



MECHANICS OF SMART STRUCTURES

Available Online at: <http://jmss.qut.ac.ir/>



The flow structure and thermal performance of a twin self-excited jet under different thermal and hydrodynamic boundary conditions

ARTICLE INFO

Article Type

Original Research

Authors

Seyed Mohammad Jaafarian*

Department of Mechanical Engineering, Higher Education Complex of Bam, Bam, Iran

Seyed Alireza. Zolfaghari

Department of Mechanical Engineering, University of Birjand, Birjand, Iran

Amir Omidvar

Department of Mechanical Engineering, Shiraz University of Technology, Shiraz, Iran

Javad Khadem

Department of Mechanical Engineering, University of Birjand, Birjand, Iran

Mahtab Aminzadeh

Independent Researcher, Iran

* Correspondence

jaafarian_mohammad@bam.ac.ir

Postal Code: 7661663786.

Article History

Received: 31 Jan, 2026

Accepted: 20 May, 2026

ePublished: 27 May, 2026

ABSTRACT

In this study, twin self-excited oscillatory jets have been evaluated as a devices that have the ability to create oscillatory flow without the external factors. In this regard, the effects of heat flux and inlet flow velocity on the oscillation frequency and flow deflection angle along with the thermal performance have been studied by using the finite volume numerical method and the OpenFoam code. In the present study, the nozzle spacing is constant and the impinging heat flux to the end wall and inlet flow velocity are $q= 0-5000-10000 \text{ W/m}^2$, and $U_0=4-8 \text{ m/s}$ respectively. The numerical results indicate that by increasing the impinging heat flux on the end wall of the chamber, the oscillation frequency increases quasi-linearly. In addition, at a constant heat flux, by growing the inlet flow velocity, the oscillation frequency and deflection angle increase. On the other hand, the average Nusselt number on the impinging wall increases by increasing the inlet flow velocity and decreasing the heat flux.

Keywords: Self-excited oscillating jet, Oscillatory jet, Twin jet, Oscillation frequency.

بررسی ساختار جریان و عملکرد حرارتی جت خودتحریک دوگانه تحت شرایط مرزی حرارتی و هیدرودینامیکی مختلف

سید محمد جعفریان*

دانشکده مهندسی مکانیک، مجتمع آموزش عالی بم، بم، ایران

سید علیرضا ذوالفقاری

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران

امیر امیدوار

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شیراز، شیراز، ایران

جواد خادم

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران

مهتاب امین زاده

پژوهشگر مستقل، ایران

کلید واژه‌ها

جت نوسانی خودتحریک، جت دوگانه، جت نوسانی، فرکانس نوسان.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۱۱/۱۱

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۲/۳۰

*نویسنده مسئول: jaafarian_mohammad@bam.ac.ir

۱ مقدمه

در دهه‌های اخیر استفاده از جت‌های نوسانی خودتحریک در کاربردهای مختلف، نظیر کنترل جدایش جریان [۱]، کاهش ضریب درگ [۲]، کنترل فرآیند احتراق [۳]، و سرمایه‌گذاری تجهیزات الکترونیکی [۴]، نظر بسیاری از محققین را به خود جلب کرده است. در جت‌های نوسانی خودتحریک به دلیل اندرکنش جریان سیال و ساختار هندسی جت، جریان در راستای عمود بر مسیر نوسان می‌کند. تحریک و نوسان جریان سیال، کلیه ویژگی‌های جریان را تحت تأثیر قرار خواهند داد. از مهمترین ویژگی‌های جت‌های نوسانی خودتحریک می‌توان به عدم وجود قطعات متحرک، ساخت و نگهداری آسان همچنین دامنه وسیع فرکانس نوسان جریان اشاره کرد [۵-۶].

یکی از روش‌های ایجاد جریان نوسانی خودتحریک، تخلیه جریان جت داخل یک محفظه می‌باشد. این نوع جریان توسط برخی پژوهشگران مورد بررسی قرار گرفته است و به عنوان یک جت

چکیده

در این مطالعه، جت‌های نوسانی خودتحریک دوگانه، به عنوان تجهیزاتی که توانایی ایجاد جریان نوسانی بدون دخالت عامل خارجی را دارند مورد ارزیابی قرار گرفته‌اند. در این راستا تأثیرات شار حرارتی و سرعت جریان ورودی به نازل‌ها بر فرکانس نوسان و زاویه انحراف جریان به همراه عملکرد حرارتی این گونه جت‌ها با استفاده از روش عددی حجم محدود و کد اپن فوم، مطالعه شده است. در جت دوگانه مورد مطالعه فاصله نازل‌ها از یکدیگر ثابت و شار حرارتی برخوردی معادل $q = -5000 \text{ to } -10000 \text{ W/m}^2$ در نظر گرفته شده است. همچنین سرعت سیال ورودی به محفظه دارای مقادیر $U_0 = 4 \text{ to } 8 \text{ m/s}$ می‌باشد. نتایج عددی نشان می‌دهند که

نوسانی خودتحریک با عملکرد حرارتی مناسب در اعداد رینولدز پایین معرفی شده است [۷]. یاچاچن و همکاران [۸]، با مطالعه این گونه جت ها نشان دادند که کلیه پارامترهای مرتبط با جریان با فرکانس یکسان در محفظه نوسان می کنند. همچنین فرکانس نوسان تحت تاثیر سرعت جریان ورودی و موقعیت قرارگیری نازل در محفظه می باشد. تاثیر ضخامت نازل بر ساختار جریان و انتقال حرارت از دیواره برخوردی در سرعت های مختلف توسط امین زاده و همکاران [۹]، مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج حاصل نشان داد که در یک سرعت ورودی ثابت با کاهش ضخامت نازل، فرکانس نوسان جریان و عدد ناسلت متوسط روی دیواره برخوردی افزایش می یابد. امین زاده و همکاران [۱۰]، در مطالعه ای دیگر تاثیر اختلاف دمای دیواره محفظه و سیال ورودی بر فرکانس نوسان در جت خودتحریک نوسانی را مورد بررسی قرار دادند. آنها نشان دادند که در $Re=3000$ فرکانس نوسان جریان تا ۱۰٪ در مقایسه با محفظه همدمای افزایش می یابد و این افزایش فرکانس تا ۵۸٪ در $Re=1000$ دیده شد.

علاوه بر تحریک و نوسان جریان، استفاده از جت های دو و یا چندگانه، جهت بهبود عملکرد جت ها پیشنهاد شده است. سرکار و همکاران [۱۱]، سرمایه دیواره هدف توسط جت چندگانه را مورد مطالعه قرار دادند. نتایج نشان داد که استفاده از جت چندگانه می تواند نرخ انتقال حرارت از سطح را تا ۶۰٪ در مقایسه با جت تک گانه افزایش دهد. قرائی و همکاران [۱۲]، با بررسی انتقال حرارت از دیواره هدف در جت چندگانه نشان دادند که با افزایش سرعت جریان، نرخ انتقال حرارت و عدد ناسلت بر روی دیواره افزایش می یابد.

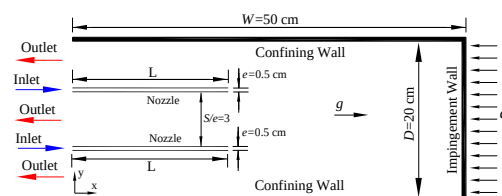
همانگونه که گفته شد جت های نوسانی خودتحریک و جت های دو و یا چندگانه می توانند ویژگی های جریان و نرخ انتقال حرارت از دیواره هدف را تحت تاثیر قرار دهند. بنابراین جهت بهره مندی از ویژگی های جت های دوگانه و نوسانی خودتحریک، به صورت همزمان، جت های خودتحریک نوسانی دوگانه مورد بررسی قرار گرفته است. در این راستا مساواتی و همکاران [۱۳]، جت های

نوسانی خودتحریک دوگانه را در $Re=27000$ تحت فواصل مختلف نازل ها از یکدیگر مورد مطالعه قرار دادند. نتایج بررسی نشان داد که در فواصل کم نازل ها جریان خروجی از آنها در هم ادغام شده و به صورت همزمان بین دیواره های محفظه نوسان می کنند. با افزایش فاصله نازل ها از یکدیگر، جریان جت ها در هم ادغام نشده و به صورت مجزا در محفظه نوسان می کنند. جعفریان و همکاران [۱۴]، با بررسی فرکانس نوسان و انتقال حرارت از دیواره برخوردی در جت نوسانی خودتحریک دوگانه نشان دادند که در یک سرعت ورودی ثابت، با افزایش فاصله نازل ها از یکدیگر فرکانس نوسان تغییر چندانی نداشته و عدد ناسلت بر روی دیواره برخوردی کاهش خواهد یافت. از سوی دیگر با افزایش سرعت جریان ورودی فرکانس نوسان جریان به صورت خطی افزایش می یابد. جعفریان و همکاران [۱۵ و ۱۶] در مطالعات دیگر، تاثیر جریان ورودی متقارن و نامتقارن را بر فرکانس نوسان بررسی کردند. آنها نشان دادند که در هر دو حالت، در فواصل کم نازل ها، جریان خارج شده از آنها در هم ادغام می شوند.

با بررسی مطالعات انجام شده در خصوص جت نوسانی خودتحریک دوگانه مشخص شده است که تاثیر شار حرارتی برخوردی به دیواره انتهایی محفظه بر فرکانس نوسان، زاویه انحراف جریان و انتقال حرارت از دیواره برخوردی مورد بررسی قرار نگرفته است. بنابراین در مطالعه حاضر، عملکرد حرارتی، فرکانس نوسان و زاویه انحراف جریان در داخل محفظه جت نوسانی خودتحریک دوگانه تحت تاثیر شارهای حرارتی مختلف (W/m^2 ۵۰۰۰-۱۰۰۰۰) به صورت عددی بر اساس روش های عددی حجم محدود و کد اپن فوم مورد ارزیابی قرار می گیرند. در این مطالعه فاصله نازل ها از یکدیگر ثابت و معادل $S=1/5$ cm فرض شده است. بر اساس نتایج مطالعات پیشین، در این فاصله جریان خروجی از نازل ها در هم ادغام شده و مانند یک جریان واحد بین دیواره های محفظه نوسان می کنند [۱۶-۱۴].

۲ توصیف مساله

در این مطالعه جهت بررسی تاثیر شار حرارتی برخوردی به دیواره انتهایی محفظه بر فرکانس نوسان جریان و عملکرد حرارتی جت دوگانه خودتحریک، معادلات حاکم بر جریان سیال به صورت عددی مورد بررسی قرار می‌گیرند. در شکل ۱ طرحواره این نوع جت به همراه ابعاد هندسی، راستای شتاب گرانش، g و شار حرارتی برخوردی به دیواره انتهایی، q نشان داده شده است.



شکل ۱. طرحواره جت دوگانه خودتحریک به همراه ابعاد هندسی، شتاب

گرانش، g و شار حرارتی برخوردی، q

۳ معادلات حاکم و شرایط مرزی

در حالت کلی، معادلات حاکم بر مساله حاضر، معادلات گذرای ناویر-استوکس متوسط گیری شده رینولدز ($URANS^1$) بوده که به صورت اندیسی ذیل ساده می‌شوند:

معادله پیوستگی:

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

معادله ممنتوم:

$$\frac{\partial \rho u_i}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_i u_j}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) \quad (2)$$

$$\tau_{ij} = -\rho \overline{u'_i u'_j} = 2\mu_t S_{ij}$$

معادله انرژی:

$$\frac{\partial(\rho c_p T)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho c_p u_i T)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x_j} \right) - \tau_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + S_i \quad (3)$$

در این روابط u_i و x_i به ترتیب معرف مؤلفه‌های سرعت و محورهای مختصات، ρ و p نشان دهنده چگالی و فشار سیال عامل بوده و دمای سیال به همراه ویسکوزیته دینامیکی با T و μ معرفی می‌شوند. همچنین t و S_{ij} نیز نشان دهنده زمان و تانسور کرنش سیال، λ و c_p معرف ضریب انتقال حرارت رسانشی و ظرفیت گرمایی ویژه، S_i معرف منبع انرژی هستند [۱۷].

در مطالعه حاضر، آثار آشفتگی جریان با استفاده از مدل آشفتگی SST k- ω مدل می‌شوند. این مدل به عنوان یکی از موفق ترین مدل‌های آشفتگی در جریان‌های نوسانی شناخته می‌شود [۱۸]. معادله انتقال انرژی جنبشی آشفتگی، k و نرخ اضمحلال انرژی جنبشی آشفتگی، ω به صورت ذیل بیان می‌شوند [۱۷]:

معادله انتقال انرژی جنبشی آشفتگی:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + \tau_{ij} S_{ij} - \frac{2}{3} \rho k \frac{\partial \rho u_i}{\partial x_i} - \beta^* \rho k \omega \quad (4)$$

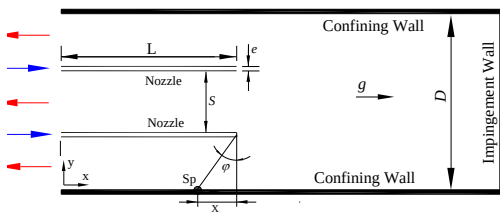
نرخ اضمحلال انرژی جنبشی آشفتگی:

$$\frac{\partial(\rho \omega)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \omega u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_{\omega,1}} \right) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right) + \gamma_2 \left(2\rho S_{ij} S_{ij} - \frac{2}{3} \rho \omega \frac{\partial \rho u_i}{\partial x_i} \right) - \beta_2 \rho \omega^2 + 2 \frac{\rho}{\sigma_{\omega,2}} \frac{\partial k_i}{\partial x_k} \frac{\partial \omega}{\partial x_k} \quad (5)$$

¹ Unsteady Reynolds averaged Navier–Stokes equations

$$\tan(\varphi) = \frac{2X}{D-e-S} \quad (۸)$$

در این رابطه X نشان دهنده فاصله افقی بین خروجی نازل و نقطه توقف جریان بوده و D معرف عرض محفظه خواهد بود.



شکل ۲. طرح شماتیک جت دوگانه جهت معرفی زاویه انحراف، φ

۴ شبکه بندی میدان حل

بررسی استقلال نتایج عددی از اندازه شبکه ایجاد شده در میدان حل، از مقایسه فرکانس نوسان جریان در تعداد مختلف گره‌ها استفاده شده است. بدین منظور هفت شبکه مختلف با تعداد گره‌های ۲۰۰۰ الی ۵۵۰۰ در داخل محفظه ایجاد شده و تغییرات فرکانس نوسان بر حسب تعداد گره‌ها در شکل ۳ نشان داده شده است. همانگونه که در شکل ۳ مشاهده می‌شود فرکانس نوسان در تعداد گره‌های بیش از ۴۵۰۰ تغییر چندانی ندارد. پس شبکه بندی میدان حل با استفاده از تعداد گره‌های ۴۹۰۰ انجام خواهد شد. لازم بذکر است که شبکه بندی به نحوی انجام شده است که اندازه سلول‌ها در مجاورت دیواره‌های محفظه و نازل کوچک شده تا علاوه بر محاسبه تغییرات پارامترهای جریان شرط $y^+ \approx 1$ را برای مدل آشفتگی مورد استفاده (SST k- ω) ارضا کند. در شکل ۴ یک نمونه از شبکه ایجاد شده نمایش داده شده است.

در این معادلات γ_2 و $\sigma_{w,2}$ ، β_2^* ، β_2 ، $\sigma_{w,1}$ به عنوان اعداد ثابت شناخته شده که به ترتیب معادل ۲، ۰/۰۸۳، ۰/۰۰۹، ۰/۱۷ و ۰/۴۴ می‌باشند [۱۹]. همچنین μ_t به عنوان ویسکوزیته آشفتگی به صورت ذیل در نظر گرفته می‌شود [۱۷]:

$$\mu_t = \frac{a_1 k}{\max\{a_1 \omega, SF_2\}} \quad (۹)$$

که در آن a_1 معادل ۰/۳۱ بوده و F دارای مقادیر صفر و یک در لایه مرزی و لایه برشی آزاد می‌باشد.

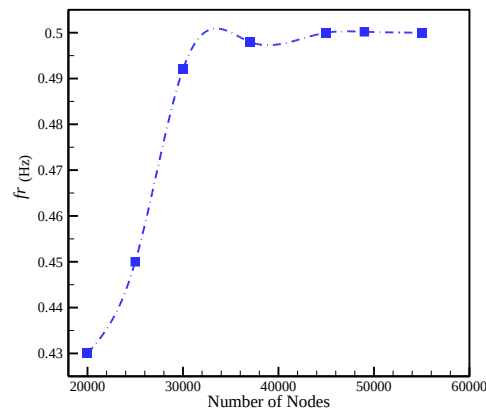
در این مطالعه انتقال حرارت از دیواره برخوردی با استفاده از عدد بدون بعد ناسلت، Nu ارزیابی می‌گردد:

$$Nu = \frac{hD}{k} = \frac{qD}{k(T_w - T_0)} \quad (۱۰)$$

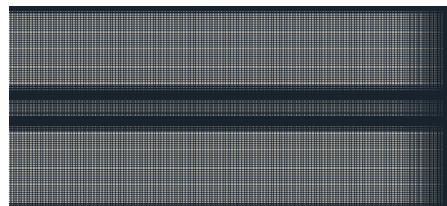
که در آن q نشان دهنده شرط مرزی حرارتی در دیواره برخوردی بوده که برابر $q = -5000 - 10000 \text{ W/m}^2$ می‌باشد. شرط مرزی حرارتی در سایر دیواره‌ها به صورت ادیاباتیک تعریف شده و در خروجی محفظه از شرط مرزی گرادیان صفر برای دما بهره گرفته می‌شود. شرط مرزی سرعت در ورودی نازل‌ها به صورت سرعت ثابت بوده و معادل $U_0 = 4 - 8 \text{ m/s}$ در نظر گرفته شده و شرط مرزی عدم لغزش برای سرعت جریان در دیواره‌ها صادق می‌باشد. در خروجی محفظه از شرط مرزی ورودی-خروجی برای سرعت، نرخ اتلاف ویژه، ω ، و انرژی جنبشی آشفتگی، k استفاده شده است.

همانگونه که گفته شد در این مطالعه زاویه انحراف جریان تحت شرایط مرزی مختلف مورد بررسی قرار گرفته است. در این نوع جت، جریان سیال بین دیواره‌های محفظه نوسان می‌کند. مطابق شکل ۲، زاویه انحراف، φ ، به صورت بیشترین انحراف جریان در برخورد به دیواره‌های محفظه نمایش داده شده است. این زاویه معرف نقطه‌ای بر روی دیواره محفظه بوده (نقطه Sp) که جریان در آن نقطه متوقف شده و به سمت دیواره مقلبل برمی‌گردد. در این نقطه ضریب اصطکاک متوسط صفحه‌ای برابر صفر خواهد شد [۲۰-۲۱]. این زاویه بر اساس شکل ۲ و با استفاده از رابطه ذیل محاسبه می‌شود:

لازم به ذکر است در تحقیقات پیشین، به دلیل عدم بررسی جت‌های دوگانه خودتحریک با هندسه مشابه تحقیق حاضر، اعتبارسنجی نتایج با استفاده از جت تک‌گانه انجام شده است. در شکل ۵ مقایسه نتایج تحلیل حاضر و نتایج گزارش شده توسط یاچاچن و همکاران [۸]، ارائه شده است. در شکل ۵ تغییرات مولفه‌های بی‌بعد سرعت ($u/U_0, v/U_0$) بر حسب زمان بی‌بعد، در نقطه‌ای خاص با مختصات بی‌بعد $(x/e, y/e)$ نشان داده شده است. جهت تحلیل خطای مشاهده شده بین نتایج موجود و داده‌های گزارش شده توسط یاچاچن و همکاران [۸]، از مدل جذر میانگین مربعات خطا^۱ و شاخص میانگین انحراف خطا^۲ استفاده و نتایج حاصل در جدول ۱ ارائه شده است. نتایج حاصل، حاکی از همخوانی مناسب بین نتایج موجود و نتایج ارائه شده توسط یاچاچن و همکاران [۸] دارد.



شکل ۳. تغییرات فرکانس بر حسب تعداد گره‌های موجود در میدان حل



شکل ۴. یک نمونه شبکه ایجاد شده در میدان حل

۵ اعتبارسنجی داده‌ها

در مطالعه حاضر، تحلیل عددی جریان سیال در محفظه جت خودتحریک دوگانه با استفاده از روش‌های عددی حجم محدود و کد این فوم انجام شده است. برای اعتبارسنجی و مقایسه نتایج حاصل با داده‌های تحقیقات پیشین، از نتایج ارائه شده توسط یاچاچن و همکاران [۸]، بهره گرفته شده است. آن‌ها جریان سیال داخل محفظه جت نوسانی خودتحریک تک‌گانه را در $Re=8500$ مورد بررسی قرار دادند. در مطالعه ایشان عدد رینولدز ($Re = \rho U_0 e / \mu$) بر اساس ضخامت نازل، e سرعت سیال ورودی، U_0 تخمین زده شده است. همچنین جریان سیال با دمای 300 K در محفظه نازل تخلیه شده و این در حالی است که دیواره‌های محفظه در دمای 360 K قرار دارند.

² The Mean Bios Error model (MBE)

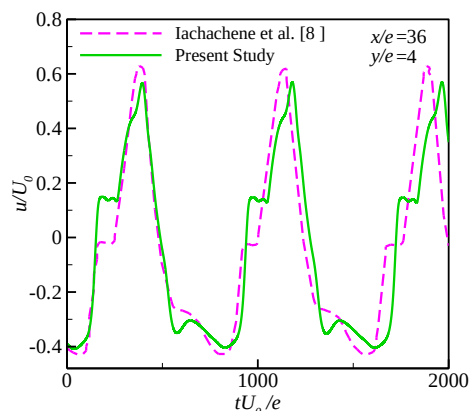
¹ The Root Mean Square Error model (RMSE)

۶ نتایج

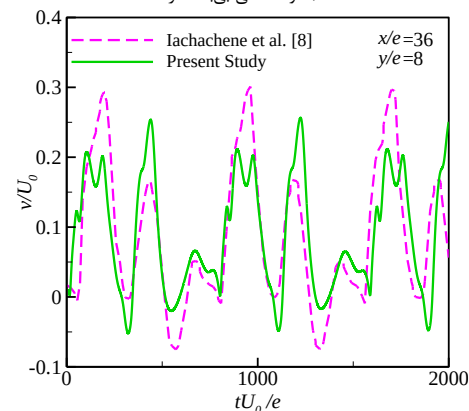
در این مطالعه، تاثیر شار حرارتی برخوردی به دیواره انتهایی محفظه و سرعت جریان ورودی به نازلها بر فرکانس نوسان جریان و عملکرد حرارتی جت دوگانه خودتحریک غیرهمدم با استفاده از روش عددی حجم محدود و کد اپن فوم، مورد ارزیابی قرار گرفته است. در جت مورد مطالعه فاصله نازلها از یکدیگر ثابت بوده ($S/e=3$) و دیواره انتهایی محفظه تحت تاثیر شارهای $q=0-5000-10000 \text{ W/m}^2$ قرار می گیرد و این در حالی است که سرعت سیال ورودی به محفظه دارای مقادیر $U_0=4-8 \text{ m/s}$ می باشد. لازم به ذکر است که عدد رینولدز جریان ورودی، Re به یک نازل، بر اساس سرعت سیال ورودی و ضخامت نازل به ترتیب معادل ۱۳۰۰ و ۲۶۰۰ می باشد.

در جتهای نوسانی خودتحریک دوگانه، بر اساس فاصله نازلها از یکدیگر و سرعت جریان ورودی، نوسان جریان می تواند منظم و یا نامنظم باشد. در نوسان منظم پارامترهای جریان با فرکانس (دوره) مشخص در محفظه، نوسان می کنند. ولی در نوسان نامنظم نوسانات کاملاً تصادفی بوده و امکان تعریف فرکانس برای نوسان وجود ندارد [۱۳]. همانگونه که گفته شد در این مطالعه فاصله نازلها از یکدیگر ثابت بوده ($S/e=3$) و در این شرایط نوسان منظم جریان در سرعتهای مختلف ورودی مشاهده شده است.

در شکل ۶ تغییرات زمانی بزرگی سرعت سیال در نقطه $(x/e, y/e) = (60, 30)$ برای شار حرارتی 5000 W/m^2 در سرعتهای ورودی مختلف نشان داده شده است. مطابق این شکل با افزایش سرعت ورودی به محفظه جت، ماکزیمم مقدار سرعت نوسانی نیز افزایش می یابد.



الف) مولفه افقی بی بعد سرعت



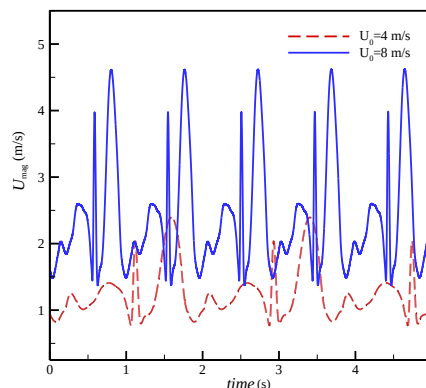
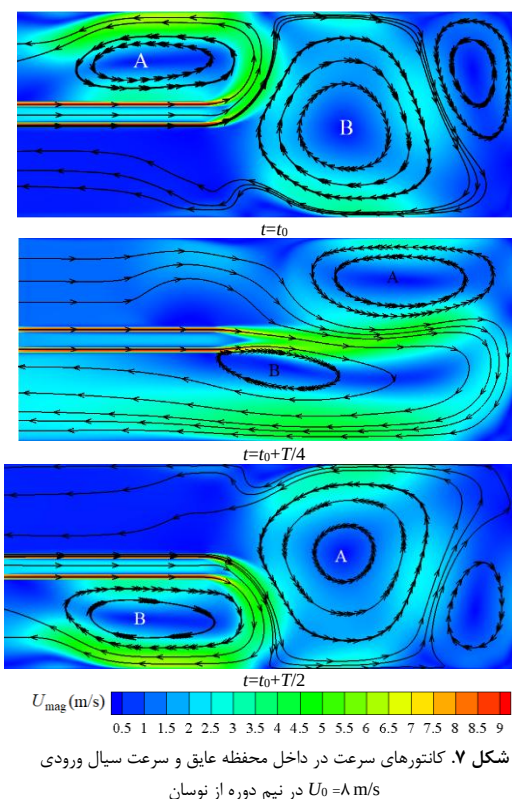
ب) مولفه عمودی بی بعد سرعت

شکل ۵. مقایسه نتایج تحلیل حاضر و نتایج گزارش شده توسط یاچاچن و همکاران [۸]: الف) مولفه افقی بی بعد سرعت، u/U_0 ب) مولفه عمودی بی بعد سرعت v/U_0 بر حسب زمان

جدول ۱: نتایج حاصل از تحلیل خطای مشاهده شده بین نتایج موجود و داده های یاچاچن و همکاران [۸]. با استفاده از مدل های جذر میانگین مربعات

	خطا و شاخص میانگین انحراف خطا	
	u/U_0	v/U_0
RMSE	۰/۰۸۵	۰/۰۵۳
MBE	۰/۰۰۱	۰/۰۰۴

گردابه A شده و این گردابه به سمت انتهای محفظه حرکت کرده که منجر به مکش سیال محیط به داخل محفظه از خروجی بالا می‌شود. با برخورد جریان به دیواره پایین اختلاف فشار بین این دیواره و خروجی بالا ($t=t_0+T/2$ در شکل ۸) منجر به تکرار نوسان جریان بین دیواره‌های محفظه می‌گردد.



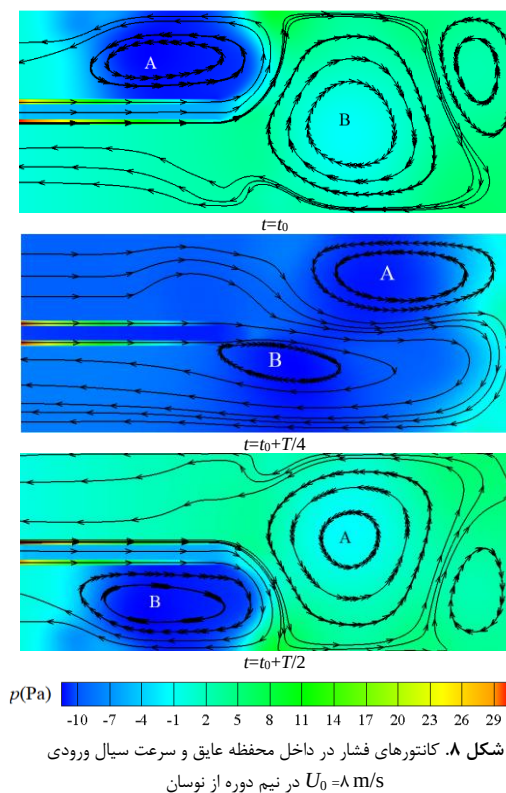
شکل ۸: تغییرات زمانی مولفه افقی سرعت در نقطه $(x/e, y/e) = (0.6, 0.3)$ برای شار حرارتی 5000 W/m^2 و سرعت ورودی مختلف.

در شکل‌های ۷ و ۸ کانتورهای سرعت و فشار در داخل محفظه عایق (شار حرارتی صفر) و سرعت سیال ورودی $U_0 = 8 \text{ m/s}$ در نیم دوره از نوسان به همراه خطوط جریان نشان داده شده است. مطابق شکل ۷ جریان خارج شده از نازل‌ها در هم ادغام شده و به دلیل پدیده کواندا^۱ [۱۵]، به سمت یکی از دیواره‌های محفظه (دیواره بالا در لحظه $t=t_0$) منحرف شده و به آن برخورد می‌کند. (در ادامه در خصوص پدیده کواندا بحث خواهد شد.) جهت انحراف اولیه جریان قابل پیش بینی نبوده و در حالت کلی مشخصه‌های آشفتگی باعث از بین رفتن تقارن جریان و انحراف آن به سمت یکی از دیواره‌ها می‌شود. در اثر انحراف جریان دو گردابه اصلی در داخل محفظه شکل می‌گیرند. این گردابه‌ها با حروف A و B در شکل ۷ نمایش داده شده و به ترتیب در جهت پادساعتگرد و ساعتگرد می‌چرخند. با برخورد جریان به دیواره بالا، یک اختلاف فشار بین این دیواره و خروجی پایین محفظه (لحظه $t=t_0$ در شکل ۸) ایجاد می‌شود. این اختلاف فشار منجر به حرکت جریان‌های ادغام شده به سمت دیواره و خروجی پایین می‌گردد و جریان به دیواره پایین برخورد می‌کند ($t=t_0+T/2$ در شکل ۷). حرکت جریان به سمت پایین باعث حرکت و تقویت

^۱Coanda Phenomenon

یکی از مهمترین مشخصه‌های جریان نوسانی، فرکانس نوسان می‌باشد. در این مطالعه از الگوریتم FFT^2 جهت تعیین فرکانس نوسان جریان استفاده شده است. در این الگوریتم، تغییرات زمانی پارامتر جریانی از حوزه زمان به حوزه فرکانس منتقل شده و اولین قله نمودار حاصل به عنوان فرکانس غالب نوسان معرفی می‌شود. در شکل ۹ تغییرات زمانی مؤلفه افقی سرعت، u در نقطه $(x/e, y/e) = (60, 30)$ برای شار حرارتی 10000 W/m^2 در سرعت ورودی $U_0 = 4 \text{ m/s}$ به همراه نمودار فوریه مربوطه نشان داده شده است. مطابق این شکل فرکانس نوسان مربوطه برابر 0.59 Hz است.

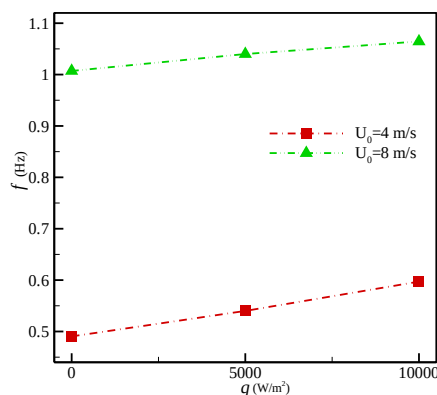
همانگونه که گفته شد انحراف و برخورد جریان به دیواره‌های محفظه تحت تاثیر پدیده کواندا انجام می‌شود. با تخلیه جریان سیال در محیط، جت آزاد شکل می‌گیرد. در جت آزاد به دلیل وجود لایه برشی اطراف جریان، سیال محیط به داخل جریان جت مکیده می‌شود. این رفتار تحت عنوان پدیده درونکشی^۱ سیال شناخته می‌شود. با تخلیه جریان در داخل محفظه، وجود دیواره، پدیده درونکشی را با اختلال روبرو می‌کند. و یک ناحیه کم فشار بین جریان اصلی و دیواره شکل گرفته که منجر به انحراف جریان به سمت دیواره خواهد شد. به انحراف جریان به سمت دیواره، پدیده کواندا گفته می‌شود.



² Fast Fourier Transform Algorithm

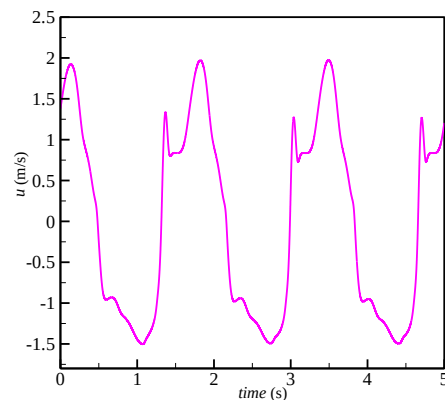
¹ Entrainment phenomenon

سیال عامل در انتهای محفظه، نیروی شناوری در خلاف جهت شتاب گرانش (شکل ۲) ایجاد شده که منجر به تسهیل تخلیه جریان از محفظه خواهد شد. این امر منجر به حرکت سریع تر و راحت تر جریان در محفظه شده و به بیان دیگر فرکانس نوسان جریان افزایش می یابد. از سوی دیگر در یک شار حرارتی ثابت با افزایش سرعت سیال ورودی، فرکانس نوسان نیز افزایش می یابد. به عنوان مثال در شار حرارتی 5000 W/m^2 با افزایش سرعت سیال ورودی از $U_0 = 4 \text{ m/s}$ به $U_0 = 8 \text{ m/s}$ فرکانس نوسان جریان از 0.54 Hz به 1.04 Hz (تقریباً دو برابر) افزایش می یابد. با افزایش سرعت جریان ورودی، ممنوم اولیه جریان افزایش یافته که این امر منجر به تقویت پدیده کواندا شده و انحراف جریان به سمت دیواره ها را تقویت و تسهیل می کند. انحراف سریع تر جریان به سمت دیواره ها منجر به افزایش فرکانس نوسان جریان می شود.

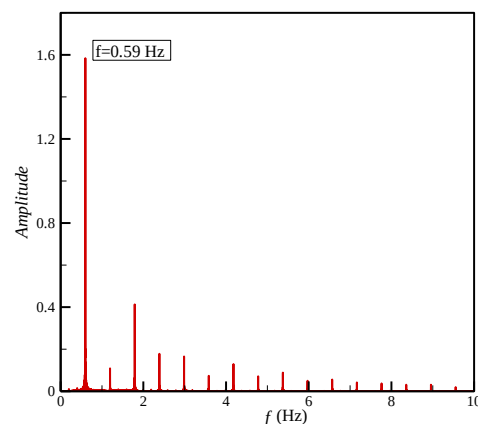


شکل ۱۰. تغییرات فرکانس نوسان جریان، f را بر حسب شار حرارتی برخوردی، q در سرعت های مختلف ورودی، U_0 .

شکل ۱۱ تغییرات زاویه انحراف جریان را بر حسب شار حرارتی برخوردی در سرعت های مختلف ورودی نمایش می دهد. مطابق شکل ۱۱ با افزایش شار حرارتی برخوردی به دیواره انتهایی محفظه، زاویه انحراف جریان تغییرات چشمگیری ندارد. بررسی مطالعات قبل نشان می دهد که در زمان برخورد جریان به یکی از دیواره های محفظه، خروجی مجاور دیوار مقابل و خروجی میانی،



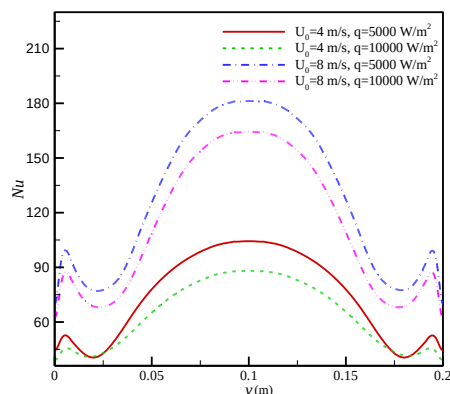
الف) تغییرات زمانی مؤلفه افقی سرعت، u



ب) نمودار فوری

شکل ۹. الف) تغییرات زمانی مؤلفه افقی سرعت، u در نقطه $(30, 60)$ $(x/e, y/e) =$ برای شار حرارتی 10000 W/m^2 در سرعت ورودی $U_0 = 4 \text{ m/s}$ ب) نمودار فوری مربوطه.

شکل ۱۰ تغییرات فرکانس نوسان جریان را بر حسب شار حرارتی برخوردی در سرعت های مختلف ورودی نشان می دهد. همانگونه که در این شکل نشان داده شده است با افزایش شار حرارتی برخوردی به دیواره انتهایی محفظه، فرکانس نوسان جریان به صورت شبه خطی افزایش می یابد. به عنوان مثال با افزایش شار حرارتی از 0 W/m^2 (محفظه همدما) به 10000 W/m^2 فرکانس نوسان در سرعت $U_0 = 4 \text{ m/s}$ از 0.49 Hz به 0.59 Hz افزایش خواهد یافت. با اعمال شار حرارتی بر دیواره انتهایی و گرم شدن



شکل ۱۲. تغییرات مکانی عدد ناسلت متوسط‌گیری شده زمانی، Nu در راستای دیوار برخوردی.

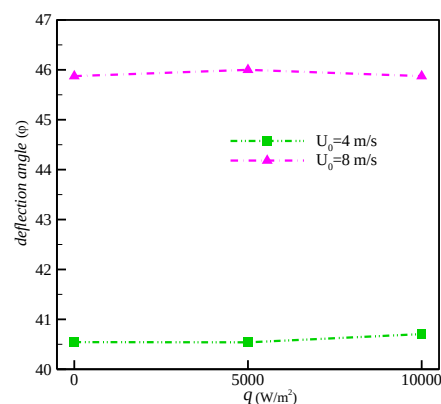
جهت بررسی بیشتر تاثیر شار حرارتی برخوردی به دیواره انتهایی، q و سرعت سیال ورودی به محفظه، U_0 ، مقادیر متوسط عدد ناسلت، $\overline{Nu}$ بر روی دیواره انتهایی در جدول ۲ ارائه شده است.

جدول ۲: اعداد ناسلت متوسط روی دیواره برخوردی، در شارهای حرارتی مختلف، q و سرعت سیال ورودی متفاوت، U_0

$\overline{Nu}$	q (W/m^2)	U_0 (m/s)
۷۴/۴۱	۵۰۰۰	۴
۶۴/۳۹	۱۰۰۰۰	۴
۱۲۷/۸۷	۵۰۰۰	۸
۱۱۳/۵۰	۱۰۰۰۰	۸

همانگونه که در جدول ۲ نشان داده شده است با افزایش سرعت سیال ورودی به محفظه، ناسلت متوسط بر روی دیواره برخوردی افزایش می‌یابد. به عنوان مثال با افزایش سرعت از $U_0 = 4$ m/s به $U_0 = 8$ m/s در شار حرارتی ثابت $q = 10000$ W/m² عدد ناسلت متوسط، $\overline{Nu}$ ، از ۶۴/۳۹ به ۱۱۳/۵۰ افزایش می‌یابد. با افزایش سرعت سیال ورودی، نفوذ جریان به انتهای محفظه بهتر انجام شده و سرعت سیال مجاور دیواره افزایش خواهد یافت که این موضوع منجر به افزایش عدد ناسلت بر روی دیواره برخوردی می‌شود. از سوی دیگر با افزایش شار حرارتی برخوردی، q ، عدد

مانند دهانه ورودی عمل کرده و سیال محیط به داخل محفظه مکیده می‌شود [۱۴]. با توجه به تراکم ناپذیر بودن جریان و محدود شدن جریان خروجی به یک دهانه، ایجاد نیروی شناوری ناشی از اعمال شار حرارتی نمی‌تواند مقدار انحراف جریان را تحت تاثیر قرار دهد. از سوی دیگر با افزایش سرعت جریان ورودی زاویه انحراف افزایش می‌یابد. به عنوان مثال در شار حرارتی 5000 W/m² با افزایش سرعت سیال ورودی از $U_0 = 4$ m/s به $U_0 = 8$ m/s زاویه انحراف جریان از ۴۰٫۵۶ درجه به ۴۶ درجه افزایش می‌یابد. همانگونه که گفته شد با انحراف جریان به سمت دیواره‌ها خروجی‌های محفظه مانند ورودی عمل کرده و سیال محیط به داخل محفظه مکیده می‌شود. با افزایش سرعت ورودی و به همراه آن افزایش حجم سیال مکیده شده به داخل محفظه، سرعت جریان در خروجی افزایش یافته که منجر به افزایش انحراف جریان می‌شود.



شکل ۱۱. تغییرات زاویه انحراف جریان، α بر حسب شار حرارتی برخوردی، q در سرعت‌های مختلف ورودی، U_0 .

در شکل ۱۲ تغییرات مکانی عدد ناسلت متوسط‌گیری شده زمانی، Nu در راستای دیوار برخوردی (انتهای محفظه) در شارهای حرارتی، q و سرعت‌های سیال ورودی متفاوت، U_0 نشان داده شده است.

- با افزایش سرعت سیال ورودی به محفظه عدد ناسلت متوسط بر روی دیواره برخوردی در دامنه متغیرهای مورد بررسی حدود ۱۲٪ افزایش خواهد یافت. افزایش سرعت جریان، منجر به افزایش ممتوم ورودی، نفوذ جریان به انتهای محفظه و اختلاط بهتر جریان در مجاورت دیوار می شود و عملکرد حرارتی (عدد ناسلت) بهبود می یابد.
- با افزایش شار برخوردی به دیواره انتهایی محفظه، عدد ناسلت متوسط بر روی این دیواره کاهش می یابد. با افزایش شار ورودی، اختلاف دمای دیواره محفظه و توده سیال افزایش یافته و این پدیده منجر به کاهش عدد ناسلت متوسط بر روی این دیواره خواهد شد.

منابع

- [1] Andino M Y, Lin J C, Washburn A E, Whalen E. A, Graff E C and Wygnanski I J. Flow Separation Control on a Full-Scale Vertical Tail Model using Sweeping Jet Actuators. AIAA Journal 2015 January 3; 1-14.
- [2] Irfan Khan T, Tajik A R and Parezanovic V. Drag reduction of a generic transport vehicle model using a fluidic oscillator. International Journal of Thermofluids 2022 July 22; 15: 100180.
- [3] Guyot D, Bobusch B, Paschereit C O and Raghu S. Active Combustion Control Using a Fluidic Oscillator for Asymmetric Fuel Flow Modulation. AIAA Journal 2008 July 1; 1-19.
- [4] Kim D J, Jeong S, Park T and Kim D. Impinging sweeping jet and convective heat transfer on curved surfaces. International Journal of Heat and Fluid Flow 2019 July 31; 79: 108458.
- [5] Tomac M N, and Sundstrom E. Adjustable Frequency Fluidic Oscillator with Supermode Frequency. AIAA Journal 2019 May 17; 57: 3349-3359.
- [6] Li Z, Zhou K, Liu Y and Wen X. Jet sweeping angle control by fluidic oscillators with master-slave designs. Chinese Journal of Aeronautics 2020 January 12; 34: 145-162.
- [7] Jaafarian S M, Omidvar O, Zolfaghari S A, Khadem J and Aminzadeh M. Comparative review of flow characteristics and thermal efficiency in wall-naslet متوسط بر روی دیواره برخوردی کاهش می یابد. به عنوان مثال با افزایش شار حرارتی از $q=500 \text{ W/m}^2$ به $q=1000 \text{ W/m}^2$ در سرعت برخوردی ثابت $U_0=8 \text{ m/s}$ عدد ناسلت متوسط، $\overline{Nu}$ ، از $127/87$ به $113/50$ کاهش می یابد. در این شرایط، با توجه به رابطه (۴) با افزایش شار حرارتی و دمای دیواره، تاثیر افزایش دما بر افزایش شار حرارتی غالب شده و عدد ناسلت کاهش می یابد.

۷ نتیجه گیری

در تحقیق حاضر، تاثیر شار حرارتی برخوردی و سرعت جریان ورودی به نازل ها بر فرکانس نوسان، زاویه انحراف جریان و عملکرد حرارتی جت دوگانه خودتحریک غیرهمدم با استفاده از روش عددی حجم محدود و کد اپن فوم، مطالعه شده است. در جت مورد مطالعه فاصله نازل ها از یکدیگر ثابت بوده ($S/e=3$) و شار $q=0-500-1000 \text{ W/m}^2$ به دیواره انتهایی محفظه برخورد کرده و این در حالی است که سرعت سیال ورودی به محفظه دارای مقادیر $U_0=4-8 \text{ m/s}$ می باشد. نتایج بررسی حاکی از آن است که:

- در هندسه مورد بررسی، جریان تخلیه شده در داخل محفظه، به دلیل پدیده کوآندا و گرادیان فشار ایجاد شده در داخل محفظه بین دیواره های محفظه به صورت منظم و با فرکانس ثابت نوسان می کند.
- با افزایش شار حرارتی برخوردی به دیواره انتهایی محفظه، فرکانس نوسان جریان به صورت شبه خطی تا ۲۱٪ در سرعت $U_0=4 \text{ m/s}$ و ۵٪ در سرعت $U_0=8 \text{ m/s}$ نسبت به محفظه عایق افزایش یافته ولی زاویه انحراف تغییرات چندانی ندارد و این در شرایطی است که در یک شار حرارتی ثابت با دو برابر شدن سرعت ورودی فرکانس نوسان دو برابر شده و زاویه انحراف جریان نوسانی تقریباً ۱۳٪ افزایش می یابد.

- [15] Jaafarian S M, Zolfaghari S A, Omidvar A, Khadem J and Aminzadeh M. Numerical investigation of the oscillating behavior and flow field in a dual self-oscillatory jet under dynamic asymmetric boundary condition. *Applied Thermal Engineering* 2025 March 1; 262: 125246.
- [16] Jaafarian S M, Zolfaghari S A, Omidvar A, Khadem J and Aminzadeh M. Study of oscillating flow structure and characterization of merging process in self-excited twin jets: Numerical and analytical approach. *International Communications in Heat and Mass Transfer* 2024 June 4; 156: 107643.
- [17] Rezaei M, Nili-Ahmadabadi M, Tavakoli M, Joulaei A and Yeong Ha M. Heat transfer enhancement on a concave surface using sweeping impinging jets: Comparison of vortex-based and conventional oscillators. *Case Studies in Thermal Engineering* 2024 June 23; 60: 104738.
- [18] Jahanmiri M, Omidvar A and Koopaee M K. A comparative study of turbulence models performance in predicting the frequency of naturally-excited oscillating jet flows. *Tarbiat Modares University Journal* 2013 February 18; 13(2): 1-11.
- [19] Wu Y, Yu S and Zou L. M. Large eddy simulation analysis of the heat transfer enhancement using self-oscillating fluidic oscillators. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 2019 March; 131: 463-471.
- [20] Bensider N, Mataoui A and Aksouh M. Control of self-sustained jet oscillations in 3D thin rectangular cavity. *Chemical Engineering research and design* 2016 November 24; 117: 533-541.
- [21] Zasimova M A, Krasikova A D and Ivanov N G. Control of self-oscillations of a round turbulent jet propagating in a narrow rectangular cavity. *Thermophysics and aeromechanics* 2025 March 12; 31: 791-804.
- attachment self-excited oscillating jets: From cavity jets to fluidic oscillators. *International Communications in Heat and Mass Transfer* 2025 December 11; 175: 110243.
- [8] Iachachene F, Mataoui A and Halouane Y. Numerical Investigations on Heat Transfer of Self-Sustained Oscillation of a Turbulent Jet Flow inside a Cavity. *Journal of Heat Transfer* 2015 October 1; 137: 101702.
- [9] Aminzadeh M, Khadem J, Zolfaghari S A and Omidvar A. Numerical study of nozzle width effect on cooling performance of a turbulent impinging oscillating jet in a heated cavity. *International Communications in Heat and Mass Transfer* 2020 October 1; 118: 104899.
- [10] Aminzadeh M, Khadem J, Zolfaghari S A and Omidvar A. Numerical Investigation on Oscillation Behavior of a Non-isothermal Self-excited Jet in a Cavity: The Effects of Reynolds Number and Temperature Differences. *International Journal of Engineering* 2020 March 12; 35: 1193-1201.
- [11] Sarkar I, Chakraborty S, Ashok A, Sengupta I, Pal S K and Chakraborty S. Comparative study on different additives with a jet array on cooling of a hot steel surface. *Applied Thermal Engineering* 2018 March 28; 137: 154-163.
- [12] Gharraei R, Vejdani A, Baheri S and Davani A A. Numerical investigation on the fluid flow and heat transfer of non-Newtonian multiple impinging jets. *International Journal of Thermal Sciences* 2016 April 19; 104: 257-265.
- [13] Mosavati M, Balachandar R and Barron R M. Characteristics of self-oscillating twin jets. *Physics of Fluid* 2021 March 9; 33: 035129.
- [14] Jaafarian S M, Zolfaghari S A, Omidvar A, Khadem J and Aminzadeh M., Comparative evaluation of oscillatory behavior and cooling performance of twin and single self-excited jets in a confined heated enclosure. *Applied Thermal Engineering*, 236, September 2020 September 9; 236: 121567.