



انجمن حفاظت در برابر اشعه ایران



مجله سنجش و ایمنی پرتو، جلد ۸، شماره ۴، ویژه‌نامه پرتوهای یون‌ساز، ۱۳۹۹، صفحه ۳۱۹-۳۲۶

پنجمین کنفرانس ملی سنجش و ایمنی پرتوهای یون‌ساز و غیر یون‌ساز (مهرماه ۱۳۹۷)

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۷/۰۶/۰۱، تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۷/۰۷/۰۱

## طراحی نرم‌افزاری برای شبیه‌سازی عملکرد آشکارسازهای گازی به روش مونت کارلو به زبان برنامه‌نویسی C++

مهسا نوری اصل و محمد حمدی‌پور\*

گروه فیزیک، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران.

\*اردبیل، دانشگاه محقق اردبیلی، گروه فیزیک، کدپستی: ۵۶۱۹۹۱۱۳۶۷

پست الکترونیکی: hamdipour@uma.ac.ir

### چکیده

در این مقاله ما یک آشکارساز گازی را در نظر گرفته‌ایم و فرض کرده‌ایم به خاطر عبور پرتو یون‌ساز یک الکترون در آن ایجاد گردد، با شبیه‌سازی عددی سیستم با در نظر گرفتن برخوردها و ایجاد الکترون‌های ثانوی مسیر حرکت الکترون اولیه و الکترون‌های ثانوی را با مفهوم روش مونت کارلو بدست آورده‌ایم. وابستگی تعداد الکترون‌های ثانوی ایجاد شده به ولتاژ الکترونیکی اعمالی و همچنین فشار گاز داخل آشکارساز بررسی شده است، نهایتاً وابستگی تعداد الکترون‌های ثانوی ایجاد شده به تعداد الکترون‌های اولیه ناشی برخورد پرتو یونیزان (که آنرا به عنوان معیاری از انرژی پرتو فرودی در نظر گرفته‌ایم) را مطالعه کرده‌ایم که با استفاده از آن سعی کرده‌ایم امکان‌سنجی طیف‌نگاری با این آشکارسازها را بررسی کنیم.

**کلیدواژگان:** آشکارساز گازی، تکثیر الکترونی گازی، آشکارساز تناسبی، آشکارساز گایگر-مولر، یونش.

### ۱. مقدمه

دمای T با معادله‌ی زیر که به معادله ساها معروف است داده می‌شود [۵]:

$$\frac{n_i}{n_n} = 2.4 \times 10^{21} \frac{T^{\frac{3}{2}}}{n_i} e^{-\frac{U_i}{KT}} \quad (1)$$

اما این کسر یونیزاسیون برای هوا در دمای معمولی حدود  $10^{-122}$  است، بنابراین می‌توان انتظار داشت که در دماهای عادی، که معمولاً آشکارسازها در آن دماها قرار دارند، یونش گرمایی تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر انتقال بار در گازها نداشته

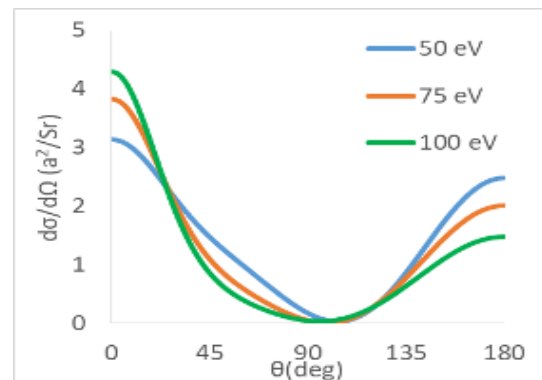
مطالعه‌ی اصول کار آشکارسازهای گازی از چندین دهه‌ی پیش شروع شده و تاکنون ادامه دارد [۱-۴]. در این مقاله به عواملی که بر روی عملکرد آشکارسازهای گازی تأثیر می‌گذارند می‌پردازیم. آشکارسازهای گازی بر اساس عبور جریان الکترونیسته از گاز عمل می‌کنند. گازها در دمای صفر کلوین عایق کامل هستند زیرا هیچ‌گونه الکترون و یون مثبت یا منفی در آنها وجود ندارد، ولی با افزایش دما انرژی گرمایی اتم‌ها می‌تواند باعث یونیزاسیون گرمایی شود که مقدار این یونش در

یون‌ها بسیار کم است در آشکارسازهای تناسبی و گایگر مولر تعداد این یون‌ها و الکترون‌ها به مقدار زیادی تقویت می‌گردد. اما عواملی نیز وجود دارند که باعث اختلال در عملکرد این آشکارسازها می‌شوند. از این عوامل می‌توان به رطوبت، نور محیط، یون‌های مثبت و منفی که به طور طبیعی در گاز حضور دارند یا وجود میدان‌های الکتریکی در اطراف آشکارساز (که حتی می‌تواند در میدان‌های زیاد با تخلیه‌ی تاریک به عنوان چشمه‌ی تولید یون عمل کنند) اشاره کرد. در آشکارسازهای گازی که باز هستند (که گاهی از این نوع آشکارساز برای ذرات آلفا استفاده می‌گردد) تمامی عوامل ذکر شده سهمی در رسانندگی گاز و به تبع آن خطایی در عملکرد آشکارساز خواهند داشت، ولی در آشکارسازهای بسته قسمت اعظم این عوامل، مانند یون‌های موجود در هوا، رطوبت و... حذف می‌شود و تنها عامل تابش زمینه باقی می‌ماند.

## ۲. روش کار و بررسی نتایج

ابتدا حرکت یک الکترون را در یک آشکارساز تناسبی با الگوریتم مونت کارلو شبیه‌سازی می‌کنیم. برخوردها به صورت پدیده تصادفی با احتمالی که از روی میانگین زمان بین دو برخورد و طول پویش میانگین مشخص می‌گردد، صورت می‌پذیرد. طی هر برخورد الاستیک تکانه‌ی خطی و انرژی پایسته می‌ماند، در حالی‌که در برخوردهای غیرالاستیک که یونش یا برانگیختگی داریم انرژی نهایی به اندازه‌ی انرژی یونش یا برانگیختگی کم‌تر خواهد شد. جهت پراکندگی بعد از برخورد نیز به صورت تصادفی وزن‌دار در نظر گرفته شده است، با وزنی که معادل مقادیر سطح مقطع دیفرانسیلی پراکندگی استخراج شده از دیتابیس آنلاین NIST [۷] و دیتا بیس نرم‌افزار GEANT می‌باشد. یک نمونه از چنین توابع وزنی که در واقع همان مقادیر سطح مقطع دیفرانسیلی

باشد. ولی علاوه بر یونش گرمایی روش‌های دیگری نیز برای ایجاد الکترون یا یون وجود دارد که از آن جمله می‌توان به موارد زیر اشاره کرد. ۱) پدیده‌ی فوتوالکتریک (یونش اتم گاز یا جدا شدن الکترون از سطوح فلزی آند و کاتد با تاباندن فوتونی که دارای انرژی بیش‌تر از انرژی یونش اتم باشد) یا ۲) یونش ناشی از برخورد ذرات دارای انرژی زیاد به اتم‌های گاز یا سطوح آند و کاتد، که این انرژی زیاد می‌تواند به طریق اعمال میدان الکتریکی به ذرات داده شود (یونش میدانی) یا خود ذرات از ابتدا دارای انرژی باشند مثل ذرات آلفا و پرتو بتا و... و همین‌طور ۳) شرایط جوی و رعدوبرق و ابرها و... نیز از عوامل دیگری هستند که می‌توانند یون‌های مثبت و منفی تولید کنند [۶]. ذرات باردار موجود در جو علاوه بر یون‌ها می‌توانند هواویزهایی<sup>۱</sup> (گردوغبار، دود، آلودگی هوا و سایر ذرات معلق در هوا) باشند که یک یا چند یون به آن‌ها چسبیده است.



شکل ۱: این نمودار سطح مقطع دیفرانسیلی پراکندگی الاستیک الکترون از اتم نئون را برحسب زاویه به ازای سه مقدار انرژی اولیه الکترون برابر ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ الکترون ولت نشان می‌دهد. ( $a^2 = 2.8002852 \times 10^{-21}$  m<sup>2</sup>).

اساس کار آشکارسازهای گازی جمع‌آوری یون‌ها و الکترون‌های ناشی از یونش پرتوهای یون‌ساز گسیل‌شده از منابع پرتوزا است، ولی از آن‌جا که تعداد این الکترون‌ها و

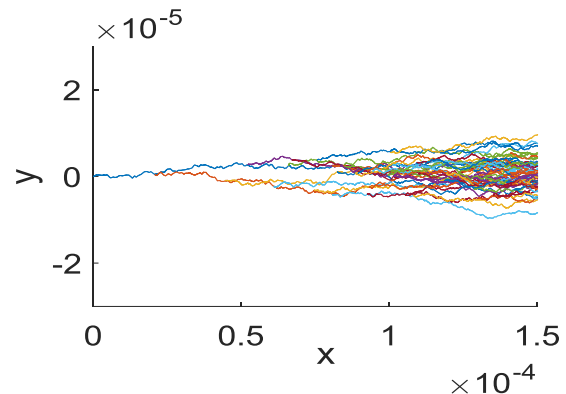
<sup>۱</sup>aerosol

انرژی کافی کسب کنند، تا در برخورد بعدی اتم را یونیزه کرده و تولید الکترون ثانویه کنند، این الکترون‌های ثانویه نیز حرکت کرده و اتم‌های دیگری را یونیزه می‌کنند که نتیجه آن تولید بهمنی از الکترون‌ها است [۸-۹]، (شکل ۲).

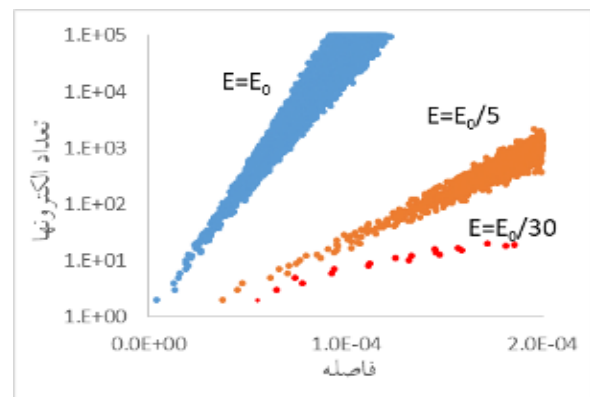
در اثر اعمال ولتاژ بین دو الکتروود آشکارساز، برحسب مقدار ولتاژ پدیده‌های مختلفی می‌توانند رخ دهند، که عبارتند از: جمع‌آوری یون، تقویت تناسبی و تخلیه تاوزند، تخلیه نورانی، تخلیه قوس. در همه موارد فوق غیر از اولین مورد، تقویت گازی صورت می‌پذیرد. در مواردی که تقویت گازی صورت می‌پذیرد، با افزایش ولتاژ منبع، ضریب تکثیر (تعداد الکترون‌های ثانویه ایجاد شده به ازای یک الکترون اولیه) نیز افزایش خواهد یافت (شکل ۳). مشاهده می‌شود که با افزایش میدان اعمالی تعداد الکترون‌هایی که ایجاد می‌گردد افزایش می‌یابد. مقدار  $E=E_0$  در حدود مقدار میدان الکتریکی شکست برای گاز است در حالی که دو مورد بعدی  $\frac{1}{5}E_0$  و  $\frac{1}{30}E_0$  میدان شکست هستند، مشاهده می‌شود که تکثیر الکترونی حتی در میدان‌های کم‌تر از میدان شکست نیز رخ می‌دهد.

حال می‌خواهیم ببینیم که با در نظر گرفتن جنبه‌های تصادفی‌ای که در تولید الکترون‌های ثانویه نقش دارند، آیا تعداد الکترون‌های ثانویه تولید شده می‌تواند به عنوان معیاری برای سنجش تعداد الکترون‌های اولیه باشد یا خیر؟ (پدیده‌های تصادفی در تولید الکترون‌های اولیه که از برخورد تابش با مولکول‌های گازی و یونش آن‌ها ایجاد می‌شوند و با ضریب فانو مشخص می‌گردند را در این مطالعه در نظر نگرفته‌ایم)، یا به عبارت دیگر می‌خواهیم امکان طیف‌سنجی با آشکارساز گازی مورد نظر را بررسی کنیم. برای این کار یک الکترون را ۱۰۰۰۰ بار از یک نقطه معین در داخل آشکارساز رها کرده و پس از طی فاصله مشخصی و رسیدن الکترون‌ها به آند، تعداد الکترون‌های ثانوی ایجاد شده را شمارش می‌کنیم. به خاطر

پراکندگی هستند و از دیتابیس NIST استخراج شده‌اند، در شکل ۱ نشان داده شده است.



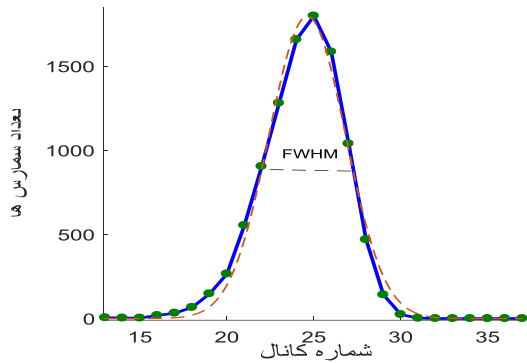
شکل ۲: در این شکل قسمت کوچکی از ابتدای مسیر حرکت الکترون در گاز را نشان داده‌ایم که در آن هم حرکت کاتوره‌ای الکترون مشخص است و هم یونش اتم‌های در طول مسیر. باید توجه داشت که همه برخوردها منجر به یونش نمی‌شوند.



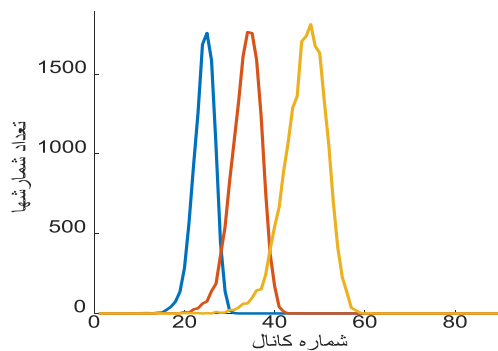
شکل ۳: تولید الکترون ثانویه با برخورد الکترون اولیه که انرژی کافی از میدان الکتریکی اعمال شده، کسب کرده است برحسب فاصله طی شده در داخل گاز برای سه مقدار مختلف از میدان الکتریکی. (مقیاس محور عمودی لگاریتمی می‌باشد).

به خاطر برخوردها، در غیاب ولتاژ خارجی مسیر الکترون یک مسیر کاتوره‌ای است و در صورتی که پتانسیل خارجی اعمال گردد، یک حرکت سوقی به سمت قطب مثبت به این حرکت کاتوره‌ای اضافه می‌گردد. اگر مقدار پتانسیل اعمالی از حدی بیشتر باشد، الکترون‌ها در بازه‌ی بین برخوردها می‌توانند

۲۰×۱/۴<sup>۲</sup> الکترون اولیه، هر مرحله با تکرار ۱۰۰۰ بار انجام می‌شود). توزیع حاصله در شکل ۶ نمایش داده شده است.



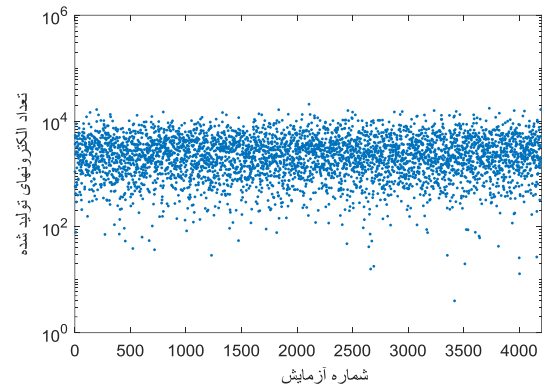
شکل ۵: در این شکل توزیع تعداد الکترون‌های ایجاد شده را نشان داده‌ایم (توزیع داده‌های شکل ۴). محور افقی نمایانگر شماره کانال (متناسب با تعداد الکترون‌های ثانویه جمع‌آوری شده و محور عمودی تعداد شمارش‌ها در هر کانال (یعنی تعداد دفعاتی که به تعداد خاصی الکترون ثانوی جمع‌آوری شده است).



شکل ۶: در این شکل فرض کرده‌ایم سه پرتو یونیزان به صورت جدا جدا و با فاصله زمانی زیاد وارد آشکارساز شوند و هر کدام به ترتیب از چپ به راست ۱۰ (آبی)، ۱۴ (قرمز) و ۲۰ (نارنجی) الکترون اولیه ایجاد کرده باشند، در این حالت برای هر کدام توزیع تعداد شمارش‌ها را مانند شکل ۴ رسم نموده‌ایم.

در هنگام شمارش تجربی الکترون‌های ثانویه که در عمل با اندازه‌گیری مساحت زیر نمودار پالس خروجی آشکارساز تناسبی صورت می‌گیرد، صرفاً با اندازه‌گیری ارتفاع یا مساحت

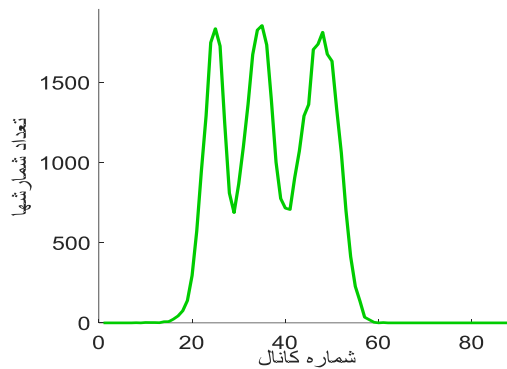
ماهیت تصادفی بودن برخوردها و پراکندگی الکترون‌ها از اتم‌های گاز، انتظار نمی‌رود که تکرار آزمایش همان تعداد قبلی را بدهد. به همین خاطر ما این آزمایش عددی را ۱۰۰۰۰ بار تکرار کردیم، نتیجه این کار در شکل ۷ نشان داده شده است.



شکل ۷: تعداد الکترون‌های ثانویه تولید شده توسط یک الکترون اولیه پس از طی یک فاصله‌ی معین.

حال توزیع تعداد آن‌ها را بررسی می‌کنیم، (بدین معنا که هر تعداد الکترون ثانویه شمارش شده چند بار تکرار شده است، با در نظر گرفتن پهنای کوچکی برای تعداد الکترون‌ها، یعنی تعداد الکترون‌ها در بازه  $n$  و  $n+dn$  باشد. هدفمان این است که تعیین کنیم در شرایط یکسان هر تعداد الکترون ثانویه با چه احتمالی ایجاد می‌شوند). توزیع بدست آمده را در شکل ۸ نشان داده‌ایم. در این شکل منحنی خط چین یک نمودار گاوسی است که به داده‌ها برازش شده است. پهنای این شکل گاوسی وقتی به نصف مقدار بیشینه‌اش،  $FWHM$ ، افت کرده است می‌تواند به عنوان معیاری از قدرت تفکیک آشکارساز مورد بحث در نظر گرفته شود.

در ادامه سعی داریم ببینیم که آیا می‌توان از روی تعداد الکترون‌های ثانوی به تعداد الکترون‌های اولیه پی برد یا خیر؟ بدین منظور آزمایش عددی قبلی را به جای یک تک الکترون اولیه، با سه مقدار متفاوت از الکترون‌های اولیه تکرار می‌کنیم، مرحله اول به جای ۱ الکترون اولیه ۱۰ الکترون اولیه، مرحله دوم  $14 = 1 \times 1/4$  الکترون اولیه و مرحله سوم هم



شکل ۷: این شکل لگاریتم تعداد شمارشها را برای حالتی که در آن چهار پرتو یونیزان ذکر شده در شکل ۵ به صورت هم زمان به آشکارساز برسند نشان داده شده است.

تکرار شبیه سازی برای حالت های مختلف، از قبیل فشارهای مختلف گاز، گازهای مختلف، دماهای مختلف و ... نشان داد که یکی از اصلی ترین پارامترهایی که مناسب بودن یک گاز برای آشکارساز تناسبی را تعیین می کند، طیف برانگیختگی الکترونی گاز مورد نظر و همین طور سطح مقطع آن برانگیختگی ها است. علاوه بر آن تمایل اتم مورد نظر برای جذب الکترون به خود و تشکیل یون منفی نیز عامل مهمی بود، که با طول عمر الکترون (که در ولتاژهای پایین بیش تر اهمیت پیدا می کند)، در ارتباط است. در برنامه ای که نوشته ایم پارامترهای زیادی در نظر گرفته نشده اند، که از جمله می توان به تولید فوتون فرابنفش و ایجاد الکترون های جدید به روش فوتوالکترونیک با آن فوتون ها، که نتیجه آن مشاهده پالس های چندگانه در خروجی است. در کارهای آتی قصد داریم کد نوشته شده را توسعه دهیم تا در حد توان خود، اکثر جنبه فیزیکی و اتفاقات داخل آشکارساز گازی را پوشش دهیم.

در ادامه اثر فشار گاز داخل آشکارساز و اثر پتانسیل اعمالی بر ضریب تقویت گازی الکترون را بررسی می کنیم

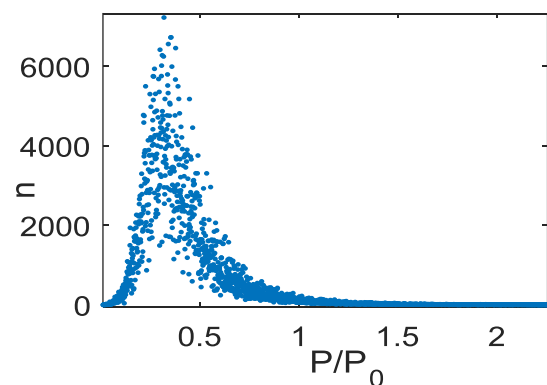
شکل ۸ اثر فشار گاز در تکثیر الکترونی را نشان می دهد. در فشارهای پایین ضریب تکثیر کم است و دلیل آن هم این است که در این حالت تعداد اتم هایی که در مسیر الکترون قرار دارند

زیر نمودار یک تک پالس نمی توانیم انرژی پرتو یونیزان فرودی (متناسب با تعداد الکترون های اولیه) را مشخص کنیم و از روی آن طیف انرژی پرتوهای فرودی را مشخص نماییم، چرا که به خاطر ماهیت تصادفی برخوردها و ایجاد الکترون های ثانویه هر آشکارسازی دارای قدرت تفکیک محدودی است. بنابراین باید به جای بررسی تک پالس باید تعداد زیادی از پالس ها را بطور آماری تحلیل نمود. حال سعی می کنیم برآوردی از قدرت تفکیک آشکارساز گازی مورد بحث را بدست آوریم، فرض کردیم که سه پرتو یونیزان مربوط به شکل ۶ با هم وارد آشکارساز شوند و هر کدام به تعداد ذکر شده الکترون اولیه ایجاد کنند. در این حالت نتیجه ی بدست آمده نموداری شبیه شکل ۷ خواهد بود. با توجه به این شکل می توان وجود سه پرتو با انرژی های مختلف را در آن تشخیص داد، در صورتی که اختلاف انرژی پرتوهای یونیزان اولیه زیاده تر و به تبع آن اختلاف تعداد الکترون های اولیه بیش تر از مقادیر ذکر شده در مقاله باشد، فاصله ی قله های مربوط به هر انرژی از همدیگر بیش تر شده و قله ها به راحتی تفکیک می گردند. اما حد پایین چقدر است؟ محاسبات (که نتیجه آن به خاطر جلوگیری از تکرار در اینجا آورده نشده است) نشان دادند که اگر نسبت تعداد الکترون های اولیه در حدود ۱۰:۱۱:۱۲ باشد قله ها به طور تقریباً کامل در هم فرو می روند و تفکیک آن ها بسیار دشوار خواهد بود ولی از حدود نسبت ۱۰:۱۳:۱۷ قله ها قابل تفکیک شده و در نسبت ۱۰:۱۴:۲۰ که در شکل ۶ نشان داده شده بصورت کاملاً قابل تفکیک و تمیز پذیر در می آیند.

### ۳. خلاصه و نتیجه‌گیری

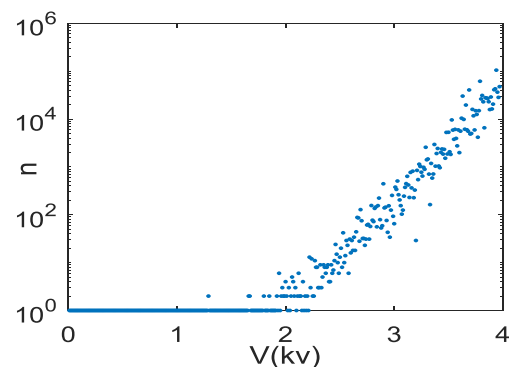
به طور خلاصه در این کار، کدی را طراحی کردیم که می‌تواند برخی پدیده‌های مهمی که در داخل آشکارسازها رخ می‌دهند را توصیف کمی و کیفی کند. هرچند برخی دیگر از پدیده‌ها مانند تولید فوتون‌های فرابنفش در آن لحاظ نشده است. برنامه نوشته شده اکثر نتایجی را که از یک آشکارساز تناسبی انتظار می‌رفت را توانست شبیه‌سازی کند. پارامترهای دخیل در برنامه را تغییر داده و برای مقادیر مختلف برنامه را اجرا کردیم و این نتایج نشان داد که طیف برانگیختگی الکترونی گاز داخل آشکارساز و همین‌طور سطح مقطع آن برانگیختگی‌ها و تمایل اتم‌های گاز مورد نظر برای جذب الکترون به خود و تشکیل یون منفی از عوامل مهمی هستند که روی پهنای پالس در نصف مقدار بیشینه (FWHM) تاثیر زیادی دارند و بنابراین عوامل مهمی برای مناسب بودن گاز مورد نظر برای آشکارساز تناسبی می‌توانند باشند. البته هدف اصلی این کار بررسی خواص آشکارسازهای گازی نبود، چرا که برای آن هم برنامه‌های بسیار قدرتمند و بسیار دقیقی وجود دارند. در این کار فقط ما سعی کردیم که خود چنین برنامه‌ای بنویسیم (در زبان ++C) و پارامترهایی که در مقاله بررسی شده‌اند تا حدود زیادی از قبل معلوم بودند و صرفاً برای این‌که درست کار کردن برنامه نوشته شده را نشان دهیم این نتایج را نشان داده‌ایم. با وجود این‌که چنین نرم‌افزارهای قدرتمندی برای شبیه‌سازی این آشکارسازها وجود دارند ولی کارهای پژوهشی زیادی نیز در حال انجام است که در آن‌ها از نرم‌افزارهای موجود استفاده نشده و تیم تحقیقاتی سعی نموده‌اند که خود نرم‌افزاری طراحی نمایند، که نتایج کارشان نیز در مقالات معتبر ISI چاپ می‌شود. که از آن جمله می‌توان به مراجع [۱-۱۰] اشاره کرد.

کم است و در حد فشار صفر هیچ اتمی وجود ندارد که یونیزه شود و تکثیر الکترونی رخ دهد. در فشارهای بالاتر نیز تکثیر الکترونی کاهش می‌یابد که دلیل آن این است که در این حالت اتم‌ها بهم نزدیک هستند و طول پویس آزاد میانگین الکترون کاهش پیدا کرده است و الکترون نمی‌تواند در فاصله بین برخوردها به اندازه کافی انرژی از میدان بگیرد تا اتم‌هایی که با آن‌ها برخورد می‌کند را یونیزه نماید.



شکل ۸: این شکل اثر فشار گاز را بر روی تعداد الکترون‌های ثانوی ایجاد شده و جمع‌آوری شده را نشان می‌دهد.

در شکل ۹ نیز اثر ولتاژ را بررسی کرده‌ایم، در ولتاژهای پایین هیچ تکثیری صورت نمی‌پذیرد در یک ولتاژ آستانه‌ای که تیز نیست، تکثیر شروع می‌شود و پس از آن با افزایش ولتاژ اعمال شده به صورت نمایی افزایش می‌یابد.



شکل ۹: این شکل تعداد الکترون‌های ثانوی ایجاد شده را برحسب اختلاف ولتاژ اعمالی به الکتروادهای آشکارساز را نشان می‌دهد.

## ۴. مراجع

- [1] A. Alkaa, Krasimir K. Mitev, P. Ségur, A fast technique for Monte Carlo simulation of the process of gas multiplication in cylindrical proportional counters, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A Accelerators Spectrometers Detectors and Associated Equipment* 580(1):161–164 (2007).
- [2] Shaokun He, Qianming Huang, Hao Qiao, Dayong Wang, Yong Ban. Simulation study of the performance of new micropattern gaseous detectors. *Radiation Detection Technology and Methods*, (2018).
- [3] Mohamed A. Gaheen, Nader M.A. Mohamed. Monte Carlo simulation of the responses of gaseous effluent monitors to radioactive isotopes. *Applied Radiation and Isotopes*. Volume 137, July 2018, Pages 205-209 (2018).
- [4] S.F. Biagi. Monte Carlo simulation of electron drift and diffusion in counting gases under the influence of electric and magnetic fields. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*. Volume 421, Issues 1–2, 21 January 1999, Pages 234-240 (1999).
- [5] چن، فرانسیس. سبحانیان، صمد (مترجم). آشنایی با فیزیک پلاسما و همجوشی کنترل شده: فیزیک پلاسما. انتشارات دانشگاه تبریز (۱۳۸۹).
- [6] جوهان، و. بم. ترومن، ر. آ. مصلحی فرد، محمود (مترجم). صالح پور، بهروز (مترجم). مبانی فیزیک پلاسما فضای. انتشارات دانشگاه تبریز (۱۳۸۰).
- [7] National Institute of Standards and Technology <https://srdata.nist.gov/SRD64/Elastic>.
- [8] نول، گلن ف.. علیرضا صدر ممتاز (مترجم). مهسا نوری اصل (مترجم). اندازه گیری و آشکارسازی تابش. انتشارات دانشگاه گیلان (۱۳۹۲).
- [9] سولفان دیس، نیکولاس. لندزبرگر، شلدون. هادی زاده یزدی، محمد هادی (مترجم). کوهی فائق، رحیم (مترجم). اندازه گیری و آشکارسازی تابش های هسته ای. انتشارات دانشگاه فردوسی مشهد (۱۳۹۳).
- [10] M. Rabie, C. M. Franck, METHES: A Monte Carlo collision code for the simulation of electron transport in low temperature plasmas, *Computer Physics Communications* Volume 203, Pages 268-277 (2016).

