مجله مهندسی مکانیک، شماره پیاپی ۶۷، جلد ۴۴، شماره ۱، بهار و تابستان ۱۳۹۳، صفحه ۵۳-۵۸

مطالعه عددی و تجربی برخورد یک جت مستطیلی با یک صفحه تخت در راستای عمود بر محور

علیرضا تهور* استادیار مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد شیراز، گروه مهندسی مکانیک، شیراز
محمد مهدی پورجم دانشجوی دکتری مهندسی مکانیک، دانشگاه هرمزگان، گروه مهندسی مکانیک، بندرعباس
شاهین حیدری دانشجوی دکتری مهندسی مکانیک، دانشگاه هرمزگان، گروه مهندسی مکانیک، بندرعباس

چکیده

در این تحقیق تحلیل تجربی و عددی بر روی مشخصات جریان آشفته ناشی از تماس جت با صفحه صاف انجام شده است. هدف از این تحقیق بررسی رفتار جت برشی است. در مدل عددی از روش حجم محدود و مدل آشفتگی k-ε realizable استفاده می شود. توزیع فشار و تنش برشی بر روی صفحه صاف برای فواصل مختلف میان صفحه و نازل مشخص شده است. مقایسه میان نتایج عددی و اندازه گیری های تجربی نشان می دهد که نتایج عددی از صحت کامل برخوردار بوده و در صورتی که فاصله افقی میان دهانه نازل و صفحه مسطح ۷/۸۴ برابر طول مشخصه جت باشد، تنش برشی برروی صفحه مسطح حداکثر مقدار خود را خواهد داشت. بنابراین در این حالت جت بیشترین کارایی خود در عمل برش را خواهد داشت.

واژه‌های کلیدی: جت تماسی، جت مستطیلی، جت آشفته، توزیع تنش برشی، صفحه مسطح

Numerical and Experimental Study of Perpendicular Impinging of Rectangular Air jet onto a Flat Plate

A. R. Tahavvor Assistant Professor of Mechanical Engineering, Dept. of Mechanical Engineering, Shiraz Branch, Islamic Azad University, Shiraz
M. M. Poorjam Ph.D. Student of Mechanical Engineering, Dept. of Mechanical Engineering, Hormozgan University, Bandar-Abbas
Sh. Heidari Ph.D. Student of Mechanical Engineering, Dept. of Mechanical Engineering, Hormozgan University, Bandar-Abbas

Abstract

In this study, an experimental and numerical analysis based on computational fluid dynamics is done to study the flow characteristics of a turbulent compressible jet impingement on a flat plate. The purpose is to investigate the behavior of cutting gas jets. In numerical model a finite volume approach with realizable k-ε model is used. Pressure and shear stress distribution over the flat plate are determined for various distances between nozzle and plate. Comparisons between numerical results and experimental measurements validate the accuracy of numerical results. Obtained results show that if the horizontal distance between the nozzle outlet and flat plate is 7.84 times of characteristic length of jet, the shear stress on the flat plate has maximum value. Therefore, in this case jet has a maximum performance in cutting procedure.

Key words: Impinging jet, Rectangular jet, Turbulent jet, Shear stress distribution, Flat plate

*نویسنده مکاتبه کننده، آدرس پست الکترونیکی: tahavvor@iaushiraz.ac.ir

۱- مقدمه

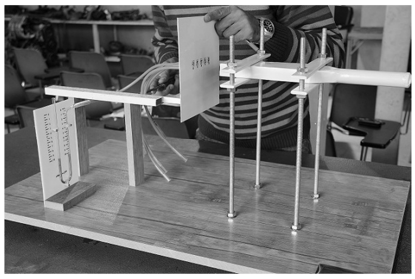
جت‌های برخوردی در بسیاری از تجهیزات کاربردی از قبیل رنگ آمیزی سطوح ، خنک کاری و گرم کاری و جدا کردن رسوبات از روی سطوح جامد، برش قطعات، خشک کردن، صنایع غذایی، الکترونیکی، شیمیایی و ... استفاده می‌شوند.

به علت اهمیت بالای انتقال گرمای برخوردی در صنعت، مطالعات زیادی به صورت عددی و تجربی انجام شده است. تأثیرات انتقال گرمای جت‌های تماسی به صورت گسترده‌ای توسط بسیاری از محققان مانند اکار [۱]، علوی تبریزی و تهور [۲]، چتوپادهیای [۳]، سنتر [۴] و دوان و همکاران [۵] مورد مطالعه قرار گرفته است. بهنیا و همکاران [۶] مطالعه ای عددی را بر روی جت برخوردی در جریان‌های رینولدز بالا با مدل‌های مختلف آشفتگی انجام دادند. پلات و همکاران [۷] نتایج تجربی و عددی را برای انتقال گرما در جت‌های برخوردی مقایسه کردند. موجومدار و ونگ [۸] با مقایسه پنج مدل رینولدز پایین نشان دادند که کاهش مقیاس طول آشفتگی در نزدیکی دیواره میتواند پیش بینی عدد ناسلت موضعی را به داده‌های تجربی نزدیک کند. اخیرا نیز تاثیر مدل توربولانس در شبیه سازی جت‌ها مورد استفاده قرار گرفته است [۹ و ۱۰]. همچنین هندسه و ابعاد نازل نیز در برخی مطالعات جهت انتخاب بهترین وضعیت مورد بررسی قرار گرفته است [۱۱ الی ۱۳]. اما با مطالعه ای بر تحقیقات پیشین در رابطه با جت های برخوردی مشاهده می شود که اغلب بررسی میدان جریان یک جت بر خوردی دایره ای بر روی یک صفحه تخت یا متحرک صورت گرفته و تاثیر جت های تماسی بر تنش برشی به ندرت مورد توجه قرار گرفته است. لذا در این بررسی میدان جریان آشفته جت مستطیل شکل که با صفحه مسطح برخورد می کند مورد مطالعه قرارگرفته و فشار و میزان تنش برشی برروی صفحه مسطح برای فواصل مختلف میان نازل و صفحه مسطح محاسبه شده است.

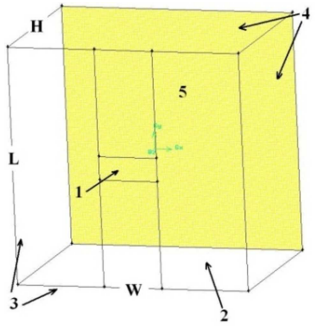
۲- تعریف مسئله

اندازه صفحه استفاده شده در این کار ۲۰سانتی‌متر ×۲۰ سانتی‌متر است و طول عرض دهانه خروجی شیپوره به ترتیب ۵ و ۲ سانتی متر می باشد (شکل ۱ و ۲).

سرعت هوای خروجی از شیپوره ۲۱۰ متر بر ثانیه در نظر گرفته شده است. با توجه به دمای هوای مورد استفاده برای جت (در حدود ۲۰ درجه سانتیگراد)، عدد ماخ حدود ۰٫۶۱ می‌باشد. بنابراین جریان کاملا تراکم پذیر می باشد. برخی از منابع مشخصات طولی جت مستطیلی را کوچکترین اندازه دهانه شیپوره می‌دانند [۱۴].



شکل ۱- نمای کلی دستگاه آزمایش



شکل ۲ - میدان حل عددی

بنابراین در اینجا مشخصه طولی شیپوره D=2cm است. برخی از منابع عدد رینولدز بحرانی را برای جتهای برخوردی در حدود ۱۰۰۰[۱۵] ۳۰۰۰ [۱۶ و ۱۷] و یا ۱۴۰۰۰[۱۸] ذکر کرده‌اند. در کار حاضر عدد رینولدز حدوداً ۲۸۰۰۰ است و جت به طور کامل آشفته است. نازل در جلوی صفحه در فواصل مختلف از صفحه نصب شده (۱۰D و ۸٫۵D، ۷٫۵D، ۵٫۰D، L = ۲٫۵D) و در تمامی حالات فشار و تنش برشی برروی صفحه تخت تعیین شده است.

۳- معادلات حاکم

معادله بقای مومنتوم حالت پایا به صورت زیر است:

$$\nabla \cdot \left(\rho \vec{V}\vec{V}\right) = -\nabla p + \nabla \cdot \tau \qquad (۱)$$

که در آن

$$\tau = \mu\left[\left(\nabla \vec{V} + \nabla \vec{V}^{T}\right) - \frac{2}{3}\nabla \cdot \vec{V} I\right] \qquad (۲)$$

$$\vec{V} = u\vec{i} + v\vec{j} + w\vec{k} \qquad (۳)$$

همچنین معادله‌ی پیوستگی نیز مورد استفاده قرار می‌گیرد.

$$\frac{\partial \rho u_j}{\partial x_j} = 0 \qquad (۴)$$

در معادلات فوق p، ρ، τ و μ به ترتیب فشار، چگالی، تنش برشی و لزجت می‌باشد. همچنین u، v و w نشان دهنده مولفه های بردار سرعت می‌باشند. بسیاری از مطالعات گذشته، عدم کارایی مدل k-ε استاندارد را در مسائل جریان جت نشان

داده‌اند [۱۹ الی ۲۱]، اما برخی از آنها نشان می‌دهند که مدل realizable k-ε برای این هدف مدلی مناسب است [۲۲ و ۲۳]. بنابراین در این تحقیق از این مدل با معادلات ذیل بعنوان معادلات حاکم بر انتقال انرژی جنبشی آشفتگی k و نرخ اتلاف آشفتگی ε [۲۴] استفاده شده می‌باشد:

$$\frac{\partial}{\partial x_j}\left(\rho k u_j\right)=\frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\mu+\frac{\mu_t}{\sigma_k}\right)\frac{\partial k}{\partial x_j}\right]+P_k+P_b-\rho\varepsilon-Y_m+S_k \quad (۵)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j}\left(\rho\varepsilon u_j\right)=\frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\mu+\frac{\mu_t}{\sigma_k}\right)\frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j}\right]+\rho C_1 S_\varepsilon+\rho C_2\frac{\varepsilon^2}{k+\sqrt{\nu\varepsilon}}+C_{1\varepsilon}\frac{\varepsilon}{k}C_{3\varepsilon}P_b+S_\varepsilon$$

۴- روش محاسباتی

میدان حل عددی مطابق شکل ۲ به صورت سه بعدی در نظر گرفته شده و شرایط مرزی به شرح ذیل می‌باشد: ۱- ورودی سرعت، ۲- مرز جلو: فشار برابر با فشار محیط، ۳و۴- مرزهای جانبی: فشار برابر با فشار محیط، ۵- مرز پشتی: دیوار صلب. در فرآیند حل با استفاده از روش حجم محدود، در ۱۰۰ تکرار اول از اسکیم گسسته سازی upwind مرتبه ۱ و در سایر تکرارها جهت حصول به جواب واقع گرایانه از اسکیم گسسته-سازی upwind مرتبه ۲ استفاده می‌شود. همچنین وابستگی سرعت و فشار با الگوریتم معروف SIMPLE انجام می‌پذیرد [۲۵]. دلیل عدم استفاده از اسکیم مرتبه ۱ در تمام تکرارها دیفیوز بودن این اسکیم می‌باشد. در دهانه شیپوره نیز از پروفیل سرعت یکنواخت به عنوان شرایط مرزی استفاده می-شود [۲۶].

$$U = U_{in} \quad (۶)$$

برای شرط مرزی انرژی جنبشی آشفتگی خواهیم داشت:

$$k = k_{in} = iU_{in}^2 \quad (۷)$$

مقدار شدت آشفتگی (i) با توجه به مرجع [۲۶] و با استفاده از رابطه (۸) برابر با ۰/۰۳۳ درنظر گرفته شده است.

$$I = 0.16(Re_{DH})^{-1/8} \quad (۸)$$

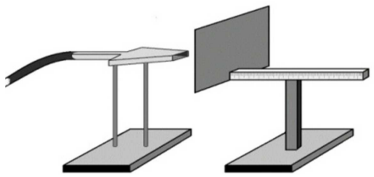
با در نظر گرفتن شرط عدم لغزش روی دیوارها، معیار همگرایی برای معادلات مومنتوم و تصحیح فشار 10^{-6} و برای معادله آشفتگی 10^{-4} تعیین می شود. همچنین از هوا به عنوان سیال عامل استفاده می‌شود. برای به دست آوردن حل مستقل از شبکه، شبکه‌های محاسباتی با اندازه های گوناگون آزمایش شده‌اند. مشاهده شد که ابعاد ۸۰×۱۶۰×۱۶۰ روی صفحه برای رسیدن به حل مستقل از شبکه مناسب می باشد. لازم به ذکر است که مقدار بیشینه فشار استاتیک برروی صفحه به عنوان پارامتر استقلال از شبکه استفاده می شود. نتایج این مطالعه در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول ۱- نتایج مطالعه استقلال از شبکه

شماره شبکه	ابعاد شبکه L×W×H	مقدار بیشینه فشار استاتیک بر روی صفحه (Pa)
1	100×100×50	125600
2	120×120×60	126200
3	160×160×80	127000
4	200×200×100	127000

۵- دستگاه آزمایش

طرحواره دستگاه آزمایش در شکل ۳ نشان داده شده است. پنج حفره هم اندازه بر روی صفحه برای اندازه‌گیری فشار تعبیه شده که حفره‌های متقارن برای بررسی تکرار پذیری آزمایش استفاده شده‌اند.



شکل ۳- طرحواره دستگاه آزمایش

۶- روش انجام آزمایش

آزمایش‌های تجربی در دو مرحله ۱- فاصله بین دهانه خروجی از شیپوره تا لبه جلوی استوانه برابر با ۲/۵ برابر قطر و ۲- فاصله برابر با ۵ برابر قطر انجام شده است. در این آزمایشات شیپوره دقیقاً مقابل صفحه قرار داده می‌شود و برای ۵ سوراخ ایجاد شده روی صفحه اختلاف فشار خوانده و ثبت می شود.

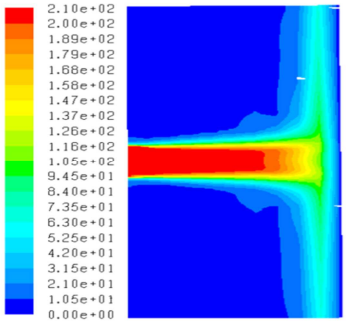
۷- آنالیز خطا و عدم قطعیت

در طول آزمایش فاکتور های زیادی بر صحت آزمایش تأثیر گذارند. خطاها از منابع مختلفی ایجاد شده و این مسئله نیازمند بررسی عدم قطعیت هر کمیت می باشد. جریان هوا با جریان-سنج با خطای اندازه‌گیری ۱± لیتر بر ثانیه اندازه‌گیری می‌شود. همچنین فشار با مانومتری U شکل با خطای ۵± سانتیمتر جیوه اندازه‌گیری می شود. عدم قطعیت این فرآیندها به ترتیب ۲٪ و۹ ٪ است. با استفاده از جمع فیثاغورث عدم قطعیت کل حدود ۶/۷ ٪ بدست می‌آید.

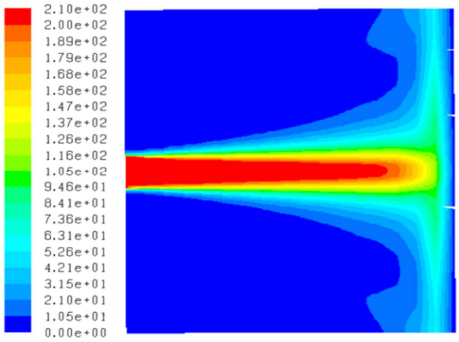
۸- نتایج

در شبیه سازی عددی پارامتر مورد نظر میزان تنش‌های برشی می‌باشد. از آنجا که اندازه‌گیری تجربی فشار به مراتب ساده‌تر از تنش برشی است لذا از اندازه‌گیری تجربی فشار جهت تأیید نتایج عددی استفاده شده و مقادیر تنش برشی از نتایج عددی مورد استفاده قرار گرفته است. شکل‌های ۴ و ۵ به

ترتیب نمودارهای تراز سرعت عمود به صفحه را برای فواصل ۵ و ۸/۵ برابر طول مشخصه جت نشان می‌دهند.

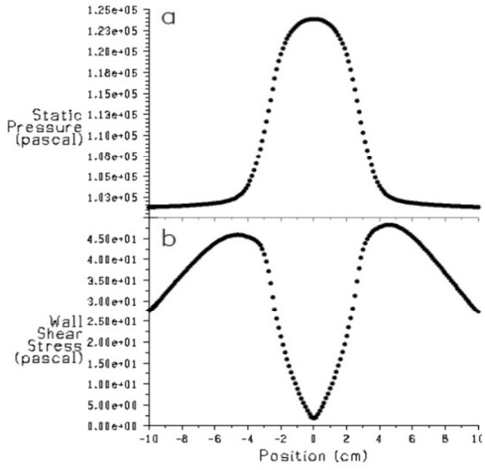


شکل ۴- نتایج عددی مربوط به کانتور سرعت عمود بر صفحه تخت در فاصله 5D

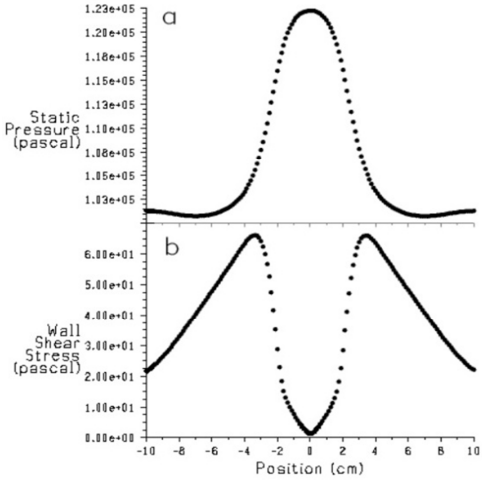


شکل ۵- نتایج عددی مربوط به کانتور سرعت عمود بر صفحه تخت در فاصله 8/5D

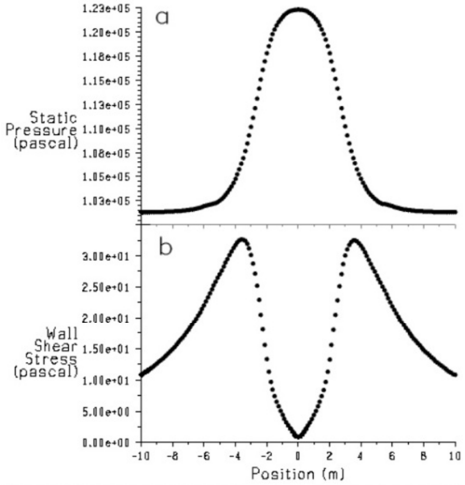
همچنین شکل‌های ۶ الی ۸ فشار استاتیک و توزیع تنش برشی روی محور مرکزی صفحه را نشان می‌دهد. این شکل‌ها نشان می دهند که هنگامی که فاصله نازل از صفحه زیاد می-شود ناحیه متأثر از تنش برشی به سمت مرکز صفحه حرکت می‌کند.



شکل ۶.- نتایج عددی a) فشار استاتیکی b) تنش برشی برای L=۲/۵D

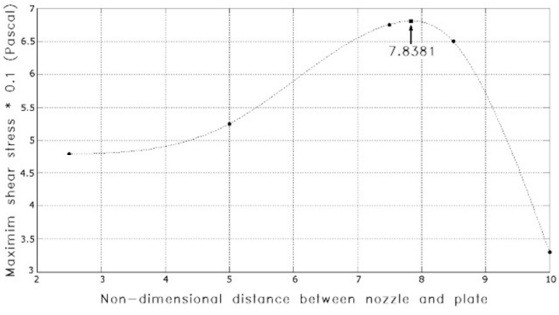


شکل ۷- نتایج عددی a) فشار استاتیکی b) تنش برشی برای L=۷/۵D



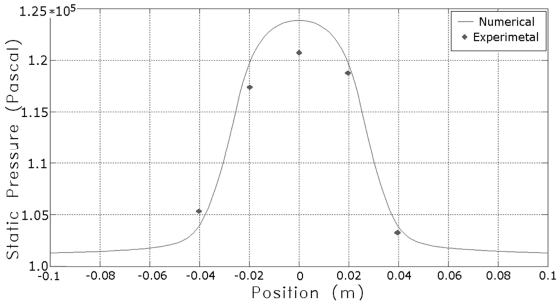
شکل ۸- نتایج عددی a) فشار استاتیکی b) تنش برشی برای L=۱۰D

در شکل ۹ بیشینه تنش‌های برشی حاصل از شبیه سازی عددی در فواصل مختلف نازل از صفحه بصورت نقاط مشخص شده می باشد. با استفاده از برازش منحنی بین این نقاط چنین مشاهده می‌شود که هنگامی که فاصله بین نازل و صفحه ۷/۸۴D باشد، جت بیشینه کارایی خود را در روال تمیز کردن دارا است.

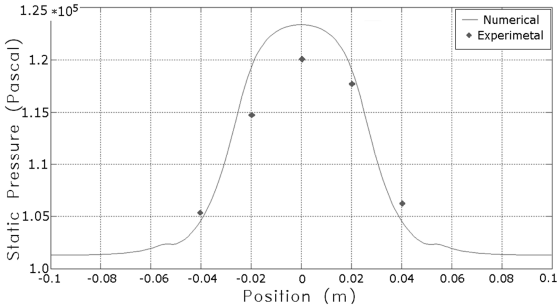


شکل ۹- تغییرات بیشینه تنش برشی نسبت به فاصله میان نازل و صفحه

شکل های ۱۰ و ۱۱ نیز مقایسه میان نتایج تجربی و عددی را به منظور اثبات صحت نتایج عددی نشان می‌دهند. همخوانی خوبی میان اطلاعات عددی و تجربی دیده می‌شود. همچنین اندازه‌گیری نقاط اول و نقاط دوم و چهارم صحت تکرار پذیری روال آزمایش را تأیید می‌کند. مقایسه نتایج نشان می‌دهد هر چه از مرکز صفحه دور می‌شویم همخوانی نتایج عددی با نتایج تجربی بهتر می‌گردد. دلیل آن، این امر می‌باشد که در سوراخ-هایی که روی صفحه تخت و روبه‌روی جت قرار گرفته‌اند، افت فشار اتفاق افتاده که این اثر با دور شدن از وسط صفحه و تبدیل شدن جت به جت دیواره کاهش می‌یابد. همچنین ضریب همبستگی بین الگوهای تجربی و عددی در آزمایش اول و دوم بترتیب برابر با ۹۹٫۴ و ۹۸٫۴ درصد می‌باشد. همچنین با بررسی نتایج مشاهده می شود که با ۴ برابر شدن فاصله جت از صفحه تخت بیشینه فشار به میزان ۱٫۶ در صد دچار افت شده و کاهش می‌یابد. همچنین با بررسی تنش‌های برشی بدست آمده از تحلیل عددی مشاهده می‌گردد که با افزایش فاصله جت از صفحه، ناحیه‌ای که تحت تأثیر بیشینه تنش برشی قرار دارد به سمت مرکز صفحه متمایل می‌شود.



شکل ۱۰- توزیع فشار استاتیکی برای L=۲٫۵D



شکل ۱۱- توزیع فشار استاتیکی برای L=۵٫۰D

۹- نتیجه گیری

- مشاهده گردید که بیشینه تنش برشی روی صفحه تخت تا فاصله ۷٫۸۴ برابر طول مشخصه ابتدا افزایش و بعد از این فاصله کاهش می‌یابد. لذا در فاصله مذکور، جت بیشترین اثر برشی را بر روی صفحه تخت خواهد داشت.
- با بررسی تنش برشی مشاهده می‌گردد که با افزایش فاصله جت از صفحه، ناحیه‌ای که تحت تأثیر بیشینه تنش برشی قرار دارد به سمت مرکز صفحه متمایل می‌شود.
- با ۴ برابر شدن فاصله جت از صفحه تخت بیشینه فشار به میزان ۱٫۶ در صد دچار افت شده و کاهش می‌یابد.

مراجع

[1] Acar, H. & Atli, V., "An Experimental Investigation of a Rectangular Jet Impinging on a Flat Surface Obliquely", ICAS Congress, UK, 2000.

[2] Alavi, S.P. & Tahavvor, A.R.," Numerical and experimental study of jet impingement onto a circular cylinder with/without offset", Proc. of 10th Annual Int. Conf. Mech. Eng., ISME, K.N. Toosi University of Technology, 2002.

[3] Chattopadhyay, H.K. & Saha, S., "Turbulent Flow and Heat Transfer from a Slot Jet Impinging on a Moving Plate", Int J Heat Fluid Fl, vol. 24, pp. 685-697, 2003.

[4] Senter J., Solliec C., "Flow Field Analysis of a Turbulent slot Air Jet Impinging on a Moving Flat Surface", Int J Heat Fluid Fl, vol.28, pp.708-719, 2007.

[5] Dewan A., Dutta R., Srinivasan B., "Recent trends in computation of turbulent jet impingement heat transfer", Heat Transfer Eng, vol.33, pp.447-460, 2012.

[6] Behnia M, Parneix S, Shabany Y, Durbin PA. "Numerical study of turbulent heat transfer in confined and unconfined impinging jets", Int J Heat Fluid Fl, vol. 20, pp. 1–9, 1999.

[7] Plat S, Huang B, Mujumdar AS, Douglas WJ. "Numerical flow and heat transfer under impinging jets", Annual Review of Num Fluid Mechs Heat Trans., vol. 2, pp. 157–197, 1989.

[8] Wang SJ, Mujumdar AS. "A comparative study of five low Reynolds number k–ε models for impingement heat transfer", Applied Thermal Engineering, vol. 25, pp. 31–44, 2005.

[9] Meslem A., Sobolik V., Bode F., Sodjavi K., Zaouali Y., Nastase I., Croitoru C., "Flow dynamics and mass transfer in impinging circular jet at low Reynolds number. Comparison of convergent and orifice nozzles", International Journal of Heat and Mass Transfer, vol. 67, pp. 25-45, 2013.

[10] Xu B., Wen J., Volkov K. "Large-eddy simulation of vortical structures in a forced plane impinging jet", Europ J Mech - B/Fluids, vol. 42, pp. 104-120, 2013.

[11] Imbriale M., Ianiro A., Meola C., Cardone G., "Convective heat transfer by a row of jets impinging on a concave surface", Int J Thermal Sci., vol. 75,pp. 153-163, 2014.

[12] Dou R., Wen Z., Zhou G., Liu X., Feng X., "Experimental study on heat-transfer characteristics

of circular water jet impinging on high-temperature stainless steel plate", Applied Thermal Engineering, Vol. 62(2), pp. 738-746, 2014.
[13] Arthurs D., Ziada S., "Effect of nozzle thickness on the self-excited impinging planar jet", J Fluids Struc, In Press, Corrected Proof, 2013.
[14] Alnahhal, M.H., "Turbulent Rectangular Jets", PhD thesis, Dept. of Mechanical Engineering and Aeronautics University of Patras, Greece, 2010.
[15] Vickers, J., "Heat transfer coefficient between fluid jets and normal surfaces", Industrial Eng. Chem., vol. 51, pp. 967-972, 2008.
[16] McNaughton, K.J., Sinclair, C.G., "Submerged jets in short cylindrical flow vessels", J. Fluid Mechanics, vol. 25, pp. 367-375, 1996.
[17] Cederwell, K., "The initial mixing on jet disposal into a recipient", Publ. nos. 14 and 15, Division of Hydraulics, Chalmers University of Technology, Goteborg, Sweden, 1963.
[18] Gordon R., Cobonpue J., "Heat transfer between a flat plate and jets impinging on it", Int Develop Heat Transf, vol. 3, pp. 454-460, 1962.
[19] Barata, J.M.M., Durào, D.F.G., Heitor, M.V., McGuirk, J.J., "The turbulence characteristics of a single impinging jet through a cross-flow", Exp. Therm. Fluid Sci., vol. 5, pp. 487-498, 1992.
[20] Craft, T., Graham, L., Launder, B., "Impinging jet studies for turbulence model assessment – II. An examination of the performance of four turbulence models", Int. J. Heat Mass Transf., vol. 36, pp. 2685-2697, 1993.
[21] Nishino, K. & Samada, M. & Kasuya, K. & Torii, K., "Turbulence statistics in the stagnation region of an axisymmetric impinging jet flow", Int. J. Heat Fluid Flow, vol. 17, pp. 193-201, 1996.
[22] Fernández, J.A., Elicer-Cortés, J.C., Valencia, A., Pavageau, M., Gupta, S., "Comparison of low-cost two-equation turbulence models for prediction flow dynamics in twin-jets devices", Int. Commun. Heat and Mass Transf., vol. 34, pp. 570-578, 2007.
[23] Balabel, A. & El-Askary, W.A., "On the performance of linear and nonlinear k-ε turbulence models in various jet flow applications", Europ J Mech.- B/Fluids, vol. 30, pp. 325-340, 2011.
[24] Shih T.H., Liou, W.W., Shabbir, A., Zhu, J., "A New k-ε Eddy-Viscosity Model for High Reynolds Number Turbulent Flows - Model Development and Validation", Computers Fluids, vol. 3, pp. 227-238, 1995.
[25] Patankar, S.V., "Numerical heat transfer and fluid flow", Taylor & Francis, 1980.
[26] Kang S.H., Greif R., "Flow and heat transfer to a circular cylinder with a hot impinging air jet", Int J Heat Mass Transf, vol. 35, pp. 2173-2183, 1992.