



CFD Simulation of Flow Through the Orifice at the Inlet and Outlet Lines of the Thermal Diffusion Column

Younes Amini^{1*}, Javad Karimi-Sabet¹, Mohammad Mahdi Shadman¹, Abolfazl Dastbaz² and Amin Hassanvand³

1. Nuclear Fuel Cycle Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute, Tehran, Iran

2. College of Chemical Engineering, University of Tehran, Iran

3. Department of Polymer Engineering, Faculty of Engineering, Lorestan University, Khorramabad, Iran

Y_aminei@alum.sharif.edu

Yamini@aeoi.org.ir

DOI: 10.22078/PR.2022.4560.3058

Received: February/20/2022

Accepted: February/20/2022

Introduction

Control of the chemical process is crucial for many reasons such as achieving desirable products, safety, and preventing undesirable changes in system parameters. Input and output flow condition in a system have a great impact on the product enrichment, product value, decreasing the waste flow, equipment size, safety issues and fixed or operational cost of the process. Thus, precise control of flow rate in a system is one of the most important factors that affect the efficiency of the equipment. The previous studies show using orifice for control of flow within some separation equipment such as thermal diffusion columns. Orifices are inexpensive equipment without movable and electrical components, which has the capability of bearing more differential pressure rather than control valves [1]. Several applications have been proposed for using Orifices as an efficient flow control component. Singh et al. used CFD to investigate the dynamic behavior of turbulent flow through an orifice and reported that the maximum discharge coefficient occurs at low Reynolds numbers, and decreased slowly with increasing Reynolds number [2]. Mohan Kumar also studied the CFD of flow through two subsequent orifice plates and concluded that the pressure drop is strongly dependent on the distance between the two orifice plates [1]. Martin et al investigated the flow of coolant through the orifice to be used as an expansion device in the cryogenic cycle. One of the important results of their work was the lack of

correlation between mass flow and outlet pressure in choking conditions [3]. Jeffrey has studied and designed an Orifice for use in reactor coolant pumps of nuclear power plants [4]. In another study, Singhal et al. optimized the design of an orifice for the airflow injection to the car engine [5]. Peter examined the flow pattern in an orifice by changing its properties and also investigated the effects of density, viscosity, pressure drop, and surface area of the orifice [6]. Gan and Riffat similar to Peter [6] studied changes in fluid properties by changing operating conditions [7]. Oliveira et al measured the mass flow rate of a two-phase liquid-gas flow using an orifice [8]. The main goal of this research is to study the different gas flow through an orifice and to determine the optimum condition for the control application inside the inlet and outlet lines of the thermal diffusion column.

Materials and Methods

Model Description

Various mathematical models have been proposed to predict the fluid behavior in orifices and nozzles. According to the article by Singal and Paroon [5], the mass flow rate is presented as follows:

$$\dot{m} = \frac{A * P}{\sqrt{T}} * \sqrt{\frac{\gamma}{R}} * M * \left(1 + \frac{\gamma - 1}{2} M^2\right)^{-\frac{\gamma}{\gamma - 1}} \quad (1)$$

Another valid correlation was purposed by Hanlen [5]. In this regard, it is noted that as the outlet pressure decreases, the flow increases to reach its maximum

value. If the flow conditions in the orifice reach the sound conditions, the flow rate does not change. The flow rate of the experimental relationships is provided by saad [9].

The three-dimensional model has been used because of the importance of fluid behavior in three-dimensional space and increase in the accuracy of calculations. The geometry of the problem is also shown in Figure 1. High Mach number flow in steady-state condition was selected for solving momentum, continuity, and energy equations in COMSOL software [10-14]. The temperature, pressure and Mach number are specified as input parameters.

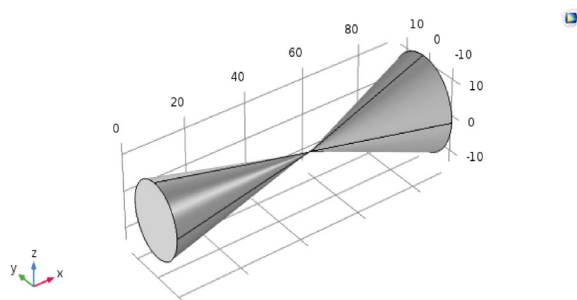


Fig. 1 The geometry of the simulated orifice.

Results and Discussion

After determining the appropriate mesh for geometry and examination mesh independency, the previous correlations [5,9,10] were used to validate. The validation results of flow for different diameters are shown in Figure 2. The inlet pressure is 0.6 bar, and the outlet pressure is the vacuum. As shown in this figure, the average relative error between the simulation results and correlations is 1.77 %.

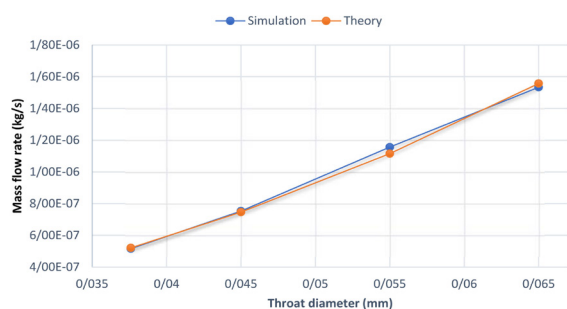


Fig. 2 Comparison of simulation results and theory results (inlet pressure 0.6 bar and the vacuum pressure for outlet).

In order to investigate the sensitivity analysis of the model, the effects of increasing the inlet pressure and decreasing the outlet pressure on the flow rate have been investigated. It was found out that the mass flow rate increases by increasing the inlet pressure in the constant outlet pressure. Moreover, the result of the simulation showed that with decreasing outlet pressure in constant input pressure, the mass flow rate increasing since the speed in the throat is less than the speed of sound. As the velocity in the throat reaches the speed

of sound, the mass flow rate remains constant. This maximum flow rate changes only with the change of the inlet pressure. These results are in agreement with the correlations.

The gas velocity, pressure and temperature profiles in the orifice were also examined. For this purpose, the simulation was performed for an inlet pressure of 0.6 bar, vacuum outlet pressure, throat radius of 0.0333 mm and inlet temperature of 298 Kelvin. Figure 3 shows the velocity changes in the direction of the throat. The throat is located at 51 mm of the orifice. As can be seen in Fig. 3, the velocity in the throat point is equal to the velocity of sound, which it is consistent with mathematical theories. The speed after the throat increases near Mach number 2, then decreases with speed, and finally, the gas leaves the orifice at a speed close to the speed of sound. Pressure changes from 0.6 bar to vacuum pressure at the outlet are shown in Figure 4. In accordance with these changes, the temperature changes are also shown in Figure 5. It should be noted that the Joule-Thomson coefficient of nitrogen is positive in the inlet temperature of 298 K. Therefore, as the pressure decreases, the temperature of the fluid will also drop.

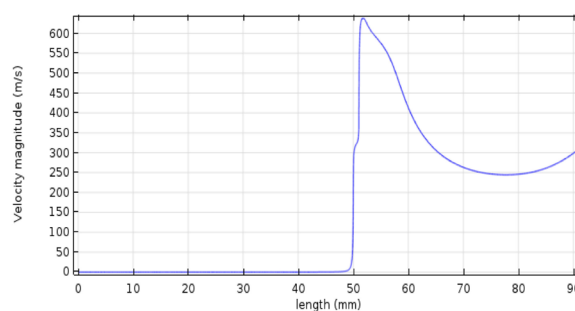


Fig. 3 variation of inlet velocity versus orifice length.

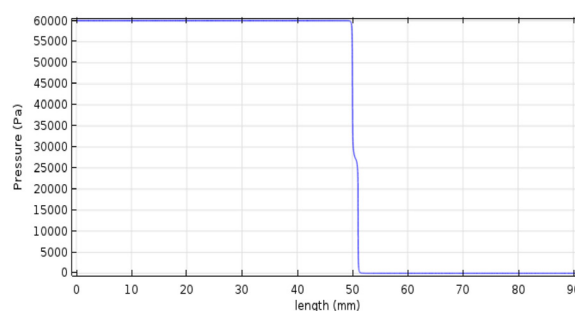


Fig. 4 variation of pressure versus orifice length.

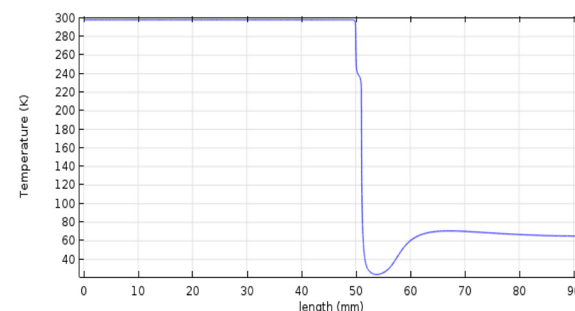


Fig. 5 variation of Temperature versus orifice length.

Conclusions

Computational fluid dynamics were used to predict the behavior of gas flow through an orifice plate. A three-dimensional model with a compressible gas flow was used. To validate the model, mathematical correlations were used. The results showed that the adopted three-dimensional model has high accuracy and predicts properly the actual behavior of orifice. The results of this paper can be used for practical considerations.

References

1. Yashvanth S, Seshadri V, KJ Y K (2017) CFD Analysis of flow through single and multi stage eccentric orifice plate assemblies, *International Journal of Scientific Research in Science, Engineering and Technology*, 3: 215-232.
2. Singh R, Singh S N, Seshadri V (2010) Performance evaluation of orifice plate assemblies under non-standard conditions using CFD, *Indian Journal of Engineering and Materials Sciences*, 17: 397-406.
3. Martin K, Reiberer R, Hager J (2006) Modeling of short tube orifices for CO₂, *International Refrigeration and Air Conditioning Conference*, USA.
4. STACK J (2011) Design and analysis of orifices for use in reactor coolant pump test loops (Doctoral dissertation, Rensselaer Polytechnic Institute.
5. Singhal A, Parveen M (2013) Air flow optimization via a venturi type air restrictor, London UK, WCE.
6. Peter U C, Chinedu U (2016) Model prediction for constant area, variable pressure drop in orifice plate characteristics in flow system, *Chemistry International*, 2, 8: 80-88.
7. Gan G, Riffat S B (1997) Pressure loss characteristics of orifice and perforated plates, *Experimental Thermal and Fluid Science*, 14, 2: 160-165.
8. Oliveira J L G, Passos J C, Verschaeren R, Van Der Geld C (2009) Mass flow rate measurements in gas-liquid flows by means of a venturi or orifice plate coupled to a void fraction sensor, *Experimental Thermal and Fluid Science*, 33, 2: 253-260.
9. Saad M A (1985) *Compressible fluid flow*, Englewood Cliffs.
10. Amini Y, Nasr Esfahany M (2019) CFD simulation of the structured packings: a review. *Separation science and technology*, 54, 15: 2536-2554.
11. Amini Y, Mokhtari M, Haghshenasfard M, Gerdroodbary M B (2015) Heat transfer of swirling impinging jets ejected from Nozzles with twisted tapes utilizing CFD technique. *Case Studies in Thermal Engineering*, 6: 104-115.
12. Amini Y, Karimi-Sabet J, Nasr Esfahany M (2016) Experimental and numerical study of multiphase flow in new wire gauze with high capacity structured packing. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 108: 35-43.
13. Karbasi E, Karimi-Sabet J, Mohammadi-Rovshandeh J, Moosavian M A, Ahadi H, Amini Y (2017) Experimental and numerical study of air-gap membrane distillation (AGMD): novel AGMD module for Oxygen-18 stable isotope enrichment, *Chemical Engineering Journal*, 322: 667-678.
14. Gerdroodbary M B, Amini Y, Ganji D D, Takam M R (2017) The flow feature of transverse hydrogen jet in presence of micro air jets in supersonic flow. *Advances in Space Research*, 59, 5: 1330-1340.

شبیه‌سازی جریان عبوری از اریفیس در خطوط ورودی و خروجی ستون نفوذ حرارتی با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی

یونس امینی^{۱*}، جواد کریمی ثابت^۱، محمد مهدی شادمان^۱، ابوالفضل دستباز^۲ و امین حسنونند^۳

۱- پژوهشکده چرخه سوخت هسته‌ای، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، تهران، ایران

۲- گروه مهندسی شیمی، دانشکده فنی، دانشگاه تهران، ایران

۳- گروه مهندسی پلیمر، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه لرستان، خرم آباد، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۵/۰۶ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۱۲/۰۱

چکیده

اریفیس‌ها تجهیزاتی ساده بدون قطعات متحرک و الکترونیکی هستند که در صنایع غنی سازی می‌توان از آنها استفاده کرد که می‌توان اختلاف فشار بیشتری نسبت به شیرهای کنترل بر روی آن اعمال نمود و بسیار ارزان قیمت می‌باشند. هدف این تحقیق بررسی عبور جریان انواع گازهای مختلف از میان اریفیس‌ها و تعیین شرایط عملیاتی مناسب برای کاربرد کنترلی داخل خطوط ورودی و خروجی ستون نفوذ حرارتی می‌باشد. جهت پیش بینی رفتار گاز داخل اریفیس از دینامیک سیالات محاسباتی و با استفاده از نرم‌افزار COMSOL استفاده شد. مدل سه بعدی اریفیس به همراه جریان گاز تراکم‌پذیر جهت شبیه‌سازی مورد نظر به کار گرفته شد. جهت اعتبارسنجی مدل از معادلات موجود در این زمینه، سینقال و همکاران و هانلن و همکاران که بسیار پرکاربرد و معتبر بودند استفاده شد. نتایج در دو بخش جریان صوتی و جریان مادن صوت ارائه گردید. در جریان صوتی نشان داده شده است که در گلویی دما و سرعت به شدت بالا و فشار افت پیدا می‌کند. در جریان مادن صوت نیز نشان داده شد که در گلویی سرعت بالا می‌رود و متناسب با آن فشار افت می‌کند. نتایج دویخش صوتی و مادن نشان دادند که مدل سه بعدی در نظر گرفته شده دارای دقت بالایی بوده و به خوبی رفتار واقعی اریفیس را پیش‌بینی می‌کند.

کلمات کلیدی: اریفیس، دینامیک سیالات محاسباتی، جریان صوتی، COMSOL.

مقدمه

پیچیدگی‌های موجود در زمینه دانش غنی‌سازی ایزوتوپی محدود به تجهیزات استفاده شده از جمله ماشین سانتریفیوژ، ستون نفوذ حرارتی، ستون تقطیر تبریدی، دستگاه لیزر و سایر روش‌های جداسازی نمی‌شود [۱-۳]. در کنار هر یک از این تجهیزات، ابزار آلات مختلفی مورد نیاز است که عدم دسترسی به هر یک از این تجهیزات، موجب ناقص شدن زنجیره غنی‌سازی و یا وابستگی کشور به دیگر کشورها، در مورد این دانش می‌شود. از جمله این تجهیزات می‌توان به تجهیزات^۱ PLC، فشارسنج‌های خلأ، پمپ‌های خلأ و کنترل‌کننده‌های جرمی اشاره نمود. برخی از مشکلات ایجاد شده در صنایع مختلف هسته‌ای مربوط به همین تجهیزات جانبی می‌باشند. همچنین، تکنولوژی خاص و انحصاری بسیاری از این تجهیزات موجب دشواری و هزینه‌بر بودن تأمین آنها شده است. یکی از تجهیزات اساسی مورد نیاز در کنار هر سیستم غنی‌سازی، تجهیزات کنترل دبی جرمی، جهت کنترل فشار عملیاتی و همچنین، میزان خوراک و جریان‌های خروجی می‌باشد. در گذشته از کنترل‌کننده‌های دبی جرمی^۲ (MFC) بدین منظور استفاده می‌شد. مشکلاتی از جمله خطای بسیار بالا، هزینه بسیار بالا، حساسیت به نوع گاز عبوری، نیاز به سرویس و تعمیر مکرر، محدودیت‌های موجود در مسیر واردات موجب شد تا گزینه‌های جایگزین این تجهیزات مورد بررسی قرار گیرد. در حال حاضر جهت کنترل دبی جرمی ورودی و خروجی گاز در بسیاری از فرایندها از شیرهای کنترل فشار^۳ (PCV) استفاده می‌شود. این تجهیزات با وجود برتری‌های متعدد نسبت به MFC، به دلیل معایبی همچون هزینه بسیار بالا، تکنولوژی پیچیده و نیاز به تعداد زیاد قطعات الکترونیکی و مکانیکی گزینه ایده‌آل نیستند. مطالعات انجام شده نشان می‌دهد، امکان استفاده از اریفیس در کنار برخی از تجهیزات غنی‌سازی از جمله ستون‌های حرارتی وجود دارد. اریفیس‌ها

تجهیزاتی ساده بدون قطعات متحرک و الکترونیکی، ارزان، دارای مقاومت و تأثیر بالا در مدت زمان طولانی استفاده می‌باشند که می‌توانند اختلاف فشار بیشتری نسبت به شیرهای کنترل بر روی آن اعمال نمود [۴].

در همین راستا محققین به بررسی تجربی و شبیه‌سازی اریفیس‌ها و همچنین، بیان کاربردهای آنها پرداخته‌اند [۵-۷]. دینامیک سیالات محاسباتی یکی از پرکاربردترین ابزارها برای انجام محاسبات و شبیه‌سازی‌های مهندسی در جهت کم کردن هزینه‌ها و آزمایش‌های آزمایشگاهی می‌باشد [۸-۱۰]. سینگ و همکاران جریان درهم و غیراستاندارد از درون یک اریفیس را به کمک دینامیک سیالات محاسباتی شبیه‌سازی کردند و به این نتیجه رسیدند که بیشترین مقدار ضریب تخلیه در اعداد رینولدز پایین اتفاق می‌افتد و با افزایش رینولدز این مقدار آهسته کاهش می‌یابد [۱۱]. موهان کومار و همکاران با استفاده از شبیه‌سازی CFD، قرار گرفتن دو صفحه اریفیس متوالی را بررسی کردند و نتیجه گرفتند که کاهش فشار به شدت وابسته به فاصله دو صفحه اریفیس از یکدیگر می‌باشد [۴]. مارتین و همکاران جریان عبوری سیال خنک‌کننده از میان اریفیس برای استفاده به عنوان دستگاه انبساطی در سیکل خنک‌کننده را بررسی کردند. نتایج آنها نشان داد که لوله اریفیس کوتاه کاربردهای بسیاری در زمینه خنک‌سازی هوا در وسایل حمل و نقل و منازل دارد زیرا ارزان قیمت، دارای کارکرد آسان و قابل اطمینان می‌باشند. از آنجا که نتایج عملی برای اعتبارسنجی مدل به ندرت در دسترس می‌باشد کار خود را به صورت‌های آزمایشگاهی و شبیه‌سازی پیش بردند. آنها هندسه‌های گوناگون از لحاظ قطر اریفیس و طول لوله و فشار ورودی‌های گوناگون را مورد ارزیابی قرار دادند. یکی از نتایج

1. Programmable Logic Controller

2. Mass Flow Controller

3. Pressure Control Valve

استفاده شد. همچنین، جهت اعتبارسنجی نتایج نیز از روابط ریاضی که در پیش‌بینی نتایج آزمایشگاهی بسیار دقیق عمل کرده است، استفاده شده است.

مدل ریاضی پیش‌بینی رفتار سیال در اریفیس‌ها و نازل‌ها

مدل‌های ریاضی زیادی تاکنون برای پیش‌بینی رفتار سیال در اریفیس‌ها و نازل‌ها ارائه شده است. از معادلات معتبری که با نتایج تجربی تطبیق مناسبی داشته‌اند معادلاتی هستند که توسط سینقال و همکاران و هانلن و همکاران بیان شده‌اند. طبق مقاله سینقال و پارون [۱۴] دبی جرمی به صورت زیر ارائه شده است:

$$\dot{m} = \frac{AP}{\sqrt{T}} \sqrt{\frac{g}{R}} M \left(1 + \frac{g-1}{2} M^2 \right)^{-\frac{g+1}{2(g-1)}} \quad (1)$$

یک رابطه معتبر دیگر در این زمینه توسط هانلن بیان شد. در این رابطه گفته شده است که با کاهش فشار خروجی، جریان افزایش می‌یابد تا به مقدار بیشینه خود برسد. در این شرایط مقدار جریان عبوری از رابطه زیر محاسبه می‌شود [۲۰]:

$$Q = APC \left(\frac{2\gamma kT}{(\gamma-1)M} \right)^{\frac{1}{2}} \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{1}{\gamma}} \left(1 - \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

در این رابطه، M جرم مولکولی گاز، k ثابت بولتزمن، T دما بر حسب کلوین، γ نسبت گرماهای ویژه، P_1 و P_2 نیز به ترتیب فشار ورودی و خروجی، C ضریب تغییرات سطح نازل و A سطح مقطع می‌باشد. ضریب تغییرات سطح هنگامی مورد استفاده قرار می‌گیرد که تغییرات ناگهانی در سطح رخ می‌دهد و انقباض یا انبساط ناگهانی در لوله را شاهد باشیم. از آنجا که سطح ناگهان تغییر اندازه می‌دهد، مقداری از جریان از گوشه تیز سطح جدا شده و از آن منطقه جریانی عبور نمی‌کند. این ضریب نسبت جریان واقعی به تئوری می‌باشد.

مهم حاصل از کار آنها، عدم ارتباط بین دبی جرمی و فشار خروجی در شرایط خفگی بود [۱۲]. جفری و همکاران طراحی اریفیس را برای استفاده در داخل پمپ خنک‌کننده^۱ (RCP) نیروگاه های هسته‌ای انجام داده‌اند [۱۳]. سینقال و همکاران به بررسی و بهینه‌سازی طراحی یک اریفیس برای عبور جریان هوا برای تزریق داخل موتور خودرو پرداخته‌اند [۱۴]. در مطالعه‌ای دیگر، پیترو و همکاران به بررسی تغییرات جریان داخل یک اریفیس با تغییر خواص پرداخته است. در مطالعه آنها، تغییرات چگالی، ویسکوزیته، افت فشار و مساحت سطح اریفیس مورد بررسی قرار گرفت. یک مدل ریاضی برای کنترل این سیستم نیز توسط این محققین پیشنهاد شد [۱۵]. گان و ریفات نیز هم همانند پیترو به بررسی تغییرات خواص سیال با تغییر شرایط عملیاتی پرداختند [۱۶]. الیویرا و همکاران به اندازه‌گیری دبی جرمی یک جریان دو فاز مایع و گاز با استفاده از اریفیس پرداختند [۱۷].

دوازده امامی و همکاران، شبیه‌سازی عددی جریان سوخت در سر یک مشعل صنعتی را انجام دادند. هدف اصلی کار آنها بررسی اثر فشار در خروجی‌های این مشعل بر توزیع دبی در این خروجی‌ها است. این کار به منظور سنجش حساسیت مشعل به فشار داخل محفظه احتراق صورت گرفت [۱۸]. توکیما و همکاران شبیه‌سازی CFD جریان را در داخل یک اوریفیس انجام دادند [۷]. در مطالعه‌ای دیگر، شاه و همکاران شبیه‌سازی یک اوریفیس را با استفاده از نرم‌افزار OpenFOAM-1.6 انجام دادند. نتایج آنها تطابق بسیار خوبی با داده‌های تجربی داشت. مدلی که آنها جهت اغتشاش به کار برده بودند از نوع k-e بود [۱۹].

هدف از تحقیق حاضر، بررسی عبور جریان از اریفیس و تعیین شرایط عملیاتی مناسب برای کاربرد کنترلی داخل خطوط ورودی و خروجی ستون نفوذ حرارتی می‌باشد. جهت شبیه‌سازی اریفیس‌ها از دینامیک سیالات محاسباتی به کمک نرم‌افزار کامسول

شده که منجر به تغییر ناگهانی خواص سیال در دو طرفش می‌شود. مهم‌ترین مشخصه این امواج تغییر ناگهانی و شدید خواص سیال هستند. د-اگر در تمامی دامنه، ماخ جریان بیشتر از ۱ باشد، به جریان مذکور فراصوت گفته می‌شود. ه- شرایط فراصوت زمانی اتفاق می‌افتد که ماخ جریان آزاد بیشتر از ۵ باشد. در این حالت، مقادیر چگالی، فشار و دما در اطراف موج ضربه‌ای تشکیل شده، به شدت افزایش خواهند یافت [۲۱ و ۲۲].

معادلات حاکم بر سیستم

روش المان محدود یکی از روش‌های عمومی حل عددی معادلات دیفرانسیل جزئی در فضای دو بعدی و سه بعدی می‌باشد. به‌منظور حل یک سیستم بر اساس روش المان محدود، سیستم مورد مطالعه به قسمت‌های کوچکتر و ساده‌تری تقسیم می‌شود. این گسسته‌سازی مستلزم تعریف سیستم به‌صورت یک شبکه می‌باشد. در واقع، شبکه از مجموعه‌ای از نقاط گسسته برای تبدیل سیستم به محدوده عددی برای حل مسئله است. فرمول‌بندی روش المان محدود در ادامه به سیستمی از معادلات جبری تبدیل می‌شود که بیانگر تقریبی از یک تابع مجهول بر روی هر المان است [۲۳-۲۵]. در این تحقیق، مدل‌سازی دینامیک سیالاتی و شبیه‌سازی عددی با استفاده از نرم‌افزار کامسول که یک طرح عددی بر پایه روش المان محدود است، انجام شده است [۲۶]. با توجه به اهمیت رفتار سیال در فضای سه بعدی و افزایش دقت محاسبات از مدل سه بعدی استفاده شده است. همچنین، لازم به ذکر است که در نتایج به‌دست آمده نیز مشاهده شده است که در بعضی موارد جواب‌ها در فضای سه بعدی دارای تقارن نبوده و این مسئله نشان می‌دهد که انتخاب فضای سه بعدی نتایج دقیق‌تری ارائه می‌دهد. هندسه مسئله در شکل ۱ نشان داده شده است. فیزیک مسئله High Mach Number Flow انتخاب و مسئله به صورت پایا حل می‌شود.

در صورتی که شرایط عبور جریان از داخل اریفیس به شرایط صوتی برسد و دبی دیگر تغییر نکند، مقدار دبی از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$Q = AP_1 C \left(\frac{2\gamma m}{(\gamma+1)RT} \right)^{\frac{1}{2}} \left(\frac{2}{\gamma+1} \right)^{\frac{1}{\gamma-1}} \quad (3)$$

$$\text{for } \frac{P_2}{P_1} \leq \left(\frac{2}{\gamma+1} \right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}}$$

روابط ریاضی مشابهی نیز توسط اسد ارائه شده است [۲۱]. این رابطه به‌صورت زیر ارائه شده است:

$$Q = AP_1 \left(\frac{\gamma}{RT} \right)^{\frac{1}{2}} \frac{M}{\left(1 + \frac{\gamma-1}{2} M^2 \right)^{\frac{\gamma+1}{2(\gamma-1)}}} \quad (4)$$

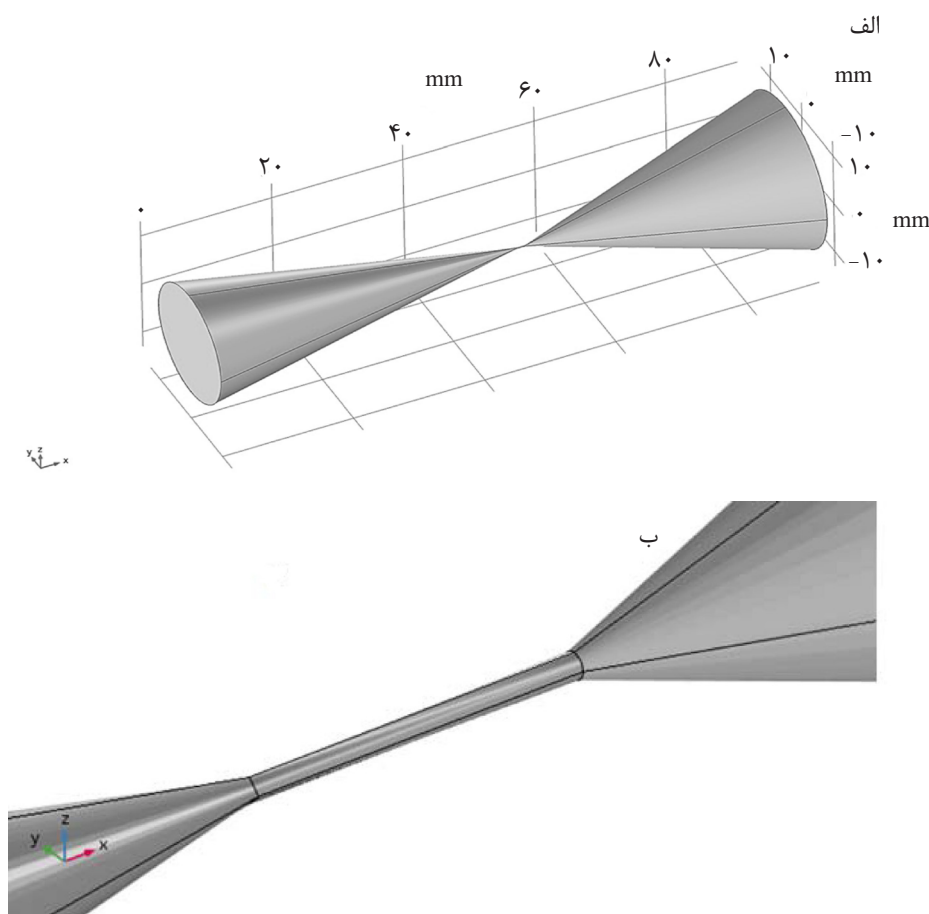
در شرایطی که سرعت صوت در گلویی برقرار شده باشد، از رابطه زیر جهت محاسبه میزان دبی جرمی استفاده شده است:

$$Q = AP_1 \left(\frac{\gamma}{RT} \right)^{\frac{1}{2}} \left(\frac{2}{\gamma+1} \right)^{\frac{\gamma+1}{\gamma-1}} \quad (5)$$

لازم به ذکر است رژیم‌های جریان تراکم‌پذیر با توجه به مقدار عدد ماخ تقسیم‌بندی می‌شوند، الف- در صورتی که عدد ماخ جریان سیال کمتر از ۰/۳ باشد، سیال تراکم‌ناپذیر خوانده می‌شود.

ب- جریان زیر صوت زمانی اتفاق می‌افتد که ماخ جریان ورودی به جسم در تمامی مکان‌ها کمتر از ۱ باشد. در این حالت خطوط جریان سیال به صورت کاملاً مجزا و منظم هستند. همچنین در این حالت، خواص جریان به شکلی کاملاً پیوسته تغییر می‌کنند.

ج- اگر ماخ جریان آزاد همچنان کمتر از ۱ بماند اما نزدیک به این عدد باشد، در بعضی از نقاط سطح آیرودینامیکی، ممکن است ماخ جریان بیشتر از ۱ شود. بنابراین، کل جریان به صورت ترکیبی از ماخ بیشتر و کمتر از ۱ خواهد بود. به چنین جریانی «گذر صوتی» گفته می‌شود. در حقیقت، این جریان زمانی ایجاد می‌شود که ماخ جریان به طور ناگهانی و به میزانی اندک، بیشتر از ۱ شود. در این حالت، موجی تحت عنوان موج ضربه‌ای تشکیل



شکل ۱ (الف) هندسه رسم شده برای مدل و (ب) نمایی دقیق تر از بخش گلولی مدل

آشفته‌گی نیز در مدل آزمایش شده است که در این بین مدل اغتشاشی $k-\epsilon$ نسبت به دیگر مدل‌ها دقت بالاتری داشته و همگرایی جواب در آن نیز سریع‌تر می‌باشد. این معادلات به صورت زیر بیان می‌شوند [۳۵-۳۹]:

$$\rho(v \cdot \nabla)v = \nabla \cdot$$

$$\left(-\rho I + (\mu + \mu_T)(\nabla v + (\nabla v)^T) - \frac{2}{3}(\mu + \mu_T)(\nabla \cdot v)I - \frac{2}{3}\rho k I \right) \quad (6)$$

$$\nabla \cdot (\rho u) = 0 \quad (7)$$

$$\rho(v \cdot \nabla)k = \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_T}{\sigma_k} \right) \nabla k \right] + P_k - \epsilon \rho \quad (8)$$

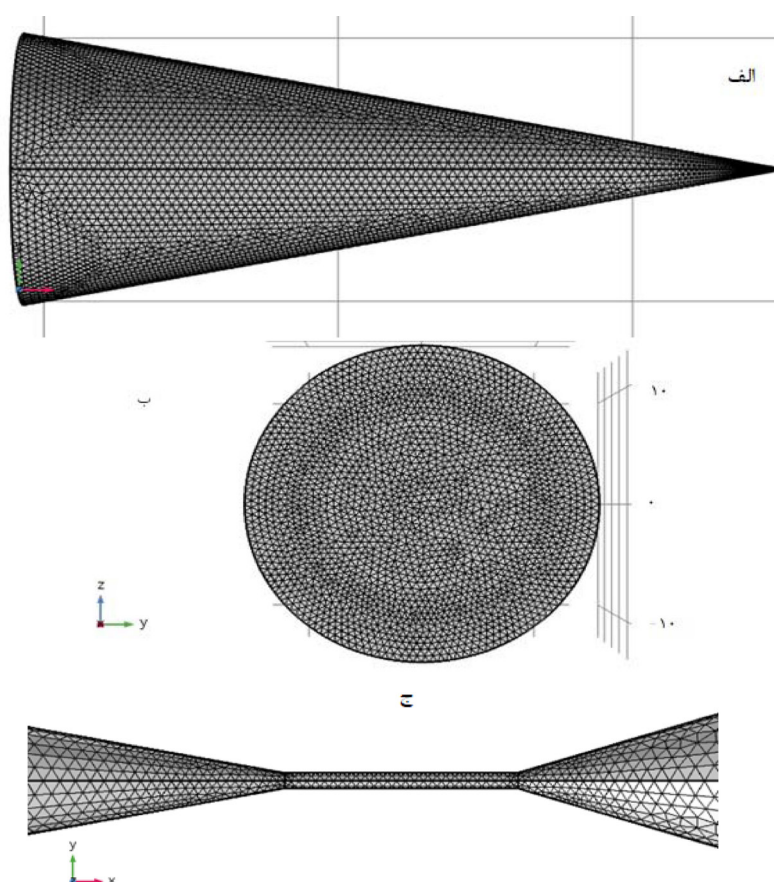
$$\rho(u \cdot \nabla)\epsilon = \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_T}{\sigma_\epsilon} \right) \nabla \epsilon \right] + C_{\epsilon 1} \frac{\epsilon}{k} P_k - C_{\epsilon 2} \rho \frac{\epsilon^2}{k}, \quad \epsilon = \epsilon_p \quad (9)$$

در روابط بالا، μ_T و P_k به صورت زیر تعریف می‌شوند [۴۰ و ۴۱]:

$$\mu_T = \rho C_\mu \frac{k^2}{\epsilon} \quad (10)$$

برای انتخاب شبکه‌بندی مناسب مدل، تعداد المان‌های شبکه‌بندی را از کم به زیاد افزایش می‌دهیم و اثر آن را بر روی جواب نهایی مورد بررسی قرار می‌دهیم. هرگاه تعداد المان‌ها بر جواب نهایی بی‌تأثیر شود، همان تعداد به عنوان شبکه‌بندی مناسب انتخاب می‌شود. تصویر شبکه‌بندی مدل در قسمت‌های مختلف آن در شکل ۲ نشان داده شده است.

با توجه به رژیم جریان برای شبیه‌سازی باید معادلات بقای جرم و بقای مومنوم با استفاده از شرایط مرزی مناسب برای جریان حل شوند [۲۵ و ۲۷]. در این معادلات، جهت حرکت سیال از مدل اغتشاشی $k-\epsilon$ استفاده شده است. این مدل یکی از بیشترین کاربردها و معتبرترین مدل‌های آشفته‌گی می‌باشد [۲۸-۳۴]. همچنین، مدل‌های دیگر



شکل ۲ شبکه‌بندی مسئله (الف) نمایی از قسمت بالایی مدل، (ب) نمای ورودی و (ج) گلولی.

$$u \cdot n = 0 \quad (17)$$

$$K - (K \cdot n)n = 0 \quad (18)$$

در رابطه بالا پارامتر K به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$K = \left[(\mu + \mu_T) (\nabla u + (\nabla u)^T) - \frac{2}{3} (\mu + \mu_T) (\nabla u) I - \frac{2}{3} \rho k I \right] n \quad (19)$$

برای پارامترهای اختلاط شرایط به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\nabla k \cdot n = 0, \quad \nabla \varepsilon \cdot n = 0 \quad (20)$$

شرایط ورودی به صورت دما، فشار و عدد ماخ وارد می‌شود. عدد ماخ در این محاسبات با توجه به سرعت محاسبه می‌گردد. دو پارامتر Turbulent in-tensity و Turbulence length scale برای شرایط ورودی براساس روابط ۲۱ و ۲۲ محاسبه می‌شوند:

$$I = 0.16 Re^{-\frac{1}{8}} \quad (21)$$

$$l = 0.07d \quad (22)$$

$$P_k = \mu_T \left[\nabla u : (\nabla u + (\nabla u)^T) - \frac{2}{3} (\nabla u)^2 \right] - \frac{2}{3} \rho k \nabla u \quad (11)$$

معادلات انرژی سیستم نیز طبق روابط زیر محاسبه می‌شوند.

$$\rho C_p u \cdot \nabla T + \nabla q = Q \quad (12)$$

$$q = -k \nabla T \quad (13)$$

معادلاتی که جهت حل خواص سیال به کار می‌رود به صورت زیر می‌باشند [۴۱-۴۵]:

$$\rho = \frac{M p_A}{RT} \quad (14)$$

$$C_p = \frac{\gamma R}{M (\gamma - 1)} \quad (15)$$

$$\alpha_p = -\frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \rho}{\partial T} \right)_p \quad (16)$$

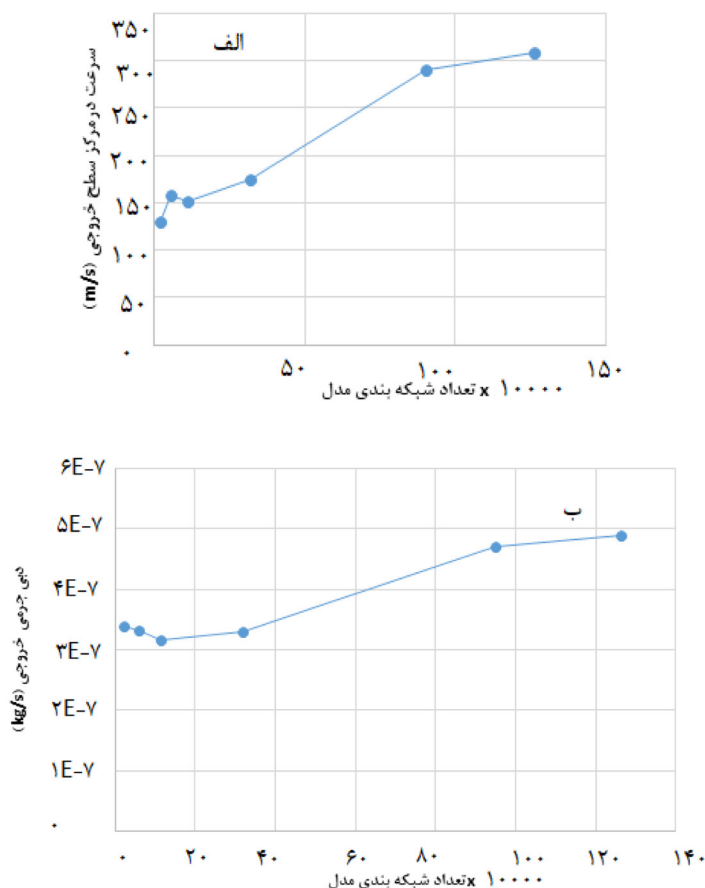
شرط مرزی بر روی دیواره به صورت شرط لغزشی تا شرایط حل مسئله به شرایط اینترنروپیک در روابط تئوری نزدیک شود. این شرط به صورت زیر تعریف می‌شود:

اعتبارسنجی نتایج

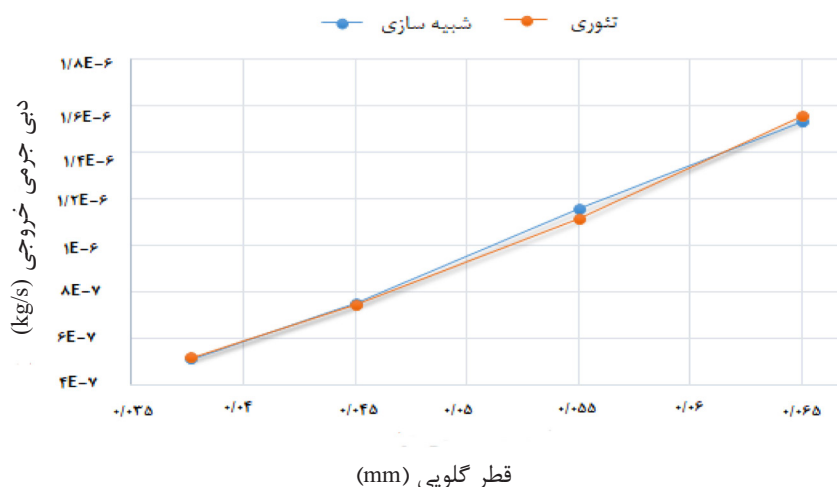
بررسی استقلال از شبکه در مسائل محاسبات عددی، یکی از بخش‌های مهم از جهت دقت حل، کاهش زمان و هزینه می‌باشد. بنابراین، شبکه بهینه می‌بایست برای شبیه‌سازی در نظر گرفته شود. شبکه‌ها در واقع جزءهایی هستند که در روش تفاضلات محدود برای حل دقیق‌تر مسئله در نظر گرفته می‌شود. نحوه انتخاب شبکه‌بندی در پژوهش حاضر به صورتی بوده که در مناطقی که مقدار پارامترهای مورد سنجش مثل سرعت حساس‌تر هستند و نیاز به دقت بالاتری دارند، از شبکه‌بندی ریزتر استفاده شود. شرایط مرزی استفاده شده در این مقاله، ورودی و خروجی‌ها به ترتیب به صورت فشار ورودی و فشار خروجی می‌باشد. برای بررسی استقلال نتایج از شبکه‌بندی، نمودار دو متغیر مختلف عملیاتی براساس تعداد المان شبکه‌بندی رسم شده است. جهت این کار دو متغیر

سرعت خروجی در مرکز اریفیس و دبی جرمی خروجی مورد بررسی قرار داده شده است. نمودارهای استقلال نتایج از شبکه‌بندی در **شکل ۳** رسم شده است. مطابق شکل، نتایج در تعداد المان حدود ۱۲۰۰۰۰۰ مش با توجه با اینکه به شبکه‌بندی وابسته نبوده و مستقل از نتایج می‌شوند به عنوان شبکه اصلی در نظر گرفته می‌شود.

پس از تعیین شبکه‌بندی مناسب، به منظور اعتبارسنجی از روابط ریاضی معتبر استفاده شد. در تصویر اول فشار ورودی ۰/۶ بار و فشار خروجی ۰/۰۱ بار می‌باشد. نتایج اعتبارسنجی در این قسمت براساس قطرهای مختلف در **شکل ۴** رسم شده است. از معادلات (۲) و (۳) در این قسمت برای اعتبارسنجی استفاده شده است. مطابق با **شکل ۴**، میانگین درصد خطای نسبی بین نتایج شبیه‌سازی و تئوری برابر با ۱/۷۷٪ می‌باشد.



شکل ۳ مودار استقلال نتایج از شبکه‌بندی: (الف) براساس متغیر سرعت و (ب) براساس متغیر دبی جرمی



شکل ۴ مقایسه نتایج حاصل از شبیه‌سازی و نتایج تئوری

اثرات افزایش قطر گلولی می‌باشد. در ادامه، تأثیر پارامترهای فوق بر روی دبی جرمی عبوری بررسی می‌گردد.

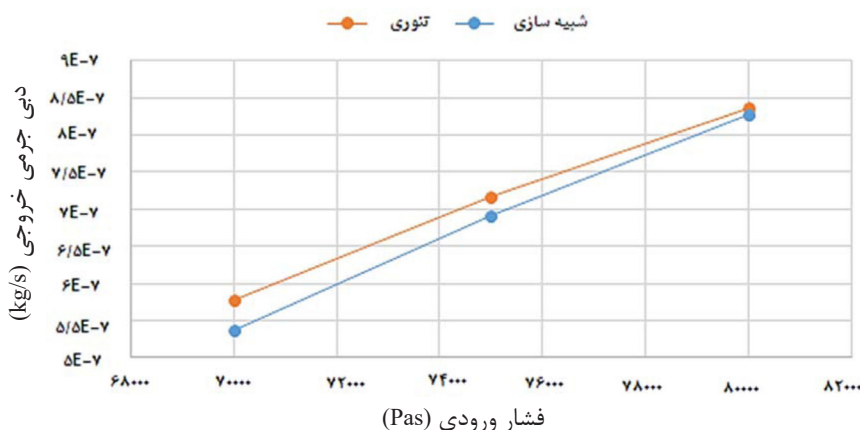
اثرات افزایش فشار ورودی

در شکل ۶، دبی جرمی عبوری بر اساس فشار ورودی نشان داده شده است. همان‌طور که انتظار می‌رفت دبی عبوری از اریفیس با افزایش فشار ورودی، افزایش یافته است. با افزایش فشار ورودی و ثابت نگه داشتن فشار خروجی، افت فشار دو سر اریفیس افزایش می‌یابد و افزایش افت فشار باعث افزایش سرعت و متعاقباً، دبی عبوری از آن می‌شود. در روابط ۲ و ۳ نیز اثر افزایش فشار ورودی به همین شکل بر روی دبی عبوری تأثیر می‌گذارد و روابط تئوری نیز آن را تأیید می‌کنند.

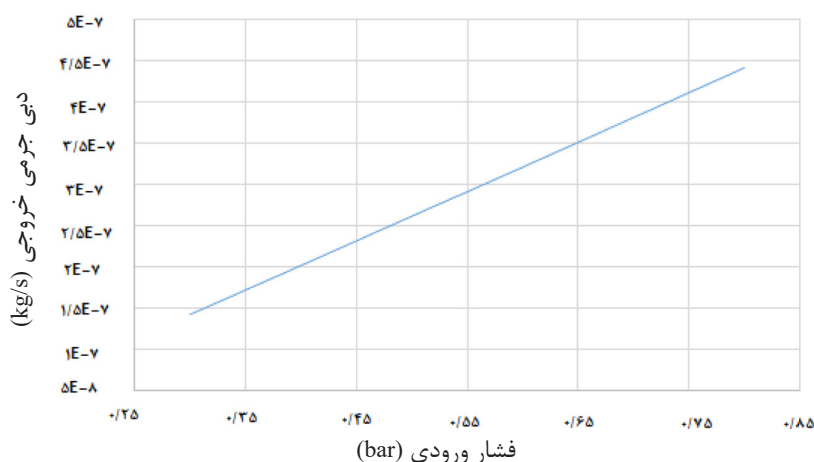
اعتبار سنجی نتایج براساس تغییر فشار ورودی در شرایطی که جریان صوتی برقرار نمی‌شود نیز انجام شده است. در این شرایط، فشار خروجی ۰/۶ بار، شعاع گلولی ۰/۴۲۵۵ mm و فشار ورودی متغیر می‌باشد. نتایج در شکل ۵ نشان داده شده است. میانگین درصد خطا در این حالت برابر ۳/۸۹٪ می‌باشد. نتایج اعتبارسنجی حاکی از دقت بالای شبیه‌سازی‌ها می‌باشد.

بررسی اثر پارامترهای مختلف بر روی مدل

در این قسمت برای آشنایی با اثرات پارامترهای مختلف بر روی نتایج مدل مورد بررسی قرار داده شده است. بررسی‌های انجام گرفته شامل اثرات افزایش فشار ورودی، اثرات کاهش فشار خروجی و



شکل ۵ نتایج حاصل از اعتبارسنجی براساس تغییر فشار ورودی.



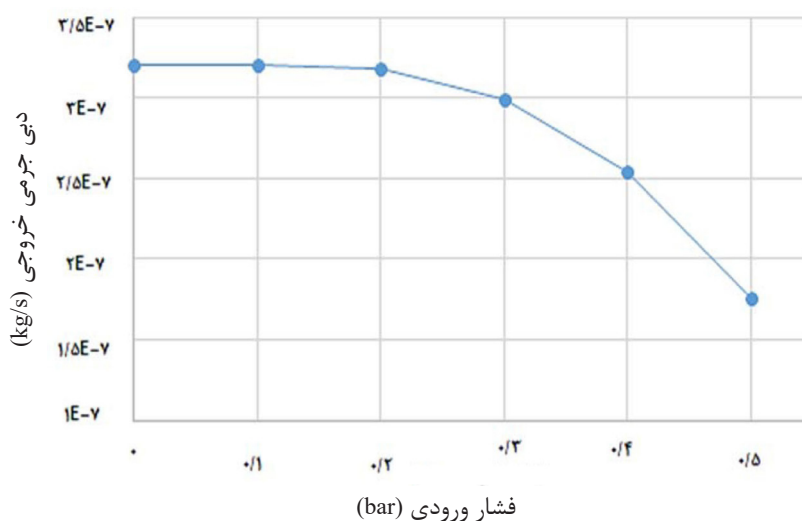
شکل ۶ اثر افزایش فشار ورودی بر دبی جرمی.

به بعد با کاهش فشار خروجی، دیگر دبی عبوری از اریفیس افزایش نمی‌یابد و ثابت باقی می‌ماند. طبق معادلات تئوری ۲ و ۳ نیز، هنگامی که سرعت جریان در گلویی به عدد ماخ برابر یک برسد، دیگر دبی عبوری تابعی از فشار خروجی نخواهد بود و تنها با تغییر فشار ورودی تغییر می‌کند.

همان‌طور که انتظار داشتیم، نتایج حاصل از شبیه‌سازی نیز این موضوع را تأیید کرد. با کاهش فشار خروجی دبی جرمی عبوری به مرور افزایش یافته و سپس هنگامی که وارد شرایط صوت می‌شویم، دبی جرمی ثابت باقی می‌ماند.

اثرات کاهش فشار خروجی

جهت بررسی تأثیر فشار خروجی بر روی دبی عبوری، فشار ورودی ثابت و فشار خروجی به مرور کاهش داده می‌شود تا اثرات آن بر روی مدل مشاهده شود. در شکل ۷، فشار ورودی ثابت و برابر ۰/۶ بار و فشار خروجی از ۰/۵ بار تا ۰/۱ بار کاهش می‌یابد. با کاهش فشار خروجی و افزایش افت فشار سرعت در گلویی افزایش می‌یابد و سرعت جریان افزایش می‌یابد. با افزایش سرعت، دبی عبوری نیز افزایش می‌یابد. هنگامی که سرعت در گلویی به عدد ماخ برابر با یک برسد و شرایط سرعت صوت برقرار شود، وارد یک مرحله جدید می‌شویم. از این مرحله



شکل ۷ اثرات کاهش فشار خروجی بر دبی جرمی عبوری.

۲۹۸ می‌باشد. گلولی در ۵۱ mm اریفیس قرار گرفته و همان‌طور که مشاهده می‌شود، سرعت در آن نقطه برابر سرعت صوت می‌باشد که با تئوری‌های ریاضی مطابقت دارد. سرعت پس از گلولی تا نزدیک عدد ماخ ۲ افزایش یافته و سپس از سرعت آن کاسته شده و در نهایت با سرعتی نزدیک به سرعت صوت از اریفیس خارج می‌شود. همان‌طور که ملاحظه می‌شود سرعت جریان بین گلولی و خروجی در محدوده‌ای کمتر از سرعت صوت می‌شود. توزیع سرعت جریان عبوری از اریفیس نیز در **شکل ۱۰** نشان داده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود جریان در گلولی بیشترین دما را دارد و بین گلولی و خروجی دما به یک دمای کمینه می‌رسد و سپس دما در خروجی بیشتر می‌شود

تغییرات فشار از ۰/۶ بار تا ۰/۰۱ بار در خروجی در **شکل ۱۱** نمایش داده شده است. متناسب با این تغییرات، توزیع دمای سه بعدی **شکل ۱۲** رسم شده است. همان‌طور که از شکل ۱۱ مشاهده می‌گردد، فشار در گلولی به نصف فشار اولیه کاهش پیدا می‌کند و در انتها به ۰/۰۱ بار می‌رسد. با توجه به دمای وارونگی نیتروژن (برابر با ۶۲۱ K) و دمای ورودی نیتروژن (۲۹۸ K)، ضریب ژول تامسون (نسبت تغییرات دمایی به فشار در آنتالپی ثابت) مثبت می‌باشد. از همین رو با کاهش فشار، دمای سیال نیز افت خواهد کرد.

اثرات افزایش قطر گلولی

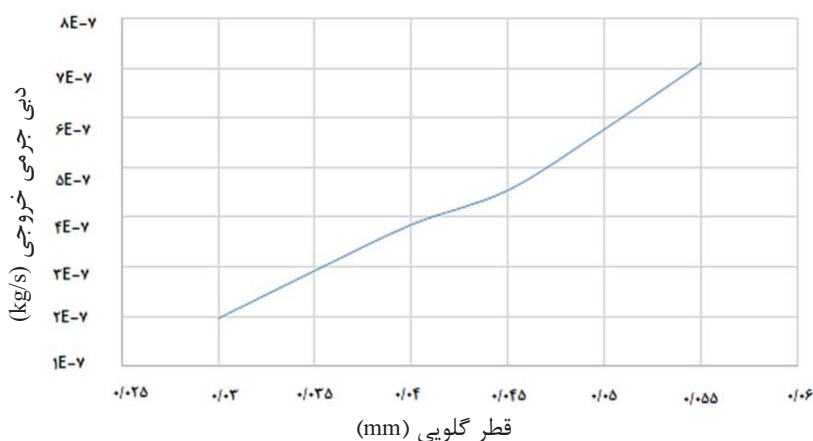
در شرایط فشار ورودی و خروجی ثابت برابر با ۰/۶ بار و ۰/۰۱ بار، سطح گلولی را به مرور بزرگتر کرده و نتایج حاصل از آن در **شکل ۸** رسم شده است. طبق نتایج تئوری، دبی عبوری با سطح مقطع گلولی ارتباط مستقیم دارد. نتایج شبیه‌سازی نیز این ادعا را ثابت می‌کند و به خوبی اثرات افزایش قطر گلولی بر دبی جرمی را نشان می‌دهد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، دبی عبوری با سطح مقطع گلولی ارتباط مستقیمی دارد و هرچه قطر گلولی بزرگتر باشد دبی عبوری افزایش پیدا می‌کند.

نتایج و بحث

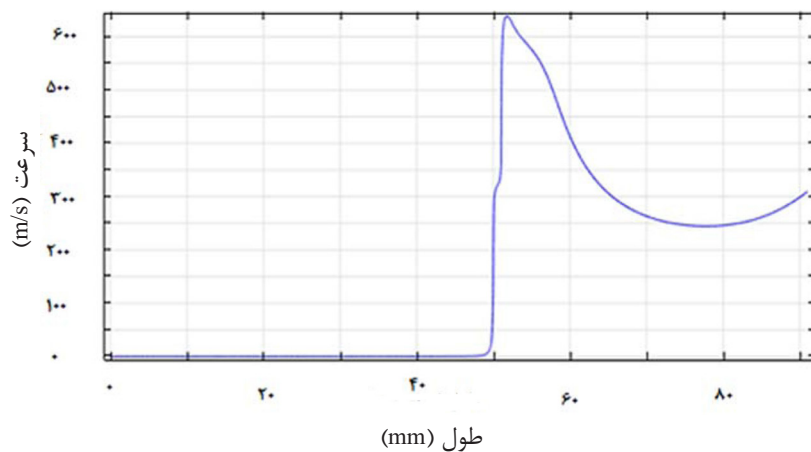
گاز انتخابی جهت بررسی و ارزیابی شبیه‌سازی صورت گرفته، گاز نیتروژن می‌باشد که به منظور تحلیل جریان سیال باید به آن توجه داشت. در این بخش، ابتدا نتایج مدل در شرایطی بررسی می‌شود که جریان صوت برقرار شده و سپس نتایج در شرایطی که جریان صوت برقرار نشده باشد، بررسی خواهد شد.

برقراری جریان صوتی در گلولی

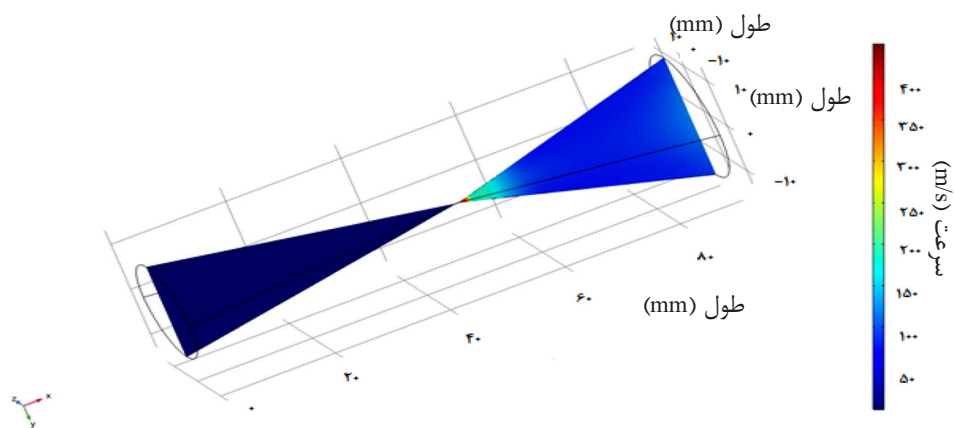
در **شکل ۹** تغییرات سرعت در راستای گلولی نشان داده شده است. شرایط برقراری جریان صوت در گلولی، فشار ورودی ۰/۶ بار، فشار خروجی ۰/۰۱ بار، شعاع گلولی ۰/۳۷۳ mm و دمای ورودی نیز برابر K



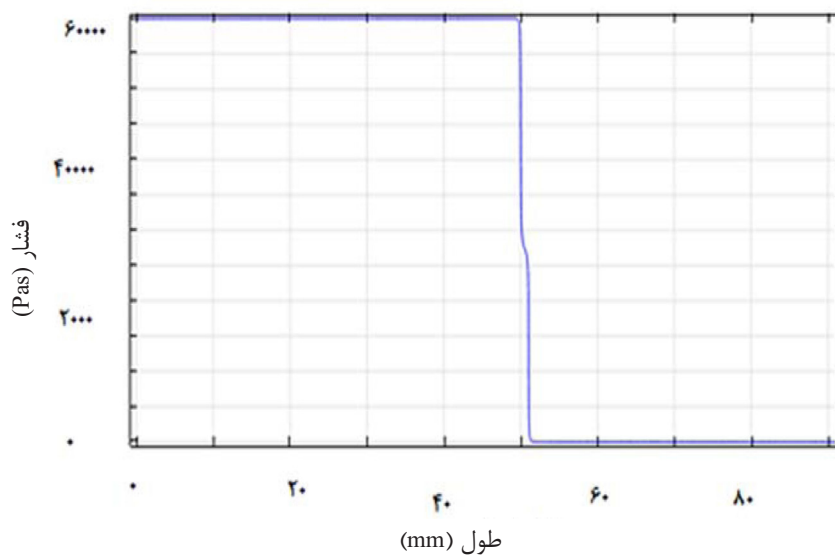
شکل ۸ اثرات افزایش قطر گلولی بر دبی جرمی عبوری.



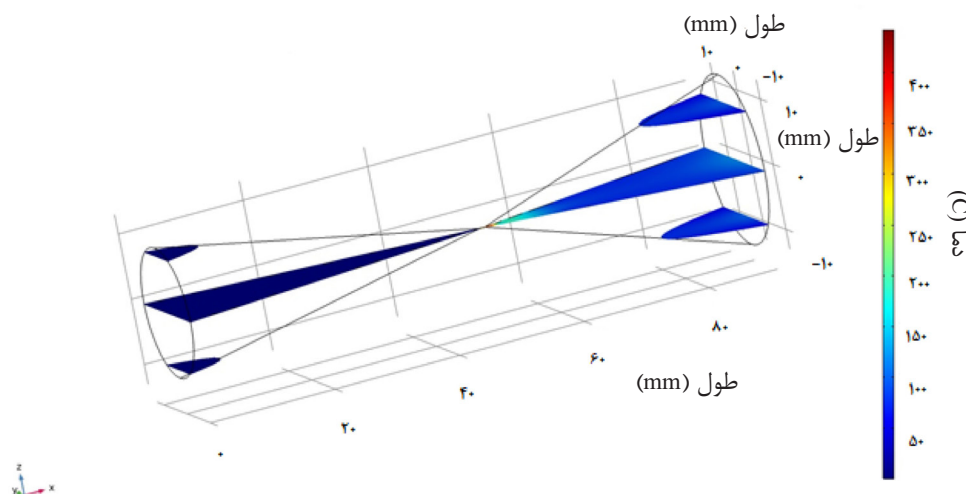
شکل ۹ تغییرات سرعت عبوری در طول اریفیس



شکل ۱۰ توزیع سرعت جریان عبوری از اریفیس



شکل ۱۱ تغییرات فشار در طول اریفیس.



شکل ۱۲ تغییرات سه‌بعدی دما در اریفیس.

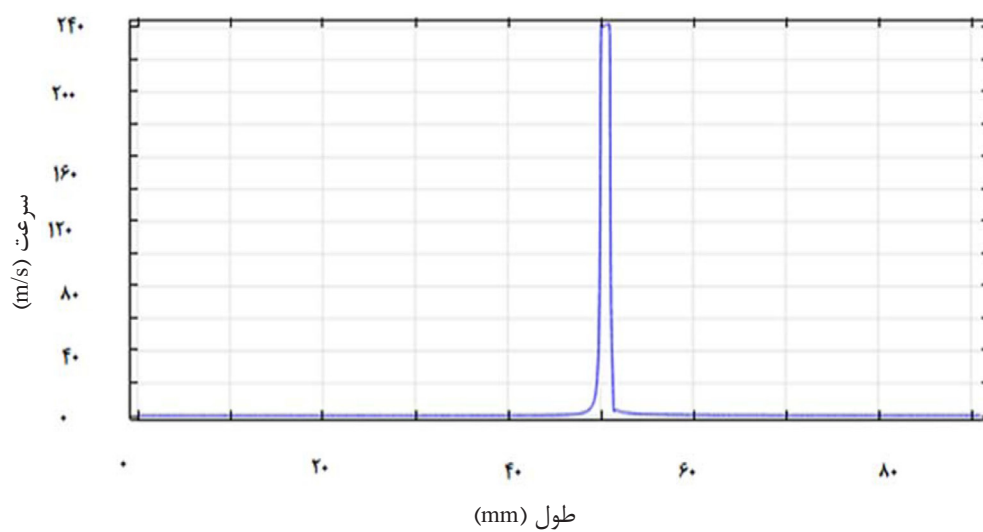
همان‌طور که از توزیع دما در اریفیس (شکل ۱۲) مشاهده می‌گردد دما در گلویی در بیشترین مقدار می‌باشد و سپس دما در محدوده بین گلویی و خروجی به یک مقدار کمینه می‌رسد و در خروجی دمای جریان کمتر از دمای گلویی می‌باشد. با بررسی سرعت عبوری و چگالی عبوری می‌توان دبی جرمی عبوری از اریفیس را در سطوح مختلف به‌دست آورد. دبی‌های جرمی ورودی، گلویی و خروجی محاسبه شده و در جدول ۱ ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، دبی جرمی عبوری از سطوح مختلف با اختلاف بسیار کمی با یکدیگر برابر است و فقط اختلاف ناچیزی دارند که ناشی از خطای نرم‌افزار در انجام محاسبات می‌باشد.

برقراری جریان مادون صوت در گلویی در این بخش، به بررسی نتایج حاصل از شبیه‌سازی که در آن سرعت جریان پایین‌تر از سرعت صوت می‌باشد، پرداخته می‌شود. در این قسمت جهت اینکه شرط جریان مادون صوت برقرار گردد، فشار ورودی، فشار خروجی و شعاع گلویی به ترتیب برابر

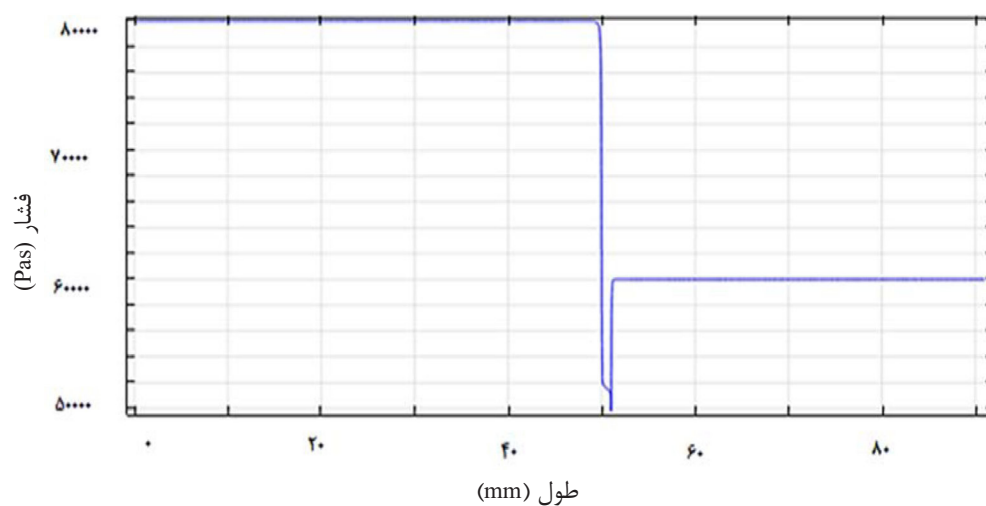
در شکل ۱۴ تغییرات فشار در طول اریفیس نشان داده است. همان‌طور که از شکل مشاهده می‌گردد، فشار در گلویی نسبت به ورودی و خروجی کاهش پیدا می‌کند. طبق معادله برنولی از آنجایی که در گلویی سرعت افزایش پیدا می‌کند، فشار کاهش پیدا می‌کند. تغییرات دمایی جریان در طول اریفیس در شکل ۱۵ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌گردد دما در گلویی کاهش پیدا می‌کند. این مقدار کاهش دما در جریان مادون صوت نسبت به جریان صوتی خیلی شدید نمی‌باشد.

جدول ۱ مقایسه دبی جرمی عبوری در سطوح مختلف اریفیس.

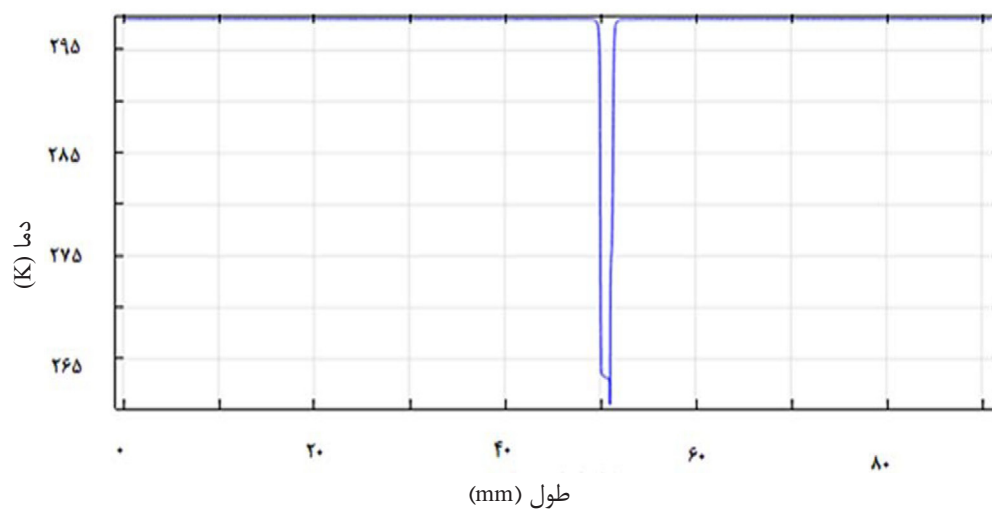
سطح خروجی	سطح وسط گلویی	سطح ورودی	محل سطح انتخابی
-۸۹۱۵/۴۷۷	-۸۸۵۹/۴۷۷	-۸۸۴۰/۴۷۷	دبی جرمی عبوری (kg/s)



شکل ۱۳ تغییرات سرعت در طول اریفیس.



شکل ۱۴ تغییرات فشار در طول اریفیس



شکل ۱۵ تغییرات دمایی در طول اریفیس.

C : ضریب تغییرات سطح نازل	در این پژوهش، جهت پیش‌بینی رفتار گاز داخل
d : قطر لوله (mm)	اوریفیس از دینامیک سیالات محاسباتی استفاده
ϵ : ثابت مدل ($k-\epsilon$)	شد. مدل سه‌بعدی اوریفیس به همراه جریان گاز
γ : نسبت ظرفیت گرمایی فشار ثابت به حجم ثابت	تراکم‌پذیر، جهت شبیه‌سازی مورد نظر با استفاده
I : (Turbulent intensity)	از دینامیک سیالات محاسباتی و با استفاده از نرم‌افزار
k : ثابت بولتزمن (m^2Kg/S^2K)	COMSOL به کار گرفته شد و جهت پیش‌بینی رفتار
k : ثابت مدل ($k-\epsilon$)	گاز داخل اوریفیس استفاده شد. جهت اعتبارسنجی
k : ضریب هدایت حرارتی ($W/m.K$)	مدل از معادلات موجود در این زمینه، سینقال و
l : (Turbulence length scale)	همکاران و هانلن و همکاران که بسیار پرکاربرد و
$\dot{m}$: دبی جرمی (Kg/S)	معتبر بودند، استفاده شد. نتایج در دو بخش جریان
M : جرم مولی ($\frac{g}{mol}$)	صوتی و جریان مادن صوت ارائه گردید. در جریان
μ : ویسکوزیته مطلق ($Pa.s$)	صوتی نشان داده شد که در گلویی دما و سرعت به
μ_T : ویسکوزیته مغشوش ($Pa.s$)	شدت بالا و فشار افت پیدا می‌کند. در جریان مادن
p : فشار (Pa)	صوت نیز نشان داده شد که در گلویی سرعت بالا
Q : گاز عبوری ($pa \frac{m^3}{s}$)	می‌رود و متناسب با آن، فشار افت می‌کند. نتایج
Q : تولید گرما (W/m^3)	دو بخش صوتی و مادن نشان دادند که مدل سه
q : شار گرمایی (W/m^2)	بعدی در نظر گرفته شده دارای دقت بالایی بوده و
R : ثابت جهانی گازها ($J/g \text{ mol.K}$)	به خوبی رفتار واقعی اریفیس را پیش‌بینی می‌کند.
ρ : دانسیته (kg/m^3)	با استفاده از نتایج مدل صورت گرفته می‌توان
T : دما (K)	محاسبات مربوط به اریفیس‌ها را انجام داده و از نتایج
u : سرعت کل (m/s)	آنها جهت استفاده عملی بهره جست.

علائم نشانه‌ها

A : سطح مقطع (m)

مراجع

- [1]. Jahromi P F, Karimi-Sabet J, Amini Y (2018) Ion-pair extraction-reaction of calcium using Y-shaped microfluidic junctions: An optimized separation approach, Chemical Engineering Journal, 334: 2603-2615.
- [2]. Moradi R, Monfared S M, Amini Y, Daštaz A (2016) Vacuum enhanced membrane distillation for trace contaminant removal of heavy metals from water by electrospun PVDF/TiO₂ hybrid membranes, Korean Journal of Chemical Engineering, 33, 7: 2160-2168.
- [3]. Moradi R, Karimi-Sabet J, Shariaty-Niassar M, Amini Y (2016) Air gap membrane distillation for enrichment of H₂ 18O isotopomers in natural water using poly(vinylidene fluoride) nanofibrous membrane, Chemical Engineering and Processing: Process Intensification, 100: 26-36.
- [4]. Yashvanth S, Seshadri V, KJ Y K (2017) CFD Analysis of Flow through Single and Multi Stage Eccentric Orifice Plate Assemblies.
- [5]. Fadaei M, Ameli F, Hashemabadi S H (2019) Experimental study and CFD simulation of two-phase flow measurement using orifice flow meter, Journal of Petroleum Research, 29, 98-5: 85-96.
- [6]. Dabiri Atashbeyk M, Shahbazi K, Fattahi M (2018) Pressure profile estimation through CFD in UBD operation considering with influx to wellbore, Iranian Journal of Chemistry and Chemical Engineering (IJCCE), 37, 6: 271-283.
- [7]. Tukiman M M, Ghazali M N M, Sadikin A, Nasir N F, Nordin N, Sapit A, Razali M A (2017) CFD simulation

- of flow through an orifice plate, in *Materials Science and Engineering*, 243, 1: 012036, IOP Publishing.
- [8]. Amini Y, Nasr Esfahany M (2019) CFD simulation of the structured packings: a review, *Separation Science and Technology*, 54, 15: 2536-2554.
- [9]. Murphy S, Delfos R, Pourquie M J B M, Olujić Ž, Jansens P J, Nieuwstadt F T M (2007) Prediction of strongly swirling flow within an axial hydrocyclone using two commercial CFD codes, *Chemical Engineering Science*, 62, 6: 1619-1635.
- [10]. Amini Y, Karimi-Sabet J, Nasr Esfahany M, Haghshenasfard M, Daştbağ A (2019) Experimental and numerical study of mass transfer efficiency in new wire gauze with high capacity structured packing, *Separation Science and Technology*, 54, 16: 2706-2717.
- [11]. Singh R, Singh S, Seshadri V (2010) Performance evaluation of orifice plate assemblies under non-standard conditions using CFD, 17: 397-406.
- [12]. Martin K, Reiberer R, Hager J (2006) Modeling of short tube orifices for CO₂.
- [13]. Stack J (2011) Design analysis of orifices for use in reactor coolant pump test loops, Rensselaer Polytechnic Institute.
- [14]. Singhal A, Parveen M (2013) Air flow optimization via a venturi type air restrictor, London UK, WCE.
- [15]. Peter U C, Chinedu U J C I (2016) Model prediction for constant area, variable pressure drop in orifice plate characteristics in flow system, *Chemistry International*, 2, 2: 80-88.
- [16]. Gan G, Riffat S B J E T, Science F (1997) Pressure loss characteristics of orifice and perforated plates, 14, 2: 160-165.
- [17]. Oliveira J L G, Passos J C, Verschueren R, Van Der Geld C (2009) Mass flow rate measurements in gas-liquid flows by means of a venturi or orifice plate coupled to a void fraction sensor, *Experimental Thermal and Fluid Science*, 33, 2: 253-260.
- [۱۸]. دوازده امامی م، میربهاغ، الماسیان ل (۱۳۸۴) شبیه‌سازی عددی جریان سیال در اریفیس‌های ورودی یک مشعل گازسوز به‌منظور بررسی اثرات تغییر فشار محفظه احتراق بر توزیع دبی سوخت در سر مشعل، سیزدهمین کنفرانس سالانه مهندسی مکانیک، اصفهان، ایران.
- [19]. Shah S, M, Joshi J B, Kalsi A S, Prasad C S R, Shukla D S (2012) Analysis of flow through an orifice meter: CFD simulation, *Chemical Engineering Science*, 71: 300-309.
- [20]. O'Hanlon J F (2005) A user's guide to vacuum technology, John Wiley and Sons.
- [21]. Saad M A (1985) Compressible fluid flow. Englewood Cliffs.
- [22]. Schreier S (1982) Compressible flow.
- [23]. Madenci E, Guven I (2015) The finite element method and applications in engineering using ANSYS®, Springer.
- [24]. Bathe K J (2007) Finite element method, Wiley Encyclopedia of Computer Science and Engineering, 1-12.
- [25]. Amini Y, Karimi-Sabet J, Esfahany M N (2016) Experimental and numerical simulation of dry pressure drop in high-capacity structured packings, *Chemical Engineering and Technology*, 39, 6: 1161-1170.
- [26]. Deshpande K B, Zimmerman W B (2006) Simulation of interfacial mass transfer by droplet dynamics using the level set method, *Chemical Engineering Science*, 61, 19: 6486-6498.
- [27]. Bird R B (2002) Transport phenomena, Appl. Mech. Rev., 55, 1: R1-R4.
- [28]. Salimi H, Hashemipour N, Karimi-Sabet J, Amini Y (2021) Applying the computational fluid dynamics studies of the thermogravitational column for N₂-CO₂ and He-Ar gas mixtures separation, *Chemical Product and Process Modeling*, 27, 8: 1745-1755.
- [29]. Hashemipour N, Karimi-Sabet J, Motahari K, Monfared S M, Amini Y, Moosavian M A (2019) Numerical study of n-heptane/benzene separation by thermal diffusion column, *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 27, 8: 1745-1755.
- [30]. Hashemipour N, Karimi-Sabet J, Motahari K, Monfared S M, Amini Y, Moosavian M A (2018) Experimental and simulation investigation on separation of binary hydrocarbon mixture by thermogravitational column, *Journal of Molecular Liquids*, 268: 791-806.
- [31]. Amini Y, Mokhtari M, Haghshenasfard M, Gerdroodbary M B (2015) Heat transfer of swirling impinging jets ejected from Nozzles with twisted tapes utilizing CFD technique, *Case Studies in Thermal Engineering*, 6: 104-115.
- [32]. Amini Y, Karimi-Sabet J, Nasr Esfahany M (2016) Experimental and numerical study of multiphase flow in new wire gauze with high capacity structured packing, *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 108: 35-43.
- [33]. Karbasi E, Karimi-Sabet J, Mohammadi-Rovshandeh J, Moosavian M A, Ahadi H, Amin Y (2017) Experimental and numerical study of air-gas membrane distillation (AGMD): novel AGMD module for

- Oxygen-18 stable isotope enrichment, *Chemical Engineering Journal*, 322: 667-678.
- [34]. Abdollahi P, Karimi-Sabet J, Moosavian M A, Amini Y (2020) Microfluidic solvent extraction of calcium: Modeling and optimization of the process variables, *Separation and Purification Technology*, 231: 115875.
- [35]. Marsousi S, Karimi-Sabet J, Moosavian M A, Amini Y (2019) Liquid-liquid extraction of calcium using ionic liquids in spiral microfluidics, *Chemical Engineering Journal*, 356: 492-505.
- [36]. Jahromi P F, Karimi-Sabet J, Amini Y, Fadaei H (2017) Pressure-driven liquid-liquid separation in Y-shaped microfluidic junctions, *Chemical Engineering Journal*, 328: 1075-1086.
- [37]. Sadeghi A, Amini Y, Saidi M H, Yavari H (2015) Shear-rate-dependent rheology effects on mass transport and surface reactions in biomicrofluidic devices, *AIChE Journal*, 61, 6: 1912-1924.
- [38]. Sadeghi A, Amini Y, Saidi M H, Chakraborty S (2014) Numerical modeling of surface reaction kinetics in electrokinetically actuated microfluidic devices, *Analytica Chimica Acta*, 838: 64-75.
- [39]. Esmacili Faraj S H, Nasr Esfahany M Amini Y (2014) Modeling of biofiltration process for removal of vinyl chloride from an air stream by modified ottengraf model, *Journal of Petroleum Research*, 24, 79: 21-30.
- [40]. Amini Y, Shadman M M, Karimi-Sabet J (2021) CFD simulation of flow distribution in the randomly packed bed Dixon ring, *Separation Science and Technology*, 1-10.
- [41]. Moradi R, Mosavat M, Gerdroodbary M B, Abdollahi A, Amini Y (2018) The influence of coolant jet direction on heat reduction on the nose cone with Aerodome at supersonic flow, *Acta astronautica*, 151: 487-493.
- [42]. Moradi R, Mahyari A, Gerdroodbary M B, Abdollahi A, Amini Y (2018) Shape effect of cavity flameholder on mixing zone of hydrogen jet at supersonic flow, *International Journal of Hydrogen Energy*, 43, 33: 16364-16372.
- [43]. Gerdroodbary M B, Amini Y, Ganji D D, Takam M R (2017) The flow feature of transverse hydrogen jet in presence of micro air jets in supersonic flow, *Advances in Space Research*, 59, 5: 1330-1340.
- [44]. Anazadehsayed A, Gerdroodbary M B, Amini Y, Moradi R (2017) Mixing augmentation of transverse hydrogen jet by injection of micro air jets in supersonic crossflow, *Acta Astronautica*, 137: 403-414.
- [45]. Barzegar Gerdroodbary M, Ganji D D, Amini Y (2015) Numerical study of shock wave interaction on transverse jets through multiport injector arrays in supersonic crossflow, *Acta Astronautica*, 115: 422-433.