



The Effect of Place the Porous Medium in Gas Pressure Regulators on Performance and Noise Reduction

ARTICLE INFO

Article Type

Original Research

Authors

Mohammadi Sarasia M.¹

Ajam H.¹

Moloodi A.*²

How to cite this article

Mohammadi Sarasia M, Ajam H, Moloodi A. The Effect of Place the Porous Medium in Gas Pressure Regulators on Performance and Noise Reduction. Modares Mechanical Engineering. 2021; 21(7):429-439.

¹ Mechanical Engineering Department, Engineering Faculty, Ferdowsi University, Mashhad, Iran.

² Materials Research Department, Academic Center for Education, Culture and Research (ACECR), Mashhad, Iran.

*Correspondence

Address: Materials Research Group, Iranian Academic Center for Education, Culture and Research (ACECR), Mashhad Branch, Mashhad, Iran. Postal Code: 9177949367

Phone: -

Fax: -

a.moloodi@jdm.ac.ir

Article History

Received: September 30, 2019

Accepted: February 20, 2021

ePublished: June 17, 2021

ABSTRACT

In the present study, the effect of putting a porous medium in natural-gas pressure regulators, on the operation and reducing the sound intensity, is studied. First, it was studied experimentally. Experiments were applied on a system with porous medium 20 ppi, a system with porous medium 10 ppi, and a system without a porous medium. To check the validity of the results, experiments were evaluated in four pressure difference levels 20, 10, 5, and 2.5 MPa, and in the critical pressure ratio condition. Afterward, for evaluation the flow parameters on the performance of regulators and the sound intensity level, numerical simulation of fluid flow was performed. The results show that implementing porous media with 10 ppi and 20 ppi porosity, decreases flow coefficient, respectively 7% and 15% and sound intensity level, respectively 25 and 30 dB. The amount of porosity does not have much effect on the sound intensity. On the other hand, the results of the fluid flow simulation show that placing the porous medium in the flow direction reducing the turbulent intensity and regulating the flow. As well as, it decreases the sound intensity by decreasing the maximum velocity and the vortex power.

Keywords Aeroacoustics, Computational Fluid Dynamics, Porous Medium, Gas Pressure Regulator

CITATION LINKS

[1] Double acting expansion engine simulation performance... [2] Dynamic Modeling and Analysis of a High-Pressure Regulator. [3] Mathematical representation of pressure regulator... [4] Optimization of parameters of the pressure regulator... [5] Optimization of a direct-acting pressure regulator... [6] Numerical modeling of anisotropic drag for a perforated plate... [7] Perforated plates for fluid management... [8] A general structural design methodology for multi-hole orifices... [9] An analysis on the pressure loss through perforated plates... [10] Effect of chamfer geometry on the pressure drop... [11] Experimental study of a turbulent pipe flow... [12] Experimental investigation on heat transfer from square jets issuing... [13] Thermal mixing enhancement of a free-cooling system... [14] Experimental study of gas flow... [15] Computational fluid dynamics analysis on orifice structure... [16] Pressure drop through orifices for single-and two-phase... [17] Study on discharge coefficient of perforated orifices... [18] Effects of geometrical parameters on thermo-hydraulic characteristics... [19] A numerical investigation of the thermal-hydraulic characteristics... [20] On the performance of perforated plate with optimized... [21] Single-phase and two-phase flow... [22] Numerical modelling of the gas flow... [23] Mach number analysis on multi-stage... [24] Numerical simulation of flow-induced noise... [25] Numerical analysis of flow and temperature characteristics... [26] A numerical study of heat transfer effects and aerodynamic noise reduction... [27] Dynamic model of gas pressure regulator. [28] A numerical study on the characteristics of transient flow... [29] Numerical simulation of a pressure regulated valve to find out the characteristics... [30] Unsteady analyses of valve systems... [31] Parametric analysis on throttling components... [32] Aerodynamics analysis of superheated steam flow... [33] Passive control of centrifugal fan noise by employing open-cell metal foam. [34] Experimental investigation of metal foam for controlling centrifugal fan noise. [35] Numerical study of pore-scale flow and noise of an open cell metal foam. [36] Tonal and broadband noise control of an axial-flow fan with metal foams... [37] Structured Porous Material Design for Passive Flow and Noise Control of Cylinders in Uniform Flow. [38] European standard for gas pressure regulators. [39] Guide AFU. Release 14.0, ANSYS. [40] Fluid flow through randomly packed columns and fluidized beds.

بررسی تأثیر قرار دادن محیط متخلخل بر عملکرد رگلاتورهای تقلیل فشار گاز با رویکرد کاهش نوفه جریانی

محسن محمدی سراسیا

دانشجوی دکتری مهندسی مکانیک-تبدیل انرژی، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، ایران

حسین عجم

دانشیار گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، ایران

احمد مولودی*

عضو هیئت علمی گروه پژوهشی مواد، سازمان جهاد دانشگاهی خراسان رضوی، فردوسی مشهد، ایران

چکیده

در پژوهش حاضر، تأثیر قرار دادن محیط متخلخل در رگلاتورهای تقلیل فشار گاز طبیعی بر عملکرد و کاهش شدت صدای تولیدشده بررسی شده است. ابتدا این موضوع به صورت آزمایشگاهی مورد مطالعه قرار گرفت. آزمایش‌ها برای دو نمونه با محیط متخلخل ۱۰ ppi و ۲۰ ppi و سیستم بدون محیط متخلخل انجام شد. برای بررسی اعتبار نتایج آزمایش‌ها در ۴ اختلاف فشار متفاوت بالادست ۲۰، ۱۰، ۵ و ۲/۵ مگاپاسکال و نسبت فشار بحرانی جریان مورد ارزیابی قرار گرفت. سپس برای ارزیابی چگونگی تأثیر پارامترهای جریانی بر عملکرد رگلاتور و تراز شدت صوت، جریان سیال عبوری از رگلاتور شبیه‌سازی عددی شد. نتایج نشان می‌دهد، استفاده از محیط متخلخل ۱۰ ppi و ۲۰ ppi، ضریب جریان را به ترتیب ۷ و ۱۵ درصد و تراز شدت صوت را به ترتیب ۱۵ و ۲۰ دسی‌بل کاهش می‌دهد. نتایج حاصل از شبیه‌سازی جریان سیال نشان می‌دهد، قرار دادن محیط متخلخل در مسیر جریان ضمن کاهش شدت آشفتگی و منظم کردن جریان، با کاهش بیشینه سرعت سیال و کم کردن قدرت گردابه‌ها، شدت صوت تولیدشده را کاهش می‌دهد.

کلیدواژه‌ها: آبروآکوستیک، دینامیک سیالات محاسباتی، محیط متخلخل، رگلاتور تقلیل فشار

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۷/۰۸

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۱۲/۰۲

*نویسنده مسئول: ahmad_moloodi@yahoo.com

۱- مقدمه

امروزه گاز طبیعی یکی از مهم‌ترین منابع انرژی بشری محسوب می‌شود. برای انتقال حجم عظیمی از منابع گاز طبیعی به مراکز مصرف، با توجه به ویژگی‌های فیزیکی آن، فشار گاز تا حد ممکن افزایش پیدا می‌کند. از طرفی کاهش فشار و کنترل آن به دلیل محدودیت‌های مصرف‌کننده و مسائل ایمنی اجتناب‌ناپذیر است. از همین رو فشار گاز در دو مرحله در ایستگاه‌های شهری و منطقه-ای به ترتیب از ۱۰۰۰ به ۲۵۰ و از ۲۵۰ به ۶۰ واحد psi کاهش پیدا می‌کند. کاهش فشار و کنترل دبی گاز در این ایستگاه‌ها به عهده شیرهای کنترلی موسوم به رگلاتور است^[1]. وظیفه رگلاتور کاهش فشار گاز و ثابت نگه‌داشتن در شرایط مطلوب و قطع جریان در زمان عدم مصرف است. رگلاتورهای فشار علاوه بر خطوط انتقال

گاز در صنایع مختلفی اعم از نیروگاه‌ها، پتروپالایشگاه‌ها و صنایع پتروشیمی کاربرد فراوان دارند. همچنین استفاده از این تجهیزات در انتقال و مصرف هیدروژن در حال توسعه است. از همین رو تحقیقات فراوانی در زمینه بهبود شرایط کاری آن‌ها انجام شده است.

عمده مشکلات رگلاتورهای فشار بالا عبارت‌اند از ناپایداری فشار، ارتعاش زیاد، تلفات جریانی و صدای گوش‌خراش. از همین رو تحقیقات بر حل این مسائل متمرکز شده‌اند. این تحقیقات به دو دسته عمده تقسیم می‌شوند. دسته اول تحقیقاتی که به بهبود پارامترهای کنترلی شیر پرداخته‌اند^[2-5]. در این مقالات سعی شده با درک روابط بین پارامترهای کنترلی شیر، سیستم به نحوی بهینه شود که تا حد ممکن از ایجاد ناپایداری اجتناب شود. دسته دوم، تحقیقاتی هستند که بهبود پارامترهای جریانی را در دستور کار خود قرار داده‌اند^[6-17]. هدف از این تحقیقات درک روابط بین پارامترهای مهم جریانی جهت کنترل سیستم، حفظ پایداری فشار، کاهش تلفات و اخیراً کاهش نوفه آکوستیک بوده است.

کاهش فشار در رگلاتورهای فشار بالا، عموماً مبتنی بر عبور جریان از ارفیس یا ارفیس‌هایی است که در مسیر جریان قرار گرفته است. شکل، تعداد و آرایش سوراخ‌ها، تعداد صفحه‌های سوراخ‌دار و محل قرار گرفتنشان نسبت به یکدیگر در شرایط کاری مختلف در تحقیقات مورد بررسی قرار گرفته است. عدد رینولدز و آرام یا آشفته بودن جریان یکی از موضوعات مورد توجه در تحقیقات بوده است. بای و کیم^[6] روی تخلخل، قطر سوراخ‌ها، ضخامت صفحه و گام سوراخ‌ها در جریان آرام را مورد بررسی قرار دادند بایزیت و همکاران^[7] روی ضخامت ارفیس‌ها کار کردند و به این نتیجه رسیدند که در جریان آرام، ضخامت بیشتر و در جریان آشفته، ضخامت کمتر صفحه ارفیس عامل افت فشار بیشتر جریان است. ژاو و همکاران^[8] رابطه‌ای بین قطر معادل و افت فشار در جریان آشفته پیشنهاد کردند. همچنین ازاهی و همکاران^[9] رابطه‌ای بین تخلخل و افت فشار در رینولدزهای متوسط بدست آوردند. با توجه به رابطه بدست آمده، افت فشار با توان دوم تخلخل رابطه عکس دارد. همه نویسندگان این مقالات به این موضوع اذعان دارند، که افزایش تخلخل و تعداد سوراخ‌ها، در جریان آشفته، پایداری جریان را افزایش می‌دهد. یکی دیگر از مسائل مورد توجه در تحقیقات شکل هندسی ارفیس‌ها بوده است. بروس و فیلهو^[10] با استفاده از آزمایش و شبیه‌سازی روی ارفیس‌های بلند به این نتیجه رسیدند که پخ ایجادشده در ورود و خروج جریان اهمیت دارد. به طور مشابه لیو و همکاران^[11] به این نتیجه رسیدند سوراخ‌های به شکل همگرا-واگرا می‌تواند تلفات جریان را کاهش دهد. مولا و همکاران^[12] اثر سوراخ‌های چهارضلعی را بررسی کردند. لیو و همکاران^[11] و ته و همکاران^[13] روی شکل‌های مختلف سوراخ کار کردند و به این نتیجه رسیدند سوراخ‌های مثلثی افت فشار

یک روش ارزان و ساده محسوب می‌شود. چن زو و همکاران^[33] محیط متخلخل را جایگزین زبانه صلب ورودی هوا به فن گریز از مرکز کردند. نتیجه این کار کاهش حداقل ۱۵ دسی‌بل شدت صوت تولید شده بود. آن‌ها در کار تحقیقاتی دیگری^[34] تأثیر باز بودن، نیمه‌باز بودن و بسته بودن محیط متخلخل فلزی قرار داده شده در فن را بررسی کردند. بررسی نتایج این تحقیق نشان داد، استفاده از محیط متخلخل باز با تخلخل بیشتر و تراکم حفرات ۴۰ppi شدت صوت را کاهش می‌دهد. البته تعیین بهینه ویژگی‌های محیط متخلخل با توجه به شرایط جریان سیال، متفاوت است. درک چگونگی کاهش نوسانات جریان با استفاده از محیط متخلخل می‌تواند در پیش‌بینی شرایط بهینه راهگشا باشد. محیط متخلخل با ایجاد یک مقاومت فشاری در برابر جریان نوسانات فشار را کاهش می‌دهد. به عبارتی با وجود حفرات ریز در ساختار محیط متخلخل، مقاومت اصطکاکی بر فشاری غلبه پیدا کرده و ناپایداری‌های جریان را کاهش می‌دهد. این حفرات نرخ اضمحلال انرژی تلاطم را نیز افزایش خواهد داد^[35]. همچنین پوشش دادن سطوح مستعد جدایش و ریزش گردابه‌ها با محیط متخلخل، می‌تواند نوسانات جریان و شدت صوت تولید شده را در این شرایط کاهش دهد^[36, 37].

با توجه به ویژگی‌های فوم متخلخل فلزی و تحقیقات مورد مطالعه در زمینه شیرهای رگلاتور فشار بالا، استفاده از این مواد می‌تواند به عنوان یک راهکار نوین در جهت بهبود پارامترهای آکوستیکی این تجهیز مهم صنعتی محسوب شود. از همین رو در این پژوهش، به بررسی تأثیر قرار دادن محیط متخلخل در رگلاتورهای تقلیل فشار محوری بر کاهش صدا و افت دبی پرداخته شده است. ابتدا نمونه معمولی و دو نمونه با محیط متخلخل با قطر سوراخ متفاوت مورد آزمایش قرار گرفت. در این آزمایش‌ها دبی جریان و شدت صوت در نسبت فشار بحرانی اندازه‌گیری شد. این آزمایش‌ها برای ۴ فشار مختلف تکرار شد. در هر نمونه ضریب شیر محاسبه و در نهایت میانگین‌گیری گردید. با این کار ارزیابی دقیقی از تأثیر محیط متخلخل بر کاهش صدا و افت دبی جریان به دست آمد. سپس برای دست پیدا کردن به برآورد کیفی از چگونگی تغییرات جریان سیال در رگلاتورها، شبیه‌سازی عددی صورت گرفت. ضریب شیر محاسبه شده حاصل از شبیه‌سازی و نتایج آزمایش تطابق بسیار خوبی داشت. شبیه‌سازی عددی دید خوبی برای بررسی پدیده‌ها و راهکارهای بهبود فرایند ارائه می‌دهد.

۲- بررسی تجربی

۲-۱- مواد و روش‌ها

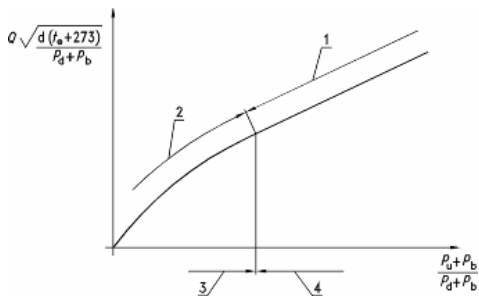
برای آزمایش، از رگلاتور ۲ اینچ گازسوزان کلاس ۳۰۰ استفاده شد. محیط متخلخل مورد آزمایش با استفاده از روش ریخته‌گری بر پایه نیکل توسط جهاد دانشگاهی ساخته شده است. برای بررسی اثر تخلخل از دو فوم با تراکم ۱۰ ppi (pore per inch) و ۲۰ ppi

کمتری نسبت به سوراخ‌های دایروی ایجاد می‌کند. به نظر می‌رسد نتایج این تحقیقات هرچند در شرایط مورد مطالعه صحیح و کاربردی است، اما قاعده کلی از آن استخراج نمی‌شود. آرایش سوراخ‌ها و اثر سوراخ مرکزی بر بهبود شرایط کاری یکی دیگر از مسائل مورد توجه محققین بوده است. گرونیچ و همکاران^[14] روی اثر سوراخ مرکزی و فاصله سوراخ‌ها از مرکز کار کردند و به این نتیجه رسیدند که وجود سوراخ مرکزی بر بهبود پایداری فشار اثر مثبت دارد. همچنین قیان و جین^[15] اثر این موضوع را در بازشدگی مختلف شیر مورد بررسی قراردادند. علاوه بر این اثر محل نصب، رابطه بین ضریب تخلیه و افت فشار و همچنین اثر حرارت در هندسه‌های مختلف مورد توجه محققین بوده است^[16-19]. کاربرد فراوان این تجهیز در صنایع مختلف باعث شده تحقیقات برای جریان‌های چند فازی، سیال نیوتونی و غیر نیوتونی و تأثیر گرانس بر شرایط کاری گسترش پیدا کند^[20, 21].

همان طور که گفته شد، یکی از موضوعات مورد توجه در تحقیقات، کاهش تلفات و بررسی چرایی آن‌ها بوده است. نتایج حاصل از شبیه‌سازی جریان سیال بیشترین کمک را به درک این موضوع کرده است. از مهم‌ترین عوامل وجود تلفات در رگلاتورهای فشار بالا گردابه‌ها و تلاطم گزارش شده است. چنانکه گو و همکاران^[22] دریافتند تلفات فشار در جریان گاز ناشی از گردابه‌های موجود آمده در پایین دست جریان است. در مقالات متعدد ارائه شده توسط قیان و همکارانش^[23-26] نیز بر این موضوع تأکید شده است. این تلفات عموماً به صورت صوت و گرما از سیستم دفع می‌شوند، طوری که شدت صوت تولید شده در این تجهیزات بسته به ظرفیت و سیال عامل تا ۱۵۰ دسی‌بل می‌رسد.

گرچه شدت صوت بالا یکی از مهم‌ترین معایب رگلاتورهای فشار بالاست اما به دلیل قرار گرفتن این تجهیزات در محیط‌های صنعتی زیاد مورد کنکاش قرار نگرفته است. ووچیک و همکاران^[27] طی آزمایش‌هایی تصریح کردند، لرزش و ایجاد صدا در رگلاتور خود انگیزشی است. به عبارتی، عامل محرک صرفاً جریان سیال است. این موضوع توسط چانگ هوم و همکاران^[28] و ساها و همکاران^[29] با شبیه‌سازی CFD جریان مورد بررسی دقیق‌تر قرار گرفت. شیپمن و همکاران^[30] به صورت تجربی و عددی روی رگلاتورهای با ظرفیت بالا کار کرده‌اند. در این مقاله به تأثیر عدد ماخ بر عملکرد آبرواکوستیک رگلاتور پرداخته شده است. وجود گردابه‌های متعدد و میرا شونده در مسیر جریان عامل نوسانات و صدای تولیدی گزارش شده است. همچنین هو و همکاران^[31] و جین و همکاران^[32] دو و چند مرحله‌ای کردن افت فشار در این تجهیزات را برای بهبود شرایط پیشنهاد کرده‌اند. با این وجود موفقیت‌های چشمگیری در این زمینه گزارش نشده است.

اخیراً استفاده از فوم سلول باز فلزی برای کاهش نوسانات جریان و صوت تولید شده در تجهیزات مورد توجه قرار گرفته است. استفاده از محیط متخلخل در تجهیزات به دلیل عدم تغییر در هندسه آن،



شکل ۲) نمودار تغییرات ضریب جریان بر حسب فشار بی بعد در شرایط بحرانی و زیر بحرانی [22]

شرایط بحرانی فقط تابع خطی از فشار بی بعد است و در قسمت زیر بحرانی تابعی غیرخطی و وابسته به فشار پایین دست جریان است.

طبق استاندارد EN334 دبی در شرایط زیر بحرانی با استفاده از رابطه ۱ و برای حالت بحرانی از رابطه ۲ محاسبه می‌شود [38].

$$Q = \frac{13.57}{\sqrt{d \times (T_u + 273)}} \times C_g \times \frac{p_u + p_b}{2} \times \sin \left[K_1 \times \sqrt{\frac{p_u - p_d}{p_u + p_b}} \right]_{deg} \quad (1)$$

$$Q = \frac{13.57}{\sqrt{d \times (T_u + 273)}} \times C_g \times \frac{p_u + p_b}{2} \quad (2)$$

در این روابط Q دبی جریان بر حسب استاندارد مترمکعب بر ساعت، فشار بالادست، P_u فشار پایین دست، P_b فشار اتمسفر بر حسب بار و d چگالی نسبی است. T_u دمای کاری بر حسب درجه سانتی-گراد است. K_1 ضریب شکل رگلاتور و C_g ضریب جریان و اعدادی بی بعد هستند.

از برابر قرار دادن روابط ۱ و ۲ معیار بحرانی بودن جریان به شکل رابطه ۳ به دست می‌آید.

$$\frac{p_u + p_b}{p_d + p_b} \geq \frac{K_1^2}{K_1^2 - 8100} \quad (3)$$

با بسط سینوس در رابطه ۱ و اعمال نامعادله ۳ برای حالت زیر بحرانی می‌توان اثبات کرد، در صورتی که K_1 کمتر از ۱۳۰ و نسبت فشار $\frac{p_u - p_d}{p_u + p_b}$ بیشتر از ۰/۱ باشد، رابطه ۱ را می‌توان به شکل رابطه ۴ ساده کرد. این ساده‌سازی می‌تواند حداکثر تا ۱۰٪ خطا ایجاد کند. این خطا در نسبت فشار ۰/۵ به کمتر از یک درصد می‌رسد.

$$Q = \frac{13.57}{\sqrt{d \times (T_u + 273)}} \times C_g \times \sqrt{(p_d + p_b) \times (p_u - p_d)} \quad (4)$$

از برابر قرار دادن روابط ۲ و ۴ محل تقاطع دو قسمت ۱ و ۲ در نمودار شکل ۲ در $\frac{p_u - p_d}{p_u + p_b} = 0.5$ اتفاق می‌افتد. از همین رو شرایط فشار بالادست و پایین دست جریان طوری تنظیم شده که نسبت فشار مذکور تا جای ممکن رعایت شود. برای اطمینان از رعایت شدن شرایط معادله ۴ ضریب شکل برای هر رگلاتور محاسبه شده است.

با توجه به روابط بالا می‌توان مقدار C_g را برای شرایط زیر بحرانی و شرایط بحرانی به ترتیب از روابط ۵ و ۶ به دست آورد.

$$C_g = \frac{Q \times \sqrt{d \times (T_u + 273)}}{13.57 \times \sqrt{(p_d + p_b) \times (p_u - p_d)}} \quad (5)$$

استفاده شده است. برای اندازه‌گیری شدت صوت از صداسنج لوترون مدل SL-4023SD استفاده شد. از هوا به عنوان سیال عامل استفاده شده است. دمای کاری ۲۲°C اندازه‌گیری شد.

فشارهای کاری مورد نظر در ایستگاه‌های تقلیل فشار گاز طبیعی، حدود ۲۰ مگا پاسکال تا ۵ مگا پاسکال است. برای آزمایش در این محدوده فشار، ابتدا با استفاده از کمپرسورهای قوی مخزن را تا فشار ۴۰ مگاپاسکال پر می‌شود. سپس با استفاده از یک شیر فشارشکن بین مخزن و رگلاتور و شیر پروانه‌ای در خروجی گاز جریان را تنظیم می‌کنیم. طریقه چینش تجهیزات آزمایش به صورت شماتیکی در شکل ۱ نشان داده شده است. آحاد فشارسنج مورد استفاده مگاپاسکال با دقت ۰/۱ است. برای اطمینان از مقدار دبی عبوری تعداد ۳ دبی سنج در مسیر جریان قرار داده شده است. آحاد دبی سنج مورد استفاده استاندارد (شرایط استاندارد صفر درجه سانتی‌گراد و یک اتمسفر است). مترمکعب بر ساعت با دقت ۰/۱ است. طی آزمایش اسلیو - قطعه لاستیکی که برای کنترل دبی رگلاتور استفاده می‌شود - از سیستم حذف شد. همچنین سایر منافذ کنترلی رگلاتور مسدود شد. این کار برای تعیین ضریب عبور گاز رگلاتور بدون تأثیرپذیری از اجزای کنترلی آن صورت پذیرفت. برای اندازه‌گیری صوت از دستگاه صداسنج طبق راهنما استفاده شده است. طوری که صداسنج در فاصله حدوداً یک متری رو به رگلاتور نصب شد. آحاد دستگاه دسی‌بل و دقت اندازه‌گیری ۰/۱ است.

در هر آزمایش، با ثابت نگه‌داشتن فشار ورودی و خروجی، دبی ثبت گردید. در این تحقیق آزمایش‌ها برای هر رگلاتور، ۴ بار در فشارهای مختلف و نسبت فشار نزدیک به بحرانی تکرار شد.

۲-۲- محاسبات آزمایش

رفتار جریان تراکم پذیر گاز در شیرها به دو قسمت عمده تقسیم می‌شود. رفتار زیر بحرانی و رفتار بحرانی. در صورتی که دبی جریان تابع تغییرات فشار بالادست و پایین دست به طور همزمان باشد جریان زیر بحرانی است. اما اگر دبی جریان فقط تابع فشار بالادست جریان باشد، شرایط بحرانی حاکم است. در شرایط بحرانی جریان اصطلاحاً دچار خفگی شده است. تفاوت این دو بخش در نمودار شکل ۲ نشان داده شده است. در این نمودار، قسمت ۱ نشان‌دهنده جریان در شرایط بحرانی است و قسمت ۲ جریان را در شرایط زیر بحرانی نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود دبی جریان در



شکل ۱) شماتیک چینش آزمایش

که در اینجا ρ_g دانسیته ظاهری، ρ_0 دانسیته ماده خام و d_p قطر میانگین حفرات است. همچنین ξ_m تراکم حفرات است. خواص محاسبه شده برای محیط متخلخل مورد استفاده در آزمایش‌ها در جدول ۱ آمده است. محاسبات بر اساس خواص اعلام شده توسط سازنده انجام شده است. مشاهده می‌شود، با وجود تخلخل یکسان در هر دو نمونه، تراوایی نمونه ۱۰ppi نسبت به نمونه ۲۰ppi کاهش پیدا کرده است. همچنین مقاومت اینرسی افزایش پیدا کرده است. به عبارتی نمونه ۱۰ppi سوراخ‌های درشت‌تری دارد و بنابراین جریان با سهولت بیشتری از آن عبور خواهد کرد.

۲-۳- هندسه، شبکه و شرایط مرزی

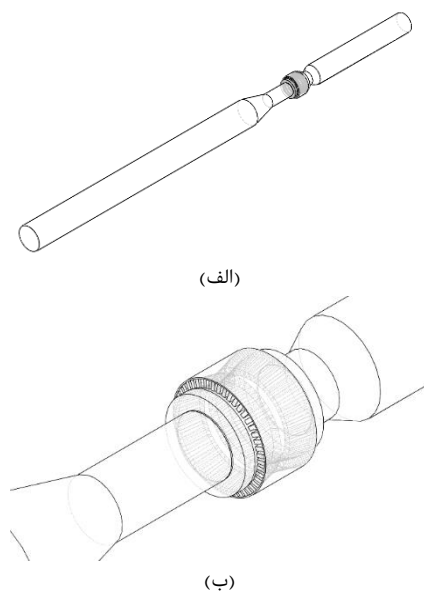
شکل ۳ شمای کلی هندسه مورد بررسی را نشان می‌دهد. طول لوله‌های ابتدایی و انتهایی را ۱۰ برابر قطر در نظر گرفتیم. این کار علاوه بر انطباق کلی با شرایط آزمایش باعث می‌شود جریان ورودی کاملاً توسعه یافته شود و شرایط ورود بر نتایج داخل رگلاتور بی‌اثر باشد. همچنین در خروجی امتداد لوله باعث توسعه یافتگی جریان در خروجی خواهد شد.

مشاهده می‌شود، هندسه مورد بررسی حالتی پیرویدیک دارد. از این رو می‌توان به حل مسئله در یک دوره تناوب آن اکتفا کرد. شکل ۴ نمایی از محیط حل را نشان می‌دهد.

شکل ۵ شبکه بندی محیط حل را نشان می‌دهد. همان طور که مشاهده می‌شود، شبکه مورد استفاده کاملاً سازمان یافته و منظم است. این شکل از شبکه می‌تواند از ایجاد و انباشت خطای عددی جلوگیری کرده و به بهبود شرایط حل کمک کند.

جدول ۱) خواص محیط متخلخل مورد استفاده در این تحقیق

تراکم	تخلخل	تراوایی	مقاومت اینرسی
۱۰ppi	۰/۹۸۷	۱/۱۸	۴۳۰/۳۴
۲۰ppi	۰/۹۸۷	۰/۲۹	۸۶۰/۶۹



شکل ۳) هندسه مورد بررسی

$$C_g = \frac{2 \times Q \times \sqrt{d \times (T_u + 273)}}{13.57 \times (p_u + p_b)} \quad (6)$$

ضریب شکل از رابطه ۷ به دست می‌آید.

$$K_1 = \frac{\arcsin \left[\frac{Q \times \sqrt{d \times (T_u + 273)}}{13.57 \times C_g} \times \frac{2}{p_u + p_b} \right]}{\frac{P_u - P_d}{P_u + P_b}} \quad (7)$$

۳- شبیه سازی عددی

۱-۳- مدل ریاضی و معادلات

در شبیه سازی جریان داخل رگلاتور، شرایط پایدار، سه بعدی، جریان کاملاً آشفته و تراکم پذیر در نظر گرفته شده است. محیط متخلخل هموژن در نظر گرفته شده است. در این شرایط معادلات حاکم بر جریان، عبارت است از:

پیوستگی:

$$\varepsilon \frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) = 0 \quad (8)$$

مومنتوم:

$$\left(\frac{\partial (\rho \mathbf{u})}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla (\rho \mathbf{u}) \right) = -\nabla P + \mu \nabla^2 \mathbf{u} - \frac{\mu}{\alpha} \mathbf{u} - \frac{c_2}{2} \rho \mathbf{u} |\mathbf{u}| \quad (9)$$

معادله حالت:

$$\frac{P}{\rho} = RT \quad (10)$$

معادله انرژی:

$$\varepsilon \left(\frac{\partial (\rho CT)}{\partial t} + \frac{1}{\varepsilon} \mathbf{u} \cdot \nabla (\rho CT) \right) = \nabla \cdot \left(\frac{k_{eff}}{C} \nabla (CT) \right) + Q \quad (11)$$

آشفته گی SST k- ω :

$$\left(\frac{\partial (\rho k)}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla (\rho k) \right) = P_k - C_{\mu} \rho \omega k + \nabla \cdot \left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \nabla k \right) \quad (12)$$

$$\left(\frac{\partial (\rho \omega)}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla (\rho \omega) \right) = \frac{\alpha \omega}{k} P_k - \beta \rho \omega^2 + \frac{2(1 - F_1) \rho}{\sigma_{\omega 2} \omega} \nabla \cdot k \nabla \omega + \nabla \cdot \left(\mu + \sigma_{\omega} \mu_t \nabla \omega \right) \quad (13)$$

برای شبیه سازی جریان در محیط متخلخل، از مدل برینکمن-فورچایمر استفاده شده است [39].

تراوایی محیط متخلخل به صورت معادله ۱۴ محاسبه می‌گردد. همچنین ضریب مقاومت اینرسی جریان به صورت معادله ۱۵ محاسبه می‌شود [40].

$$\alpha = \frac{d_p^2}{150} \frac{\varepsilon^3}{(1 - \varepsilon)^2} \quad (14)$$

$$\beta = \frac{1.75}{d_p} \frac{(1 - \varepsilon)}{\varepsilon^3}, \quad c_2 = 2\beta \quad (15)$$

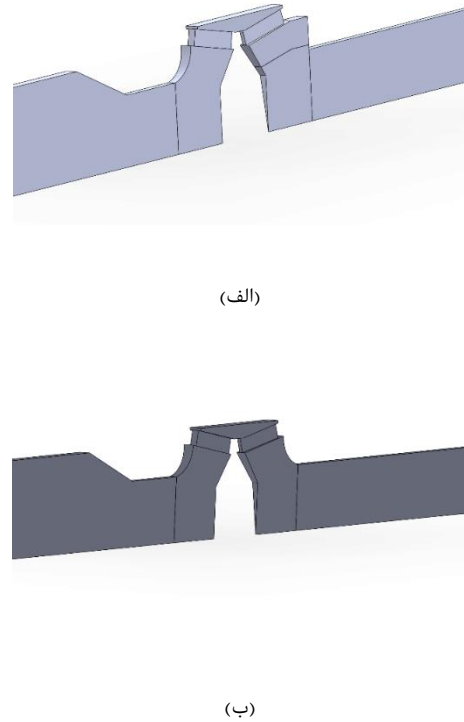
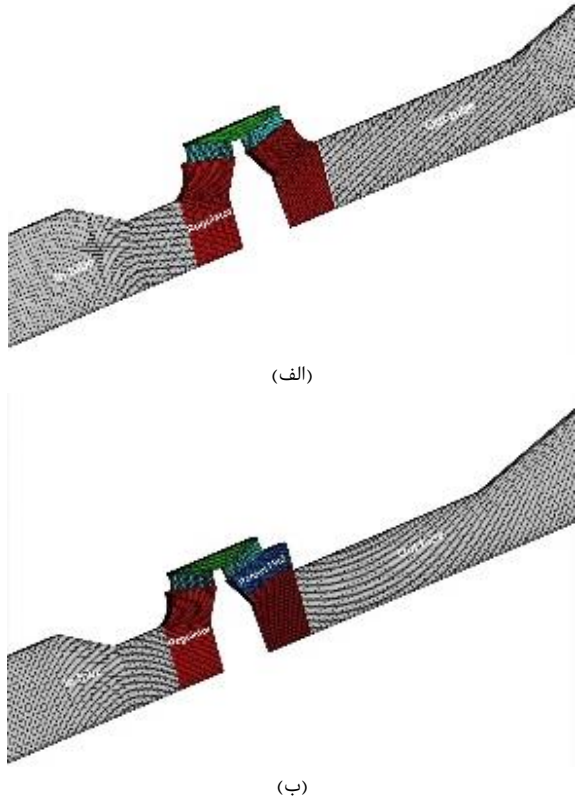
در این معادلات ε تخلخل و d_p قطر میانگین سوراخ‌های محیط متخلخل است. ضریب هدایت حرارتی موثر در محیط متخلخل از رابطه ۱۶ محاسبه می‌شود.

$$k_{eff} = \varepsilon k_{fluid} + (1 - \varepsilon) k_{solid} \quad (16)$$

در این رابطه k_f ضریب هدایت حرارتی سیال و k_s ضریب هدایت حرارتی جامد است. تخلخل با رابطه ۱۷ محاسبه شده است. میانگین حفره‌ها هم از رابطه ۱۸ محاسبه شده است.

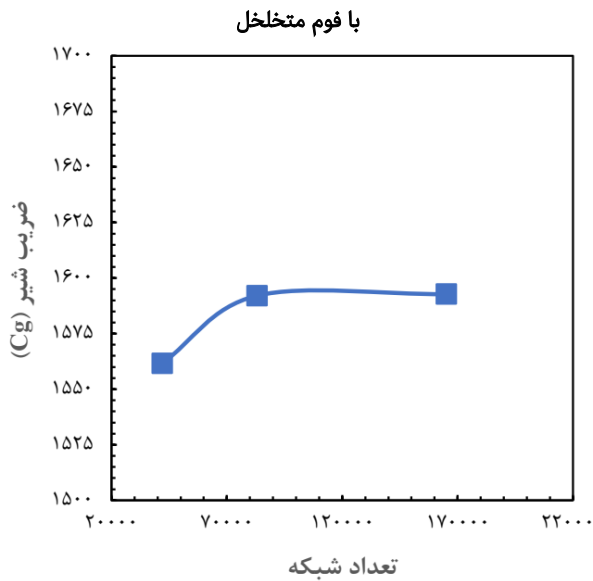
$$\varepsilon = 1 - (\rho_s / \rho_0) \quad (17)$$

$$d_p = 0.01 \times \sqrt{\frac{4}{\pi} \times \frac{\varepsilon}{\xi_m}} \quad (18)$$



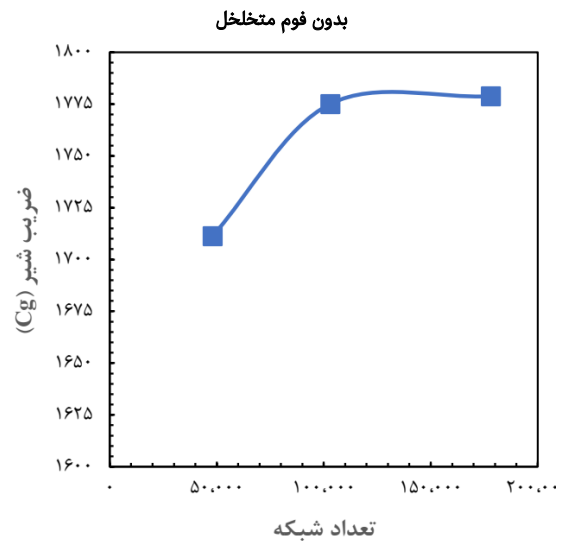
شکل ۴ هندسه پریودیک مورد استفاده در شبیه‌سازی (الف) نمای هندسه بدون سایلنسر و (ب) هندسه با سایلنسر
شکل ۵ شبکه مورد استفاده برای شبیه‌سازی (الف) نمای هندسه با سایلنسر و (ب) هندسه بدون سایلنسر

برای بررسی استقلال حل از شبکه، نتایج حاصل از سه شبکه‌بندی متفاوت در نمودار شکل ۶ نشان داده شده است. این نمودار، دبی محاسبه‌شده برای سه شبکه متفاوت در شرایط تقلیل فشار ۲۰ مگاپاسکال در ورودی به ۱۰ مگاپاسکال در خروجی برای هندسه بدون سایلنسر را نشان می‌دهد. همچنین نمودار شکل ۷ همین نتایج را برای هندسه با وجود سایلنسر ۱۰ ppi نمایش می‌دهد. همان طور که مشاهده می‌شود برای هندسه بدون سایلنسر،



شکل ۷ بررسی استقلال از شبکه برای رگلاتور با سایلنسر

شبکه‌های ۱۰۳۰۰۰ تایی و ۱۷۸۰۰۰ تایی نتایج کاملاً مشابه دارند و برای کاهش زمان و هزینه حل شبکه ۱۰۳۰۰۰ تایی مورد استفاده قرار گرفت. همچنین برای هندسه با وجود سایلنسر شبکه ۸۳۰۰۰ تایی انتخاب گردید.



شکل ۶ بررسی استقلال از شبکه برای رگلاتور بدون سایلنسر

۴- نتایج

همان طور که گفته شد، برای هر نمونه، آزمایش ۴ بار در فشارهای مختلف و نسبت فشار حدوداً ۰/۱۰ انجام شد. آزمایش‌ها برای سه رگلاتور مختلف انجام شد، که عبارت‌اند از: نمونه بدون سایلنسر، نمونه با محیط متخلخل ۱۰ ppi و نمونه با محیط متخلخل ۲۰ ppi. ضریب جریان برای هر آزمایش تعیین شد و میانگین مقادیر به دست آمده برای هر نمونه، به عنوان ضریب جریان آن در نظر گرفته شد. همچنین تراز شدت صوت برای هر نمونه اندازه‌گیری گردید. برای بررسی نتایج ابتدا تأثیر محیط متخلخل بر عملکرد رگلاتور مورد بررسی قرار گرفت. سپس اثر قرار دادن محیط متخلخل در رگلاتور بر کاهش تراز شدت صوت و چگونگی تأثیر پارامترهای جریانی بر آن، ارزیابی شده است.

۴-۱- تأثیر محیط متخلخل بر عملکرد رگلاتور

نتایج آزمایش‌ها در جدول ۲ گزارش شده است. این جدول شامل ۳ بخش است. بخش اول نتایج آزمایش رگلاتور بدون محیط متخلخل، بخش دوم نتایج آزمایش رگلاتور با محیط متخلخل ۱۰ ppi و بخش آخر نتایج آزمایش رگلاتور با محیط متخلخل ۲۰ ppi را نشان می‌دهد. در این جدول مقادیر دبی عبوری از رگلاتور و فشار بالادست و پایین دست آن آمده است. همچنین برای هر آزمایش، ضریب جریان و ضریب شکل محاسبه شده است. برای هر نمونه، میانگین، انحراف از میانگین و ضریب تغییرات ضریب جریان و ضریب شکل گزارش شده است. همان طور که مشاهده می‌شود، ضریب تغییرات همواره از ۴ درصد کوچک‌تر هست، که این موضوع نشان‌دهنده دقت قابل قبول آزمایش‌ها هست.

فشارهای مورد بررسی در بالادست جریان از ۲۰ بار تا ۵ بار تغییر کرده است. این گستره تغییرات برای اطمینان از نتایج آزمایش بوده است. فشار پایین دست جریان تا جای ممکن طوری تنظیم شده است که نسبت فشار مطلق به نسبت فشار بحرانی نزدیک باشد. این موضوع برای اطمینان از مقادیر به دست آمده برای جریان در حالت بحرانی و زیر بحرانی رعایت شده است. نتایج نشان می‌دهد، با افزایش فشار بالادست دبی جریان افزایش پیدا کرده ولی ضریب جریان تقریباً مقادیر ثابتی دارد. این موضوع به دلیل افزایش اختلاف فشار بالادست و پایین دست جریان است. همان طور که انتظار می‌رفت، ضریب شکل برای هر رگلاتور عددی ثابت است. برای مقادیر بالای بحرانی ضریب شکل محاسبه نشده است. ضریب شکل برای نمونه‌های دارای محیط متخلخل یکسان است. شکل یکسان جریان در هر دو نمونه عامل این قضیه است. خطوط جریان - حاصل از نتایج شبیه‌سازی - در شکل ۱۱ این موضوع را روشن می‌کند.

نمودار شکل ۸ تغییرات ضریب جریان میانگین و نمودار شکل ۹ بازده میانگین محاسبه شده را در ۳ نمونه مورد بحث نشان می‌دهد. در این نمودارها نتایج عددی و آزمایشگاهی هم‌زمان به نمایش در آمده است. مشاهده می‌شود نتایج شبیه‌سازی با واقعیت تطابق خوبی دارد، طوری که خطای حل عددی کم‌تر از ۳ درصد است. البته این خطا در نمونه‌های متخلخل کمتر است. اختلاف موجود بین شبیه‌سازی عددی و نتایج آزمایشگاهی، به دلیل حاکمیت شرایط گذرا در آزمایش‌هاست. مقادیر نسبت فشار در شبیه‌سازی ۰/۵

جدول ۲) نتایج آزمایش‌ها

	شماره آزمایش	دبی (نرمال متر مکعب بر ساعت)	فشار بالادست (بار)	فشار پایین دست (بار)	C_g	K_1
بدون محیط متخلخل	۱	۴۳۵۰	۵/۲۴	۲/۵۸	۱۷۷۹	۱۲۶/۹
	۲	۷۸۶۰	۱۰/۶۴	۴/۸۰	۱۷۱۰	۱۲۶/۹
	۳	۱۱۱۰۰	۱۵/۷۹	۷/۵۰	۱۶۷۴	۱۲۶/۹
	۴	۱۴۷۰۰	۲۰/۶۰	۱۰/۱۳	۱۷۲۴	۱۲۶/۹
	میانگین				۱۷۲۱	۱۲۶/۹
	انحراف از معیار				۷۳/۳۷	۰/۰
	ضریب تغییرات (درصد)				۲٪	۰٪
با محیط متخلخل ۱۰ ppi	۵	۳۸۸۰	۵/۱۷	۲/۴۵	۱۶۰۲	۱۲۵/۹
	۶	۷۰۰۰	۱۰/۰۸	۵/۰۰	۱۶۰۵	۱۲۵/۹
	۷	۹۹۷۰	۱۴/۸۰	۷/۵۰	۱۶۰۲	۱۲۶/۰
	۸	۱۳۵۰۰	۲۰/۰۰	۹/۰۰	۱۶۳۰	۱۲۶/۰
	میانگین				۱۶۱۰	۱۲۶/۰
	انحراف از معیار				۱۱/۴۶	۰/۰۵
	ضریب تغییرات (درصد)				۱٪	۰٪
با محیط متخلخل ۲۰ ppi	۹	۳۳۸۰	۵/۰۹	۲/۵۲	۱۴۱۹	۱۲۶/۱
	۱۰	۶۶۳۰	۱۰/۱۵	۴/۹۵	۱۵۰۹	۱۲۶/۱
	۱۱	۹۱۰۰	۱۴/۹۷	۷/۵۶	۱۴۴۶	۱۲۶/۱
	۱۲	۱۲۰۰۰	۲۰/۱۹	۹/۵۰	۱۴۳۴	۱۲۶/۰
	میانگین				۱۴۵۲	۱۲۶/۱
	انحراف از معیار				۳۴/۱۴	۰/۰۵
	ضریب تغییرات (درصد)				۲٪	۰٪

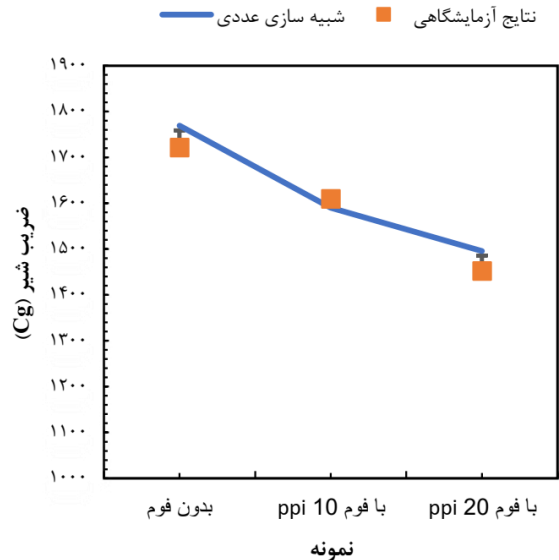
باید به این نکته توجه داشت که عدد ماخ، شکل ۱۰، در نمونه بدون محیط متخلخل به ۱/۴ رسیده و شرایط خفگی جریان را به وجود آورده است اما در نمونه‌های با محیط متخلخل عدد ماخ حداکثر به ۰/۷ رسیده است. بنابراین این‌طور می‌توان استنباط کرد که در نمونه‌های با محیط متخلخل، برای نسبت فشار بالاتر جریان خفه خواهد شد. با توجه به این موضوع، می‌توان انتظار داشت، نمونه‌های با محیط متخلخل در نسبت فشارهای بیشتر راندمان بالاتری را داشته باشند.

در شکل ۱۱ تغییرات سرعت و خطوط جریان در شرایط بدون محیط متخلخل، با محیط متخلخل ۱۰ ppi و ۲۰ ppi نمایش داده شده است. سرعت سیال در نمونه بدون محیط متخلخل تقریباً دو برابر نمونه‌های دارای محیط متخلخل است. این موضوع باعث خواهد شد ناپایداری‌های جریان در نمونه بدون محیط متخلخل بیشتر باشد. با توجه به خطوط جریان این افزایش سرعت را می‌توان توجیه کرد. مشاهده می‌شود، در شرایط بدون محیط متخلخل بعد از عبور جریان از مجرای مرتبط‌کننده، گردابه بزرگی به وجود می‌آید. این گردابه مجرای عبور جریان سیال را تنگ می‌کند. همین موضوع باعث افزایش سرعت جریان در این مقطع می‌شود. اما در نمونه‌های دیگر، محیط متخلخل باعث یکنواخت شدن جریان و از بین رفتن گردابه مذکور می‌گردد. به عبارتی جریان در فضای موجود پخش می‌شود. از همین رو، با وجود اینکه سرعت سیال در نمونه با محیط متخلخل تقریباً نصف می‌شود، اما ضریب جریان حداکثر ۱۵ درصد کم می‌شود. گردابه دومی که در هر سه نمونه مشاهده می‌شود، بعد از تغییر قطر لوله است.

در شکل ۱۲ مشاهده می‌شود، در نمونه بدون محیط متخلخل تغییرات فشار شدیدتر از شرایط با محیط متخلخل است. گستره تغییرات فشار در نمونه بدون محیط متخلخل بیشتر است، طوری که کمینه فشار در نمونه بدون محیط متخلخل ۱۰۰ کیلو پاسکال کمتر از دو مورد دیگر است. این موضوع به دلیل افزایش مقاومت ویسکوز جریان در محیط متخلخل است.

۲-۴- تأثیر محیط متخلخل بر کاهش صدا

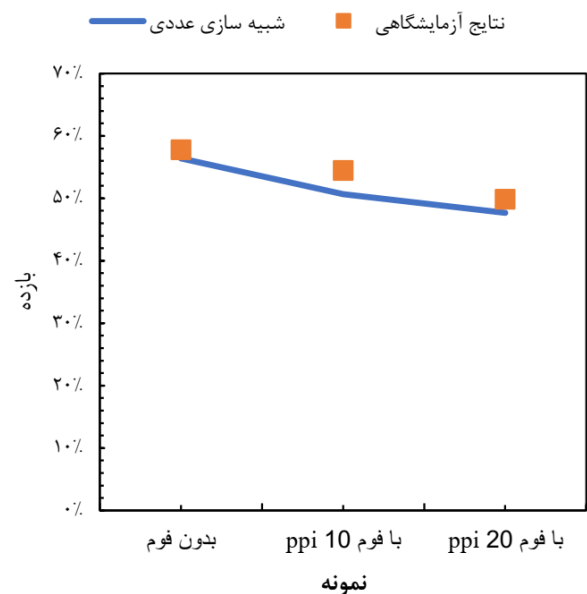
در جدول ۳ تغییرات تراز شدت صوت، حاصل از آزمایش، در نمونه‌های مورد بررسی نمایش داده شده است. مشاهده می‌شود نمونه‌های دارای محیط متخلخل تراز شدت صوت پایین‌تری از نمونه بدون محیط متخلخل دارند. این در حالی است که تولید نویز در دو نمونه دارای محیط متخلخل تقریباً یکسان است. باید توجه داشت، طبق نتایج جدول ۲ سایلنسر متراکم‌تر ۱۵ درصد و سایلنسر با تراکم کمتر ۷ درصد دبی را کاهش می‌دهد. بنابراین استفاده از محیط متخلخل ۱۰ ppi با افت کمتر دبی می‌تواند تراز شدت صوت را کاهش دهد. نتیجه مهم و جالب این اندازه‌گیری تأثیر بسیار کم فشار جریان و در نتیجه دانسیته سیال بر شدت صدای منتشر شده



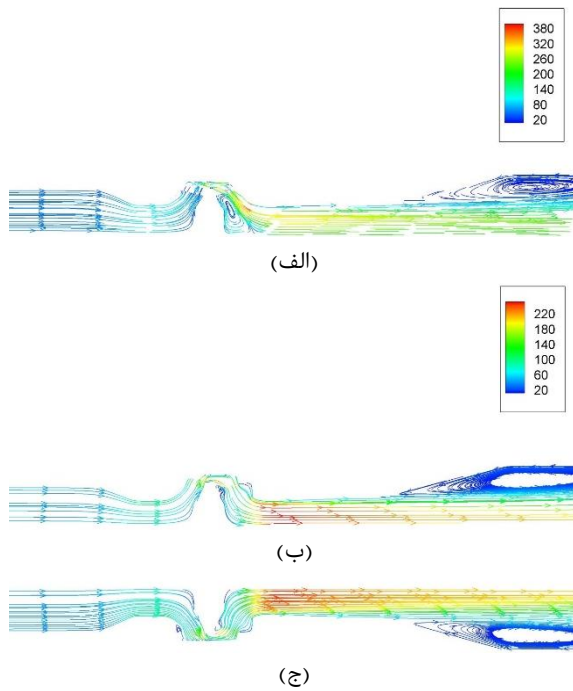
شکل ۸) نمودار تغییرات ضریب جریان در شرایط مورد بررسی

ثابت نگه داشته شده است. شرایط مورد بررسی در شبیه‌سازی‌ها در نقطه بحرانی تنظیم شده است.

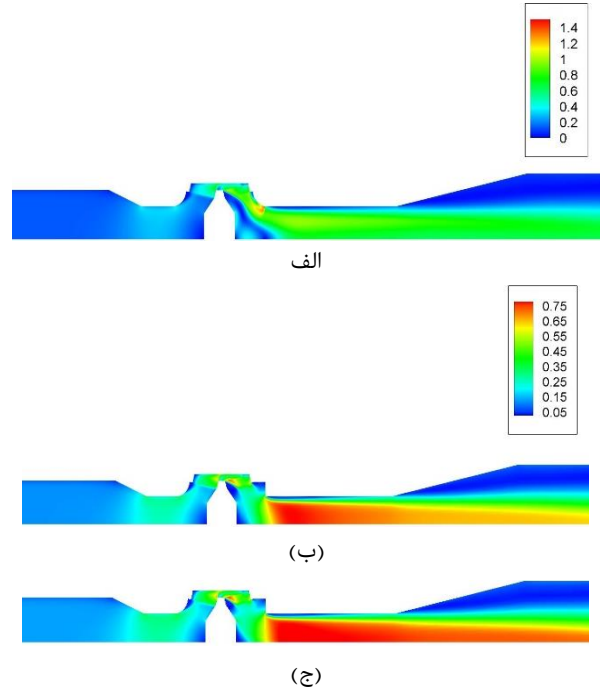
همان‌طور که در نمودار شکل ۸ مشاهده می‌شود، ضریب جریان با استفاده از محیط متخلخل کاهش پیدا می‌کند و هرچه تراکم سوراخ‌ها بیشتر باشد، این افت جریان مشهودتر است. افت ضریب جریان در حالت با محیط متخلخل ۱۰ ppi و ۲۰ ppi نسبت به حالت بدون محیط متخلخل به ترتیب، ۷ و ۱۵ درصد است. این موضوع در نمودار شکل ۹ هم مشاهده به صورت مشابه نمود پیدا کرده است. با کوچک‌تر شدن سوراخ‌های محیط متخلخل، بازده رگلاتور کاهش پیدا کرده است. باید توجه داشت، این کاهش بازدهی، کمتر از ۱۰ درصد نسبت به حالت بدون محیط متخلخل است.



شکل ۹) نمودار تغییرات بازده در شرایط مورد بررسی



شکل ۱۱) خطوط جریان رنگی شده با اندازه سرعت (m/sec) برای شرایط الف) بدون ساینسر، ب) با ساینسر ۱۰ ppi، ج) با ساینسر ۲۰ ppi

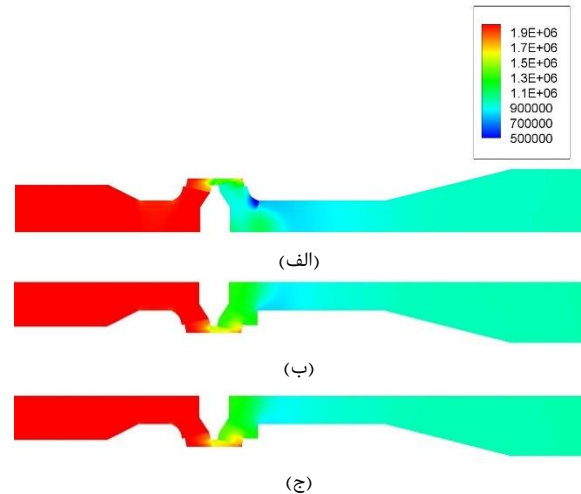


شکل ۱۰) تغییرات عدد ماخ برای شرایط الف) بدون ساینسر، ب) با ساینسر ۲۰ ppi، ج) با ساینسر ۱۰ ppi

از رگلاتور، عامل کاهش فرکانس گردابه‌ها است. همچنین محیط متخلخل با کاهش لایه‌های برشی آزاد جریان و کاهش شدت تلاطم عملکرد بسزایی در کاهش چشمه‌های تولید صدا و تشدید نوسانات جریان داشته است.

۵- نتیجه‌گیری

در این تحقیق به بررسی چگونگی تأثیر محیط متخلخل بر عملکرد و کاهش شدت صوت تولیدشده پرداخته شد. برای این کار ابتدا آزمایش‌هایی طراحی شد. طراحی آزمایش‌ها به گونه‌ای بود که نتایج برای حالت زیر بحرانی و بحرانی قابل استفاده باشد. مشاهده شد، محیط متخلخل می‌تواند ۲۰ دسی‌بل شدت صوت به وجود آمده را در رگلاتورهای تقلیل فشار کاهش دهد. با این وجود جریان



شکل ۱۲) تغییرات فشار (پاسکال) برای شرایط الف) بدون ساینسر، ب) با ساینسر ۱۰ ppi، ج) با ساینسر ۲۰ ppi

جدول ۳) تراز شدت صوت در نمونه‌های مورد بررسی

case no.	Noise (dB,A)
۱	۱۲۰/۳
۲	۱۱۹/۸
۳	۱۱۹/۶
۴	۱۲۰/۰
۵	۱۰۵/۲
۶	۱۰۴/۸
۷	۱۰۵/۰
۸	۱۰۵/۶
۹	۱۰۱/۴
۱۰	۱۰۰/۸
۱۱	۹۹/۴
۱۲	۱۰۰/۰

است. این موضوع روشن می‌کند، شکل جریان سیال نسبت به سایر عوامل مؤثر بر تولید صوت اهمیت بیشتری دارد. توجیه این مسئله با توجه به نتایج حل عددی امکان‌پذیر است.

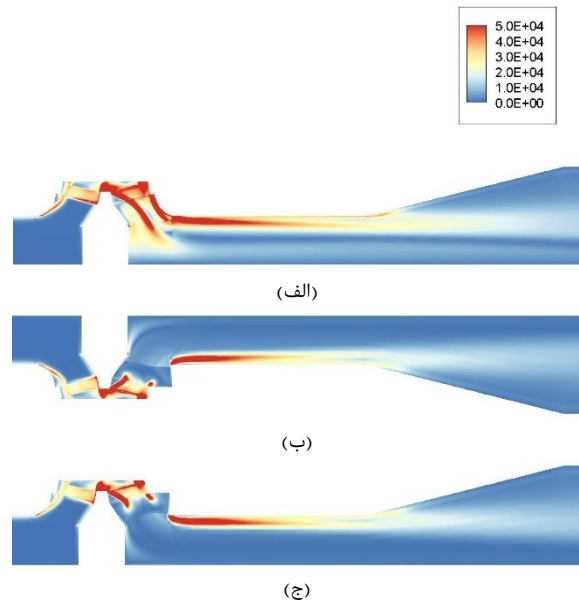
همان‌طور که در مقدمه بحث گفته شد، گردابه‌ها و لایه‌های برشی آزاد نقش به‌سزایی در ایجاد صدا و نوسانات جریان دارند. بررسی فرکانس چرخش گردابه‌ها در شکل ۱۳ و ویسکوزیته تلاطم در شکل ۱۴ دید خوبی نسبت به این دو پدیده در رگلاتور می‌دهد. قرار دادن محیط متخلخل در مسیر جریان ضمن از بین بردن برخی گردابه‌ها، فرکانس چرخش آن‌ها را کاهش داده است. مطابق شکل ۱۰ و شکل ۱۱ در نمونه‌های دارای محیط متخلخل، به دلیل کاهش سرعت جریان و از بین رفتن گردابه بزرگ به وجود آمده در خروجی جریان

جلوگیری به عمل می‌آید. فرکانس گردش گردابه‌ها افت کرده و شدت تلاطم نیز کاهش می‌یابد. از همین رو چشمه‌های تولید صوت کاهش پیدا کرده و شدت صوت عبوری از جداره فلزی کاهش می‌یابد. بررسی نسبت فشار بحرانی در شرایط وجود محیط متخلخل و همچنین شبیه‌سازی گذرای فرایند می‌تواند در پژوهش‌های آینده مورد ارزیابی قرار گیرد.

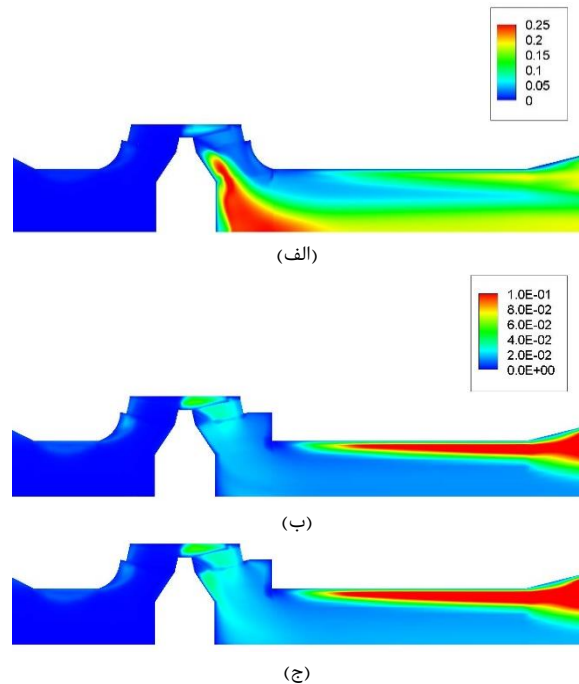
تشکر و قدردانی: نویسندگان بر خود لازم می‌دانند از سازمان جهاد دانشگاهی خراسان رضوی تشکر و قدردانی به عمل آورند.
تأییدیه اخلاقی: این مقاله تاکنون در نشریه دیگری (به طور کامل یا بخشی از آن) به چاپ نرسیده است. همچنین برای بررسی یا چاپ به نشریه دیگری ارسال نشده است. محتویات علمی مقاله حاصل فعالیت علمی نویسندگان بوده است.
تعارض منافع: در مورد پژوهش حاضر، هیچ‌گونه تعارض منافع با سازمان یا اشخاص حقیقی و حقوقی وجود ندارد.
سهم نویسندگان: نویسندگان این مورد را بیان نکردند.
منابع مالی: منابع مالی این پژوهش توسط سازمان جهاد دانشگاهی خراسان رضوی تأمین شده است.

منابع

- 1- Farzaneh Gord M, Jannatabadi M. Double acting expansion engine simulation performance based on control valve type and gas composition. *Modares Mechanical Engineering*. 2017;17(2):29-40
- 2- Ramzan M, Maqsood A. Dynamic modeling and analysis of a high pressure regulator. *Mathematical Problems in Engineering*. 2016;2016.
- 3- Kolodin I, Ryabinin M. Mathematical representation of pressure regulator with variable characteristic. *InIOP Conference Series: Materials Science and Engineering* 2019;589(1):012018.
- 4- Kolodin I. Optimization of parameters of the pressure regulator with variable characteristic. *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* 2020;779(1):012046.
- 5- Zhang C, Li G. Optimization of a direct-acting pressure regulator for irrigation systems based on CFD simulation and response surface methodology. *Irrigation Science*. 2017;35(5):383-95.
- 6- Bae Y, Kim YI. Numerical modeling of anisotropic drag for a perforated plate with cylindrical holes. *Chemical Engineering Science*. 2016;149:78-87.
- 7- Bayazit Y, Sparrow EM, Joseph DD. Perforated plates for fluid management: Plate geometry effects and flow regimes. *International Journal of Thermal Sciences*. 2014;85:104-11.
- 8- Zhao T, Zhang J, Ma L. A general structural design methodology for multi-hole orifices and its experimental application. *Journal of Mechanical science and Technology*. 2011;25(9):2237.
- 9- Özahi E. An analysis on the pressure loss through perforated plates at moderate Reynolds numbers in turbulent flow regime. *Flow Measurement and Instrumentation*. 2015;43:6-13.



شکل ۱۳ تغییرات ورتیسیت (1/sec) برای شرایط الف) بدون ساینسر، ب) با ساینسر ۱۰ ppi، ج) با ساینسر ۲۰ ppi



شکل ۱۴ تغییرات ویسکوزیته تلاطم (kg/m/sec) برای شرایط الف) بدون ساینسر، ب) با ساینسر ۱۰ ppi، ج) با ساینسر ۲۰ ppi

عبوری از آن را کم می‌کند. این کاهش جریان در نمونه‌های مورد آزمایش ۱۰ ppi و ۲۰ ppi به ترتیب ۷ و ۱۵ درصد است. در ادامه برای درک بهتر نتایج، شبیه‌سازی عددی نمونه‌های مورد مطالعه انجام شد. نتایج تطابق بسیار خوبی با واقعیت داشت. مشاهده شد، وجود محیط متخلخل باعث یکنواخت شدن جریان سیال می‌شود. این موضوع باعث عبور دبی جریان از فضای وسیع‌تری می‌شود. بنابراین بیشینه سرعت سیال در این شرایط کاهش پیدا می‌کند و از تغییرات دفعی فشار و سرعت در شرایط عدد ماخ بیشتر از یک

- 26- Qian JY, Chen MR, Jin ZJ, Chen LL, Sundén B. A numerical study of heat transfer effects and aerodynamic noise reduction in superheated steam flow passing a temperature and pressure regulation valve. *Numerical Heat Transfer, Part A: Applications*. 2020;77(10):873-89.
- 27- Vujić D, Radojković S. Dynamic model of gas pressure regulator. *Facta universitatis-series: Mechanics, Automatic Control and Robotics*. 2001;3(11):269-76.
- 28- Shin CH. A numerical study on the characteristics of transient flow in a pressure regulator resulting from closure of the pressure control valve. *Journal of Mechanical Science and Technology*. 2013;27(2):443-9.
- 29- Saha BK. Numerical simulation of a pressure regulated valve to find out the characteristics of passive control circuit. *International Journal of Mechanical and Mechatronics Engineering*. 2013;7(5):936-9.
- 30- Shipman J, Hosangadi A, Ahuja V. Unsteady analyses of valve systems in rocket engine testing environments. In 40th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit 2004:3663.
- 31- Hou CW, Qian JY, Chen FQ, Jiang WK, Jin ZJ. Parametric analysis on throttling components of multi-stage high pressure reducing valve. *Applied Thermal Engineering*. 2018;128:1238-48.
- 32- Qian JY, Hou CW, Wu JY, Gao ZX, Jin ZJ. Aerodynamics analysis of superheated steam flow through multi-stage perforated plates. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2019;141:48-57.
- 33- Xu C, Mao Y. Passive control of centrifugal fan noise by employing open-cell metal foam. *Applied Acoustics*. 2016;103:10-9.
- 34- Xu C, Mao Y. Experimental investigation of metal foam for controlling centrifugal fan noise. *Applied Acoustics*. 2016;104:182-92.
- 35- Xu C, Mao Y, Hu Z. Numerical study of pore-scale flow and noise of an open cell metal foam. *Aerospace Science and Technology*. 2018;82:185-98.
- 36- Xu C, Mao Y, Hu Z. Tonal and broadband noise control of an axial-flow fan with metal foams: Design and experimental validation. *Applied Acoustics*. 2017;127:346-53.
- 37- Arcondoulis EJ, Liu Y, Li Z, Yang Y, Wang Y. Structured porous material design for passive flow and noise control of cylinders in uniform flow. *Materials*. 2019;12(18):2905.
- 38- Fischer R. EN 334-the new European standard for gas pressure regulators; EN 334-die neue europäische Norm fuer Gas-Druckregelgeraete. *GWF (Gas-und Wasserfach) Gas-Erdgas*. 2000;141.
- 39- Guide AF. Release 14.0, ANSYS. Inc., USA, November. 2011 Nov.
- 40- Ergun S, Orning AA. Fluid flow through randomly packed columns and fluidized beds. *Industrial & Engineering Chemistry*. 1949;41(6):1179-84.
- 10- Barros Filho JA, Santos AA, Navarro MA, Jordão E. Effect of chamfer geometry on the pressure drop of perforated plates with thin orifices. *Nuclear Engineering and Design*. 2015;284:74-9.
- 11- Nicolleau FC, Salim SM, Nowakowski AF. Experimental study of a turbulent pipe flow through a fractal plate. *Journal of Turbulence*. 2011;(12):N44.
- 12- Muvvala P, Balaji C, Venkateshan SP. Experimental investigation on heat transfer from square jets issuing from perforated nozzles. *Heat and Mass Transfer*. 2017;53(7):2363-75.
- 13- Teh AL, Chin KW, Teh EK, Chin WM, Chia CM, Foo JJ. Thermal mixing enhancement of a free-cooling system with a fractal orifice plate. *Chemical Engineering Research and Design*. 2015;100:57-71.
- 14- Gronych T, Jeřáb M, Peksa L, Wild J, Staněk F, Vičar M. Experimental study of gas flow through a multi-opening orifice. *Vacuum*. 2012;86(11):1759-63.
- 15- Jin ZJ, Gao ZX, Zhang M, Liu BZ, Qian JY. Computational fluid dynamics analysis on orifice structure inside valve core of pilot-control angle globe valve. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*. 2018;232(13):2419-29.
- 16- Zeghloul A, Azzi A, Saidj F, Messilem A, Azzopardi BJ. Pressure drop through orifices for single-and two-phase vertically upward flow—implication for metering. *Journal of Fluids Engineering*. 2017;139(3).
- 17- Huang S, Ma T, Wang D, Lin Z. Study on discharge coefficient of perforated orifices as a new kind of flowmeter. *Experimental Thermal and Fluid Science*. 2013;46:74-83.
- 18- Raju LR, Kumar SS, Nandi TK. Effects of geometrical parameters on thermo-hydraulic characteristics of perforated plates. *International Journal of Thermal Sciences*. 2018;124:13-22.
- 19- Al-Sallami W, Al-Damook A, Thompson HM. A numerical investigation of the thermal-hydraulic characteristics of perforated plate fin heat sinks. *International Journal of Thermal Sciences*. 2017;121:266-77.
- 20- Shaaban S. On the performance of perforated plate with optimized hole geometry. *Flow Measurement and Instrumentation*. 2015;46:44-50.
- 21- Roul MK, Dash SK. Single-phase and two-phase flow through thin and thick orifices in horizontal pipes. *Journal of Fluids Engineering*. 2012;134(9).
- 22- Guo BY, Hou QF, Yu AB, Li LF, Guo J. Numerical modelling of the gas flow through perforated plates. *Chemical Engineering Research and Design*. 2013;91(3):403-8.
- 23- Qian JY, Zhang M, Lei LN, Chen FQ, Chen LL, Wei L, Jin ZJ. Mach number analysis on multi-stage perforated plates in high pressure reducing valve. *Energy Conversion and Management*. 2016;119:81-90.
- 24- Wei L, Zhu G, Qian J, Fei Y, Jin Z. Numerical simulation of flow-induced noise in high pressure reducing valve. *PloS one*. 2015;10(6):e0129050.
- 25- Jin ZJ, Chen FQ, Qian JY, Zhang M, Chen LL, Wang F, Fei Y. Numerical analysis of flow and temperature characteristics in a high multi-stage pressure reducing valve for hydrogen refueling station. *International journal of hydrogen energy*. 2016;41(12):5559-70.