

طراحی و ساخت مدار الکترونیکی برای شمارش نرخ ذرات عبوری از آشکارساز صفحه عایق

INC29-1233

مجید احمدپوری^(*)، یوسف پزشکیان

گروه فیزیک، دانشکده علوم پایه، دانشگاه صنعتی سهند، صندوق پستی ۵۱۳۳۵-۱۹۹۶، تبریز، ایران

چکیده:

آشکارساز صفحه عایق، یک آشکارساز گازی است که می‌تواند برای ثبت عبور ذرات و برخی مشخصات آنها از قبیل مکان، زمان و اندازه‌گیری نرخ شمارش، مورد استفاده قرار گیرد. در اینجا مدار الکترونیکی مورد استفاده برای ثبت و اندازه‌گیری نرخ شمارش ذرات عبوری از نمونه‌های مختلف آشکارسازهای ساخته شده در آزمایشگاه دانشگاه صنعتی سهند، ارائه شده است. این مدار شامل قسمت‌های مختلفی از قبیل پیش‌تقویت‌کننده، تقویت‌کننده و ریزکنترل‌گر می‌شود. علامت خروجی از آشکارساز صفحه عایق، توسط این مدار تقویت شده و برای ذخیره‌سازی و تحلیل‌های بعدی، آماده می‌شود. مدار الکترونیکی معرفی شده دارای هزینه ساخت پایینی بوده و به راحتی می‌توان با ایجاد تغییر در ساختار آن، قابلیت‌های آن را شخصی‌سازی نمود. پس از ارزیابی اولیه، مدار ساخته شده با استفاده از یک آشکارساز صفحه عایق با ناحیه فعال $10 \times 10 \text{ cm}^2$ و ضخامت 2 mm مورد آزمایش قرار گرفته و همچنین کارایی آن برای نرخ شمارش‌های تا مرتبه 100 kHz تایید شده است.

کلیدواژه‌ها: آشکارساز صفحه عایق، پیش‌تقویت‌کننده، نرخ شمارش.

Design and fabrication of electronic circuit to count the rate of the particles passing through the Resistive Plate Chambers

Majid Ahmadpouri^(*), Yousef Pezeshkian

Department of Physics, Sahand University of Technology, P.O.BOX: 51335-1996, Tabriz, Iran

Abstract

Resistive plate chamber is a gaseous detector that can be used to record the passage of particles and measure their count rate. Here, the electronic circuit used to measure the particle count rate passing through different samples of detectors made in Sahand University of Technology is presented. This circuit includes parts such as preamplifier, amplifier and microcontroller. The introduced electronic circuit has a low cost and its capabilities can be easily customized by making changes in its structure. The constructed circuit has been tested using resistive plate chamber with an active area of $10 \times 10 \text{ cm}^2$ and a thickness of 2 mm , and its efficiency has been confirmed for counting rates up to 100 kHz .

Keywords: Resistive Plate Chamber (RPC), Preamplifier, Counting Rate.

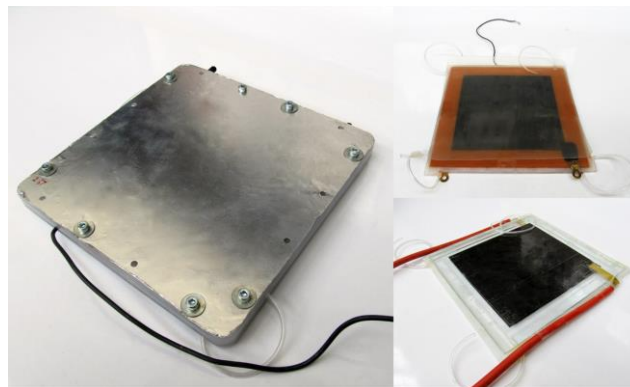
۱. مقدمه

آشکارسازهای صفحه عایق که ابتدا برای استفاده در شتابدهنده‌ها و برخورددهنده‌ها ساخته شده بودند نخستین بار در سال ۱۹۸۱ میلادی توسط سانتونیکو و کاردارلی تحت عنوان شمارنده صفحه عایق معرفی شدند [۱]. بارزترین تفاوت این نوع آشکارسازها، استفاده از صفحات عایق (معمولا شیشه یا باکلیت^۱) به عنوان قسمت اصلی ساختمان داخلی آنهاست. صفحات عایق با مقاومت الکتریکی بالا (از مرتبه 10^9 تا 10^{12} اهم.متر)، باعث می‌شوند که الکترون‌های ناشی از یونیزه شدن گاز، به آند منتقل نشوند و بر روی سطح صفحه عایق جایگزیده شوند. بدین ترتیب آشکارساز می‌تواند به عبور همزمان چندین ذره از مکان‌های مختلف حساس باشد.

از جمله کاربردهای آشکارساز صفحه عایق در حوزه‌های پژوهشی فیزیک ذرات و پرتوهای کیهانی، می‌توان به آزمایش سیمولوله فشرده میونی (CMS)^۲ [۲] و آزمایش اطلس (ATLAS)^۳ [۳] در برخورددهنده بزرگ هادرونی (LHC)^۴ [۲] اشاره کرد. از دیگر کاربردهای آشکارساز صفحه عایق، تصویربرداری میونی است [۴-۵]. علاوه بر این، تلاش‌هایی نیز برای استفاده از این آشکارسازها، در آشکارسازی گاما و ایکس برای تصویربرداری پزشکی و غیر پزشکی صورت گرفته است [۶-۸].

در ایران افراد مختلفی در حوزه آشکارسازهای صفحه عایق فعالیت کرده‌اند که عموماً معطوف به کارهای شبیه‌سازی است [۹-۱۰]. با این حال کارهایی نیز در مورد ساخت و شبیه‌سازی آشکارساز صفحه عایق چندگانه (MRPC)^۵ برای استفاده در دستگاه تصویر برداری پزشکی پت شده است [۱۱].

اولین تلاش‌ها برای ساخت آشکارساز صفحه عایق در آزمایشگاه آشکارسازی دانشگاه صنعتی سهند، در سال ۱۳۹۷، با طراحی و ساخت آشکارسازهایی با صفحات شیشه‌ای صورت گرفت. بعدها برخی مواد دیگر (نظیر باکلیت) نیز برای این منظور، استفاده شد. از آنجایی که شیشه به سهولت در ایران قابل دسترسی است، عمده آشکارسازهای ساخته شده نیز با استفاده از شیشه صورت گرفته است. نمونه‌های مختلفی از آشکارسازهای صفحه عایق با مواد و هندسه‌های مختلف ساخته شده است که چند نمونه از آنها در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل ۱. نمونه‌هایی از آشکارساز صفحه عایق ساخته شده در آزمایشگاه آشکارسازی دانشگاه صنعتی سهند.

نحوه توزیع جریان گاز با توجه به سطح مقطع کوچک ورودی و خروجی گاز و همچنین استفاده از آشکارساز ساخته شده

^۱ Bakelite

^۲ Compressed baryonic matter experiment

^۳ A Toroidal LHC Apparatus

^۴ Large Hadron Collider

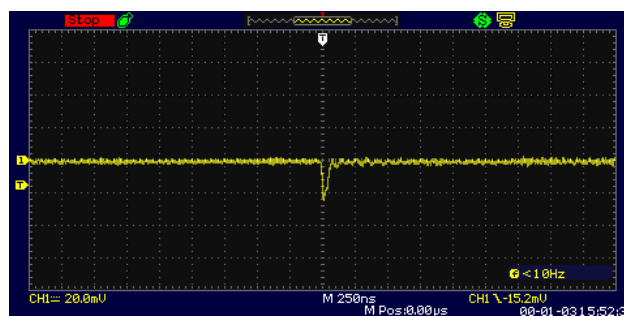
^۵ Multigap Resistive Plate Chamber

جهت اندازه‌گیری نرخ شمارش تابش فرودی نیز بررسی شده است [۱۲-۱۳]. در این مقاله به مرور مدار الکترونیکی استفاده شده برای ثبت داده‌های آشکارسازهای صفحه عایق ساخته شده می‌پردازیم. برای ثبت و تحلیل اندازه‌گیری‌های صورت گرفته، نیاز به مدارهای الکترونیکی مختلفی وجود دارد. علامت‌های تولید شده توسط آشکارسازهای مختلف، با توجه به اینکه چه مشخصاتی دارند، توسط این مدارهای الکترونیکی تقویت، تغییر شکل، تبدیل به داده‌های دیجیتالی و در نهایت ذخیره می‌شوند. بنابراین توجه به ویژگی‌ها علامت تولید شده توسط آشکارساز از یک سو، و خروجی مورد انتظار از سوی دیگر، تعیین کننده نوع مدارهای الکترونیکی به کار رفته خواهد بود. با این وجود، برخی از مدارهای الکترونیکی، معمولاً از عناصر اصلی مراحل پردازش الکترونیکی علامت‌های به وجود آمده هستند، مدارهایی نظیر پیش تقویت کننده، تقویت کننده، تبدیل کننده آنالوگ به دیجیتال، از جمله مهمترین مدارهای رایج برای این منظور هستند.

در برخی از آشکارسازها، نظیر شمارنده گایگر، علامت خروجی با توجه به دامنه و پهنای آن، به راحتی توسط مدارهای الکترونیکی تقویت شده و پردازش می‌شود. در مقابل، در برخی از آشکارسازها، علامت‌های ایجاد شده دارای ارتفاع کمتر و پهنای باریکتری هستند که نیاز به ملاحظات بیشتری در طراحی مدار الکترونیکی وجود دارد. ارتفاع دامنه و پهنای علامت خروجی از آشکارساز صفحه عایق، به ترتیب از مرتبه چند ده میلی‌ولت و چند ده نانوانیبه است. بنابراین ثبت و پردازش این علامت، به صورت مستقیم، نیاز به تجهیزات الکترونیک سریع و پیشرفته‌ای دارد. در صورتی که اقتصادی بودن راهکار مد نظر نباشد، استفاده از مدارهای مجتمع با کاربرد خاص (ASICs) می‌تواند مفید باشد که عموماً هزینه بالایی دارند. تجهیزات گران قیمت، علاوه بر هزینه مالی، در امکان ایجاد تغییرات، متناسب با پروژه‌های مختلف، دارای محدودیت‌هایی هستند. در این بین راهکارهای میانبری مطرح هستند که در کنار کارایی مد نظر، هزینه کمتری نیز دارند. یکی از این راهکارها استفاده از ابزار و قطعات در دسترس^۷ است که الزاماً برای هدف مورد نظر طراحی و ساخته نشده‌اند، ولی با ایجاد تغییراتی می‌توان از آنها استفاده نمود.

۲. روش کار

در اینجا تلاش شده است تا با استفاده از قطعات رایج الکترونیکی، مدار شمارنده برای آشکارساز صفحه عایق، طراحی و ساخته شود. همانطور که در شکل ۲ نشان داده شده است، ارتفاع و پهنای علامت خروجی از آشکارساز صفحه عایق، از مرتبه چند ده میلی‌ولت و چند ده نانوانیبه است.



شکل ۲. نمونه تپ خروجی از آشکارساز صفحه عایق.

در نخستین گام در مدار الکترونیکی، پیش تقویت کننده قرار دارد که وظیفه اصلی آن تقویت اولیه و آماده‌سازی علامت برای پردازش‌های بعدی الکترونیکی است. با توجه به بار الکتریکی جمع‌آوری شده در نوار قرائت، نیاز به استفاده از

^۶ Application-Specific Integrated Circuit

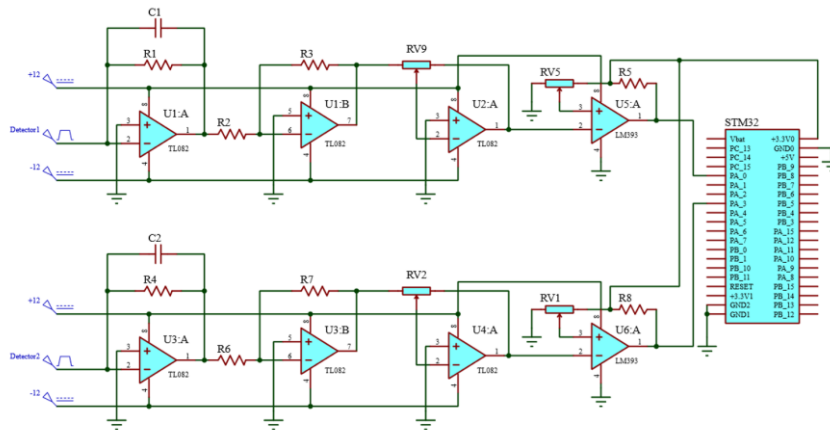
^۷ Commercial off-the-shelf

قطعاتی است که امپدانس ورودی بالایی دارند. تقویت‌کننده‌های عملیاتی مختلفی می‌تواند برای این منظور مورد استفاده قرار گیرد. ویژگی‌های هر یک از آنها در انتخاب قطعه مناسب تعیین کننده است. پهنای باند، امپدانس ورودی، ولتاژ تغذیه، جریان بایاس ورودی و ... از جمله این موارد هستند. تقویت‌کننده‌های عملیاتی نظیر AD8616، OPA2604 و TL082 از نمونه‌های قابل دسترس در داخل کشور هستند که برخی از ویژگی‌های آنها در جدول ۱ ارائه شده است. TL082 قیمت ارزان‌تری دارد و ما در این مدار از آن استفاده کرده‌ایم.

جدول ۱. ویژگی‌های چند تقویت‌کننده عملیاتی مناسب برای استفاده به عنوان پیش‌تقویت‌کننده.

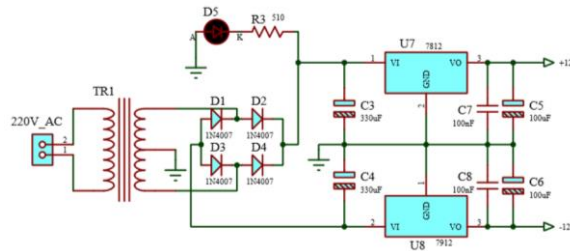
نوع ورودی	ولتاژ تغذیه (V)	جریان بایاس ورودی (pA)	امپدانس ورودی (Ω)	پهنای باند (MHz)	نوع
JFET	۵-۱۵	۵۰	۱۰ ^{۱۲}	۴	TL082
FET	۴-۲۴/۵	۱۰۰	۱۰ ^{۱۲}	۲۰	OPA2604
FastFET	۵-۱۰	۲	۱۰ ^{۱۱}	۱۰۰۰	ADA4817

در گام بعد شکل دهی و تقویت علامت ورودی انجام می‌گیرد که در اینجا نیز برای سهولت و عدم نیاز به قطعات اضافی، از همان آی‌سی TL082 به صورت مدار تقویت‌کننده معکوس کننده، استفاده شده است. در صورتی که به دنبال شمارش رخدادهای آشکارساز باشیم و اطلاعات دیگر علامت مورد نیاز نباشد، می‌توان با قرار دادن یک مرحله دیگر علامت موجود را تبدیل به یک علامت منطقی نمود. مزیت اصلی این کار در یکدست نمودن علامت‌ها به صورت صفر و یک است که در نتیجه‌ی آن، هم قسمت قابل توجهی از نویز موجود کاسته می‌شود و هم اینکه در مرحله بعدی مدار، یعنی ریزکنترل‌گر، شمارش علامت‌ها دقیق‌تر خواهد شد. قطبش علامت بعد از پیش‌تقویت‌کننده مثبت و بعد از تقویت‌کننده دارای قطبش منفی می‌شود. بنابراین در صورتی که از مقایسه‌گری نظیر LM393 استفاده شود، باید دوباره قطبش آن مثبت شود که با استفاده از یک مرحله دیگر TL082 توسط مدار تقویت‌کننده معکوس کننده (با بهره یک)، این کار صورت می‌گیرد. برای شمارش و تبدیل علامت به داده دیجیتال، خانواده ریزکنترل‌گرهای STM32 با توجه به کارایی بالا در کنار اقتصادی بودن، از جمله انتخاب‌های مطلوب می‌توانند باشند، در مدار طراحی شده نیز از STM32F103C8T6 استفاده شده است. در اینجا علامت پردازش شده در قسمت‌های آنالوگ مدار، با استفاده از یکی از پایه‌های وقفه ریزکنترل‌گر، تبدیل به داده‌های قابل ثبت می‌شوند. ریزکنترل‌گر در کنار ثبت و شمارش این علامت‌ها با استفاده از Timer داخلی خود، زمان رخدادها را نیز ثبت می‌نماید. بنابراین می‌توان با داده‌برداری در بازه‌های زمانی مشخص، نرخ شمارش عبور ذرات را مشخص نمود.



شکل ۳. طرحواره مدار اندازه‌گیری نرخ شمارش دو کاناله.

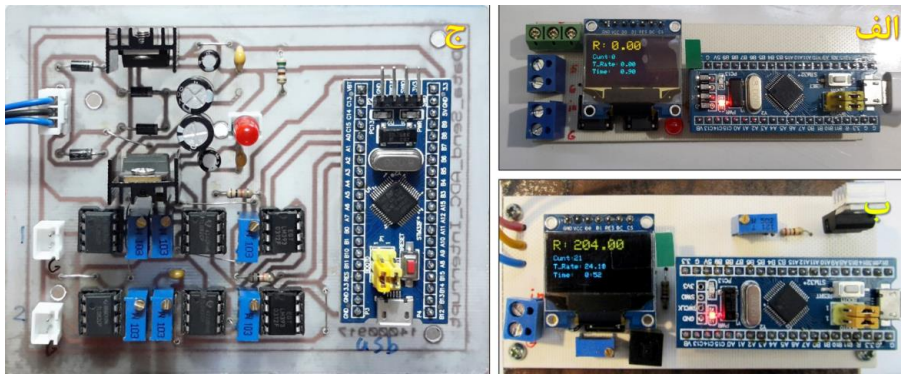
نویز حاصل از منبع تغذیه، یکی از رایج‌ترین نویزهای موجود است که عدم توجه به آن باعث کاهش کارایی مدار خواهد شد. تقویت‌کننده‌های عملیاتی نظیر TL082، نیاز به منبع تغذیه متقارن دارند (به طور مثال مثبت ۱۲ ولت و منفی ۱۲ ولت). برای این منظور از یک ترانسفورماتور متقارن (۲۲۰ به ۱۲) و آی‌سی رگولاتورهای LM7812 (برای مثبت ۱۲ ولت) و LM7912 (برای منفی ۱۲ ولت) مطابق شکل ۴ استفاده شده است.



شکل ۴. طرحواره مدار منبع تغذیه ولتاژ متقارن.

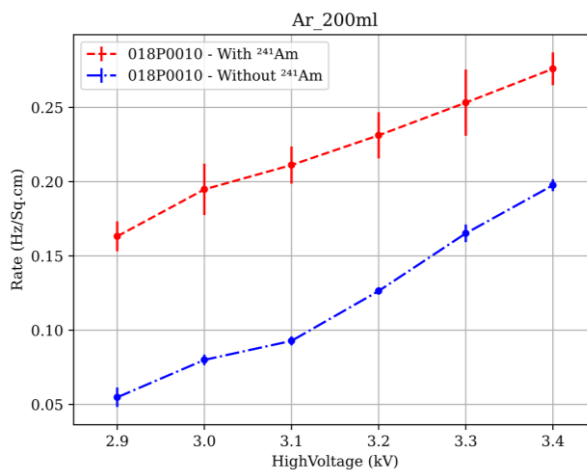
۳. بررسی عملکرد مدار الکترونیکی

مدار الکترونیکی معرفی شده، در چند نمونه ساخته شد. همانطور که در شکل ۵ مشاهده می‌شود، می‌توان با تغییر در قسمت‌های مختلف، امکانات جانبی مدار را مطابق با انتظارات مد نظر، افزایش داد. شکل ۵-الف) اولین نسخه از این مدار است که ضمن دریافت علامت خروجی از آشکارساز صفحه عایق، مقدار نرخ شمارش لحظه‌ای و نرخ شمارش کل را در یک نمایشگر (OLED) نشان می‌دهد. همچنین داده‌های ثبت شده قابلیت ارسال از طریق درگاه USB را نیز دارند. شکل ۵-ب) دومین نسخه این مدار است که علاوه بر رفع برخی عیوب جزئی در طراحی مدار، تغذیه مورد نیاز ریزکنترل‌گر، با استفاده از یک رگولاتور ولتاژ ۵ ولت (LM7805)، از طریق منبع تغذیه شکل ۴ تامین می‌شود. این ویژگی باعث می‌شود تا مدار برای کار کردن، نیاز به تغذیه از طریق درگاه USB نداشته باشد و صرفاً از یک منبع تغذیه استفاده می‌شود. شکل ۵-ج) نسخه بهبود یافته‌ای است که همزمان قابلیت دریافت علامت خروجی دو آشکارساز صفحه عایق را دارد. همچنین برای افزایش سرعت پردازش، قسمت محاسباتی از کد ریزکنترل‌گر حذف شده است و داده‌ها صرفاً به صورت آنالوگ تقویت شده و تبدیل به دیجیتال می‌شوند و از طریق درگاه USB به رایانه انتقال داده می‌شوند. علاوه بر افزایش سرعت پردازش که منجر به اندازه‌گیری نرخ شمارش بیشتر می‌شود، امکان ثبت داده‌های بیشتر برای تحلیل بهتر داده‌ها نیز فراهم می‌شود.



شکل ۵. مدارهای الکترونیکی ساخته شده. الف) شمارنده با قابلیت نمایش نرخ شمارش کل و نرخ شمارش لحظه‌ای به همراه نمایشگر و ارسال داده‌ها از طریق درگاه USB، ب) شمارنده با قابلیت نمایش نرخ شمارش کل و نرخ شمارش لحظه‌ای به همراه نمایشگر و بازو، ج) شمارنده با قابلیت اندازه‌گیری نرخ شمارش برای ۲ آشکارساز و ارسال داده‌ها از طریق درگاه USB.

برای بررسی عملکرد مدار ساخته شده در اندازه‌گیری نرخ شمارش، از یک function generator برای تولید علامت‌های اولیه استفاده شد. نتایج بدست آمده نشان می‌دهد که مدار ساخته شده در نرخ شمارش‌های پایین‌تر از ۱۰۰ kHz، قابل استفاده است. همچنین مدار ساخته شده برای داده برداری آشکارسازهای ساخته شده در آزمایشگاه، مورد ارزیابی قرار گرفت. شکل ۶ نتایج داده برداری را برای آشکارساز صفحه عایق تک گاف با ناحیه فعال $10 \times 10 \text{ cm}^2$ و پهنای گاف mm ۲ نمایش می‌دهد. آزمایش برای حالتی که آشکارساز در حضور چشمه ^{241}Am قرار گرفته است، دارای نرخ شمارش بیشتری در مقایسه با حالتی است که آشکارساز بدون حضور چشمه کار می‌کند.



شکل ۶. منحنی نرخ شمارش بدون حضور چشمه ^{241}Am (خط نقطه) و در حضور چشمه ^{241}Am (خط چین) برای ولتاژهای اعمالی مختلف.

۴. نتیجه‌گیری

در این مقاله به بررسی مدار ساخته شده برای اندازه‌گیری نرخ شمارش آشکارساز صفحه عایق پرداختیم و نشان داده شد که مدار ساخته شده در ثبت و پردازش خروجی آشکارساز به خوبی کار می‌کند. سادگی و کم هزینه بودن این مدار باعث می‌شود که به راحتی آن را شخصی سازی کرد. از جمله کارهای بعدی مد نظر ارتقا این مدار با افزودن برخی تصحیحات در رابطه با کاهش نویز و همچنین استفاده از ریزکنترل‌گر آن به عنوان تبدیل کننده آنالوگ به دیجیتال (ADC) است.

توانایی مدار برای ثبت همزمان علامت خروجی از چند آشکارساز و یا چندین نوار قرائت، استفاده از آن را برای پردازش‌های پیچیده‌تر فراهم می‌کند که تصویربرداری با استفاده از آشکارسازهای ساخته شده از جمله این اهداف می‌تواند باشد.

۵. مراجع

- [1] R. Santonico and R. Cardarelli, "Development of resistive plate counters," *Nucl. Instruments Methods*, vol. 187, no. 2–3, pp. 377–380, Aug. 1981, doi: 10.1016/0029-554X(81)90363-3.
- [2] S. Vanheule, "Design of a glass resistive plate chamber for the upgrade of the Compact Muon Solenoid muon system," Gent, 2013.
- [3] G. Chiodini, "ATLAS RPC time-of-flight performance," in *Proceedings of XI Workshop on Resistive Plate Chambers and Related Detectors — PoS(RPC2012)*, Dec. 2012, vol. 2012-Febru, p. 007. doi: 10.22323/1.159.0007.
- [4] E. Preziosi *et al.*, "TECNOMUSE: A novel, RPC-based, muon tomography scanner for the control of container terminals," *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 1548, no. 1, 2020, doi: 10.1088/1742-6596/1548/1/012021.
- [5] R. Sehgal, M. S. Mitra, T. Roy, S. T. Sehgal, L. M. Pant, and B. K. Nayak, "Voxelization based PoCA point cloud filtration algorithm for image reconstruction for Muon Tomography," *J. Instrum.*, vol. 15, no. 09, pp. P09012–P09012, Sep. 2020, doi: 10.1088/1748-0221/15/09/P09012.
- [6] M. Abbrescia, V. Peskov, and P. Fonte, *Resistive Gaseous Detectors*, vol. 53, no. 9. Weinheim, Germany: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2018. doi: 10.1002/9783527698691.
- [7] M. Nizam, B. Satyanarayana, R. R. Shinde, and G. Majumder, "Study of Multi-gap Resistive Plate Chambers (MRPCs) as a Potential Candidate for Development of a PET Device," 2021, pp. 1125–1128. doi: 10.1007/978-981-33-4408-2_167.
- [8] Y. Wang and Y. Yu, "Multigap Resistive Plate Chambers for Time of Flight Applications," *Appl. Sci.*, vol. 11, no. 1, p. 111, Dec. 2020, doi: 10.3390/app11010111.
- [9] A. Moshaii, L. Khosravi Khorashad, M. Eskandari, and S. Hosseini, "RPC simulation in avalanche and streamer modes using transport equations for electrons and ions," *Nucl. Instruments Methods Phys. Res. Sect. A Accel. Spectrometers, Detect. Assoc. Equip.*, vol. 661, no. SUPPL. 1, pp. S168–S171, Jan. 2012, doi: 10.1016/j.nima.2010.09.133.
- [10] K. Doroud, A. Moshaii, Y. Pezeshkian, J. Rahighi, and H. Afarideh, "Simulation of temperature dependence of RPC operation," *Nucl. Instruments Methods Phys. Res. Sect. A Accel. Spectrometers, Detect. Assoc. Equip.*, vol. 602, no. 3, pp. 723–726, May 2009, doi: 10.1016/j.nima.2008.12.099.
- [11] B. Sharifi and S. Saramad, "Investigation of a prototype double-stack MRPC detector with 20 gas gaps for Time-Of-Flight measurement in PET imaging systems," *J. Instrum.*, vol. 15, no. 2, pp. P02015–P02015, Feb. 2020, doi: 10.1088/1748-0221/15/02/P02015.
- [12] Y. Pezeshkian and M. Ahmadpouri, "Evaluating the Performance of a Resistive Plate Chamber by Measurement of the Detector's Count Rate," *Iran. J. Appl. Phys.*, vol. 11, no. 4, pp. 38–56, 2021, doi: 10.22051/ijap.2021.37470.1233.
- [13] 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, doi: 10.1088/1748-0221/16/11/P11022.