

## مطالعه جریان و انتقال حرارت جت نوسانی سینوسی بر خوردی در فاصله های نزدیک به سطح مقعر

سعید رخشا، مهران رجیبی زرگرآبادی\*، سیف الله سعدالدین

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران.

### تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۹/۰۸/۰۸  
بازنگری: ۱۳۹۹/۱۱/۱۲  
پذیرش: ۱۳۹۹/۱۲/۰۷  
ارائه آنلاین: ۱۴۰۰/۰۲/۲۶

### کلمات کلیدی:

جت برخوردی  
جت نوسانی سینوسی  
صفحه مقعر  
انتقال حرارت  
عددناسلت.

**خلاصه:** هدف اصلی این پژوهش بررسی اثر نوسانی کردن جت ورودی بر میزان انتقال حرارت جت برخوردی در فاصله های کم از سطح مقعر می باشد. به این منظور شبیه سازی سه بعدی جریان و انتقال حرارت جت نوسانی سینوسی در فواصل جت تا سطح برخورد ۴ تا ۵ برابر قطر جت و برای اعداد رینولدز ۷۰۰۰ و ۱۴۰۰۰ به انجام رسید. نتایج حاصل از شبیه سازی عددی تطابق مناسبی، با نتایج آزمایشگاهی جت پایا دارد. نتایج نشان می دهد اثر نوسانی کردن جریان با تابع سینوسی در فاصله های کم بین جت و صفحه مقعر کاهش می یابد. به طوری که در فاصله ۴ برابری قطر جت از سطح برخورد، نوسانی کردن جت سینوسی منجر به افزایش ۱۰ درصدی ناسلت متوسط سطح گردید در حالی که این مقدار برای فاصله ۵/۰ برابری قطر جت، برابر ۵ درصد می باشد. بررسی اثر نوسان بر عدد ناسلت نشان داد که با نوسانی کردن جریان با جت نوسانی سینوسی، ابتدا ناسلت کاهش می یابد، و سپس با افزایش فرکانس نوسان جت ورودی، عدد ناسلت افزایش می یابد. با مشاهده نتایج، می توان دریافت که با افزایش فاصله بین سطح و جت ورودی، عدد ناسلت به صورت محسوسی کاهش می یابد. این میزان کاهش، در جریان نوسانی در مقایسه با جت پایا کمتر است.

### ۱- مقدمه

روی انتقال حرارت، دریافتند که انتقال حرارت جت نوسانی در سطوح ناصاف افزایش می یابد. ژو<sup>۳</sup> و همکاران [۹] به شبیه سازی انتقال حرارت یک جت برخوردی با تابع پله ای پرداخته اند. در این تحقیق اثر اختلاف دما بین جت ورودی و صفحه برخوردی، عدد رینولدز میانگین، فاصله نازل تا صفحه و فرکانس نوسان بر روی عدد ناسلت بررسی شده است. کورینا<sup>۴</sup> و همکاران [۱۰] کارایی یک خشک کن را با استفاده از یک جت نوسانی مربعی مورد مطالعه قرار داده اند. نتایج تحقیقات آن ها نشان داد که نوسانی کردن جت برخوردی، بازده خشک کن را کاهش می دهد. میدلبرگ<sup>۵</sup> و هرویج<sup>۶</sup> [۱۱] اثر توابع نوسانی مختلف بر روی روند انتقال حرارت جت برخوردی را با استفاده از آزمایش مورد بررسی قرار داده اند. نتایج پژوهش آنان نشان داد که برای فرکانس های پایین نوسان، انتقال حرارت در ناحیه سکون به ازای همه توابع نوسانی، کاهش می یابد. زولکیفلی<sup>۷</sup> و همکاران [۱۲] مطالعه ای آزمایشگاهی

جت برخوردی یکی از مؤثرترین و متداول ترین روش افزایش انتقال حرارت در صنایع پر کاربرد مانند توربین گاز، قطعات الکترونیکی، خشک کن ها و... می باشد. تحقیقات زیادی بر روی جریان و انتقال حرارت جت برخوردی انجام شده است [۱-۳]. از جمله روش های بهبود انتقال حرارت جت برخوردی می توان به تغییر هندسه نازل، نوسانی کردن جت ورودی، استفاده از سطوح ناصاف اشاره کرد. هر کدام از این روش ها توسط محققان پیشین مورد مطالعه قرار گرفته است. نوسانی کردن جت برخوردی توسط محققان پیشین مورد مطالعه قرار گرفته است [۴-۶]. بهرا<sup>۱</sup> و همکاران [۷] مشاهده کرده اند که نوسانی کردن جت برخوردی با تابع سینوسی و با دامنه های بزرگ، در مقایسه با جت دائم، سبب افزایش انتقال حرارت می گردد. ژو<sup>۳</sup> و همکاران [۸] مطالعه آزمایشگاهی بر روی جت برخوردی نوسانی با تابع سینوسی و پله ای را در دستور کار خود قرار داده اند. آن ها با بررسی اثر زبری سطح بر

- 3 Xu
- 4 Kurina
- 5 Middelberg
- 6 Herwig
- 7 Zulkiffi

- 1 Bejera
- 2 Zhou

\* نویسنده عهده دار مکاتبات: rajabi@semnan.ac.ir

حقوق مؤلفین به نویسندگان و حقوق ناشر به انتشارات دانشگاه امیرکبیر داده شده است. این مقاله تحت لیسانس آفرینندگی مردمی (Creative Commons License) در دسترس شما قرار گرفته است. برای جزئیات این لیسانس، از آدرس <https://www.creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode> دیدن فرمائید.



جهت نوسانی برخوردی بر روی صفحه تخت یا جت پایا بر روی صفحه مقعر بوده است و موارد محدودی به بررسی جریان و انتقال حرارت جت نوسانی بر روی صفحه مقعر پرداخته شد. در این تحقیق هدف بررسی جریان و انتقال حرارت جت نوسانی سینوسی برخوردی به سطح مقعر در فاصله‌های کم بین جت و سطح برخورد می‌باشد. لذا جهت بررسی عمیق‌تر و دقیق‌تر ماهیت جریان و انتقال حرارت جت نوسانی در برخورد با صفحه مقعر، شبیه‌سازی عددی سه بعدی با رهیافت حجم محدود به انجام می‌رسد. از آنجایی که دستگاه تولید جت نوسانی سینوسی در این آزمایش‌ها در دسترس نبوده است، نتایج عددی با نتایج آزمایشگاهی مربوطه به جت پایا که در همین تحقیق انجام شده، مقایسه می‌گردد. اثر فرکانس جت ورودی نوسانی و عدد رینولدز در فواصل مختلف جت از صفحه برخورد، بر میزان انتقال حرارت از سطح مقعر مورد بررسی قرار می‌گیرد.

## ۲- حل عددی

### ۲-۱- شبکه

شکل ۱ طرحواره‌ای از مسأله حاضر را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل ۱- الف ملاحظه می‌شود، یک جت دایروی به قطر  $d$  بر روی صفحه مقعر قرار دارد و فاصله خروجی جت تا صفحه مقعر  $H$  می‌باشد (شکل ۱-ب). دامنه محاسباتی برای حل عددی مطابق شکل ۱-ب ایجاد شده است. شکل ۱-ج شبکه ایجاد شده برای حل عددی جریان سه بعدی جت نوسانی برخوردی به سطح مقعر را نشان می‌دهد. به منظور استفاده از توابع دیواره برای حل جریان در نزدیکی دیواره، شبکه باید در نواحی نزدیک به دیواره به میزان کافی ریز شود که مقدار  $y^+ < 1$  حاصل شود. شکل ۲ توزیع عدد ناسلت را برای چهار شبکه محاسباتی نشان می‌دهد. مطابق شکل، توزیع عدد ناسلت با تغییرات شبکه از  $1,200,000$  به  $1,400,000$  تفاوت چشم‌گیری نمی‌کند، بنابراین تعداد سلول‌های محاسباتی شبکه نهایی برای شبیه‌سازی عددی برابر  $1,200,000$  می‌باشد.

### ۲-۲- معادلات حاکم

معادلات حاکم بر حل این مسأله معادلات پایستاری جرم، مومنتوم و انرژی می‌باشند. روابط (۱) تا (۴) معادلات کلی حاکم را نشان می‌دهد. به منظور مدل کردن ترم‌های آشفته‌گی از مدل‌های دومعادله‌ای آشفته‌گی جریان استفاده می‌شود.

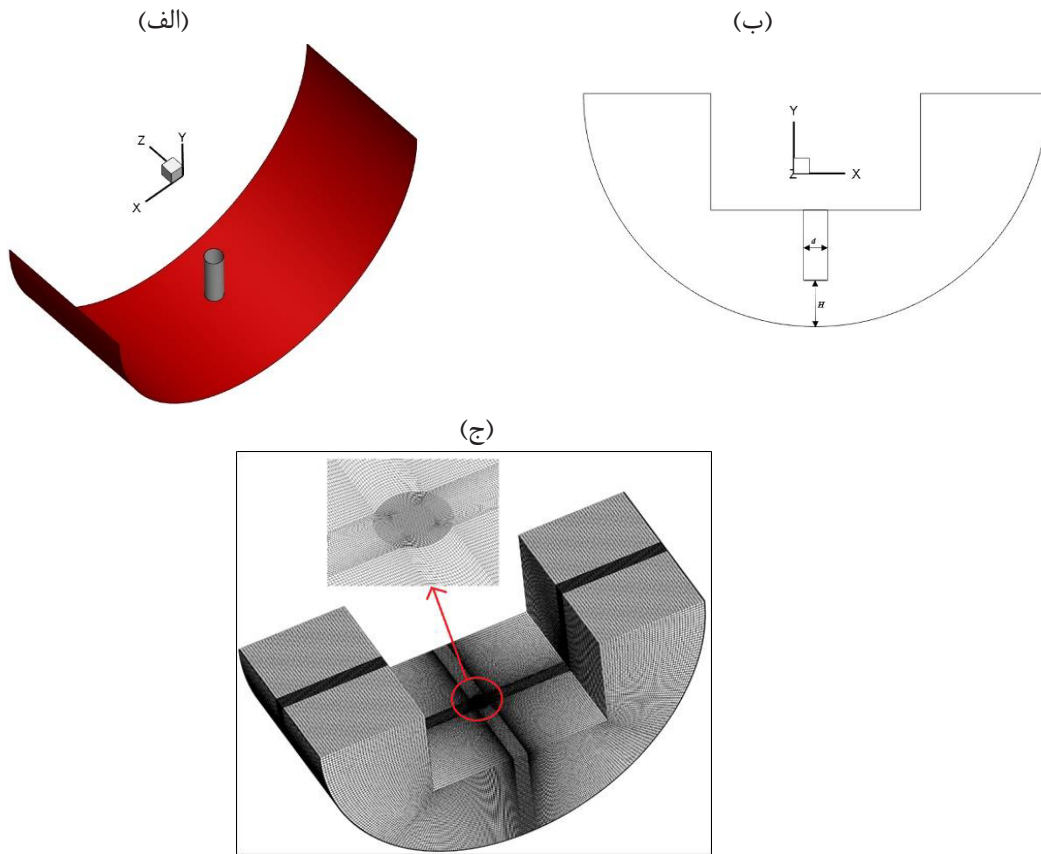
جهت بررسی میدان جریان و حرارت جت برخوردی نوسانی ترتیب داده‌اند. نتایج حاصل از تحقیق نشان داد که عدد ناسلت محلی در محدوده جت دیواره، برای جت نوسانی، بیشتر از حالت جت پایا می‌باشد. محمدپور و همکاران [۱۳] تلاش کرده‌اند به ترکیب بهینه‌ایی از جت‌های نوسانی و پایا بر روی صفحه تخت دست یابند که در آن، انتقال حرارت بیشینه را حاصل نماید.

همان‌طور که تحقیقات پیشین نشان می‌دهد استفاده از سطوح ناصاف به افزایش و بهبود انتقال حرارت جت برخوردی از سطح منجر می‌شود. می‌توان گفت استفاده از سطح مقعر باعث یک جریان ثانویه‌ای می‌شود که همین پدیده موجب افزایش نرخ انتقال حرارت بر روی سطح می‌گردد [۱۴] و [۱۵]. هاشیه‌باف<sup>۱</sup> و همکاران [۱۶] نشان داده‌اند که در جریان جت برخوردی آشفته بر روی سطح مقعر یک جریان افقی ایجاد می‌شود و به این ترتیب شدت آشفته‌گی جریان جت برخوردی بر روی سطح مقعر افزایش می‌یابد. محمدپور و همکاران [۱۷] به شبیه‌سازی عددی انتقال حرارت جت نوسانی برخوردی به صفحه مقعر در حالت دو بعدی پرداخته‌اند. رجبی و همکاران [۱۸] جریان انتقال حرارت جت نوسانی برخوردی را بر روی سطح مقعر نامتقارن شبیه‌سازی عددی کردند. کیو<sup>۲</sup> و همکاران [۱۹] به بررسی آرایش جت‌ها بر روی صفحه مقعر پرداخته‌اند آن‌ها دریافتند که با تغییر آرایش جت برخوردی به صفحه مقعر می‌توان انتقال حرارت را به صورت محسوسی افزایش داد. طریقی و رجبی [۲۰] مکان استقرار جت‌های برخوردی به سطح مقعر را با استفاده از شبیه‌سازی عددی مورد بررسی قرار داده‌اند و دریافتند که با کاهش فاصله جت تا خروجی صفحه، بیشترین مقدار عدد ناسلت به سمت مرکز صفحه منتقل می‌شود. هادی‌پور و رجبی [۲۱] با استفاده از آزمایش تجربی، انتقال حرارت جت دایروی به سطح نامتقارن مقعر را مورد بررسی قرار داده‌اند. نتایج تحقیق آن‌ها نشان می‌دهد که با افزایش شعاع انحنای سطح مقعر، متوسط عدد ناسلت کاهش می‌یابد. حاجی محمدی و رجبی [۲۲] جریان جت برخوردی سینوسی به صفحه مقعر را با شبیه‌سازی عددی مورد مطالعه قرار داده‌اند و اثر فرکانس، دامنه نوسان و عدد رینولدز را بر متوسط زمانی عدد ناسلت مورد بررسی قرار داده‌اند.

همان‌طور که در ابتدای این بخش اشاره شد، یکی از کاربردهای جت برخوردی بر روی صفحه مقعر به خنک کاری پره توربین گاز مربوط می‌شود. زیرا سطوح بکار رفته در توربین گاز اغلب به صورت مقعر است. با بررسی تحقیقات پیشین می‌توان گفت عمده مطالعات انجام شده مربوطه به بررسی

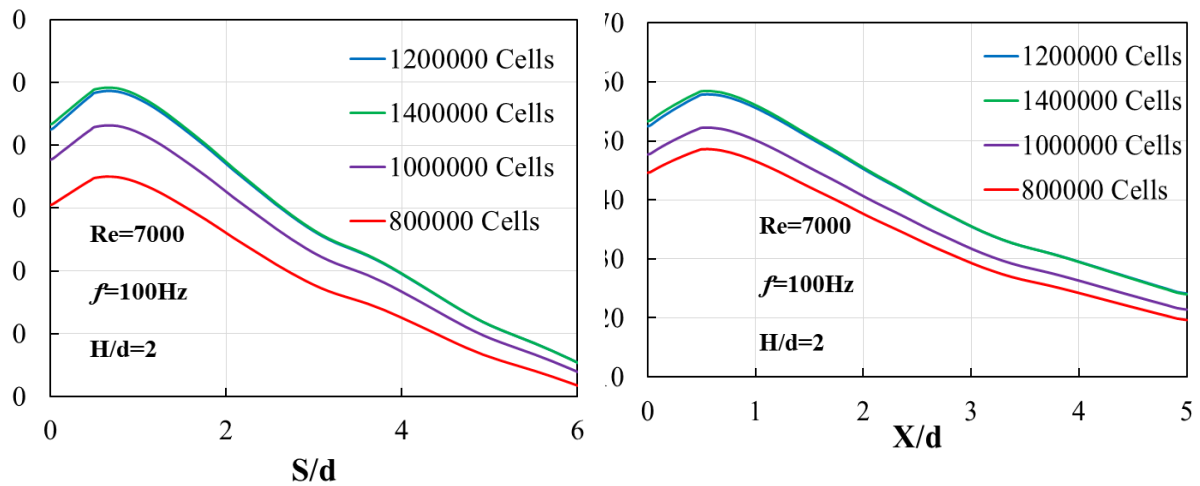
1 Hashiehbaf

2 Qiu



شکل ۱. الف) طرحواره سه بعدی مسئله ب) نمای دوبعدی مسئله در صفحه x-y ج) شبکه محاسباتی حل عددی جت برخوردی به سطح مقعر

Fig. 1. a) 3d view of problem b) 2d view of problem in x-y plane c) Grid of numerical solution of impinging jet on the concave surface



شکل ۲. بررسی اثر شبکه بر توزیع عدد ناسلت

Fig. 2. Investigation of grid independency

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho U_j k) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + P_k - \rho \varepsilon \quad (5) \quad \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\bar{u}_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

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

$$\frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \frac{\varepsilon}{k} (C_{\varepsilon 1} P_k - C_{\varepsilon 2}^* \rho \varepsilon) \quad (6) \quad \frac{\partial(\rho c_p \bar{T})}{\partial t} + \frac{\partial(\rho c_p \bar{u}_i \bar{T})}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( k \frac{\partial \bar{T}}{\partial x_i} - \rho c_p \bar{u}_i \bar{T}' \right) \quad (3)$$

$$C_{\varepsilon 2}^* = C_{\varepsilon 2} + \frac{C_\mu \eta^3 (1 - \frac{\eta}{\eta_0})}{1 + \beta \eta^3}, \eta = S \frac{k}{\varepsilon}, S = \sqrt{2 S_{ij} S_{ij}} \quad (7) \quad -\rho \bar{u}_i \bar{u}_j = \mu_t \left( \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \delta_{ij} \rho k \quad (4)$$

مقادیر ثابت معادلات بالا به صورت زیر می‌باشد:

### ۲-۳- شرایط مرزی

جدول ۲ و شکل ۳ شرایط مرزی اعمال شده بر دامنه محاسباتی حل را نشان می‌دهد. شرایط مرزی ورودی سرعت برای جت ورودی، شرط مرزی دیواره با شار ثابت برای سطوح برخورد و شرط مرزی خروجی فشار برای سطوح دیگر در نظر گرفته شده است. برای تحلیل شرایط در حالت ناپایا (نوسانی) شرایط اولیه مورد نیاز است. شرایط اولیه در لحظه اولیه ( $t=0$ ) مطابق زیر در نظر گرفته می‌شود.

برای بدست آوردن  $\mu_t$ ، از مدل‌های توربلانسی استفاده می‌شود. به همین منظور سه مدل آشفتگی  $k-\varepsilon$  RNG،  $k-\omega$  SST و مدل سه معادله‌ای  $k-k\ell-\omega$  مورد ارزیابی قرار می‌گیرند. و با توجه به قابلیت پیش‌بینی نتایج و مطابقت آن با نتایج آزمایشگاهی یک مدل برای ادامه حل عددی در شرایط مختلف، انتخاب می‌گردد. تحقیقات پیشین، توانایی بهتر مدل  $k-\varepsilon$  RNG را نسبت به مدل‌های دیگر آشفتگی، گزارش کردند [۲۳-۲۵]. لذا معادلات انتقال برای مدل  $k-\varepsilon$  RNG به شرح زیر ارائه می‌گردد [۲۶]:

جدول ۱. ثابت‌های معادله‌های (۵) تا (۷)

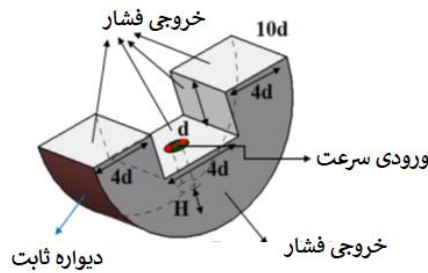
Table 1. The constants of Eqs. (5) to (7)

$\beta$	$\eta_0$	$\sigma_k$	$C_{\varepsilon 2}$	$C_{\varepsilon 1}$	$C_\mu$
۰/۰۱۲	۴/۳۸	۰/۷۱۹۴	۱/۶۸	۱/۴۲	۰/۰۸۴۵

### جدول ۲. شرایط مرزی مسأله برای حل عددی

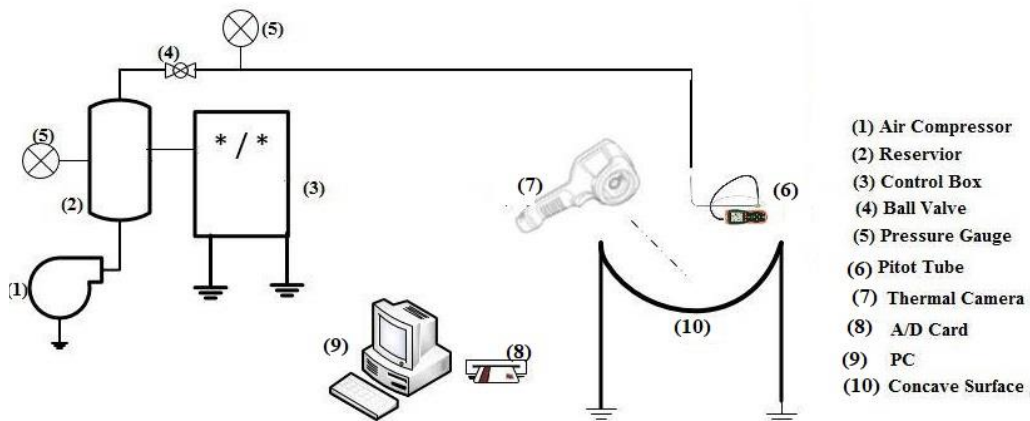
Table 2. the Boundary condition for numerical solution

نوع شرط مرزی	دما	جریان
ورودی	$T=300\text{K}$	سرعت: ۸-۱۶ m/s
خروجی	$T=300\text{K}$	شدت آشفتگی: ۳٪ - ۱۰٪
دیواره	شار حرارتی ثابت: $2000\text{ W/m}^2$	فشار: فشار اتمسفر
		سرعت: ۰ m/s (صفر)



شکل ۳. شرایط مرزی اعمال شده بر دامنه محاسباتی

Fig. 3. Boundary condition of computational domain



شکل ۴. دستگاه تست آزمایش جت برخوردی پایا به سطح بر خورد

Fig. 4. Test setup of steady impinging jet on the concave surface

### ۳- آزمایش تجربی

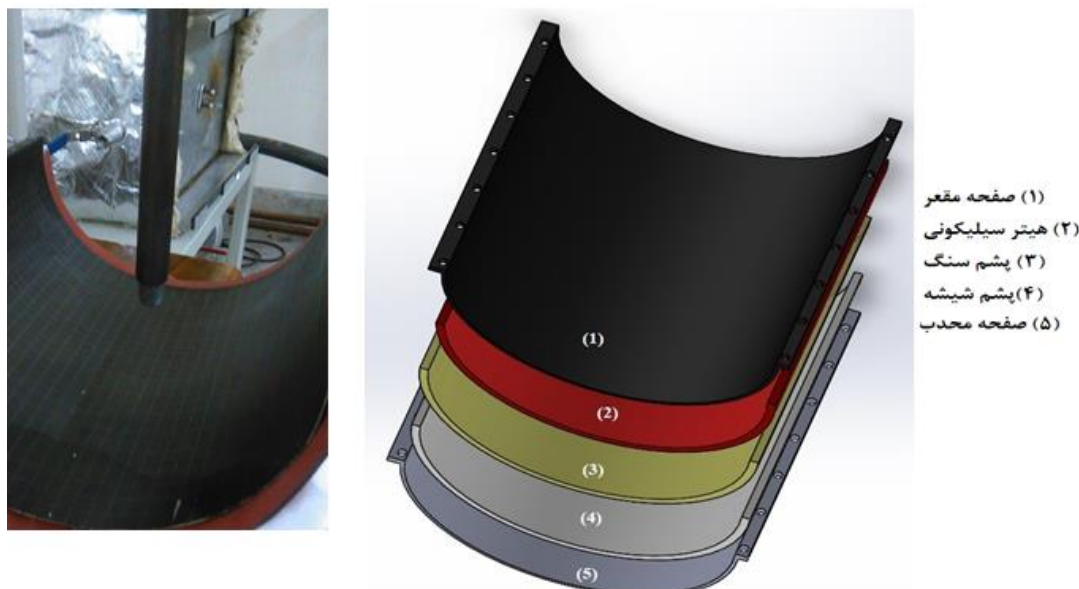
#### ۳-۱- تجهیزات آزمایشگاهی

به منظور اعتبار سنجی حل عددی به داده‌های تجربی مطابق بر شرایط مورد مطالعه، نیاز است. بنابراین یک دستگاه آزمایش جت برخوردی طراحی و ساخته شد. این دستگاه از قسمت‌های اصلی شامل جعبه کنترل که دمای محیط و دمای هوای جت ورودی را نشان می‌دهد، سنسورهای دما، سطح مقعر در معرض شار حرارتی ثابت، لوله پیتوت، دوربین حرارتی مادون قرمز سنسور فشار و شیر تنظیم دبی جریان ورودی تشکیل شده است. برای اعمال شار حرارتی ثابت به سطح مقعر از یک هیتر سیلیکونی استفاده شده است. به طوری که وقتی جریان درون این هیتر برقرار می‌شود، شار حرارتی ثابتی معادل ۲۰۰۰ وات بر مترمربع بر قسمت محدب سطح مقعر، وارد می‌شود. به منظور جلوگیری از اتلاف حرارتی این شار حرارتی از دو لایه

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

#### ۲-۴- الگوریتم حل

الگوریتم حل معادلات سرعت و فشار در این تحقیق، سیمپل سی می‌باشد. دقت و سرعت همگرایی در این الگوریتم از میزان قابل قبولی برخوردار است. گام زمانی در نظر گرفته شده  $(1/40f)$  ثانیه است که این مقدار حدوداً یک هشتم دوره تناوب جت ورودی سینوسی می‌باشد. دقت همگرایی برای معادلات پایداری جرم و مومنتوم  $10^{-4}$  برای معادله انرژی  $10^{-6}$  اعمال گردیده است.



شکل ۵. نمایی از صفحه مقعر و اجزای آن الف) طرحواره ب) نمایی از صفحه برخورد در آزمایش

Fig. 5. Schematic view of concave surface and components b) View of impinging surface of experiment

با داشتن مقادیر دما، شار حرارتی ثابت وارده بر سطح مقعر، قطر جت ورودی و ضریب هدایت حرارتی هوا می‌توان با استفاده از رابطه زیر مقادیر ناسلت را در سراسر صفحه مقعر بدست آورد.

$$Nu = \frac{q''}{\lambda (T_s - T_{jet})} D \quad (8)$$

عدم قطعیت آزمایش را می‌توان با شناسایی منابع قابل توجه خطاها محاسبه کرد. عدم قطعیت هر متغیر شامل عدم قطعیت سیستماتیک و تصادفی است، بنابراین عدم قطعیت کلی را می‌توان از معادله زیر محاسبه کرد:

$$\varepsilon_t = \pm \sqrt{\varepsilon_r^2 + \varepsilon_s^2} \quad (9)$$

جایی که  $\varepsilon_r$  و  $\varepsilon_s$  خطاهای تصادفی و سیستماتیک هستند. این آزمایش برای

پشم و شیشه و پشم و سنگ مطابق شکل ۴ استفاده می‌شود.

### ۳-۲- شرایط آزمایش

بعد از آماده سازی دستگاه آزمایش، ابتدا هیتر سیلیکونی صفحه مقعر را روشن کرده تا شار حرارتی مورد نظر تنظیم گردد. این کار حدود ۱۰ دقیقه زمان لازم دارد، در مرحله بعد کمپرسور هوا را روشن نموده تا مخزن هوا به اندازه کافی از هوا پر شود، دمای مخزن و دمای محیط از طریق جعبه کنترل نمایش داده می‌شود. به منظور تنظیم سرعت جت ورودی به صفحه مقعر از شیر تنظیم دبی استفاده می‌شود. با باز و بسته کردن این شیر، سرعت جریان در مرکز لوله خروجی جریان، اندازه گیری می‌شود. اندازه گیری سرعت به وسیله لوله پیتوت و یا هات وایر انجام می‌شود. مطابق عدد رینولدز مورد نظر، سرعت جریان هوا از ۸ الی ۱۶ متر بر ثانیه تغییر می‌کند. بعد از تنظیم شارحرارتی و جریان جت ورودی، زمانی بین ۲۰ الی ۳۰ دقیقه لازم است تا دمای سطح مقعر به تعادل برسد. وقتی دما به تعادل رسید، با استفاده از دوربین مادون قرمز، مقادیر دما ثبت می‌شود. این آزمایش ۳ بار تکرار می‌شود تا نسبت به تکرارپذیری آن اطمینان حاصل گردد.

جدول ۳. میزان خطای سیستماتیک تجهیزات اندازه گیری

Table 3. The systematic error of measurement equipment

میزان خطا	تجهیز
$\pm 0.5  T $	ترموکوپل
$\pm (2/2 + 3/5 \% \text{rdg})$	دوربین حرارتی
$\pm 0.3 \% \text{ F.S}$	لوله پیتوت
$\pm 1/5 \% \text{ F.S}$	منبع تغذیه الکتریکی

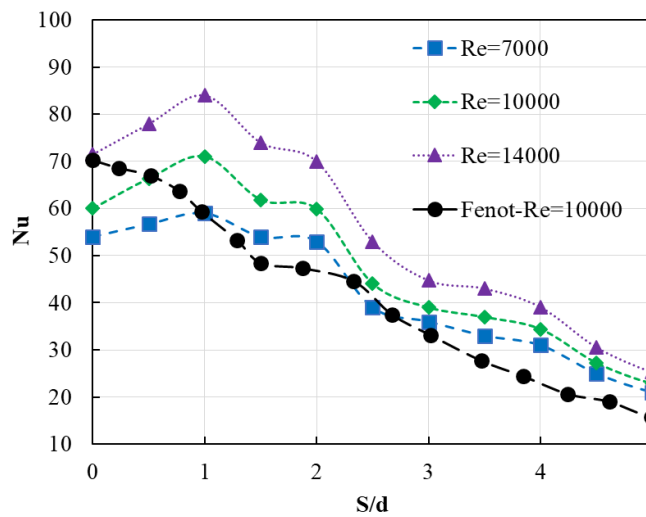


Fig. 6. The comparison of present experimental data with Fenot et al.'s [28] results

شکل ۶. مقایسه نتایج آزمایشگاهی تحقیق حاضر با نتایج تحقیق فنوت و همکاران [۲۸]

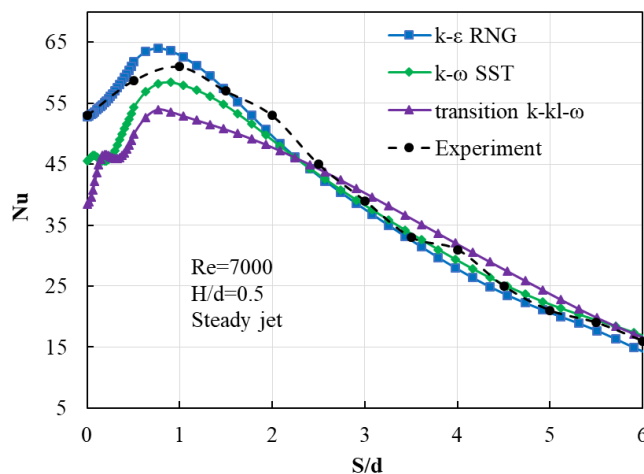
بدست آورد. خطای سیستماتیک عدد ناسلت ۸٪ است. عدم قطعیت محاسبه عدد ناسلت شامل عدم قطعیت تجهیزات اندازه گیری و نحوه اندازه گیری، در مجموع حدود ۱۱/۷٪ حاصل می شود [۲۷].

برای اطمینان از قابل قبول بودن نتایج آزمایش، این نتایج را با نتایج تجربی که در تحقیق فنوت و همکاران [۲۸] ثبت شده است، مقایسه می شود. همان طور که در شکل ۶ مشاهده می شود نتایج این تحقیق با اختلاف قابل قبولی نسبت به آزمایش فنوت<sup>۱</sup> و همکاران، توزیع عدد ناسلت را برای سه عدد رینولدز نشان می دهد. بیشترین اختلاف بین نتایج تحقیق حاضر و تحقیق

تأیید تکرارپذیری نتایج سه بار تکرار شد. خطای تصادفی عدد نوسلت از میانگین مربع ۴/۷٪ بدست می آید. خطاهای سیستماتیک پارامترهای اندازه گیری در جدول ۳ ارائه شده است.

عدم قطعیت اندازه گیری دما حدود ۵٪ است. همرفت طبیعی از سطح محدب، شار گرمای اعمال شده به سطح گرم را کاهش می دهد. اندازه گیری ها نشان می دهد که به دلیل همرفت طبیعی، کمتر از ۱۵ وات در متر مربع کاهش یافته است که در مقایسه با کل شار حرارتی که به دیوار تحمیل می شود (کمتر از ۱٪ از شار گرمای اعمال شده) قابل اغماض است. خطای سیستماتیک عدد ناسلت را می توان با استفاده از ریشه مجموع مربعات اجزا

1 Fenot



شکل ۷. مقایسه توزیع عدد ناسلت حاصل از شبیه‌سازی عددی سه مدل آشفتگی با نتایج تجربی

Fig. 7. The comparison of capability turbulence models for prediction of Nu distribution

جدول ۴. مقایسه نتایج عددی تحقیق حاضر با نتایج آزمایشگاهی تحقیقات پیشین

Table 4. The comparison of present numerical result with previous experimental data

$Nu$	$H/d$	$f(\text{Hz})$	$Re$	سطح	محقق
۶۰	۸/۵	۴۰	۱۴۰۰۰	تخت	هافمن [۲۹]
۶۷	۴	۱۰۰	۱۴۰۰۰	مقعر	تحقیق حاضر
۲۰	۶	۴۰	۲۸۰۰	تخت	علیمحمدی [۳۰]
۲۳	۶	۴۰	۳۰۰۰	مقعر	تحقیق حاضر

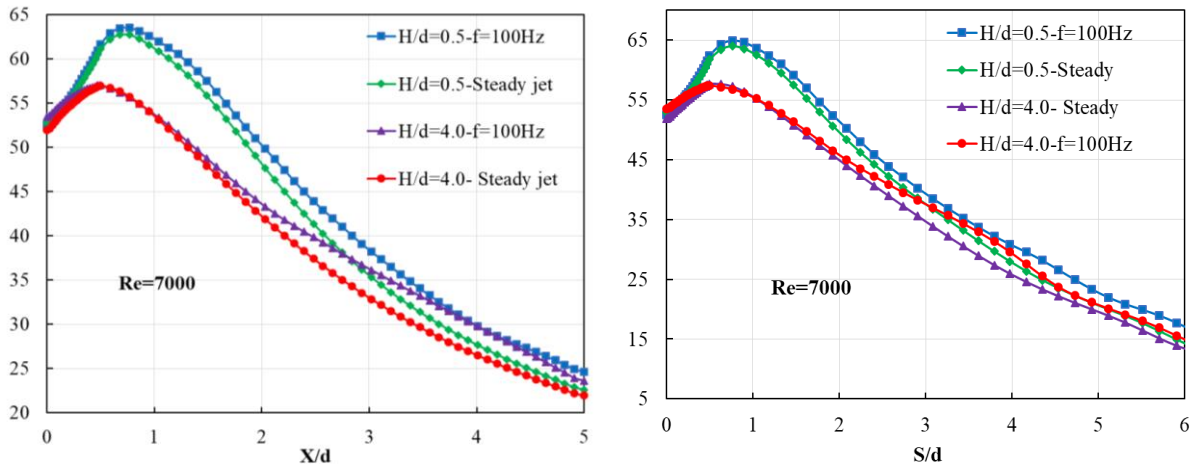
است (شکل ۶). مطابق این شکل، نتایج حاصل از شبیه‌سازی از سه مدل آشفتگی با نتایج تجربی مقایسه شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود مدل آشفتگی  $k-\varepsilon$  RNG نسبت به دو مدل دیگر آشفتگی، پیش‌بینی بهتری از توزیع عدد ناسلت ارائه کرده است. از آنجایی که نتایج آزمایشگاهی برای جریان جت نوسانی بر روی سطح مقعر وجود ندارد، برای اعتبارسنجی نتایج شبیه‌سازی عددی جریان جت نوسانی به سطح مقعر، عدد ناسلت نقطه سکون با نتایج آزمایشگاهی جت نوسانی بر روی صفحه تخت مقایسه شده است. همان‌طور که در جدول ۴ مشاهده می‌شود، نتایج عددی این تحقیق که با مدل  $k-\varepsilon$  RNG انجام شده است تطابق مناسبی با نتایج آزمایشگاهی

[۲۸] حدود ۱۵ درصد می‌باشد که با توجه به عدم قطعیت آزمایش‌های تجربی در زمینه جت برخوردی، مقداری قابل قبول است.

#### ۴- اعتبار سنجی حل عددی

از آنجایی که در این پژوهش، هدف مطالعه عددی جریان و انتقال حرارت جت برخوردی نوسانی می‌باشد، لازم است در ابتدا اعتبار حل عددی مورد بررسی قرار گیرد، تا بتوان در بررسی نتایج حاصله از حل عددی بتوان به آن نتایج اطمینان کرد. بدین منظور نتایج حل عددی برای حالت‌های جت پایا و برای دو ارتفاع جت  $H/d=0/5$  با نتایج آزمایشگاهی مقایسه گردیده





شکل ۸. اثر نوسانی کردن جریان در فاصله‌های کم و زیاد جت از سطح برخورد بر توزیع عدد ناسلت

Fig. 8. The effect of pulsating the flow on the Nu distribution for the high and low distances of the jet to surface

برای ورود به جت برخوردی دارند و آشفتگی جریان را بیشتر می‌کنند [۳۱].  
اثر فواصل مختلف جت از دیواره بر انتقال حرارت جت برخوردی نوسانی در شکل ۹ نمایش داده شده است. مطابق نتایج حاصله، با افزایش فاصله بدون بعد بین جت و سطح مقعر، عدد ناسلت در ناحیه سکون تغییرات چندانی زیادی نمی‌کند ولی در ناحیه جت دیواره، موجبات کاهش عدد ناسلت را فراهم می‌آورد. علت این کاهش را می‌توان در اثر ورودی هوای محیط به محدوده جت ورودی نسبت داد. هرچه فاصله جت از دیواره بیشتر باشد، میزان هوای ورودی از اطراف به جت، بیشتر خواهد بود. این رفتار در تحقیقات پیشین در زمینه جت نوسانی بر سطح مقعر نیز مشاهده شده است [۱۷ و ۱۸].

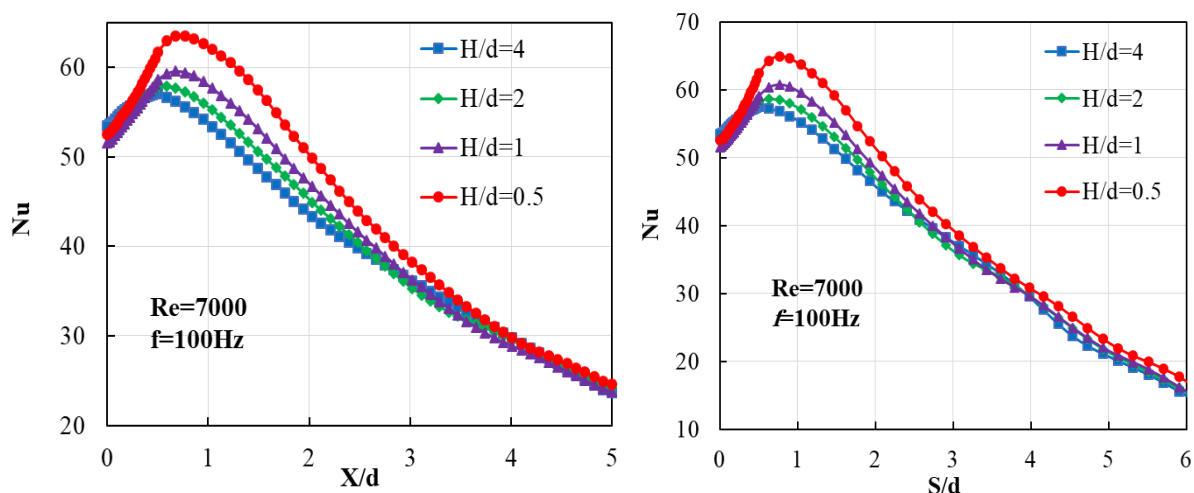
شکل ۱۰ توزیع سرعت جت نوسانی و پایا در راستای برخورد را نشان می‌دهد. مطابق تحقیقات پیشین [۳۲] انتهای ناحیه پتانسیل جت مکانی است که سرعت جت برابر  $0.95$  سرعت جت ورودی شود. بنابراین مطابق شکل می‌توان گفت با افزایش فاصله جت از صفحه برخورد، انتهای ناحیه پتانسیل از صفحه برخورد دور می‌شود. به عبارت دیگر طول ناحیه پتانسیل با افزایش فاصله جت از صفحه برخورد کاهش می‌یابد. مطابق شکل نوسانی کردن جریان توزیع سرعت در راستای برخورد را برای فواصل  $H/d=2$  و  $H/d=4$  به شدت تحت تأثیر قرار می‌دهد به نحوی که ناحیه پتانسیل جت به صورت کلی از بین می‌رود و باعث اختلاط جریان جت با هوای اطراف می‌گردد. به نحوی که دبی جریان هوای خنک‌کاری، کاهش می‌یابد. بنابراین عدد ناسلت

دارد.

## ۵- نتایج و بحث و بررسی

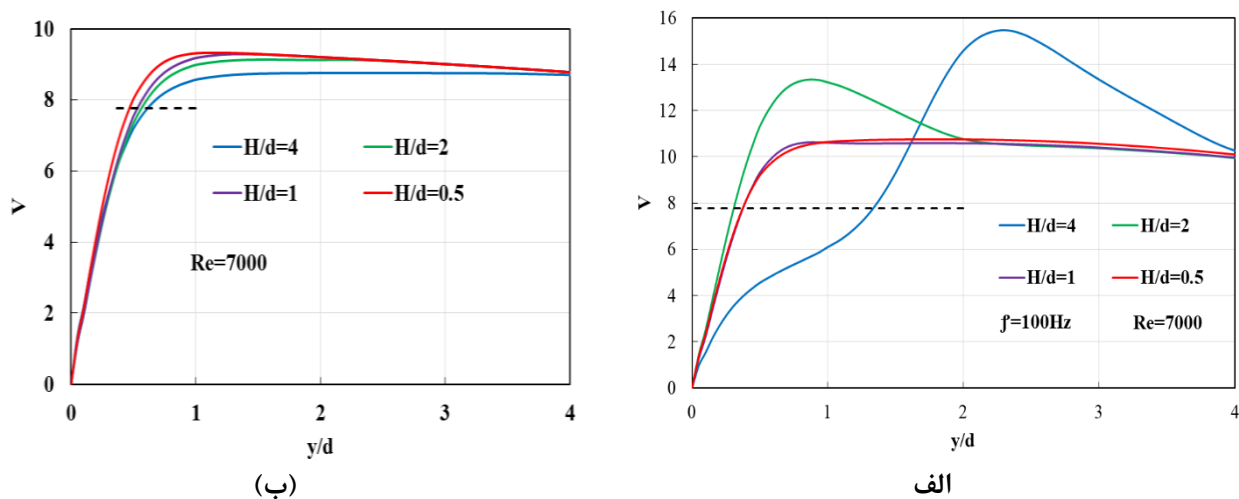
شکل ۸ توزیع عدد ناسلت برای دو حالت جت نوسانی سینوسی و جت پایا در فاصله‌های نزدیک و دور از صفحه برخورد را نشان می‌دهد. در این شکل اثر نوسانی کردن جریان جت برخوردی به صفحه مقعر را در فواصل کم و زیاد از سطح مقعر را ارائه می‌شود.

نمودارهای شکل ۸ نشان می‌دهد که با کاهش فاصله بین جت و سطح برخورد، عدد ناسلت به صورت محسوسی افزایش می‌یابد البته این افزایش در ناحیه برخورد کمترین مقدار و در ناحیه جت دیواره به بیشترین مقدار خود می‌رسد. در نواحی انتهایی صفحه برخورد، اثر نوسانی کردن جریان و فاصله جت از صفحه برخورد، به کمترین میزان می‌رسد. همچنین از این شکل می‌توان نتیجه گرفت که اثر نوسانی کردن جریان در راستای محوری بیشتر از راستای منحنی سطح مقعر می‌باشد. همان‌طور که در شکل ملاحظه می‌شود نوسانی کردن جت نوسانی با تابع سینوسی در ناحیه برخورد تأثیر زیادی بر عدد ناسلت نمی‌گذارد ولی با فاصله گرفتن از ناحیه برخورد و ورود به ناحیه جت دیواره، اثر نوسانی کردن جریان جت بر توزیع عدد ناسلت و نرخ انتقال حرارت افزایش می‌یابد. مطابق شکل ملاحظه می‌شود که با افزایش فاصله جت از سطح برخورد، اثر نوسانی کردن جریان بیشتر می‌شود. زیرا هر چه فاصله بین جت و سطح برخورد بیشتر باشد، هوای اطراف فرصت بیشتری



شکل ۹. اثر فاصله بدون بعد جت نوسانی از سطح برخورد بر توزیع عدد ناسلت بر روی سطح مقعر

Fig. 9. The effect of jet to surface distance of pulsed impinging jet on the Nu distribution along the concave surface



شکل ۱۰. توزیع سرعت در راستای محور جت برخوردی در فاصله‌های مختلف نازل از سطح برخورد (الف) جت نوسانی در لحظه  $t/\tau = 0.5$  (ب) جت پایا

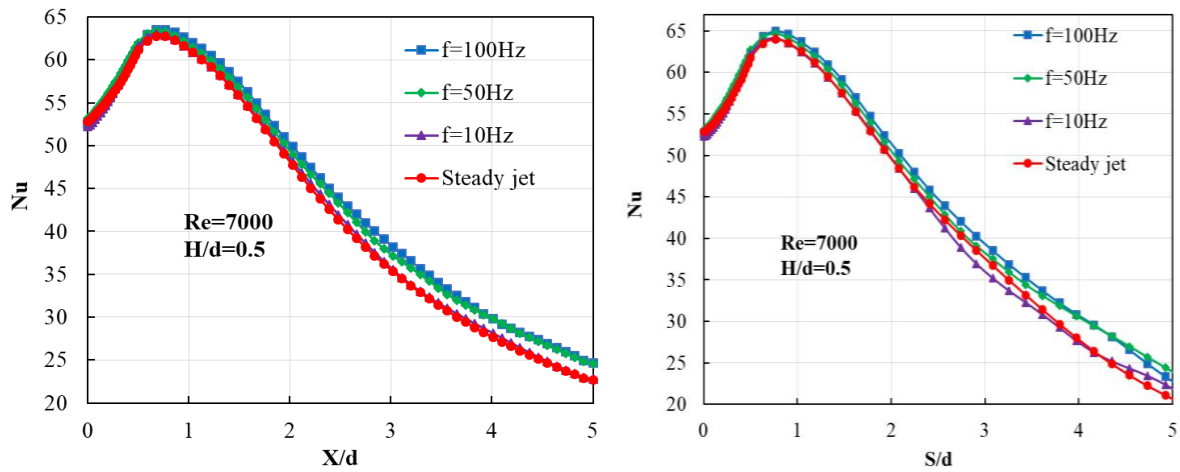
Fig. 10. The velocity distribution along the jet centerline at various nozzle to surface distances a) pulsed jet at  $t/\tau=0.5$  b) steady jet

نوسانی کردن جریان منجر به کاهش ضخامت لایه مرزی در ناحیه جت دیواره می‌شود که همین پدیده، سبب افزایش ضریب انتقال حرارت جابجایی و در نتیجه عدد ناسلت در آن ناحیه می‌گردد [۹].

نوسانی کردن جریان جت ورودی موجب تغییر در ساختار و مشخصات جریان می‌شود، به طوری که در اثر این نوسان سرعت و امکان اختلاط جریان جت با هوای ساکن اطراف، گردابه‌هایی تشکیل می‌شود که ساختار جریان جت برخوردی رو متأثر می‌کنند. شکل ۱۲ توزیع انرژی جنبشی آشفستگی

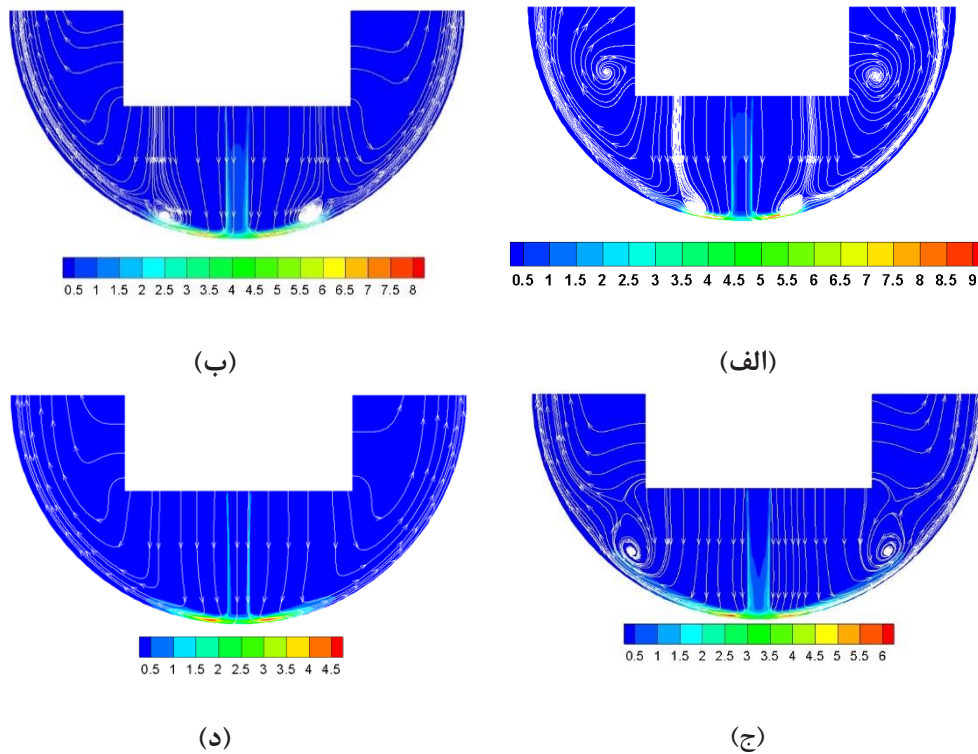
در ناحیه دیواره، کاهش می‌یابد.

شکل ۱۱ اثر فرکانس نوسان جت ورودی به سطح برخورد را بر توزیع ناسلت بر روی سطح مقعر نشان می‌دهد. مطابق این شکل ملاحظه می‌شود که نوسانی کردن جت ورودی با فرکانس‌های پایین موجب کاهش عدد ناسلت در ناحیه سکون و ناحیه برخورد می‌شود. با افزایش فرکانس نوسان به ۵۰ هرتز، توزیع ناسلت نسبت به حالت جت پایا افزایش پیدا می‌کند و با افزایش فرکانس به ۱۰۰ هرتز این روند ادامه پیدا می‌کند. می‌توان گفت



شکل ۱۱. اثر فرکانس نوسان جت ورودی بر توزیع عدد ناسلت

Fig. 11. Effect of pulse frequency of inlet jet on the Nu distribution



شکل ۱۲. توزیع انرژی جنبشی آشفتگی برای جریان جت نوسانی در فرکانس‌ها الف) ۱۰۰ Hz ب) ۵۰ Hz ج) ۱۰ Hz د) جت پایا

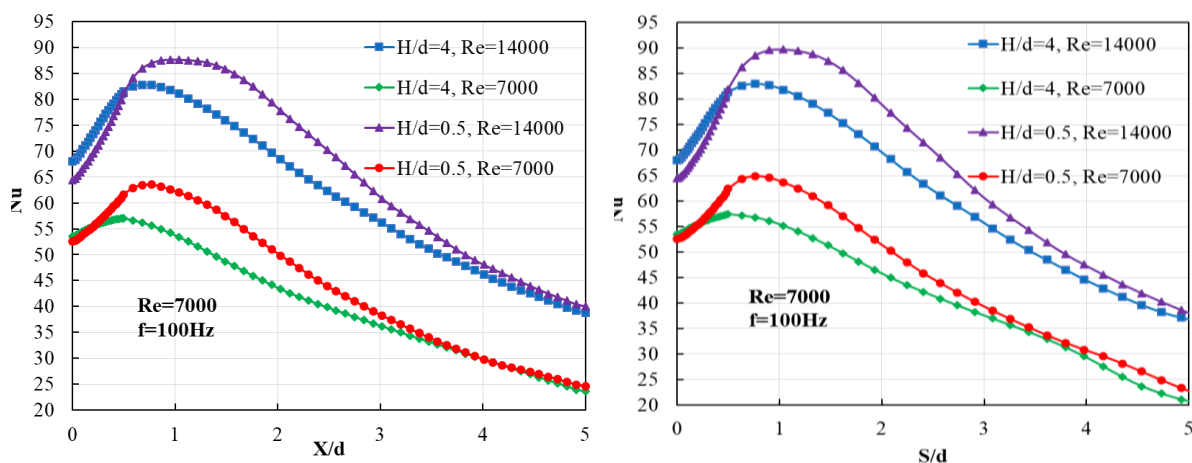
Fig. 12. the contour of turbulent kinetic energy for pulsed jet flow at frequencies a)100Hz b) 50Hz c)10Hz d)steady jet

پارامتر مهم دیگری که نقشی اساسی در میزان انتقال حرارت جت برخوردی، دارد، عدد رینولدز است. شکل (۱۳) اثر عدد رینولدز را بر توزیع عدد ناسلت برای فواصل نزدیک و دور جت نوسانی از صفحه برخورد را نشان می‌دهد. مطابق این شکل، با افزایش عدد رینولدز، عدد ناسلت به صورت محسوسی افزایش می‌یابد. این رفتار تقریباً در اکثر تحقیقات پیشین، مشاهده شده است [۱۴ و ۳۳] با توجه به شکل مشاهده می‌شود که با افزایش عدد رینولدز، توزیع عدد ناسلت در ناحیه سکون، با افزایش فاصله جت از سطح برخورد، افزایش می‌یابد. رفتاری که در رینولدز ۷۰۰۰ کمتر مشاهده شده است (شکل ۸). به نظر علت این پدیده، غلبه اثر آشفتگی بر اختلاط با هوای ساکن اطراف جت می‌باشد. همان‌طور که در شکل ملاحظه می‌شود، اثر افزایش عدد رینولدز بسیار بیشتر از اثر فاصله جت از سطح برخورد می‌باشد. به طوری که به رغم ۸ برابر شدن فاصله جت از صفحه برخورد، ولی با دو برابر شدن عدد رینولدز، انتقال حرارت یا توزیع ناسلت افزایش می‌یابد. می‌توان از این شکل نتیجه گرفت که عدد ناسلت با عدد رینولدز نسبت مستقیم و با فاصله بدون بعد جت از صفحه برخورد رابطه معکوس دارد. این مشاهدات با رابطه تجربی بدست آمده توسط هادی‌پور و رجبی مطابقت دارد [۳۴].

برای درک بیشتر از چگونگی اثر عدد رینولدز بر توزیع عدد ناسلت، توزیع سرعت در راستای عمود بر سطح برخورد در دو فاصله از محور برخورد، نمایش داده شده است، شکل ۱۴. این شکل توزیع سرعت برای دو مقطع

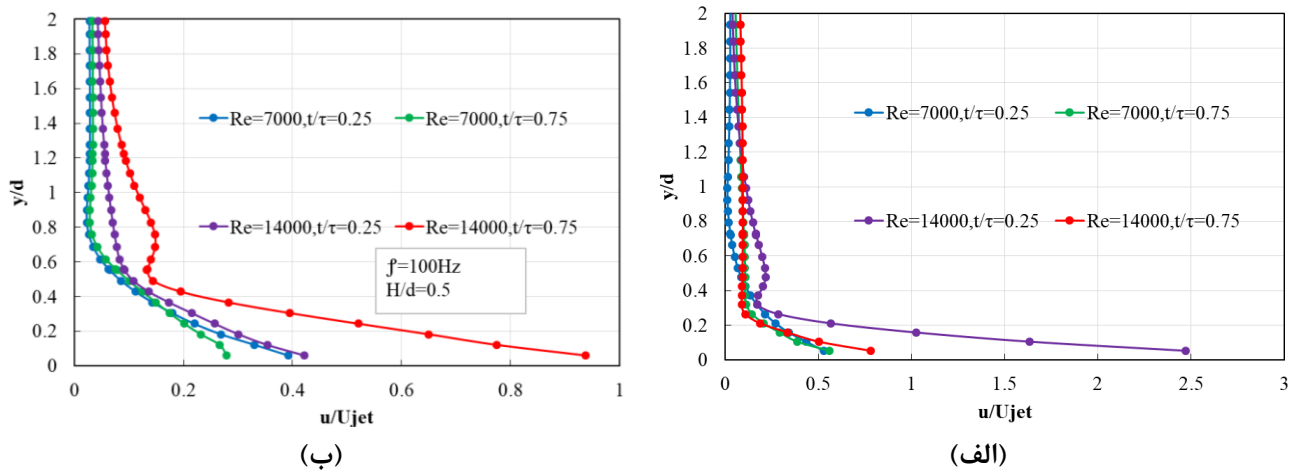
همراه با خطوط جریان را برای جریان جت نوسانی با فرکانس‌های مختلف و جت پایا را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل ملاحظه می‌شود در جریان جت نوسانی، گردابه‌هایی تشکیل می‌شود که میزان آشفتگی جریان را افزایش می‌دهند. این گردابه‌ها در جریان جت پایا ملاحظه نمی‌شود. بنابراین شدت آشفتگی در جریان جت نوسانی بیشتر از جت پایا می‌باشد. به طوری که بیشترین عدد برای انرژی جنبشی آشفتگی برای حالت پایا برابر  $4/5 \text{ m}^2/\text{s}^2$  می‌باشد در صورتی که این مقدار برای جریان جت نوسانی با فرکانس‌های ۱۰، ۵۰ و ۱۰۰ هرتز به ترتیب برابر  $6 \text{ m}^2/\text{s}^2$ ، ۸ و ۹ می‌باشد. لذا می‌توان گفت با افزایش فرکانس تحریک جت نوسانی، میزان آشفتگی جریان افزایش می‌یابد. مشاهدات مشابه در مطالعات پیشین، تأیید می‌کند که نوسانی کردن جت ورودی و استفاده از صفحه مقعر منجر به افزایش شدت آشفتگی جریان می‌گردد [۱۴-۱۶].

می‌توان گفت به صورت کلی دو پارامتر در اثر نوسانی کردن جریان جت، بر روی انتقال حرارت مؤثر می‌باشند. اول میزان اختلاط با هوای ساکن اطراف جت و دوم میزان آشفتگی جریان. این دو پارامتر با تغییر فرکانس، تغییر می‌یابند. برای فرکانس ۱۰ هرتز می‌توان گفت اگرچه میزان آشفتگی جریان در این حالت افزایش می‌یابد ولی به دلیل اختلاط بیشتر با هوای ساکن محیط، میزان دبی ورودی هوای خنک کاری به سطح برخورد کاهش یافته است. لذا توزیع عدد ناسلت در این حالت نسبت به جریان جت پایا کمتر است.



شکل ۱۳. اثر عدد رینولدز بر توزیع عدد ناسلت

Fig. 13. The effect of Re number on the Nu distribution of pulsed jet impinging on the concave surface



شکل ۱۴. توزیع سرعت در راستای عمود بر سطح مقعر در فواصل مختلف از محور جت (الف)  $s/d = 2$  (ب)  $s/d = 4$ ، فرکانس  $100$  هرتز و  $H/d = 0.5$

Fig. 14. The velocity profile along the perpendicular to the concave surface at various distance from the jet centerline a)  $s/d=2$  b)  $s/d=4$

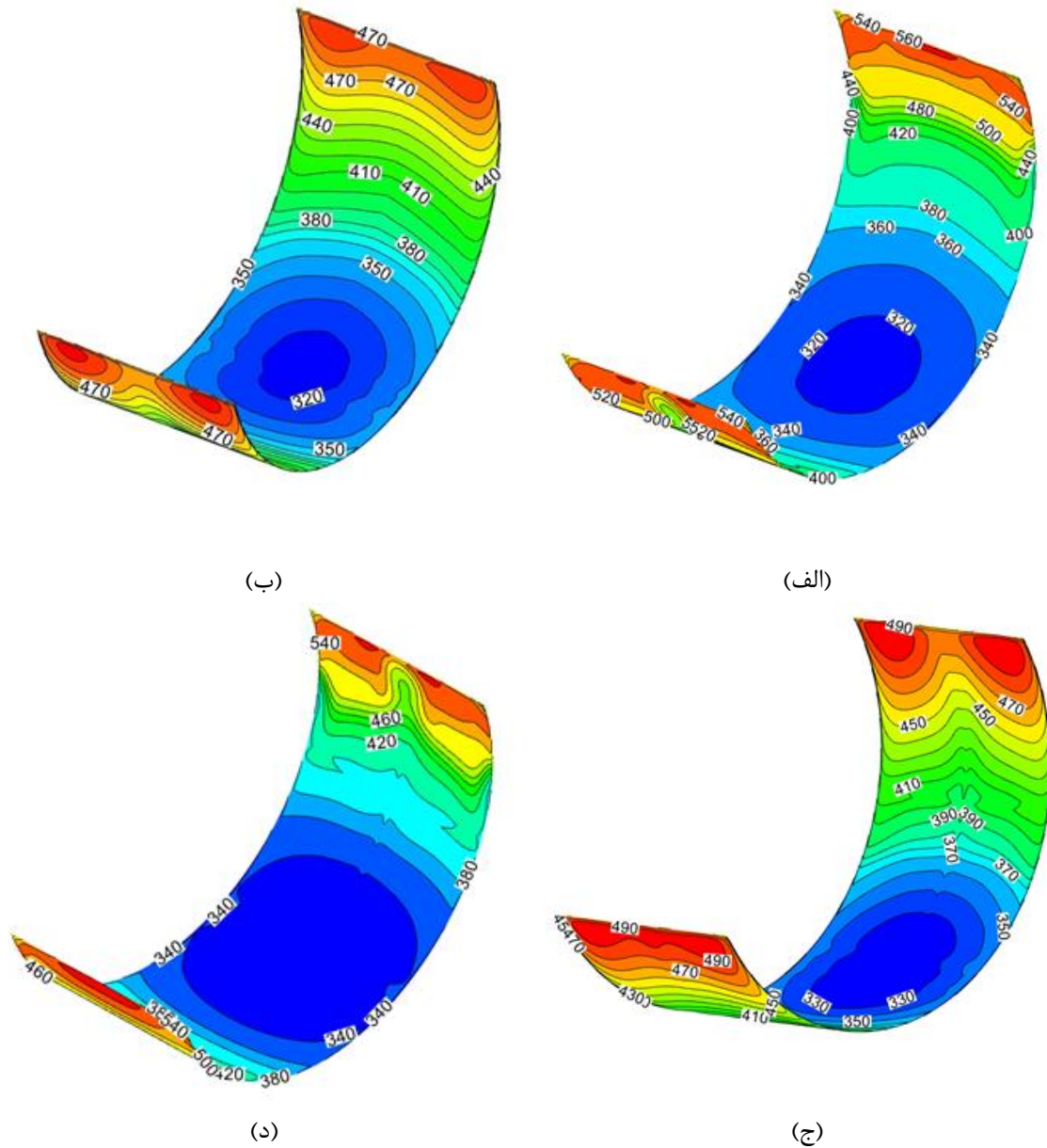
تا دیواره، می‌تواند به خنک‌کاری سطح برخورد بیانجامد. همچنین می‌توان دریافت که در فاصله بدون بعد  $0.5$ ، مساحت سطحی که خط دما ثابت  $320$  کلوین احاطه شده است در حالت جت نوسانی از جت پایا بیشتر است که نشان دهنده، انتقال حرارت بهتر جت نوسانی نسبت به جت پایا می‌باشد. رفتاری مشابه برای فاصله بدون بعد  $4$  نیز مشاهده می‌شود. به منظور بررسی کلی انتقال حرارت از سطح برخورد، متوسط زمانی و مکانی عدد ناسلت روی سطح محاسبه شده و در جدول ۵ ارائه گردیده است. برای بدست آوردن مقادیر مربوطه از رابطه زیر استفاده شده است

$$\overline{Nu}_{ave} = \frac{1}{100\pi d^2} \cdot \frac{1}{T} \int_{-5d}^{5d} \int_0^{\tau} Nu(x, \theta, t) dx d\theta dt \quad (10)$$

در رابطه (۱۰)، دوره تناوب تابع نوسان سینوسی می‌باشد و برای هر جت نوسانی با فرکانس، مقداری برابر  $\tau = 1/f$  می‌باشد. مطابق مقادیر حاصله، ملاحظه می‌شود که با نوسانی کردن جریان با فرکانس  $10$  هرتز، متوسط عدد ناسلت روی سطح کاهش می‌یابد و با افزایش رینولدز به  $50$  هرتز و  $100$  هرتز، متوسط ناسلت برای فاصله بدون بعد  $0.5$  به ترتیب  $1/2$  درصد و  $5$  درصد افزایش می‌یابد. این مقادیر برای فاصله بدون بعد  $4$ ، به ترتیب  $4$  درصد و  $9$  درصد می‌باشد. بنابراین با افزایش فاصله جت از سطح

زمانی از یک دوره نوسان را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل ملاحظه می‌شود که با افزایش رینولدز مقدار سرعت در نزدیکی دیواره به صورت محسوسی افزایش می‌یابد. بیشینه مقدار سرعت  $1/4$  دوره نوسان برای رینولدز  $14000$  با رینولدز  $7000$  به دو می‌رسد. سرعت در نزدیکی دیواره، مهم‌ترین پارامتر در تعیین میزان انتقال حرارت می‌باشد. به عبارتی هر چقدر سرعت در نزدیک دیواره بیشتر باشد، ضخامت لایه مرزی مومنتوم کمتر و در نتیجه ضخامت لایه مرزی حرارتی کمتر می‌شود [۳۲ و ۳۵]. با کاهش ضخامت لایه مرزی، میزان انتقال حرارت افزایش می‌یابد. بنابراین می‌توان گفت که اگر مقدار سرعت در نزدیکی دیواره بیشتر شود، ضریب انتقال حرارت جابجایی بیشتر می‌شود لذا عدد ناسلت افزایش می‌یابد.

توزیع دما می‌تواند به صورت ملموسی میزان انتقال حرارت و خنک‌کاری جت نوسانی و پایا را در فواصل مختلف جت از صفحه برخورد را به معرض نمایش بگذارد. شکل ۱۵ توزیع دما را برای دو حالت نوسانی و پایا و برای دو ارتفاع جت از سطح برخورد را نشان می‌دهد. مطابق این شکل، مشاهده می‌شود که کمترین میزان دما برای حالت جت نوسانی با فرکانس  $100$  هرتز و فاصله بدون بعد  $0.5$  می‌باشد. در این حالت، کمینه مقدار دما به  $320$  کلوین می‌رسد، کمینه مقدار دما برای فاصله بدون بعد  $4$ ،  $330$  و  $340$  کلوین می‌باشد. این مقادیر به خوبی نشان می‌دهد که کاهش فاصله جت



شکل ۱۵. توزیع دما بر روی سطح مقعر برای جت نوسانی و پایا در فواصل (الف) جت نوسانی (ب) جت پایا) ( $H/d=0.5$ ) (ج) جت نوسانی (د) جت پایا) ( $H/d=4$ )

Fig. 15. the contour of temperature on the concave surface for pulsed and steady jet a and b)  $H/d=0.5$  c and d)  $H/d=4$

جدول ۵. متوسط مکانی و زمانی عدد ناسلت در فرکانس و فواصل مختلف جت از صفحه برخورد

Table 5. The time and area averaged of Nu number at the various distance of jet to surface and frequency of inlet jet

$f=100\text{Hz}$	$f=50\text{Hz}$	$f=10\text{Hz}$	پایا	فاصله جت تا سطح برخورد
۳۳/۹۸	۳۲/۰۷	۳۰/۴۱	۳۱/۶۷	$H/d= 0.5$
۳۱/۶۸	۳۰/۳۴	۲۸/۱۳	۲۹/۱۹	$H/d= 4$

- با افزایش رینولدز، توزیع عدد ناسلت در ناحیه سکون در فاصله‌های زیاد جت از سطح برخورد، بیشتر از حالت فاصله کم جت از صفحه برخورد می‌باشد

- افزایش فرکانس و کاهش فاصله جت از صفحه برخورد، متوسط عدد ناسلت سطح را افزایش می‌دهد. اثر افزایش فرکانس در فاصله‌های زیاد جت از سطح برخورد، بیشتر است.

### ۷- فهرست علائم

$C_p$	ظرفیت گرمایی ویژه	$N.m\ kg^{-1}K^{-1}$
$\bar{U}_{jet}$	سرعت متوسط جت	$m\ s^{-1}$
$d$	قطر نازل	mm
$H$	فاصله نازل از سطح مقعر	mm
$k$	انرژی جنبشی آشفتگی	$m^2s^{-2}$
$Nu$	عدد ناسلت	-
$Nu_{ave}$	متوسط زمانی و مکانی عدد ناسلت	-
$P$	فشار	Pa
$T$	دما	K
$T_s$	دمای سطح	K
$T_{jet}$	دمای هوای جت	K
$h$	ضریب انتقال حرارت جابجایی	$W/m^2.K$
$t$	زمان	s
$u$	سرعت در راستای محور $x$	$m\ s^{-1}$
$v$	سرعت در راستای محور $y$	$m\ s^{-1}$
$w$	سرعت در راستای محور $Z$	$m\ s^{-1}$
$x_i$	مختصات $(x,y,Z)$	m
$Y^+$	فاصله بی بعد اولین سلول از مرز دیواره	-
$\varepsilon$	شدت اضمحلال آشفتگی	$m^2.s^{-3}$
$\mu$	لزجت دینامیکی	$N.s.m^{-2}$
$\rho$	چگالی	$kg/m^3$
$\tau$	دوره نوسان	s
$\lambda$	ضریب هدایت حرارتی	$W/m.K$
$f$	فرکانس نوسان	$s^{-1} (Hz)$

برخورد، اثر نوسانی کردن جریان بر متوسط عدد ناسلت افزایش می‌یابد.

### ۶- نتیجه گیری و جمع بندی

هدف این تحقیق، مطالعه جریان و انتقال حرارت جت نوسانی سینوسی در فواصل کم بین جت و سطح برخورد بود. به این منظور شبیه‌سازی عددی و آزمایش تجربی به منظور اعتبارسنجی نتایج عددی به انجام رسیده است. به این منظور از یک جت دایروی پایا و یک سطح مقعر تحت شار حرارتی ۲۰۰۰ وات بر متر مربع جهت انجام آزمایش تجربی بهره برده شد. در شبیه‌سازی عددی از مدل آشفتگی  $k-\varepsilon$  RNG به منظور مدل کردن لزجت آشفتگی استفاده شده است زیرا این مدل در مقایسه با دیگر مدل‌های آشفتگی از قابلیت بیشتری در پیش بینی توزیع عدد ناسلت برخوردار است. نتایج تجربی با نتایج تحقیقات پیشین، مقایسه شده است، همچنین نتایج عددی با نتایج آزمایشات تجربی انجام شده در این تحقیق اعتبار سنجی گردیده است. در شبیه‌سازی عددی اثر نوسانی کردن جریان در فواصل کم و زیاد جت از سطح برخورد، به انجام رسیده است و اثر فرکانس نوسان، عدد رینولدز و فاصله جت از سطح برخورد مورد ارزیابی قرار گرفته است. خلاصه نتایج حاصله می‌تواند به صورت زیر ارائه گردد:

- نتایج تجربی حاصل از آزمایشات برای جت پایا، تطابق مناسبی با نتایج تحقیقات پیشین دارد.

- مدل آشفتگی  $k-\varepsilon$  RNG در مقایسه با دیگر مدل‌های آشفتگی، اختلاف کمتری نسبت به نتایج تجربی دارد.

- نوسانی کردن جت ورودی با تابع سینوسی، در فاصله‌های زیاد جت از سطح برخورد، اثر بیشتری بر توزیع عدد ناسلت و انتقال حرارت از سطح برخورد دارد.

- نوسانی کردن جت ورودی، منجر به افزایش توزیع عدد ناسلت در ناحیه دیواره دارد و اثر آن در ناحیه سکون به مراتب کمتر است.

- یک فرکانس حدی وجود دارد که بیشتر از آن مقدار، نوسانی کردن جت منجر به افزایش عدد ناسلت و کمتر از آن سبب کاهش عدد ناسلت در سراسر صفحه برخورد می‌شود.

- با افزایش فاصله جت از سطح برخورد، توزیع عدد ناسلت برای جت نوسانی سینوسی، در ناحیه دیواره جت، کاهش می‌یابد و در ناحیه سکون تغییرات چشم‌گیری نمی‌کند.

- با افزایش عدد رینولدز، توزیع عدد ناسلت در سراسر صفحه افزایش می‌یابد و اثر آن از فاصله بین جت و سطح برخورد به مراتب بیشتر است.

- [10] J.C. Kurnia, A.P. Sasmito, P. Xu, A.S. Mujumdar, Performance and potential energy saving of thermal dryer with intermittent impinging jet, *Applied Thermal Engineering*, 113 (2017) 246-258.
- [11] G. Middelberg, H. Herwig, Convective heat transfer under unsteady impinging jets: the effect of the shape of the unsteadiness, *Heat and mass transfer*, 45(12) (2009) 1519-1532.
- [12] R. Zulkifli, K. Sopian, S. Abdullah, M.S. Takriff, Comparison of local Nusselt number for steady and pulsating circular jet at Reynolds number of 16000, *European Journal of Scientific Research*, 29(3) (2009) 369-378.
- [13] J. Mohammadpour, M.M. Zolfagharian, A.S. Mujumdar, M.R. Zargarabadi, M. Abdulhazadeh, Heat transfer under composite arrangement of pulsed and steady turbulent submerged multiple jets impinging on a flat surface, *International journal of thermal sciences*, 86 (2014) 139-147.
- [14] Y. Zhou, G. Lin, X. Bu, L. Bai, D. Wen, Experimental study of curvature effects on jet impingement heat transfer on concave surfaces, *Chinese Journal of Aeronautics*, 30(2) (2017) 586-594.
- [15] J. Taghinia, M. Rahman, T. Siikonen, Heat transfer and flow analysis of jet impingement on concave surfaces, *Applied Thermal Engineering*, 84 (2015) 448-459.
- [16] A. Hashiehbaf, A. Baramade, A. Agrawal, G. Romano, Experimental investigation on an axisymmetric turbulent jet impinging on a concave surface, *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 53 (2015) 167-182.
- [17] J. Mohammadpour, M. Rajabi-Zargarabadi, A.S. Mujumdar, H. Ahmadi, Effect of intermittent and sinusoidal pulsed flows on impingement heat transfer from a concave surface, *International Journal of Thermal Sciences*, 76 (2014) 118-127.
- [18] M.R. Zargarabadi, E. Rezaei, B. Yousefi-Lafouraki, Numerical analysis of turbulent flow and heat transfer of sinusoidal pulsed jet impinging on an asymmetrical concave surface, *Applied Thermal Engineering*, 128 (2017) 103-110.
- [1] A. Hadipour, M.R. Zargarabadi, M. Dehghan, Effect of micro-pin characteristics on flow and heat transfer by a circular jet impinging to the flat surface, *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, (2020) 1-9.
- [2] M. Mehdi Zolfagharian, M. Rajabi-Zargarabadi, A.S. Mujumdar, M. Valipour, M. Asadollahi, Optimization of turbine blade cooling using combined cooling techniques, *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*, 8(3) (2014) 462-475.
- [3] M. Attalla, A.A. Abdel Samee, N. N. Salem, Experimental investigation of heat transfer of impinging jet on a roughened plate by a micro cubic shape, *Experimental Heat Transfer*, 33(3) (2020) 210-225.
- [4] H. Ramezanzadeh, A. Ramiar, M. Youseffard, M. Ghasemian, Numerical analysis of sinusoidal and step pulse velocity effects on an impinging jet quenching process, *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 140(1) (2020) 331-349.
- [5] M. Haines, I. Taylor, The turbulence modelling of a pulsed impinging jet using LES and a divergence free mass flux corrected turbulent inlet, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 188 (2019) 338-364.
- [6] P. Xu, S. Qiu, M. Yu, X. Qiao, A.S. Mujumdar, A study on the heat and mass transfer properties of multiple pulsating impinging jets, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 39(3) (2012) 378-382.
- [7] R.C. Behera, P. Dutta, K. Srinivasan, Numerical study of interrupted impinging jets for cooling of electronics, *IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies*, 30(2) (2007) 275-284.
- [8] J. Zhou, Y. Wang, G. Middelberg, H. Herwig, Unsteady jet impingement: heat transfer on smooth and non-smooth surfaces, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 36(2) (2009) 103-110.
- [9] P. Xu, A.S. Mujumdar, H.J. Poh, B. Yu, Heat transfer under a pulsed slot turbulent impinging jet at large temperature differences, *Thermal Science*, 14(1) (2010) 271-281.



- single-sample experiments, *Mech, in, Engng*, 1953.
- [28] M. Fenot, E. Dorignac, J.-J. Vullierme, An experimental study on hot round jets impinging a concave surface, *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 29(4) (2008) 945-956.
- [29] H.M. Hofmann, D.L. Movileanu, M. Kind, H. Martin, Influence of a pulsation on heat transfer and flow structure in submerged impinging jets, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 50(17-18) (2007) 3638-3648.
- [30] S. Alimohammadi, D.B. Murray, T. Persoons, On the numerical-experimental analysis and scaling of convective heat transfer to pulsating impinging jets, *International Journal of Thermal Sciences*, 98 (2015) 296-311.
- [31] H. Yadav, A. Agrawal, A. Srivastava, Mixing and entrainment characteristics of a pulse jet, *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 61 (2016) 749-761.
- [32] R.B. Kalifa, S. Habli, N.M. Saïd, H. Bournot, G. Le Palec, Parametric analysis of a round jet impingement on a heated plate, *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 57 (2016) 11-23.
- [33] S. Ghadi, K. Esmailpour, S. Hosseinalipour, A. Mujumdar, Experimental study of formation and development of coherent vortical structures in pulsed turbulent impinging jet, *Experimental Thermal and Fluid Science*, 74 (2016) 382-389.
- [34] A. Hadipour, M.R. Zargarabadi, Heat transfer and flow characteristics of impinging jet on a concave surface at small nozzle to surface distances, *Applied Thermal Engineering*, 138 (2018) 534-541.
- [35] 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*, (2020) 1-16.
- (2018) 578-585.
- [19] 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(1) (2020) 57-68.
- [20] M.R.Z. R. Tarighi, Numerical Simulation of the Effect of the Location of Impinging Jets on the Convective Heat Transfer from a Cylindrical Concave Surface, *Journal of Applied and Computational Sciences in Mechanics*, 27(2) (2016) 71-86. (In Persian).
- [21] A.H.M.R. Zargarabadi, Experimental Analysis of Heat Transfer from Round Jet Impinging to Asymmetric Concave Surface, *Amirkabir Journal of Mechanical Engineering*, 50(6) (2019) 1229-1236. (In Persian).
- [22] M.R.Z. A. Hajimohammadi, Numerical Simulation of the Effects of Sinusoidal Pulsed Impinging Jet on Heat Transfer from the Concave Cylindrical Surface, *Journal of Applied and Computational Sciences in Mechanics* 29(1) (2017) 17-30. (In Persian).
- [23] H. Liakos, E. Keramida, M. Founti, N. Markatos, Heat and mass transfer study of impinging turbulent premixed flames, *Heat and Mass Transfer*, 38(4) (2002) 425-432.
- [24] M. Sharif, K. Mothe, Parametric study of turbulent slot-jet impingement heat transfer from concave cylindrical surfaces, *International Journal of Thermal Sciences*, 49(2) (2010) 428-442.
- [25] K. Parham, E. Esmailzadeh, U. Atikol, L. Aldabbagh, A numerical study of turbulent opposed impinging jets issuing from triangular nozzles with different geometries, *Heat and Mass Transfer*, 47(4) (2011) 427-437.
- [26] V. Yakhot, S. Orszag, S. Thangam, T. Gatski, C. Speziale, Development of turbulence models for shear flows by a double expansion technique, *Physics of Fluids A: Fluid Dynamics*, 4(7) (1992) 1510-1520.
- [27] S. Kline, F. McClintock, Describing uncertainties in

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

*S. Rakhsha, M. Rajabi Zargarabadi, S. Saedodin, Study of the Flow and Heat Transfer of Pulsed Sinusoidal Impinging Jet at Distances Close To the Concave Surface, Amirkabir J. Mech Eng., 53(9) (2021) 4943-4960.*

**DOI:** 10.22060/mej.2021.19176.6971

