

شبیه‌سازی مونت کارلو و ارزیابی عملکرد پرتویی پایش‌گر دروازه‌ای پرتویی خودرو

مجتبی عسکری^۱، عرفان جوادی^۲، آیدین قلعه اسدی^۲، مهدی منشی زاده^۲، مهدی خسروانی^۲، حسین سیار^۲، محسن شریف‌زاده^۱

رامین روزه دار مقدم^۲، امید حقیقی^۲، محمدصادق اسلامی^۲، عباس فرخی زاده^۲، علی طاهری^{۲،۱*} و سید پژمان شیرمردی^{۲،۱}

^۱ پژوهشکده کاربرد پرتوها، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی ایران، تهران، ایران، صندوق پستی ۳۳۹-۱۴۱۵۵۱.

^۲ شرکت توسعه کاربرد پرتوهای ایران، سازمان انرژی اتمی ایران، تهران، ایران، صندوق پستی ۸۳۶-۱۴۳۹۵.

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

پست الکترونیکی: ceo@iradco.ir

چکیده

در این مقاله، با استفاده از شبیه‌سازی مونت کارلوی نرم‌افزار MCNPX به طراحی و بهینه‌سازی ابعاد و فواصل بین آشکارسازهای سوسوزن پلاستیکی مورد استفاده در پایش‌گر دروازه‌ای پرتوهای گاما به منظور ساخت بر مبنای ابعاد بهینه‌شده، پرداخته می‌شود. مراحل تست و ارزیابی عملکرد پایش‌گر دروازه‌ای پرتوهای گاما بر اساس بخش آزمون‌های پذیرش پرتویی استاندارد کمیسیون بین‌المللی الکتروتکنیک به شماره IEC ۶۲۲۴۴:۲۰۲۴ شامل آزمون هشدار کاذب، آزمون تأثیرات پس زمینه (بر روی عملکرد آشکارسازها)، آزمون آشکارسازی تابش گاما و آزمون پاسخ فراتر از محدوده، انجام پذیرفته است. نتایج آزمون‌های ارزیابی انجام شده، انطباق عملکرد این پایش‌گر دروازه‌ای با استاندارد IEC ۶۲۲۴۴ را تأیید می‌کند. بر این اساس می‌توان نتیجه‌گیری کرد که طراحی، شبیه‌سازی و جانمایی آشکارسازها با دقت کافی به انجام رسیده و مورد تأیید است. همین‌طور حداقل اکتیویته قابل تشخیص دستگاه برای چشمه ^{60}Co برابر با اکتیویته 0.7 میکروکوری و برای چشمه ^{137}Cs برابر با اکتیویته $1/5$ میکروکوری در ۱ متری با سطح تبعیض $2/\sigma \pm$ تعیین شد که قابل قیاس با پایش‌گرهای تجاری موجود است.

کلیدواژگان: پایش‌گر دروازه‌ای پرتویی، سوسوزن پلاستیک، استاندارد IEC ۶۲۲۴۴، شبیه‌سازی MCNPX، حداقل اکتیویته قابل تشخیص.

۱. مقدمه

مورد نیاز کارخانجات ذوب فلزات و صنایع فولاد است [۲، ۳]. بنابراین لازم است راه‌های مقابله نوینی به منظور ممانعت از ورود یا خروج مواد هسته‌ای در مبادی ورودی کشور مانند گمرگ و بندر، بخش حمل و نقل کارخانجات فلزات و مراکز هسته‌ای در نظر گرفته شود.

خطرات ناشی از پرتوهای یون‌ساز، دستیابی به سلاح‌های هسته‌ای و انجام عملیات تروریستی با استفاده از چشمه‌های مولد این پرتوها باعث می‌شود تا لزوم حفاظت کشور و افراد در برابر چنین اقداماتی کاملاً احساس شود [۱]. منابع احتمالی ورود آلودگی رادیو اکتیو به هر کشوری عموماً شامل قاچاق چشمه‌های پرتوزا، واردات تولیدات فلزی و آهن قراضه آلوده

از پایش گر دروازه‌ای، SaphyGATE محصول شرکت فرانسوی Bertin Instruments با دانش فناوری‌های پیشرفته و طراحی مدرن، نسل جدید پایش گر پرتویی است. SaphyGATE مبتنی بر چند آشکارساز سوسوزن پلاستیک PVT با حجم بالا (۲۵ Lit) درون محفظه آلومینیومی با وزن ۴۰۰ kg و ابعاد $320 \times 750 \times 1500$ mm^۳ است، که دارای ثبت انرژی در محدوده ۳۰ MeV - ۷ keV است. این پایش گر مبتنی بر یک الگوریتم ابتکاری است که برای جبران تضعیف پس‌زمینه ناشی از وسیله نقلیه در حال رانندگی طراحی شده است. این ویژگی امکان شناسایی منابع با فعالیت کم را می‌دهد و یک تشخیص پرتویی بهتری با میزان زنگ خطر کاذب کمتر در مقایسه با سایر سیستم‌های کلاسیک انجام می‌دهد. SaphyGATE G برای صنایع بازیافت و فولاد، سایت‌های صنعتی و عمرانی، کنترل مرزی و تأسیسات هسته‌ای توصیه می‌شود و با استاندارد IEC ۶۲۰۲۲ که یکی از مورد توجه‌ترین استانداردها در این زمینه است [۷]، مطابقت دارد [۸]. نمونه دیگر پایش گر ساخت شرکت آمریکایی Arktis در سه نسخه خودرویی و فردی و چند منظوره است. در نمونه خودرویی این پایش گر یک غربالگری بسیار مطمئن از کامیون‌ها و کانتینرهای حمل بار برای تهدیدات رادیولوژیکی و مواد قاچاق هسته‌ای ارائه می‌دهد. در این نسخه آشکارسازهای نوترون ^۳He در ترکیب با آشکارسازهای گاما مبتنی بر PVT (۱۸ Lit)، مطابق با استاندارد ANSI N ۴۲/۳۵-۲۰۱۶ را برای محدوده انرژی ۳ MeV - ۳۰ keV برای امکان شناسایی بهینه و حداقل میزان هشدار کاذب فراهم می‌کند. به منظور بهبود حساسیت، طرفین آشکارساز که در منطقه تشخیص پرتویی نیستند با ۱۰ میلی‌متر از سرب حفاظ گذاری شده است. همچنین این دستگاه

یکی از مؤثرترین سیستم‌ها جهت کشف آلودگی‌های پرتویی علاوه بر بازدید بصری که نیازمند زمان و نیروی انسانی قابل توجهی است، پایش گر دروازه‌ای پرتویی خودرو برای کشف مواد پرتوزا است [۴]. پایش گر دروازه‌ای پرتویی^۱ (RPM) به‌طور معمول از چند آشکارساز سوسوزنی پلاستیک با حجم بالا تشکیل می‌شود. اصول آشکارسازی پایش گر دروازه‌ای با استفاده از آشکارسازهای سوسوزن به این صورت است که ابتدا یک ماده سوسوزن با دریافت پرتو، پالس‌های نوری ضعیفی ایجاد می‌کند. سپس پالس تولید شده به وسیله تیوب تکثیر کننده نوری^۲ (PMT) به جریان الکتریکی تبدیل و تقویت می‌شود. خروجی آشکارساز برای تجزیه و تحلیل اطلاعات به گیرنده مرکزی و بسته به نیاز به یک سیستم هشدار دهنده و رایانه متصل می‌شود [۵]. بنابراین در این پایش‌گرهای دروازه‌ای پس از افزایش سیگنال دریافتی بیش از حد مجاز آستانه‌ای در آشکارسازهای پرتویی که در ابتدا با توجه به پس زمینه طبیعی تخمین زده شود، زنگ هشدار فعال خواهد شد و وجود مواد پرتوزای عبوری را تشخیص خواهد داد.

شرکت‌های متعددی در سرتاسر جهان به طراحی و ساخت پایش گر پرداخته‌اند که هر کدام ویژگی‌های منحصر به فرد خود را دارند که در ادامه بررسی جامعی از پایش گر شرکت‌های مهم در این حوزه و مشخصات بارز آن‌ها ذکر می‌گردد. پایش گر دروازه‌ای استاندارد Oak Ridge، شامل دو ستون حاوی آشکارسازهایی به فاصله تقریبی ۵/۳۹ متر از هم قرار گرفته‌اند که هر یک از این ستون‌ها حاوی دو واحد آشکارساز نوترونی ^۳He که درون تیوپ پلی‌اتیلن (کنساز نوترون و ثبت آن‌ها) و دو واحد آشکارسازی پرتوهای گاما، پلاستیک پلی وینول تولوئن^۳ (PVT) با ابعاد بزرگ مستطیلی است [۶]. نمونه دیگر

^۳ Polyvinyltoluence

^۱ Radiation Portal Monitoring

^۲ Photomultiplier

[۲۱،۲۰] و شامل آزمون هشدار کاذب، آزمون تأثیرات پس زمینه، آزمون آشکارسازی تابش‌های گاما و آزمون پاسخ فراتر از محدوده است که در ادامه روش، نحوه و محدوده قابل قبول آن‌ها ارائه می‌شود.

۱.۲. آزمون پذیرش پرتویی پایش‌گر

شرایط محیطی آزمایشگاه کالیبراسیون، مطابق استاندارد مذکور در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول (۱). شرایط آزمون استاندارد [۱۹].

شرایط آزمون استاندارد	کمیت
$(18 \text{ to } 25)^\circ\text{C}$	دمای محیطی
$\leq 75\%$	رطوبت نسبی
$(70 \text{ to } 106.6) \text{ kPa}$	فشار جو
نرخ دز معادل محیطی کمتر از $0.15 \mu\text{Sv/h}$	تابش زمینه گاما
نرخ شار نوترونی کمتر از $200 \text{ s}^{-1} \text{ m}^{-2}$	تابش زمینه نوترون

همچنین فواصل و سرعت حرکت چشمه‌ها در طراحی و ساخت پایش‌گر، به ترتیب در جدول‌های ۲ و ۳ آورده شده است.

جدول (۲). جزئیات طراحی و ساخت پایش‌گر خودرویی [۱۹].

نوع پایش‌گر	پایش‌گر خودرویی (کامیون و ریلی)
فواصل بین پنل‌های آشکارسازی	$(5/0 \pm 0/1) \text{ m}$ از سطح هر پنل آشکارسازی
فاصله ارزیابی	مرکز بین پنل‌های آشکارسازی
ناحیه آشکارسازی پایین از سطح زمین	$0/2 \text{ m}$
ناحیه آشکارسازی میانی از سطح زمین	$2/25 \text{ m}$
ناحیه آشکارسازی بالایی از سطح زمین	$4/5 \text{ m}$

محدودیت سرعت بیشتر از $1/2$ متر بر ثانیه عابر را دارد و فاصله بین ستون‌ها قابل تنظیم از $0/6$ تا 3 متر است. انتقال داده از طریق Ethernet قابل بازخوانی و دسترس است. در این نسخه آشکارسازهای نوترونی جهت پایش پرتوهای نوترون و دوربین CCTV برای نظارت تعبیه شده است [۹]. از نمونه‌های تجاری مهم دیگر می‌توان به پایش‌گر ساخت شرکت Exploranium [۱۰]، پایش‌گر دروازه ای $\text{PM}5000\text{B}-05$ ساخت شرکت بلاروسی Polymaster [۱۱]، پایش‌گر دروازه‌ای خودرویی مدل $\text{BDRM}-05$ [۱۲] ساخت شرکت ATOMTEX، پایش‌گر طیف‌سنج تابش خودرویی RadComm RC۷۰۰۰ شرکت Rapiscan/TSA ۸۵۰ و [۱۳] LAURUS Systems [۱۳] و TM- [۱۴] اشاره کرد.

طراحی و ساخت سیستم پایش‌گر دروازه‌ای خودرو برای آشکارسازی مواد پرتوزا به صورت تجاری در شرکت توسعه کاربرد پرتوهای ایران انجام شده است [۱۵] که در آن با توجه به تحقیقات فنی قبلی [۱۶-۱۸،۳]، از آشکارساز سوسوزن پلاستیک استفاده شده است. ابعاد و فاصله بهینه بین آشکارسازهای سوسوزن پلاستیک پایش‌گر با استفاده از شبیه‌سازی مونت کارلو انجام گرفته است که نتایج این شبیه‌سازی به تفصیل در این مقاله مورد بررسی قرار می‌گیرد. در ادامه، مقاله به بررسی انطباق عملکرد سیستم پایش‌گر دروازه‌ای خودرو با استاندارد بین‌المللی IEC ۶۲۲۴۴:۲۰۲۲ [۱۹] می‌پردازیم.

۲. استاندارد IEC ۶۲۲۴۴:۲۰۲۲

سند IEC ۶۲۲۴۴:۲۰۲۲، الزامات عملکرد پایش‌گر دروازه‌ای مورد استفاده برای تشخیص چشمه‌های ساطع کننده تشعشعات گاما و نوترون را تعریف می‌کند. بنابراین به طور معمول تست و ارزیابی پایش‌گرهای دروازه‌ای مطابق با بخش آزمون پذیرش پرتویی استاندارد بین‌المللی IEC ۶۲۲۴۴:۲۰۲۲ انجام می‌پذیرد

جدول (۳). سرعت حرکت چشمه در پایش‌گرهای مختلف [۱۹].

نوع پایش‌گر	سرعت حرکت چشمه (m/s)
فردی	$1/2 \pm 0/12$
سواری	$2/2 \pm 0/22$
کامیون و ریلی	$1/2 \pm 0/12$
بسته و یا نوار نقاله	$1/0 \pm 0/1$

جدول (۴). اکتیویته چشمه‌های آزمون [۱۹].

چشمه	اکتیویته
^{241}Am	$1.74 (= \text{MBq} 47/0.2 \mu\text{Ci})$
^{137}Cs	$0.7 \text{ MBq} (= 16/21 \mu\text{Ci})$
^{60}Co	$0.26 \text{ MBq} (= 7/0.2 \mu\text{Ci})$

در نهایت مشخصات چشمه‌های مورد آزمون پایش‌گرها در جدول ۴ بیان شده است. ذکر این نکته ضروری است که اکتیویته به همراه $0/25 \text{ mm}$ ضخامت فولاد ضد زنگ کپسوله شده در نظر گرفته شده است و بنابراین خطای مجاز ($+20\%$, -0%) برای آن در نظر گرفته شده است.

۱.۱.۲. شرایط تست عمومی آزمون‌ها

آزمون‌ها باید طوری انجام شوند که اطمینان حاصل شود که میانگین ضریب تغییرات^۴ (COV) برای هر خوانش کمتر یا مساوی ۱۲ درصد باشد. همین‌طور هنگام آزمایش با منابع رادیواکتیو باید COV کمتر یا مساوی ۱۲ درصد به دست آید. فرآیندهایی مانند افزایش سطح تشعشع یا افزایش تعداد خوانش‌ها معمولاً COV را تا حد قابل قبولی کاهش می‌دهد. هنگام آزمایش بدون حضور منابع رادیواکتیو، RPM نباید هیچگونه هشدار را صادر کند. فاصله زمانی بین هر خوانش باید به اندازه کافی طولانی باشد تا اطمینان حاصل شود که خوانش‌ها مستقل هستند. فاصله زمانی انتخاب شده به زمان به روز رسانی پاسخ مشخص شده پایش‌گر بستگی دارد.

۱.۱.۱.۲. شرایط عمومی قبل از انجام آزمون

در این آزمون، پایش‌گر را در معرض میدان تابش پرتو گاما (با استفاده از چشمه‌های ^{241}Am و ^{60}Co یا منابعی که پرتوهای گاما با انرژی کم و پراثری ساطع می‌کنند) قرار می‌دهند. برای تکرارپذیری لازم است موقعیت چشمه‌ها علامت‌گذاری شود. حداقل ۱۰ خوانش را با چشمه‌های موجود ثبت کرده و میانگین، انحراف معیار و ضریب تغییرات (COV) را برای هر سری از اندازه‌گیری‌های نرخ شمارش محاسبه و ثبت می‌کنیم. ضریب تغییرات مطابق با شرایط تست عمومی باید کمتر از ۱۲٪ باشد. محدوده پذیرش پاسخ به پرتو را $\pm 15\%$ درصد از میانگین محاسبه شده، تعیین می‌شود.

۲.۱.۲. آزمون هشدار کاذب

تعداد هشدارها، اعم از پرتو گاما یا نوترون، هنگامی که در یک ناحیه پس‌زمینه پایدار (فقط نوسانات طبیعی) در سطوح ذکر شده در جدول ۱ به کار می‌روند، باید کمتر از ۲ در یک دوره ۱۰ ساعته باشد.

روش انجام آزمون هشدار کاذب بدین صورت است که با استفاده از چشمه ^{137}Cs یا چشمه نوترونی در ارتفاع مرکزی گیت ۱۰ هشدار ایجاد کرده و سپس چشمه را حذف می‌کنیم. اگر از سنسورهای اشغال استفاده شود، فرآیند مورد نیاز برای ایجاد یک اشغال ۵ ثانیه برای پایش‌گر خودرو یا ۱ ثانیه اشغال برای عابر پیاده را ایجاد می‌کنیم. در طی یک دوره ۱۰ ساعته، اشغال مورد نیاز را هر ۳۵ ثانیه شروع می‌کنیم. نتایج هشدار نباید کمتر از ۱۰۲۸ اشغال باشد. اگر از سنسورهای اشغال استفاده نمی‌شود، نتایج پایش‌گر را به مدت ۱۰ ساعت ثبت می‌کنیم. نتیجه زمانی قابل قبول است که در طول دوره ۱۰ ساعته بیش از ۲ هشدار پرتو گاما یا ۲ آلارم نوترونی رخ ندهد. پس از ۱۰

⁴ Coefficient Variation

ساعت، تست تأیید هشدار را تکرار کرده تا مطمئن شویم که پایش‌گر در طول مدت زمان کارکرد، عملکرد صحیح دارد.

۳.۱.۲. آزمون تأثیرات پس زمینه

در صورتی که تغییر تدریجی در پس‌زمینه رخ دهد که به اندازه کافی بزرگ بوده که باعث ایجاد تغییر اساسی در قابلیت تشخیص شود، به عنوان مثال، از منبع پرتویی که به آرامی نزدیک می‌شود، پایش‌گر باید علامت هشدار ارائه دهد.

روش انجام آزمون تأثیرات پس زمینه بدین صورت است که چشمه ^{137}Cs را در فاصله حداقل ۸ متری از پنل(های) آشکارسازی در ارتفاع میانی قرار داده و چشمه را به صورت افقی به سمت ناحیه آشکارسازی بدون ایجاد اشغال با سرعتی که ۱۰ درصد از سرعت مشخص شده در جدول ۳ است، حرکت می‌دهیم. اگر پایش‌گر قبل از یا زمانی که چشمه در ناحیه آشکارسازی قرار دارد، هشدار دهد یا نشان دهد که پس‌زمینه تغییر کرده است، نتایج قابل قبول هستند. این روند را در ۳ آزمایش تکرار کرده و پس از هر بار موفقیت آزمون، چشمه به نقطه شروع منتقل می‌شود.

۴.۱.۲. آزمون آشکارسازی تابش‌های گاما

زمانی که سطح تشعشعات گامای اندازه‌گیری شده از آستانه هشدار گاما در طول اشغال بیشتر باشد، زنگ هشدار می‌بایست فعال گردد. این نیاز باید با استفاده از هر سه چشمه ^{241}Am ، ^{60}Co و ^{137}Cs آزمایش شود.

روش انجام آزمون آشکارسازی تابش‌های گاما بدین صورت است که هر چشمه آزمایش باید به صورت افقی از بالا، مرکز و پایین منطقه تشخیص در سرعت و فاصله آزمایشی برای آن نوع پایش‌گر خاص که در جدول‌های ۲ و ۳ ارائه شده است، حرکت کند. باید ۲۰ آزمایش برای هر ارتفاع انجام شود تا در مجموع ۶۰ آزمایش در هر چشمه آزمایش با حداقل ۱۰ ثانیه

تأخیر بین هر آزمایش به دست آید. پاسخ پایش‌گر زمانی قابل قبول در نظر گرفته می‌شود که زنگ هشدار در حداقل ۵۹ آزمایش از ۶۰ آزمایش برای هر یک از رادیونوکلیدهای آزمایشی رخ دهد.

۵.۱.۲. آزمون پاسخ فراتر از محدوده

یک پایش‌گر باید وضعیت در معرض نرخ دز معادل محیطی بیشتر از حداکثر تعریف شده را نشان دهد. پس از فعال شدن هشدار، باید امکان بی‌صدا کردن هشدار صوتی بدون تأثیر بر نشانه‌های بصری وجود داشته باشد. پایش‌گر باید در عرض ۱ دقیقه پس از بازگشت به نرخ دز معادل محیط به سطح قبل از قرار گرفتن در معرض آن دز بیشینه به حالت غیرآلارم بازگردد. در این آزمون، ابتدا حداکثر نرخ دز معادل محیط توسط سازنده را در نظر گرفته و با استفاده از چشمه(های) پرتو گاما، فاصله آزمون مورد نیاز برای تولید نرخ دز معادل محیطی ۱/۵ برابر حداکثر نرخ اعلام شده را مشخص می‌نماییم. این فاصله برای تعیین موقعیت چشمه استفاده خواهد شد. سپس چشمه آزمایش را در ناحیه آشکارسازی حرکت داده و هنگامی که وضعیت بیش از حد مشخص شد، منبع را برای مدت ۱ دقیقه متوقف می‌کنیم. در طول این مدت، هشدار صوتی را خاموش کرده تا مطمئن شویم که نشانه بصری فعال باقی می‌ماند. پس از ۱ دقیقه، چشمه آزمایش را از ناحیه خارج کرده و بررسی می‌کنیم که پایش‌گر در عرض ۱ دقیقه به عملکرد عادی خود برسد. آزمایش را در مجموع ۳ بار تکرار می‌کنیم. در صورتی که هر ۳ آزمایش موفقیت آمیز باشد، پایش‌گر قابل قبول در نظر گرفته می‌شود.

۳. طراحی و ساخت پایش‌گر دروازه‌ای پرتویی

در سامانه پایش‌گر تولیدی از چهار آشکارساز سوسوزن پلاستیک PVT و همین‌طور چهار PMT استفاده شده است

پایش‌گر حداقل اکتیویته قابل تشخیص است که برای این سامانه مورد محاسبه قرار گرفته شده است. لازم به ذکر است که محاسبه MDA خارج از الزامات استاندارد IEC 6۲۲۴۴:۲۰۲۲ است.

۱.۴. شبیه‌سازی مونت کارلو ابعاد و فاصله بین آشکارسازها

از پارامترهای مهم در طراحی و ساخت سامانه پایش‌گر دروازه‌ای خودرو، ابعاد و فاصله بین دو آشکارساز است و می‌توان با شبیه‌سازی، ترابرد پرتوهای گاما برای اندازه‌گیری نرخ شمارش دروازه پایش‌گر با ابعاد مختلف آشکارساز و فاصله بین آشکارسازها انجام داد. بنابراین دو صفحه پلاستیکی سوسوزن در یک سمت با عرض‌های مختلف ۲۵، ۵۰ و ۱۰۰ سانتی‌متر و با طول ۱۰۰ سانتی‌متر در هر طرف پایش‌گر شبیه‌سازی شد. هر کدام از این صفحات سوسوزن در یک سمت به ازای فواصل جداشدگی ۰، ۳۰، ۶۰، ۹۰ و ۱۲۰ سانتی‌متر در شبیه‌سازی در نظر گرفته شدند.

به ازای سه چشمه پرکاربرد صنعتی رادیواکتیو گاما از ^{137}Cs ، ^{60}Co و ^{241}Am 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 ادامه سناریوهای مختلف شبیه‌سازی ارائه شده است.

سناریو ۱: در شکل ۲، تغییرات مجموع نرخ شمارش ۴ صفحه آشکارسازی برای چشمه رادیواکتیو گاما از ^{137}Cs ، ^{60}Co و ^{241}Am در موقعیت فضای بینابینی دو صفحه و به ازای ارتفاع‌های ۳ گانه ۲۰، ۲۲۵ و ۴۵۰ سانتی‌متری و فواصل جداشدگی صفحات دوگانه بالا و پایین در هر دو طرف برای ابعاد مختلف $100 \times 25 \text{ cm}^2$ ، $100 \times 50 \text{ cm}^2$ و $100 \times 100 \text{ cm}^2$ آشکارساز آورده شده است. آنچه از شکل ۲ قابل استنباط است،

[۱۵]. برای به دست آوردن ابعاد و فاصله بین آشکارسازها، از شبیه‌سازی مونت کارلو کد هسته‌ای MCNPX استفاده شده است. بر مبنای استاندارد IEC-6۲۲۴۴ و با توجه به همگن بودن ماده آشکارسازهای مورد استفاده، مسئله مهم جانمایی چیدمان آشکارسازها به نحوی است که کمترین فضای مرده از بابت آشکارسازی پرتو ایجاد شود، بنابراین بردهای الکترونیکی در فضای خالی بین دو آشکارساز قرار داده شد. با توجه به ابعاد کامیون‌ها، دو پنل آشکارسازی از هم در فاصله ۴/۵ متر قرار داده شده‌اند. شماتیکی از چینش آشکارسازها در پایش‌گر دروازه‌ای پرتویی در شکل (۱) ارائه شده است. قاعدتاً هر یک از چهار آشکارساز شمارش بیشتری داشته باشد احتمال وجود چشمه در نزدیکی آن آشکارساز را بیشتر می‌کند و می‌توان مکان تقریبی چشمه را حدس زد. داده‌های ارسال شده از طرف دستگاه پایش‌گر شامل اطلاعات آشکارسازها و اطلاعات کنترلی توسط رایانه پردازش می‌شود.



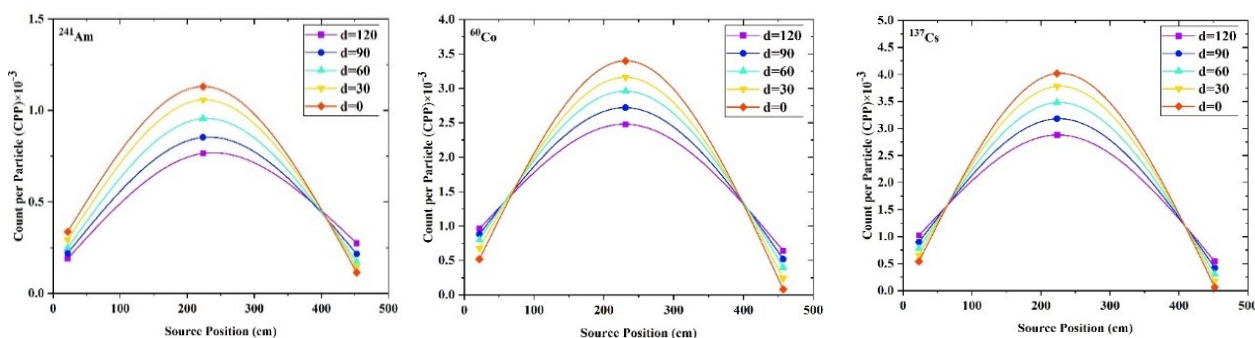
شکل (۱). سامانه پایش‌گر پرتویی.

۴. نتایج

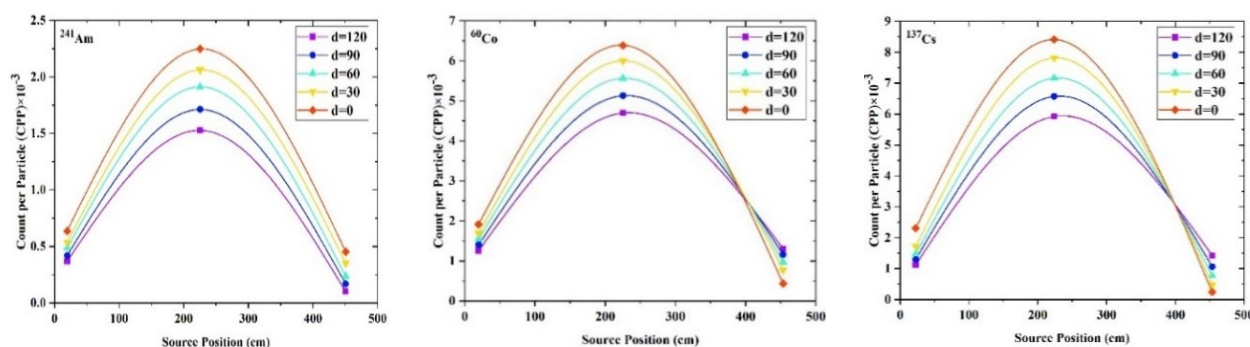
در مرحله طراحی سامانه پایش‌گر پرتویی، از شبیه‌سازی مونت کارلوی کد MCNPX استفاده شد. برای بررسی کنترل کیفی و صحت عملکرد سامانه پایش‌گر پرتویی تست و ارزیابی‌هایی بر اساس استاندارد IEC 6۲۲۴۴:۲۰۲۲ انجام شد که در ادامه آورده می‌شود. همچنین یکی از پارامترهای مهم عملکردی سامانه

به این قرار است که روند آهنگ نرخ شمارشی مجموع به مانند مورد قبل است. با تغییر ابعاد آشکارسازها و افزایش ابعاد و مقایسه به این نتیجه می‌رسیم که آهنگ نرخ شمارشی مجموع نیز متناسب با افزایش ابعاد صفحات آشکارسازی، افزایش می‌یابد.

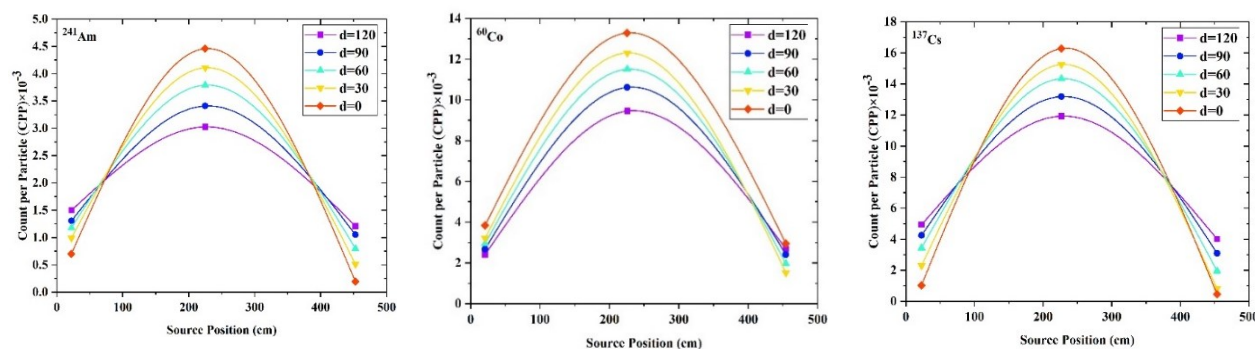
در فاصله ۲۲۵ سانتی‌متری از زمین با بیشترین مقدار نرخ شمارشی مجموع مواجه هستیم. با افزایش فاصله بین دو صفحه آشکارساز در هر سمت دروازه پایش‌گر با کاهش آهنگ نرخ شمارشی مجموع در موقعیت چشمه در وسط و افزایش آهنگ نرخ شمارشی مجموع در فواصل ۲۰ و ۴۵۰ سانتی‌متر از زمین روبرو می‌شویم. آنچه از شکل‌های ۲ تا ۴ قابل استنباط است،



شکل (۲). نمودار تغییرات مجموع نرخ شمارش ۴ صفحه آشکارسازی با ابعاد ۲۵ × ۱۰۰ سانتی‌متر مربع به ازای ارتفاع‌های ۳ گانه ۲۰، ۲۲۵ و ۴۵۰ سانتی‌متری برای چشمه‌های ^{241}Am و ^{60}Co ، ^{137}Cs .



شکل (۳). نمودار تغییرات مجموع نرخ شمارش ۴ صفحه آشکارسازی با ابعاد ۵۰ × ۱۰۰ سانتی‌متر مربع به ازای ارتفاع‌های ۳ گانه ۲۰، ۲۲۵ و ۴۵۰ سانتی‌متری برای چشمه‌های ^{241}Am و ^{60}Co ، ^{137}Cs .



شکل (۴). نمودار تغییرات مجموع نرخ شمارش ۴ صفحه آشکارسازی با ابعاد ۱۰۰ × ۱۰۰ سانتی‌متر مربع به ازای ارتفاع‌های ۳ گانه ۲۰، ۲۲۵ و ۴۵۰ سانتی‌متری برای چشمه‌های ^{241}Am و ^{60}Co ، ^{137}Cs .

عملکرد پایش چشمه عبوری به صورت مستقل از ارتفاع عبور آن است.

سناریو ۳: با توجه به این که دو پارامتر مهم در تعیین فاصله جداشدگی بهینه صفحات سوسوزنی در هر دو طرف دروازه آشکارساز و از طرفی حساسیت بالا در خوانش و ردگیری چشمه عبوری (مقادیر نرخ شمارش بزرگ) و از طرف دیگر تغییرات کمتر در بازه دینامیکی تغییرات نرخ شمارش مجموع (هموارتر بودن بازه دینامیکی) است، لذا معادله‌ی (۱) بدین صورت قابل ارائه است:

$$C = \frac{cpp_{max} \times 100}{dynamic\ range(\%)} \quad (1)$$

شرایط بهینه زمانی است که با بیشینه صورت و کمینه مخرج کسر مواجهیم و به عبارتی پارامتر C مقداری بیشینه را به خود اختصاص دهد. با رسم نمودار تغییرات C برحسب انرژی با فواصل مختلف جداشدگی صفحات سوسوزنی در هر دو طرف این امکان فراهم می‌شود که بتوانیم موقعیت بهینه را به وضوح مشاهده کنیم که این مورد در شکل ۶ آورده شده است.

با افزایش انرژی چشمه گامای عبوری از دروازه پایش‌گر با افزایش و در ادامه کاهش مقدار پارامتر C روبرو می‌شویم. هرچه مقدار جداشدگی صفحات سوسوزنی در هر دو طرف بزرگتر باشد مقدار C عددی بزرگتر را به خود اختصاص می‌دهد که در بیشترین حالت حداکثر ۱۴٪ و بین دو وضعیت جداشدگی صفحات ۰ و ۱۲۰ سانتی‌متری اتفاق می‌افتد.

۲.۴. نتایج انجام آزمون پذیرش پرتویی

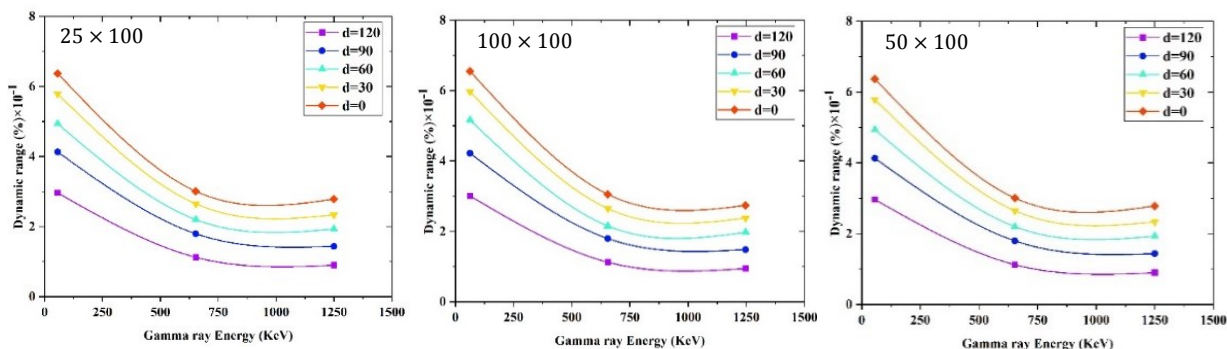
مطابق با سند استاندارد IEC، تست و ارزیابی سامانه پایش‌گر انجام پذیرفت که نتایج هر بخش به تفکیک آورده می‌شود.

همان‌طور که دیده می‌شود با افزایش پهنای دو برابری صفحات از ۲۵ به ۵۰ سانتی‌متر، شدت شمارش حدوداً ۲ برابر شده است اما سایر روندهای حاکم بر آهنگ شمارش به‌ازای تغییر در فاصله بین دو صفحه واقع در هر سمت دروازه و موقعیت قرارگیری چشمه تغییرات محسوسی نداشته است.

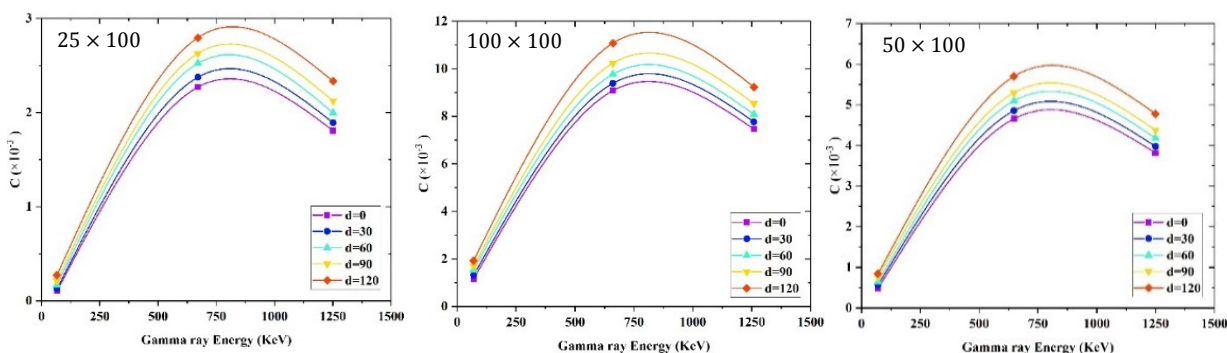
نکته جالب توجه این است که با بزرگتر شدن پهنای صفحات، تغییرات متفاوتی را شاهد نیستیم، برای مثال با افزایش پهنای صفحات به ۱۰۰ سانتی‌متر، تغییراتی در روندهای مشاهده شده شبیه‌سازی با هندسه قبلی وجود ندارد.

پهنای صفحات از ۲۵ به ۱۰۰، مقادیر متناظر آهنگ شمارش حدوداً ۴ برابر شده است اما سایر روندهای حاکم بر تغییرات آهنگ شمارش به‌ازای تغییر در فاصله بین دو صفحه واقع در هر سمت دروازه و نیز تغییر در موقعیت قرارگیری چشمه تغییرات محسوسی نمی‌کند و همانند قبل می‌ماند.

سناریو ۲: شکل ۵، تغییرات درصدی بیشینه نرخ شمارش مجموع صفحه آشکارسازی با انرژی‌های ۳ گانه ۶۰، ۶۶۲ و ۱۲۵۰ کیلوکلوکرون‌ولت مربوط به چشمه‌های رادیواکتیو گاما از ^{241}Am ، ^{137}Cs و ^{60}Co با فواصل جداشدگی مختلف صفحات دوگانه بالا و پایین در هر دو طرف را نشان می‌دهد. با توجه به شکل ۵، مشخص است که با تغییر در ابعاد صفحات آشکارسازی، تغییر محسوسی در بازه دینامیکی تغییرات نرخ شمارش مجموع در انرژی خاص و فاصله جداشدگی معین دیده نمی‌شود و به عبارتی بازه دینامیکی مستقل از ابعاد سوسوزن رفتار می‌کند. با افزایش هرچه بیشتر فاصله جداشدگی صفحات سوسوزنی هر دو طرف دروازه پایش‌گر با کاهش بیشتر در مقدار تغییرات درصدی بیشینه نرخ شمارش مجموع مواجه می‌شویم که به معنای هرچه هموارتر شدن بازه دینامیکی و به عبارتی



شکل (۵). نمودار تغییرات مجموع نرخ شمارش صفحات آشکارسازی به ازای فواصل مختلف برای چشمه‌های ^{137}Cs ، ^{60}Co و ^{241}Am .



شکل (۶). رسم نمودار تغییرات C برحسب انرژی با فواصل مختلف جداشدگی صفحات سوسوزنی.

۱.۲.۴. نتایج آزمون عمومی

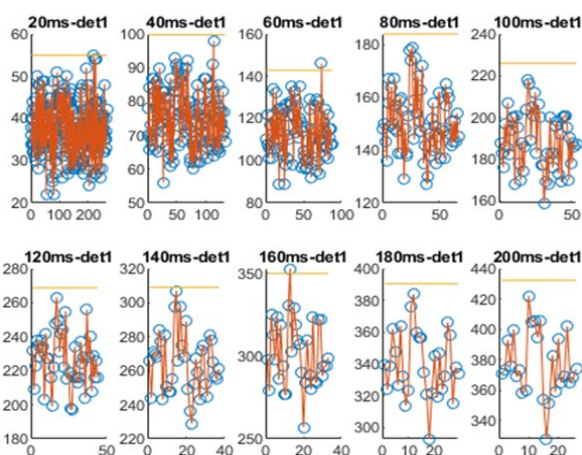
ضریب تغییرات برای داده‌ها در جدول ۵ محاسبه شده است. در شکل ۷، تغییرات شمارش ۴ پنل آشکارسازی در ۳۰ خوانش آورده شده است و همان‌طور که ملاحظه می‌شود ضریب تغییرات مطابق با شرایط تست عمومی کمتر از ۱۲٪ است.

پایش‌گر در معرض میدان تابش پرتو گاما چشمه ^{60}Co قرار گرفته و تعداد ۳۰ خوانش با استفاده از چشمه مذکور و با فواصل نمونه برداری ۱ ثانیه ثبت گردید. میانگین، انحراف معیار و

جدول (۵). اندازه‌گیری میانگین، انحراف معیار و ضریب تغییرات برای آزمون عمومی در زمان نمونه‌برداری ۱ ثانیه.

شماره پنل آشکارسازی	میانگین شمارش‌ها (cps)	انحراف معیار	ضریب تغییرات (%)
پنل ۱	۱۹۹۲/۲۷۶	۴۹/۹۱۹۵۳۵۲۵	۲/۵۰۵۶۵۳۵۹۷
پنل ۲	۱۹۷۷/۸۲۸	۴۷/۸۳۲۵۹۰۰۱	۲/۴۱۸۴۴۰۳۳
پنل ۳	۲۳۳۲/۲۷۶	۶۳/۷۵۴۰۰۶۴۱	۲/۷۳۳۵۵۳۲۵۱
پنل ۴	۲۱۲۰/۳۱۰	۴۲/۸۵۰۵۰۲۴	۲/۰۲۰۹۵۴۵۹۶

است که در صورتی که دو رخداد متوالی از مجموع شمارش زمینه و سطح آستانه فراتر رود، سیستم هشدار فعال خواهد شد. در شکل ۸، به صورت نمونه‌ای تغییرات آهنگ شمارش برای پنل آشکارسازی اول به همراه سطح آستانه آن مشخص شده است.



شکل (۸). تغییرات آهنگ شمارش در پنل شماره ۱ در زمان‌های

نمونه‌برداری متفاوت (توجه: در نمونه‌برداری‌های ۲۰، ۶۰ و ۱۶۰

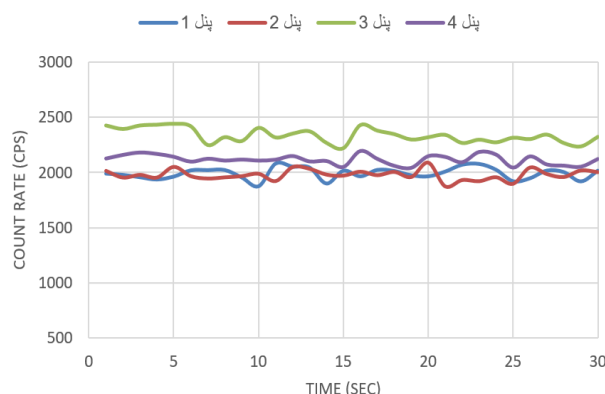
میلی‌ثانیه یک رخداد فراتر از آستانه ثبت شده است اما سیستم هشدار

فعال نمی‌گردد، زیرا می‌بایست حتماً ۲ رخداد متوالی فراتر از آستانه

ثبت گردد تا سیستم هشدار فعال شود).

۳.۲.۴. نتایج آزمون تاثیرات پس زمینه

در این آزمون ابتدا سنسورهای اشغال^۵ دستگاه غیر فعال گردید و مد دستگاه در حالت آنالیز یا Manual Scan تنظیم گردید. سطح آستانه در $\pm 2/\sqrt{S}$ ، زمان نمونه برداری ۱۰۰ ms و زمان به روز رسانی شمارش زمینه در ۳۰ تنظیم گردید. سپس در ادامه در این آزمون چشمه ^{137}Cs با $16 \mu\text{Ci}$ در فاصله ۸ متری از پنل‌های آشکارسازی قرار گرفت. چشمه مذکور توسط فردی با سرعت 0.22 m/s به ورودی پایش‌گر نزدیک شد. زمانی که چشمه در فاصله ۲ متری از ناحیه آشکارسازی دستگاه قرار می‌گرفت، شمارش زمینه به سرعت افزایش یافت و سیستم



شکل (۷). تغییرات آهنگ شمارش ۴ پنل آشکارسازی در ۳۰ خوانش.

۲.۲.۴. نتایج آزمون هشدار کاذب

در ابتدا با استفاده از چشمه ^{137}Cs با اکتیویته ۱۶ میکروکوری در ارتفاع مرکزی گیت (۲/۲۵ متری) ۱۰ خوانش صورت پذیرفت. در تمامی خوانش‌ها سیستم هشدار فعال شده و اعلام وجود ماده رادیواکتیو را دارد. سپس چشمه از میدان آشکارسازی حذف شد و سیستم هشدار به‌طور کامل به‌صورت آنی و خودکار غیر فعال گردید. در ادامه برای انجام این آزمون، با توجه به این‌که از سنسورهای اشغال استفاده شده و پایش‌گر مورد استفاده خودرویی بوده، در طی یک دوره ۱۰ ساعته، اشغال مورد نیاز در هر ۳۵ ثانیه شروع و مدت زمان اشغال ۵ ثانیه تنظیم گردید. از ساعت ۱۵ ظهر خوانش انجام پذیرفت و در ساعت ۱ بامداد خوانش‌ها متوقف گردید. مقدار سطح تبعیض در $2/\sqrt{S}$ و فواصل زمان نمونه‌برداری ۱۰۰ میلی‌ثانیه تنظیم گردید و در ۱۰۲۸ خوانش ۱۰ ساعته هیچ هشدار توسط پایش‌گر صادر نشد. لازم به ذکر است که فواصل زمان نمونه‌برداری در ۲۰، ۴۰، ۶۰، ۸۰، ۱۰۰، ۱۲۰، ۱۴۰، ۱۶۰، ۱۸۰ و ۲۰۰ میلی‌ثانیه قابل تنظیم است. با توجه به تست‌های متعدد و آنالیز پاسخ آن‌ها مناسب‌ترین زمان نمونه‌برداری ۱۰۰ میلی‌ثانیه انتخاب گردید.

الگوریتم سیستم هشدار پایش‌گر به گونه‌ای پیاده‌سازی شده

⁵ occupancy

هشدار پایش‌گر فعال می‌گردد. این آزمون ۳ مرتبه تکرار گردید و در هر ۳ آزمون، نتایج موفقیت آمیز بود.

۴.۲.۴. نتایج آزمون آشکارسازی تابش‌های گاما

چشمه‌های ^{137}Cs و ^{60}Co با اکتیویته‌های به ترتیب ۱۶ و ۷ میکروکوری بر روی خودرویی در ارتفاع‌های ۰/۲، ۲/۲۵ و ۴/۵ متری نصب گردید و خودرو با سرعت $0/12 \pm 1/2$ متر بر ثانیه ($1/32 < \text{سرعت} < 1/08$ متر بر ثانیه) از گذرگاه پایش‌گر عبور می‌کند. تعداد ۲۰ عبور خودرو در داخل گیت مورد ارزیابی قرار گرفته و تمامی ۲۰ خوانش برای هر ارتفاع و چشمه ثبت می‌گردد که برای نمونه، یک خوانش در جدول ۶ آورده می‌شود. با توجه به عدم دسترسی به چشمه ^{241}Am با اکتیویته ۴۷ میکروکوری، تست‌ها با این چشمه انجام نشده است. موقعیت‌های قرارگیری چشمه‌ها بر روی خودرو در ارتفاع‌های ۰/۲، ۲/۲۵ و ۴/۵ متری قرار دارد. در جدول ۶، یکی از نتایج اندازه‌گیری برای آزمون تابش گاما برای چشمه‌های ^{137}Cs و ^{60}Co برای ۴ پنل آشکارسازی در زمان نمونه‌برداری ۱۰۰ میلی‌ثانیه ارائه شده است. سطح وضعیت‌های هشدار \checkmark نشان از اعلام هشدار توسط پایش‌گر و \times بیان‌گر عدم هشدار است. لازم به ذکر است، در صورتی که یک از پنل‌های آشکارسازی اعلام هشدار نماید کل سیستم هشدار پایش‌گر فعال خواهد شد. بنابراین سیستم هشدار وابسته به آهنگ شمارش پنبلی است که زودتر از آستانه حد مجاز فراتر رود. همچنین یادآور می‌گردد که حتماً دو رخداده متوالی (شمارش پرتوهای ناشی از وجود چشمه در گذر زمان) می‌بایست بالاتر از حد آستانه ($\pm 2/7\sigma$) باشد تا سیستم هشدار فعال شود. با توجه به نتایج جدول ۶، برای چشمه‌های ^{137}Cs و ^{60}Co تعداد ۵۸ و ۵۹ آزمون به ترتیب از ۶۰ آزمون برای هر یک از چشمه‌ها موفقیت آمیز بوده است و سیستم هشدار فعال شده است. در ارتفاع ۰/۲ متری در دو خوانش برای

چشمه ^{137}Cs و یک خوانش برای چشمه ^{60}Co سیستم هشدار در هیچکدام از ۴ تا از پنل آشکارسازی فعال نشده بود. یکی از دلایل آن می‌توان به پایین بودن زمان اسکن خودرو (۵ ثانیه) توسط پایش‌گر اشاره کرد که با افزایش این زمان پیش‌بینی می‌شود که سیستم‌های هشدار به طور کامل برای تمامی ۱۲۰ آزمون فعال گردد.

۵.۲.۴. نتایج آزمون پاسخ فراتر از محدوده

در این آزمون چشمه ^{137}Cs با اکتیویته ۴ mCi در محلی از سطح پنل آشکارساز به مدت ۱ دقیقه قرار گرفت تا ماکزیمم آهنگ شمارش در آشکارساز ثبت گردد. در این مدت هشدار صوتی که توسط حضور چشمه فعال شده بود، خاموش گردید ولی همچنان هشدارهای نوری بر روی پنل‌های آشکارسازی فعال بود. سپس پس از حذف چشمه شمارش‌های آشکارساز پس از مدت زمان کمتر یک دقیقه به آهنگ شمارش پس زمینه رسید. این روند ۳ بار تکرار گردید و در هر ۳ مرتبه اتفاقی مشابه تکرار گردید. بیشینه آهنگ شمارشی که در آشکارساز ثبت شده، ۱۲۰ هزار شمارش بر ثانیه بود.

۳.۴. حداقل اکتیویته قابل تشخیص دستگاه

برای آن‌که یک چشمه قابل تشخیص باشد، باید اختلاف بین میانگین شمارش چشمه و میانگین شمارش زمینه از حاصل ضرب سطح اطمینان در جمع انحراف معیار شمارش چشمه و انحراف معیار شمارش زمینه بیشتر باشد.

در حداقل اکتیویته قابل تشخیص دستگاه، چشمه‌های ^{60}Co با اکتیویته $0/7 \mu\text{Ci}$ و ^{137}Cs با اکتیویته $1/5 \mu\text{Ci}$ در فاصله ۱۰۰ cm از هر پنل قرار داده و میزان شمارش در بازه زمانی یک ثانیه، ۳۰ بار خوانده شد و میزان میانگین و انحراف معیار خوانش‌ها با میزان میانگین و انحراف معیار زمینه مقایسه شده است و در انحراف معیارهای مختلف این میزان گزارش می‌شود.

جدول (۶). یکی از نتایج اندازه‌گیری آزمون آشکارسازی تابش گاما برای چشمه‌های ^{137}Cs و ^{60}Co برای ۴ پنل آشکارسازی در زمان نمونه‌برداری ۱۰۰ میلی‌ثانیه.

پنل ۴	پنل ۳	پنل ۲	پنل ۱	ارتفاع	چشمه
				۰/۲ متر	^{137}Cs
✓	✓	✓	✓	وضعیت هشدار	
				۲/۲۵ متر	^{137}Cs
✓	✓	✓	✓	وضعیت هشدار	
				۴/۵ متر	^{137}Cs
×	✓	×	✓	وضعیت هشدار	
				۰/۲ متر	^{60}Co
✓	✓	✓	✓	وضعیت هشدار	
				۲/۲۵ متر	^{60}Co
✓	✓	✓	✓	وضعیت هشدار	
				۴/۵ متر	^{60}Co
×	✓	✓	✓	وضعیت هشدار	

جدول (۷). اندازه‌گیری حداقل اکتیویته قابل تشخیص با چشمه ^{14}C و اکتیویته ۰/۷ میکروکوری در فاصله ۱۰۰ سانتی‌متری از هر پنل آشکارسازی.

پارامتر	آشکارساز ۱	آشکارساز ۲	آشکارساز ۳	آشکارساز ۴
(cm) فاصله چشمه از آشکارساز	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰
(m_1) میانگین چشمه	۲۵۷۷/۷۳۳	۲۳۹۶/۸۳۳	۲۳۳۵/۴۰۰	۲۴۰۷/۶۳۳
(σ_1) انحراف معیار چشمه	۱۱۰/۶۲۱	۹۵/۸۹۷	۶۴/۸۴۴	۶۷/۱۰۶۹
(m_2) میانگین زمینه	۱۹۸۳/۴۰۰	۱۹۴۸/۸۶۷	۱۸۷۱/۷۶۷	۱۹۸۹/۸۶۷
(σ_2) انحراف از معیار زمینه	۴۸/۰۷۲	۴۷/۴۰۷	۴۰/۷۳۸	۵۱/۲۹۳
$(m_1 - m_2) - 2.7 * \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2}$	۲۶۸/۶۷۳۱	۱۵۹/۱۳۳۴	۲۵۶/۸۷	۱۸۹/۷۱۱
2.7σ	Ok	Ok	Ok	Ok

جدول (۸). اندازه‌گیری حداقل اکتیویته قابل تشخیص با چشمه ^{137}Cs و اکتیویته ۱/۵ میکروکوری در فاصله ۱۰۰ سانتی‌متری از هر پنل آشکارسازی.

پارامتر	آشکارساز ۱	آشکارساز ۲	آشکارساز ۳	آشکارساز ۴
(cm) فاصله چشمه از آشکارساز	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰
(m_1) میانگین چشمه	۲۶۰۹/۵۰۰	۲۴۰۱/۹۳۳	۲۴۹۷/۰۳۳	۲۵۴۴/۴۰۰
(σ_1) انحراف معیار چشمه	۶۲/۳۰۶	۷۶/۳۶۱	۵۸/۹۰۳۴۸	۹۱/۶۰۹
(m_2) میانگین زمینه	۲۰۱۲/۲۶۷	۱۹۲۶/۲۳۳	۱۹۱۳/۵۰۰	۲۰۱۲/۲۳۳
(σ_2) انحراف از معیار زمینه	۴۷/۱۴۰	۳۸/۴۰۵	۴۴/۸۲۱	۴۳/۸۵۱
$(m_1 - m_2) - 2.7 * \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2}$	۳۸۶/۲۸۳۴	۲۴۴/۹۱۸	۳۸۳/۶۸۶۶	۲۵۷/۹۴۵۹
2.7σ	Ok	Ok	Ok	Ok

با روشی مشابه، در حد وسط سازه‌های آشکارساز (خطی) که به صورت مورب افقی با سطح زمین و از محور تقارن وسیله می‌گذرد و از هر چهار آشکارساز فاصله یکسان دارد) مقدار حداقل اکتیویته قابل تشخیص برای چشمه ^{14}C با اکتیویته ۴/۳ میکروکوری و ^{137}Cs با اکتیویته ۹/۴ میکروکوری با سطح تبعیض 2.7σ به دست آمد.

همان‌طور که در جدول‌های ۷ و ۸ نشان داده شده است، سیستم آشکارسازی توانایی تشخیص چشمه ^{14}C با اکتیویته ۰/۷ میکروکوری و ^{137}Cs با اکتیویته ۱/۵ میکروکوری را در ۱۰۰ سانتی‌متر با سطح تبعیض 2.7σ دارد. لازم به ذکر است در صورتی که حداقل یک پنل از ۴ پنل آشکارسازی اعلام هشدار نماید، سیستم آلام پایش‌گر دروازه ای فعال خواهد شد.

۵. نتیجه گیری

با توجه به اهمیت و جایگاه ویژه پایش گرهای دروازه‌ای در جلوگیری از حمل و نقل غیر قانونی مواد پرتوزا، پروژه‌ای در راستای طراحی، ساخت و ارزیابی عملکرد پایش گر دروازه‌ای خودرویی انجام شد. در ابتدا پس از انجام مطالعات اولیه، مروری بر نمونه‌های موجود پایش گر دروازه‌ای صورت گرفته و نحوه عملکرد آن‌ها بررسی و ارزیابی شد. شدت پس‌زمینه محیط، چیدمان و نوع آشکارسازهای تابشی، روش نظارت، اندازه خودروی تحت نظارت و سرعت خودرو از مهم‌ترین عواملی که بر عملکرد یک پایش گر دروازه‌ای خودرویی تأثیر می‌گذارند. در شکل‌های ۲ تا ۵، شبیه‌سازی مونت کارلو در طراحی سیستم آشکارسازی پایش گر دروازه‌ای صورت پذیرفته و انتخاب و نوع دقیق مشخصات آشکارسازی برای ساخت یک پایش گر دروازه‌ای خودرویی به‌دست آمده است. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که آشکارساز سوسوزن پلاستیک 100×100 سانتی‌متر مربع بازدهی شمارش بیشتری از دو آشکارساز دیگر دارد اما با توجه به قیمت تمام شده برای این ابعاد از پلاستیک سوسوزن، آشکارساز 100×50 سانتی‌متر مربع هم از لحاظ قیمت و هم از لحاظ بازدهی شمارش انتخاب بهینه‌ای است. بنابراین با توجه به اهمیت همزمان پارامتر C، حساسیت در شمارش و قیمت تمام شده محصول، مقدار جداشدگی صفحات سوسوزنی 60 سانتی‌متر به همراه ابعاد سوسوزنی 100×50 سانتی‌متر مربع برای ساخت نهایی دروازه پایش گر انتخاب گردید. با توجه به این‌که با استفاده از نتایج مطالعاتی و شبیه‌سازی این پروژه اقدام به ساخت یک پایش گر دروازه‌ای خودرویی شده است و مهمترین بخش در سیستم‌های پایش گر مواد هسته‌ای سیستم‌های آشکارسازی و شمارش آن‌هاست، کنترل کیفی این سیستم‌ها باید مورد ارزیابی باید قرار گیرد. بنابراین ارزیابی مطابق با استاندارد

IEC 62244:2022 صورت گرفت. تست‌ها و ارزیابی‌ها پرتویی

و نتایج آن‌ها شامل موارد زیر است:

در آزمون عمومی پایش گر در معرض چشمه ^{60}Co قرار گرفته و تعداد ۳۰ خوانش با استفاده از چشمه با فواصل نمونه برداری ۱ ثانیه ثبت گردید. با استفاده از نتایج ضریب تغییرات مطابق با شرایط تست عمومی کمتر از برای هر پنل کمتر از ۳٪ به‌دست آمده است.

در آزمون هشدار کاذب در طی یک دوره ۱۰ ساعته، اشغال ۵ ثانیه‌ای و با تاخیر ۳۵ ثانیه نتایج به‌دست آمد. مقدار سطح تبعیض در $\pm 2/75$ و فواصل زمان نمونه‌برداری ۱۰۰ میلی‌ثانیه تنظیم گردید و در ۱۰۲۸ خوانش ۱۰ ساعته هیچ هشدار توسط پایش گر صادر نشد.

در آزمون تأثیرات پس‌زمینه چشمه ^{137}Cs با اکتیویته $16 \mu\text{Ci}$ در فاصله ۸ متری از پنل‌های آشکارسازی قرار گرفت. چشمه مذکور توسط فردی با سرعت $0/22 \text{ m/s}$ به ورودی پایش گر نزدیک شد. زمانی که چشمه در فاصله ۲ متری از ناحیه آشکارسازی دستگاه قرار می‌گرفت، شمارش زمینه به سرعت افزایش یافت و سیستم هشدار پایش گر فعال می‌گردید. این آزمون ۳ مرتبه تکرار گردید و در هر ۳ آزمون، نتایج موفقیت آمیز بود.

در آزمون آشکارسازی تابش‌های گاما، چشمه‌های ^{137}Cs و ^{60}Co با اکتیویته‌های به ترتیب ۱۶ و ۷ میکروکوری بر روی خودرویی در ارتفاع‌های ۰/۲، ۲/۲۵ و ۴/۵ متری نصب گردید و خودرو با سرعت $0/12 \pm 1/2$ متر بر ثانیه از گذرگاه پایش گر عبور می‌کند. تعداد ۲۰ عبور خودرو در داخل گیت مورد ارزیابی قرار گرفته و تمامی ۲۰ خوانش برای هر ارتفاع و چشمه ثبت گردید. با توجه به نتایج، برای چشمه‌های ^{137}Cs و ^{60}Co تعداد ۵۸ و ۵۹ آزمون به ترتیب از ۶۰ آزمون برای هر یک از چشمه‌ها

می‌رسد. در نهایت به‌منظور به‌دست آوردن حداقل اکتیویته قابل تشخیص دستگاه، با استفاده از نتایج سیستم آشکارسازی، این پایش‌گر توانایی تشخیص چشمه ^{60}Co با اکتیویته 0.7 میکروکوری و ^{137}Cs با اکتیویته $1/5$ میکروکوری را در 100 سانتی‌متر با سطح تبعیض $2/75 \pm$ دارد. شایان به ذکر است که این پایش‌گر پرتویی برای مطابقت با الزامات استانداردهای نظارت بر آلودگی پرتویی در پاسخ‌های اضطراری رادیولوژیکی طراحی و ساخته شده است و عملکردهای فنی آن قابل قیاس با پایش‌گرهای تجاری موجود است.

موفقیت آمیز بوده است و سیستم هشدار فعال شده است. در آزمون پاسخ فراتر از محدوده، چشمه ^{137}Cs با اکتیویته 4 mCi در محلی از سطح پنل آشکارساز به مدت 1 دقیقه قرار گرفت تا ماکزیمم آهنگ شمارش که 120 هزار شمارش بر ثانیه بود در آشکارساز ثبت گردد. سپس پس از حذف چشمه شمارش‌های آشکارساز پس از مدت زمان کمتر یک دقیقه به آهنگ شمارش پس زمینه رسید. این روند 3 بار تکرار گردید و در هر 3 مرتبه اتفاقی مشابه تکرار گردید. بنابراین آزمون استاندارد برای پایش‌گر پرتویی دروازه‌ای با موفقیت به تأیید

۵. مراجع

1. A. S. Paschoa, F. Steinhäusler. Chapter 3-Terrestrial, atmospheric, and aquatic natural radioactivity. *Radioactivity Environ.* 17 (2010) 29-85.
2. F. O. Ogundare, C. U. Nwankwo. Radionuclide content of, and radiological hazards associated with samples from the different streams of metal recycling facilities. *Radioprotection* 50 (1) (2015) 55-58.
3. M. Askari, J. Kochakpour, A. Taheri. Investigation of plastic scintillation detectors for detecting the radioactive materials. *J. Nuclear Sci. Tech. (JonSat)* 43 (2) (2022) 125-132.
4. H. Sim, H. Seo, S. Yoon, H. Choi, H. Kim, J. Jang. Suppression of Background Count by Cargo Containers in Radiation Portal Monitor. *IEEE Trans. Nuclear Sci.* 71 (5) (2024) 1026-1032.
5. H. C. Lee, W. G. Shin, H. J. Park, D. H. Yoo, C. I. Choi, C. S. Park, C. H. Min. Validation of energy-weighted algorithm for radiation portal monitor using plastic scintillator. *Appl. Radiat. Isot.* 107 (2016) 160-164.
6. J. Davis, S. A. Dewji, E. Abelquist, N. Hertel. Synopsis of the oak ridge radiation protection research needs workshop. *Health Phys.* 116 (1) (2019) 69-80.
7. A. Tiberinus. Development of advanced Radiation Portal Monitors (RPM) for high-speed RN detection. CRBNE Research and Innovation Conference - 5th International conference nrbce research and innovation, May 2022, lille, France, 2022.
8. M. Voytchev, R. Radev. Radiation Protection Instrumentation: IEC International Standards for Performance Requirements (No. LLNL-PROC-751886). Lawrence Livermore National Lab.(LLNL), Livermore, CA (United States), 2018.
9. J. Moon, J. Kim, H. Chung, S. W. Kwak, K. T. Lim. Evaluation of neutron attenuation properties using helium-4 scintillation detector for dry cask inspection. *Nuclear Eng. Tech.* 55 (9) (2023) 3506-3513.
10. C. A. L. Presti, D. R. Weier, R. T. Kouzes, J. E. Schweppe. Baseline suppression of vehicle portal monitor gamma count profiles: A characterization study. *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sec. A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment* 562 (1) (2006) 281-297.
11. E. R. Bariev, G. F. Novikov, L. F. Rozdalouskaya, National experience in securing and managing radioactive sources. *Security of Radioactive Sources*, 46 (2005).
12. M. Amin, J. Triyanto, E. Nasrullah, F. Harahap, Rancangan perangkat lunak akuisisi data untuk unit deteksi BDRM05. *PRIMA-Aplikasi dan Rekayasa dalam Bidang Iptek Nuklir* 18 (1) (2021) 1-10.
13. R. Turner. Scrap metals industry perspective on radioactive materials. *Health Phys.* 91 (5) (2006) 489-493.

14. D. Prifti, K. Tushe, C. Massey, E. Bylyku, B. Daci. Norm alarm assessment safety issues in Albania. *European Phys. J. Special Topics* (2023) 1-9.
15. M. Monshizadeh, E. Javadi, M. Khosravani, H. Sayyar, M. Yahaghi, R. Roozedar, A. Ghalehasadi, A. Taheri, S. P. Shirmardi. Design and construction of a vehicle radiation portal monitor to detect radioactive materials. *J. Radiat. Safety and Measurement* 12 (4) (2024) 209-222.
۱۶. ی. روشن مختار، م. تاجیک، ر. قلی‌پور پیوندی. بررسی تأثیر موقعیت نسبی چشمه و سوسوزن در بازدهی سوسوزن پلاستیک مکعبی بزرگ. پژوهش سیستم‌های بس ذره‌ای ۸ (۱۸) (۱۳۹۷) ۶۸-۶۱.
۱۷. ر. آزاد دوست، ج. رحیقی، م. لامعی رشتی. طراحی و ساخت سیستم مانیتورینگ مواد پرتوزا برای استفاده در ورودی کارخانجات. پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه آزاد واحد مرکزی تهران، تهران، ۱۳۹۰.
۱۸. م. عسکری، ج. کوچک پور، ع. طاهری، ا. حسینی. ارزیابی عملکرد
- پایش‌گر پرتویی NSTRI-RPM-۲۰۲۰-۱ برای چشمه‌های پرتوزا در حال حرکت. بیست و هفتمین کنفرانس هسته‌ای ایران، دانشگاه فردوسی مشهد، ایران، ۱۳۹۹.
19. BSN, IEC 62244:2022 Radiation protection instrumentation – Installed radiation portal monitors (RPMs) for the detection of illicit trafficking of radioactive and nuclear materials, ISBN 978-2-8322-6660-1, 2022.
20. S. Santosa, K. Khotimah, A. R. Kumaraningrum. Application of prototype radiation portal monitor 15 based on IEC 62244: 2019 with technology audit supporting detection of radioactive sources: A review. *AIP Conf. Proc.* 2501 (1) (2022) 030017.
21. S. Apikyan, D. Diamond, R. Way. *Prevention, Detection and Response to Nuclear and Radiological Threats*. Springer Science & Business Media, 2007.