/۰ در موج سینوسی، منجر به افزایش نرخ انتقال حرارت می‌شود. در نهایت، نتایج بدست آمده نشان می‌دهد که در مقایسه با جت پایا، افزایش قابل توجهی در نرخ انتقال حرارت برای موج مربعی شکل نسبت به موج سینوسی وجود دارد.

با توجه به اینکه سطح داخلی پره‌های توربین به صورت سطوح مقعر متقارن نمی‌باشند، در تحلیل عددی حاضر به بررسی تاثیر جت برخوردی نوسانی بر انتقال حرارت از سطح مقعر نامتقارن پرداخته شده است. در این راستا، شبیه سازی به صورت دو بعدی با موج سینوسی به سطح نامتقارن انجام شده است. در این تحقیق، تاثیر عدد رینولدز، فرکانس نوسانات، دامنه نوسان، انحنای سطح و فاصله دهانه جت تا سطح برخورد، مورد بررسی قرار گرفته است.

۲- هندسه و شرایط مرزی

هندسه مساله حاضر مطابق شکل ۱، یک جت شیاری برخوردی دو بعدی است. با توجه به شکل و عدم تقارن هندسی آن، کل میدان جریان برای تحلیل عددی در نظر گرفته شده است. شرایط مرزی به کار گرفته شده در مساله حاضر در حالت پایا همانند مطالعه تجربی چوی^۵ و همکاران [۱۱] است.

در سال ۲۰۰۸ لیوکانگستاپورن^۱ [۶]، در تحقیقاتشان تاثیر تغییرات نسبت دامنه سرعت بر انتقال حرارت حاصل از برخورد یک جت شیاری نوسانی محدود به یک سطح تخت را بررسی کردند. در این تحقیق، نشان داده شده است که در سرعت‌های یکسان، با افزایش دامنه نوسان سرعت، میزان متوسط زمانی انتقال حرارت از سطح افزایش می‌یابد. در این نوع جت، جریان‌های چرخشی‌ای که در ناحیه برخورد بر اثر شتاب جت‌های نوسانی تولید می‌شوند، به عنوان موثرترین عامل انتقال حرارت گزارش داده شده است. این جریان‌ها به شدت به دامنه سرعت وابسته می‌باشند و با تغییر این پارامتر، میزان انتقال حرارت از سطح تغییر می‌کند. در سال ۲۰۰۹ روزلی^۲ و همکارانشان [۷]، مقایسه‌ای را بین عدد ناسلت محلی برای جت پایا و جریان جت نوسانی انجام دادند. صفحه مورد نظر از جنس آلومینیوم و فرکانس‌های ۱۰ تا ۲۰ هرتز بررسی شده است. شار حرارتی را در موقعیت‌های شعاعی از صفر تا ۱۲ سانتی‌متر به مرکزیت نقطه سکون اندازه‌گیری کردند. با توجه به نتایج می‌توان نتیجه گرفت که جریان با سرعت بالا و شدت تلاطم بیشتر، انتقال حرارت محلی بیشتری را موجب می‌شود. متوسط عدد ناسلت برای جریان نوسانی در هر دو فرکانس برای عدد رینولدز ۳۲۰۰۰ بررسی شده است که میزان افزایش آن در حدود ۳۰٪ است. در سال ۲۰۱۰ زو^۳ و همکاران [۸]، تاثیر اختلاف دمای زیاد بین جت و سطح برخورد بر انتقال حرارت حاصل از برخورد یک جت شیاری نوسانی آشفته را به سطح تخت بررسی کرده‌اند. نتایج عددی نشان می‌دهد که برای اختلاف دماهای بیشتر از ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد، به دلیل افزایش نرخ هدایت حرارتی، عدد ناسلت کاهش می‌یابد. آنها نشان دادند که هرچه اختلاف دمای بین جریان جت و سطح برخورد بیشتر باشد، متوسط زمانی عدد ناسلت کمتر می‌شود. در سال ۲۰۱۰ دمیرکن^۴ و همکاران [۹]، در یک تحلیل عددی اثر نوسانات سینوسی در جت‌های برخوردی به یک سطح تخت را مورد بررسی قرار داده‌اند. آنها گزارش داده‌اند که با افزایش عدد رینولدز جت و دامنه نوسان، عدد ناسلت پیش‌بینی شده افزایش می‌یابد. با

¹ Liewkongsataporn

² Rozli

³ Xu

⁴ Demircan

⁵ Choi

جت آدیاباتیکی فرض شده است. شرط عدم لغزش برای تمامی دیواره‌ها اعمال شده است. جریان هوا به صورت گاز ایده‌آل و تراکم ناپذیر فرض شده است. ضمناً چسبندگی دینامیکی $\mu = 1.7894 \times 10^{-5} \text{ kg/ms}$ و گرمای ویژه در فشار ثابت اتمسفر $C_p = 1006.43 \text{ Nm/kgK}$ برای هوا در نظر گرفته شده است. برای محاسبه عدد رینولدز، چگالی در دمای ورودی تعریف شده است. برای خروجی جریان هوا، شرط مرزی فشار خروجی اعمال شده است.

۲-۱- شرایط اولیه

برای تحلیل جت در حالت نوسانی، شرایط اولیه مورد نیاز است. شرایط در لحظه اولیه ($t=0$) مطابق زیر در نظر گرفته شده است:

$$u = v = 0, \quad P = P_\infty, \quad T = T_\infty, \quad k = \varepsilon = 0$$

۳- معادلات حاکم

معادلات حاکم بر مسأله، معادله‌های پیوستگی، ممتوم و انرژی می‌باشند:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (4)$$

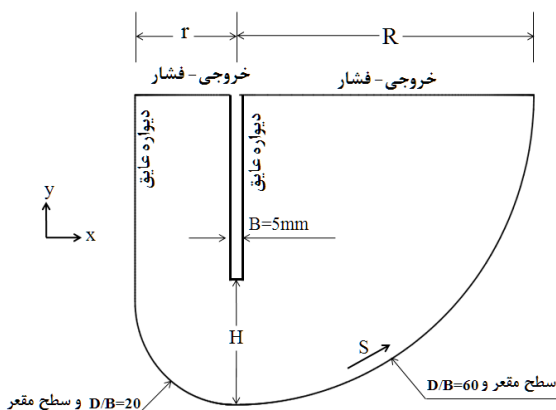
(5)

$$\left(\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_j} \right) = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu(2S_{ij}) - \rho \overline{u_i' u_j'} \right] \quad (6)$$

که در معادلات بالا u_i مولفه سرعت، P فشار، T دما و k ضریب هدایت حرارتی سیال است. همچنین S_{ij} تانسور نرخ کرنش متوسط که توسط رابطه $S_{ij} = \frac{(u_{ij} + u_{ji})}{2}$ تعریف می‌شود. $\overline{u_i' T'}$ و $\overline{u_i' u_j'}$ به ترتیب، تانسور تنش رینولدز و بردار شار حرارتی آشفته می‌باشند که این دو ترم، نیاز به مدل‌سازی دارند.

۳-۱- مدل آشفته‌گی جریان

پس از بررسی مدل‌های آشفته‌گی مختلف مدل آشفته‌گی RNG k-ε به عنوان مدل مناسبی در مسأله حاضر در نظر گرفته شده است. تحقیقات انجام شده نشان می‌دهند که این مدل در پیش‌بینی پیچیدگی‌های جریان در برخورد با صفحه مقعر و جریان نوسانی، دارای دقت بیش‌تر به همراه سرعت



شکل ۱- محدوده محاسباتی و شرایط مرزی

سرعت در خروجی جت در دو حالت پایا و نوسانی در نظر گرفته شده است. موج نوسانی در این مطالعه، به صورت موج سینوسی اعمال شده است. دو توزیع سرعت اعمال شده در خروجی جت (u_{jet}) به صورت زیر تعریف شده است: توزیع سرعت ورودی در حالت پایا:

$$u_{jet} = u_{avg} \quad (1)$$

توزیع سرعت ورودی با موج نوسانی سینوسی:

$$u_{jet} = u_{avg} + A u_{avg} \sin(2\pi f t) \quad (2)$$

که u_{avg} سرعت متوسط خروجی جت است. A دامنه نوسان جت سینوسی و f فرکانس نوسان است. t هم مدت زمان نوسان است.

در موج سینوسی، نیمه اول سیکل مربوط به زمانی است که $u_{jet} > u_{avg}$ و نیمه دوم، مربوط به زمانی است که $u_{jet} < u_{avg}$. اجرای این الگوی سینوسی به طور مکرر، یک سیکل نامیده می‌شود. در این بررسی، عدد رینولدز طبق رابطه (۳) تعریف شده است:

$$Re = \frac{\rho u_{avg} (2B)}{\mu} \quad (3)$$

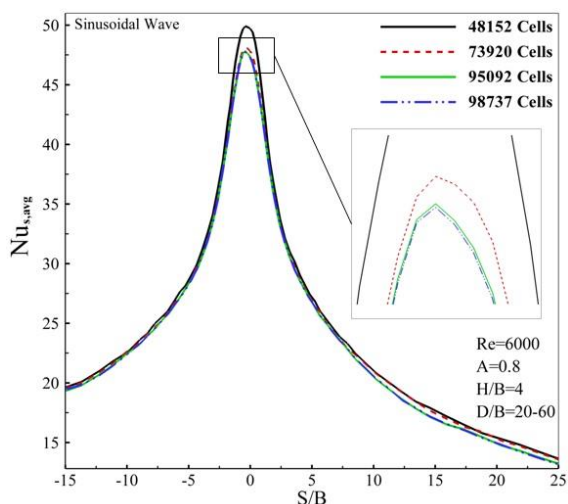
که در آن B عرض دهانه خروجی جت، ρ چگالی و μ لزجت دینامیکی است. مطابق مطالعه تجربی چوی و همکاران [۱۱]، دمای خروجی جت ثابت و برابر ۲۹۸ کلوین، شدت آشفته‌گی در خروجی جت ۵٪ و قطر هیدرولیکی برای محاسبه عدد رینولدز و عدد ناسلت دو برابر عرض خروجی جت ($2B$) در نظر گرفته شده است. برای دیواره برخورد، شار حرارتی ثابت ۵۰۰۰ وات بر متر مربع در نظر گرفته شده، دیواره‌ی نازل

۴- حل عددی

شبیه‌سازی عددی میدان جریان و انتقال حرارت به روش حجم کنترل در یک هندسه دو بعدی و در شرایط پایا و گذرا انجام شده است. شکل ۲، تغییرات متوسط زمانی عدد ناسلت موضعی در حالت جت نوسانی برای چندین شبکه‌بندی مختلف را نشان می‌دهد. برای هندسه‌ای با مشخصات فیزیکی ذکر شده، تعداد ۹۵۰۹۲ شبکه محاسباتی برای حل با بیشترین دقت و سرعت، مناسب بوده، در شبکه‌بندی‌های ریزتر هیچ‌گونه تغییر محسوسی در متوسط زمانی عدد ناسلت مشاهده نمی‌شود.

مطابق شکل ۳، محدوده جریان به شکل یک شبکه‌بندی غیر یکنواخت با ساختار، در نظر گرفته شده است. با توجه به اهمیت نواحی کنار دیواره در دقت نتایج حاصل از حل عددی، شبکه‌بندی ناحیه برخورد و ناحیه بین خروجی جت تا سطح برخوردی بر محور اصلی، ریزتر (تمرکز بیشتر) از سایر قسمت‌ها در نظر گرفته شده است.

به دلیل تاثیر مدل نزدیک دیواره بر رفتار جریان و انتقال حرارت، از مدل دو لایه‌ای در نزدیک دیواره استفاده شده است. در این راستا، شبکه‌بندی در نزدیکی دیواره به اندازه کافی ریز شده است تا مقدار Y^+ در تمام طول دیواره کوچکتر از ۱ باشد.



شکل ۲- اثر تغییرات شبکه بر متوسط زمانی عدد ناسلت موضعی

همگرایی بالاتری نسبت به سایر مدل‌های آشفتگی است [۱۳ و ۱۴].

معادله k:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ \left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right\} + P_k - \rho \varepsilon \quad (7)$$

معادله ε:

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \varepsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ \left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right\} + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} P_k - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} - \frac{C_\mu \eta^3 (1 - \eta / \eta_0)}{1 + \beta \eta^3} \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (8)$$

که در این روابط:

$$P_k = \left[2\mu_t S_{ij} - \frac{2}{3} \rho k S_{ij} \right] \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \quad (9)$$

و ثوابت معادلات عبارتند از:

$C_{1\varepsilon} = 1.42$, $C_{2\varepsilon} = 1.68$, $C_\mu = 0.0845$
 $\sigma_k = \sigma_\varepsilon = 0.7194$, $\beta = 0.012$, $\eta_0 = 4.38$
 در معادلات بالا k انرژی جنبشی جریان آشفته و ε نرخ اضمحلال ویسکوز انرژی جنبشی آشفته است؛ همچنین μ_t لزجت گردابه‌ای و پارامتر η بیانگر نسبت زمان مشخصه آشفتگی به زمان مشخصه میدان جریان است.

۳-۲- مدل آشفتگی انتقال حرارت

رایج‌ترین مدل به کار گرفته شده برای بردار شار حرارتی، مدل ساده پخش گردابه‌ای^۱ (SED) است که یک مدل مرتبه اول بوده، مطابق رابطه (۱۰) تعریف می‌شود [۱۴]:

$$\overline{u_i T^i} = - \frac{\nu_t}{Pr_t} \frac{\partial T}{\partial x_i} \quad (10)$$

عدد پرانتل آشفته (Pr_t) به صورت نسبت پخش گردابه‌ای ممنوم به پخش گردابه‌ای دما به صورت رابطه (۱۱) تعریف می‌شود [۱۵]:

$$Pr_t = \frac{\varepsilon M}{\varepsilon_H} \quad (11)$$

این نسبت در این مدل ثابت و برابر ۰/۸۵ در نظر گرفته شده است؛ در حالی که عدد پرانتل آشفته، بیانگر نسبت چسبندگی گردابه‌ای به پخش گردابه‌ای است:

$$Pr_t = \frac{\vartheta_t}{\alpha_t} \quad (12)$$

فرض ثابت بودن این پارامتر به این معنی است که در شرایط جریانی و هندسی مختلف این نسبت بدون تغییر خواهد بود.

^۱ Simple Eddy Diffusivity

زمانی عدد ناسلت محلی، مطابقت قابل قبولی با نتایج بدست آمده از مطالعه تجربی ملادین و زومبرونن [۱۶] دارد. مطابق نتایج تجربی در شکل ۴، عدد ناسلت در اطراف ناحیه برخورد ($x/B \leq 2$) و فواصل دور از آن ($x/B > 6$) کاهش می‌یابد. این در حالی است که نوسانی کردن جت، باعث افزایش عدد ناسلت در فاصله ($2 \leq x/B < 6$) می‌شود. x امتداد سطح تخت برخورد از نقطه سکون و B عرض خروجی جت در تحقیق ملادین [۱۶] است.

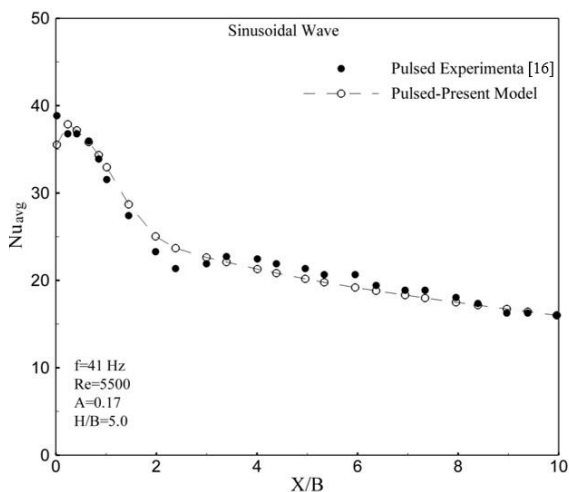
لازم به ذکر است که عدد ناسلت و متوسط زمانی عدد ناسلت محلی به صورت رابطه (۱۳-۱۴) تعریف شده‌اند:

$$Nu = \frac{q''}{\Delta T} \frac{2B}{K(T)} \quad (13)$$

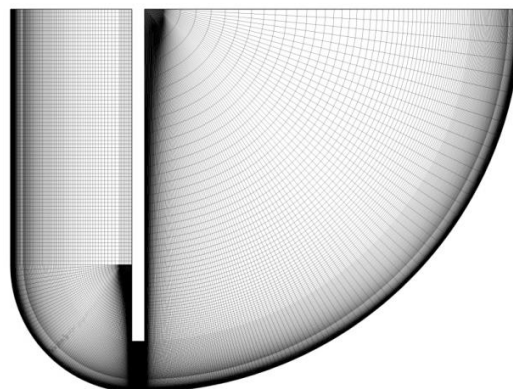
$$Nu_{avg}(x) = \int_0^t \frac{1}{\Delta T} Nu(x,t) dt \quad (14)$$

که در این رابطه، q'' شار حرارتی وارد شده به سطح مقعر و $K(T)$ ضریب هدایت حرارتی است؛ همچنین ΔT اختلاف دمای سطح و سیال برخوردی و Δt گام زمانی حل است.

شکل ۵، اثر تغییر فرکانس نوسان (f) بر متوسط زمانی عدد ناسلت را در امتداد سطح برخورد برای موج سینوسی نشان می‌دهد. با توجه به شکل، با افزایش فرکانس نوسان از ۴۰ تا ۱۶۰ هرتز، متوسط عدد ناسلت محلی افزایش می‌یابد.



شکل ۴- مقایسه متوسط عدد ناسلت محلی با نتایج تجربی



شکل ۳- ساختار شبکه‌بندی محدوده جریان

برای ترم‌های جابجایی معادلات از فرمول‌بندی تفکیکی و روش مجزاسازی مرتبه دوم^۱ استفاده شده، ارتباط میان فشار و سرعت از طریق الگوریتم سیمپل^۲ برقرار شده است. مبنای همگرایی حل، میزان باقیمانده‌های نسبی است که در حالت پایا 10^{-6} و در حالت گذرا برای تمامی پارامترها (به جز انرژی 10^{-6}) 10^{-4} در نظر گرفته شده است؛ همچنین استقلال گام زمانی برای هر مورد به صورت مستقل، مورد بررسی قرار گرفته است. گام زمانی مورد استفاده برای حالت نوسانی 10^{-4} است. تکرار محاسبات تا زمانی انجام می‌شود که نوسان میدان‌های جریان و دما پایا شود. به عبارت دیگر، نتایج در چرخه‌های متوالی به صورت یکسان تکرار شوند.

۵- نتایج و بحث

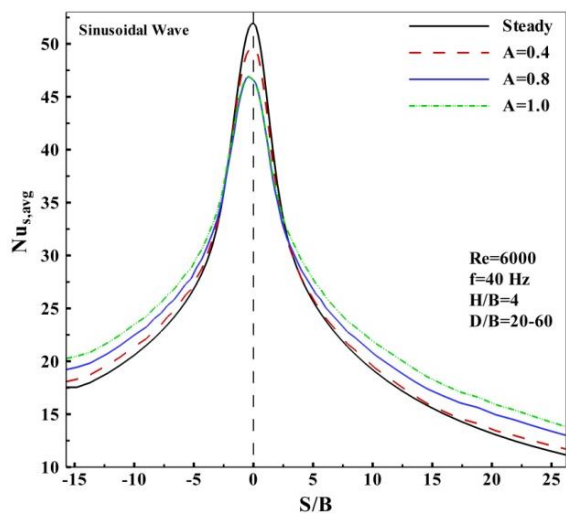
پیش‌بینی توزیع عدد ناسلت بدست آمده در تحقیق حاضر با داده‌های تجربی از ملادین^۳ و زومبرونن^۴ [۱۶] در حالت نوسانی مورد مقایسه قرار گرفته‌اند. با توجه به عدم وجود داده‌های عددی و تجربی در مورد جت نوسانی برخوردی به سطح مقعر، مطالعه حاضر با استفاده از نتایج تجربی در دسترس برای جت برخوردی نوسانی به یک سطح تخت اعتبارسنجی شده است. شکل ۴، متوسط زمانی عدد ناسلت محلی در فرکانس ۴۱ هرتز را نشان می‌دهد. مقایسه نتایج عددی با داده‌های تجربی نشان می‌دهد که پیش‌بینی متوسط

¹ Second-order upwind

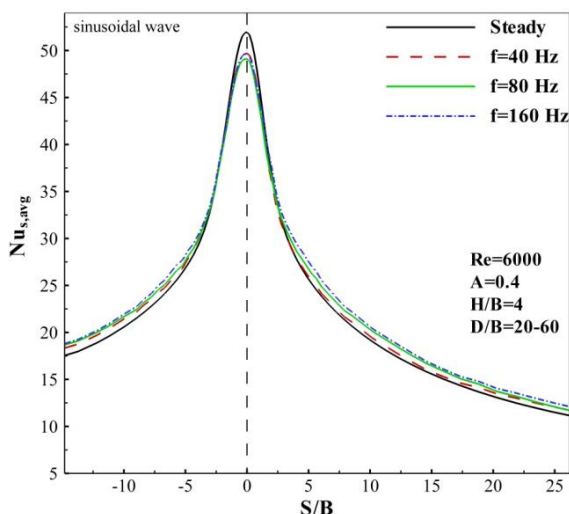
² SIMPLE

³ Mladin

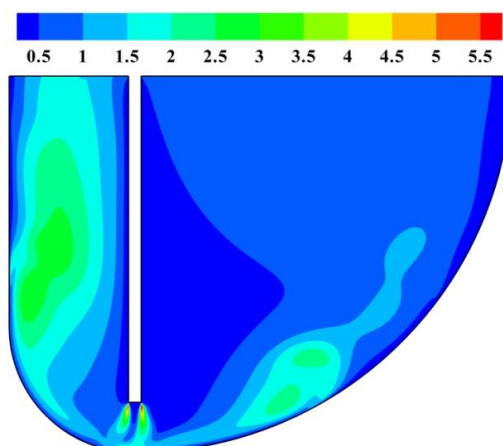
⁴ Zumbunnen



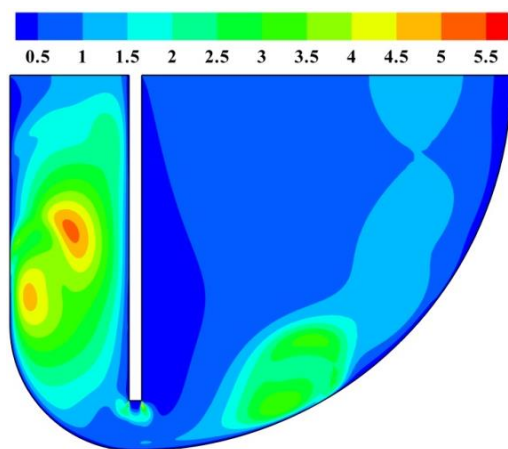
شکل ۶- اثر دامنه نوسان بر توزیع متوسط زمانی عدد ناسلت محلی



شکل ۵- اثر فرکانس نوسان بر توزیع متوسط زمانی عدد ناسلت محلی



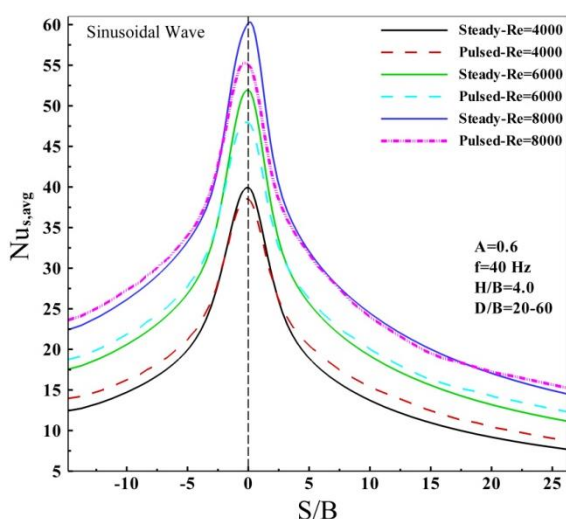
شکل ۷- کانکتور انرژی جنبشی آشفتگی با دامنه نوسان ۰/۴



با افزایش فرکانس، نوسان‌ها در یک بازه زمانی افزایش می‌یابد و همین امر موجب افزایش اختلاط و آشفتگی بیشتر جریان می‌شود. میزان آشفتگی ارتباط مستقیمی با انتقال حرارت دارد و با افزایش آن انتقال حرارت نیز افزایش می‌یابد و دلیل اصلی این ارتباط مستقیم تاثیر آشفتگی جریان بر روی لایه مرزی تشکیل شده روی سطح مقعر می‌باشد. هرچه ضخامت لایه مرزی کوچکتر و نامنظم‌تر باشد، می‌توان انتقال حرارت بهتری را انتظار داشت. افزایش فرکانس هم با از بین بردن لایه‌های مرزی و آشفتگی کردن جریان میزان انتقال حرارت را افزایش می‌دهد. شکل ۶ اثر دامنه نوسان (A) را بر متوسط زمانی عدد ناسلت محلی نشان می‌دهد. با توجه به شکل ۶، متوسط عدد ناسلت در ناحیه برخورد، با افزایش دامنه کاهش می‌یابد و در امتداد صفحه، با توجه به تشکیل گردابه‌های قوی‌تر و بزرگ‌تر، نرخ انتقال حرارت و در نتیجه متوسط عدد ناسلت افزایش می‌یابد.

شکل‌های ۷ و ۸ به ترتیب، کانکتور انرژی جنبشی آشفتگی در $A=1$ و $A=0.4$ را نشان می‌دهند. مطابق معادله انتقال انرژی جنبشی آشفتگی، k ، (رابطه ۷) این پارامتر به مقدار و گردادیان‌های سرعت وابسته است. به عبارت دیگر، در نواحی با مقادیر و گردادیان سرعت زیاد، مقادیر انرژی جنبشی آشفتگی نیز قابل توجه خواهد بود [۱۷].

که در پایین دست جریان میزان انتقال حرارت جت نوسانی نسبت به حالت پایا افزایش می‌یابد. دلیل این افزایش، بالاتر بودن شدت آشفتگی جت نوسانی نسبت به جت پایا در این نواحی است [۲۱]. وجود شیب کم در توزیع متوسط زمانی عدد ناسلت محلی در جت نوسانی (نسبت به جت پایا) از نقطه سکون تا پایین دست جریان، باعث نرخ بالاتر انتقال حرارت از سطح هدف می‌شود. با توجه به شکل ۹، با افزایش عدد رینولدز اختلاف متوسط زمانی عدد ناسلت محلی نسبت به حالت پایا کاهش می‌یابد. به طوری که در عدد رینولدز ۸۰۰۰، تغییرات چندانی بین حالت نوسانی و پایا مشاهده نمی‌شود. البته در هر سه عدد رینولدز، متوسط عدد ناسلت در حالت نوسانی نسبت به حالت پایا در قسمتی از سطح بیشتر است که انحنا بیشتری دارد ($D/B=20$).



شکل ۹- اثر عدد رینولدز بر متوسط زمانی عدد ناسلت

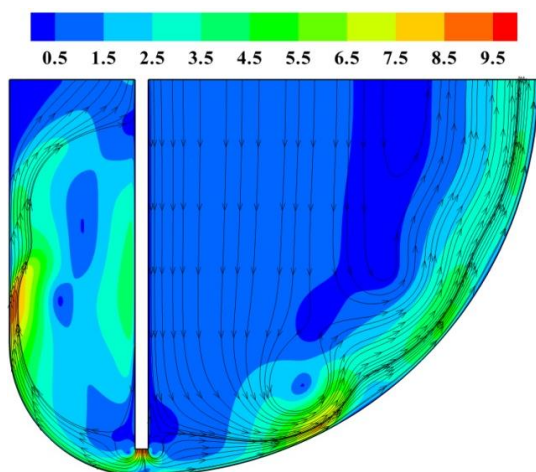
در شکل ۱۰، توزیع متوسط زمانی عدد ناسلت موضعی روی سطح برخورد، حاصل از برخورد جت شیاری نوسانی به سطوح مقعر نامتقارن ارائه شده است. همانطور که گفته شده، هندسه مساله حاضر به صورت سطوح مقعر نامتقارن است. این سطوح از دو نیم دایره با انحنای متفاوت تشکیل شده است. با توجه به شکل ۱۰، انحنای قسمت چپ شکل که ثابت و برابر با $D/B=20$ در نظر گرفته شده است. برای سمت راست سه انحنای نسبی ۲۰، ۳۰ و ۶۰ اعمال شده است؛ بنابراین این سطوح به ترتیب دارای نسبت انحنای (D/B)

شکل ۸- کانتور انرژی جنبشی آشفتگی با دامنه نوسان ۱ همانطور که در شکل ۷ مشاهده می‌شود، برای جت با دامنه نوسان ۰/۴، در ناحیه برخورد به علت گرادیان‌های شدید سرعت، انرژی جنبشی آشفتگی افزایش می‌یابد. با افزایش فاصله از ناحیه برخورد، انرژی جنبشی آشفتگی در نزدیکی دیواره به طور محسوس کاهش می‌یابد؛ همچنین با افزایش فاصله از دیواره، افزایش سرعت منجر به افزایش انرژی جنبشی آشفتگی به ویژه در ناحیه با شعاع انحنای کمتر می‌شود. مطابق شکل (۸)، با افزایش دامنه نوسان به ۱/۰ و در نتیجه کاهش محسوس سرعت در نیم سیکل دوم، منجر به کاهش سرعت و در نتیجه کاهش انرژی جنبشی آشفتگی در ناحیه برخورد می‌شود. در ناحیه سکون، انرژی جنبشی آشفتگی در جت با دامنه نوسان ۰/۴ بیشتر از جت با دامنه ۱ است. این اختلاف در شکل ۶ مشاهده می‌شود که مقدار عدد ناسلت در ناحیه سکون با دامنه ۰/۴ نسبت به دامنه ۱ بیشتر است؛ اما با دور شدن از ناحیه سکون، تغییرات انرژی جنبشی آشفتگی در جت با دامنه نوسان ۱ بیشتر از جت با دامنه ۰/۴ است، بطوریکه این تغییرات در شکل ۶ به صورت افزایش انتقال حرارت در جت با دامنه نوسان ۱ نسبت به جت با دامنه ۰/۴ نشان داده شده است.

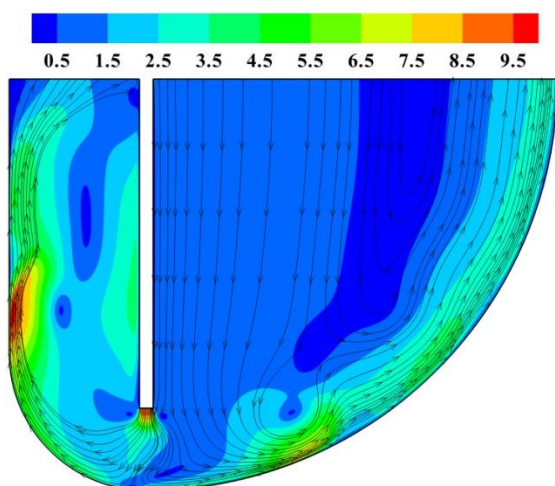
شکل ۹، تغییرات متوسط زمانی عدد ناسلت محلی در اعداد رینولدز مختلف در جت نوسانی سینوسی و حالت پایا را نشان می‌دهد. همانطور که دیده می‌شود، افزایش عدد رینولدز، منجر به افزایش نرخ انتقال حرارت از سطح می‌شود. در جت پایا با افزایش عدد رینولدز، عدد ناسلت نیز افزایش می‌یابد [۱۸]. علت این امر، زیاد شدن سرعت برخورد جت و گرادیان ناشی از آن و در نتیجه افزایش نرخ انتقال حرارت از سطح است. ارزیابی نتایج انتقال حرارت برخوردی نوسانی در یک سیکل بستگی به این دارد که آیا انتقال حرارت نوسانی در نیم سیکل اول به اندازه کافی قوی است که بتواند انتقال حرارت بسیار پایین در نیم سیکل دوم را جبران کند [۱۹]. با افزایش عدد رینولدز جت، این پدیده از دو طریق سرعت بالای جت در نیم سیکل اول و وجود جریان چرخشی در نیم سیکل دوم جبران و منجر به افزایش انتقال حرارت می‌شود [۲۰]. مطابق شکل ۹، در فرکانس ۴۰ هرتز برای هر سه عدد رینولدز در جت نوسانی، پیش‌بینی متوسط زمانی عدد ناسلت در ناحیه سکون از حالت پایا کمتر است؛ این در حالی است

به افزایش متوسط عدد ناسلت محلی می‌شود. با افزایش فاصله دهانه جت هسته پتانسیل کوتاهتر شده، میزان پخش شدن جت پس از خروج از نازل افزایش می‌یابد.

در شکل‌های ۱۲ و ۱۳، کانتور سرعت همراه با خطوط جریان در دو فاصله $H/B=2$ و 6 نشان داده شده است. مقایسه این دو شکل نشان می‌دهد که با افزایش فاصله جت از سطح برخورد، انحراف جریان موجب کاهش سرعت مرکزی جت و در نتیجه کاهش مقادیر سرعت در ناحیه سکون می‌شود. همان گونه که در شکل ۱۱ نشان داده شده است، کاهش سرعت در ناحیه برخورد، کاهش عدد ناسلت در این ناحیه را به دنبال دارد.



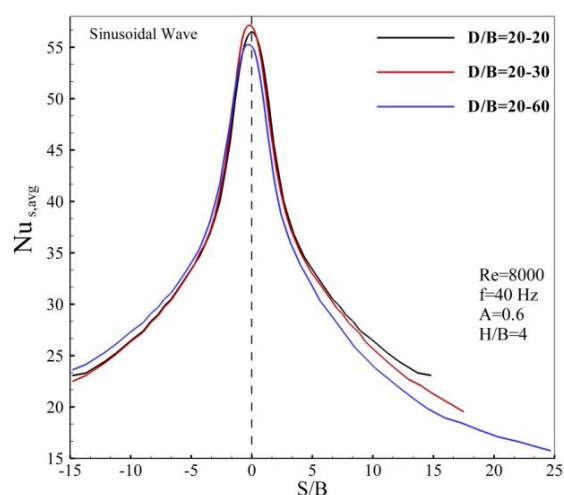
شکل ۱۲- کانتور سرعت به همراه خطوط جریان در $H/B=2$



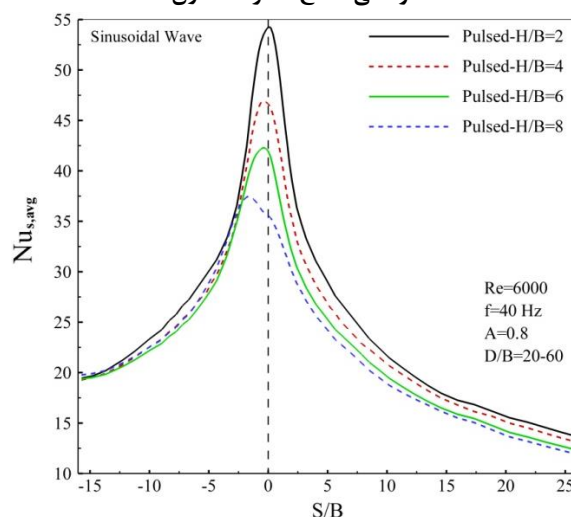
شکل ۱۳- کانتور سرعت به همراه خطوط جریان در $H/B=6$

$20-20$ ، $20-30$ و $20-60$ می‌باشند. با توجه به شکل ۱۰، با افزایش مقدار D/B در مقادیر $S/B > 0$ ، در مقایسه با سطح متقارن، متوسط عدد ناسلت موضعی در ناحیه برخورد و جت دیواره کاهش می‌یابد. این در حالی است که در $S/B < 0$ ، متوسط عدد ناسلت موضعی با افزایش نسبت انحنا (D/B)، در ناحیه برخورد و جت دیواره نسبت به سطح متقارن افزایش یافته است.

شکل ۱۱، اثر فاصله دهانه جت تا مرکز سطح مقعر نامتقارن را روی توزیع متوسط عدد ناسلت محلی نشان می‌دهد. مطابق شکل ۱۱، کاهش فاصله بین دهانه جت با سطح برخورد، منجر



شکل ۱۰- تاثیر نسبت انحنا بر توزیع متوسط زمانی عدد ناسلت موضعی سطح مقعر نامتقارن



شکل ۱۱- تاثیر فاصله جت تا سطح برخورد بر متوسط زمانی عدد ناسلت محلی

۶- نتیجه‌گیری

در مطالعه پیش‌رو، شبیه‌سازی عددی جریان و انتقال حرارت آشفته جت برخوردی نوسانی به یک سطح مقعر نامتقارن، بررسی قرار گرفت. در این بررسی، از جت برخوردی نوسانی با موج سینوسی با دمای ۲۹۸ کلوین استفاده شده است. به سطح برخورد، شار حرارتی ثابتی اعمال شده، دیواره‌های نازل عایق در نظر گرفته شده است. بررسی‌ها برای اعداد رینولدز ۴۰۰۰ تا ۸۰۰۰، دامنه نوسان ۰/۴ تا ۱، فرکانس ۴۰ تا ۱۶۰ هرتز، فاصله جت تا سطح برخورد (H/B) ۲ تا ۸ و سه انحنای سطح برخورد (D/B) ۲۰-۲۰، ۳۰-۳۰ و ۶۰-۶۰ صورت گرفته است. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که استفاده از جت‌های نوسانی، باعث افزایش مقدار متوسط عدد ناسلت بر روی سطح مقعر در مقایسه با جت پایا می‌شود.

همچنین افزایش عدد رینولدز خروجی جت، باعث افزایش قابل ملاحظه‌ی گرادیان سرعت و انرژی جنبشی آشفستگی در ناحیه نزدیک دیواره می‌شود. با افزایش انرژی جنبشی آشفستگی در امتداد سطح برخورد، متوسط زمانی عدد ناسلت و به دنبال آن میزان انتقال حرارت از سطح برخورد افزایش می‌یابد.

نتایج شبیه‌سازی عددی این تحقیق نشان می‌دهد که با افزایش فرکانس نوسان جت در محدوده ۴۰ تا ۱۶۰ هرتز، اختلاط و آشفستگی جریان افزایش یافته، در نتیجه متوسط نرخ انتقال حرارت از سطح برخورد نیز افزایش می‌یابد. با افزایش دامنه نوسان، متوسط زمانی عدد ناسلت محلی، به علت ایجاد گردابه‌های بزرگتر افزایش می‌یابد. با توجه به نتایج مشخص می‌شود که تغییرات عدد ناسلت در سطح با انحنای $D/B=20$ بیشتر است. به عبارت دیگر در این نواحی، انتقال حرارت بیشتری انجام می‌شود.

با افزایش فاصله دهانه جت تا سطح برخورد، هسته پتانسیل کوتاهتر و در نتیجه سرعت محوری کاهش می‌یابد. این کاهش سرعت، موجب پخش جریان شده که باعث کاهش انتقال حرارت در سطح برخورد می‌شود.

مطابق نتایج به دست آمده، در سطح مقعر نامتقارن با ثابت نگه داشتن انحنای یک سمت ($D/B=20$) و افزایش انحنای نسبی سطح دوم، توزیع عدد ناسلت در سطح نیز نامتقارن خواهد بود. همچنین نتایج نشان می‌دهد که در سطح نامتقارن مورد بررسی، جریان جت به سمت سطحی

متمایل می‌شود که دارای انحنای نسبی کمتری است. با انحراف جریان سیال به سطح با انحنای نسبی کمتر، عدد ناسلت و میزان انتقال حرارت در این ناحیه در مقایسه با بخش دیگر سطح برخورد افزایش می‌یابد.

۷- فهرست علائم

دامنه نوسان	A
فرکانس نوسان، 1/s	f
شار حرارتی، w/m^2	q''
عرض جت، m	B
فاصله نازل تا سطح برخورد، m	H
دما، K	T
فشار استاتیک، Pa	P
عدد رینولدز	Re
مسافت روی سطح مقعر، m	S
زمان، s	t
سرعت، m/s	U
چگالی، kg/m^3	ρ
ویسکوزیته دینامیکی، $kg/m.s$	μ
نرخ اضمحلال انرژی جنبشی آشفستگی، m^2/s^3	ε
ضریب هدایت گرمایی، $w/m.k$	K
انرژی جنبشی آشفستگی، m^2/s^2	k
عدد ناسلت	Nu
متوسط زمانی عدد ناسلت	Nu_{avg}
سرعت متوسط، m/s	u_{avg}
سرعت خروجی جت، m/s	u_{jet}
عدد استروهل	$St = fD/u_{avg}$
عدد پرانتل آشفته	Pr_t
گرمای ویژه در فشار ثابت، $N.m/kg.k$	C_p
فاصله بی‌بعد از دیواره	y^+

۸- مراجع

- transfer on a semi-circular concave surface. *Int J Heat Mass Tran* 43: 1811-1822.
- [12] Sharif MAR, Mothe KK (2009) Evaluation of turbulence models in the prediction of heat transfer due to slot jet impingement on plane and concave surfaces *Numer. Numer Heat Tr B-Fund* 55(4):273-294.
- [13] Mohammadpour J, Zolfagharian MM, Mujumdar AS, Rajabi-Zargarabadi M, Abdulazadeh M (2014) Heat transfer under composite arrangement of pulsed and steady turbulent submerged multiple jets impinging on a flat surface. *Int J Therm Sci* 86: 139-147.
- [14] Daly BJ, Harlow FH (1970) Transport equation in turbulence. *Phys Fluids* 13: 2634-2649.
- [15] Kays WM, Crawford ME (Translator) (1993) Convective heat and mass transfer. 3th edn. McGraw-Hill, New York.
- [16] Mladin EC, Zumbrunnen DA (1997) Local convective heat transfer to submerged pulsating jets. *Int J Heat Mass Tran* 40: 3305-3321.
- [17] Ahmadi H, Rajabi-Zargarabadi M, Mujumdar AS, Mohammadpour J (2015) Numerical modeling of a turbulent semi-confined slot jet impinging on a concave surface. *Int J Therm Sci* 19: 129-140.
- [18] Kumar BVNR, Prasad BVSSS (2008) Computational flow and heat transfer of a row of circular jets impinging on a concave surface. *Heat Mass Transfer* 44(6): 667-678.
- [19] Liewkongsatporn W, Ahrens F, Patterson T (2006) A numerical study of axisymmetric pulsating jet impingement heat transfer. *International heat transfer conference* 13: 13-18.
- [20] Behera RC, Dutta P, Srinivasan K (2007) Numerical study of interrupted impinging jets for cooling of electronics. *IEEE Trans Compon Package Technol* 30: 275-284.
- [21] Xu P, Yu BM, Qiu SX, Poh HJ, Mujumdar AS (2010) Turbulent impinging jet heat transfer enhancement due to intermittent pulsation. *Int J Therm Sci* 49: 1247-1252.
- [1] Sheriff HS, Zumbrunnen DA (1995) Dependence of heat transfer to a pulsating stagnation flows on pulsation characteristics. *J Thermophys Heat Tr* 9: 181-192.
- [2] Sailor DJ, Rohli DJ, Qianli F (1999) Effect of variable duty cycle flow pulsations on heat transfer enhancement for an impinging air jet. *Int J Heat Fluid Fl* 20: 574-580.
- [3] Camci C, Herr F (2002) Forced Convection Heat Transfer Enhancement Using A Self-Oscillating Impinging Planar Jet. *J Heat Trans-T ASME* 124: 770-782.
- [4] Zulkifli R, Sopian K (2006) Pulsating Circular Air Jet Impingement Heat Transfer. *Journal-The Institution of Engineers, Malaysia* 67(3).
- [5] Hofmann HM, Movileanu DL, Kind M, Martin H (2007) Influence of a Pulsation on Heat Transfer and Flow Structure in Submerged Impinging Jets. *Int J Heat Mass Tran* 50: 3638-3648.
- [6] Liewkongsatporn W, Patterson T, Ahrens F (2008) Pulsating jet impingement heat transfer enhancement. *Dry Technol* 26(4):433-442.
- [7] Zulkifli R, Sopian K, Abdullah S, Takriff MS (2009) Comparison of local nusselt number between steady and pulsating jet at different jet reynolds number. *WSEAS Transactions on Environment and Development* 5(5): 1790-5079.
- [8] Xu P, Mujumdar AS, Poh HJ, Yu BM (2010) Heat transfer under a pulsed slot turbulent impinging jet at large temperature differences. *Int J Therm Sci* 14: 271-281.
- [9] Demircan T, Turkoglu H (2010) The numerical analysis of oscillating rectangular impinging jets. *Numer Heat Transfer* 58: 146-161.
- [10] Mohammadpour J, Rajabi-Zargarabadi M, Mujumdar AS, Ahmadi H (2014) Effect of intermittent and sinusoidal pulsed flows on impingement heat transfer from a concave surface. *Int J Therm Sci* 76: 118-127.
- [11] Choi M, Yoo HS, Yang G, Lee JS, Sohn DK (2000) Measurement of impinging jet flow and heat