



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

جواد محمدپور^۱، مهران رجبی زرگرآبادی^{۲*}، هادی احمدی^۳

۱- کارشناس ارشد دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه سمنان، سمنان

۲- استادیار دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه سمنان، سمنان

* سمنان، صندوق پستی ۳۵۱۳۱-۱۹۱۱۱، rajabi@semnan.ac.ir

چکیده- این مقاله در مورد اثر نوسانهای مربعی (ضربانی) بر روی جریان و انتقال حرارت آشفته یک جت شیاری برخوردی به سطح مقعر بحث می‌کند. در این راستا تحلیل عددی جریان و انتقال حرارت آشفته در یک جت دو بعدی با استفاده از مدل RNG-K-ε انجام شده است. اثرات عدد رینولدز جت، فاصله جت تا مرکز سطح برخورد و فرکانس نوسانات بر توزیع متوسط زمانی عدد ناسلت سطح مورد مطالعه قرار گرفته است. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که در مقایسه با جت پایا، استفاده از جت نوسانی در محدوده فرکانس ۱۰ تا ۵۰ هرتز باعث افزایش میانگین انتقال حرارت از سطح می‌شود. افزایش عدد رینولدز در محدوده ۴۷۴۰ تا ۹۵۹۰ نیز به طور قابل توجهی منجر به بالا رفتن متوسط زمانی عدد ناسلت می‌شود. همچنین در جت پایا، کاهش فاصله جت تا صفحه منجر به افزایش محسوس عدد ناسلت در ناحیه برخورد می‌شود. این در حالی است که در جت نوسانی، کاهش فاصله جت تا سطح مقعر منجر به تغییرات عدد ناسلت در سراسر سطح برخورد مقعر می‌شود.

کلید واژگان: جریان آشفته، انتقال حرارت برخوردی، جت نوسانی، عدد ناسلت.

Numerical analysis of turbulent flow and heat transfer from pulsating impinging jet to concave surface

J. MohamadPour¹, M. Rajabi Zargarabadi^{2*}, H. Ahmadi³

1,3- MSc., Mech. Eng. Semnan Univ., Semnan, Iran

2- Assis. Prof., Mech. Eng., Semnan Univ., Semnan, Iran

* P. O. B. 35131-19111, Semnan, Iran. rajabi@semnan.ac.ir

Abstract- This paper discusses about the effects of square wave pulsation on the turbulent flow and heat transfer from slot jet impinging to a concave surface. The RNG k-ε turbulence model is applied for modeling the turbulent flow and heat transfer filed in the present 2-D slot jet flow. The effects of jet Reynolds number, nozzle to surface distance and pulsation frequency on time-averaged Nusselt number distribution are studied carefully. Results show that applying the pulsating jet in the range of 10 Hz to 50 Hz can increase heat transfer from the concave surface in comparison with the steady jet. Increasing jet Reynolds number ranged from 4740 to 9590 significantly increases the time-averaged local Nusselt number. Also, in steady jet, decreasing the nozzle to surface distance, consequences increasing the Nusselt number near the impingement zone. While in pulsating jet, it causes both increasing/ decreasing the Nusselt number all over the concave surface.

Keywords: Turbulent Flow, Impingement Heat Transfer, Pulsating Jet, Nusselt Number.

۱- مقدمه

یکی از مؤثرترین روش‌های خنک‌کاری قطعات داغ در صنعت، انتقال حرارت به شیوه برخوردی است. در این روش با تشکیل یک لایه نازک هیدرودینامیکی و حرارتی بر روی سطح برخورد، انتقال حرارت بیشتری در مقایسه با سایر روش‌های خنک‌کاری انجام می‌شود. هندسه سطوح استفاده شده در مطالعات جت برخوردی به دو صورت تخت یا منحنی شکل می‌باشد که با وجود اشتراک در اصول کلی جریان در هر دو حالت، رفتار جریان در برخورد به سطوح منحنی با تغییرات زیادی همراه است. از انتقال حرارت برخوردی در خنک‌کاری دیواره محفظه احتراق، اجزای الکتریکی، برش و شکل دهی فلزات و خشک کردن کاغذ استفاده می‌شود. اصلی‌ترین کاربرد جت برخوردی به سطوح مقعر، مربوط به خنک‌کاری سطح داخلی لبه جلویی پره توربین گاز است. این بخش از پره توربین به دلیل دریافت شار حرارتی بسیار زیاد، نیازمند خنک‌کاری است. همچنین از دیگر کاربرد این روش می‌توان به صنایع هوافضا که به طور خاص شامل یخ زدایی از لبه جلویی بال فضاپیما به وسیله یک جت گرم است، اشاره کرد.

در سال‌های اخیر روش‌های مختلفی برای افزایش کارایی جت برخوردی و افزایش انتقال حرارت از سطوح برخورد ارائه شده است. یکی از مؤثرترین روش‌های ارائه شده تاکنون استفاده از جت‌های نوسانی^۱ می‌باشد که در دهه اخیر بسیار مورد توجه محققین قرار گرفته است. در این روش، از جریان نوسانی (گسسته) به جای جریان پیوسته در جت برخوردی استفاده می‌شود. این نوسانات می‌تواند به شکل موج مربعی یا سینوسی و در فرکانس‌های مختلف باشد.

تاکنون مطالعات محدودی به صورت تجربی و عددی در این زمینه انجام شده است. زومبرون و عزیز [۱] برای اولین بار به صورت تجربی اثر جریان تناوبی را در انتقال حرارت حاصل از برخورد یک جت آبی نوسانی به یک سطح تخت با شار حرارتی ورودی ثابت بررسی کردند. شریف و زومبرون [۲] در یک مطالعه تجربی تأثیر دو نوع موج سینوسی و مربعی شکل را بر انتقال حرارت جابجایی در برخورد یک جت آبی به یک سطح تخت را بررسی کردند. آنها کاهش عدد ناسلت محلی ناحیه سکون را در امواج سینوسی گزارش دادند.

1. Pulsating Jets

هافمن و همکاران [۳] به صورت عددی عملکرد سیزده مدل آشفته‌گی مختلف را در پیش‌بینی انتقال حرارت حاصل از برخورد جت پایا و نوسانی به یک سطح تخت بررسی کردند. آنها در این تحقیق مدل $k-\omega$ SST را به عنوان مدلی مناسب برای پیش‌بینی عدد ناسلت در ناحیه گذار از آرام به آشفته و در فواصل کوچک بین جت و سطح معرفی کردند. میوکانگستاپورن و همکاران [۴] در یک مطالعه عددی، افزایش انتقال حرارت برخوردی حاصل از یک جت نوسانی نسبت به نتایج جت پایا را گزارش دادند. در این محاسبات با ثابت فرض کردن عدد رینولدز (۷۸۰۰) نشان داده شد که با افزایش دامنه نوسانات و کاهش فاصله جت تا سطح برخورد، انتقال حرارت برخوردی افزایش می‌یابد. همچنین در این تحقیق تأثیر دمای محیط به واسطه جریان برگشتی بر میزان انتقال حرارت بررسی شده است. بیهرا و همکاران [۵] انتقال حرارت حاصل از برخورد یک جت هوای نوسانی به یک سطح تخت را به صورت عددی بررسی کردند. در این مطالعه با استفاده از تغییرات پارامترهایی مانند عدد رینولدز جت، شکل امواج نوسانی، فرکانس نوسانات و فاصله جت تا سطح برخورد، نشان داده شده است که در صورت استفاده از نوساناتی مربعی شکل، توزیع عدد ناسلت در ناحیه برخورد و ناحیه جت دیواره به ترتیب ۱۲٪ و ۳۵٪ در مقایسه با حالت پایا افزایش می‌یابد. این در حالی است که میزان این تغییرات به ازای نوسانات سینوسی به ترتیب ۵٪ و ۱۰٪ محاسبه گردیده است. میوکانگستاپورن و همکاران [۶] در ادامه تحقیقاتشان تأثیر تغییرات نسبت دامنه سرعت بر انتقال حرارت حاصل از برخورد یک جت شیباری نوسانی محدود به یک سطح تخت را بررسی کردند. در این تحقیق نشان داده شده است که در سرعت‌های یکسان، با افزایش دامنه سرعت، میزان متوسط زمانی انتقال حرارت از سطح افزایش می‌یابد. باید به این نکته اشاره کرد که در این نوع جت، جریان‌های چرخشی‌ای که در ناحیه برخورد بر اثر شتاب جت‌های نوسانی تولید می‌شوند به عنوان مؤثرترین عامل انتقال حرارت گزارش شده‌اند. این جریان‌ها به شدت به دامنه سرعت وابسته بوده و با تغییر این پارامتر میزان انتقال حرارت از سطح تغییر می‌کند. زو و همکاران [۷] در ادامه تحقیقات انجام شده در این زمینه، تأثیر اختلاف دمای زیاد بین جت و سطح برخورد را بر انتقال حرارت حاصل از برخورد یک جت شیباری نوسانی آشفته به سطح تخت

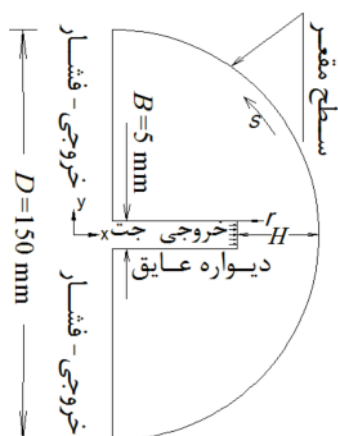
نزدیک شدن سطح به سطح تخت میزان انتقال حرارت و متوسط عدد ناسلت به شکل قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌یابد. تاکنون تمامی مطالعات انجام شده در زمینه جت‌های نوسانی، به برخورد جت با سطوح تخت محدود شده است. هدف از تحقیق حاضر، تلاش جدیدی برای بررسی تأثیر جت برخوردی نوسانی شکل بر نرخ انتقال حرارت از سطح مقعر می‌باشد. در این راستا از شبیه‌سازی عددی به منظور بررسی جریان و انتقال حرارت در یک جت برخوردی نوسانی دو بعدی با موج مربعی به سطح مقعر استفاده شده است. تأثیر عدد رینولدز، فرکانس نوسانات و فاصله جت تا صفحه مورد بررسی قرار گرفته است. هم چنین علاوه بر اعتبار سنجی نتایج به دست آمده با تحقیقات انجام شده دیگران، نتایج حاصل از جت نوسانی با داده‌های بدست آمده از جت پایا مورد مقایسه قرار گرفته است.

۲- معرفی مسأله

۲-۱- شرایط مرزی

هندسه مسأله حاضر مطابق شکل ۱ یک جت شیاری برخوردی دو بعدی است که با توجه به تقارن فیزیکی و هندسی تنها نیمی از میدان جریان برای تحلیل عددی در نظر گرفته شده است.

شرایط مرزی به کار گرفته شده در مسأله حاضر در حالت پایا همانند مطالعه تجربی چوی و همکاران [۱۱] می‌باشد.



شکل ۱ محدوده محاسباتی و شرایط مرزی

بررسی کردند. نتایج عددی آنها نشان می‌دهد که برای اختلاف دماهای بیشتر از ۱۰۰ درجه، به دلیل افزایش نرخ هدایت حرارتی، عدد ناسلت کاهش می‌یابد. دمیرکن و همکاران [۸] در یک تحلیل عددی اثر نوسانی‌های سینوسی در جت‌های برخوردی به سطح تخت را بررسی کردند. آنها گزارش دادند که ساختار کلی جریان در دو حالت جت نوسانی و پایا مشابه است، اما به دلیل ایجاد جریان‌های چرخشی در جت‌های نوسانی، عدد ناسلت در ناحیه جت دیواره به صورت نوسانی تغییر می‌کند. هم چنین نشان داده شد که با افزایش عدد رینولدز جت و دامنه نوسانات، عدد ناسلت پیش‌بینی شده افزایش می‌یابد. با افزایش فرکانس تا مقداری معین عدد ناسلت در ناحیه سکون روند صعودی داشته اما با افزایش بیشتر آن عدد ناسلت در این ناحیه تغییرات محسوس نخواهد داشت. زو و همکاران [۹] با تغییر متناوب سرعت جت به صورت مربعی شکل نوسانی تغییرات انتقال حرارت از یک سطح تخت را بررسی کردند. در این مطالعه نشان داده شد که در اثر به کار بردن این نوع موج نوسانی تغییرات مهمی در میدان جریان مانند افزایش آشفته‌گی، گسترش و توسعه گردابه‌ها و گسترش اختلاط همراه با ناپایداری جریان به وجود می‌آید که این عوامل باعث کاهش محسوس ضخامت لایه مرزی هیدرودینامیکی و حرارتی و در نتیجه افزایش نرخ انتقال حرارت از سطح برخورد می‌شوند.

بازدید تهران و همکاران [۱۰] به بررسی جت برخوردی نوسانی به صفحه تخت با شار حرارتی ثابت پرداختند. آنها ضمن مقایسه مدل‌های آشفته‌گی مختلف نشان دادند که با افزایش فاصله جت از سطح برخورد، عدد ناسلت افزایش می‌یابد. همچنین آنها نشان دادند که توزیع عدد ناسلت متأثر از لایه مرزی دیواره و گردابه‌های حلقه‌ای ایجاد شده در جریان است. چوی و همکاران [۱۱]، مطالعه تجربی جامعی را بر انتقال حرارت جت برخوردی پایا به سطح مقعر انجام دادند. این تحقیق مبنای مقایسه نتایج جت پایا و نوسانی در تحقیق حاضر قرار گرفته است.

شریف و موهه [۱۲]، اثر تغییر پارامترهای هندسی شامل فاصله جت تا سطح و تغییرات انحنای سطح را بر میزان انتقال حرارت و تغییرات عدد ناسلت به طور کامل بررسی کردند. آنها نشان دادند که با کاهش انحنای سطح (افزایش شعاع انحنای و

- ورودی جت

سرعت در ورودی جت به دو صورت پایا و نوسانی فرض شده است. موج مربعی شکل به عنوان یک نوع موج متداول نوسانی در این مطالعه استفاده شده است (شکل ۲).
 دو توزیع سرعت اعمال شده در ورودی جت به صورت زیر تعریف شده است:
 - توزیع سرعت ورودی در حالت پایا:

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

- توزیع سرعت ورودی با موج نوسانی مربعی:

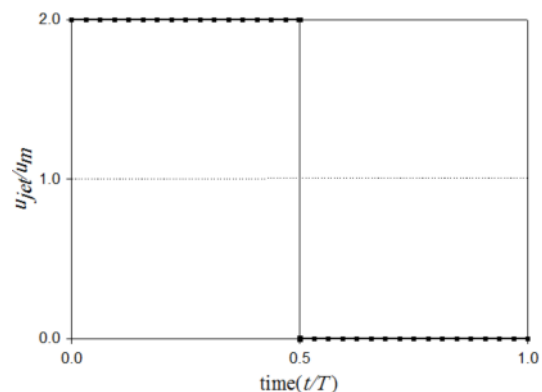
$$\begin{cases} u_{jet} = u_{peak} \rightarrow t = (2n+1)\frac{T}{2} \\ u_{jet} = 0 \rightarrow t = (2n)\frac{T}{2} \end{cases} \quad (2)$$

که نیم سیکل اول مربوط به زمانی است که ورودی نازل جت باز است (u_{peak}) و نیم سیکل دوم مربوط به حالتی است که ورودی نازل جت بسته است، هم چنین $u_m = u_{peak} / 2$ و $n=0,1,2,3,\dots$ می باشد.

مطابق مطالعه تجربی چوی و همکاران [۱۱]، دمای خروجی جت برابر ۲۹۸ کلوین، شدت آشفتهگی در ورودی جت ۵٪ و قطر هیدرولیکی برای محاسبه عدد رینولدز و عدد ناسلت دو برابر عرض دهانه ورودی ($2B$) در نظر گرفته شده است.

- دیواره برخورد

شار حرارتی ثابت ۵۰۰ وات بر متر مربع به صفحه برخورد مقعر اعمال شده و دیواره نازل جت آدیاباتیک فرض شده است. شرط عدم لغزش برای تمامی دیواره‌ها در نظر گرفته شده است.



شکل ۲ توزیع سرعت با موج مربعی شکل در ورودی جت

- خواص فیزیکی سیال

جریان هوا به صورت گاز ایده آل و تراکم ناپذیر فرض شده است. از آنجا که شار حرارتی اعمالی به سطح برخورد نسبتاً زیاد است، اختلاف دما در محدوده محاسباتی افزایش می یابد و در نتیجه خواص ترموفیزیکی سیال، وابسته به دما در نظر گرفته شده اند. سیال در فشار اتمسفر فرض شده است و شرط مرزی خروجی نیز فشار می باشد.

۲-۲- شرایط اولیه

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

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

۳- معادلات حاکم

معادلات حاکم بر مسأله، معادله های پیوستگی، ممنتوم و انرژی می باشند که به ترتیب در روابط ۳ الی ۵ نشان داده شده اند:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (3)$$

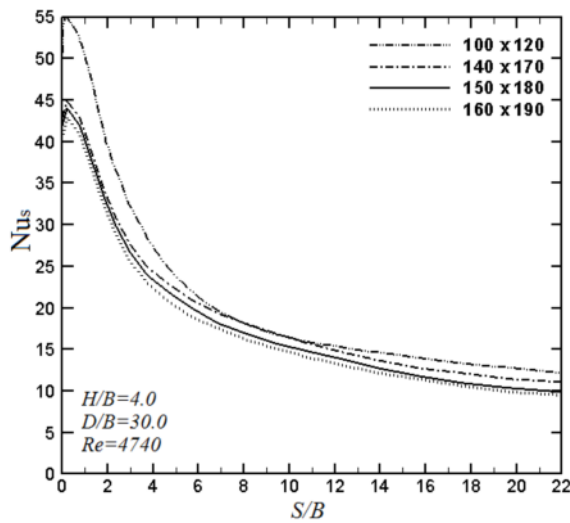
$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = & -\frac{\partial P}{\partial x_i} \\ & + \frac{\partial}{\partial x_j} [\mu(2S_{ij}) - \rho \overline{u'_i u'_j}] \end{aligned} \quad (4)$$

$$\frac{\partial(\rho T)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i T)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\frac{\mu}{Pr} \frac{\partial T}{\partial x_i} - \rho \overline{u'_i T'} \right] \quad (5)$$

$\overline{u'_i T'}$ و $\overline{u'_i u'_j}$ به ترتیب تانسور تنش رینولدز و بردار شار حرارتی آشفته می باشد که این دو ترم نیاز به مدل سازی دارند.

۳-۱- مدل آشفتهگی جریان

پس از بررسی مدل های آشفتهگی مختلف مدل آشفتهگی RNG-k-ε به عنوان مدل مناسب در مسأله حاضر در نظر گرفته شد. تحقیقات انجام شده نشان می دهد که این مدل در پیش بینی پیچیدگی های جریان در برخورد با صفحه مقعر دارای دقت بیش تر به همراه سرعت همگرایی بالاتری نسبت به سایر مدل های آشفتهگی می باشد [۱۳].



شکل ۳ بررسی استقلال از شبکه برای جت مقعر برخوردی

شبیه‌سازی عددی میدان جریان و انتقال حرارت به روش حجم کنترلی در یک هندسه دوبعدی و در شرایط پایا و نوسانی انجام شده است. به دلیل تأثیر مدل نزدیک دیواره بر رفتار جریان و انتقال حرارت، از مدل دو لایه‌ای در نزدیکی 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. در تحلیل حاضر از فرمول‌بندی تفکیکی و روش مجزا سازی مرتبه دوم استفاده شده و ارتباط میان فشار و سرعت از طریق الگوریتم سیمپل سی برقرار شده است. مبنای همگرایی جواب‌ها میزان باقیمانده نسبی می‌باشد که در حالت پایا 10^{-6} و در حالت گذرا برای تمامی پارامترها (به جز انرژی گام 10^{-4}) در نظر گرفته شده است. هم چنین استقلال گام زمانی برای هر مورد امتحان شده است و گام زمانی مورد استفاده برای حالت نوسانی 10^{-4} می‌باشد.

۵- نتایج و بحث

به منظور بررسی اعتبار حل، توزیع ناسلت به دست آمده از تحقیق حاضر با مقادیر مطالعه زو و همکاران [۹] در دو حالت نوسانی و پایا مورد مقایسه قرار گرفته است. در شکل ۴ توزیع ناسلت جت پایا و متوسط زمانی ناسلت در فرکانس ۲۵ هرتز نشان داده شده است. مقایسه نتایج عددی با مقادیر تجربی در این شکل نشان می‌دهد که پیش‌بینی عدد ناسلت محلی متوسط زمانی مطابقت قابل قبولی با نتایج بدست آمده از مطالعه زو و همکاران [۹] دارد.

معادله k :

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + P_k - \rho \varepsilon \quad (6)$$

معادله ε :

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \varepsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} P_k - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} - \frac{C_\mu \eta^3 \left(1 - \frac{\eta}{\eta_0} \right)}{1 + \beta \eta^3} \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (7)$$

که در این رابطه:

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

$$\eta = \frac{Sk}{\varepsilon}, \quad S = \sqrt{2S_{ij}S_{ij}}, \quad S_{ij} = 0.5 \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right)$$

و ثوابت معادلات عبارتند از:

$$C_{1\varepsilon} = 1.42, \quad C_{2\varepsilon} = 1.68, \quad C_\mu = 0.0845$$

$$\sigma_k = \sigma_\varepsilon = 0.7194, \quad \beta = 0.012, \quad \eta_0 = 4.38$$

۳-۲- مدل آشفته‌گی انتقال حرارت

رایج ترین مدل به کار گرفته شده برای بردار شار حرارتی $\overline{u_i T'}$ مدل ساده پخش گردابه‌ای (SED) می‌باشد که مطابق رابطه (۸) تعریف می‌شود [۱۴]:

$$\overline{u_i T'} = - \frac{\nu_t}{Pr_t} \frac{\partial T}{\partial x_i} \quad (8)$$

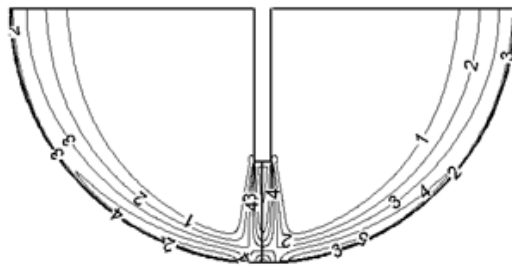
عدد پراگندگی آشفته (Pr_t) معمولاً ثابت و برابر ۰/۸۵ فرض

می‌شود.

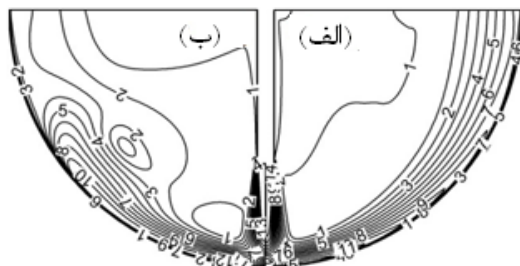
۴- حل عددی

مطابق شکل ۳ بررسی حل مستقل از شبکه‌بندی برای چهار شبکه بندی مختلف در حالت $H/B=4$ انجام شده است. تعداد سلول 180×150 (به ترتیب در جهت r و s) بیشترین دقت و سرعت در حل را فراهم می‌کند. برای سایر هندسه‌ها نیز محاسبات مشابهی انجام شده است.

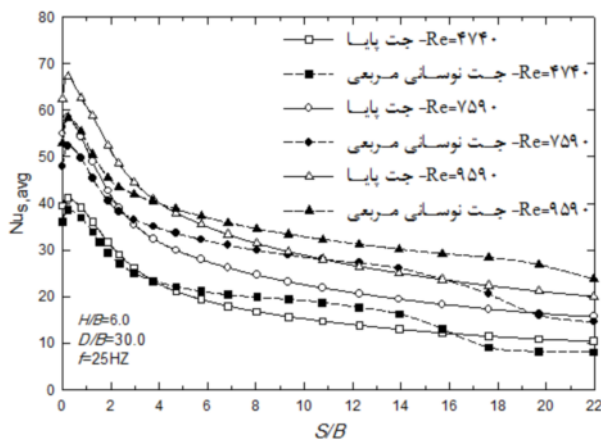
1. Simple Eddy Diffusivity



شکل ۵ توزیع سرعت (متر بر ثانیه) در حالت پایا $H/B = 6.0$ و $Re = 4740$



شکل ۶ توزیع متوسط زمانی سرعت موج نوسانی در $H/B = 6.0$ و $Re = 4740$ در حالت ورودی جت باز (u_{Peak})
الف- فرکانس ۱۰ هرتز، ب- فرکانس ۲۵ هرتز



شکل ۷ اثر عدد رینولدز متوسط بر متوسط زمانی عدد ناسلت محلی

افزایش (یا کاهش) انتقال حرارت برخوردی نوسانی در یک سیکل وابسته است به اینکه آیا انتقال حرارت نوسانی در نیم دوره اول به اندازه کافی قوی هست که بتواند انتقال حرارت بسیار پایین نیم دوره دوم را جبران کند [۴]. با افزایش سرعت جت این موضوع از دو طریق سرعت بالای جت در نیم دوره اول و وجود جریان چرخشی در نیم دوره دوم جبران شده و انتقال حرارت افزایش می‌یابد [۶] (شکل ۶).

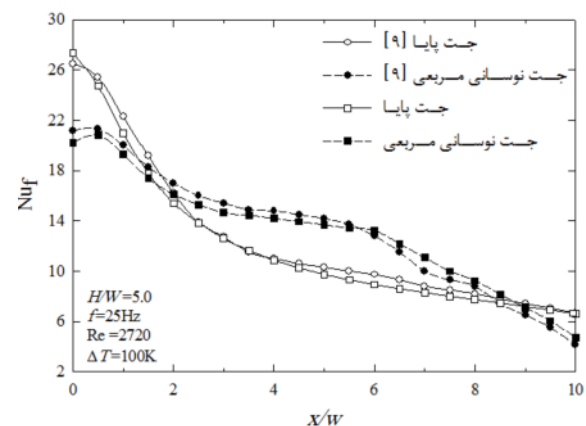
لازم به ذکر است که متوسط زمانی عدد ناسلت محلی از رابطه (۹) محاسبه شده است:

$$Nu_{avg}(x) = \int_0^t \frac{1}{\Delta t} Nu(x, t) dt \quad (9)$$

مطابق شکل ۴ با نوسانی کردن جت، عدد ناسلت در اطراف ناحیه برخورد ($x/w < 2.0$) و فواصل دور از آن ($x/w > 8.0$) کاهش می‌یابد. این در حالی است که نوسانی کردن جت باعث افزایش محسوس عدد ناسلت در فاصله ($2.0 < x/w < 8.0$) می‌شود. w بیانگر عرض شیار در مرجع [۹] می‌باشد)

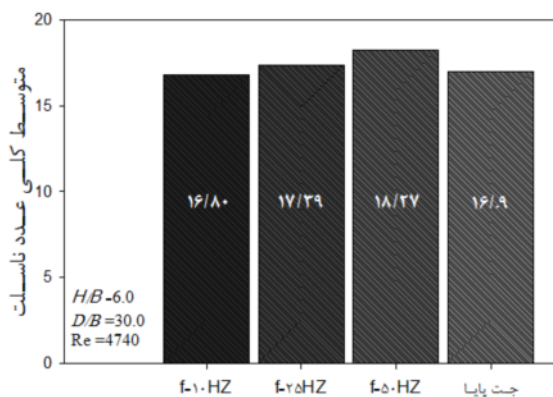
در شکل ۵ توزیع سرعت جت برخوردی به سطح مقعر در حالت پایا و عدد رینولدز ۴۷۴۰ نشان داده شده است. مطابق این شکل توزیع سرعت به دست آمده کاملاً متقارن بوده و مقدار بیشینه سرعت در نزدیکی دیواره ۵ متر بر ثانیه است. مقایسه این نتایج با شکل ۶ نشان می‌دهد که نوسانی کردن جت باعث تقویت جت برخوردی به سطح مقعر و افزایش سرعت متوسط زمانی آن می‌شود. مطابق شکل ۶ نوسانی کردن جت با دو فرکانس ۱۰ و ۲۵ هرتز منجر به افزایش سرعت جت در مجاورت دیوار به بیش از ۱۰ متر بر ثانیه می‌شود که عامل اصلی افزایش انتقال حرارت در حالت نوسانی است.

شکل ۷ تغییرات متوسط زمانی عدد ناسلت در اعداد رینولدز مختلف را برای هر دو حالت پایا و نوسانی نشان می‌دهد. مطابق شکل، در جت پایا با افزایش عدد رینولدز، عدد ناسلت نیز افزایش می‌یابد. علت این امر زیاد شدن سرعت برخورد جت و گرادبان آن و در نتیجه افزایش نرخ انتقال حرارت از سطح می‌باشد.

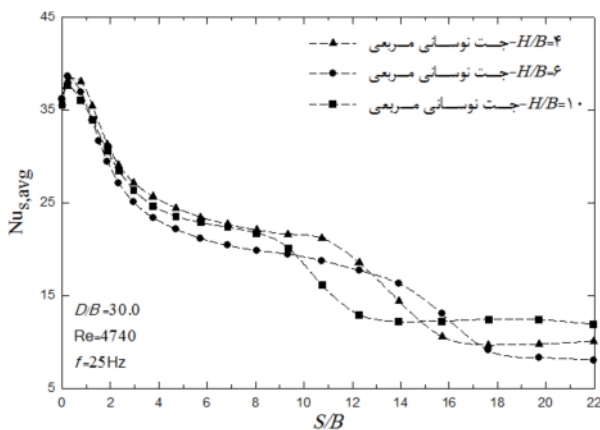


شکل ۸ اعتبارسنجی مدل آشفتگی حاضر در دو حالت نوسانی و پایا

مطابق شکل ۹، با افزایش فرکانس نوسانات، متوسط کلی عدد ناسلت افزایش می‌یابد. با افزایش فرکانس از ۱۰ تا ۵۰ هرتز، منجر به تشکیل گردابه‌های قوی‌تر و در نتیجه بالا رفتن نرخ انتقال حرارت متوسط در سطح می‌شود. مطالعات انجام شده روی صفحه تخت نشان می‌دهد که با افزایش فاصله نازل جت تا صفحه برخورد، نرخ انتقال حرارت از سطح برخورد کاهش می‌یابد [۱۵]. شکل ۱۰ اثر ارتفاع جت تا مرکز سطح مقعر را بر روی پیش‌بینی توزیع عدد متوسط زمانی ناسلت برای هر دو حالت پایا و نوسانی نشان می‌دهد. در جت پایا، کاهش فاصله جت تا صفحه منجر به افزایش محسوس عدد ناسلت در ناحیه برخورد ($H/B < 2.0$) می‌شود. در پایین‌دست جریان تغییر فاصله جت تا صفحه تأثیر محسوسی بر مقدار عدد ناسلت ندارد.



شکل ۹ متوسط کلی عدد ناسلت در فرکانس‌های مختلف



شکل ۱۰ اثر فاصله جت تا صفحه برخورد بر روی متوسط زمانی عدد ناسلت محلی

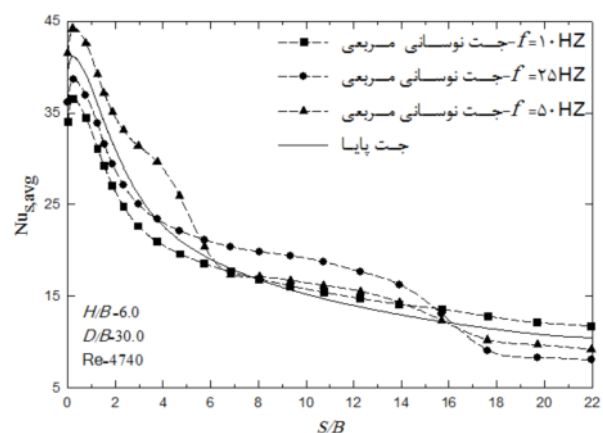
مطابق شکل ۷، در فرکانس ۲۵ هرتز برای هر سه عدد رینولدز در جت نوسانی، مقدار پیش‌بینی شده متوسط زمانی عدد ناسلت در منطقه سکون از حالت پایا کمتر است. این در حالی است که در پایین دست جریان میزان انتقال حرارت جت نوسانی نسبت به حالت پایا در هر سه حالت افزایش می‌یابد. مطابق شکل، با اعمال موج مربعی شکل، در نزدیکی $S/B = 14.0$ در اعداد رینولدز ۴۷۴۰، ۷۵۹۰ و ۹۵۹۰ به ترتیب ۱۵٪، ۳۴٪ و ۲۱٪ افزایش نرخ انتقال حرارت نسبت به حالت پایا مشاهده می‌شود. دلیل این افزایش بالاتر بودن شدت آشفتگی جت نوسانی نسبت به جت پایا در این نواحی است [۹].

پارامتر دیگری که نقش به سزایی در نرخ انتقال حرارت برخوردی از جت نوسانی دارد، فرکانس نوسانات جت می‌باشد. شکل ۸ اثر تغییر فرکانس را بر متوسط زمانی عدد ناسلت صفحه برخورد نشان می‌دهد.

مطابق این شکل متوسط زمانی عدد ناسلت با افزایش فرکانس نوسانات از ۱۰ هرتز تا ۵۰ هرتز افزایش می‌یابد. حتی در فرکانس ۵۰ هرتز، متوسط زمانی عدد ناسلت جت نوسانی در نقطه سکون ($x=0$) از مقدار جت پایا نیز بیشتر پیش‌بینی شده است.

متوسط کلی (زمان-مکان) عدد ناسلت در شکل ۹ نشان داده شده است. این پارامتر از رابطه ۱۰ محاسبه می‌شود.

$$Nu_{avg}(x) = \int_0^x \frac{1}{\Delta x} \int_0^t \frac{1}{\Delta t} Nu(x, t) dt dx \quad (10)$$



شکل ۸ اثر فرکانس نوسانات بر توزیع متوسط زمانی عدد ناسلت محلی

T	دوره زمان (S)
u_{jet}	سرعت جت ($m s^{-1}$)
u_m	سرعت متوسط زمانی جت نوسانی
u_{Peak}	ماکزیمم سرعت موج مربعی شکل ($m s^{-1}$)
زیر نویس ها	
f	دمای لایه ای
s	سطح برخورد
avg	متوسط زمانی

۸- مراجع

- [1] Zumbrennen D.A., Aziz M., "Convective Heat Transfer Enhancement Due to Intermittency in an Impinging Jet", *Journal of Heat Transfer*, Vol. 115, 1993, pp. 91-98.
- [2] Sheriff H.S., Zumbrennen D.A., "Effect of Flow Pulsations on the Cooling Effectiveness of an Impinging Jet", *Journal of Heat Transfer*, Vol. 116, 1994, pp. 886-895.
- [3] Hofmann H.M., Movileanu D.L., Kind M., Martin H., "Influence of a Pulsation on Heat Transfer and Flow Structure in Submerged Impinging Jets", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 50, 2007, pp. 3638-3648.
- [4] Liewkongsatoporn W., Ahrens F., Patterson T., "A Numerical Study of Axisymmetric Pulsating Jet Impingement Heat Transfer", *13th International heat transfer conference*, 2006, pp. 13-18.
- [5] Behera R.C., Dutta P., Srinivasan K., "Numerical Study of Interrupted Impinging Jets for Cooling of Electronics", *IEEE Transactions on Components and Packag Technologies*, Vol. 30, 2007, pp. 275-284.
- [6] Liewkongsatoporn W., Patterson T., Ahrens F., "Pulsating Jet Impingement Heat Transfer Enhancement", *Journal of Drying Technology*, Vol. 26, 2008, pp. 433-442.
- [7] Xu P., Mujumdar A.S., Poh H.J., Yu B.M., "Heat Transfer Under a Pulsed Slot Turbulent Impinging Jet at Large Temperature Differences", *Thermal Science*, Vol. 14, 2010, pp. 271-281.
- [8] Demircan T., Turkoglu H., "The Numerical Analysis of Oscillating Rectangular Impinging Jets", *Numerical Heat Transfer*, Vol. 58, 2010, pp. 146-161.
- [9] Xu P., Yu B.M., Qiu S.X., Poh H.J., Mujumdar A.S., "Turbulent Impinging Jet Heat Transfer Enhancement Due to Intermittent Pulsation", *International Journal of Thermal Science*, Vol. 49, 2010, pp. 1247-1252.

مطابق شکل ۱۰، در جت نوسانی، کاهش فاصله جت تا سطح مقعر منجر به تغییر عدد ناسلت در سراسر سطح مقعر می شود. نتایج نشان می دهد که بیشترین تأثیر ناشی از تغییر فاصله جت، در میانه سطح مقعر ($10.0 < H/B < 14.0$) و کمترین تأثیر آن در ناحیه برخورد خواهد بود. تغییرات ناشی از کاهش فاصله جت تا صفحه در برخی فواصل باعث افزایش و در بعضی نواحی منجر به کاهش عدد ناسلت شده است.

۶- نتیجه گیری

شبیه سازی عددی جریان و انتقال حرارت آشفته جت برخوردی نوسانی به یک سطح مقعر در این تحقیق مورد توجه قرار گرفته است. در یک جت برخوردی نوسانی با موج مربعی به سطح مقعر استفاده شده است. نتایج به دست آمده نشان می دهد که با افزایش فرکانس نوسانات جت برخوردی، میزان انتقال حرارت و در نتیجه مقدار عدد ناسلت در سطح مقعر افزایش می یابد. همچنین افزایش عدد رینولدز نیز به طور محسوسی منجر به افزایش متوسط زمانی عدد ناسلت در هر دو حالت جت پایا و نوسانی می شود.

تغییر فرکانس نوسانات جت نشان می دهد که مقادیر متوسط کلی ناسلت در هر سه فرکانس ۱۰، ۲۵ و ۵۰ هرتز بیشتر از ناسلت متوسط جت پایا می باشد.

همچنین در جت پایا، کاهش فاصله جت تا صفحه منجر به افزایش محسوس عدد ناسلت در ناحیه برخورد می شود. اما در جت نوسانی، کاهش فاصله جت تا سطح مقعر منجر به تغییرات (کاهش و در برخی مناطق افزایش) عدد ناسلت در سراسر سطح برخورد مقعر می شود.

۷- فهرست علائم

B	عرض شیار (m)
f	فرکانس نوسانات (Hz)
H	فاصله نازل تا صفحه (m)
k	انرژی جنبشی آشفته ($m^2 s^{-2}$)
K	ضریب هدایت حرارتی ($W m^{-1} K^{-1}$)
q''	شار حرارتی ($W m^{-2}$)
Re	عدد رینولدز ($= \rho u_{jet} \times 2B / \mu$)
t	زمان (S)

- [13] Sharif M.A.R., Mothe K.K., "Evaluation of Turbulence Models in the Prediction of Heat Transfer Due to Slot Jet Impingement on Plane and Concave Surfaces", *Numerical Heat Transfer*, Vol.55, 2009, pp. 273-294.
- [14] Daly B.J., Harlow F.H., "Transport Equation in Turbulence", *Physics Fluids*, Vol.13, 1970, pp. 2634-2649.
- [15] Kadem N., Mataoui A., Salem A., Younsi R., "Numerical Simulation of Heat Transfer in an Axisymmetric Turbulent Jet Impinging on a Flat Plate", *AMO-Advanced Modeling and Optimization*, Vol. 9, 2007, pp. 207-217.
- [10] Bazdidi-Tehrani, F., Karami, M., and Jahromi, M., "Unsteady Flow and Heat Transfer Analysis of an Impinging Synthetic Jet", *Heat and Mass Transfer*, Vol. 47, Issue 11, 2011, pp. 1363-1373.
- [11] Choi M., Yoo H.S., Yang G., Lee J.S., Sohn D.K., "Measurement of Impinging Jet Flow and Heat Transfer on a Semi-Circular Concave Surface", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 43, 2000, pp. 1811-1822.
- [12] Sharif M.A.R., Mothe K.K., "Parametric Study of Turbulent Slot-Jet Impingement Heat Transfer from Concave Cylindrical Surfaces", *International Journal Therm. Sci.* Vol. 49, 2010, pp. 428-442.