

Amirkabir Journal of Mechanical Engineering

Amirkabir J. Mech. Eng., 53(9) (2021) 1161-1164 DOI: 10.22060/mej.2021.19176.6971

Study of the Flow and Heat Transfer of Pulsed Sinusoidal Impinging Jet at Distances Close To the Concave Surface

S. Rakhsha, M. Rajabi Zargarabadi*, S. Saedodin

Department of Mechanical Engineering, Semnan University, Semnan, Iran

ABSTRACT: The main purpose of this study is to investigate the effect of the pulsating of the inlet jet on the heat transfer rate short distances of the nozzle from the concave surface. For this purpose, three-dimensional simulation of flow and heat transfer of sinusoidal pulsed jets on the concave surface has been performed at distances of 0.5 times of nozzle diameter to 4 and for Reynolds numbers of 7000 and 14000. The results of the numerical simulation are in good agreement with the experimental results of the steady jet. The result shows that the effect of pulsating the flow with the sine function decreases at short distances between the jet and the concave surface. So that at a distance of 4 times of nozzle diameter, pulsating jet leeds to a 10% increase in the average Nu, while this value is equal to 5% for a distance of 0.5 times of nozzle diameter. It can be found that pulsating the flow decreases Nu at low frequencies, and then with increasing the frequency of the pulsed jet, the Nu number increases. Furthermore, with increasing the distance between the surface and the inlet jet, the Nu number decreases significantly. This rate of reduction is lower in comparison to the steady jet.

Review History:

Received: Oct. 29, 2021 Revised: Jan. 31, 2021 Accepted: Feb. 25, 2021 Available Online: May, 16, 2021

Keywords:

Sinusoidal pulsed jets Concave surface Impinging jet Heat transfer Nu number

1-Introduction

Impinging jet is one of the most effective and common methods of increasing heat transfer in widely used industries such as gas turbines, electronic components, dryers, etc. Methods of improving the heat transfer of the impinging jet include changing the nozzle geometry, pulsating the inlet jet, and using non-flat surfaces. Each of these methods has been studied by previous researchers. Pulsed jet impinging has been studied by previous researchers [1-3]. As previous research has shown, the use of non-flat surfaces increases and improves the heat transfer of the impinging jet from the surface. It can be said that the use of a concave surface causes a secondary flow which increases the heat transfer rate on the surface [4, 5].

In this research, the aim is to investigate the flow and heat transfer of a sinusoidal pulsed jet to a concave surface at short distances between the jet and the impinging surface. The effect of pulse inlet jet frequency and Reynolds number at different distances of the jet from the surface on the heat transfer rate is investigated.

2- Numerical Solution

Fig. 1 shows a schematic of the present problem. As shown in the figure circular jet of diameter d is located on the concave surface and the exit distance of the jet from the concave surface is H. The governing equations for solving this

problem are the equations of mass, momentum, and energy. In order to model turbulence terms, two-equation turbulence models are used. And according to the ability to predict the results and their compliance with laboratory results, a model is selected to continue numerical solution in different conditions. Previous research has reported a better ability of the k-E RNG model than other turbulence models [6-9]. The velocity inlet boundary condition is for the inlet jet, the boundary condition of the wall with a constant flux for the collision surfaces, and the boundary condition of the pressure outlet for the other surfaces.



Fig. 1. 2d view of the problem in the x-y plane

*Corresponding author's email: rajabi@semnan.ac.ir



Copyrights for this article are retained by the author(s) with publishing rights granted to Amirkabir University Press. The content of this article is subject to the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC-BY-NC 4.0) License. For more information, please visit https://www.creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode.



Fig. 2. The effect of pulsating the flow on the Nu distribution for the high and low distances of the jet to the surface

3- Experiments

The apparatus was designed and manufactured for an impinging jet. The setup consists of main parts including a control box that shows the ambient temperature and air temperature of the inlet jet, temperature sensors, concave surface exposed to constant heat flux, pitot tube, infrared thermal camera pressure sensor, and inlet flow regulating valve. The systematic error of the Nu number is 8%. The uncertainty of calculating the Nu number, including the uncertainty of the measuring equipment and the method of measurement, is a total of about 11.7% [10]

4- Results and Discussion

Fig. 2 shows that as the distance between the jet and the concave surface decreases, the Nu number increases significantly, although this increase reaches its lowest value in the stagnation region and its maximum in the wall jet region. At the end of the impingement surface, the effect of pulsating flow and the distance of the jet from the surface is minimized.

According to Fig. 3, It is observed that pulsating the inlet jet with low frequencies reduces the Nu number in the stagnation zone. By increasing the pulse frequency to 50 Hz, the Nu distribution increases compared to the steady jet mode, and by increasing the frequency to 100 Hz, this trend continues.

In order to investigate the heat transfer from the concave surface, the time and area average of the Nu number on the surface has been calculated and presented in Table 1.

Table 1. the time and area averaged of Nu number at the various distance of jet to surface and frequency of inlet jet

| | steady | <i>f</i> =10Hz | <i>f</i> =50Hz | <i>f</i> =100Hz |
|---------|--------|-------------------|-------------------|-----------------|
| H/d=0.5 | 31.6 | 30.4 | 32.1 | 34 |
| H/d=4 | 29.2 | 28.1 | 30.3 | 31.7 |



Fig. 3. Effect of pulse frequency of inlet jet on the Nu distribution of concave surfacee

According to the table, it is observed that by pulsating the flow with a frequency of 10 Hz, the average Nu number on the surface decreases, and by increasing the frequency to 50 Hz and 100 Hz, the average Nu for dimensionless distance 0.5 by 1.2% and 5%, respectively. These values for the dimensionless distance 4 are 4% and 9%, respectively. Therefore, by increasing the distance of the jet from the surface, the effect of pulsating the inlet jet on the average Nu number increases.

5- Conclusion

The summary of the results can be presented as follows:

- The k- ϵ RNG turbulence model differs less from the experimental data compared to other turbulence models.

- pulsating the jet with sinusoidal function, at long distances of the jet from the surface, has a greater effect on the distribution of Nu number.

- pulsating the jet leads to an increase in the distribution of Nu number in the wall area and its effect is much less in the stagnation zone.

- Increasing the frequency and decreasing the distance of the jet from the surface, increases the average Nu number of the surface. The effect of increasing the frequency is greater at long distances of the jet from the concave surface.

References

- [1] H. Ramezanzadeh, A. Ramiar, M. Yousefifard, 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.
- [2] 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.
- [3] 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.

- [4] 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.
- [5] J. Taghinia, M. Rahman, T. Siikonen, Heat transfer and flow analysis of jet impingement on concave surfaces, Applied Thermal Engineering, 84 (2015) 448-459.
- [6] M. Sharif, K. Mothe, Parametric study of turbulent slotjet impingement heat transfer from concave cylindrical surfaces, International Journal of Thermal Sciences, 49(2) (2010) 428-442.
- [7] K. Parham, E. Esmaeilzadeh, 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.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] S. Kline, F. McClintock, Describing uncertainties in singlesample experiments, Mech, in, Engng, 1953.

HOW TO CITE THIS ARTICLE

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) 1161-1164



DOI: 10.22060/mej.2021.19176.6971

This page intentionally left blank

نشريه مهندسي مكانيك اميركبير



نشریه مهندسی مکانیک امیرکبیر، دوره ۵۳، شماره ۹، سال ۱۴۰۰، صفحات ۴۹۴۳ تا ۴۹۶۰ DOI: 10.22060/mej.2021.19176.6971

مطالعه جریان و انتقال حرارت جت نوسانی سینوسی برخوردی در فاصله های نزدیک به سطح مقعر

سعيد رخشا، مهران رجبی زرگرآبادی*، سيف الله سعدالدين

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران.

خلاصه: هدف اصلی این پژوهش بررسی اثر نوسانی کردن جت ورودی بر میزان انتقال حرارت جت برخوردی در فاصلههای کم از سطح مقعر میباشد. به این منظور شبیهسازی سه بعدی جریان و انتقال حرارات جت نوسانی سینوسی در فواصل جت تا سطح برخورد ۲۰۱۵ ۴ برابر قطر جت و برای اعداد رینولدز ۲۰۰۰ و ۱۴۰۰۰ به انجام رسید. نتایج حاصل از شبیهسازی عددی تطابق مناسبی، با نتایج آزمایشگاهی جت پایا دارد. نتابج نشان میدهد اثر نوسانی کردن جریان با تابع سینوسی در فاصلههای کم بین جت و صفحه مقعر کاهش میابد. به طوری که در فاصله ۴ برابری قطر جت از سطح برخورد، نوسانی کردن جر سینوسی منجر به افزایش ۱۰درصدی ناسلت متوسط سطح گردید در حالی که این مقدار برای فاصله ۲۵، برابری قطر جت، برابر ۵ درصد میباشد. بررسی اثر نوسان بر عدد باسلت نشان داد که با نوسانی کردن جریان با جت نوسانی سینوسی، ابتدا ناسلت کاهش مییاد، و سپس با افزایش فرکانس نوسان جت ورودی، عدد ناسلت افزایش مییابد. این میزان کاهش، در جریان نوسانی در مقاصله بین سطح و جت ورودی، عدد ناسلت به صورت محسوسی کاهش مییابد. این میزان کاهش، در جریان نوسانی در مقایسه با جت پایا کمتر است

تاریخچه داوری: دریافت: ۸۸/۸۸/۸۹ 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.

۱ – مقدمه

جت برخوردی یکی از مؤثرترین و متداول ترین روش افزایش انتقال حرارت در صنایع پر کاربرد مانند توربین گاز، قطعات الکترونیکی، خشک کنها و... میباشد. تحقیقات زیادی بر روی جریان و انتقال حرارت جت برخوردی انجام شده است[۱–۳]. از جمله روشهای بهبود انتقال حرارت جت سطوح ناصاف اشاره کرد. هر کدام از این روشها توسط محققان پیشین مورد مطالعه قرار گرفته است. نوسانی کردن جت برخوردی توسط محققان پیشین مورد مطالعه قرار گرفته است. نوسانی کردن جت برخوردی توسط محققان پیشین که نوسانی کردن جت برخوردی توسط محققان پیشین مورد مطالعه قرار گرفته است[۴–۶]. بهرا^۱ و همکاران [۷] مشاهده کردهاند که نوسانی کردن جت برخوردی با تابع سینوسی و با دامنههای بزرگ، در مقایسه با جت دائم، سبب افزایش انتقال حرارت میگردد. ژو⁷ و همکاران [۸] مطالعه آزمایشگاهی بر روی جت برخوردی نوسانی با تابع سینوسی و پلهای را در دستور کار خود قرار دادهاند. آنها با بررسی اثر زبری سطح بر

1 Bejera

2 Zhou

د موقوق 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 در دسترس شما قرار گرفته است. این مقاله تحت این مقاله تحت این مقاله تحت ایسانس آفرینندگی مردمی (By No

روی انتقال حرارت، دریافتند که انتقال حرارت جت نوسانی در سطوح ناصاف افزایش مییابد. ژو^۳ و همکاران [۹] به شبیهسازی انتقال حرارت یک جت برخوردی با تابع پلهای پرداختهاند. 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^۴ و همکاران مرالعه قرار دادهاند. نتایج تحقیقات آنها نشان داد که نوسانی مربعی مورد برخوردی، بازده خشککن را با استفاده از یک جت نوسانی کردن جت برخوردی، بازده خشککن را کاهش میدهد. میدلبرگ^ه و هرویج^۶ [۱۱]اثر توابع نوسانی مختلف بر روی روند انتقال حرارت جت برخوردی را با استفاده از آزمایش مورد بررسی قرار دادهاند. نتایج پژوهش آنان نشان داد که برای فرکانسهای پایین نوسان، انتقال حرارت در ناحیه سکون به ازای همه توابع نوسانی، کاهش مییابد. زولکیفلی^۷ و همکاران [۱۲] مطالعهای آزمایشگاهی

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

^{*} نویسنده عهدهدار مکاتبات: rajabi@semnan.ac.ir

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 بیشنه را حاصل نماید.

همان طور که تحقیقات پیشین نشان میدهد استفاده از سطوح ناصاف به افزایش و بهبود انتقال حرارت جت برخوردی از سطح منجر می شود. می توان گفت استفاده از سطح مقعر باعث یک جریان ثانویه ای می شود که همین پدیده موجب افزایش نرخ انتقال حرارت بر روی سطح می گردد[۱۴ و ۱۵]. هاشیهباف^۱ و همکاران [۱۶] نشان دادهاند که در جریان جت برخوردی آشفته بر روی سطح مقعر یک جریان افقی ایجاد می شود و به این ترتیب شدت آشفتگی 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 شبیه سازی عددی کردند. کیو و همکاران [۱۹] به بررسی آرایش جتها بر روی صفحه مقعر پراختهاند آنها دریافتند که با تغییر آرایش جت برخوردی به صفحه مقعر می توان انتقال حرارت را به صورت محسوسی افزایش داد. طریقی و رجبی [۲۰] مکان استقرار جتهای برخوردی به سطح مقعر را با استفاده از شبیه سازی عددی مورد بررسی قرار دادهاند و دریافتند که با كاهش فاصله جت تا خروجي صفحه، بيشترين مقدار عدد ناسلت به سمت مرکز صفحه منتقل می شود. هادی پور 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 می یابد. حاجی محمدی و رجبی[۲۲] جریان جت برخوردی سینوسی به صفحه مقعر را با شبیه سازی 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 می شود. زیرا سطوح بکار رفته در توربین گاز اغلب به صورت مقعر است. با بررسی تحقیقات پیشین می توان گقت عمده مطالعات انجام شده مربوطه به بررسی

جت 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 می باشد. لذا جهت بررسی عمیق تر و دقیق تر ماهیت جریان و انتقال حرارت جت نوسانی در برخورد با صفحه مقعر، شبیه سازی عددی سه بعدی با رهیافت حجم محدود به انجام می رسد. از آنجایی که دستگاه تولید جت نوسانی سینوسی در این آزمایش ها در دسترس نبوده است، نتایج عددی با نتایج آزمایشگاهی مربوطه به جت پایا که در همین تحقیق انجام شده، مقایسه می گردد. 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 می گیرد.

۲- حل عددی ۲- ۱- شبکه

شکل ۱ طرحوارهای از مسأله حاضر را نشان میدهد. همان طور که در شکل ۱– الف ملاحظه میشود، یک جت دایروی به قطر d برروی 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 برای حل جریان کافی ریز شود که مقدار ۱> ⁺ y حاصل شود. شکل ۲ توزیع عدد ناسلت را برای چهار شبکه محاسباتی نشان میدهد. مطابق شکل، توزیع عدد ناسلت با تغییرات شبکه از ۲۰۰،۰۰۰ به ۲۰۰،۰۰۰ تفاوت چشم گیری نمی کند، بنابراین تعداد سلول های محاسباتی شبکه نهایی برای شبیه سازی عددی برابر ۲۰۰،۰۰۰ میباشد.

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

¹ Hashiehbaf

² Qiu



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





شکل ۲. بررسی اثر شبکه بر توزیع عدد ناسلت



$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_{j}}(\rho U_{j}k) = \frac{\partial}{\partial x_{j}}\left[(\mu + \frac{\mu_{t}}{\sigma_{k}})\frac{\partial k}{\partial x_{j}}\right] + P_{k} - \rho\varepsilon \quad (\Delta)$$

$$\frac{\partial(\rho\varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_{j}}(\rho U_{j}\varepsilon) = \frac{\partial}{\partial x_{j}}\left[(\mu + \frac{\mu_{t}}{\sigma_{\varepsilon}})\frac{\partial\varepsilon}{\partial x_{j}}\right] + \frac{\varepsilon}{k}(C_{\varepsilon 1}P_{k} - C_{\varepsilon 2}^{*}\rho\varepsilon) \qquad (8)$$

$$C_{\varepsilon 2}^{*} = C_{\varepsilon 2} + \frac{C_{\mu} \eta^{3} (1 - \frac{\eta}{\eta_{0}})}{1 + \beta \eta^{3}}, \eta = S \frac{k}{\varepsilon}, S = \sqrt{2S_{ij}S_{ij}} \quad (\forall)$$

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=۰) مطابق زیر در نظر گرفته می شود.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial (u_i)}{\partial x_i} = 0 \tag{1}$$

$$\frac{\partial(\rho \overline{u_i})}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \overline{u_i} \overline{u_j})}{\partial x_j} = -\frac{\partial \overline{P}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu(\frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_j} + \frac{\partial \overline{u_j}}{\partial x_i}) - \rho \overline{u_i u_j} \right] \quad (\Upsilon)$$

$$\frac{\partial(\rho c_p \overline{T})}{\partial t} + \frac{\partial(\rho c_p \overline{u_i} \overline{T})}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(k \frac{\partial \overline{T}}{\partial x_i} - \rho c_p \overline{u_i} \overline{T'}\right) \quad (\tilde{r})$$

$$-\rho \overline{u_i u_j} = \mu_t \left(\frac{\partial u_i'}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j'}{\partial x_i}\right) - \frac{2}{3} \delta_{ij} \rho k \tag{(f)}$$

برای بدست آوردن µ، از مدلهای توربلانسی استفاده می شود. به همین منظور سه مدل آشفتگی w-۵ SST ، k-ε RNG و مدل سه معادلهای k-kl-۵ مورد ارزیابی قرار می گیرند. و با توجه به قابلیت پیش بینی نتایج و مطابقت آن با نتایج آزمایشگاهی یک مدل برای ادامه حل عددی در شرایط مختلف، انتخاب می گردد. تحقیقات پیشین، توانایی بهتر مدل K-۶ RNG را نسبت به مدلهای دیگر آشفتگی، گزارش کردند[۲۳–۲۵]. لذا معادلات انتقال برای مدل RNG به شرح زیر ارائه می گردد [۲۶]:

| β | $\eta_{.}$ | σ_k | $C_{\varepsilon\tau}$ | C_{ε} | C _µ |
|-------|------------|------------|-----------------------|-------------------|----------------|
| +/+17 | ۴/۳۸ | •/٧١٩۴ | ١/۶٨ | 1/47 | +/+14 |

جدول ۱. ثابتهای معادلههای (۵) تا (۷)

جدول ۲. شرایط مرزی مسأله برای حل عددی

Table 2. the Boundary condition for numerical solution

| جريان | دما | نوع شرط مرزی |
|----------------------|-------------------------------------|--------------|
| سرعت: ۸ – ۱۶ m/s | T = $\mathbf{v} \cdot \mathbf{k}$ | ورودى |
| شدت آشفتگی: ٪۳ – ۱۰٪ | | |
| فشار: فشار آتمسفر | $T=\mathbf{v}\cdot\mathbf{k}$ | خروجى |
| سرعت: m/s (صفر) | شار حرارتی ثابت: ۲۰۰۰ ۲۰۰۰ | ديواره |



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 برخورد

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

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

۲– ۴– الگوريتم 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 (۱/۴۰f) ثانیه است که این مقدار حدوداً یک هشتم دوره تناوب جت ورودی سینوسی میباشد. دقت همگرایی برای معادلات پایستاری جرم و مومنتوم ^{۴-}۱۰ برای معادله انرژی

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 می شود، شار حرارتی ثابتی معادل ۲۰۰۰ وات بر مترمربع بر قسمت محدب سطح مقعر، وارد می شود. به منظور جلوگیری از اتلاف حرارتی این شار حرارتی از دو لایه



شکل ⁶. 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

پشم و شیشه و پشم و سنگ مطابق شکل ۴ استفاده می شود.

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 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.

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.

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

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:

$$\varepsilon_t = \pm \sqrt{\varepsilon_r^2 + \varepsilon_s^2} \tag{9}$$

جایی که $_{r}^{3}$ و $_{s}^{3}$ خطاهای تصادفی و سیستماتیک هستند. این آزمایش برای

جدول ۳. میزان خطای سیستماتیک تجهیزات اندازه گیری

Table 3. The systematic error of measurement equipment

| میزان خطا | تجهيز |
|--------------------------------|---------------------|
| $\pm \cdot \Delta T $ | ترموكوپل |
| \pm ($7/7+7/\delta$ % rdg) | دوربين حرارتي |
| ±•/٣ % F.S | لوله پيتوت |
| ±1/2 % F.S | منبع تغذيه الكتريكي |



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]

تأیید تکرارپذیری نتایج سه بار تکرار شد. خطای تصادفی عدد نوسلت از میانگین مربع //۴/۷ بدست میآید. 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 میدهد. اندازه گیریها نشان میدهد 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 میشود (کمتر از ٪۱ از شار گرمای اعمال شده) قابل اغماض است. خطای سیستماتیک عدد ناسلت را میتوان با استفاده از ریشه مجموع مربعات اجزا

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 شکل۶ مشاهده می شود نتایج این تحقیق با اختلاف قابل قبولی نسبت به آزمایش فنوت٬ و همکاران، توزیع عدد ناسلت را برای سه عدد رینولدز نشان می دهد. بیشترین اختلاف بین نتایج تحقیق حاضر و تحقیق

1 Fenot



شکل ۷. مقایسه توزیع عدد ناسلت حاصل از شبیهسازی عددی سه مدل أشفتگی 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 ازمایشگاهی تحقیقات پیشین

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

| Nu. | H/d | <i>f(</i> Hz) | Re | سطح | محقق |
|-----|------------------|---------------|------|------|---------------|
| ۶. | Λ/Δ | ۴. | 14 | تخت | هافمن [۲۹] |
| ۶۷ | ۴ | ۱۰۰ | 14 | مقعر | تحقيق حاضر |
| ۲. | ۶ | ۴. | ۲۸۰۰ | تخت | علیمحمدی [۳۰] |
| ۲۳ | ۶ | ۴. | ۳۰۰۰ | مقعر | تحقيق حاضر |

[۲۸] حدود ۱۵ درصد می باشد که با توجه به عدم قطعیت آزمایش های 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 می باشد، 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 جت۵/۵=H/ط با نتایج آزمایشگاهی مقایسه گردیده

است (شکل ۶). مطابق این شکل، نتایج حاضل از شبیهسازی از سه مدل آشفتگی با نتایج تجربی مقایسه شده است. همان طور که ملاحظه می شود مدل آشفتگی k-E RNG که نسبت به دو مدل دیگر آشفتگی، پیش بینی بهتری از توزیع عدد ناسلت ارائه کرده است. از آنجایی که نتایج آزمایشگاهی برای جریان جت نوسانی بر روی سطح مقعر وجود ندارد، برای اعتبار سنجی نتایج شبیه سازی 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 می شود، نتایج عددی این تحقیق که با مدل k-E RNG مناسبی با نتایج آزمایشگاهی



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

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 می یابد البته این افزایش در ناحیه برخورد کمترین مقدار و در ناحیه جت دیواره به بیشترین مقدار خود می سد. در نواحی انتهایی صفحه برخورد، اثر نوسانی کردن جریان و فاصله جت از صفحه برخورد، به کمترین میزان می سد. همچنین از این شکل می توان نتیجه گرفت که اثر نوسانی کردن جریان در راستای محوری بیشتر از راستای منحنی سطح مقعر می باشد. همان طور که در شکل ملاحظه می شود نوسانی کردن جت نوسانی با تابع سینوسی در ناحیه برخورد و ورود زیادی بر عدد ناسلت نمی گذارد ولی با فاصله گرفتن از ناحیه برخورد و ورود به ناحیه جت دیواره، اثر نوسانی کردن جریان جت بر توزیع عدد ناسلت و نرخ زیادی انتقال حرارت افزایش می یابد. مطابق شکل ملاحظه می شود که با افزایش فاصله جت از سطح برخورد، اثر نوسانی کردن جریان بیشتر می شود. زیرا هر فاصله جت از سطح برخورد، اثر نوسانی کردن جریان بیشتر می شود. زیرا هر

برای ورود به جت برخوردی دارند و آشفتگی جریان را بیشتر می کنند [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 چندان زیادی نمی کند ولی در ناحیه جت دیواره، موجبات کاهش عدد ناسلت را فراهم می آورد. علت این کاهش را می توان 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 ۹۵/۰ 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 ۲و۴=H/d به شدت تحت تأثیر قرار میدهد به نحوی که ناحیه پتانسل 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



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



 $t/\tau = 1$ شكل ۱۰. توزيع سرعت در راستاى محور جت برخوردى در فاصلههاى مختلف نازل از سطح برخورد الف) جت نوسانى در لحظه ب) جت پايا Fig. 10. The velocity distribution along the jet centerline at various nozzle to surface distances a) pulsed jet

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

در ناحیه دیواره، کاهش می یابد.

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

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

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



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) Hz (ب) Hz ج) 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

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 ^۲ ۲/۵ m ۸۰ میباشد در صورتی که این مقدار برای جریان جت نوسانی با فرکانسهای میباشد در صورتی که این مقدار برای جریان جه میباشد. لذا میتوان گفت با افزایش فرکانس تحریک جت نوسانی، میزان آشتفگی جریان افزایش مییابد. مشاهدات مشابه در مطالعات پیشین، تأیید می کند که نوسانی کردن جت ورودی و استفاده از صفحه مقعر منجر به افزایش شدت آشفتگی جریان

میتوان گفت به صورت کلی دو پارامتر در اثر نوسانی کردن جریان جت، بر روی انتقال حرارت مؤثر می باشند. 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 یافتهاست. لذا توزیع عدد ناسلت در این حالت نسبت به جریان جت پایا کمتر است.

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 مىدهد. مطابق اين شكل، با افزايش عدد رينولدز، عدد ناسلت به صورت محسوسی افزایش می یابد. این رفتار تقریباً در اکثر تحقیقات پیشین، مشاهده شده است[۱۴ و ۳۳] با توجه به شکل مشاهده می شود که با افزایش عدد رینولدز، توزیع عدد ناسلت در ناحیه سکون، با افزایش فاصله جت از سطح برخورد، افزایش می یابد. رفتاری که در رینولدز ۷۰۰۰ کمتر مشاهده شده است (شکل ۸). به نظر علت این یدیده، غلبه اثر آشفتگی بر اختلاط با هوای ساکن اطراف جت می باشد. همان طور که در شکل ملاحظه می شود، 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 رينولدز، انتقال حرارت يا توزيع ناسلت افزايش مىيابد. می توان از این شکل نتیجه گرفت که عدد ناسلت با عدد رینولدز نسبت مستقيم و با فاصله بدون بعد جت از صفحه برخورد رابطه معكوس دارد. این مشاهدات با رابطه تجربی بدست آمده توسط هادی یور 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





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) ۲ = s/d = 4 ب) s/d = 5/d = 3، فرکانس H/d = 0.6

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

زمانی از یک دوره نوسان را نشان میدهد.

همان طور که در شکل ملاحظه می شود که با افزایش رینولدز مقدار سرعت در نزدیکی دیواره به صورت محسوسی افزایش می یابد. بیشینه مقدار سرعت ۲/۱ دوره نوسان برای رینولدز ۱۴۰۰۰ با رینولدز ۲۰۰۰ به دو می رسد. سرعت در نزدیکی دیواره، مهم ترین پارامتر در تعیین میزان انتقال حرارت می باشد. به عبارتی هر چقدر سرعت در نزدیک دیواره بیشتر باشد، ضخامت لایه مرزی مومنتوم کمتر و در نتیجه ضخامت لایه مرزی حرارتی کمتر می شود[۳۲ و ۳۵]. با کاهش ضخامت لایه مرزی، میزان انتقال حرارت افزایش می یابد. بنابراین می توان گفت که اگر مقدار سرعت در نزدیکی دیواره بیشتر شود، ضریب انتقال حرارت جابجایی بیشتر می شود لذا عدد ناسلت افزایش می یابد.

توزیع دما میتواند به صورت ملموسی میزان انتقال حرارت و خنک کاری 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 ۱۰۰ هرتز و فاصله بدون بعد ۰/۵ میباشد. در این حالت، کمینه مقدار دما به ۲۲۰ کلوین میرسد، کمینه مقدار دما برای فاصله بدون بعد ۴، ۳۳۰ و کلوین میباشد. این مقادیر به خوبی نشان میدهد که کاهش فاصله جت

تا دیواره، میتواند به خنککاری سطح برخورد بیانجامد. همچنین میتوان دریافت که در فاصله بدون بعد ۰/۵، مساحت سطحی که خط دما ثابت ۳۲۰ 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 ۴ 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

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

au در رابطه (۱۰)، دوره تناوب تابع نوسان سینوسی میباشد و برای هر جت نوسانی با فرکانس، مقداری برابر au = 1/f میباشد. مطابق مقادیر حاصله، ملاحظه میشود که با نوسانی کردن جریان با فرکانس ۱۰ هرتز، متوسط عدد ناسلت روی سطح کاهش مییابد و با افزایش رینولدز به ۵۰ هرتز و ۱۰۰ هرتز، متوسط ناسلت برای فاصله بدون بعد ۵/۰ به ترتیب ۱/۲ درصد و ۵ درصد افزایش مییابد. این مقادیر برای فاصله بدون بعد ۴، به ترتیب ۴ درصد و ۹ درصد میباشد. بنابراین با افزایش فاصله جت از سطح



شکل ۱۵. توزیع دما بر روی سطح مقعر برای جت نوسانی و پایا در فواصل (H/d=۰/۵ الف) جت نوسانی ب) جت پایا) (H/d=۴ ج) جت نوسانی د)جت پایا)

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 برخود

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

| <i>f</i> =1++Hz | <i>f</i> =۵•Hz | <i>f</i> =\•Hz | پايا | فاصله جت تا سطح برخورد |
|-----------------|----------------|----------------|--------------|------------------------|
| ۳۳/۹۸ | ۳۲/۰۷ | ٣•/۴١ | ۳١/۶٢ | <i>H/d</i> = •/۵ |
| ۳١/۶٨ | ٣٠/٣۴ | ۲۸/۱۳ | ۲۹/۱۹ | <i>H/d</i> = ۴ |

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 RNG ٤-۶ 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 تحربی حاصل از آزمایشات برای جت پایا، تطابق مناسبی با نتایج تحقیقات پیشین دارد.

مدل آشفتگی k-ɛ 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 می شود.

 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 چشم گیری نمی کند.

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.

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 | $N.m kg^{-1}K^{-1}$ |
|---------------|------------------------------|---------------------------------|
| $ar{U}_{jet}$ | سرعت متوسط جت | $m.s^{-1}$ |
| d | قطر نازل | mm |
| H | فاصله نازل از سطح مقعر | mm |
| k | انرژی جنبشی آشفتگی | $m^r s^{-r}$ |
| Nu | عدد ناسلت | - |
| Nuave | متوسط زمانی و مکانی عدد | - |
| | ناسلت | |
| Р | فشار | Pa |
| Т | دما | Κ |
| T_s | دمای سطح | Κ |
| T jet | دمای هوای جت | Κ |
| h | ضريب انتقال حرارت | $W/m^r.K$ |
| | جابجايي | |
| t | زمان | S |
| и | سرعت در راستای محور <i>x</i> | $m . s^{-1}$ |
| v | سرعت در راستای محور ۷ | $m . s^{-1}$ |
| W | سرعت در راستای محور Z | $m . s^{-1}$ |
| Xi | مختصات (<i>x,y</i> ,z) | m |
| Y^{\star} | فاصله بی بعد اولین سلول | - |
| | از مرز دیواره | |
| ε | شدت اضمحلال آشفتگی | m ^r .s ^{-r} |
| μ | لزجت ديناميكي | N.s.m ^{-r} |
| ho | چگالی | kg/m ³ |
| τ | دوره نوسان | S |
| λ | ضريب هدايت حرارتي | W/m.K |
| f | فركانس نوسان | $s^{-1}(Hz)$ |

- [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. Abdulahzadeh, 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

[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. Yousefifard, 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 nonsmooth 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.

منابع

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, ournal 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 slotjet impingement heat transfer from concave cylindrical surfaces, International Journal of Thermal Sciences, 49(2) (2010) 428-442.
- [25] K. Parham, E. Esmaeilzadeh, 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 | |