

طراحی و ساخت سیستم پایش گر پرتویی خودرو برای آشکارسازی مواد پرتوزا

مهدی منشی زاده^۱، عرفان جوادی^۱، مهدی خسروانی^۱، حسین سیار^۱، مرتضی یاحقی^۱، رامین روزه دار مقدم^۱

آیدین قلعه اسدی^۱، علی طاهری^{۱*} و سید پژمان شیرمردی^۱

^۱ شرکت توسعه کاربرد پرتوهای ایران، سازمان انرژی اتمی ایران، تهران، ایران، صندوق پستی: ۸۳۶-۱۴۳۹۵.

^۲ پژوهشکده کاربرد پرتوها، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی ایران، تهران، ایران، صندوق پستی ۳۳۹-۱۴۱۵۵۱.

* تهران، تهران، سازمان انرژی اتمی ایران، شرکت توسعه کاربرد پرتوهای ایران، صندوق پستی: ۸۳۶-۱۴۳۹۵.

پست الکترونیکی: ceo@iradco.ir

چکیده

طراحی و ساخت سیستم پایش گر پرتویی برای کشف مواد و آلودگی‌های رادیواکتیو، کنترل حمل و نقل مواد پرتوزا، بازرسی و شناسایی مواد پرتوزا در مبادی عبور و مرور با تأکید بر پایش گر داخل خودرو و بار کامیون در شرکت توسعه کاربرد پرتوهای ایران انجام شد. سامانه پایش گر پرتویی می‌تواند به صورت دروازه‌ای در دو طرف ورودی کارخانجات، مراکز و تأسیسات هسته‌ای، گمرک، فرودگاه‌ها و مرز نصب شود و روشی نوین برای مقابله با خطرات ناشی از حمل غیرقانونی مواد رادیواکتیو محسوب می‌شود. این سامانه به مقادیر بسیار کم آلودگی رادیواکتیو حساس است. این دستگاه شامل یک سری مدارات الکترونیکی و نگه‌دارنده‌های مکانیکی است و در آن از آشکارساز سوسوزن پلاستیکی به عنوان سیستم پایش گر استفاده شده است. همین‌طور از تجهیزات دیگر این سامانه می‌توان به دوربین عکس برداری از پلاک خودرو، قابلیت نصب راه‌بند با کنترل خودکار، مرکز کنترل از راه دور، چراغ راهنما جهت اعلام وضعیت به راننده و علائم هشدار نوری و صوتی اشاره کرد. آزمون‌های عملکردی با استفاده از چشمه‌های ^{137}Cs با اکتیویته $3\ \mu\text{Ci}$ نشان داد که سامانه پایش گر توانایی تشخیص چشمه در داخل خودرو با حداقل اکتیویته $3\ \mu\text{Ci}$ در فاصله ۱۰۰ سانتی متری را داشته و همچنین دقت خوبی در شناسایی همین چشمه در زمانی که با حداکثر سرعت ۱/۴ متر بر ثانیه حرکت می‌کند، داراست.

کلیدواژگان: پایش گر پرتویی، سوسوزن پلاستیکی، چشمه پرتوزا، حداقل اکتیویته قابل تشخیص، پرتوی گاما.

۱. مقدمه

مانند کبالت-۶۰، سزیم-۱۳۷، آمرسیوم-۲۴۱ و ... سروکار دارند یا آن‌ها را تولید می‌کنند [۲] که این چشمه‌ها منبع تابش اشعه گاما بوده و این مراکز ملزم به حفظ و نگهداری و در نهایت تحویل چشمه‌های مستعمل به مدیریت پسمانداری هستند [۳]. بنابراین به نحوی باید جلوی از دست دادن یا سرقت چشمه‌های

آلودگی آهن آلات وارداتی، به مواد پرتوزا به صورت عمدی یا سهوی می‌تواند منجر به ورود مواد پرتوزا به همراه این فلزات به کارخانجات ذوب آهن و فلزات شده و در این صورت محصولات نهایی عوارض بسیار نامطلوب خواهد داشت [۱]. همین‌طور بسیاری از مراکز تأسیسات هسته‌ای با چشمه‌هایی

به دلیل بازدهی مناسب برای آشکارسازی پرتوهای با شدت کم از سوسوزن‌های NaI(Tl) [۱۳] و در مواردی از آشکارسازهای سوسوزن مایع آلی برای شناسایی رادیونوکلوئیدهایی که نوترون/گاما [۱۴] تولید می‌کنند، استفاده شده است.

در این مقاله طراحی و ساخت سیستم پایش‌گر دروازه‌ای پرتوهای گاما انجام شده است. این سیستم از چهار قطعه سوسوزن پلاستیک بزرگ از نوع پلی وینیل تولوئن^۳ با ابعاد سطح $100 \times 50 \text{ cm}^2$ ، ضخامت 5 cm و فاصله بین دو سوسوزن 60 cm در نظر گرفته شد. اهمیت کار در این بود که این سامانه توانایی شناسایی مواد پرتوزا را از داخل خودروی متحرک داشته باشد، بنابراین الکترونیک و مکانیک سیستم که دارای انواع پارامترهای مهم از قبیل ضریب تضعیف نور، یکنواختی پاسخ، طراحی هدایت‌گر نور، بهینه‌سازی الکترونیک سیستم، نرم‌افزار مناسب جهت جمع‌آوری داده‌ها و انتخاب بهینه منعکس‌کننده نور است، به‌صورتی انتخاب شد که نتایج قابل قبولی را ارائه دهد و حداقل اکتیویته قابل تشخیص^۴ (MDA) [۱۵] در سطح استاندارد جهانی برای شناسایی مواد پرتوزا در داخل خودرو را دارا باشد.

۲. ساز و کار سامانه پایش‌گر پرتویی

چشمه‌ای در حال حرکت با سرعت v را در نظر بگیرید که در داخل خودرو یا بار کامیون است. این چشمه، فوتونی که یک اشعه گاما محسوب می‌شود را تابش می‌کند و این اشعه گاما وارد بلورهای آشکارساز سوسوزن می‌شود. نوری که طی فرآیند سوسوزنی در بلور آشکارساز تولید می‌گردد، توسط تکثیرکننده فوتونی^۵ (PMT) تکثیر می‌گردد. فرآیند تکثیر شامل برخورد نور با لایه فوتوکاتد ورودی و خروج الکترون می‌شود که تعداد این الکترون‌ها متناسب با تعداد و انرژی فوتون‌هایی است که با

پرتوزا یا مواد هسته‌ای از تأسیسات هسته‌ای گرفته شود که این مورد به منع گسترش سلاح‌های هسته‌ای و خطرات ناشی از مواد رادیواکتیو کمک شایانی می‌کند و باعث جلوگیری از بیماری‌های جسمی مانند سرطان می‌شود [۴]. به‌عنوان مثال؛ طبق گزارش آژانس بین‌المللی انرژی اتمی، ۶۶۲ مورد قاچاق مواد هسته‌ای فقط در بازه زمانی ۱۹۹۳ تا ۲۰۰۴ تأیید شده است [۵]. مطمئناً اگر از سیستم‌های نوین به جای روش‌های سنتی استفاده می‌شد این رقم کاهش چشم‌گیری پیدا می‌کرد و البته تقاضا در بازار سیاه برای مواد رادیواکتیو نیز روز به روز در حال افزایش است. بنابراین نیاز به سامانه پایش‌گر^۱ (RPM) به شدت احساس می‌شود [۶].

استفاده از سامانه پایش‌گر پرتویی روشی نوین و واقع‌بینانه برای نظارت بر موارد مذکور و حفاظت از خطرات ناشی از پرتوهای یون‌ساز است [۷]. بازرسی باید به‌نحوی صورت بگیرد که دارای سرعت مناسب بوده و ترافیک معقولی را ایجاد کند. به این دلایل نیاز به دستگاه‌هایی است که مواد پرتوزای در حال حرکت را در این مبادی عبور و مرور بررسی کند.

تاکنون تحقیقات بسیار زیادی برای سامانه پایش‌گر پرتویی در جهان و ایران انجام شده است [۸-۱۱]. آشکارسازهایی که در سیستم پایش‌گر پرتویی استفاده می‌شود باید از حساسیت زیاد برخوردار بوده و می‌بایست توانایی آشکارسازی در زاویه‌های فضایی بزرگ را داشته باشد و به همین دلیل از آشکارسازهای سوسوزن پلاستیک در ابعاد بزرگ استفاده می‌شود. به نظر می‌رسد اولین بار در سال ۱۹۸۳ فهلا و برونسون^۲ آشکارسازهای سوسوزن پلاستیکی را برای استفاده در پایش مواد پرتوزا در تأسیسات هسته‌ای [۱۲] پیشنهاد داده‌اند و از سال ۲۰۰۶ تحقیق در مورد سامانه‌های پایش‌گر تا به امروز شدت بیش‌تری گرفته است. در بسیاری از سامانه‌های پایش‌گر

^۴ Minimum Detectable Activity

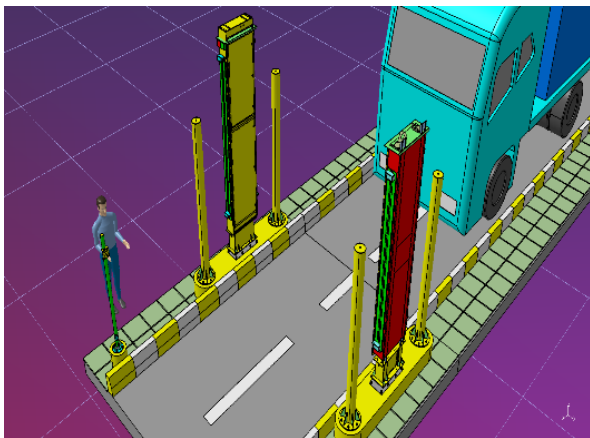
^۵ Photomultiplier Tube

^۱ Radiation Portal Monitor

^۲ Fehla and Brunson

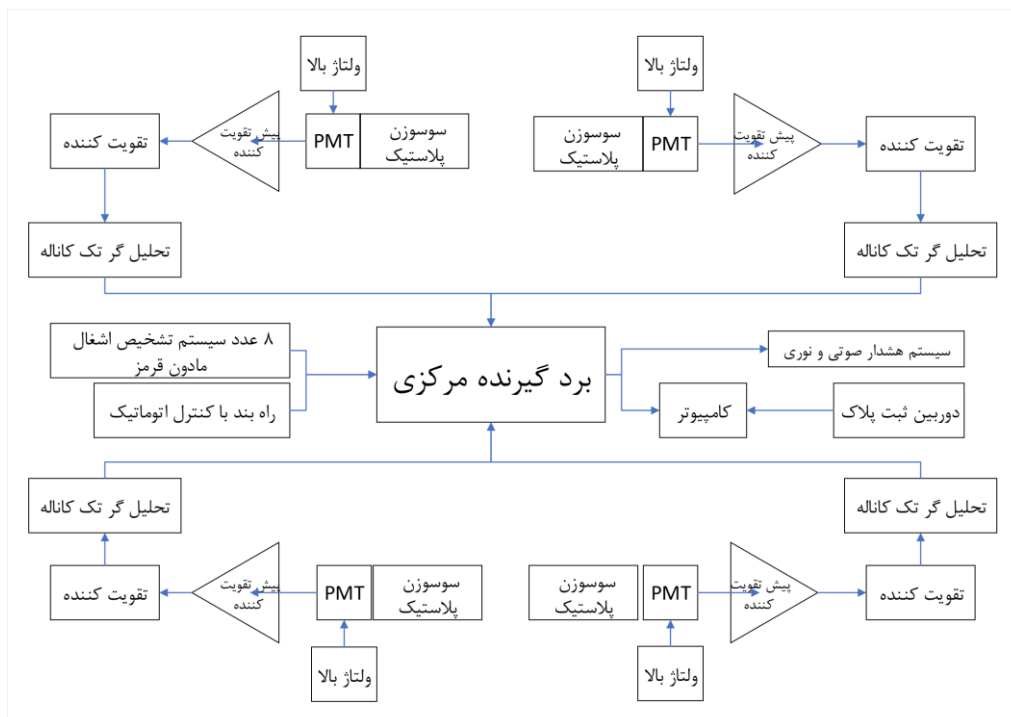
^۳ Polyvinyltoluene (PVT)

خروجی را مورد تحلیل قرار داده و در صورت وجود چشمه‌های پرتوزا، زنگ هشدار صوتی و نوری شروع به فعالیت می‌کند. تجهیزات دیگری مانند منبع تغذیه، پیش تقویت کننده، تقویت کننده، سنسور مادون قرمز (به‌عنوان سنسور تشخیص اشغال حرکت)، دوربین برای ثبت پلاک، هشدار صوتی و نوری مطابق شکل ۲ به سیستم متصل می‌شوند.



شکل (۱): شماتیک سامانه با دو پیل آشکارسازی و در مجموع ۴ آشکارساز که این دو پیل روبروی یکدیگر نصب می‌شوند.

فوتوکاتد برخورد می‌کند. یک میدان الکتریکی، این الکترون‌های گسیلی را به سمت داینود می‌راند. داینودها معمولاً ۶ تا ۱۴ مرحله‌ای هستند [۱۶] و البته در سامانه پایش گر پرتویی حاضر ۱۰ مرحله‌ای است. الکترون‌های آخرین داینود توسط آند جمع شده و منجر به یک تپ الکتریکی می‌شود. این تپ الکتریکی برای تجزیه و تحلیل اطلاعاتی که دارد به گیرنده مرکزی متصل می‌شود. اگر تعداد سیگنال‌های دریافتی به بیش از حد مجاز آستانه برسد، هشدار نوری و صوتی فعال می‌شود. حد مجاز آستانه معمولاً با توجه به پس زمینه موجود در محیط تخمین زده می‌شود و سامانه پایش گر حاضر قابلیت تغییر حد مجاز را دارد. در شکل ۱، نمایی از سیستم پایش گر سامانه پایش گر برای آشکارسازی مواد رادیواکتیو آورده شده است. در طرفین محل عبور خودرو و کامیون دو پیل آشکارسازی که هر کدام دارای ۲ آشکارساز هستند، قرار گرفته است. نتایج آشکارسازی هر ms ۲۰ (به‌صورت پیش‌فرض) به قسمت کنترل منتقل می‌شود. در قسمت کنترل با استفاده از نرم‌افزار تعبیه شده، پالس‌های



شکل ۲: بلوک دیاگرام سیستم آشکارسازی به همراه الکترونیک سیستم پایش گر پرتویی.

۱.۲ سوسوزن پلاستیک

از اصلی‌ترین روش‌ها که سابقه بسیار بالایی در آشکارسازی تابش‌های یونیزه کننده دارد، استفاده از نور سوسوزنی است که در مواد معینی تولید می‌شود. در این نوع سامانه‌های پایش‌گر، کریستال‌های آلی پلاستیک استفاده می‌شود [۹]. از مزایای استفاده از سوسوزن پلاستیک می‌توان به قابلیت دسترسی در اندازه و شکل‌های گوناگون، عدم شکنندگی، هزینه کم و تولید در ضخامت‌های بزرگ نام برد [۱۵]. در سامانه پایش‌گر حاضر از این مزیت‌ها استفاده شده است به طوری که هر آشکارساز دارای حجم ۲۵ لیتر است. این نوع سوسوزن‌ها واکنش سریعی دارند اما در عوض نور کم‌تری را تولید می‌کنند. با این حال سوسوزن‌های پلاستیکی استفاده شده در سامانه پایش‌گر این قابلیت را دارد که کسر بزرگی از تابش‌های فرودی را به فلورسانس آبی تبدیل کند. بدین منظور تنظیمات به صورتی انجام می‌شود که ثابت زمانی مدار اندازه‌گیری خیلی کوتاه‌تر از زمان واپاشی فلورسانس تأخیری و فسفرسانس باشد و به عبارتی سهم نامطلوب فلورسانس تأخیری و فسفرسانس در آن کمینه شود. بنابراین فقط نور آبی سهمی در پالس خروجی دارد [۱۷].

دمای پایین راندمان کاری این آشکارسازها را دچار اختلال می‌کند بنابراین نیاز به یک سیستم گرم کننده آشکارساز در دمای زیر صفر درجه است که این موارد در سامانه پایش‌گر لحاظ شده است. مشخصات آشکارساز مورد استفاده در سامانه پایش‌گر پرتویی حاضر در جدول (۱) به طور مختصر بیان شده است.

با توجه به همگن بودن بلور آشکارسازهای مورد استفاده قرار گرفته مسئله مهم جانمایی چیدمان آشکارسازها به نحوی است که کم‌ترین فضای مرده از بابت آشکارسازی پرتو ایجاد شود بنابراین استاندارد IEC-۴۲۲۴۴ را مبنای طراحی قرار داده و از چهار آشکارساز با قراردادن بردهای الکترونیکی بین دو آشکارساز استفاده شد. برای پوشش آشکارسازها (رفلکتورهای

نوری) از مایله‌های آلومینیومی و همچنین برای کاهش اثر نور محیط بر روی عملکرد سوسوزن از روکش‌های پلاستیکی تیره رنگ استفاده شده است. البته برای پوشش آشکارسازها به منظور جمع‌آوری نور تولید شده در نقاط مختلف آشکارساز، می‌توان از پودر خشک TiO_2 ، رنگ بازتابنده سفید، اکسید منیزیم به صورت مایع، تفلون سفید و کاغذ استفاده کرد [۱۸].

جدول ۱: مشخصات آشکارساز سامانه پایش‌گر پرتویی.

مقدار	مشخصه
۶۴	خروجی نور، درصد آنترانس
۰/۹	زمان خیزش، ns
۲/۱	زمان واپاشی، ns
۲/۵	پهنای پالس FWHM، ns
۴۲۵	طول موج بیش‌ترین گسیل، nm
۳۸۰	ضریب تضعیف نور، cm
۱۰۰۰۰	بازده سوسوزن، e^-/MeV Photons
۱/۱	نسبت تعداد هیدروژن به کربن

۲.۲ مکان و اتصالات لامپ تکثیر کننده فوتونی

لامپ PMT دارای دو قسمت اصلی است که یکی لایه‌ای حساس به نور است و فوتوکاتد نامیده می‌شود و دیگری قسمت تکثیر کننده الکترون شامل داینودها است. پوشش بیرونی این لامپ معمولاً از جنس شیشه است که یک خلأ در درون لامپ را نگه می‌دارد تا شتابدهی به الکترون‌ها مؤثرتر باشد و در برخورد به ذرات هوا افت انرژی پیدا نکند. لامپ PMT برای بهره برداری نیاز به یک مدار تقسیم کننده ولتاژ^۱ و یک منبع تغذیه دارد. از ویژگی‌های لامپ PMT مورد استفاده می‌توان به نویز بسیار کم و زمان انجام کار بسیار پایین و قابل قبول اشاره کرد و بنابراین از این لامپ‌ها برای ساخت انتخاب شد. در سامانه پایش‌گر از ۴ لامپ PMT استفاده شده است. مکان بهینه لامپ

^۱ Voltage divider

زمان فروپاشی این پالس نیز به صورتی است که اجازه جمع آوری بار را می دهد (در حد ۵۰ الی ۱۰۰ میکروثانیه). بنابراین برای هر سیگنال خروجی از لامپ PMT مداری موسوم به پیش تقویت کننده طراحی و سپس ساخته و در دستگاه تعبیه شده است. این برد از ۵ بخش تشکیل شده است:

(۱) مدار مبدل بار الکتریکی به پالس ولتاژ: این مدار بارهای الکتریکی تولید شده توسط لامپ PMT را که به ازای برخورد هر پرتو هستند را جمع نموده و پالس ولتاژ تبدیل می نماید سپس آن را به گونه ای تقویت و شکل دهی می نماید تا بتوان به ورودی مدار مقایسه کننده ارسال نمود.

(۲) مدار مقایسه کننده و پنجره شمارش: این برد قابلیت آن را دارد که بتوان سیگنال های خروجی از مدار پیش تقویت کننده را در یک پنجره انرژی که توسط کاربر تعیین می گردد، شمارش نماید. پنجره انرژی کمک می کند تا تابش زمینه را در حد استاندارد تعیین نموده و رفتار آشکارسازها را با یکدیگر مقایسه کرد.

(۳) مدار تنظیم تغذیه HV^2 و دریافت بازخورد ناشی از برد HV: یکی دیگر از قابلیت های این دستگاه تنظیم ولتاژ تغذیه HV توسط نرم افزار و دریافت و هم چنین خواندن آن است تا بتوان در هر زمانی فلات^۳ هر آشکارساز را از طریق نرم افزار تنظیم کرد.

(۴) مدار خوانش دمای محیط: در هر یک از بردهای پیش تقویت کننده از یک عدد سنسور دما جهت اطلاع کاربر از دمای داخل دستگاه استفاده شده است. دمای اندازه گیری شده به صورت برخط در رابط کاربری نشان داده می شود.

(۵) مدار میکروکنترلر و ارسال داده: در هر یک از بردهای پیش تقویت کننده از یک میکروکنترلر استفاده شده است که وظیفه آن شمارش پالس، تنظیم پنجره انرژی، تنظیم ولتاژ

نیز تأثیر بسیار زیادی در افزایش دقت دستگاه دارد که به صورت تجربی این مورد بهینه سازی شد بدین صورت که موقعیت لامپ را در سطح کریستال سوسوزن پلاستیک جابه جا کرده و در نهایت موقعیتی که در آن بیش ترین شمارش ثبت می شود، مکان اتصال لامپ PMT به سوسوزن در نظر گرفته شده است. محل اتصال سوسوزن و لامپ PMT باید با ماده ای پر شود که ضریب شکست یکسانی با اتصالات جفت شده داشته باشد تا اتصالات به صورت تقریباً کاملی به دست آید. ماده ای که مشخصات اپتیکی مناسبی برای اتصال دارد، ژل سیلیکون با چسبانندگی زیاد است و برای سامانه پایش گر از این ژل استفاده شد.

۳.۲ تجهیزات الکترونیکی

از مهم ترین تجهیزات الکترونیکی سامانه پایش گر می توان به پیش تقویت کننده، تقویت کننده، منبع ولتاژ بالا، تبدیل کننده سیگنال آنالوگ به دیجیتال و تحلیلگر^۱ SCA [۱۰] اشاره کرد. در سامانه پایش گر جهت شمارش پالس های خروجی PMT از چهار برد برای SCA استفاده شد. یک برد مرکزی نیز تعبیه شده است تا عمل پردازش و اعمال فرامین را انجام دهد. برای هر دو نوع برد مذکور از پردازنده AVR مدل Atmega۱۶ استفاده شده است و رابط کاربری از طریق پروتکل ارتباطی RS۲۳۲ به USB کامپیوتر وصل می شود.

۱.۳.۲ برد الکترونیک پیش تقویت کننده

تابش هایی که وارد آشکارساز می شود، پس از طی فرآیند سوسوزنی، بار الکتریکی کمی تولید می کنند، بنابراین برای شکل دهی پالس قبل از آشکارساز، به یک پیش تقویت کننده نیاز دارند. پیش تقویت کننده عمل شکل دهی به پالس را انجام نمی دهد و خروجی به صورت یک پالس دنباله دار است که زمان خیزش این پالس متناسب با زمان جمع آوری بار است و همچنین

³ Plateau

¹ Single channel Analyzer

² High Voltage

عکس وسیله نقلیه عبوری، تشخیص پلاک و ذخیره داده‌های مربوط به آشکارسازها برای هر وسیله نقلیه عبوری و تشخیص و اعلام وجود منبع رادیواکتیو پرتوزا بر اساس شمارش آشکارساز را بر عهده دارد. از جمله قابلیت‌های ویژه این نرم‌افزار تشخیص و تمایز بین شخص، خودرو سواری و کامیون به همراه تعیین طول وسیله نقلیه است.

در این سامانه پایش‌گر، کد نرم‌افزاری با استفاده از نرم‌افزار C# برنامه‌ای نوشته شد که از طریق درگاه سریال با دستگاه پایش‌گر ارتباط برقرار کرده و داده‌های ارسال شده از طرف دستگاه پایش‌گر شامل اطلاعات آشکارسازها و اطلاعات کنترلی نظیر سوسوزن‌ها را دریافت می‌کند و به صورت شماتیک نمایش می‌دهد. همچنین کلیه اطلاعات دریافت شده در پایگاه داده SQL Server ذخیره می‌گردد و در نهایت می‌توان از اطلاعات ذخیره شده گزارش تهیه کرد. مرحله بعد ارتباط نرم‌افزار با دوربین شناسایی پلاک است بدین صورت که اطلاعات آشکارسازهای ثبت شده به ماشین با همان پلاک تخصیص داده می‌شود. فرکانس خواندن اطلاعات در هر ۲۰ ms رخ می‌دهد و ارتباط نرم‌افزار با دستگاه در هر ۱۰۰ ms انجام می‌شود. با توجه به این‌که در این سامانه ۴ عدد آشکارساز وجود دارد، بنابراین در هر ۱۰۰، ۲۰ = ۵×۴ تا عدد خوانده می‌شود، که در قالب چهار نمودار جداگانه یا یک نمودار میانگین نمایش داده می‌شود. در این سامانه تابش زمینه به‌طور مداوم اسکن و ثبت می‌گردد و در صورتی که تعداد ذرات آشکارسازی شده به تعداد ذرات زمینه را بیش‌تر از یک یا چند برابر انحراف از معیار باشد، آژیر صوتی و نوری فعال می‌شود و کاربر را متوجه می‌سازد که در داخل خودرو یا بار کامیون چشمه‌های پرتوزا یا مواد رادیواکتیو وجود دارد. دسترسی به ۴ نمودار جداگانه نیز این امکان را فراهم می‌کند که مکان چشمه پرتوزا به صورت تقریبی مشخص شود. سپس با یک پایش‌گر دستی اقدام به شناسایی دقیق محل چشمه

منبع تغذیه HV، خواندن سیگنال خروجی از سنسور دما و ارسال و دریافت داده‌ها از برد مرکزی است.

۲.۳.۲ برد الکترونیک تقویت کننده

دامنه پالس خروجی از پیش‌تقویت‌کننده از مرتبه چند صد میلی‌ولت است و بنابراین نیاز به یک تقویت‌کننده است و البته نیاز است که این تقویت‌کننده وظیفه شکل‌دهی به پالس را نیز انجام دهد. این برد پالس‌های دریافتی از پیش‌تقویت‌کننده را بعد از تقویت و شکل‌دهی به SCA می‌فرستد تا شمارش شروع شود.

۳.۳.۲ برد الکترونیک اصلی^۱

در سامانه پایش‌گر از یک برد اصلی استفاده می‌شود که چندین وظیفه به شرح ذیل را در دستگاه بر عهده دارد:

(۱) دریافت و ارسال اطلاعات با هر کدام از ۴ عدد برد پیش‌تقویت‌کننده، (۲) ارتباط با کامپیوتر، (۳) دریافت سیگنال خروجی از ۴ عدد سنسور نوری که در ورودی و خروجی مبادی جهت اعلام حضور خودرو قرار گرفته‌اند، (۴) تعیین وضعیت هشدار نوری (قرمز برای حالت آلوده و سبز برای حالت نرمال) و هشدار صوتی، (۵) دریافت اطلاعات دمای داخل پیل و تنظیم دمای آن با استفاده از هیتری که در دو طرف قرار گرفته‌اند، (۶) تعیین وضعیت باز یا بسته شدن راه‌بند متناسب با وضعیت خودرو.

۴.۲ تولید و پیاده‌سازی نرم‌افزار HMI مدیریت داده

سامانه پایش‌گر

به منظور تنظیم و پایش پارامترهای دستگاه از نرم‌افزار جامع رایانه‌ای استفاده شده است که کار با آن برای کاربر عادی نیز آسان است. این نرم‌افزار وظیفه نمایش نرخ شمارش هر آشکارساز، پایش و تنظیم مقدار ولتاژ خروجی برد الکترونیک تغذیه ولتاژ بالا، تنظیم پنجره انرژی هر مجموعه آشکارسازی و پایش دمای مجموعه آشکارسازها را بر عهده دارد. همچنین ثبت

¹ Main Electronic Board



شکل (۳): سامانه پایش گر پرتویی.

۳. نتایج

برای بررسی کنترل کیفی و صحت عملکرد سامانه پایش گر پرتویی تست‌های متعددی انجام شد که در بخش‌های بعدی آورده می‌شود.

۱.۳ محاسبه ابعاد و فاصله بهینه بین آشکارسازها

ابعاد و فاصله بین دو آشکارساز در پایش گر، از پارامترهای مهم طراحی و ساخت سامانه پایش گر است و بنابراین شبیه‌سازی بر مبنای روش مونت کارلو به منظور ترابرد پرتوهای گاما با هدف اندازه‌گیری نرخ شمارش دروازه پایش گر با ابعاد مختلف آشکارساز و همین‌طور فاصله بین آشکارسازها صورت گرفت. برای این کار از دو صفحه پلاستیکی سوسوزن در یک سمت با عرض‌های مختلف ۲۵، ۵۰ و ۱۰۰ سانتی‌متر و با طول ۱۰۰ سانتی‌متر در هر طرف پایش گر در نظر گرفته شد. هر کدام از این صفحات سوسوزن در یک سمت به ازای فواصل جداشدگی ۰، ۳۰، ۶۰، ۹۰ و ۱۲۰ سانتی‌متر در فایل ورودی کد برای چشمه ^{137}Cs لحاظ شدند. این چشمه در فضای بینابینی دروازه و در ۳ موقعیت ۲۰، ۲۲۵ و ۴۵۰ سانتی‌متری از زمین مقادیر نرخ شمارش توسط هر ۴ صفحه سوسوزن به دست آمد.

در شکل ۴، تغییرات مجموع نرخ شمارش ۴ صفحه آشکارسازی به ازای ارتفاع‌های ۳ گانه ۲۰، ۲۲۵ و ۴۵۰ سانتی‌متری و قرارگیری چشمه رادیواکتیو گاما از ^{137}Cs در

پرتوزا می‌کنند. مطمئناً هر آشکارسازی شمارش بیش‌تری انجام دهد، چشمه رادیواکتیو در آن قسمت خودرو یا کامیون قرار گرفته است. در قسمت پیشرفته نرم‌افزاری که برای سامانه پایش گر طراحی شده است قابلیت تغییر در رزولوشن و قابلیت انتخاب ۲۰ ms، ۱۰۰ ms، ۱s و ۵s نیز وجود دارد. ابتدا باید توجه کنیم که حداقل انتخاب زمان پایش گر ما ۲۰ ms است و برای بزرگ‌نمایی نمودار و زمان پایش گر و یا به عبارتی نمایش داده‌های بیش‌تر که منجر به کاهش خطا می‌شود فقط می‌توان از ضرایب صحیحی از ۲۰ ms استفاده کرد. مثلاً برای زمان پایش گر ۱۰۰ ms باید ۵ بار از داده‌هایی که به دست می‌آید میانگین‌گیری کرد و برای بقیه زمان‌های پایش گر نیز از عدد صحیح مربوط به خودش استفاده شده است. همچنین این نرم‌افزار قابلیت ارسال و دریافت داده‌ها و ارتباط با شبکه را نیز دارد بدین معنی که کاربر از راه دور امکان کار با سامانه پایش گر را دارد.

۵.۲ سازه آشکارساز

سامانه پایش گر پرتویی به صورتی طراحی شده است که در دو طرف مسیر عبوری افراد و خودروها قرار می‌گیرد. دو پنل آشکارسازی از هم در فاصله ۴/۵ متر قرار گرفته‌اند. ضخامت فلز به کار برده شده برای سازه نگهدارنده آشکارساز در دو صفحه جلویی و پشتی متفاوت است. برای صفحه پشتی عبور پرتوهای گاما اهمیتی ندارد و بنابراین از آهن ۵ میلی‌متری استفاده شد و همچنین از یک حفاظ سربی با ضخامت ۶ میلی‌متر در صفحه پشتی برای کاهش شمارش زمینه ناشی از پرتوهای کیهانی و سایر موارد استفاده شده است. برای صفحه جلویی که عبور پرتوها دارای اهمیت است، آلومینیوم با ضخامت ۲ میلی‌متر انتخاب شد. شکل ۳، سامانه پایش گر پرتویی حاضر را نشان می‌دهد.

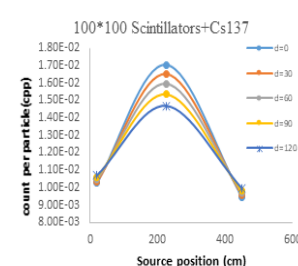
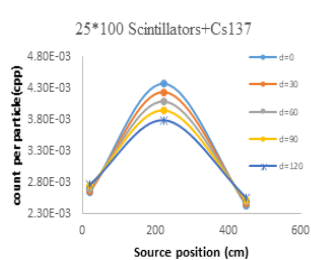
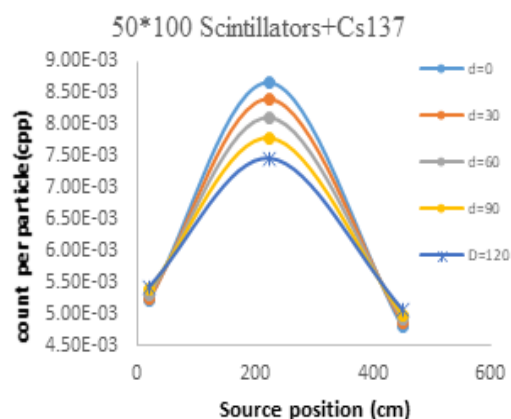
فضای بینابینی دو صفحه و فواصل جداشدگی صفحات دوگانه بالا و پایین در هر دو طرف برای ابعاد مختلف $25 \times 100 \text{ cm}^2$ ، $50 \times 100 \text{ cm}^2$ و $100 \times 100 \text{ cm}^2$ آشکارساز آورده شده است. در موقعیت چشمه گاماها در موقعیت میانی (فاصله ۲۲۵ سانتی متری از زمین) با بیشترین مقدار نرخ شمارشی مجموع مواجه هستیم.

مواجه خواهند شد. به طور مثال، با افزایش پهناى صفحات از ۲۵ به ۵۰ سانتی متر مقادیر متناظر شدت شمارش تقریباً ۲ برابر شده است. سایر روندهای حاکم بر تغییرات شدت شمارش به ازای تغییر در فاصله بین دو صفحه واقع در هر سمت دروازه و نیز تغییر در موقعیت قرارگیری چشمه به همان منوال قبل باقی می ماند. با بزرگتر شدن پهناى صفحات تا ۱۰۰ سانتی متر منجر به تغییر در روندهای مشاهده شده شبیه سازی با هندسه قبلی نمی شود. روند تغییرات نرخ شمارشی مجموع به مانند موارد قبل است. با تغییر ابعاد آشکارسازها و بزرگتر شدن این ابعاد آنچه از مقایسه نمودارهای فوق مشهود است آنکه مقادیر نرخ شمارشی مجموع نیز متناسب با این افزایش ابعاد صفحات آشکارسازی با افزایش مواجه خواهند شد. به طور مثال، با افزایش پهناى صفحات از ۲۵ به ۱۰۰ مقادیر متناظر شدت شمارش تقریباً ۴ برابر شده است. سایر روندهای حاکم بر تغییرات شدت شمارش به ازای تغییر در فاصله بین دو صفحه واقع در هر سمت دروازه و نیز تغییر در موقعیت قرارگیری چشمه به همان منوال قبل باقی می ماند. با توجه به اهمیت هم زمان حساسیت در شمارش و قیمت تمام شده محصول، مقدار جداشدگی صفحات سوسوزنی ۶۰ سانتی متر به همراه ابعاد سوسوزنی ۲۵ در ۱۰۰ سانتی متر برای ساخت نهایی دروازه پایش گر انتخاب گردید.

۲.۳ میزان یکنواختی پاسخ و بازده کل آشکارساز

بازده آشکارساز سوسوزن پلاستیک یک بازه مشخصی بر اساس مراجع بین المللی دارد [۱۹] و این بازده متناسب با نوع فویل، چیدمان سیستم و کوپلینگ اجزا، ضخامت بیشینه بدنه، طراحی بدنه و ... است. بنابراین ابتدا بازده آشکارساز و میزان یکنواختی پاسخ آشکارساز به کمک چشم ^{137}Cs با اکتیویته ۳ میکروکوری محاسبه شد. میزان یکنواختی پاسخ آشکارساز برای نواحی مختلف یکی از آزمون های کارکردی این تجهیز است به نحوی که نایکنواختی شدید پاسخ نشان از جایگذاری و چیدمان اشتباه

مواجه هستیم.



شکل ۴. نمودار تغییرات مجموع نرخ شمارش ۴ صفحه آشکارسازی با ابعاد مختلف به ازای ارتفاع های ۳ گانه ۲۰، ۲۲۵، و ۴۵۰ سانتی متری برای چشمه ^{137}Cs .

با افزایش فاصله بین دو صفحه آشکارساز در هر سمت دروازه پایش گر با کاهش هرچه بیشتر مقدار نرخ شمارشی مجموع در موقعیت چشمه در وسط و افزایش هرچه بیشتر مقدار نرخ شمارشی مجموع در موقعیت چشمه در پایین و بالا (فواصل ۲۰ و ۴۵۰ سانتی متر از زمین) روبرو می شویم. با تغییر ابعاد آشکارسازها و بزرگتر شدن این ابعاد و آنچه از مقایسه نمودارهای فوق مشهود است آنکه مقادیر نرخ شمارشی مجموع نیز متناسب با این افزایش ابعاد صفحات آشکارسازی با افزایش

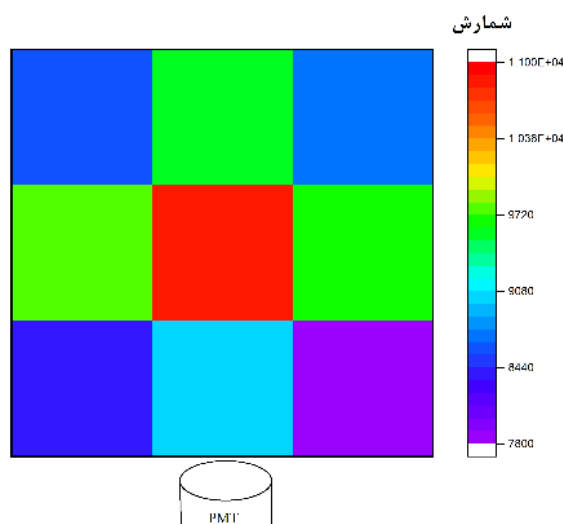
در نظر گرفته به چشمه حساس نخواهد شد و تعداد بیش‌تری از آن‌ها با نسبت‌های متفاوت، سهمی در ایجاد سیگنال نهایی خواهند داشت. بنابراین در نظر گرفتن صرف یک عدد ماکزیمم یا مینیمم نمی‌تواند بیان‌گر حالت واقعی آشکارسازی باشد. منظور از در نظر گرفتن مقدار میانگین، محاسبه بازده به‌صورت متوسط است. در صورتی‌که مقدار ۷۸۰۰ و یا ۱۱۰۰۰ به‌عنوان کمینه و بیشینه در نظر گرفته شود بازده کل آشکارساز در بازه بین ۷ تا ۱۰ درصد و بازده میانگین آشکارساز مقدار ۸ درصد محاسبه می‌شود.

۳.۳ حداقل اکتیویته قابل آشکارسازی برای تشخیص

مواد رادیواکتیو

به منظور ارزیابی عملکرد و پاسخ سامانه پایش گر پرتویی و با توجه به این نکته که سرعت حرکت چشمه یکی از فاکتورهای اساسی دقت دستگاه است، چشمه‌ها را در داخل خودرو گذاشته و برای به‌دست آوردن میزان شمارش سامانه پایش گر از چشمه سزیم-۱۳۷ با اکتیویته ۳ میکروکوری و ۲۲ میکروکوری استفاده شد که این چشمه‌ها به‌ترتیب در فاصله ۲۰ سانتی‌متر، ۵۰ سانتی‌متر و ۱۰۰ سانتی‌متر از هر پنل آشکارساز سمت راست و چپ قرار گرفتند و میزان شمارش در بازه یک ثانیه، ۵۰ بار خوانده شد. سرعت لحظه‌ای خودرو در هر بار آزمایش در فاصله مربوط به خودش به ترتیب 0 m/s ، $1/4 \text{ m/s}$ و $2/8 \text{ m/s}$ در نظر گرفته شد. چیدمان اندازه‌گیری میزان شمارش بر حسب فاصله برای چشمه‌ها در شکل ۶ آورده شده است. در حالت (الف) شمارش هر دو آشکارساز بالایی و پایینی ثبت شد و در حالت (ب) فقط شمارش آشکارساز پایینی در نظر گرفته شد. لازم به ذکر است که دلیل انتخاب این چشمه‌ها، استاندارد

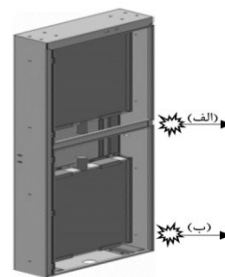
آشکارساز و PMT، نایکنواختی بلور سوسوزن و پوشش نادرست درونی آشکارسازها شامل رفلکتورها است. چشمه مورد استفاده برای این منظور چشمه به شکل سکه‌ای با ابعاد بسیار کوچک نسبت به اندازه نواحی تقسیم‌شده است. از آنجایی که چشمه در فاصله بسیار نزدیک به نواحی آشکارسازی قرار داده شده است، می‌توان از اثر چشمه بر نواحی مجاور صرف نظر کرد. سطح سوسوزن هر آشکارساز به ۹ ناحیه تقسیم گردید و شمارش مربوط به هر کدام ثبت شد که در شکل (۵) داده‌های مربوط به آشکارساز سمت راست بالایی به عنوان نمونه ارائه شده است.



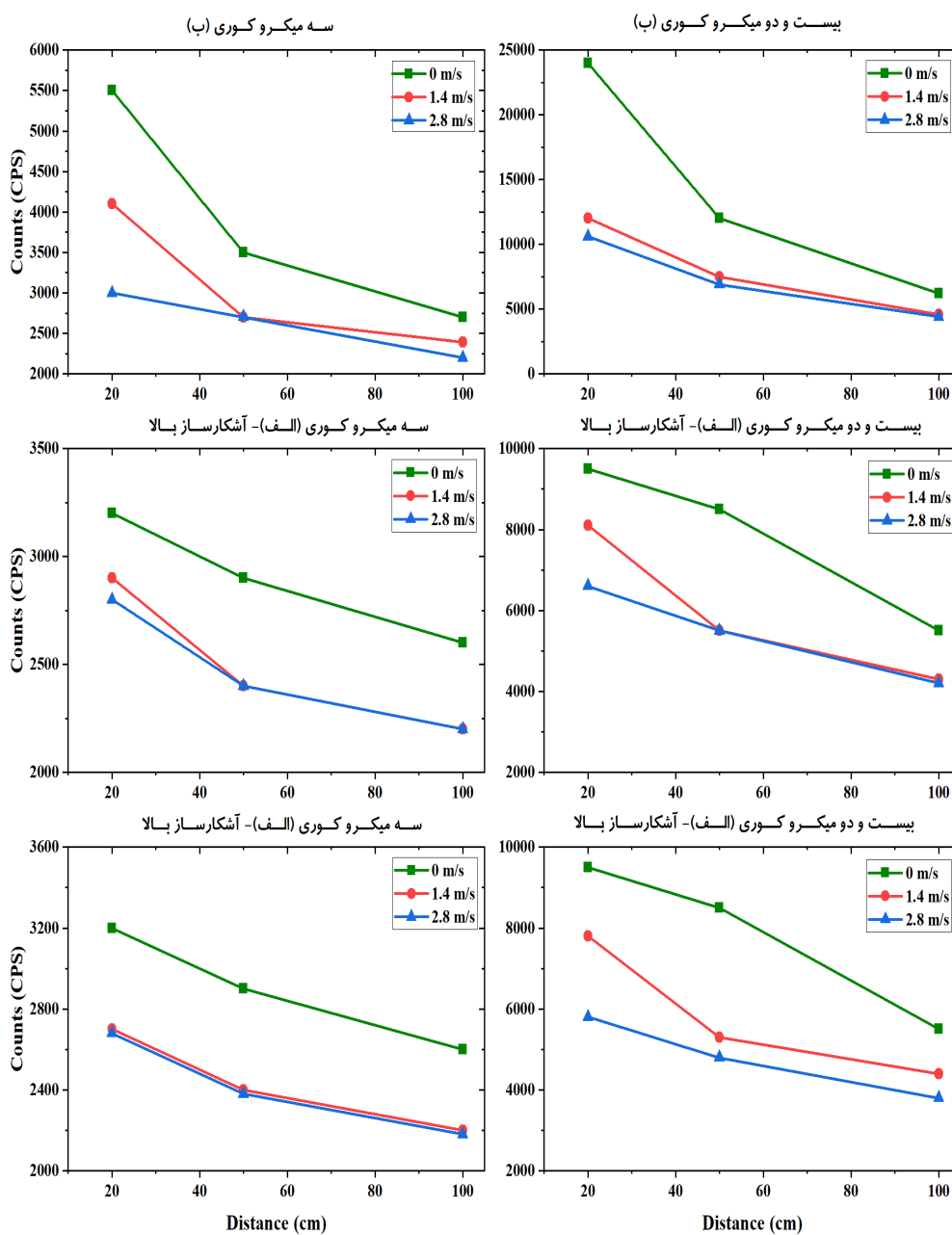
شکل (۵): تقسیم‌بندی قسمت سوسوزن آشکارساز به ۹ ناحیه و شمارش در ناحیه‌های مختلف آشکارساز سمت راست بالا.

طبق شکل ۵، اعدادی که در بازه ۷۸۰۰ تا ۱۱۰۰۰ به‌دست آمده‌اند یک سری اعداد آماری نیستند و کارکرد فیزیکی دستگاه، این شمارش‌ها را ثبت کرده است و با تکرار آزمایش به نتایج مشابه دست می‌یابیم. لازم به ذکر است، در صورت عبور یک خودرو حاوی مواد رادیواکتیو، قطعاً تنها یک ناحیه از ۹ ناحیه IEC۶۲۴۴ و دستورالعمل دستگاه‌های مشابه است که در ایران تست گرفته شده‌اند.

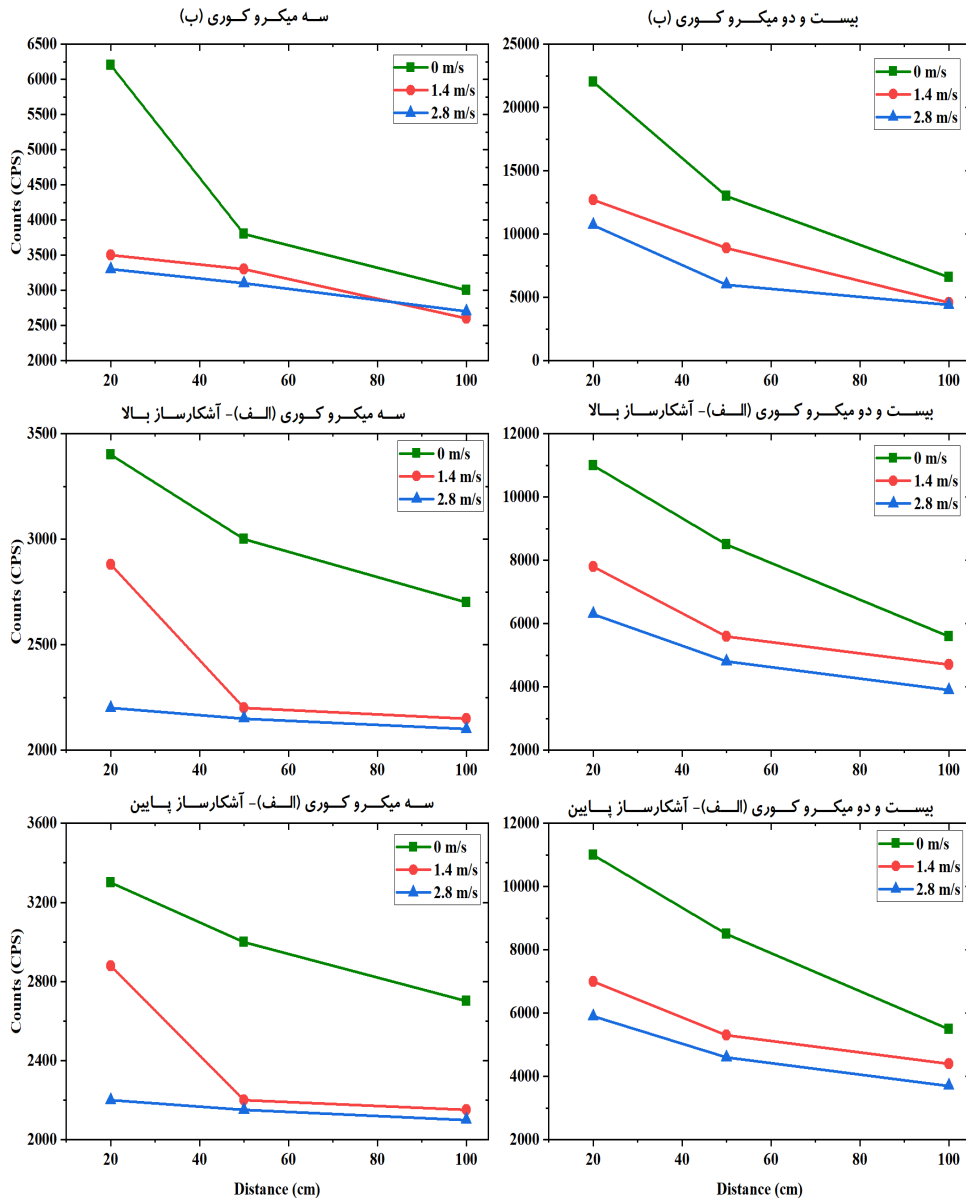
با عبور چشمه‌های رادیواکتیو از کنار آشکارسازهای سامانه پایش‌گر، شمارش شروع می‌شود. در شکل‌های ۷ و ۸، میزان شمارش بر حسب فاصله برای اکتیویته‌های مختلف سزیم-۱۳۷ در دو پنل آشکارساز سمت راست و سمت چپ در بازه زمانی ۱ ثانیه برای سرعت‌های مختلف عبوری آورده شده است.



شکل (۶): چیدمان اندازه‌گیری شمارش چشمه ^{137}Cs در دو حالت الف و ب.



شکل (۷): شمارش پنل راست در دو حالت الف و ب (^{137}Cs).



شکل (۸): شمارش پنل چپ در دو حالت الف و ب (^{137}Cs).

برای کاهش خطای مثبت کاذب که ناشی از نوسانات شمارش زمینه است، از چهار انحراف از معیار استفاده شد. به صورت ناگزیر یک سری خطاها وجود خواهد داشت. زمانی می توان یک چشمه را قابل تشخیص خواند که حاصل ضرب سطح اطمینان در جمع انحراف معیار شمارش چشمه کم تر از اختلاف میانگین شمارش چشمه و میانگین شمارش زمینه باشد (معیار رایلی)، به عبارتی همواره [۲۰، ۱۰].

در جدول ۲، برای چشمه هایی که با اکتیویته ۳ میکروکوری و ۲۲ میکروکوری با سرعت مشخص و ثابت ۰ m/s، ۱/۴ و ۲/۸ m/s حرکت می کند میزان شمارش ها و انحراف از معیارها آورده شده است تا مقدار کم ترین میزان اکتیویته در فواصل مختلف مشخص شود. لازم به ذکر است برای سرعت صفر، سنسور اشغال به صورت دستی فعال شده است.

جدول (۲): MDA سامانه پایشگر بر حسب فاصله و سرعت چشمه.

اکتیویته (μCi)	فاصله (cm)	سرعت (m/s)	میانگین	انحراف معیار	4σ	3σ	2σ	σ
۳	۲۰	۰	۴۱۳۳	۱۶۳	۸۱۰	۱۰۹۱	۱۳۷۲	۱۷۷۰
۳	۵۰	۰	۳۱۸۳	۱۴۳	-۶۰	۲۰۱	۴۶۱	۸۴۰
۳	۱۰۰	۰	۲۷۱۶	۱۳۲	-۴۸۳	-۲۳۳	۱۶	۳۸۴
۲۲	۲۰	۰	۱۴۵۰۰	۳۰۵	۱۰۶۰۹	۱۱۰۳۲	۱۱۴۵۵	۱۱۹۹۵
۲۲	۵۰	۰	۹۸۳۳	۲۵۱	۶۱۵۷	۶۵۲۶	۶۸۹۵	۷۳۸۲
۲۲	۱۰۰	۰	۵۸۱۷	۱۹۳	۲۳۷۳	۲۶۸۴	۲۹۹۵	۳۴۲۴
۳	۲۰	۱/۴	۳۱۶۰	۱۴۲	-۸۱	۱۷۹	۴۳۹	۸۱۷
۳	۵۰	۱/۴	۲۵۳۳	۱۲۷	-۶۴۸	-۴۰۳	-۱۵۷	۲۰۵
۳	۱۰۰	۱/۴	۲۲۸۱	۱۲۱	-۸۷۴	-۶۳۵	-۳۹۷	-۳۹
۲۲	۲۰	۱/۴	۹۲۳۳	۲۴۳	۵۵۸۸	۵۹۴۹	۶۳۱۱	۶۷۸۹
۲۲	۵۰	۱/۴	۶۳۵۰	۲۰۲	۲۸۷۱	۳۱۹۱	۳۵۱۰	۳۹۴۸
۲۲	۱۰۰	۱/۴	۴۵۰۰	۱۶۹	۱۱۴۹	۱۴۳۶	۱۷۲۵	۲۱۳۰
۳	۲۰	۲/۸	۲۷۰۰	۱۳۱	-۴۹۸	-۲۴۸	۱	۳۶۸
۳	۵۰	۲/۸	۲۴۸۳	۱۲۶	-۶۹۳	-۴۴۹	-۲۰۵	۱۵۷
۳	۱۰۰	۲/۸	۲۲۵۰	۱۲۰	-۹۰۲	-۶۶۴	-۴۲۶	-۷۰
۲۲	۲۰	۲/۸	۷۶۵۰	۲۲۱	۴۰۹۳	۴۴۳۲	۴۷۷۱	۵۲۲۸
۲۲	۵۰	۲/۸	۵۴۳۳	۱۸۶	۲۰۱۵	۲۳۱۹	۲۶۲۴	۳۰۴۷
۲۲	۱۰۰	۲/۸	۴۰۶۷	۱۶۱	۷۵۰	۱۰۲۸	۱۳۰۸	۱۷۰۶

سیستم هشدار نوری از سبز به قرمز تغییر کرده و آژیر صوتی فعال می‌شود.

از طرفی محدوده انرژی قابل تشخیص چشمه از ۵۹ KeV تا ۳ MeV است و بنابراین می‌توان گفت که سامانه پایشگر علاوه بر سزیم-۱۳۷، توانایی شناسایی عناصر پرتوزای کبالت، امرسیوم و ... را نیز دارد.

در بررسی خطای سیستم، هر یک از آزمون‌های بیان شده در جدول ۲، ۲۰ بار تکرار گردید و در برخی موارد آزمون، یکبار سیستم موفق به پاسخ نشد. لذا می‌توان نتیجه گرفت که خطای آن، حداکثر ۵ درصد از کل تعداد شمارش‌ها است.

در جدول ۳، مقایسه‌ای از عملکرد فنی سامانه پایشگر پرتویی با نمونه‌های تجاری که اطلاعات فنی از کاتالوگ‌های مربوط به شرکتشان گردآوری شده، انجام شده است. مطابق با این جدول، مشخصات فنی سامانه پایشگر پرتویی در مقایسه با پایشگرهایی تجاری موجود قابل قبول است.

$$K(\sigma_1 + \sigma_2) < m_1 - m_2 \quad (1)$$

که در آن K سطح اطمینان که معمولاً مقادیر ۱، ۲، ۳، ۴ را دارد. همچنین m_1 میانگین شمارش چشمه، m_2 میانگین شمارش زمینه، σ_1 انحراف معیار شمارش چشمه و σ_2 انحراف معیار شمارش زمینه است. به عبارت ساده هنگامی که

$$K\sigma = (m_1 - m_2) - K(\sigma_1 + \sigma_2) > 0 \quad (2)$$

تشخیص چشمه برای سیستم پایشگر در فاصله‌ای معین که اندازه‌گیری صورت گرفته، امکان پذیر است.

نتایج حاصل از اندازه‌گیری چشمه ^{137}Cs با اکتیویته‌های ۳ میکروکوری و ۲۲ میکروکوری نشان می‌دهند که این سامانه پایشگر توانایی تشخیص چشمه با اکتیویته ۳ میکروکوری را در فاصله ۱۰۰ سانتی‌متری با 2σ و کمتر، ۵۰ سانتی‌متری با 3σ و کمتر و ۲۰ سانتی‌متری در هر شرایطی دارد. تشخیص چشمه با اکتیویته ۲۲ میکروکوری نیز به راحتی در هر فاصله و در بازه سرعتی استاندارد امکان پذیر است. هنگامی که خودرویی از سامانه پایشگر عبور کند و میزان شمارش‌های ثبت شده از سطح هشدار $K\sigma$ انتخاب شده توسط کاربر سامانه بیش‌تر شود،

نتیجه آن کاهش خطرات ناشی از پرتوزایی مواد رادیو اکتیو است. تست‌های مربوط به آزمون یکنواختی برای ۴ تا آشکارساز نیز نشان داد که بازده کل آشکارساز در محدوده ۸٪ است. بعد از یک سری طراحی‌ها و تجربیاتی که از قبل در ساخت سامانه پایش گر وجود داشت، اقدام به ساخت سامانه پایش‌گری شد که قابلیت شناسایی حداقل اکتیویته ۳ میکروکوری در داخل خودرو با سرعت حداکثر ۱ m/s را دارد. البته اطلاعات کلی در جدول (۲) آورده شده است بدین صورت که خانه‌های سبز رنگ نشان‌دهنده توانایی سامانه پایش‌گر در شناسایی چشمه در حال حرکت یا ایستا است و در خانه‌های قرمز رنگ این توانایی وجود ندارد. بدیهی است هر چه اکتیویته چشمه بالا و یا سرعت چشمه کم‌تر باشد شناسایی چشمه پرتوزا راحت‌تر امکان پذیر می‌شود و به عبارتی حداقل اکتیویته قابل تشخیص دستگاه کاهش می‌یابد. مثلاً برای چشمه سزیم-۱۳۷ با اکتیویته ۲۲ میکرو کوری تشخیص چشمه در بازه سرعتی استاندارد امکان پذیر است.

جدول (۳): مقایسه MDA برای ^{137}Cs در فاصله ۱ m برای انواع پایش‌گرها.

سازنده	حجم (L)	سرعت (m/s)	اکتیویته (μCi)
IRAD	۲۵	۱	۳
NSTRI [۱۵]	۱۲/۵	۰/۴۵	۲
ATOMTEX	۵	۲/۸	۴/۶
ATOMTEX	۵	۱/۴	۲
IAP	۵/۱	۱	۱۵
Polymaster	۱۹/۷۲	۱/۴	۱
Bertin	۵۳۹/۲۲	۲/۲	۲/۹

۴. نتیجه‌گیری

سامانه پایش‌گر پرتویی از الزامات مراکز و تأسیسات هسته‌ای، کارخانه ذوب فلزات، فرودگاه‌ها، گمرک و ... است و احتمال حمل و نقل غیر قانونی چشمه‌های پرتوزا را کاهش می‌دهد که

۵. مراجع

- R. Coogan, C. Marianno, W. Charlton. A strategic analysis of stationary radiation portal monitors and mobile detection systems in border monitoring. *Nucl. Eng. Technol.* 52 (3) (2020) 626-632.
- X. Sun, H. Hao, Z. Liu, F. Zhao, J. Song. Tracing global cobalt flow: 1995–2015. *Resour. Conservation Recycl.* 149 (2019) 45-55.
- M. Esser, A. Borremans, A. Dubgorn, A. Shaban. Nuclear waste transportation: quality assurance and control. *Transport. Res. Procedia* 54 (2021) 871-882.
- A. Taddei, F. Hediger, F. R. Neumann, S. M. Gasser. The function of nuclear architecture: a genetic approach. *Annu. Rev. Genet.* 38 (2004) 305-345.
- J. Ely, R. Kouzes. The use of energy windowing to discriminate SNM from NORM in radiation portal monitors. *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sec. A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment* 560 (2) (2006) 373-387.
- A. V. Dudkin. Radiation portal monitors: problems and development prospects. *Adv. Mater. Res.* 1084 (2015) 702-707.
- J. Bendahan. Review of active interrogation techniques. *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sec. A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment* 954 (2020) 161120.
- K. Jenkins, P. Johns, M. Demboski, E. Gordon, A. Kriss, J. Magana. Characterizing Relocatable Radiation Detectors for Evolving Nuclear Security Missions. *J. Nucl. Mater. Management* 49 (4) (2022) 46-63.
- B. T. Koo, H. C. Lee, K. Bae, Y. Kim, J. Jung, C. S. Park, C. H. Min. Development of a radionuclide identification algorithm based on a convolutional neural network for radiation portal monitoring system. *Radiat. Phys. Chem.* 180 (2021) 10930.
- م. عسکری، ج. کوچک‌پور، ع. طاهری. بررسی و مطالعه آشکارسازهای سوسوزن پلاستیکی برای به کارگیری در سیستم‌های کشف مواد پرتوزا. *مجله علوم و فنون هسته‌ای* ۱۰۰ (۲) (۱۴۰۱) ۱۲۵-۱۳۲.
- م. عسکری، ج. کوچک‌پور، ع. طاهری، ا. حسینی. ارزیابی عملکرد پایش‌گر پرتویی NSTRI-RPM-2020-1 برای چشمه‌های پرتوزا در حال حرکت. بیست و هفتمین کنفرانس هسته‌ای ایران، دانشگاه فردوسی مشهد، ایران، ۱۳۹۹.

12. H. Sim, H. Choi, S. Baek, H. Seo, H. Choi, H. Kim, J. Jang. Effects of rainfall and temperature on background signal of radiation portal monitor. *Radiat. Prot. Dosimetry* 199 (8-9) (2023) 710-715.
13. P. E. Fehlau, G. S. Brunson. Coping with plastic scintillators in nuclear safeguards. *IEEE Trans. Nucl. Sci.* 30 (1) (1983) 158-161.
14. C. Lee, W. G. Shin. Validation of energy-weighted algorithm for radiation portal monitor using plastic scintillator. *Appl. Radiat. Isotopes* 107 (2016) 160-164.
15. M. G. Paff, M. L. Ruch, A. Poitrasson-Riviere, A. Sagadevan, S. D. Clarke, S. Pozzi. Organic liquid scintillation detectors for on-the-fly neutron/gamma alarming and radionuclide identification in a pedestrian radiation portal monitor. *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sec. A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment* 789 (2015) 16-27.
16. G. F. Knoll. *Radiation Detection and Measurement*. 1st ed., John Wiley & Sons, New York, 2010.
17. V. A. Morozov, N. V. Morozova, P. Budzyński. Delayed electron emission in photomultiplier tubes. *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sec. A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment* 1053 (2023) 168323.
18. M. Askari, J. Kochakpour, A. Taheri. Investigation of plastic scintillation detectors for detecting the radioactive materials. *J. Nucl. Sci. Technol. (JonSat)* 43 (2) (2022) 125-132.
19. W. R. Leo. *Techniques for Nuclear and Particle Physics Experiments: a How-to Approach*. Springer Science & Business Media, Berlin, 2012.
20. B. T. Chu. *Stability of Systems Containing a Heat Source-the Rayleigh Criterion*. National Advisory Committee for Aeronautics, 1956.