

<p><b>Research Paper</b></p>
------------------------------

# Evaluating the Performance of a Resistive Plate Chamber by Measurement of the Detector's Count Rate<sup>1</sup>

Yousef Pezeshkian <sup>\*2</sup> and Majid Ahmadpouri<sup>3</sup>

Received: 2021.08.28

Revised: 2021.11.07

Accepted: 2021.12.10

## Abstract

Resistive plate chamber (RPC) is a gaseous particle detector primarily developed for particle physics experiments and found vast applications in industry. We have constructed a prototype of a single gap glass RPC, with gap width of 2 mm. For simplicity, this prototype has a single  $10 \times 10 \text{ cm}^2$  Al pad to readout the detector's signals. An electronic board is designed and built at our laboratory to receive, amplify and register pulses as counts per unit time at the computer. In this study, we have used the count rate (noise) as an indicator of the detector's performance. We observed that the count rate reduced in the presence of Fe shields above the detector, due to the absorption of particles related to the cosmic rays. We also studied the sensitivity of the detector to the 60 keV gammas of the Am source. Although an increase in the count rate in the presence of the  $^{241}\text{Am}$  source is evident, the efficiency of the detector to 60 keV gammas is very small. All of the measurements are performed at several high voltages between 1 kV and 3 kV.

**Keyword:** *Resistive Plate Chamber (RPC), Gaseous Detector, Cosmic Muons, Americium Source.*

---

<sup>1</sup> DOI: 10.22051/ijap.2021.37470.1233

<sup>2</sup> Assistant Professor, Physics department, Sahand University of Technology, Tabriz, Iran. (Corresponding Author). Email: pezeshkian@sut.ac.ir

<sup>3</sup> PhD Student, Physics department, Sahand University of Technology, Tabriz, Iran. Email: majidahmadpouri@gmail.com



## بررسی عملکرد یک آشکارساز صفحه عایق با اندازه گیری نرخ

### شمارش<sup>۱</sup>

یوسف پزشکیان\*<sup>۲</sup> و مجید احمدپوری<sup>۳</sup>

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۶/۰۶

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۰/۰۸/۱۶

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۹/۱۹

فصلنامه علمی فیزیک کاربردی ایران

دانشکده فیزیک شیمی، دانشگاه الزهرا

سال یازدهم، پیاپی ۲۷، زمستان ۱۴۰۰

صص ۳۸-۵۶

#### چکیده:

آشکارساز صفحه عایق یک آشکارساز ذرات گازی برای استفاده در آزمایش‌های فیزیک ذرات است و امروزه کاربردهای متنوع آن در صنعت قابل مشاهده است. نمونه‌ای از آشکارساز صفحه عایق تک‌گاف با پهنای گاف  $2\text{mm}$  از ورقه‌های شیشه‌ای ساخته شده است. در این آشکارساز برای سادگی تنها از یک ورقه مربعی آلومینیومی  $10 \times 10\text{ cm}^2$  برای دریافت علامت استفاده شد. یک مدار الکترونیکی در آزمایشگاه طراحی و ساخته شده که بتواند علامت تولید شده در آشکارساز را دریافت، تقویت و در قالب تعداد رخدادها در واحد زمان (نوفه) در رایانه ثبت نماید. در این مطالعه از نرخ شمارش ذرات برای بررسی عملکرد آشکارساز استفاده نموده و نشان داده‌ایم که با افزودن لایه‌های محافظ آهنی بر بالای آشکارساز بخشی از ذرات مرتبط با پرتوهای کیهانی حذف می‌شوند و میزان نرخ شمارش کاهش می‌یابد. همچنین حساسیت آشکارساز به فوتون‌های  $60\text{ keV}$  مربوط به چشمه امرسیوم بررسی شد. با وجود مشاهده افزایش نرخ شمارش در حضور چشمه، کارایی آشکارساز برای مشاهده گاما‌های  $60\text{ keV}$  بسیار پایین است. تمام اندازه‌گیری‌ها در چندین ولتاژ بالای اعمالی در ناحیه ۱ تا  $3\text{ kV}$  تکرار شده‌اند.

**واژگان کلیدی:** آشکارساز صفحه عایق، آشکارساز گازی، میون کیهانی، چشمه امرسیوم.

<sup>۱</sup> DOI: 10.22051/ijap.2021.37470.1233

<sup>۲</sup> استادیار، گروه فیزیک، دانشگاه صنعتی سهند، تبریز، ایران. (نویسنده مسئول) Email: pezeskhian@sut.ac.ir

<sup>۳</sup> دانشجوی دکترا، گروه فیزیک، دانشگاه صنعتی سهند، تبریز، ایران. Email: majidahmadpouri@gmail.com

## ۱. مقدمه

آشکارساز صفحه عایق (RPC) در سال ۱۹۸۱ م. توسط دو دانشمند ایتالیایی با نام‌های ساتونیکو و کاردارللی به عنوان شمارنده صفحه عایق<sup>۲</sup> معرفی شد [۱]. عملکرد آشکارساز صفحه عایق، همانند سایر آشکارسازهای گازی، مبتنی بر یونیزاسیون گاز در اثر عبور ذره ورودی است. الکترون‌ها در میدان الکتریکی محفظه شتاب می‌گیرند و با مولکول‌های گاز برخورد می‌کنند و یونیزاسیون‌های دوم و سوم و مانند آن به افزایش تعداد الکترون‌ها (و البته یون‌ها) منجر می‌شود. نوآوری این آشکارساز در استفاده از صفحات عایق بود که چون سدی در برابر ارتباط مستقیم آند و کاتد با گاز می‌باشند. مقاومت بالای صفحه عایق باعث می‌شود که الکترون‌های ایجاد شده در اثر یونیزاسیون، به آند منتقل نشده و بر روی سطح صفحه عایق جایگزیده شوند. بدین ترتیب آشکارساز می‌تواند به عبور همزمان چندین ذره از مکان‌های مختلف حساس باشد. ساده‌ترین و متداول‌ترین آشکارساز صفحه عایق نوع تک‌گافه (با پهنای گاف ۲ mm) است که ساختار آن در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل ۱ ساختار یک آشکارساز صفحه عایق تک‌گافه.

آشکارسازهای صفحه عایق در ابتدا برای استفاده در شتاب‌دهنده‌ها و برخورد دهنده‌ها ساخته و در آزمایش‌های بهمن‌های گسترده هوایی<sup>۳</sup> برای رصد پرتوهای کیهانی به کار گرفته شدند. از مهمترین آزمایش‌های مربوط به برخورد دهنده‌ها که هنوز هم فعال هستند می‌توان به آزمایش سیم‌لوله فشرده میونی<sup>۴</sup> [۲] و آزمایش اطلس<sup>۵</sup> [۳] در برخورد دهنده بزرگ هادرونی<sup>۶</sup> [۲] اشاره کرد. در این

<sup>1</sup> Resistive Plate Chamber

<sup>2</sup> Resistive Plate Counter

<sup>3</sup> Extensive Air Shower (EAS) experiments

<sup>4</sup> Compact Muon Solenoid (CMS)

<sup>5</sup> A Toroidal LHC Apparatus (ATLAS)

<sup>6</sup> Large Hadron Collider (LHC)

آزمایش‌ها از آشکارساز صفحه‌عایق به عنوان سیستم راه‌انداز میونی استفاده می‌شود. آزمایش پوشش پلستکس<sup>۱</sup> در انگلستان [۴] و آزمایش ARGO/YBJ در چین [۵] پیشروان استفاده از آشکارسازهای صفحه‌عایق در آزمایش‌های بهمن‌های گسترده هوایی بودند. آزمایش رویدادهای با انرژی فوق‌العاده زیاد<sup>۲</sup> از آشکارساز صفحه‌عایق چندگانه برای ردیابی میون‌های کیهانی استفاده می‌کند [۶-۷]. در رصدخانه نوترینوی هند<sup>۳</sup> [۸]، آزمایش ماده باریونی فشرده<sup>۴</sup> [۹] و ده‌ها آزمایش دیگر آشکارسازهای صفحه‌عایق به عنوان مهم‌ترین بخش دستگاه شناخته می‌شوند.

استفاده از آشکارسازهای صفحه‌عایق به حوزه‌های پژوهشی فیزیک ذرات و پرتوهای کیهانی محدود نماند و خیلی زود بررسی استفاده از این آشکارساز برای مقاصد کاربردی و به صورت ویژه تصویربرداری شروع شد. یکی از حوزه‌های بسیار فعال، تصویربرداری میونی<sup>۵</sup> با استفاده از این آشکارسازها است که در سال‌های گذشته مورد توجه قرار گرفته است [۱۱-۱۰]. در تصویربرداری میونی، می‌توان از میون‌های مربوط به پرتوهای کیهانی در اکتشاف معدن، جستجوی ساختارهای داخلی (بناهای تاریخی مثل اهرام ثلاثه)، یافتن نقص در سازه‌های بتنی و مانند آن استفاده نمود. تلاش‌هایی برای استفاده از این آشکارسازها، در آشکارسازی گاما و ایکس برای تصویربرداری پزشکی و غیر پزشکی نیز در جریان است. برخی از پروژه‌ها مثل ساخت دستگاه ماموگرافی مبتنی بر آشکارسازهای صفحه‌عایق به نتیجه رسیده و تجاری سازی شده است [۱۲]. در تصویر برداری به روش گسیل پوزیترون (پت)<sup>۶</sup> همچنان شاهد رقابت گروه‌های مختلف می‌باشیم، اگرچه ساخت آن با استفاده از آشکارسازهای صفحه‌عایق وارد فاز صنعتی نشده است [۱۴-۱۳].

برای آگاهی از جزئیات بیشتر در مورد فیزیک، روش عملکرد، تاریخچه و کاربردهای این آشکارساز به کتاب «آشکارسازهای گازی عایق؛ طراحی، عملکرد و دورنما»، نوشته ابرشیا و همکارانش مراجعه شود [۱۲]. در این کتاب آخرین دستاوردهای مرتبط با این آشکارساز تا سال ۲۰۱۸ م. گردآوری شده است.

با وجود پژوهش‌های مختلف در حوزه آشکارسازی در ایران، فناوری ساخت آشکارسازها در کشور بومی نشده است. آشکارسازهای سیلیکونی و حالت جامد یا آشکارسازهای سوسوزن و تکثیرکننده نوری فناوری‌های پیچیده و پرهزینه‌ای دارند که شاید سرمایه‌گذاری برای ساخت آن‌ها صرفه

<sup>1</sup> COVER\_PLASTEX

<sup>2</sup> Extreme Energy Events (EEE)

<sup>3</sup> Indian Neutrino Experiment (INO)

<sup>4</sup> Compressed baryonic matter experiment (CBM)

<sup>5</sup> Muon tomography

<sup>6</sup> Positron Emission Tomography (PET)



اقتصادی برای کشور نداشته باشد. اما ساختار نسبتاً ساده، هزینه ساخت پایین و دقت فضایی و زمانی بالای آشکارساز صفحه عایق در مقایسه با سایر آشکارسازهای ذرات، آن را به یک گزینه مناسب برای سرمایه‌گذاری تبدیل می‌کند. از این رو، ساخت این آشکارساز و انجام آزمایش‌هایی که نشان دهنده عملکرد صحیح آن باشند، می‌تواند یک دستاورد به شمار آید.

تاریخچه مطالعه بر روی این آشکارساز در ایران به کارهای شبیه‌سازی انجام گرفته توسط دکتر مشاعی و همکارانش برمی‌گردد [۱۶-۱۵]. همچنین در چندسال گذشته آقایان شریفی و دکتر سرآمد اقدام به ساخت و شبیه‌سازی آشکارساز صفحه عایق چندگانه برای استفاده در پت نموده‌اند [۱۷]. بیش از سه سال از شروع مطالعه بر روی این نوع آشکارسازها در آزمایشگاه آشکارسازی حاضر در دانشگاه صنعتی سهند گذشته و تا کنون چندین نمونه از آن‌ها ساخته شده است [۱۸].

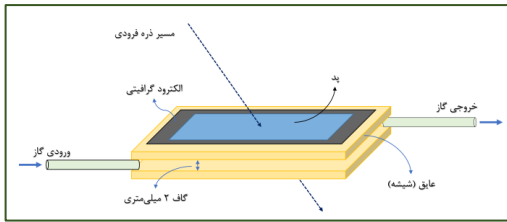
هدف از ارائه این مقاله شرح چگونگی طراحی نمونه ساخته شده و معرفی مدار الکترونیکی به کار رفته برای تقویت علامت‌ها (سیگنال‌ها) و ثبت رخدادها، می‌باشد. همچنین آزمایش‌های نشان‌دهنده توانایی آشکارساز در ثبت عبور ذرات بیان خواهند شد. روش استاندارد برای اندازه‌گیری بازده آشکارسازهای صفحه عایق استفاده از تلسکوپ میونی<sup>۱</sup> است. با توجه به در دسترس نبودن ابزار و قطعات مورد نیاز برای انجام آزمایش تلسکوپ میونی، از روش جایگزین برای تایید کارکرد آشکارساز استفاده نموده‌ایم که در ادامه به شرح آن خواهیم پرداخت.

## ۲. مشخصات نمونه ساخته شده و چیدمان آزمایش

تصویر آشکارساز ساخته شده و جزئیات اجزای آن در شکل ۱ نشان داده شده است. آشکارساز شامل دو صفحه شیشه‌ای با ضخامت ۲ میلی‌متر، گاف ۲ میلی‌متری، الکترودهای گرافیتی و یک ورقه مربعی<sup>۲</sup> از جنس آلومینیوم با ابعاد ۱۰ در ۱۰ سانتی‌متر مربع برای دریافت و ثبت علامت می‌باشد. این آشکارساز در واقع تنها یک پیکسل دارد. می‌توان با افزایش تعداد ورقه‌های مربعی یا استفاده از نوارهای موازی<sup>۳</sup> مکان عبور ذره را نیز با دقت بالاتری مشخص کرد.

<sup>۱</sup> در تلسکوپ میونی آشکارساز مورد مطالعه را بین دو آشکارساز دیگر ساندویچ می‌کنند و با مدار الکترونیکی مناسب (به روش همزمانی coincidence) بازده آشکارساز را به صورت نسبت رخدادهایی که هر سه آشکارساز مشاهده کرده‌اند به رخدادهایی که فقط آشکارسازهای بالا و پایین مشاهده کرده‌اند، به دست می‌آورند.

<sup>۲</sup> pad  
<sup>۳</sup> strips



(ب)

(الف)

شکل ۲ (الف) تصویر آشکارساز صفحه عایق ساخته شده در دانشگاه صنعتی سهند (ب) شماتیکی از اجزای آشکارساز.

ساخت چند نمونه ناموفق در ابتدای کار آزمایشگاه آشکارسازی، نشان دهنده اهمیت توجه به جزئیات است و لازم است در مورد تک تک اجزا و المان‌های دستگاه ملاحظات ویژه‌ای شود. به این دلیل، ساخت نمونه‌های بعدی با بررسی منابع مختلف و انجام آزمایش‌های گسترده همراه بوده است. البته فرآیند بهبود ساخت و عملکرد یک دستگاه هیچگاه متوقف نمی‌شود و همواره می‌توان با انجام تغییرات مناسب در جنس مواد، نحوه اتصال آن‌ها، تغییر طراحی و غیره نمونه بهتری ساخت. روش انتخاب صفحه عایق، تنظیم ولتاژ اعمالی به الکتروودها، انتخاب گاز و تنظیم شار گاز ورودی به محفظه و طراحی و ساخت مدار الکترونیکی را جداگانه شرح می‌دهیم.

### الف. صفحات عایق

برای ساخت آشکارساز صفحه عایق معمولاً از صفحاتی از جنس باکلیت<sup>۱</sup>، شیشه و به ندرت از ورقه‌هایی از جنس سرامیک [۱۹] استفاده می‌شود. دو ویژگی تاثیر گذار صفحه عایق در عملکرد آشکارساز، مقاومت حجمی<sup>۲</sup> (ویژه) و میزان زبری یا صافی<sup>۳</sup> سطح می‌باشد. مقاومت حجمی تاثیر قابل توجهی در تحمل آهنگ برخورد آشکارساز داشته و بسته به نیاز مقادیری بین  $10^7 \Omega m$  و  $10^8 \Omega m$  یا بین  $10^{10} \Omega m$  و  $10^{12} \Omega m$  می‌تواند داشته باشد [۲۰-۲۱]. همچنین، ناهمواری‌های سطح صفحه عایق نیز سبب افزایش میدان الکتریکی در برخی قسمت‌های گاف آشکارساز شده که منجر به افزایش تخلیه خودبه‌خودی می‌گردد [۲۲].

<sup>1</sup> Bakelite

<sup>2</sup> Bulk resistivity

<sup>3</sup> Surface roughness



بر پایه بررسی های ما، ورقه های از جنس باکلیت در داخل کشور تولید نمی شوند. بنابراین نمونه های اولیه از ورقه هایی از جنس شیشه و شیشه پلکسی<sup>۱</sup> ساخته شدند. ورقه های شیشه پلکسی به خاطر استحکام و سهولت ماشین کاری می توانست گزینه مناسبی باشد، اما در نمونه های ساخته شده با آن ها هیچ گونه علامت معناداری مشاهده نشد. برای بررسی دقیق تر اقدام به اندازه گیری مقاومت حجمی این ورقه ها به روشی مشابه آنچه که در [۲۳] توضیح داده شده است، نمودیم. مقاومت حجمی شیشه به کار رفته حدود  $10^{10} \Omega m$  به دست آمد. چیدمانی که در آزمایشگاه طراحی و ساخته بودیم، قادر بود مقاومت را تا  $10^{12} \Omega m$  اندازه گیری کند. مقاومت شیشه پلکسی بیشتر از مقداری بود که ما بتوانیم با چیدمان موجود آن را اندازه بگیریم. بنابراین شیشه پلکسی برای آشکارساز صفحه عایق گزینه مناسبی نبود و نمونه مورد مطالعه در این مقاله از شیشه ساخته شد.

پس از جستجوهای بیشتر متوجه شدیم که جنس فیبرهای مدار چاپی<sup>۲</sup> شباهت زیادی به باکلیت دارد. اما اشکالی که وجود دارد، این است که سطح فیبرها ناهمواری زیادی داشته و چه بسا نوفه زیادی ایجاد کنند. شاید بتوان با برخی اصلاحات بر روی سطح مثل لایه نشانی سیلیکونی [۲۴] مشکل فیبر مدار چاپی را حل کرد. مطالعه و بررسی فیبر مدار چاپی در دستور کار ما قرار دارد، اگرچه هنوز نتیجه قابل ملاحظه ای به دست نیامده است.

## ب. انتخاب گاز و تنظیم شار ورودی

ترکیب گاز متداول برای آشکارسازهای صفحه عایق برای اینکه در مد بهمینی<sup>۳</sup> کار کنند R134A (۹۵٪/۲)، iso-butane (۴٪/۵) و SF<sub>6</sub> (۰٪/۳) می باشد [۲۵]. ما به دو منظور در این مطالعه از گاز آرگون (Ar) استفاده کرده ایم. دلیل اول، گاز آرگون در مقایسه با R134، یا ترکیب های دارای گازهای فرونشان (نظیر ایزوبوتان) می تواند در ولتاژهای کمتر علامت قابل آشکارسازی ایجاد کند که نیازمند الکترونیک ساده تری برای تقویت و آشکارسازی است [۲۶] و [۱۲]. دلیل دوم آن است که برای تعیین میزان SF<sub>6</sub> ۰٪/۳ در ترکیب گاز، لازم است از حسگرهای جریان<sup>۴</sup> بسیار دقیقی استفاده شود که بتواند شار بسیار پایین این گاز را اندازه گیری نماید. درحالی که سیستم ترکیب گازی که در آزمایشگاه ساخته ایم قادر به اندازه گیری شارهای خیلی پایین نمی باشد. بنابراین گاز آرگون یک گزینه مناسب برای مرحله ساخت و آزمایش آشکارساز می باشد.

<sup>1</sup> Plexiglass

<sup>2</sup> Printable Circuit Board (PCB)

<sup>3</sup> Avalanche mode

<sup>4</sup> Flow meter

گاز آرگون وارد محفظه‌ای می‌شود که دارای چهار درگاه، ورود گاز، خروج گاز، درگاه اندازه‌گیری فشار و درگاه مسدود می‌باشد. گاز در داخل محفظه با شار ۲۰۰ میلی‌لیتر بر دقیقه جریان دارد و فشار داخل محفظه از مرتبه ۱۵۰ پاسکال بالاتر از فشار اتمسفر تنظیم می‌شود. مقدار فشار با استفاده از حسگر فشار BOSCH BMP280 اندازه‌گیری می‌شود. اختلاف فشار به منظور ممانعت از ورود هوا به داخل محفظه اعمال می‌شود تا از حضور گاز آرگون در همه فضای داخلی محفظه اطمینان حاصل شود. مطالعه مجزایی برای درک بهتر جریان گاز در داخل محفظه انجام گرفته است که نتایج آن در [۲۷] منتشر شده است.

### پ. تنظیم ولتاژ بالا

ولتاژ کاری آشکارسازهای صفحه‌عایق به نوع گاز مورد استفاده بستگی دارد. ضریب تقویت گازهای مختلف متفاوت است. می‌توان ضریب تقویت گازها و در نتیجه ولتاژ کاری آشکارساز را با استفاده از نرم‌افزارهای مناسب محاسبه نمود. فرآیند تکثیر الکترون‌ها در حضور میدان الکتریکی در داخل گاز توسط نظریه تاونسند<sup>۱</sup> تشریح می‌شود. اگر شدت میدان و پهنای گاف زیاد باشد، اثر بار فضایی منجر به متوقف شدن فرآیند تکثیر خواهد شد. اثر بار فضایی می‌گوید که اگر تعداد الکترون‌های بهمین از یک حدی بیشتر شود، میدان حاصل از الکترون‌ها و یون‌ها با میدان اعمالی خارجی قابل مقایسه شده و فرآیند تکثیر متوقف خواهد شد [۱۲].

پیش از محاسبه محدوده ولتاژ کاری آشکارساز برای گاز آرگون، بایست تقویت<sup>۲</sup> آشکارساز را به صورت تابعی از میدان الکتریکی به دست آورد. بیشینه تعداد متوسط الکترون‌های بهمین را تقویت می‌نامند و با رابطه‌ی زیر محاسبه می‌شود:

$$n = e^{(\alpha - \eta)x} \quad (1)$$

$\alpha$  ضریب تکثیر،  $\eta$  ضریب جذب و  $x$  پهنای گاف آشکارساز را نشان می‌دهد. ضرایب جذب و تکثیر تابعی از میدان الکتریکی هستند.

در یک محفظه با پهنای گاف ۲mm، بسته به شدت میدان الکتریکی وقتی تعداد الکترون‌ها به حدود  $10^5$  الی  $10^7$  برسد، اثر بار فضایی ظاهر خواهد شد [۲۸]. عدد  $10^5$  برای گازی مثل آرگون است که تقویت آن بالاست و قبل از اینکه ولتاژ به ۴ kV برسد، تعداد الکترون‌های بهمین از  $10^5$  بیشتر می‌شود (شکل ۳) و میدان الکتریکی حاصل از  $10^5$  الکترون با میدان اعمالی خارجی برابری و رقابت می‌کند و در نتیجه اثر بار فضایی ظاهر می‌شود. در مقابل، در مورد ترکیب گاز استاندارد که

<sup>1</sup> Townsend

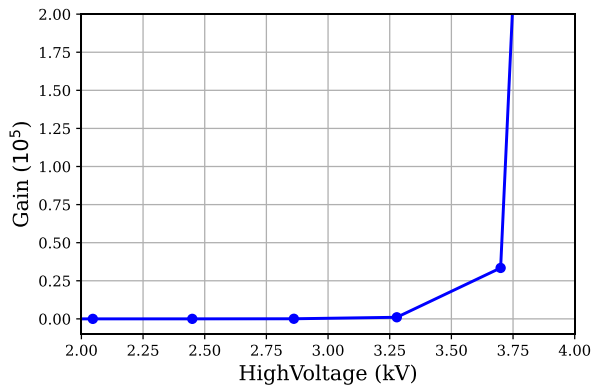
<sup>2</sup> gain





تقویت آنها ضعیف تر است و وقتی تعداد الکترون‌ها به حدود  $10^7$  برسد، میدان‌ها قابل مقایسه خواهند شد.

ضرایب جذب و تکثیر انواع گازها را می‌توان با استفاده از نرم افزار گارفیلد++ [۲۹] محاسبه کرد. با استفاده از ضرایب جذب و تکثیر گاز آرگون که در [۳۰] محاسبه شده، تقویت آشکارساز صفحه عایق با پهنای گاف ۲ میلی‌متر را برای گاز آرگون در ولتاژهای مختلف محاسبه و در شکل ۳ رسم نموده‌ایم.



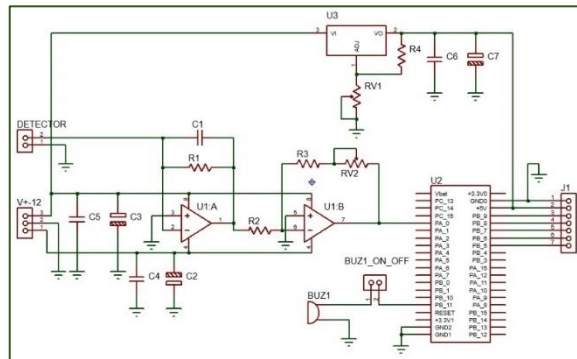
شکل ۳ تقویت بر حسب ولتاژ.

با توجه به شکل ۳، در ولتاژهای بالاتر از ۴ kV تقویت از حد آستانه اشباع (اثر بار فضایی) عبور خواهد کرد. از آنجایی که ما در این آزمایش از آرگون خالص استفاده می‌کنیم و از گازهای فرونشاندنده و جاذب فوتون‌های فرابنفش استفاده نکرده‌ایم، خود را به ولتاژهای بین ۲ kV تا ۳ kV محدود کرده‌ایم، تا شاهد افزایش بیش از حد تخلیه‌های ناخواسته و میزان نوفه نباشیم. برای اعمال ولتاژ از منبع تغذیه مستقیم (DC) ۱۰kV با قابلیت تنظیم ولتاژ ساخت شرکت PHYWE، استفاده کرده‌ایم. آزمایش‌هایی هم که در آزمایشگاه با گاز R134 و آرگون انجام شده، نشان می‌دهند که برای گاز R134 در ولتاژهایی از مرتبه ۱۰kV علامت‌ها در اسیلوسکوپ ظاهر می‌شوند، درحالی که برای گاز آرگون از ولتاژهای بالاتر از ۲kV علامت داریم.

### ت. مدار الکترونیکی

برای شمارش تعداد ذرات عبوری از آشکارساز، از یک مدار تقویت کننده که در آزمایشگاه طراحی شده بود استفاده کرده‌ایم. این مدار شامل بخش‌های مختلفی از جمله: پیش تقویت کننده،

تقویت کننده، ریز کنترل گر و نمایشگر می‌باشد. برای درک بهتر روش کار مدار الکترونیکی در نظر بگیرید که با عبور ذره یونیزان از ناحیه فعال آشکارساز، یک یا چندین بهمن الکترونی به وجود می‌آید. در اثر حرکت الکترون‌های یک بهمن به سمت آند و بزرگ شدن بهمن، بار الکتریکی متغیر با زمان بر روی صفحه قرائت (پد) القا می‌شود. این بار القا شده بر روی پد، توسط پیش تقویت کننده‌ی حساس به بار<sup>۱</sup> جمع‌آوری و در قسمت بعدی مدار تقویت می‌شود. پس از تبدیل بار القا شده به علامت قابل ثبت، قسمت منطقی مدار الکترونیکی با محاسبه تعداد علامت تولید شده در واحد زمان، کار شمارش را انجام می‌دهد. با توجه به اینکه نرخ شمارش از مرتبه بالا نیست، می‌توان از ریز کنترل گرهایی<sup>۲</sup> با فرکانس کاری پایین‌تر استفاده نمود. در اینجا ریز کنترل گر استفاده شده از سری STM32F103 است. بدین ترتیب علامت اولیه‌ی تولید شده به وسیله آشکارساز پس از تقویت و ارسال به ریز کنترل گر، ضمن جداسازی از نوفه‌های احتمالی، به صورت تعداد در واحد زمان (نرخ شمارش) از طریق پورت USB برای ثبت به رایانه فرستاده می‌شود. این مدار تعداد علامت‌ها در واحد زمان را با بسامد ۵ ثانیه در بازه زمانی قابل تنظیم ۵ دقیقه اندازه‌گیری می‌کند و مقادیر اندازه‌گیری شده به رایانه منتقل می‌شوند. در واقع یک برنامه مبتنی بر زبان جاوا به عنوان واسط بین مدار الکترونیکی و رایانه عمل می‌کند و متناسب با الگوریتم ارسالی داده‌ها به رایانه، در محیط سیستم عامل ویندوز، داده‌های ثبت شده به صورت فایل متنی با پسوند CSV ذخیره می‌شوند. همزمان یک نمایشگر نیز بر روی مدار قرار گرفته است که نرخ شمارش را نشان می‌دهد.

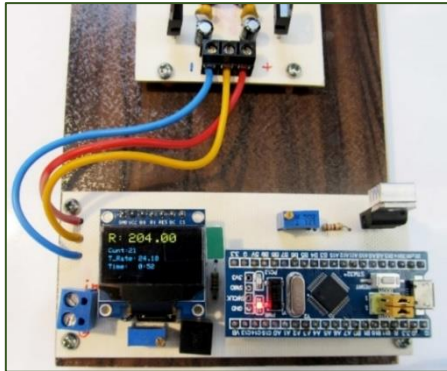


(الف)

<sup>1</sup> Charge-sensitive amplifier

<sup>2</sup> Microcontroller





(ب)

شکل ۴ (الف) شماتیک مدار الکترونیکی (ب) تصویر مدار الکترونیکی ساخته شده.

### ۳. روش بررسی عملکرد آشکارساز

روش ارزیابی عملکرد آشکارسازها با توجه به نوع آشکارساز متفاوت است. در برخی از آشکارسازها که برای طیف‌سنجی و اندازه‌گیری انرژی ذرات به کار می‌روند (گرماسنج‌ها<sup>۱</sup>)، استفاده از چشمه‌های هسته‌ای امری متداول است. در گرماسنجی معمولاً انرژی ذرات ورودی اندک است و سیستم آشکارساز به قدری چگال است که ذره تمام انرژی خود را در آشکارساز به جا می‌گذارد، یا اینکه مقدار انرژی به جا مانده با انرژی کل ذره متناسب است. اما برای آشکارسازهای ذرات با انرژی‌های زیاد و سطح مقطع برخورد پایین استفاده از چشمه‌های هسته‌ای خیلی کارآمد نمی‌باشد. مثلاً در آشکارسازهای صفحه‌عایق تک‌گافه، علامت (پالس) تولید شده متناسب با مقدار بار به وجود آمده در بین الکترودها نیست [۱۲] و [۳۱]، از طرفی هم مقدار  $dE/dx$  در این نوع ساختار کم است، بنابراین برای طیف‌سنجی مناسب نبوده و بیشتر مثل یک شمارنده عمل می‌کنند. به همین دلیل است که عملکرد و بازده آشکارسازهای صفحه‌عایق را با استفاده از تلسکوپ میونی ارزیابی می‌کنند. ناتوانی در دسترسی به تجهیزات مورد نیاز برای آزمایش تلسکوپ میونی، منجر به استفاده ما از روشی دیگر برای تایید امکان آشکارسازی ذرات با آشکارساز شده است.

اگر نرخ شمارش آشکارساز (تعداد شمارش در واحد زمان)  $R_{count}$  باشد. در بدترین حالت اگر آشکارساز به عبور ذرات حساس نباشد و در عین حال مشاهده شود که شمارش صورت می‌گیرد، تمام رخدادهای ثبت شده رخداد تقلبی<sup>۲</sup> یا نوفه خواهند بود. در یک آشکارساز متداول، نرخ

<sup>1</sup> Calorimeters

<sup>2</sup> fake

شمارش ترکیبی از رخدادهای واقعی (ثبت ذرات عبوری) و رخدادهای تقلبی است ( $R_{count} = R_{real} + R_{fake}$ ). حتی در بهترین آشکارسازها هم نمی‌توان میزان رخدادهای تقلبی را به صفر رساند. حال اگر نرخ ذرات عبوری را بدانیم ( $R_{inci.}$ )، و بتوانیم رخدادهای واقعی ( $R_{real}$ ) و تقلبی ( $R_{fake}$ ) را از هم جداسازی کنیم، بازده آشکارساز را می‌توان محاسبه نمود:

$$\varepsilon = \frac{R_{real}}{R_{inci.}} \quad (2)$$

این کاری است که یک تلسکوپ میونی انجام می‌دهد. حال فرض کنید که بتوانیم تعداد ذرات عبوری ( $R_{inci.}$ ) را کاهش (یا افزایش) بدهیم، اگر نرخ شمارش کاهش (یا افزایش) پیدا نکند، یعنی آشکارساز درست کار نکرده و آنچه که شمارش می‌شود رخدادهای تقلبی (برای نمونه: ناشی از تخلیه خودبه‌خودی) هستند.

**کاهش نرخ شمارش:** اگر هیچ چشمه‌ی هسته‌ای در مجاورت آشکارساز نباشد و در محیط اطراف نیز موادی که تابش دارند وجود نداشته باشد، تنها ذراتی که از آشکارساز عبور می‌کنند همان ذرات مرتبط با پرتوهای کیهانی هستند. تعداد این ذرات را در آزمایشگاه نمی‌توان افزایش داد ولی افزودن لایه‌های جاذب در بالای آشکارساز می‌تواند باعث جذب بخشی از ذرات مربوط به پرتوهای کیهانی شود. ذرات حاصل از پرتوهای کیهانی با لایه‌های محافظ برهم‌کنش می‌کنند و انرژی خود را از دست می‌دهند. در نتیجه تعداد ذراتی که وارد آشکارساز می‌شوند، کاهش می‌یابد. به طور معمول تعداد رخدادهای مرتبط با پرتوهای کیهانی حدود ۱ مرتبه بزرگی کمتر از میزان رخدادهای تقلبی (نوفه) می‌باشد [۳۲]. بدین ترتیب با افزودن لایه‌های محافظ به میزان کافی، نرخ شمارش می‌تواند از مرتبه ۱۰٪ یا بیشتر کاهش داشته باشد. برای بررسی این مورد، نرخ شمارش را در ولتاژهای مختلف بدون حضور حفاظ و با قرار دادن ۴/۵ mm آهن بر بالای آشکارساز اندازه‌گیری می‌کنیم.

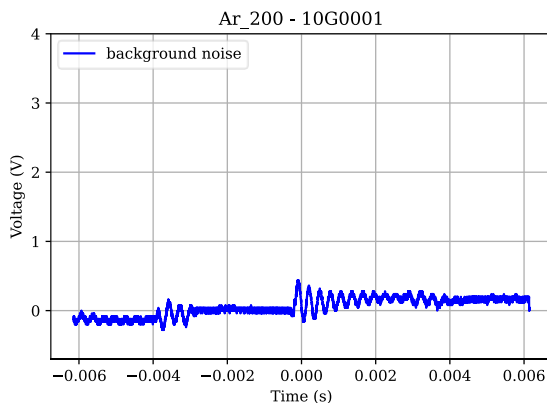
**افزایش نرخ شمارش:** ذرات عبوری از آشکارساز را می‌توان با قرار دادن چشمه هسته‌ای مناسب در مجاورت آشکارساز افزایش داد. اگر ذرات چشمه بتوانند وارد ناحیه حساس آشکارساز شوند و یونش ایجاد کنند، نرخ شمارش باید تغییر کند. برای این منظور از چشمه  $^{241}\text{Am}$  موجود در حسگرهای دود استفاده کرده‌ایم. این چشمه دارای نیمه عمر طولانی ۴۳۲ سال، و گامای گسیلی ۶۰ keV می‌باشد. ابتدا با شبیه‌سازی MCNP بررسی می‌کنیم که آیا بخشی از فوتون‌های گسیلی از  $^{241}\text{Am}$  وارد ناحیه فعال آشکارساز می‌شوند یا خیر؟ و سپس تغییرات نرخ شمارش را در مجاورت این چشمه بررسی می‌کنیم.



## ۴. نتایج

### الف. انجام تنظیمات الکترونیک و اندازه گیری نرخ شمارش پایه

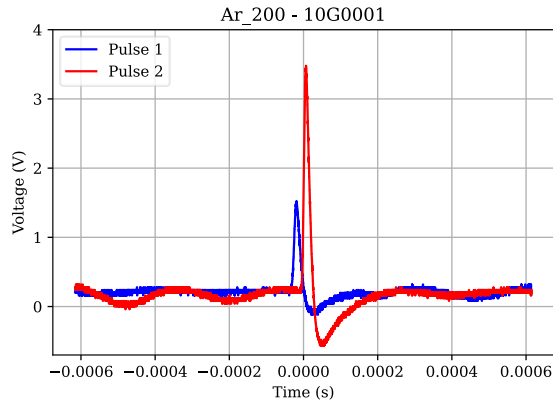
ولتاژ آستانه (ولتاژی که اگر ارتفاع علامت بیشتر از آن باشد، مدار آن را شمارش خواهد کرد) در مدار الکترونیکی با توجه به خروجی اسیلوسکوپ تنظیم می شود. اگر خروجی پد آشکارساز را با یک مقاومت ۵۰ اهمی، به زمین وصل کنیم با مشاهده اختلاف پتانسیل دو سر مقاومت با اسیلوسکوپ، نوفه پیوسته ای وجود دارد که مربوط به منبع تغذیه و سایر المان های الکترونیکی می باشد. ولتاژ آستانه را باید بالاتر از ارتفاع این نوفه پیوسته تنظیم کنیم به صورتی که نوفه در شمارش ها ثبت نشود. از طرف دیگر ولتاژ باید آنقدر پایین باشد که کوچکترین علامت های مربوط به عبور ذره را حذف نکند و مانع از ثبت آنها نشود. در شکل ۵، تصویری از داده های اسیلوسکوپ را نشان می دهد که سطح نوفه پیوسته را پس از بخش تقویت کننده مدار نشان می دهد. اندازه نوفه ها از مرتبه  $400\text{ mV}$  هستند. برای این حالت مقدار ولتاژ آستانه برای جداسازی نوفه پیوسته از نوفه گسسته یا علامت ولتاژ را روی  $1/5\text{ V}$  تنظیم کرده ایم.



شکل ۵ سطح نوفه پیوسته آشکارساز (پس از بخش تقویت کننده مدار) که در اسیلوسکوپ مشاهده می شود.

برای انتقال اطلاعات به رایانه و بررسی عملکرد آشکارساز، علامت های که از مقدار آستانه تعریف شده بیشتر باشند در بخش منطقی مدار الکترونیکی ذخیره می شوند. علامت هایی را که پس از عبور از مدار تقویت کننده و اعمال فیلتر ولتاژ آستانه در اسیلوسکوپ مشاهده می شوند، در واقع می توان نوفه گسسته یا نرخ شمارش پایه آشکارساز به شمار آورد که به کمک مدار الکترونیک شمارش می شود. نمونه علامت های مشاهده شده در اسیلوسکوپ در شکل ۶ مشاهده می شود. نرخ شمارش پایه یک آشکارساز به ولتاژ اعمالی، پهنای گاف، ترکیب گاز، جنس و ویژگی های سطح عایق و

شرایط محیطی وابسته است. در مطالعه‌ای که توسط کالمانی و همکارانش انجام شده [۲۵]، برای ترکیب گاز متداول و در ولتاژ ۹/۹ kV نرخ شمارش پایه چیزی از مرتبه  $0.24 \text{ Hz/cm}^2$  به دست آمده است. جانگ و همکارانش با آشکارساز و گاز متفاوت نرخ شمارش پایه را در مرتبه  $\text{Hz/cm}^2$  ۰/۲-۰/۳ گزارش نموده‌اند [۳۲].



شکل ۶ نمونه علامت‌های مشاهده شده در اسیلوسکوپ.

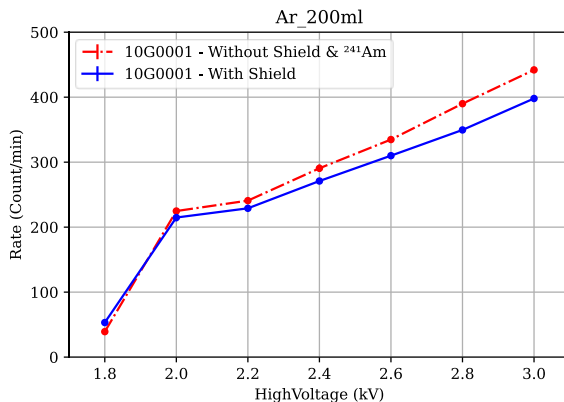
مقدار نرخ شمارش پایه آشکارساز ما در ولتاژ ۳ kV، حدود  $0.07 \text{ Hz/cm}^2$  به دست می‌آید. مقدار پایین نوفه به خاطر این است که ما آشکارساز را در ولتاژهای پایین به کار گرفته‌ایم و در ولتاژ ۴ kV، سطح نوفه ما با مقدار ارائه شده توسط گروه‌های دیگر قابل مقایسه خواهد بود.

### ب. نرخ شمارش پس از قرار دادن حفاظ آهنی بر روی آشکارساز

اگر نرخ شمارش پایه را با نرخ شمارش در حالتی که لایه‌هایی از جنس آهن<sup>۱</sup> بر روی آشکارساز اضافه کرده‌ایم مقایسه کنیم، کاهش نرخ شمارش میزان جذب ذرات پرتوهای کیهانی را نشان خواهد داد. نرخ شمارش را در هفت ولتاژ مختلف بین ۱/۸ kV و ۳ kV اندازه‌گیری کرده‌ایم. مدت زمان ثبت اطلاعات ۵ دقیقه بوده و متوسط و انحراف معیار متوسط نرخ رخدادهای، با متوسط گیری از تعداد رخدادهای هر دقیقه به دست آمده است (۵ تا شمارش یک دقیقه‌ای).

<sup>۱</sup> از ورقه‌های آهنی به خاطر در دسترس بودن استفاده شده است.





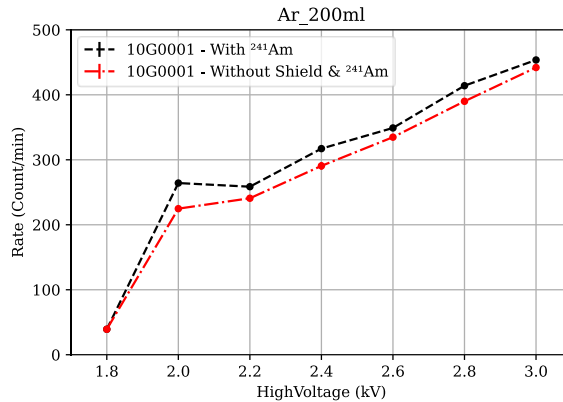
شکل ۷ نرخ شمارش برای حالت بدون حفاظ (خط-نقطه) و حالت با حفاظ (توپر).

منحنی خط چین در شکل ۷ نرخ شمارش پایه (بدون قرار دادن حفاظ و بدون قرار دادن چشمه) را نشان می‌دهد و منحنی توپر نرخ شمارش را پس از افزودن حفاظ نمایش می‌دهد. در ولتاژهای پایین‌تر از  $1/8 \text{ kV}$  تقریباً هیچ رخدادی رصد نمی‌شود. با افزایش ولتاژ هم رخدادهای واقعی حاصل از عبور ذرات و هم رخدادهای ناخواسته مربوط به تخلیه خودبه‌خودی افزایش می‌یابد. هر دو افزایش در شکل ۷ قابل مشاهده است. در ولتاژهای پایین‌تر از  $2/2 \text{ kV}$ ، افزودن حفاظ آهنی تغییر قابل توجهی در تعداد رخدادهای ایجاد نمی‌کند. از ولتاژ  $2/2 \text{ kV}$  به بعد، فاصله بین نرخ رخدادهای زمانی که از حفاظ استفاده می‌کنیم شروع به افزایش می‌کند. در ولتاژ  $2/8 \text{ kV}$  نرخ رخدادهای افزودن حفاظ از  $390$  به  $348$  در دقیقه می‌رسد، یعنی افزودن حفاظ آهنی باعث می‌شود در حدود  $42$  رخداد کمتر در هر دقیقه داشته باشیم. کاهش رخدادهای از مرتبه  $10\%$  است که با آنچه که در مقاله [۳۲] درباره نسبت رخدادهای مرتبط با پرتوهای کیهانی به کل شمارش‌ها مطرح شده است، همخوانی دارد.

### پ. نرخ شمارش در حضور چشمه <sup>241</sup>Am

برای اینکه ببینیم چه تعداد فوتون وارد ناحیه حساس آشکارساز خواهد شد، با استفاده از شبیه‌سازی MCNP شار فوتون‌های عبوری از شیشه به ازای یک فوتون گسیلی از چشمه محاسبه شده است. برای این منظور چشمه نقطه‌ای فوتون با انرژی  $60 \text{ keV}$  در بالای شیشه قرار داده شد. سپس شار بدست آمده در احتمال گسیل این گاما از چشمه <sup>241</sup>Am و مقدار پرتوزایی چشمه ضرب شده است. طبق محاسبات انجام شده حدود  $3995$  فوتون در هر ثانیه از لایه شیشه‌ای عبور می‌کنند و وارد محفظه

می‌شوند. در آزمایش، با قرار دادن ۲ تا چشمه  $^{241}\text{Am}$  که از حسگرهای دود جدا شده بودند بر روی آشکارساز، نرخ ذرات را در ولتاژهای مختلف ثبت کرده‌ایم. شکل ۸ مقادیر به دست آمده را در هفت ولتاژ مختلف نشان می‌دهد.



شکل ۸ نرخ شمارش برای حالت بدون حضور چشمه (خط-نقطه) و حالت با حضور چشمه امرسیوم (خط چین).

همان‌گونه که در شکل ۸ مشاهده می‌شود، نرخ رخدادهای ثبت شده در حضور چشمه امرسیوم افزایش یافته است. اگر اختلاف تعداد رخدادهای با حضور و بدون حضور چشمه (یعنی  $22/4$  تا در دقیقه) را با  $2 \times 3995$  فوتونی که در هر ثانیه وارد آشکارساز می‌شوند مقایسه کنیم، می‌توانیم تخمینی از بازده آشکارساز در مقابل ذرات گامای  $60 \text{ keV}$  را داشته باشیم.

$$\varepsilon = \frac{22.4 \times 100}{2 \times 3995 \times 60} = 0.005\% \quad (2)$$

مشاهده می‌شود که حساسیت آشکارساز به فوتون‌های  $60 \text{ keV}$  بسیار پایین است.

با مراجعه به مراجع دیگر نمی‌توان حساسیت آشکارسازهای صفحه‌عایق به فوتون‌هایی با انرژی  $60 \text{ keV}$  را مشاهده و با نتایج موجود مقایسه نمود. اما تلاش‌های صورت گرفته برای به کارگیری آشکارسازهای صفحه‌عایق در دستگاه‌های تصویربرداری پزشکی پت باعث شده که حساسیت آن‌ها نسبت به فوتون‌های  $511 \text{ keV}$  را مورد بررسی قرار دهند. بلانکو و همکارانش بازده کوانتومی را برای فوتون‌های  $511 \text{ keV}$  برای آشکارساز خود  $0.044\%$  به دست آورده‌اند [۳۳]. همچنین در [۳۴] نشان دادند که بازده آشکارساز بسیار به جنس اجزای آشکارساز و طراحی آن و نیز انرژی فوتون‌ها بستگی داشته و در انرژی‌های کمتر از  $100 \text{ keV}$ ، بازده کمتر از  $0.1\%$  می‌باشد. از آنجایی که آشکارساز ساخته شده در دانشگاه صنعتی سهند ساختار بسیار ساده‌ای دارد و برای آشکارسازی





فوتون‌ها طراحی و ساخته نشده است، به نظر می‌رسد عدد به دست آمده نامربوط نمی‌باشد. اما نیاز به بررسی‌های دقیق‌تر هست.

## ۵. بحث و نتیجه‌گیری

آشکارساز ساخته شده در دانشگاه صنعتی سهند، قادر است عبور ذرات را ثبت کند. کاهش میزان نوفه پس از قرار دادن لایه‌های محافظ در بالای آشکارساز به وضوح مشاهده می‌شود. مطالعه دقیق‌تر عملکرد آشکارساز نیاز به آزمایش تلسکوپ میونی دارد که در دستور کار ما قرار گرفته است. در صورتی که بازده آشکارسازهای صفحه عایق بالا باشد، یکی از کاربردهای بی‌درنگ آن می‌تواند استفاده در آرایه البرز-۱ در کنار آشکارسازهای سوسوزن [۳۵] باشد. تغییر نرخ شمارش در حضور چشمه گاما این نوید را به ما می‌دهد که با انجام برخی اصلاحات در ساخت آشکارساز می‌توان میزان بازده را افزایش داد. البته برای آشکارسازی فوتون‌ها لازم است به سراغ RPCهای چندگافی برویم. بهینه‌سازی آشکارسازهای صفحه عایق به منظور آشکارسازی فوتون‌های گاما یا ایکس می‌تواند مقدمه‌ای برای تصویربرداری صنعتی و پزشکی به شمار آید.

برای بهبود عملکرد آشکارساز ساخته شده، لازم است از صفحات با جنس باکلیت استفاده شود. آسان‌ترین راه‌حل، خرید این صفحات از دیگر کشورها است. اگرچه در صورت تمایل به بومی کردن این فناوری، همکاری با افراد مجرب در علم مواد ضرورت دارد. مساله مهم دیگر لزوم بهبود الکترونیک آشکارساز است؛ به صورتی که میزان نوفه پیوسته آشکارساز کاهش یابد تا بتوانیم شاهد کاهش ولتاژ آستانه شمارش باشیم و علامت‌های ضعیف‌تر را نیز ثبت کنیم.

## ۶. تقدیر و تشکر

لازم می‌دانیم از آقای قاسم قربانی که از ابتدای فعالیت‌های آزمایشگاه همراه ما بوده‌اند و کمک‌های شایانی به ما در ساخت آشکارساز داشته‌اند، قدردانی کنیم. همچنین از آقای دکتر قره‌شعبانی که امکان استفاده از تجهیزات موجود در آزمایشگاه پلاسما را فراهم کردند سپاسگزاریم. در پایان قدردان زحمات خانم دکتر محمدی که شبیه‌سازی MCNP مربوط به عبور فوتون‌ها از ورقه‌ی شیشه‌ای را انجام دادند و همچنین راهنمایی‌های ایشان در نگارش مقاله هستیم. همچنین از داوران مقاله تشکر می‌کنیم که نظراتشان منجر به انسجام و نظم بیشتر مقاله شده است.

- [1] Santonico R, Cardarelli R., "Development of resistive plate counters," Nucl. Instruments Methods Phys. Res., vol. 187, no. 2-3, pp. 377-380, 1981.
- [2] Vanheule S., "Design of a glass resistive plate chamber for the upgrade of the Compact Muon Solenoid muon system," Gent, 2013.
- [3] Chiodini G, Orlando N, Spagnolo S., "ATLAS RPC time-of-flight performance," Cern. Geneva Cern, 2012.
- [4] Agnetta GA, et al., "Use of RPC in EAS physics with the COVER\_PLASTEX experiment," Nucl. Instruments Methods Phys. Res. Sect. A Accel. Spectrometers, Detect. Assoc. Equip., vol. 381, no. 1, pp. 64-72, 1996.
- [5] Aielli G, et al., "Layout and performance of RPCs used in the Argo-YBJ experiment," Nucl. Instruments Methods Phys. Res. Sect. A Accel. Spectrometers, Detect. Assoc. Equip., vol. 562, no. 1, pp. 92-96, 2006, doi: 10.1016/j.nima.2006.02.136.
- [6] Pinto C, Abbrescia M, Avanzini C, Baldini L, Baldini R., "Monitoring the long term stability of civil buildings through the MRPC telescopes of the EEE Project Monitoring the long term stability of civil buildings through the MRPC telescopes of the EEE Project," 2020, doi: 10.1088/1742-6596/1561/1/012019.
- [7] Abbrescia M, et al., "The EEE MRPC telescopes as tracking tools to monitor building stability with cosmic muons," J. Instrum., vol. 14, no. 06, pp. P06035-P06035, 2019, doi: 10.1088/1748-0221/14/06/p06035.
- [8] Anupama GC, et al., "Big science in India," Nat. Rev. Phys., Oct. 2021, doi: 10.1038/s42254-021-00384-5.
- [9] Chakraborty S, "Development of Resistive Plate Chamber (RPC) for CBM Muon Chamber," BOSE INSTITUTE, 2018.
- [10] Sehgal R, Mitra MS, Roy T, Sehgal ST, Pant LM, Nayak BK., "Voxelization based PoCA point cloud filtration algorithm for image reconstruction for Muon Tomography," J. Instrum., vol. 15, no. 09, pp. P09012-P09012, 2020, doi: 10.1088/1748-0221/15/09/p09012.
- [11] Preziosi E, et al., "TECNOMUSE: a novel, RPC-based, muon tomography scanner for the control of container terminals," J. Phys. Conf. Ser., vol. 1548, p. 12021, 2020, doi: 10.1088/1742-6596/1548/1/012021.
- [12] Abbrescia M, Peskov V, Fonte P, Resistive gaseous detectors: designs, performance, and perspectives. John Wiley & Sons, 2018.
- [13] Wang Y, Yu Y, "Multigap Resistive Plate Chambers for Time of Flight Applications," Appl. Sci., vol. 11, no. 1, p. 111, Dec. 2020, doi: 10.3390/app11010111.
- [14] Nizam M, Satyanarayana B, Shinde RR, Majumder G, "Study of Multi-gap Resistive Plate Chambers (MRPCs) as a Potential Candidate for Development of a PET Device," 2021, pp. 1125-1128.
- [15] Doroud K, Moshaii A, Pezeshkian Y, Rahighi J, Afarideh H, "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, 2009, doi: 10.1016/j.nima.2008.12.099.
- [16] Moshaii A, Khorashad LK, Eskandari M, Hosseini S, "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, pp. S168-S171, 2012.
- [17] Sharifi B, Saramad S., "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. 02, pp. P02015-P02015, Feb. 2020, doi: 10.1088/1748-0221/15/02/P02015.



- [18] Khosrozadeh M, Pezeshkian Y, Ashkani M, Ghorbani G, "Constructing a Prototype of Single Gap Resistive Plate Chamber in Sahand University of Technology," in 9th Conference on Particle Physics and Fields, pp. 15–18, 2019, (in Persian).
- [19] Naumann L, Kotte R, Stach D, Wüstenfeld J, "Ceramics high rate timing RPC," Nucl. Instruments Methods Phys. Res. Sect. A Accel. Spectrometers, Detect. Assoc. Equip., vol. 628, no. 1, pp. 138–141, 2011.
- [20] Morales M, Pecharrómán C, Mata-Osoro G, Díaz LA, Garzón JA, "Aging and conductivity of electrodes for high rate tRPCs from an ion conductivity approach," Proc. Sci., vol. 2012-Febru, 2012.
- [21] Raveendrababu K, Behera PK, Satyanarayana B, "Effect of electrical properties of glass electrodes on the performance of RPC detectors for the INO-ICAL experiment," J. Instrum., vol. 11, no. 08, pp. P08024–P08024, 2016, doi: 10.1088/1748-0221/11/08/p08024.
- [22] Lu C, "RPC electrode material study," Nucl. Instruments Methods Phys. Res. Sect. A Accel. Spectrometers, Detect. Assoc. Equip., vol. 602, no. 3, pp. 761–765, 2009.
- [23] Meghna KK, et al., "Measurement of electrical properties of electrode materials for the bakelite Resistive Plate Chambers," J. Instrum., vol. 7, no. 10, p. P10003, 2012.
- [24] Biswas S, et al., "Performances of silicone coated high resistive bakeliteRPC," Nucl. Instruments Methods Phys. Res. Sect. A Accel. Spectrometers, Detect. Assoc. Equip., vol. 661, pp. S94–S97, 2012.
- [25] Kalmani S, et al., "Preliminary results on optimization of gas flow rate for RPCs," in XI workshop on Resistive Plate Chambers and Related Detectors (RPC2012), 2012, vol. 2012-Febru, pp. 1–7, doi: 10.22323/1.159.0027.
- [26] Capeans M, Guida R, Mandelli B, "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, [Online]. Available: [https://ph-dep-dt-old.web.cern.ch/Documents/Posters/PosterRPC\\_MandelliB.pdf](https://ph-dep-dt-old.web.cern.ch/Documents/Posters/PosterRPC_MandelliB.pdf).
- [27] Pezeshkian Y, Kiyoumarsioskouei A, Ahmadpouri M, Ghorbani G, "The gas flow pattern through small size Resistive Plate Chambers with 2 mm gap," J. Instrum., vol. 16, no. 11, p. P11022, Nov. 2021.
- [28] Riegler W, Lippmann C, Veenhof R, "Detector physics and simulation of resistive plate chambers," Nucl. Instruments Methods Phys. Res. Sect. A Accel. Spectrometers, Detect. Assoc. Equip., vol. 500, no. 1–3, pp. 144–162, 2003.
- [29] Schindler H, "Garfield++ User Guide (Version 2019.6)," 2019. <https://garfieldpp.web.cern.ch/garfieldpp/documentation/UserGuide.pdf>.
- [30] Tourani MA, Jahanbakhsh O, Pezeshkian Y, "Evaluation of Transport Parameters of Ar and CO<sub>2</sub> Gas Mixture Using Garfield++ Code," 8th National Conference on Physics, 2017 (in Persian).
- [31] Abbrescia M, Peskov V, Fonte P, Resistive Gaseous Detectors, vol. 53, no. 9. Weinheim, Germany: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2018.
- [32] Zhang Q, et al., "Environmental dependence of the performance of resistive plate chambers," J. Instrum., vol. 5, no. 2, 2010, doi: 10.1088/1748-0221/5/02/P02007.
- [33] A. Blanco et al., "Perspectives for positron emission tomography with RPCs," Nucl. Instruments Methods Phys. Res. Sect. A Accel. Spectrometers, Detect. Assoc. Equip., vol. 508, no. 1–2, pp. 88–93, 2003.
- [34] Blanco A, et al., "Efficiency of RPC detectors for whole-body human TOF-PET," Nucl. Instruments Methods Phys. Res. Sect. A Accel. Spectrometers, Detect. Assoc. Equip., vol. 602, no. 3, pp. 780–783, 2009.
- [35] Pezeshkian Y, Bahmanabadi M, Abbasian Motlagh M, Rezaie M, "Scintillation detectors of Alborz-I experiment," Nucl. Instruments Methods Phys. Res. Sect. A Accel. Spectrometers, Detect. Assoc. Equip., vol. 773, 2015, doi: 10.1016/j.nima.2014.11.015.
- [36] Gonzalez-Diaz D, Sharma A, "Challenges for resistive gaseous detectors towards RPC2014," J. Instrum., vol. 8, no. 02, p. T02001, 2013.

[37] Crosetto DB, "A modular VME or IBM PC based data acquisition system for multi-modality PET/CT scanners of different sizes and detector types," in Nuclear Science Symposium Conference Record, 2000 IEEE, 2000, vol. 2, pp. 12/78-12/97 vol. 2.

© 2020 Alzahra University, Tehran, Iran. This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0 license) (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).

