Scientific Researches in
Theoretical and Applied Physics
Vol. 1, Issue. 1, Spring 2023

Research Paper

Investigation of gas pollution problem of Resistive Plate Chambers at high-rate experiments

Amir Kiumarsi Oskuyi *[1], Yousef Pezeshkiyan[2]

This paper is an open access and licensed under the CC BY NC license.

DOI:10.22034/STRAP.2023.15906

Reference to this article: Kiyoumarsiososkouei, A., & Pezeshkian, Y. (2023). Investigation of gas pollution problem of Resistive Plate Chambers at high-rate experiments. *Scientific Researches in Theoretical and Applied Physics*, *1*(1), 53-56.

Keywords

Resistive Plate Chambers, Computational Fluid Dynamics, Flow Optimization, Gas Replacement.

Received: 2023/01/02

Accepted: 2023/01/31

Available: 2023/06/10

A B S T R A C T

Nowadays, the simultaneous use of a large number of resistive plate chambers has become widespread in advanced physics experiments. One of the significant challenges with this type of detector is the use of gas. The collision of energetic particles with gas molecules leads to the ionization of the gas molecules, resulting in reactions that eventually contaminate the gas. To avoid degrading the performance of the detector, the contaminated gas must be replaced. Economic constraints and environmental considerations make optimization of the gas system inevitable. In this research, we use computational fluid dynamics tools to study the gas flow regime inside a single gap detector using Ansys-Workbench package. Our study shows that both diffusion and advection processes are effective in gas replacement in the chamber, but one dominates over the other within a specific range of the chamber. Based on the simulation results for single-gap detectors and considering the geometry of the multi-gap detectors, we can conclude that in the multi-gap detectors, the diffusion process plays the main role in the gas replacement. The most effective measure to reduce the gas replacement time in multi-gap detectors is to fill and eliminate the empty and unused spaces in the chamber.

*** Corresponding Author: Amir Kiumarsi Oskuyi**
E-mail: kiumarsi@sut.ac.ir

1. Faculty of Mechanical Engineering, Sahand University of Technology, Tabriz, Iran
2. Department of Physics, Sahand University of Technology, Tabriz, Iran

مقاله پژوهشی

بررسی مشکل آلودگی گازها در آشکارسازهای صفحه عایق در آزمایش‌های با میزان تابش بالا

امیر کیومرثی اسکویی[1*]، یوسف پزشکیان[2]،

این مقاله به صورت دسترسی باز و با لایسنس CC BY NC کریتیو کامانز قابل استفاده است.

ارجاع به این مقاله: کیومرثی اسکویی، امیر؛ پزشکیان، یوسف. (۱۴۰۱). بررسی مشکل آلودگی گازها در آشکارسازهای صفحه عایق در آزمایش‌های با میزان تابش بالا. *پژوهش‌های علمی در فیزیک نظری و کاربردی*، ۱(۱)، ۵۳-۵۶.

DOI:10.22034/STRAP.2023.15906

کلیدواژه‌ها

آشکارساز صفحه عایق، دینامیک سیالات محاسباتی، بهینه‌سازی جریان، جایگزینی گاز

چکیده

امروزه استفاده همزمان از تعداد زیادی از آشکارسازهای صفحه عایق در آزمایش‌های پیشرفته فیزیک بسیار متداول شده‌است. یکی از مهم‌ترین چالش‌های این نوع آشکارسازها، مدیریت استفاده از گاز مصرفی می‌باشد. برخورد ذرات پرانرژی با مولکول‌های گاز منجر به یونیزاسیون و به دنبال آن واکنش‌هایی می‌شود که اثر نهایی آن، آلوده شدن گاز می‌باشد. به منظور جلوگیری از افت عملکرد آشکارساز لازم است گاز آلوده جایگزین شود. محدودیت‌های اقتصادی و ملاحظات محیط‌زیستی بهینه‌سازی سیستم گاز را اجتناب‌ناپذیر کرده است. در این پژوهش با استفاده از ابزارهای دینامیک سیالات محاسباتی و روابط تحلیلی، رژیم جریان گاز در داخل یک آشکارساز تک گافه را با استفاده از نرم‌افزار تجاری انسیس-ورکبنچ بررسی کرده‌ایم. مطالعه ما نشان می‌دهد که هر دو فرآیند پخش و جابه‌جایی در جایگزینی گاز در محفظه موثر هستند، اما در محدوده مشخصی از محفظه یکی بر دیگری غالب می‌شود. با استناد به نتایج شبیه‌سازی انجام‌شده بر روی آشکارسازهای تک‌گافه و با توجه به هندسه‌ی آشکارسازهای صفحه‌عایق چندگافه، می‌توان استنباط کرد که در آشکارسازهای چندگافه فرآیند پخش نقش اصلی را در جایگزینی گاز بازی خواهد کرد. موثرترین اقدام برای کاهش زمان جایگزینی گاز در آشکارسازهای چندگافه پُر کردن فضاهای خالی و بدون استفاده محفظه است.

دریافت شده: ۱۴۰۱/۱۰/۱۲
پذیرفته شده: ۱۴۰۱/۱۱/۱۱
منتشر شده: ۱۴۰۲/۰۳/۲۰

* نویسنده مسئول: امیر کیومرثی اسکویی
رایانامه: kiumarsi@sut.ac.ir

۱- دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی سهند، تبریز، ایران.
۲- گروه فیزیک، دانشگاه صنعتی سهند، تبریز، ایران.

مقدمه

آشکارسازهای صفحه عایق در آزمایش‌های فیزیک ذرات، پرتوهای کیهانی و نوترینوها کاربرد زیادی پیدا کرده است. در سالهای گذشته استفاده از این آشکارساز برای مقاصد تصویربرداری پزشکی و صنعتی نیز مورد توجه قرار گرفته است. فرآیند آشکارسازی همانند تمام آشکارسازهای گازی مبتنی بر یونیزاسیون مولکول‌های گاز و ایجاد جریان الکتریکی در اثر حرکت الکترون‌ها و یون‌ها در میدان الکتریکی است. نحوه عملکرد آشکارساز، کاربردها و انواع آشکارسازهای صفحه عایق به تفصیل توسط فونته و همکارانش [۱] تشریح شده است.

گاز (ترکیب گاز) مورد استفاده در این آشکارساز در اثر فرآیند یونش و برخوردهای متوالی که میان مولکول‌ها رخ می‌دهد دچار آلودگی می‌شود. یعنی ترکیباتی در گاز ایجاد می‌شود که عملکرد آشکارساز را دچار اختلال می‌کند [۲،۳]. گاز آلوده باید با گاز تمیز جایگزین شود. بنابراین در تمام آزمایش‌هایی که از این آشکارساز استفاده می‌کنند جریان گاز داریم که به‌طور دائم گاز تمیز را وارد محفظه‌های

آشکارساز می‌کند تا جایگزین گاز آلوده شود و گاز آلوده از سوی دیگر خارج شود.

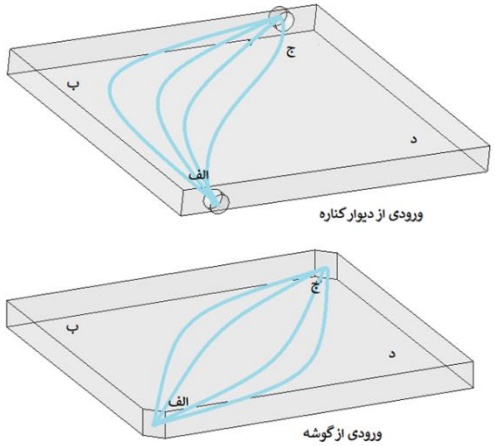
در آزمایش‌های بزرگ از تعداد آشکارسازهای زیادی استفاده می‌شود [۴-۶] و بنابراین حجم گازی که باید جایگزین شود بالاست که هزینه زیادی را به آزمایشگران تحمیل کرده و مشکلات زیست محیطی نیز به همراه دارد. برخی از گروه‌ها، برای جلوگیری از هدر رفت گاز، استفاده از سیستم بازیافت و تصفیه گاز آلوده را پیشنهاد کرده‌اند [۷]، [۸]. استفاده از چنین سیستمی خود هزینه‌های زیادی را می‌طلبد. کار دیگری که برای کاهش مصرف گاز باید انجام شود تلاش برای طراحی بهتر محفظه‌ها و اتصالات و ورودی و خروجی گاز است. همچنین لازم است برای هر آزمایش محاسبه شود که حداقل نرخ جریان ورود گاز چقدر باشد تا آلودگی عملکرد آشکارساز را تحت تاثیر قرار ندهد.

در این مطالعه ما می‌خواهیم برای یک آشکارساز صفحه عایق تک‌گافه بررسی کنیم که لازم است چند برابر حجم آشکارساز گاز تازه وارد محفظه شود تا گاز تازه در تمام قسمت‌های آشکارساز پخش شود. همچنین در مورد امکان تعمیم نتایج برای آشکارسازهای چندگافه بحث خواهیم کرد. در نهایت پیشنهادهایی برای بهبود عملکرد آشکارساز از نگاه میزان گاز مصرفی، کاهش زمان لازم برای شروع داده‌برداری و افزایش سرعت داده‌برداری ارائه خواهد شد.

جابجایی یا پخش

انتقال سیال (گاز) در یک محیط از طریق جابجایی[1] و پخش[2] صورت می‌گیرد. وقتی می‌خواهیم یک محفظه پر از گاز را با گاز جدیدی جایگزین کنیم، هر دو فرآیند نقش بازی می‌کنند که بسته به هندسه محفظه، نوع جریان و اختلاف غلظت سیال ممکن است یکی بر دیگری غالب باشد. اغلب اگر در یک هندسه مشخص فرآیند جابجایی فرآیند غالب جایگزینی گاز باشد، سرعت جایگزینی بالاتر خواهد بود.

مسیرهای جابجایی گاز برای دو حالت مختلف (نحوه تعبیه ورودی و خروجی گاز) برای یک محفظه مربع شکل در شکل ۱ مشخص شده است. در ناحیه میانی بین الف و ج فرآیند جابجایی غالب است و در ناحیه ب و د فرآیند پخش نقش تعیین کننده دارد.



شکل ۱ تصویر شماتیک جریان در داخل محفظه.

انتشار گاز در یک محیط به‌طور کلی با استفاده از معادله جابجایی-پخش (معادله ۱) توصیف می‌شود.

$$\underbrace{\frac{\partial C}{\partial t}}_{\text{ناپایایی}} + \underbrace{v_x\frac{\partial C}{\partial x} + v_y\frac{\partial C}{\partial y}}_{\text{جابجایی}} = \underbrace{D\left(\frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial y^2}\right)}_{\text{پخش}} \qquad (۱)$$

اگر سرعت جریان در ورودی زیاد باشد، عبارت پخش قابل صرف نظر بوده و زمان جایگزینی گاز تابع عکس سرعت گاز ورودی $T \propto \frac{1}{v}$ و همچنین هندسه محفظه (در اولویت دوم) خواهد بود. اما اگر سرعت ورود گاز به داخل محفظه پایین باشد (به دلیل پایین بودن نرخ جریان ورودی و یا بزرگ بودن دریچه ورودی محفظه)، فرآیند غالب برای انتشار گاز «پخش» خواهد بود.

[1] Drift (Advection)

2 Diffusion

در آشکارسازهای صفحه عایق تک‌گافه هر دو جمله موثر هستند و از هیچ‌کدام نمی‌توان صرف‌نظر کرد. در این‌صورت برای مطالعه فرآیند جایگزینی گاز باید به سراغ شبیه‌سازی برویم. اما در آشکارسازهای صفحه عایق چندگافه با توجه به هندسه پیچیده‌ای که دارند (تمام مجموعه صفحات عایق و گاف‌های خالی بین آن‌ها در داخل یک محفظه بزرگتر قرار دارند) و سرعت ورود گاز پایین است می‌توان از عبارت‌های مربوط به جابجایی (جمله دوم و سوم سمت چپ معادله ۱) صرف‌نظر کرد. بدین‌ترتیب نرخ تغییرات غلظت گاز جدید فقط تابعی از ضریب پخش و گرادیان غلظت گاز جدید به گاز آلوده خواهد بود. وقتی فرآیند پخش غالب باشد، معادله (۱) به صورت زیر خلاصه می‌شود.

$$\underbrace{\frac{\partial C}{\partial t}}_{\text{ناپایایی}} = \underbrace{D\left(\frac{\partial^2 C}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 C}{\partial y^2}\right)}_{\text{پخش}} \qquad (۲)$$

معادله فوق تحت عنوان معادله ناپایای لاپلاس و یا اصطلاحا معادله گرما نیز شناخته می‌شود. این معادله در شرایط مختلف مرزی حل دقیق دارد و فرمت پاسخ آن به شکل زیر می باشد.

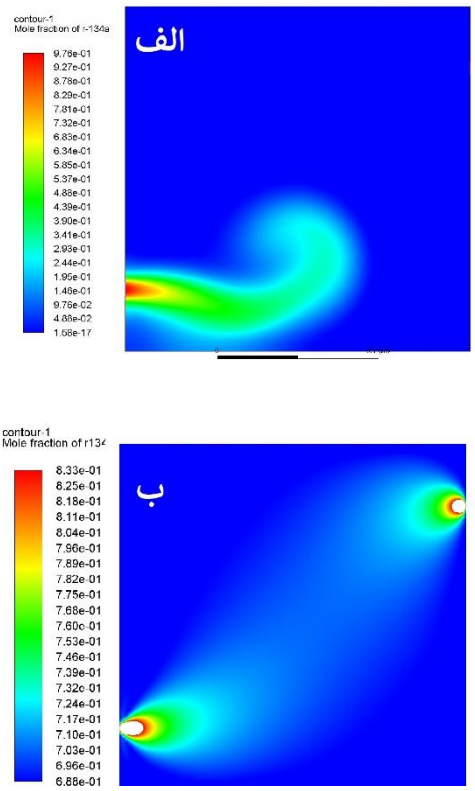
$$C(x,y,t) = e^{-\lambda D t} \times \left(A\sin\sqrt{\lambda}x + B\cos\sqrt{\lambda}x\right) \times \left(E\sin\sqrt{\lambda}y + F\cos\sqrt{\lambda}y\right) \qquad (۳)$$

حل معادله ۳ نیز برای هندسه پیچیده آشکارسازهای صفحه‌عایق چندگافه کار ساده‌ای نیست. ابزارهای قدرتمند شبیه‌سازی روش سرراست‌تر و ساده‌تری برای مطالعه فرآیند انتشار گاز در داخل محفظه در اختیار ما قرار می‌دهند.

در این شبیه‌سازی یک آشکارساز تک‌گافه با ابعاد ۲۵×۲۵×۰/۲ cm^3 در نظر گرفته شده‌است که گاز فرئون ***R-134a*** با سرعت ۰/۰۰۱ متر برثانیه وارد محفظه می‌شود. شبیه سازی با استفاده از بسته نرم افزاری انسیس-فلوئنت[1] انجام شده است. در شبیه سازی گاز آلوده و گاز جدید هر دو ویژگی-های فیزیکی (چگالی، ضریب پخش و ...) یکسانی دارند. همچنین نرخ آلودگی گاز در شبیه‌سازی حاضر لحاظ نشده است، به بیان دیگر فرض می‌شود که نرخ آلودگی گاز بسیار کندتر از نرخ جایگزینی گاز است. این فرض، با توجه به برخی گزارش‌ها، معقول است. چراکه زمان آلودگی گاز متناسب با نوع و محیط آزمایش از مرتبه چند هفته و بالاتر است در حالی که زمان جایگزینی در بدترین حالت کمتر از یک روز است.

شبیه‌سازی‌های انجام گرفته نشان می‌دهند، اگر به اندازه یک حجم محفظه گاز تمیز وارد آشکارساز شود، در نواحی بین خطوط آبی (در شکل ۱) گاز آلوده به‌طور کامل با گاز تمیز جایگزین می‌شود (به دلیل غالب بودن رژیم جابجایی). اما غلظت گاز تمیز در نواحی ب و د تغییر چندانی نخواهد کرد.

نتایج شبیه‌سازی برای غلظت گاز تمیز در شکل ۲ نشان داده شده است. شکل ۲.الف غلظت گاز جدید را پس از ۵ دقیقه و شکل ۲.ب غلظت گاز جدید را پس از حدود ۷ ساعت از لحظه باز کردن شیر ورودی نشان می‌دهند.



شکل ۲ کانتور غلظت گاز جدید الف) در حالت گذار (در شروع فرآیند جایگزینی) ب) در حالت پایا (زمان زیاد پس از شروع جایگزینی)

همانگونه که پیش‌تر نیز اشاره شد، زمان جایگزینی به پارامترهای مختلفی از جمله سرعت ورودی سیال، ویسکوزیته، چگالی و ضریب پخش سیال و سایرپارامترهای فیزیکی و هندسی بستگی دارد. به صورت خلاصه و تخمینی در مجموع شبیه‌سازی‌هایی که برای این پژوهش انجام شده نشان دهنده این حقیقت است که در صورت انتخاب ***R-134a*** به عنوان سیال عامل و اگر هندسه مورد بررسی یک مربع با ابعاد ۲۵×۲۵ cm^2 باشد مرتبه جایگزینی گاز را می‌توان مطابق جدول ۱ خلاصه کرد.

[1] Ansys-Fluent Package (Workbench)

جدول ۱ مرتبه جایگزینی گاز برحسب سرعت های ورودی مختلف

سرعت ورودی سیال *(m/s)*	زمان جایگزینی گاز جدید
۰/۵	۱ دقیقه
۰/۰۱	۱ ساعت
۰.۰۰۱	۱۰ ساعت

به عبارت دیگر زمان جایگزینی کامل گاز در فرآیند پخش از مرتبه ساعت و در فرآیند جابجایی از مرتبه ثانیه (حداکثر چند دقیقه) می‌باشد. در تمامی شبیه‌سازی‌های فوق به اندازه ۵ تا۱۰ برابر حجم محفظه گاز مصرف می‌شود تا کل گاز آلوده با گاز جدید جایگزین شود.

بحث و نتیجه‌گیری

نشان دادیم که برای انتشار گاز در آشکارسازهای تک‌گافه نمی‌توان از فرآیند جابه‌جایی صرف‌نظر کرد. بسته به نحوه قرارگیری ورودی و خروجی (مکان و زاویه آن‌ها) گاز آلوده در ناحیه‌ی محدودی از محفظه که فرآیند جابه‌جایی غالب است به سرعت با گاز جدید جایگزین می‌شود ولی سایر نواحی (به‌طور خاص گوشه‌های دور از ورودی/خروجی) جایگزینی گاز با سرعت بسیار کمتری صورت می‌گیرد. با طراحی هوشمندانه‌تر ورودی و خروجی (مثلا با افزایش تعداد ورودی و خروجی‌ها و تنظیم دقیق موقعیت آن‌ها) می‌توان ناحیه‌ای را که در آن جابه‌جایی غالب است، گسترش داد. در آزمایش‌هایی که میزان تابش بالاست و جایگزینی سریع‌گاز اهمیت دارد یا باید شار ورود گاز را افزایش داد و یا اینکه در هنگام تحلیل داده‌ها باید افت کیفیت آشکارساز در نواحی خارج از محدوده جابه‌جایی را در نظر گرفت.

با توجه به نکات مطرح شده در مقاله می‌توان نکاتی را درباره آشکارسازهای چندگافه استنتاج کرد. از جمله اینکه جایگزینی گاز در آشکارسازهای چندگافه از طریق فرآیند پخش خواهد بود. هنگامی که فرآیند پخش غالب است، راه موثر برای افزایش سرعت جایگزینی گاز کاهش حجم محفظه است. با توجه به اینکه کاهش حجم محفظه از طریق کم‌کردن پهنای گاف‌ها ممکن است باعث تضعیف عملکرد آشکارساز شود، توصیه می‌شود که فضاهای مرده و بدون استفاده اطراف گاف‌ها با مواد عایق پر شوند.

سپاسگزاری

از خانم دکتر نجمه محمدی به خاطر مشورت‌هایی که در حین انجام کار داشتند قدردانی می‌کنیم.

منابع و مراجع

[1] M. Abbrescia, V. Peskov, and P. Fonte, *Resistive gaseous detectors: designs, performance, and perspectives*. John Wiley & Sons, 2018.

[2] P. Lyu *et al.*, "Gas related effects on multi-gap RPC performance in high luminosity experiments," *J. Instrum.*, vol. 11, no. 11, pp. C11041–C11041, Nov. 2016.

[3] M. Capeans, R. Guida, and B. Mandelli, "Systematic study of RPC performances in polluted or varying gas mixtures compositions : an online monitor system for the RPC gas mixture at LHC," *Cern PHEP-Tech-Note-2012-002*, pp. 1–14, 2012.

[4] G. C. Anupama *et al.*, "Big science in India," *Nat. Rev. Phys.*, Oct. 2021.

[5] S. Chakraborty, "Development of Resistive Plate Chamber (RPC) for CBM Muon Chamber," BOSE INSTITUTE, 2018.

[6] Y. Wang *et al.*, "Production and quality control of STAR-TOF MRPC," *Nucl. Instruments Methods Phys. Res. Sect. A Accel. Spectrometers, Detect. Assoc. Equip.*, vol. 613, no. 2, pp. 200–206, Feb. 2010.

[7] M. Corbetta, R. Guida, B. Mandelli, and G. Rigoletti, "Gas R&D on gas recirculation and recuperation for the Resistive Plate Chamber detectors," *J. Instrum.*, vol. 15, no. 10, 2020.

[8] D. M. Rossi, H. Simon, and R. Collaboration, "A closed-circuit gas recycling system for RPC detectors," *Nucl. Instruments Methods Phys. Res. Sect. A Accel. Spectrometers, Detect. Assoc. Equip.*, vol. 661, pp. S230–S233, 2012.

[9] Y. Pezeshkian, A. Kiyoumarsioskouei, M. Ahmadpouri, and G. Ghorbani, "The gas flow pattern through small size Resistive Plate Chambers with 2 mm gap," *J. Instrum.*, vol. 16, no. 11, p. P11022, Nov. 2021.