

Investigation of the Effect of Sensors' Chamber Geometry and Fluid Type on Fluid Flow in the Electronic Nose System Using Computational Fluid Dynamics Simulation

A. Altafi¹, S. S. Mohtasebi^{1*}, A. Jafari¹, M. Ghasemi Varnamkhasti²

1- Department of Agricultural Machinery Engineering, Faculty of Agricultural Engineering and Technology, University of Tehran, Karaj, Iran

2- Department of Biosystem Mechanical Engineering, Faculty of Agriculture, University of Shahrekord, Shahrekord, Iran

(*- Corresponding Author Email: mohtaseb@ut.ac.ir)

<https://doi.org/10.22067/jam.2026.97514.1466>

Introduction

The electronic nose (e-nose) system analyses the volatile compounds in products by mimicking the human olfactory system and is capable of providing both chemical and sensory information. One of the most important applications of the electronic nose is gas sensors widely used in various industries, including construction, chemical and petrochemical, environmental monitoring, medical and pharmaceutical, agricultural, and food industries, as well as in many other processes where gas monitoring and analysis are essential. Due to the increasing cost of experimental testing, computational fluid dynamics (CFD) can be employed to investigate the effects of key factors in the electronic nose. CFD is a branch of numerical methods used to solve the governing equations describing various flow phenomena. In CFD, different methods and algorithms are utilised to obtain solutions; however, in all cases, the problem domain is discretised into a large number of small elements, and the governing equations are solved for each element. A review of previous studies indicates that simulation processes aimed at achieving reliable results in this field have received considerable attention, and the data obtained from these simulations can be highly accurate and efficient. Moreover, the sensor chamber plays an important role in enhancing the performance, stability, and sensitivity of an electronic nose. Therefore, four different configurations of 3D sensing chambers were simulated using ANSYS FLUENT software, examining both air and CO₂ as fluids. Numerical simulations were carried out to investigate the gas flow behaviour inside these four chambers and specify the optimal chamber design with the best stability time.

Materials and Methods

In the present study, four chamber geometries namely cylindrical, pyramidal, conical, and hemispherical, were designed using CATIA software. Subsequently, three-dimensional simulations were performed using Ansys Fluent software. To predict the fluid flow behaviour, the continuity equation and the Navier–Stokes equations were employed. The boundary conditions were identical for all geometries, and given the equal inlet and outlet cross-sectional areas across all configurations, the only difference among the models lies in their overall geometric structure. The electronic nose chambers were tested with a laminar flow and the SIMPLER method.

Results and Discussion

The 3-Dimensional simulations were conducted for the four geometries under two fluid injections, air and carbon dioxide, while maintaining identical boundary conditions. To investigate the fluid behaviour inside the geometries, flow field contours were presented at 25 s, 50 s, 75 s, and under approximate stability conditions when the contours became nearly time-invariant. In the air injection case, the fluid inside the hemispherical geometry reached steady-state conditions by 25 s, faster than in the other geometries, and maintained a similar flow pattern at later times. Based on the simulation results, the hemispherical geometry exhibited the best overall performance. This favourable behaviour can be attributed to the geometric dimensions of the hemisphere in the sensor surface region. In contrast, the behaviour of carbon dioxide differed significantly from that of air. Under carbon dioxide injection, similar to the air injection case, the fluid in the hemispherical geometry reached steady-state conditions by 25 s and fully covered the outlet region. In this geometry, the flow attained a nearly uniform distribution at 25 s, and the fluid fully contacted the sensor surface. Also, results showed that small vortices produced near the sensor surface can improve the stability time, and they can help to bring the fluid to the surface faster.

Conclusion

In the present study, four geometries were investigated under two injection conditions: air and carbon dioxide. The evaluations were conducted to identify the optimal geometry in terms of fluid flow behaviour, sensor surface coverage, and flow stability. The results demonstrated that the hemispherical geometry exhibited the best performance under both air and carbon dioxide injection conditions. This indicates that providing a larger fluid–sensor contact area along with a balanced geometric configuration can lead to improved fluid behaviour and overall system performance.

Keywords: Fluid flow pattern, Olfactory machine, Three-dimensional modelling

بررسی اثر هندسه محفظه حسگرها و نوع سیال بر جریان سیال در سامانه بینی الکترونیکی با استفاده از شبیه‌سازی دینامیک سیالات محاسباتی

عارفه الطافی^۱، سید سعید محتسبی^{۱*}، علی جعفری^۱، مهدی قاسمی ورنامخواستی^۲

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۱۱/۰۲

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۲/۱۵

چکیده

سامانه بینی الکترونیکی قابلیت تجزیه و تحلیل مواد فرار موجود در محصولات، با تقلید از بینی انسان را دارا بوده و داده‌های خروجی آن می‌تواند شامل اطلاعات شیمیایی و حسی بسیار مفیدی باشند. با توجه به نیاز به صرف هزینه و زمان زیاد برای ساخت و داده‌برداری از این محفظه‌ها به صورت تجربی، طراحی و شبیه‌سازی عددی صحیح و کارآمد آن‌ها می‌تواند دستیابی انسان به داده‌های مدنظر را بسیار تسهیل کند. بدین منظور و با هدف دستیابی به طراحی بهینه‌ی محفظه این سامانه‌ها جهت عملکرد بهتر حسگرها، در پژوهش حاضر چهار هندسه مختلف در دو حالت تزریق هوا و دی‌اکسیدکربن (CO₂) به صورت سه‌بعدی شبیه‌سازی و مورد بررسی قرار گرفته‌اند. هندسه‌ها طوری طراحی شده‌اند که از نظر ابعادی و همچنین سطح مقطع ورودی و خروجی یکسان بوده تا عملکرد جریانی و سیالاتی به ساختار ذاتی هندسه‌ها معطوف گردد. همچنین شرایط مرزی و مشخصات سیال برای تمامی هندسه‌ها یکسان بوده است. بررسی‌ها جهت یافتن بهترین هندسه از نظر نوع عملکرد سیال و پوشش سطح حسگرها و همچنین پایداری مناسب‌تر مورد ارزیابی قرار گرفتند. بررسی‌ها نشان داد که هندسه نیم‌کره بهترین عملکرد جریان را در هر دو حالت تزریق هوا و CO₂ داراست و سیال در زمان کمتری به سطح رسیده و همچنین به شرایط تعادلی می‌رسد. در این هندسه مناطق راکد کمتری در جریان سیال داخل محفظه پدید آمده و این امر موجب بهبود عملکرد و افزایش قابلیت اطمینان حسگرها می‌شود. نتایج همچنین نشان داد که پیدایش گردابه‌ها می‌تواند زمان رسیدن سیال به سطح حسگر را کاهش دهد.

واژه‌های کلیدی: الگوی جریان سیال، شبیه‌سازی سه‌بعدی، ماشین بویایی

مقدمه

سامانه بینی الکترونیکی، علاوه بر توانایی ارزیابی ترکیب‌های بودار، تخمین غلظت آن‌ها و یا تعیین برخی از خواص ذاتی آن‌ها، قابلیت تحلیل مواد فرار موجود در محصولات را با تقلید از بینی انسان دارا می‌باشد و می‌تواند اطلاعات شیمیایی و حسی بسیار کاربردی را ارائه دهد. از جمله کاربردهای این نوع سامانه‌ها، انواع حسگرهای گازی است که در قالب سامانه تشخیص یک دستگاه بینی الکترونیکی مورد استفاده قرار می‌گیرند. این حسگرها، باید قادر به ایجاد رد اثر متفاوتی برای هر نوع خاصی از گاز باشند. حسگرهای گازی در صنایع مختلفی مانند صنایع ساختمانی، شیمیایی،

پتروشیمی، محیط‌زیست، پزشکی و دارویی، کشاورزی، غذایی و بسیاری دیگر از فرایندهایی که کنترل و تحلیل گاز در آن الزامی است، کاربرد دارند. از جمله کاربردهای سامانه بینی الکترونیکی در بخش کشاورزی می‌توان به پایش سلامت و تشخیص آلودگی محصولات (Rezaee, Mohtasebi, & Firouz, 2024a, 2024b) شناسایی و تشخیص نوع چوب (Nikoutadbir, Tarmian, Mohtasebi, Mohtasebi, & Oladi, 2024) تشخیص درصد تقلب در محصولات غذایی (Oliveros et al., 2002) پیش‌بینی زمان برداشت، میزان رسیدگی محصول (Zhang, Pan, Zhao, & Tu, 2016) تعیین کیفیت محصولات در طول دوره انبارداری (Hui et al., 2015) اشاره کرد. کاربردهای تشخیصی و طبقه‌بندی مواد غذایی به روش ماشین بویایی، به دلیل سادگی عملکرد، غیر مخرب بودن، سرعت و غیره روز به روز در حال گسترش است. از مزایای بینی الکترونیکی، به‌ویژه نسبت به آنالیزهای شیمیایی، می‌توان به هزینه کم، سهولت استفاده و توانایی پاسخ سریع به مخلوط‌های پیچیده اشاره کرد که آن را به یک فناوری قدرتمند برای تجزیه و تحلیل ترکیبات شیمیایی فرار تبدیل می‌کند.

۱- گروه مهندسی ماشین‌های کشاورزی، دانشکده مهندسی و فناوری کشاورزی، دانشگاه تهران، کرج، ایران

۲- گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران

(* - نویسنده مسئول: Email: mohtasebi@ut.ac.ir)

<https://doi.org/10.22067/jam.2026.97514.1466>

یک سامانه بین‌الکترونیکی شامل محفظه نمونه، محفظه حسگرها، پمپ، منبع تغذیه، فیلتر و سامانه جمع‌آوری داده است (Pearce, Schiffman, Nagle, & Gardner, 2006; Rezaee et al., 2024b).

علی‌رغم این‌که فناوری بین‌الکترونیکی از زمان معرفی به‌طور گسترده به‌عنوان یک فناوری بالقوه پیشگام شناخته‌شده است، چالش‌های متعددی هنوز کاربردهای حسگرهای گازی و بین‌الکترونیکی را در فعالیت‌های تحقیقاتی محدود می‌کند (Covington, Marco, Persaud, Schiffman, & Nagle, 2021). عوامل مداخله‌گری که به‌ویژه در کاربردهای بین‌الکترونیکی حیاتی به‌نظر می‌رسد شامل رطوبت، درجه حرارت، جریان، نرخ جریان و دینامیک سیال محفظه است. استراتژی‌های جبران سخت‌افزاری با هدف بهبود کیفیت پاسخ حسگرهای بین‌الکترونیکی شامل انتخاب و طراحی حسگر، روش‌های نمونه‌گیری برای محدود کردن اثرات عوامل مداخله‌گر و هندسه محفظه حسگرها می‌باشد (Karimzadeh & Assar, 2016; Kumar et al., 2020). رطوبت یکی از مشکلاتی است که اغلب در مطالعات به‌دلیل تأثیر قابل‌توجه آن بر پاسخ حسگرها مورد مطالعه قرار می‌گیرد (Chai et al., 2022; Korotcenkov & Cho, 2011). به‌عنوان یک قاعده کلی، وجود رطوبت منجر به جابه‌جایی کل خط پایه حسگرهای بین‌الکترونیکی، کاهش دامنه پاسخ حسگرها و در نتیجه کاهش حساسیت حسگرها می‌شود. در مورد تأثیر دما بر پاسخ حسگرهای بین‌الکترونیکی می‌بایست دو نوع دما در نظر گرفته شود. این دماها شامل دمای عملکرد حسگر و دمای نمونه گازی هستند. دمای کار حسگر (دمایی که در آن لایه فعال و حساس گرم می‌شود)، پارامتری مهم به‌ویژه برای حسگرهای MOS یا مبتنی بر گرافن می‌باشد. زیرا واکنش‌های سطحی به شدت به دمای عنصر حسگر بستگی دارد. حسگرهای پلیمر رسانا در دمای محیط کار می‌کنند، اما نشان داده‌شده است که افزایش دمای کاری تا حدود ۷۰ درجه سلسیوس، که پلیمرها شروع به تجزیه می‌کنند، می‌تواند حساسیت را افزایش داده و خرابی حسگر را کاهش دهد (Dey, 2018; Yuan, Benck, Eatmon, Blankschtein, & Strano, 2018). یکی دیگر از عوامل مؤثر بر پاسخ حسگرهای گازی، جریان گاز نمونه‌برداری است. در مورد تغییرات جریان گاز در حسگرهای بین‌الکترونیکی، باید در نظر داشت که در برخی از کاربردها، نمونه‌برداری و تجزیه و تحلیل در زمان‌های مختلف انجام می‌شود. در مقابل، در برخی دیگر، نمونه‌گیری و تجزیه و تحلیل هم‌زمان اتفاق می‌افتد. در این موارد، جنبه اصلی که باید مورد توجه قرار گیرد، هندسه محفظه و پایداری نرخ جریان گاز در مرحله تجزیه و تحلیل است (Robbiani, Lotesoriere, Dellacà, & Capelli, 2023). اسکات و همکاران

(O'Hare, 2004) عنوان کردند که دینامیک سیال محفظه بین‌الکترونیکی بر پاسخ حسگرهای مورد استفاده تأثیر می‌گذارد. در این مطالعه نتیجه‌گیری شد که وجود یک مانع عملکرد حسگرها را از نظر زمان پاسخ افزایش می‌دهد. در نتیجه پاسخ سریع‌تری نسبت به موقعیتی که سطح حسگرها در جهت عمود بر مسیر جریان قرار می‌گیرند، ایجاد می‌کند (Lezzi et al., 2001; Sedláč & Kuberský, 2020; Shyla, Naidu, & Kumar, 2013). محققین با تمرکز بر طراحی محفظه حسگرها بیان کرده‌اند که در داخل محفظه، شرایط پایدار و یکنواخت باید در سریع‌ترین زمان ممکن حاصل شود (Cheng, Liu, & Meng, 2020; Sedláč & Kuberský, 2020). برای اطمینان از شرایط پایدار و یکنواخت، جریان آرام در محفظه مورد نیاز است. برای جبران عوامل فیزیکی مؤثر بر پاسخ حسگرها، روش‌های مختلف سخت‌افزاری می‌توانند در سامانه‌های بین‌الکتریک پیاده‌سازی شوند. چنین راه‌حلی می‌تواند شامل اصلاحات و طرح‌های خاص مربوط به روش‌های ساخت حسگرها (Hunter et al., 2020; Liu, Ma, Pinna, & Zhang, 2017; Xue et al., 2020)، طراحی سامانه نمونه‌برداری و از همه مهم‌تر، طراحی هندسه محفظه باشد (Covington et al., 2021; Dragonieri, Pennazza, Carratu, & Resta, 2017; Fonollosa, Fernández, Gutiérrez-Gálvez, Huerta, & Marco, 2016; Laref, Ahmadou, Losson, & Siadat, 2017).

هندسه محفظه جنبه‌ای حیاتی برای افزایش پاسخ حسگرها از نظر زمان پاسخ و قابلیت اطمینان است. الزامات یک محفظه حسگر بین‌الکترونیکی برای تضمین پاسخ‌های سریع و قابل‌اعتماد عبارتند از: (الف) حجم کم، (ب) عدم گردش مجدد یا مناطق راکد، و (ج) جریان آرام. علاوه بر این، بیشتر مطالعات اشاره می‌کنند که داشتن لایه فعال حسگر عمود بر جهت جریان می‌تواند پاسخ آن را افزایش دهد. چاودری و همکاران (Chowdhury, Kumar, Kumar, Karar, & Bhondekar, 2016) چگونگی کاهش حجم داخلی یک محفظه را مورد مطالعه قرار دادند. نویسندگان در این پژوهش سه هندسه محفظه را در نظر گرفتند. شبیه‌سازی‌های CFD نشان داد طرحی که شرایط یکسانی را برای همه حسگرها تضمین می‌کند بهتر از دو طرح دیگر عمل کرد. سامیان و ادی (Samiyan & Addi, 2017) هندسه سه محفظه مستطیلی، لوله‌ای شکل و کروی را با شبیه‌سازی توزیع جریان در داخل محفظه و انجام آزمایش‌هایی بر روی زمان پاسخ حسگرهای MOS هنگام قرار گرفتن در معرض الکل مقایسه کردند. نتایج ایشان نشان داد که محفظه‌های مستطیلی و لوله‌ای شکل تحت تأثیر نواحی چرخشی و راکد قرار می‌گیرند و این فرایند تأثیر منفی روی عملکرد محفظه خواهد داشت. آنانوش و همکاران در مطالعات خود عملکرد یک حسگر واحد را در دو محفظه قایق‌شکل و صلیب‌شکل شبیه‌سازی و

اهمیت هندسه محفظه سامانه بر جریان سیال و عملکرد حسگرها، با هدف دستیابی به هندسه‌ی بهینه‌ی محفظه، در پژوهش حاضر فرایند طراحی و شبیه‌سازی چهار هندسه مختلف و با ساختار متنوع شامل استوانه، هرم، نیم‌کره و مخروط به‌صورت سه‌بعدی و با نرم‌افزارهای CATIA و Ansys Fluent انجام شد تا تاثیر ساختارهای فیزیکی هندسه‌هایی که می‌توانند بسیار مورد استفاده قرار گرفته و کاربردی باشند، مورد بررسی قرار گیرد. همچنین شبیه‌سازی تمامی هندسه‌ها با تزریق دو سیال هوا و CO₂ صورت گرفته و نتایج با یکدیگر مقایسه شده‌اند. از هوا به‌عنوان سیال جهت پاک‌سازی محفظه و حسگرها استفاده شده است. با توجه به این‌که CO₂ یکی از گازهای حاصل از تنفس محصولات کشاورزی پس از برداشت آن‌ها می‌باشد، از این سیال به‌عنوان سیال هدف برای حسگرها استفاده شده است. در نتیجه در مطالعه حاضر علاوه بر طراحی و شبیه‌سازی چهار هندسه متنوع، کاربردی و متفاوت از لحاظ ساختاری، تاثیر تغییر نوع سیال با استفاده از دو سیال مهم و حائز اهمیت نیز صورت پذیرفته است. در حالی‌که در سایر مطالعات شبیه‌سازی، بررسی هم‌زمان دو نوع سیال و رفتار آن‌ها در چهار هندسه متفاوت که از لحاظ ابعاد و ساختاری جدید می‌باشند، انجام نشده است. این مقایسه درک بسیار مناسبی از نوع رفتار و عملکرد سیال در حالات مختلف را نشان داده و می‌تواند بینش بسیار مفیدی را در این زمینه ایجاد کند.

مواد و روش‌ها

معادلات حاکم، روش حل و شرایط مرزی

در مطالعه حاضر، چهار هندسه مختلف با استفاده از نرم‌افزار CATIA طراحی شده‌اند. سپس، فرایند شبیه‌سازی به‌صورت سه‌بعدی و با استفاده از نرم‌افزار Ansys Fluent انجام شد. برای پیش‌بینی جریان سیال، از معادلات پیوستگی و ناویراستوکس (روابط ۱ و ۲) استفاده می‌شود (Dohare et al., 2020):

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

$$\rho \frac{DV}{Dt} = -\nabla P + \mu \nabla^2 V + \rho g \quad (2)$$

که در این روابط V سرعت، P فشار، ρ چگالی جرم هوا و μ ضریب ویسکوزیته دینامیکی است. روش حل Second order upwind برای تقریب معادله مومنتوم استفاده شده‌است. سیال آرام^۲ در نظر گرفته شده و همچنین کوپل سرعت و فشار نیز با استفاده از الگوریتم SIMPLEC صورت پذیرفته است. حلگر مورد استفاده

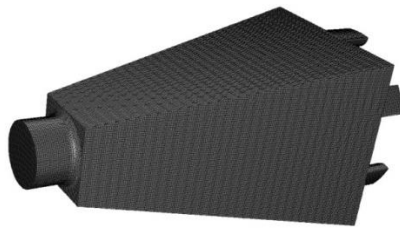
مقایسه کردند. نویسندگان به این نتیجه رسیدند که محفظه قایق‌شکل به دلیل کاهش حجم داخلی و کاهش مناطق راکد و در حال چرخش، بهتر از محفظه صلیب‌شکل عمل می‌کند (Annanouch et al., 2018; Annanouch et al., 2019). دوه‌ره و همکاران (Dohare, Bagchi, & Bhondekar, 2020) از مانع برای بهینه‌سازی جریان داخل محفظه استفاده کردند. نتایج شبیه‌سازی نشان داد که هرچه سرعت جریان بیشتر باشد، مناطق راکد کمتر می‌شوند. در پژوهشی که توسط لویز و همکاران (Lopez et al., 2020) انجام شد، عملکرد دو هندسه محفظه مقایسه شدند تا مناطق راکد را در این هندسه‌ها مورد بررسی قرار دهند. هارموزی و همکاران (Harmouzi, Amari, & Masmoudi, 2023) یک نمونه بینی الکترونیکی را شبیه‌سازی کردند. نویسندگان با بهره‌گیری از هندسه‌های ارائه‌شده توسط سامیان و ادی (Samiyan & Addi, 2017) و اعمال اصلاحات روی محفظه، یک قوس مماسی برای حذف گوشه در دو طرف محفظه استفاده کردند که توزیع جریان هوا در محفظه‌ی اصلاح‌شده به‌طور کلی یکنواخت و بدون تلاطم بود.

جهت بررسی تجربی هندسه‌های مختلف، علاوه بر صرف هزینه زیاد جهت ساخت هندسه‌ها و تامین حسگرها، زمان زیاد داده‌برداری و تامین شرایط محیطی مناسب، داده‌هایی از جمله زمان رسیدن سیال به حسگر و زمان عملکرد حسگرها به‌دست خواهد آمد و برای دستیابی به شکل‌های کاتوری و وکتورها، نیاز به ابزار و حسگرهای خاص و گران‌قیمت می‌باشد که در نتیجه انجام فرایند تجربی و دستیابی به داده‌ها را بسیار پرهزینه و زمان‌بر خواهد کرد. در نتیجه با انجام فرایند شبیه‌سازی می‌توان علاوه بر صرف زمان کم، هزینه کم، هندسه‌های متنوع‌تری را تحلیل و پس از یافتن بهترین هندسه محفظه، صرفاً همان هندسه را جهت راستی‌آزمایی به‌صورت تجربی تحلیل کرد. در همین خصوص، بررسی مطالعات انجام‌شده در سال‌های اخیر نیز نشان داد که فرایند شبیه‌سازی جهت دستیابی به نتایج مناسب در این زمینه بسیار مورد توجه قرار گرفته و داده‌های به‌دست‌آمده از این شبیه‌سازی‌ها بسیار دقیق و کارآمد هستند. لازم به ذکر است که فرایند شبیه‌سازی نیز دارای محدودیت‌هایی از جمله نیاز به سیستم‌های رایانه‌ای با توانمندی بالا است که قادر به انجام شبکه‌بندی‌های سه‌بعدی و از همه مهم‌تر شبیه‌سازی سیالاتی آن‌ها باشد. روش دینامیک سیالات محاسباتی (CFD^۱) شاخه‌ای است از روش‌های عددی برای حل معادلات حاکم بر کشف قوانین و پدیده‌های مختلف جریان. اکنون روش CFD جای خود را در میان روش‌های آزمایشگاهی و تحلیلی برای تحلیل مسائل سیالات و انتقال حرارت باز کرده است و استفاده از این روش برای انجام تحلیل‌های مهندسی امری عادی شده است. با توجه به تاثیر حائز

شرایط مرزی برای تمامی هندسه‌ها مشابه بوده و با توجه به سطح مقطع یکسان ورودی و خروجی در تمامی هندسه‌ها، تنها تفاوت در ساختار کلی و ذاتی هندسه‌ها می‌باشد. شرایط مرزی اعمال شده از قبیل سرعت ورودی ۰/۸ متر بر ثانیه و شرط مرزی Pressure outlet برای خروجی است.

تصاویر هندسه‌ها، ابعاد آن‌ها و نوع شبکه‌بندی آن‌ها در شکل‌های ۱ و ۲ قابل مشاهده است.

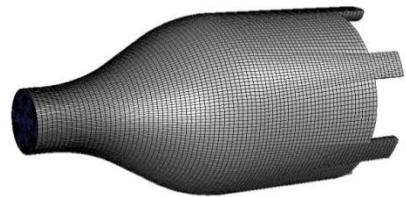
مشابه با مقاله چانگ و همکاران (Chang et al., 2018)، Pressure based و در حالت Transient بوده است. هندسه‌ها طوری طراحی شده‌اند که از نظر طولی و همچنین سطح مقطع ورودی و خروجی یکسان بوده تا عملکرد جریانی و سیالاتی به ساختار هندسه‌ها معطوف گردد. جهت شبکه‌بندی این هندسه‌ها سعی شده‌است تا حد امکان از شبکه‌های ساختاری (مربعی- مکعبی) که نتایج بهتری نسبت به سایر شبکه‌بندی‌ها دارند استفاده گردد.



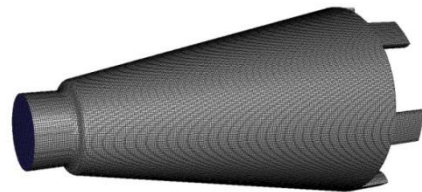
هندسه هرم (Pyramidal)



هندسه نیم کره (Hemispherical)



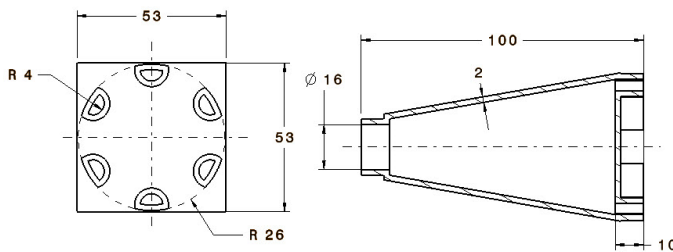
هندسه استوانه‌ای (Cylindrical)



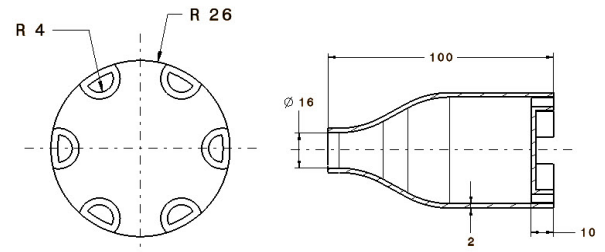
هندسه مخروط (Conical)

شکل ۱- ساختار شبکه‌بندی هندسه‌های مورد بررسی در شبیه‌سازی

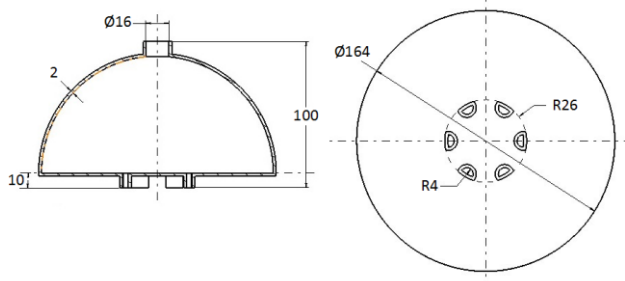
Fig. 1. Meshing structure of the geometries investigated in the simulation



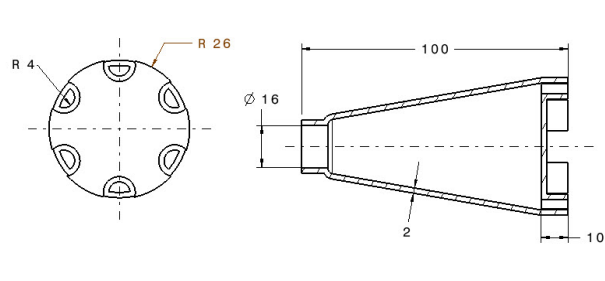
هندسه هرم (Pyramidal)



هندسه استوانه‌ای (Cylindrical)



هندسه نیم کره (Hemispherical)



هندسه مخروط (Conical)

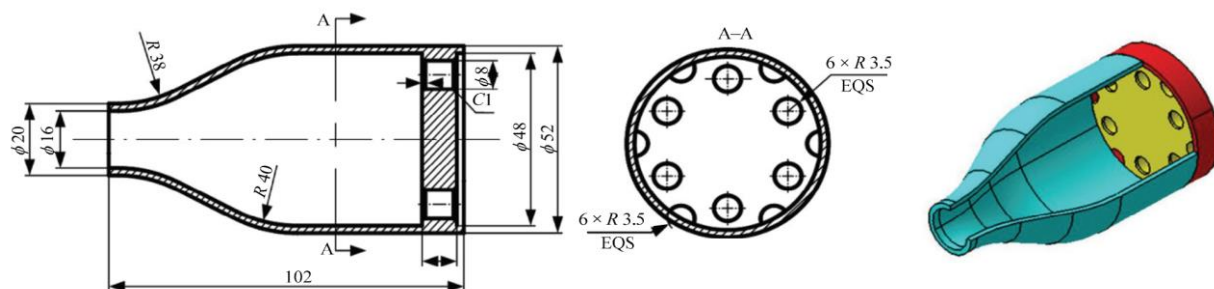
شکل ۲- ابعاد هندسه‌های مورد بررسی در شبیه‌سازی

Fig. 2. Dimensions of the geometries investigated in the simulation

اعتبارسنجی و استقلال از شبکه

اولین مرحله جهت آغاز فرایند طراحی و ساخت محفظه و شبیه‌سازی آن، دستیابی به روش حل درست با انجام فرایند اعتبارسنجی با مقالات مشابه می‌باشد. انجام فرایند اعتبارسنجی می‌تواند خط مشی مناسبی برای ادامه مسیر پروژه باشد و به همین جهت، مقاله‌ای مشابه در زمینه طراحی بهینه بیونیک محفظه بینی

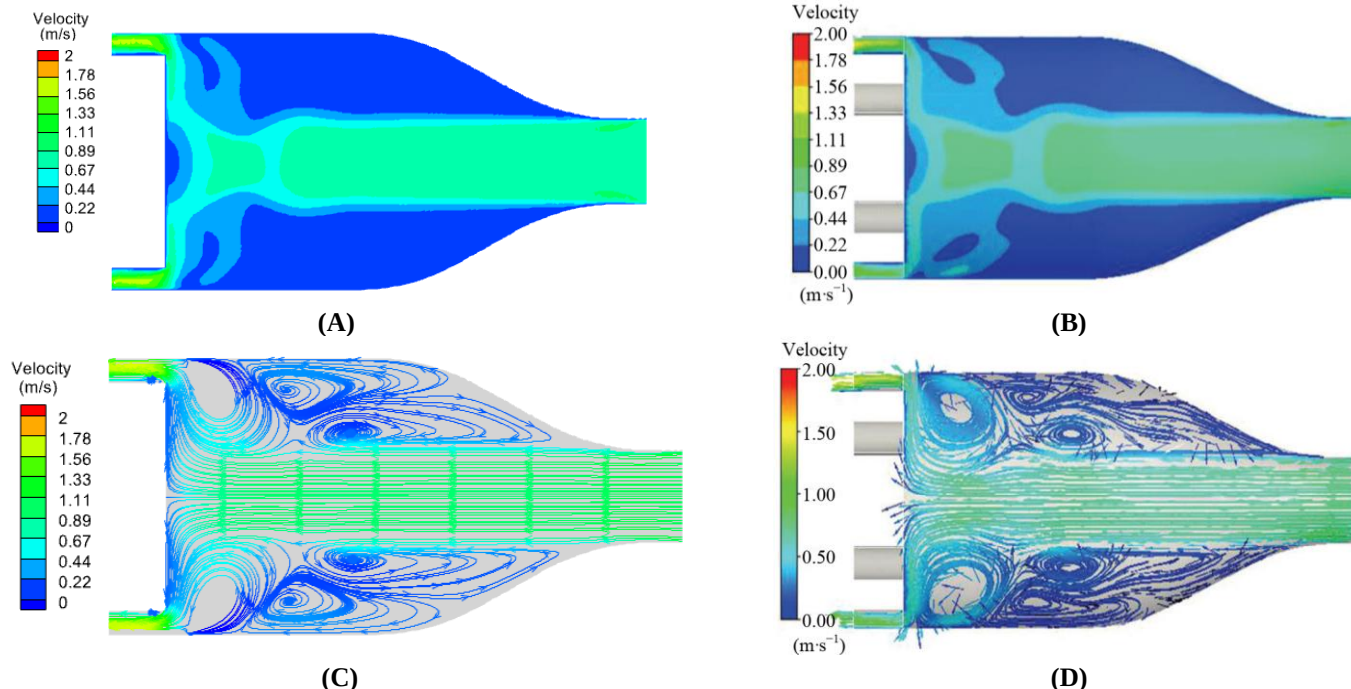
الکترونیکی برای تشخیص نفت و گاز مورد بررسی، طراحی و شبیه‌سازی قرار گرفت. هندسه مورد مطالعه در این مقاله در شکل ۳ مشاهده می‌شود. جهت آغاز فرایند، ابعاد مطابق با تصویر مقاله مذکور طراحی و برای اجرای شبیه‌سازی، شبکه‌بندی در نرم‌افزارهای Ansys (ICEM) انجام شده است.



شکل ۳- هندسه مورد بررسی در مقاله (Chang et al. (2018)
Fig. 3. The investigated geometry Chang et al. (2018)

گرفت و همان‌طور که در شکل ۴ مشاهده می‌شود، کانتور و وکتور سرعت به‌دست‌آمده در شبیه‌سازی کنونی، تطابق بسیار خوبی با داده‌های این مقاله دارد. همچنین، مشابه مقاله مذکور، مقدار دبی خروجی در این اعتبارسنجی نیز عدد ۰/۱۹۶۸ به‌دست آمده است که دقت شبیه‌سازی حاضر را تایید می‌کند (Chang et al., 2018).

فرایند شبیه‌سازی نیازمند وجود داده‌های اولیه نظیر سرعت ورودی، نوع سیال، دانسیته سیال و غیره می‌باشد، که این داده‌ها از تحقیقات مشابه برداشت شده و شبیه‌سازی با استفاده از نرم‌افزار Ansys Fluent انجام گردید. نتایج به‌دست‌آمده از شبیه‌سازی‌ها با نتایج مقاله چانگ و همکارانش مورد بررسی قرار

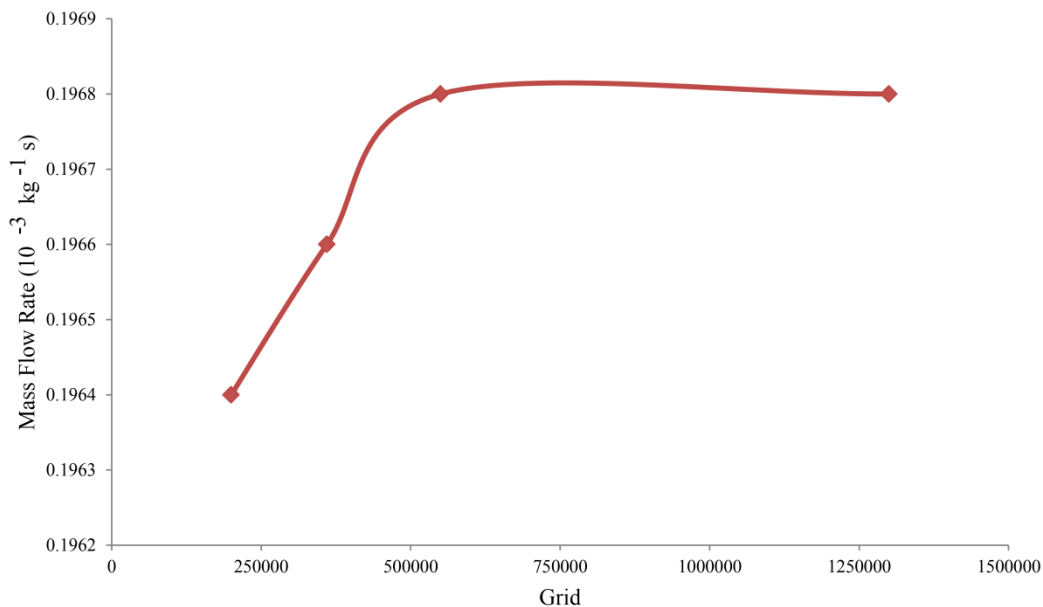


شکل ۴- مقایسه داده‌های مقاله با نتایج شبیه‌سازی: (A) کانتور و (C) وکتورهای سرعت در شبیه‌سازی صورت‌گرفته، و (B) کانتور و (D) وکتورهای سرعت در مقاله مورد بررسی

Fig. 4. Comparison between the data reported in the reference article and the simulation results: velocity (A) contour and (C) vectors obtained from the performed simulation, and velocity (B) contour and (D) vectors reported in the reference article

می‌رسد. با ادامه روند افزایش تعداد شبکه تا ۱۳۰۰۰۰۰ شبکه، مقدار دبی همچنان در عدد ۰/۱۹۶۸ مانده و لذا نتایج شبیه‌سازی از تعداد شبکه مستقل شده است. در نتیجه مقدار شبکه کمتر برای انجام شبیه‌سازی‌ها انتخاب گردیده است.

جهت بررسی استقلال از شبکه، مش‌های مختلفی با تعداد شبکه‌های نشان داده در شکل ۵ مورد بررسی قرار گرفت. همانطور که در شکل مشاهده می‌شود، با افزایش تعداد شبکه تا تعداد ۵۵۰ هزار، مقدار دبی خروجی به مقدار صحیح (10^{-3} kgs^{-1}) ۰/۱۹۶۸



شکل ۵- نمودار استقلال از شبکه

Fig. 5. Grid independence plot

و جهت دستیابی به پایداری کامل آن، نیازمند انجام شبیه‌سازی بیشتری است (تصویر Stable state). مشابه این پدیده در هندسه‌های هرمی و مخروطی (شکل ۷ و ۸) نیز اتفاق افتاده است. در شکل ۷ (هندسه هرمی)، سیال در زمان شبیه‌سازی ۷۵ ثانیه کاملاً سطح حسگرها را لمس کرده و تفاوت آن با هندسه استوانه‌ای در آن است که هندسه هرم در زمان ۷۵ ثانیه به پایداری بهتری رسیده است. هندسه مخروطی (شکل ۸) نیز در زمان ۷۵ ثانیه کاملاً روی سطح قرار گرفته است ولی جهت رسیدن به تعادل کامل به زمان بسیار بیشتری نسبت به دو هندسه قبل نیاز دارد. اما رفتار هندسه نیم‌کره بسیار متفاوت از سه هندسه دیگر است. همانطور که در شکل ۹ مشاهده می‌شود، سیال در این حالت در زمان ۲۵ ثانیه کاملاً به پایداری رسیده و در زمان‌های بیشتر شکل یکسانی را دارا می‌باشد. برای هندسه نیم‌کره، جهت دید بهتر عملکرد سیال (به علت این که در زمان کمتر از ۵۰ ثانیه به تعادل می‌رسد)، تصاویر در زمان‌های ۵، ۲۵ و ۵۰ ثانیه و شرایطی که تقریباً پایدار است (زمانی که کانتورها تقریباً دارای فرم ثابتی شدند) نشان داده شده است. لازم به ذکر است که سرعت سیال نقش حیاتی در توزیع همگن سیال داخل محفظه دارد

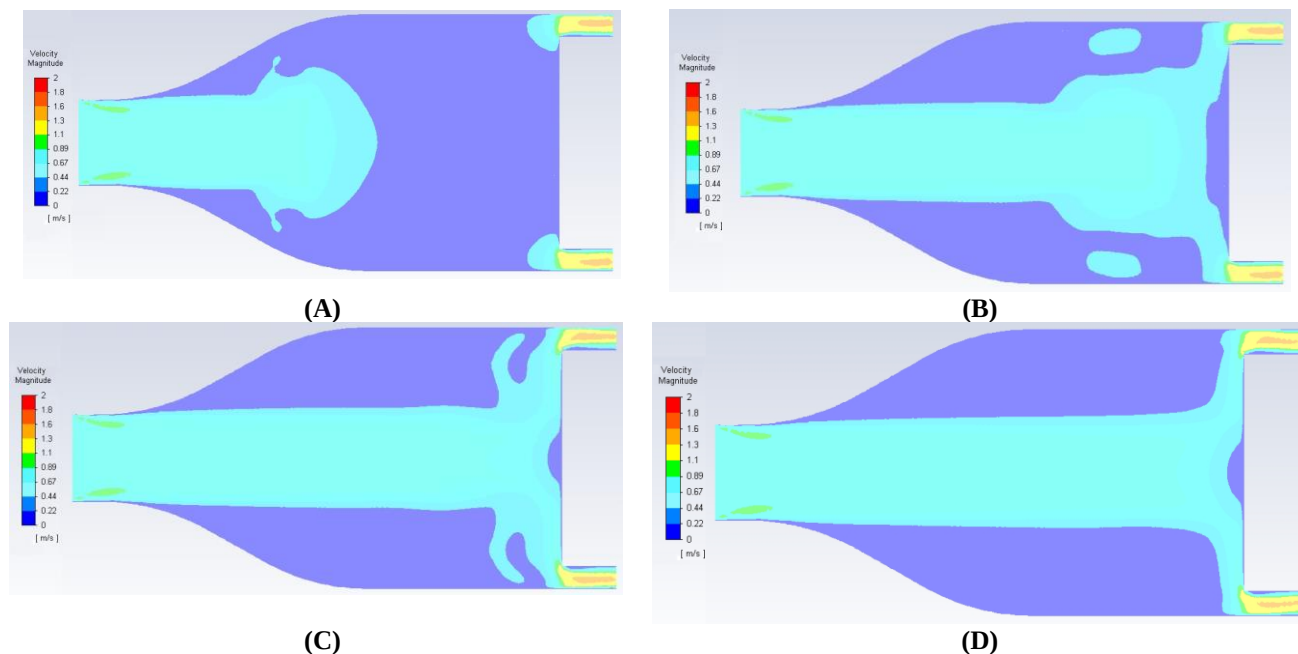
نتایج و بحث

همان‌طور که بیان شد، در پژوهش حاضر فرایند شبیه‌سازی چهار هندسه مختلف شامل استوانه، هرم، مخروط و نیم‌کره به صورت سه‌بعدی و در دو حالت تزریق سیال هوا و CO_2 و با شرایط مرزی یکسان صورت پذیرفته است. جهت بررسی رفتار سیال در هندسه‌ها از جمله زمان رسیدن به سطح حسگرها و زمان تقریبی پایداری، تصاویر آن‌ها در زمان‌های ۲۵، ۵۰ و ۷۵ ثانیه و شرایطی که تقریباً پایدار است (زمانی که کانتورها تقریباً دارای فرم ثابتی شدند) نشان داده شده و با یکدیگر مقایسه شده‌اند. علاوه بر کانتورهای سرعت، نمودارهای خطوط مسیر سیال^۱ نیز جهت نمایش بهتر عملکرد هندسه‌ها آورده شده است.

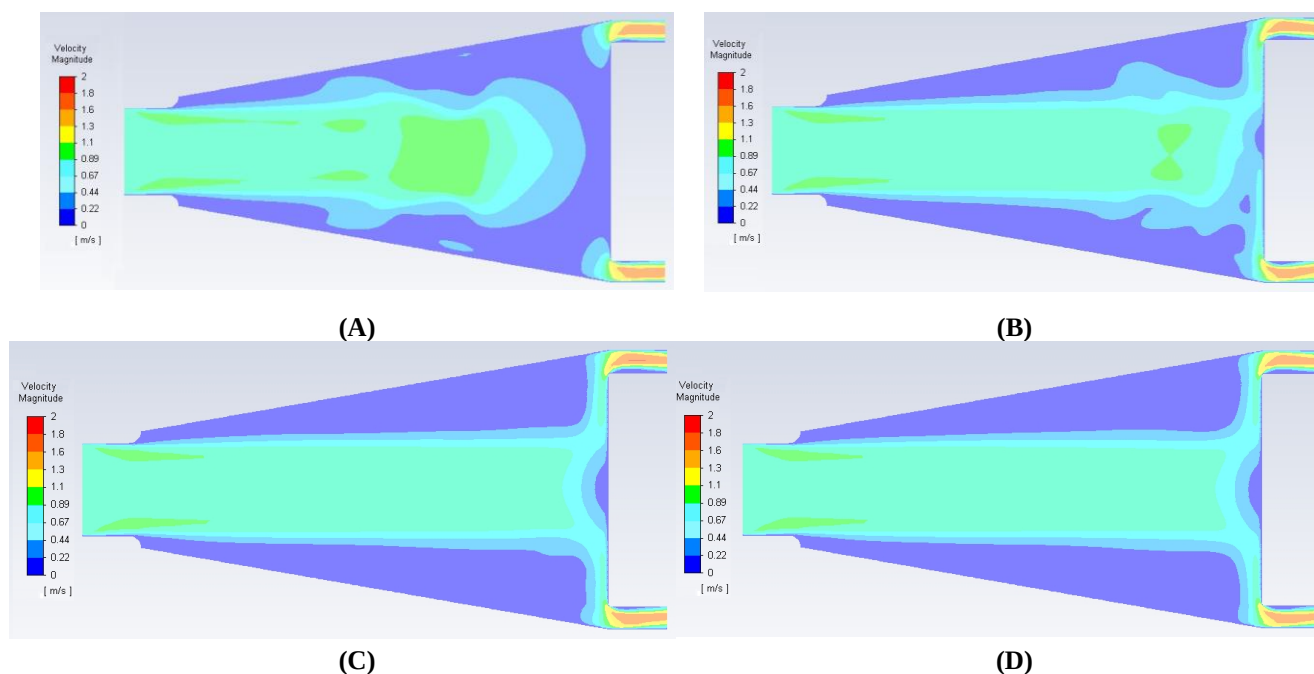
جهت مقایسه عملکرد چهار هندسه در حالت تزریق هوا، همان‌طور که در شکل ۶ و برای هندسه استوانه‌ای قابل مشاهده است، با افزایش زمان شبیه‌سازی، سیال در زمانی کمتر از ۵۰ ثانیه سطح حسگرها را لمس و در زمان ۷۵ ثانیه به طور کامل سطح حسگرها را پوشش داده

مخروطی و نیم کره افزایش یافته است که در نتیجه می تواند باعث رسیدن زودتر سیال به سطح حسگرها (تماس اولیه با سطح حسگرها) شود.

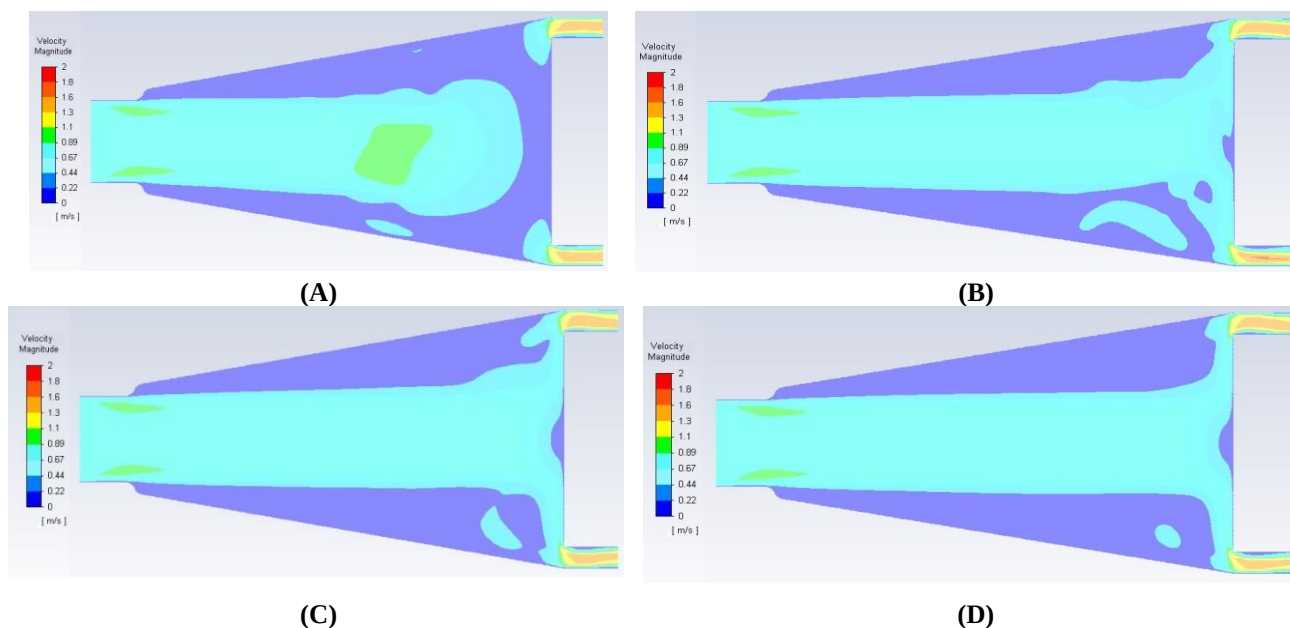
(Cai, Ding, & Wang, 2025) و همان طور که در شکل ها مشاهده می شود، ناحیه های جانبی محفظه ها دارای قسمت های مرده هستند و سرعت سیال در قسمت میانی جریان اصلی برای هندسه های هرمی،



شکل ۶- کانتورهای سرعت هندسه استوانه ای در زمان های (A) 25 s، (B) 50 s، (C) 75 s و (D) شرایط پایداری نسبی برای هوا
Fig. 6. Velocity contours of the cylindrical geometry at (A) 25 s, (B) 50 s, (C) 75 s, and (D) stability conditions for air

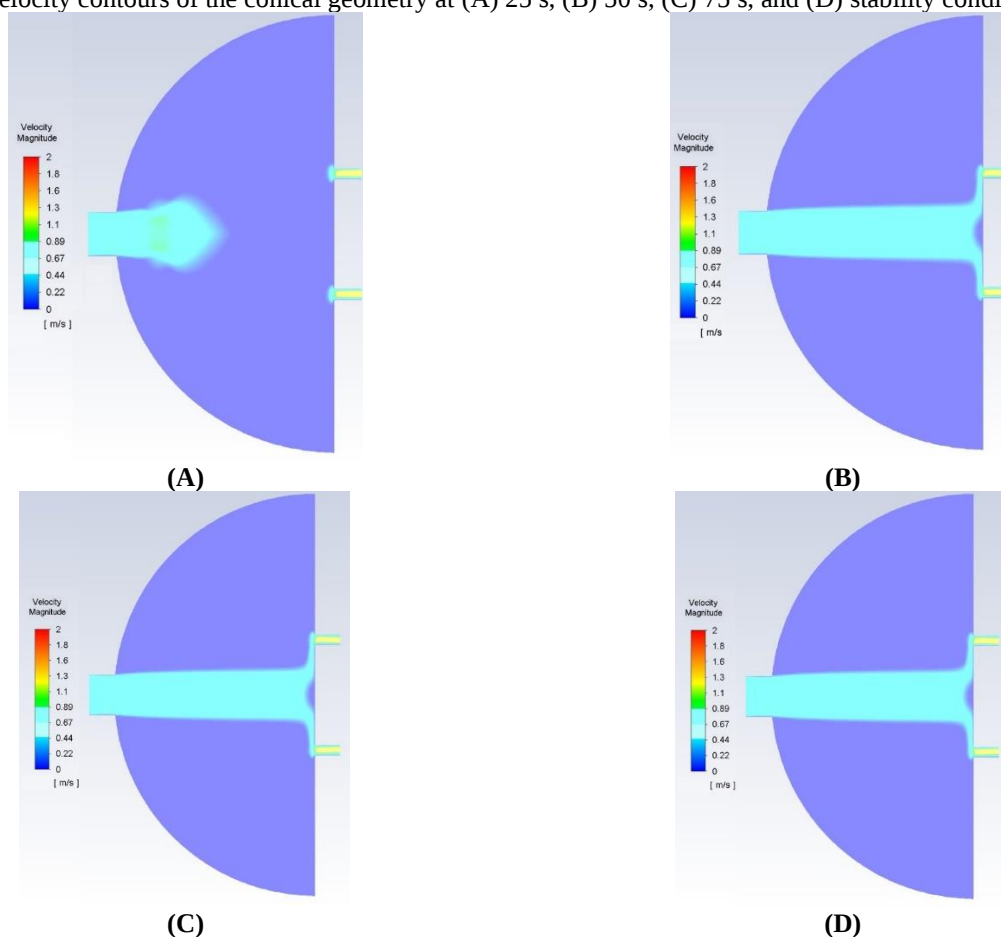


شکل ۷- کانتورهای سرعت هندسه هرمی در زمان های (A) 25 s، (B) 50 s، (C) 75 s و (D) شرایط پایداری نسبی برای هوا
Fig. 7. Velocity contours of the pyramidal geometry at (A) 25 s, (B) 50 s, (C) 75 s, and (D) stability conditions for air



شکل ۸- کانتورهای سرعت هندسه مخروطی در زمان‌های (A) 25 s، (B) 50 s، (C) 75 s و (D) شرایط پایداری نسبی برای هوا

Fig. 8. Velocity contours of the conical geometry at (A) 25 s, (B) 50 s, (C) 75 s, and (D) stability conditions for air

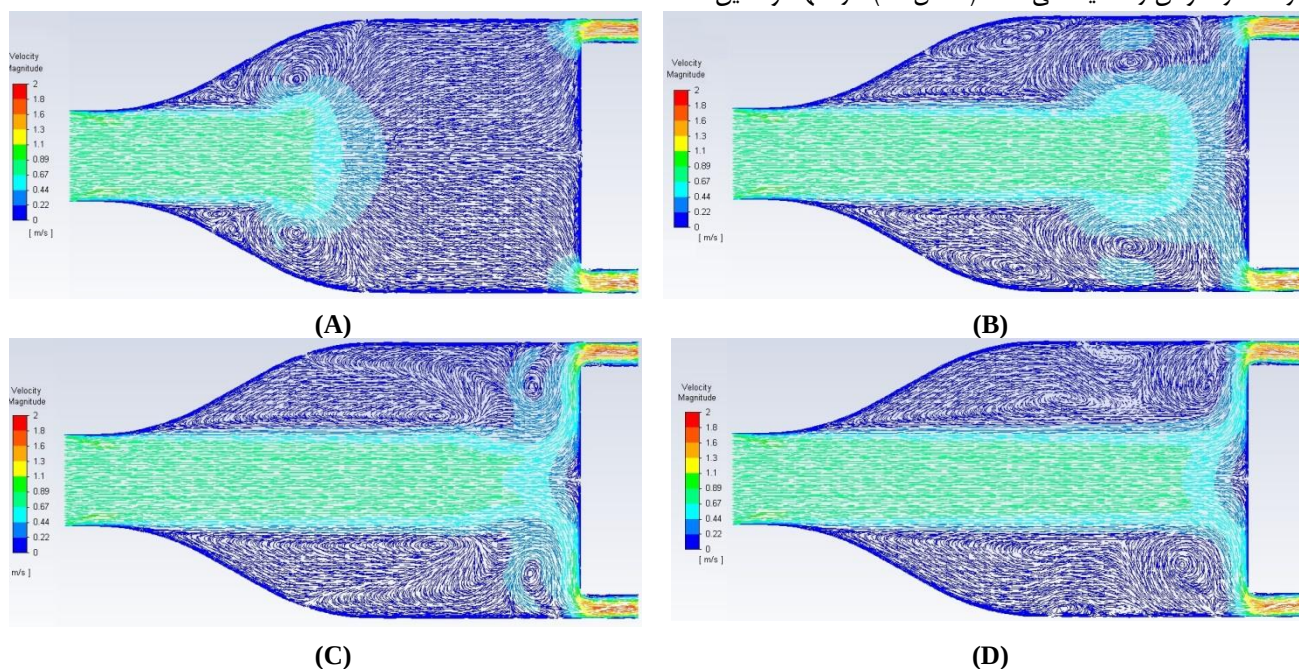


شکل ۹- کانتورهای سرعت هندسه نیم‌کره در زمان‌های (A) 5 s، (B) 25 s، (C) 50 s و (D) شرایط پایداری نسبی برای هوا

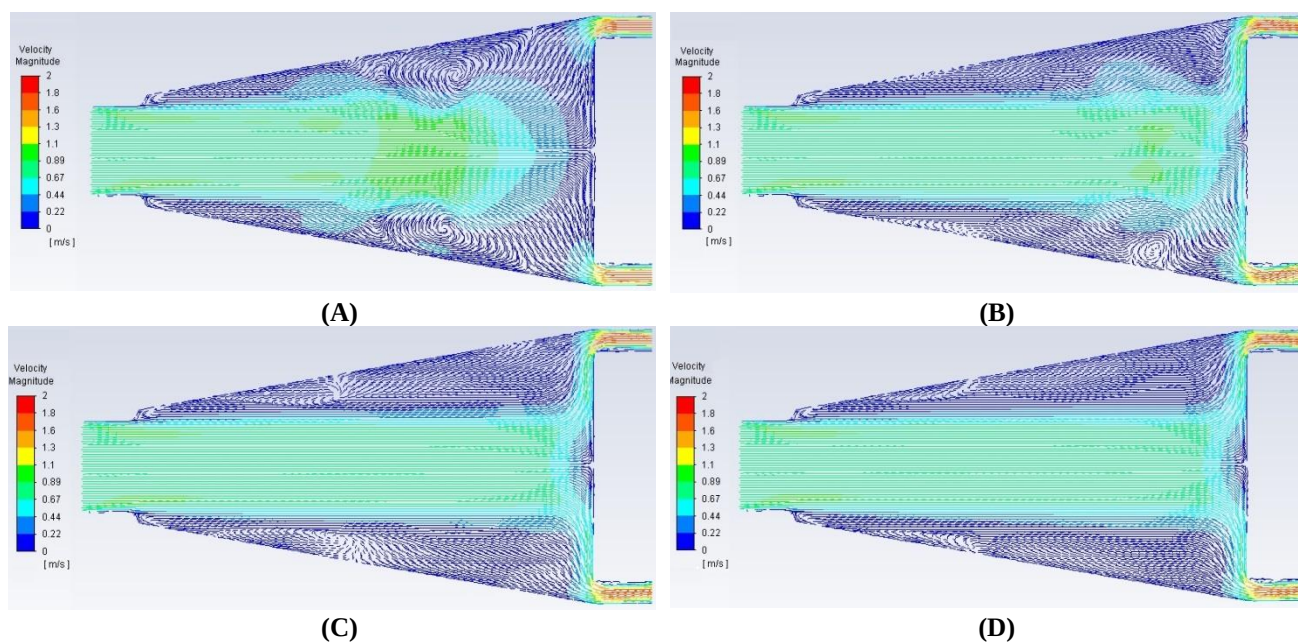
Fig. 9. Velocity contours of the hemispherical geometry at (A) 25 s, (B) 50 s, (C) 75 s, and (D) stability conditions for air

رسیدن به سطح حسگر نیز به تدریج باعث چسبیدن سیال به سطح حسگر و حرکت به سمت دیواره‌ها هستند. ولی همچنان مشابه هندسه هرمی دارای گردابه‌های نامتقارنی هستند. دلیل پیدایش گردابه‌های نامتقارن، چرخش جانبی سیال است. این بدان معنی است که سیال به جای حرکت مستقیم، کمی نیز دارای جابه‌جایی و چرخش به دور محور اصلی جریان بوده و این عمل گردابه‌ها را به یک سمت سوق می‌دهد. در این میان، هندسه کره بهترین عملکرد را دارا می‌باشد. دلیل این عملکرد مناسب می‌تواند ابعاد کره در قسمت سطح حسگر آن باشد. این تغییر ابعاد در سطح حسگر سیال (سطح تخت) باعث شده است که سیال در زمان ورود به هندسه کره، عکس‌العملی مشابه با یک تونل باد آزمایشگاهی داشته و با توجه به دور بودن دیواره کره از خروجی‌های تعبیه شده روی سطح حسگر آن، گردابه‌ها فضای کافی برای پخش شدن به سمت‌های دیگر داشته و در نتیجه سیال مرکزی به راحتی به سطح حسگر رسیده و همگرا شود. لازم به ذکر است که مانند سایر هندسه‌ها، در این هندسه نیز گردابه‌ها سیال میانی را تا سطح دیواره خروجی همراهی کرده و بعد از همگرایی به تدریج به طرفین حرکت می‌کنند. می‌توان گفت که تاثیر حرکت سیال روی دیواره‌های جانبی و درهم‌کنش سیال میانی و گردابه‌های ایجاد شده روی سطوح جانبی می‌تواند باعث مقاومت سیال در همگرایی سریع‌تر گردد و در نتیجه هندسه کروی از این حیث دارای شرایط بهتری نسبت به سایر هندسه‌ها می‌باشد.

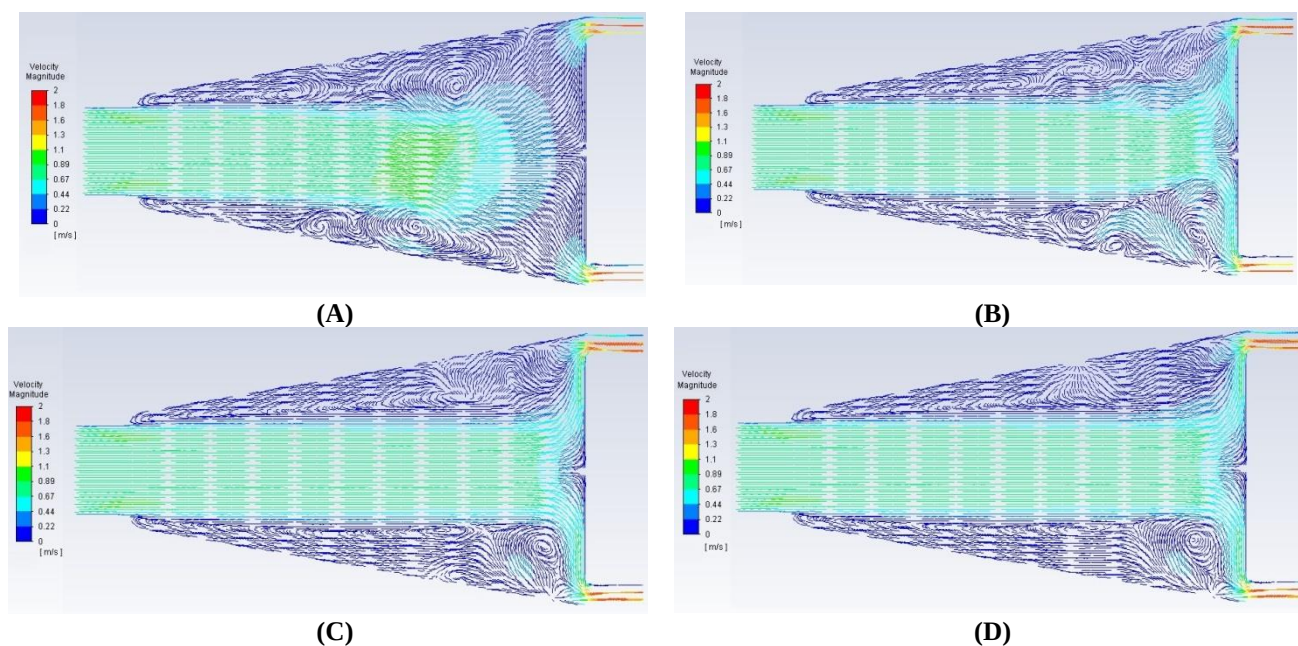
برای بررسی بهتر رفتار سیال در این هندسه‌ها، نمودارهای مسیر سیال در این هندسه‌ها، برای زمان‌های مشخص شده نیز مورد بررسی قرار گرفته است. در هندسه استوانه‌ای (شکل ۱۰) با افزایش زمان، گردابه‌هایی در اطراف جریان اصلی (جریان میانی) و مماس به دیواره شکل گرفته و تا انتهای مسیر جریان میانی را همراهی می‌کند. با نزدیک شدن سیال به سطح حسگرها، پیدایش گردابه‌ها در سطوح جانبی نیز افزایش یافته به آرامی این گردابه‌ها کوچک‌تر می‌شوند که این عمل باعث هم‌گرایی بهتر سیال می‌شود که توسط ژائو و همکاران هم تایید شده است (Zhao, Dalton, Yang, & Scherer, 2006). با افزایش گردابه‌های کوچک در نزدیکی سطح حسگرها، سرعت سیال روی سطح کمتر و در نتیجه این عمل باعث لمس بهتر سیال با سطح حسگرها شده و باعث چسبیدن بهتر سیال به آن شده است که این پدیده در بررسی چانگ و همکاران نیز مشاهده گردیده است (Chang et al., 2018). وجود گردابه‌های نامتقارن در هندسه هرمی شکل (شکل ۱۱) باعث ناپایداری جریان در زمان ۵۰ ثانیه شده است. وجود دیواره‌های مسطح و کنج‌ها (محل برخورد سطوح دیواره به هم)، باعث پیدایش گردابه‌های بزرگی در این ناحیه‌ها خواهد شد که به تدریج با سطح میانی سیال رسیده و باعث ناپایداری کل سیال خواهند شد. تعداد گردابه‌های ایجاد شده در هندسه مخروطی بیشتر از هندسه هرمی است ولی با این تفاوت که مشابه هندسه استوانه‌ای، این گردابه‌ها بیشتر به سمت سیال میانی حرکت کرده و آن را هدایت می‌کنند (شکل ۱۲). در انتها و حین



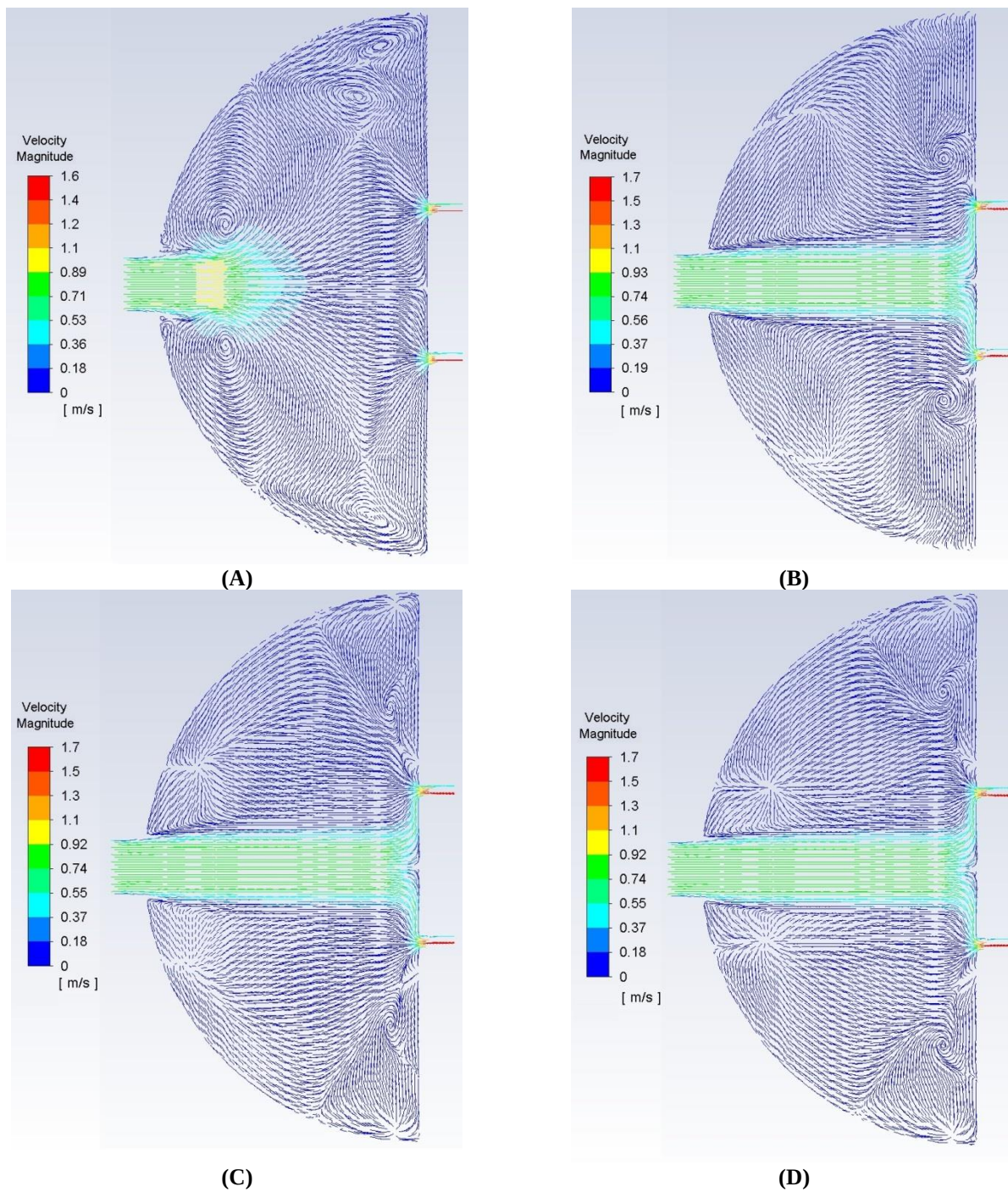
شکل ۱۰- نمودارهای خط مسیر هندسه استوانه‌ای در زمان‌های (A) 25 s, (B) 50 s, (C) 75 s و (D) شرایط پایداری نسبی برای هوا
Fig. 10. Path line plots of the cylindrical geometry at (A) 25 s, (B) 50 s, (C) 75 s, and (D) stability conditions for air



شکل ۱۱- نمودارهای خط مسیر سرعت هندسه هرمی در زمان‌های (A) 25 s، (B) 50 s، (C) 75 s و (D) شرایط پایداری نسبی برای هوا
Fig. 11. Path line plots of the pyramidal geometry at (A) 25 s, (B) 50 s, (C) 75 s, and (D) stability conditions for air



شکل ۱۲- نمودارهای خط مسیر سرعت هندسه مخروطی در زمان‌های (A) 25 s، (B) 50 s، (C) 75 s و (D) شرایط پایداری نسبی برای هوا
Fig. 12. Path line plots of the conical geometry at (A) 25 s, (B) 50 s, (C) 75 s, and (D) stability conditions for air



شکل ۱۳- نمودارهای خط مسیر سرعت هندسه نیم کره در زمان‌های (A) 5 s، (B) 25 s، (C) 50 s و (D) شرایط پایداری نسبی برای هوا
Fig. 13. Path line plots of the hemispherical geometry at (A) 25 s, (B) 50 s, (C) 75 s, and (D) stability conditions for air

نسبت به هوا) نیز مورد بررسی قرار گرفته و نمودارهای خط مسیر سرعت آن بررسی شده‌است. همان‌طور که در شکل ۱۴ مشاهده

همان‌طور که بیان گردید، علاوه بر بررسی تزریق هوا در هندسه های موجود، تاثیر تزریق سیال CO_2 (سیالی با دانسیته متفاوت

آن بهتر است که این امر می‌تواند به علت وجود گردابه‌های بسیار اطراف آن بوده و همین امر نیز در رسیدن به پایداری نهایی نقش منفی ایجاد ایفا کرده است.

همانند حالت تزریق هوا در هندسه نیم‌کره، در حالت تزریق CO_2 (شکل ۱۷) نیز در این هندسه، سیال در زمان ۲۵ ثانیه با پایداری رسیده و قسمت خروجی را به‌طور کامل پوشش داده است. در این هندسه در زمان ۲۵ ثانیه سیال به شرایط تقریباً یکنواختی رسیده و سیال کاملاً سطح حسگر را لمس می‌کند. نکته جالب‌توجه در تزریق CO_2 در این هندسه این است که با افزایش زمان، قسمت انتهایی جریان اصلی در حال کاهش قطر بوده و این بدان معنی است که گردابه‌های اطراف آن در حال رشد و همچنین فاصله گرفتن از جداره بیرونی هستند.

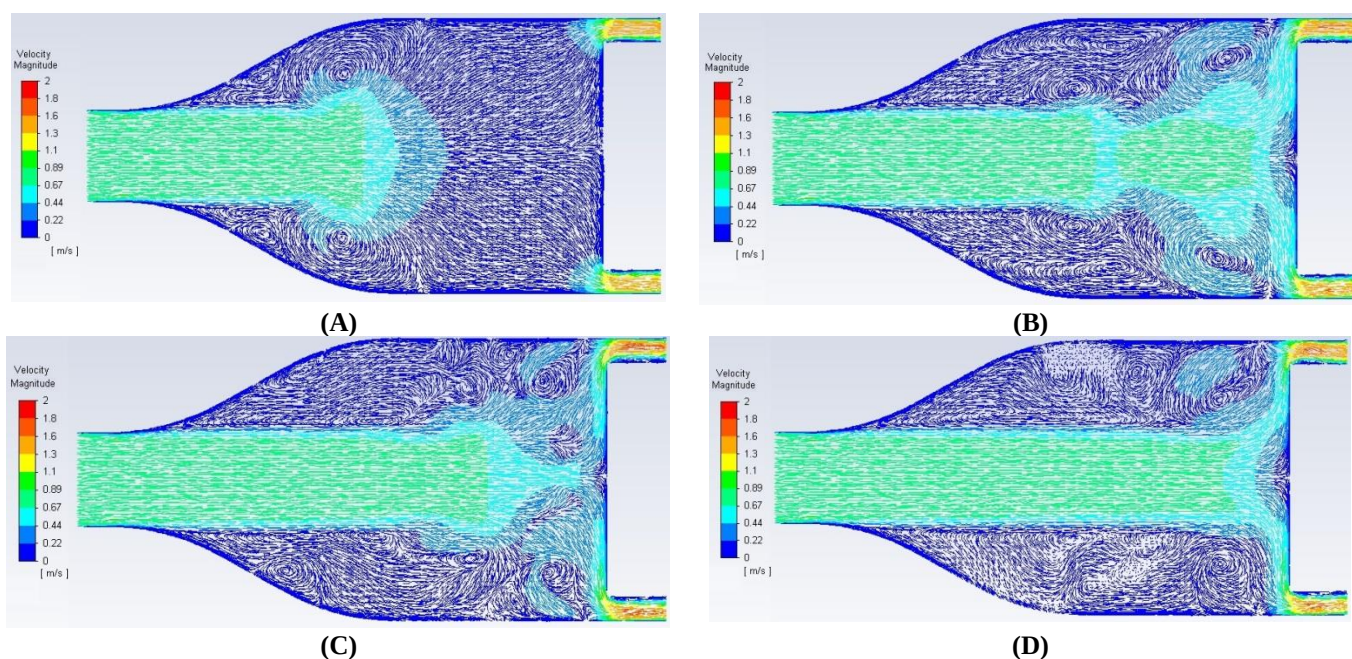
جهت مقایسه عددی و بهتر هندسه‌ها، نمودارهایی که بیانگر زمان رسیدن سیال به سطح و زمان پایداری آن برای هندسه‌های شبیه‌سازی شده‌است در شکل ۱۸ برای هر دو سیال هوا (شکل A) و CO_2 (شکل B) به تصویر کشیده شده‌است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، الگوی رفتاری هندسه‌ها برای هر دو حالت هوا و CO_2 به یک حالت بوده ولی مقادیر آن‌ها متفاوت است. در هندسه استوانه‌ای، زمان رسیدن سیال به سطح در هر دو حالت هوا و CO_2 تقریباً یکسان است ولی همان‌طور که پیشتر نیز بیان گردید، زمان رسیدن به پایداری برای حالت CO_2 بسیار بیشتر شده‌است. هر دو هندسه مخروطی و هرمی تقریباً در زمان مشابهی به سطح می‌رسند (هندسه مخروطی در حالت CO_2 اندکی زودتر به سطح می‌رسد) ولی زمان رسیدن به پایداری در هندسه هرمی در هر دو حالت بسیار بهتر از هندسه مخروطی است. اما هندسه نیم‌کره در هر دو حالت دارای زمان رسیدن به سطح و زمان پایداری بسیار بهتری نسبت به سایر هندسه‌هاست. لازم به ذکر است که هندسه نیم‌کره در حالت سیال هوا، دارای زمان پایداری بسیار بهتری نسبت به حالت CO_2 است.

می‌شود، رفتار CO_2 بسیار متفاوت از هوا است. برای هندسه استوانه‌ای در ثانیه ۵۰، سیال به‌طور کامل سطح حسگر را پوشش داده است. دلیل این امر افزایش نرخ جریان سیال است که باعث شده سیال در زمان کمتری به سطح حسگرها برخورد کند. ولی با افزایش زمان و ایجاد گردابه‌های بزرگ‌تر و برخورد آن‌ها با هم، سیال یکنواختی خود را از دست داده و با توزیع آن به طرفین، از حالت تعادل خارج می‌گردد. پس از این زمان، با کوچک‌تر شدن گردابه‌ها و حرکت به سمت سطوح جانبی، مجدداً سیال به سمت همگرایی حرکت کرده و شرایط آن پایدارتر^۱ شده‌است. لازم به ذکر است که عملکرد این هندسه در حالت تزریق هوا مناسب‌تر از CO_2 است. به‌گونه‌ای که جریان گردابه‌های سیال در زمان ۵۰ ثانیه نسبت به حالت تزریق هوا در همان زمان، بسیار متفاوت شده و این تغییر می‌تواند به‌واسطه تغییر در دانسیته سیال و به‌واسطه آن جرم سیال رخ دهد. همان‌طور که در شکل‌ها مشهود است، افزایش گردابه‌های بزرگ و تداخل آن‌ها در نزدیکی سطح حسگرها باعث ناپایداری در جریان سیال شده و مانع از همگرایی سیال در زمان کمتری شده‌است و در نتیجه آن، سیال در زمان بیشتری به حالت تقریباً تعادلی^۲ رسیده است. هندسه هرمی در حالت تزریق CO_2 (شکل ۱۵) رفتاری متفاوت از تزریق هوا (شکل ۱۱) از خود نشان داده است. با افزایش زمان، سیال به سطح حسگر رسیده، ولی دارای حالت پایداری نیست. در نتیجه جهت رسیدن به حالت پایداری می‌بایست زمان شبیه‌سازی بسیار بالاتر از زمان مشخص شده باشد. اتفاقی که در این هندسه رخ داده است کمی متفاوت از هندسه استوانه‌ای است. در این هندسه، سیال در زمان ۲۵ ثانیه بسیار بهتر از هوا عمل کرده ولی با افزایش زمان و افزایش گردابه‌ها، ناپایداری بیشتری در سیال حادث شده و در نتیجه در زمان بسیار بیشتری به پایداری تقریبی رسیده است. در نتیجه می‌توان گفت که با افزایش گردابه‌های بزرگ، سرعت رسیدن سیال به سطح حسگرها افزایش یافته، اما تاثیر منفی در زمان پایداری آن ایجاد خواهد کرد و در نهایت با تشکیل گردابه‌های کوچک‌تر، سیال به پایداری بهتری خواهد رسید.

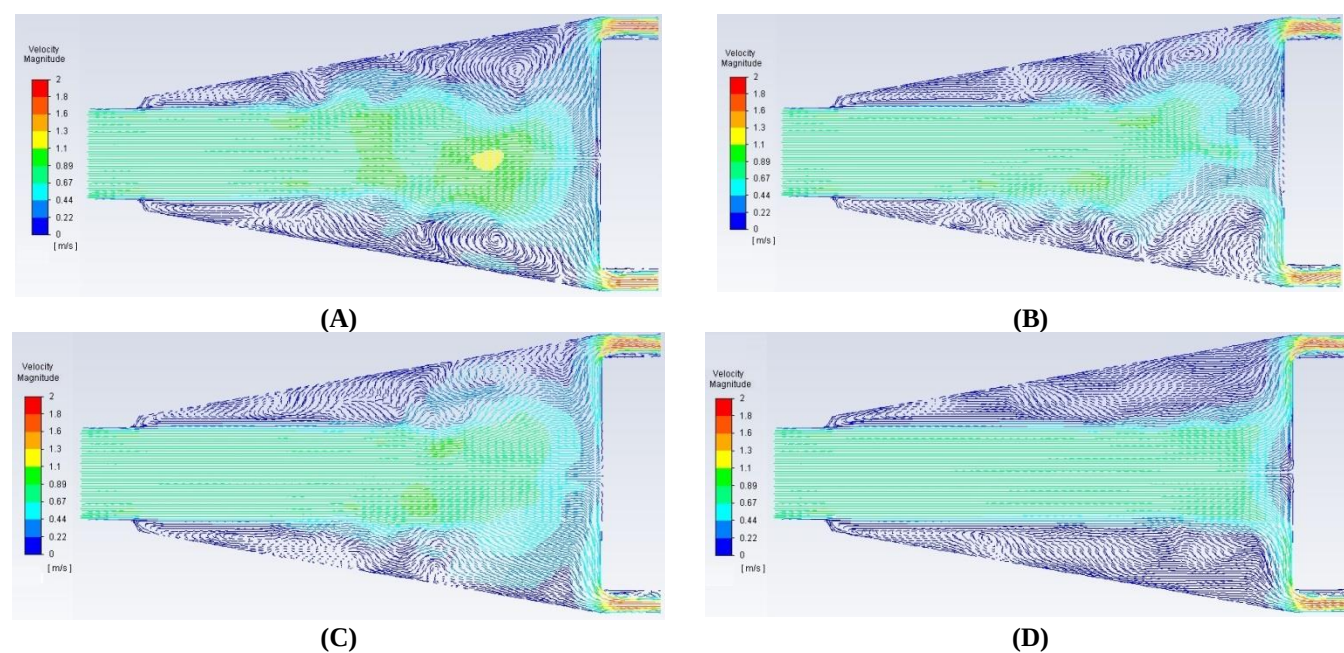
در هندسه مخروطی (شکل ۱۶)، آشفتگی جریان به‌وضوح قابل مشاهده است. حرکت جریان سیال به سمت دیواره‌ها و عدم یکنواختی جریان باعث شده است که سیال به سختی و در زمان ۷۵ ثانیه سطح حسگر را لمس کند و پس از آن و تا زمان زیادی بعد از ۷۵ ثانیه نیز به پایداری کامل نرسد. ولی می‌توان گفت که مشابه با حالت تزریق هوا، در زمان ۷۵ ثانیه سطح حسگر را به‌طور کامل پوشش داده‌است. عملکرد هندسه مخروطی در حالت تزریق CO_2 ، مشابه هرم است ولی از نظر زمان رسیدن سیال به سطح اندکی از

1- Stable

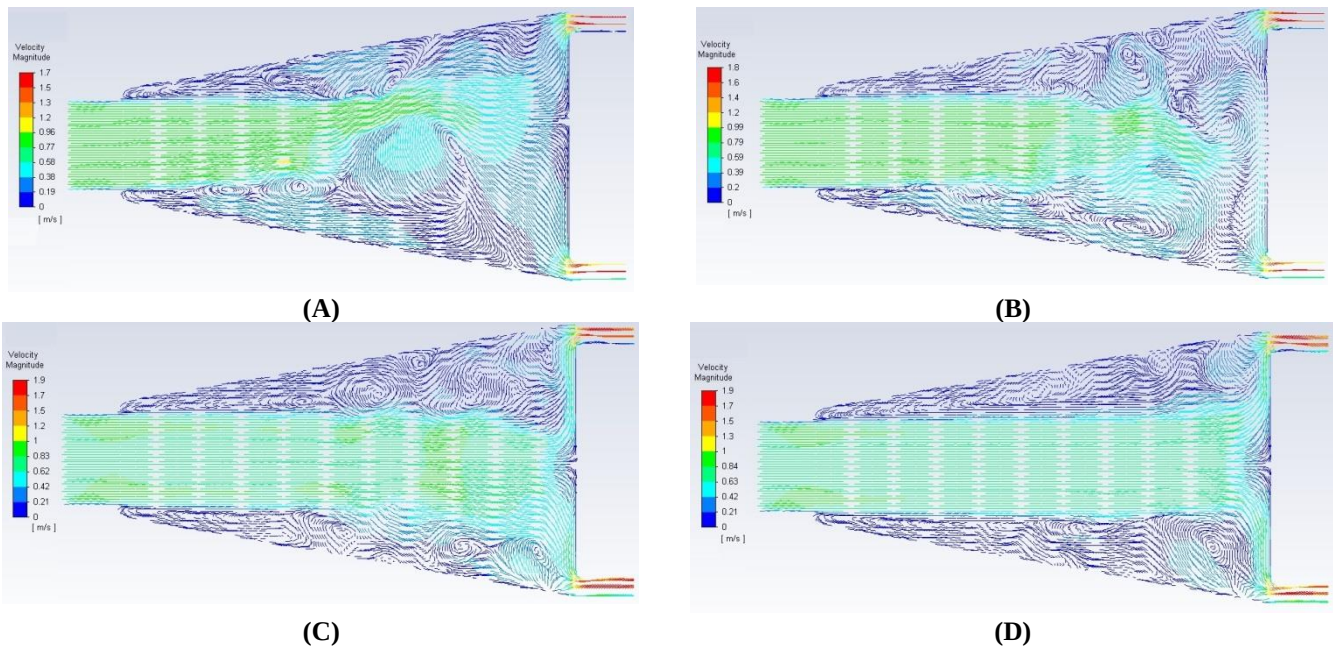
2- Stable state



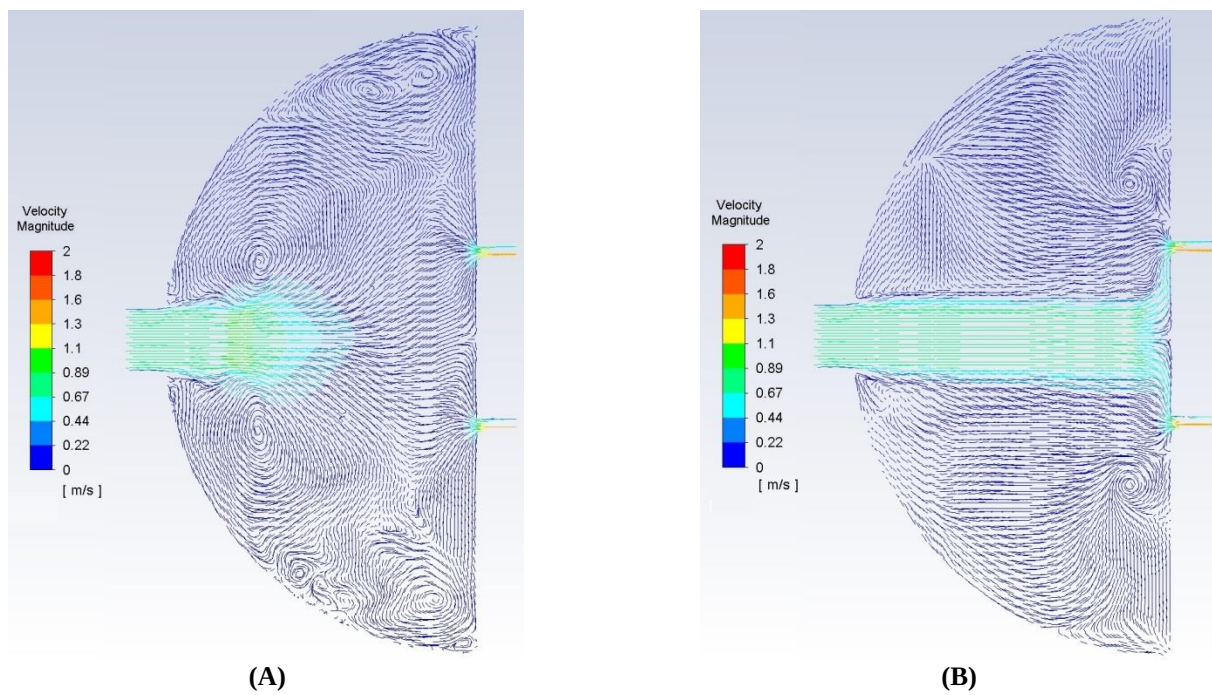
شکل ۱۴- نمودارهای خط مسیر سرعت هندسه استوانه‌ای در زمان‌های (A) 25 s، (B) 50 s، (C) 75 s و (D) شرایط پایداری نسبی برای CO_2
Fig. 14. Path line plots of the cylindrical geometry at (A) 25 s, (B) 50 s, (C) 75 s, and (D) stability conditions for CO_2

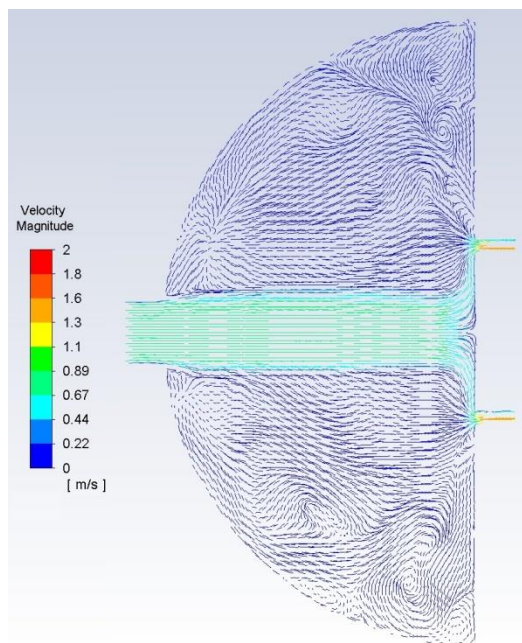


شکل ۱۵- نمودارهای خط مسیر سرعت هندسه هرمی در زمان‌های (A) 25 s، (B) 50 s، (C) 75 s و (D) شرایط پایداری نسبی برای CO_2
Fig. 15. Path line plots of the pyramidal geometry at (A) 25 s, (B) 50 s, (C) 75 s, and (D) stability conditions for CO_2

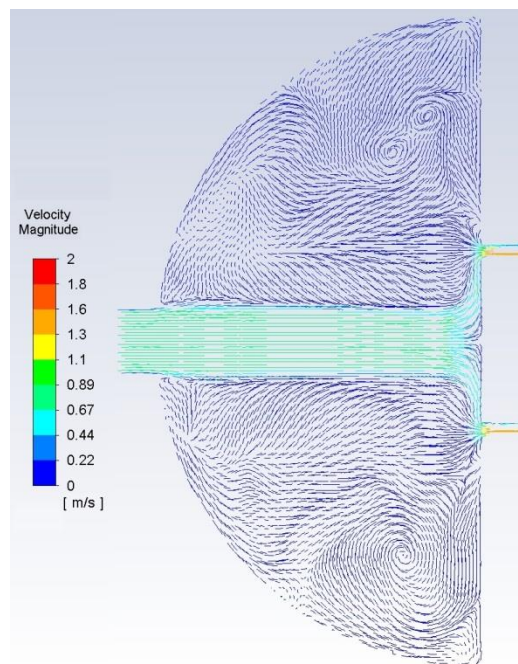


شکل ۱۶- نمودارهای خط مسیر سرعت هندسه مخروطی در زمان‌های (A) 25 s، (B) 50 s، (C) 75 s و (D) شرایط پایداری نسبی برای CO_2
Fig. 16. Path line plots of the conical geometry at (A) 25 s, (B) 50 s, (C) 75 s, and (D) stability conditions for CO_2





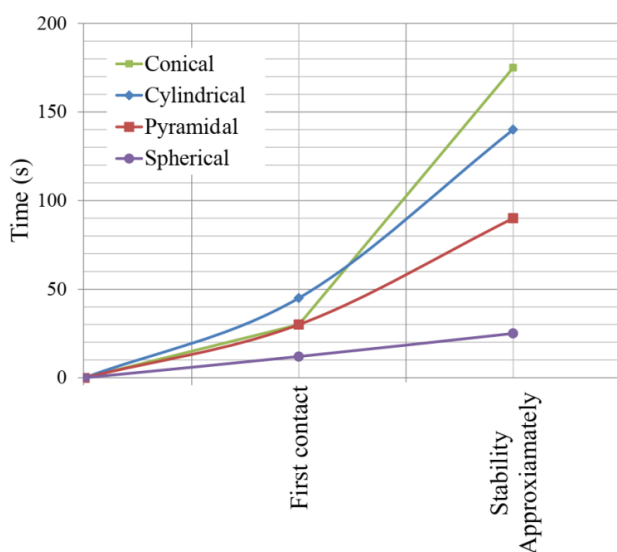
(C)



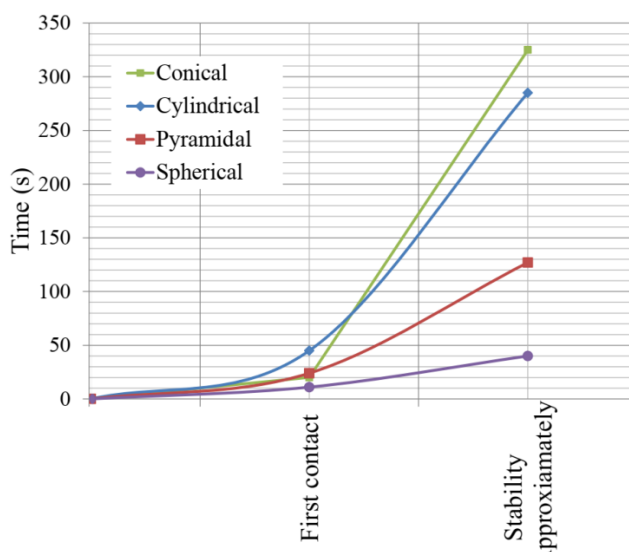
(D)

شکل ۱۷- نمودارهای خط مسیر سرعت هندسه نیم کره در زمان‌های (A) 5 s، (B) 25 s، (C) 50 s و (D) شرایط پایداری نسبی برای CO_2

Fig. 17. Path line plots of the hemispherical geometry at (A) 25 s, (B) 50 s, (C) 75 s, and (D) stability conditions for CO_2



(A)



(B)

شکل ۱۸- نمودارهای زمان رسیدن سیال به سطح و زمان پایداری هندسه‌های شبیه‌سازی شده در دو حالت (A) هوا و (B) CO_2

Fig. 18. Plots of the first contact and stability times of the simulated geometries for (A) Air and (B) CO_2

نتیجه گیری

عملکرد سیال، پوشش سطح حسگرها و همچنین زمان رسیدن سیال به پایداری مورد بررسی و مقایسه قرار گرفته‌اند. بررسی‌های صورت گرفته نشان داند که هندسه نیم کره بهترین عملکرد را در هر

در مطالعه حاضر، چهار هندسه مختلف در دو حالت تزریق سیال هوا و دی‌اکسید کربن (CO_2) جهت یافتن بهترین هندسه از نظر نوع

با توجه به نیاز به انجام بررسی‌های بیشتر در زمینه شبیه‌سازی هندسه‌ها، فرایند شبیه‌سازی این هندسه‌ها با قراردادن مانع در نزدیکی سطح حسگرها که می‌تواند در جریان گردابه‌ها و همچنین توزیع سیال تاثیرگذار باشد توصیه می‌گردد. همچنین تاثیر شبیه‌سازی برای جریان اغتشاشی و بررسی انواع حالات آن می‌تواند داده‌های مفیدی را ارائه دهد. با توجه به مشخص شدن عملکرد مناسب هندسه کروی، ساخت این هندسه و اعمال شرایط مرزی کنونی و مقایسه داده‌های تجربی و عددی با یکدیگر نیز می‌تواند نتایج بسیار خوبی جهت ارزیابی فرایندهای شبیه‌سازی ارائه نماید.

مشارکت نویسندگان

عارفه الطافی: مفهوم‌سازی، روش‌شناسی، جمع‌آوری داده‌ها، پردازش داده‌ها، شبیه‌سازی عددی، اعتبارسنجی، تصویرسازی نتایج، استخراج و تهیه متن اولیه، ویرایش متن
سید سعید محتسبی: مفهوم‌سازی، مشاوره فنی، نظارت و مدیریت، ویرایش متن
علی جعفری: مشاوره فنی، نظارت و مدیریت، ویرایش متن
مهدی قاسمی: ویرایش متن، مشاوره فنی، نظارت و مدیریت، ویرایش متن

دو حالت تزریق هوا و CO_2 داراست. از دلایل این امر می‌توان به افزایش سطح مقطع هندسه، افزایش سرعت سیال میانی، یکنواختی سطح دیواره‌ها و همچنین توزیع گردابه ایجادشده در اطراف جریان اصلی سیال اشاره کرد. توزیع گردابه ایجادشده در اطراف جریان اصلی سیال در هندسه نیم‌کره به نحوی بوده که مقاومتی جهت تشکیل و حرکت سیال ایجاد نکرده و سیال به راحتی مسیر خود را پیموده و به ناحیه خروجی رسیده است. این بدان معنی است که با ایجاد سطح تماس بیشتر سیال و حسگر و هندسه متوازن می‌توان شاهد رفتار بهتری از سیال بود. پیدایش گردابه‌های کوچک در سطوح جانبی باعث همگرایی بهتر سیال می‌شود و با افزایش آن‌ها در نزدیکی سطح حسگرها، سرعت سیال روی سطح کمتر و در نتیجه این عمل باعث لمس بهتر سیال با سطح حسگرها شده و باعث چسبیدن بهتر سیال به آن شده‌است. اما تشکیل گردابه‌های بزرگ و نامتقارن باعث افزایش زمان پایداری جریان شده ولی به زمان رسیدن سیال به سطح کمک می‌کند. هندسه مخروطی نیز به علت داشتن هندسه ای همگن و نداشتن لبه‌های تیز، بعد از هندسه کروی، شرایط بهتری را نسبت به سایر هندسه‌ها در زمان رسیدن به سیال به سطح داراست.

پیشنهادات

References

- Annanouch, F. E., Bouchet, G., Perrier, P., Morati, N., Reynard-Carette, C., Aguir, K., & Bendahan, M. (2018). *How the chamber design can affect gas sensor responses*. Proceedings of the West Mark Ed Association Conference, Eurosensors 2018 Conference, Graz, Austria. <https://doi.org/10.3390/proceedings2130820>
- Annanouch, F. E., Bouchet, G., Perrier, P., Morati, N., Reynard-Carette, C., Aguir, K., Martini-Laithier, V., & Bendahan, M. (2019). Hydrodynamic evaluation of gas testing chamber: Simulation, experiment. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 290, 598-606. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2019.04.023>
- Cai, J., Ding, W., & Wang, M. (2025). Design of test-chamber shape for portable electronic nose. *Journal of Physics: Conference Series*, 2939, 012028. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2939/1/012028>
- Chang, Z., Sun, Y., Zhang, Y., Gao, Y., Weng, X., Chen, D., David, L., & Xie, J. (2018). Bionic optimization design of electronic nose chamber for oil and gas detection. *Journal of Bionic Engineering*, 15(3), 533-544. <https://doi.org/10.1007/s42235-018-0044-6>
- Chai, H., Zheng, Z., Liu, K., Xu, J., Wu, K., Luo, Y., Liao, H., Debliqy, M., & Zhang, C. (2022). Stability of metal oxide semiconductor gas sensors: A review. *IEEE Sensors Journal*, 22(6), 5470-5481. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2022.3148264>
- Cheng, L., Liu, Y. B., & Meng, Q. H. (2020). A novel E-nose chamber design for VOCs detection in automobiles. In Proceedings of the 39th Chinese Control Conference (CCC), Shenyang, China. <https://doi.org/10.23919/CCC50068.2020.9189213>
- Chowdhury, S., Kumar, D., Kumar, R., Karar, V., & Bhondekar, A. (2016). *Simple sensor chamber design for hand-held electronic nose*. Conference: Modern Information and communication technologies for digital India, India.
- Covington, J. A., Marco, S., Persaud, K. C., Schiffman, S. S., & Nagle, H. T. (2021). Artificial olfaction in the 21st century. *IEEE Sensors Journal*, 21(11), 12969-12990. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2021.3076412>
- Dey, A. (2018). Semiconductor metal oxide gas sensors: A review. *Materials Science and Engineering: B*, 229, 206-217. <https://doi.org/10.1016/j.mseb.2017.12.036>
- Dohare, P., Bagchi, S., & Bhondekar, A. P. (2020). Performance optimisation of a sensing chamber using fluid dynamics simulation for electronic nose applications. *Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences*, 28, 3068-3078. <https://doi.org/10.3906/elk-1903-103>
- Dragonieri, S., Pennazza, G., Carratu, P., & Resta, O. (2017). Electronic nose technology in respiratory diseases.

- Lung*, 195(2), 157-165. <https://doi.org/10.1007/s00408-017-9987-3>
12. Fonollosa, J., Fernández, L., Gutiérrez-Gálvez, A., Huerta, R., & Marco, S. (2016). Calibration transfer and drift counteraction in chemical sensor arrays using direct standardization. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 236, 1044-1053. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2016.05.089>
 13. Harmouzi, M., Amari, A., & Masmoudi, L. (2023). Conception and simulation of an electronic nose prototype for olfactory acquisition. *Advances in Science, Technology and Engineering Systems Journal*, 8(1), 101-107.
 14. Hui, G., Jin, J., Deng, S., Ye, X., Zhao, M., Wang, M., & Ye, D. (2015). Winter jujube (*Zizyphus jujube* Mill.) quality forecasting method based on electronic nose. *Food Chemistry*, 170, 484-491.
 15. Hunter, G. W., Akbar, S., Bhansali, S., Daniele, M., Erb, P. D., Johnson, K., Liu, C. C., Miller, D., Oralkan, O., & Hesketh, P. J. (2020). Editors' choice—Critical review—A critical review of solid state gas sensors. *Journal of The Electrochemical Society*, 167(3), 037570. <https://doi.org/10.1149/1945-7111/ab729c>
 16. Karimzadeh, R., & Assar, M. (2016). Effect of laser irradiation on CO gas detecting response of reduced graphene oxide sensor. *RSC Advances*, 6(58), 52817-52825. <https://doi.org/10.1039/C6RA04618E>
 17. Korotcenkov, G., & Cho, B. K. (2011). Instability of metal oxide-based conductometric gas sensors and approaches to stability improvement (short survey). *Sensors and Actuators B: Chemical*, 156(2), 527-538. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2011.02.024>
 18. Kumar, J., Singh, H., Raj, V., Nimal, A., Gupta, V., & Singh, V. (2020). Trace detection of nerve agent simulant in the fuel vapour environment using metal oxide surface acoustic wave E-nose. *Defence Science Journal*, 70(5), 520-528. <https://doi.org/10.14429/dsj.70.14584>
 19. Laref, R., Ahmadou, D., Losson, E., & Siadat, M. (2017). Orthogonal signal correction to improve stability regression model in gas sensor systems. *Journal of Sensors*, 2017(1), 9851406. <https://doi.org/10.1155/2017/9851406>
 20. Lezzi, A. M., Beretta, G. P., Comini, E., Faglia, G., Galli, G., & Sberveglieri, G. (2001). Influence of gaseous species transport on the response of solid state gas sensors within enclosures. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 78(1), 144-150. [https://doi.org/10.1016/S0925-4005\(01\)00805-X](https://doi.org/10.1016/S0925-4005(01)00805-X)
 21. Liu, X., Ma, T., Pinna, N., & Zhang, J. (2017). Two-dimensional nanostructured materials for gas sensing. *Advanced Functional Materials*, 27(37), 1702168. <https://doi.org/10.1002/adfm.201702168>
 22. Lopez, L., Copa, V., Hayasaka, T., Faustino-Lopez, M.A., Wu, Y., Liu, H., Liu, Y., Estacio, E., Somintac, A., & Lin, L. (2020). Influence of chamber design on the gas sensing performance of graphene field-effect-transistor. *SN Applied Sciences*, 2(7), 1-11. <https://doi.org/10.1007/s42452-020-2676-5>
 23. Nikoutadbir, A., Tarmian, A., Mohtasebi, S. S., Mohtasebi, S. M., & Oladi, R. (2024). The utilization of an olfactory machine in wood identification demonstrates a promising prospect: discerning disparities in emission profiles of volatile organic compounds between *Picea abies* and *Pinus sylvestris*. *European Journal of Wood and Wood Products*, 82(3), 591-596. <https://doi.org/10.1007/s00107-024-02053-7>
 24. Oliveros, M. C. C., Pavon, J. L. P., Pinto, C. G., Laespada, M. E. F., Cordero, B. M., & Forina, M. (2002). Electronic nose based on metal oxide semiconductor sensors as a fast alternative for the detection of adulteration of virgin olive oils. *Analytica Chimica Acta*, 459, 219-228.
 25. Pearce, T. C., Schiffman, S. S., Nagle, H. T., & Gardner, J. W. (2006). *Handbook of Machine Olfaction: Electronic Nose Technology*. John Wiley & Sons.
 26. Rezaee, Z., Mohtasebi, S. S., & Firouz, M. S. (2024a). Monitoring pistachio health using data fusion of machine vision and electronic nose (E-nose). *Journal of Food Measurement and Characterization*, 19, 1851-1858. <https://doi.org/10.1007/s11694-024-03078-5>
 27. Rezaee, Z., Mohtasebi, S. S., & Firouz, M. S. (2024b). An electronic nose system supported by machine learning techniques for rapid detection of *Aspergillus flavus* in pistachio. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 18(7), 5757-5765. <https://doi.org/10.1007/s11694-024-02606-7>
 28. Robbiani, S., Lotesoriere, B. J., Dellacà, R. L., & Capelli, L. (2023). Physical confounding factors affecting gas sensors response: A review on effects and compensation strategies for electronic nose applications. *Chemosensors*, 11(10), 514. <https://doi.org/10.3390/chemosensors11100514>
 29. Samiyan, N. S., & Addi, M. M. (2017). Characterization of sensing chamber design for E-nose applications. *Journal of Telecommunication, Electronic and Computer Engineering*, 9(3-9), 123-127. <https://jtec.utem.edu.my/jtec/article/view/3136>
 30. Scott, S. M., James, D., Ali, Z., & O'Hare, W. T. (2004). Optimising of the sensing chamber of an array of a volatile detection system: Fluid dynamic simulation. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 76, 693-708.
 31. Sedláč, P., & Kuberský, P. (2020). The effect of the orientation towards analyte flow on electrochemical sensor performance and current fluctuations. *Sensors*, 20(4), 1038-1054. <https://doi.org/10.3390/s20041038>
 32. Shyla, M. V., Naidu, K. B., & Kumar, G. V. (2013). Optimization of sensor position on different surfaces using CFD analysis for reducing accidents caused by emission of toxic gas in industries. In Proceedings of the Fifth International Conference on Advanced Computing (ICoAC). <https://doi.org/10.1109/ICoAC.2013.6921950>
 33. Xue, L., Yamazaki, H., Ren, R., Wanunu, M., Ivanov, A. P., & Edel, J. B. (2020). Solid-state nanopore sensors.

- Nature Reviews Materials*, 5(12), 931-951. <https://doi.org/10.1038/s41578-020-0229-6>
34. Yuan, Z., Benck, J. D., Eatmon, Y., Blankschtein, D., & Strano, M. S. (2018). Stable, temperature-dependent gas mixture permeation and separation through suspended nanoporous single-layer graphene membranes. *Nano Letters*, 18(8), 5057-5069. <https://doi.org/10.1021/acs.nanolett.8b01866>
35. Zhang, W., Pan, L., Zhao, X., & Tu, K. (2016). A study on soluble solids content assessment using electronic nose: Persimmon fruit picked on different dates. *International Journal of Food Properties*, 19(1), 53-62. <https://doi.org/10.1080/10942912.2014.940535>
36. Zhao, K., Dalton, P., Yang, G. C., & Scherer, P. W. (2006). Numerical modeling of turbulent and laminar airflow and odorant transport during sniffing in the human and rat nose. *Methods*, 31, 107-118.