تغییر پیکربندی آشکارسازهای گاما به منظور ارتقای عملکرد سامانه بازرسی مواد منفجره به وسیله نوترون

نادعلی ورکانی،جواد* [(۱)]– پهلوانی،محمدرضا [(۱)]– مستعار، احمد [(۲)]

۱. دانشگاه مازندران، دانشکده علوم پایه ، گروه فیزیک هسته ای

۲. دانشگاه علوم پزشکی شهید بهشتی، دانشکده پزشکی، گروه مهندسی و فیزیک پزشکی

چکیده:

این مقاله به بررسی تاثیر چیدمان آشکارسازهای گاما بر عملکرد سامانه بازرسی به وسیله نوترون می‌پردازد. همچنین الگوریتم آشکارسازی اسکن تابش بر پایه نشان به عنوان الگوریتم آشکارسازی پیشنهاد شده و کارایی آن مورد بررسی قرار گرفته است. ضریب تشخیص برای این سامانه برابر ۷۵ درصد و حساسیت برابر ۹۲ درصد بدست آمد. نمودار منحنی‌های مشخصه عملکرد سامانه محاسبه گردید و با استفاده از سطح زیر این منحنی‌هاعملکرد سامانه به میزان 95/87 بدست آمد. در نهایت برای مشخص نمودن کارایی این روش نتایج حاصل با نتایج روشهای دیگر مقایسه گردید. این مقایسه نشان می دهد که نتایج حاصل از این روش کارایی خوبی در مقایسه با بسیاری از روشهای مشابه دارد.

کلمات کلیدی: روش مونت کارلو، روش اسکن تابش بر پایه نشانه، آشکارسازی مواد منفجره، آنالیز فعالسازی نوترونی.

مقدمه:

نقل و انتقال غیرمجاز مواد منفجره و مخدر به یک مسئله جدی در قرن جاری تبدیل شده است به همین دلیل در سالهای اخیر سامانه های بازرسی جهت شناسایی چنین موادی گسترش یافته است. سامانه های بازرسی مبتنی بر نوترون در بین روشهای آشکارسازی توده‌ای و غیرمخرب جایگاه خاصی یافته است[1]. بیشتر مواد منفجره در ترکیب خود دارای عناصر کربن، نیتروژن، هیدروژن و اکسیژن هستند و با استفاده از محاسبه نسبت وجود این عناصر با استفاده از اندازگیری شدت گامای ناشی از فعالسازی نوترونی، می‌توان به وجود مواد غیر مجاز پی برد [2]. در این مقاله ابتدا روش اسکن تابش بر پایه نشان توضیح داده شده است. در ادامه با استفاده از کد محاسباتی MCNP-4C مکان بهینه آشکارسازها تعیین شده است. بعد از مشخص نمودن مکان بهینه آشکارسازها، با انتخاب نشانهای مناسب ذوش اسکن تابش بر پایه نشان بکار گرفته شده و کارایی سامانه محاسبه شده است.

روش اسکن تابش بر پایه نشانه[1]:

[1] Signature-Based Radiation Scanning

در این روش الگوهایی مواد مورد نظر در داخل کتابخانه ذخیره شده و در هنگام ارزیابی اهداف با الگوهای استخراج شده از هدف نامعین مقایسه می‌شود. میزان هم‌پوشانی این الگوها را می‌توان به عنوان معیاری برای اینکه هدف مورد بازرسی دارای ماده مورد نظر هست یا خیر در نظر گرفت. در این تحقیق به دنبال راهکاری هستیم که بتوانیم اهداف دارای مواد منفجره را از اهداف دیگر جدا نماییم. با استفاده از روش اسکن تابش بر میزان انطباق الگوها معین می‌شوند. معیار شایستگی هنجارشده[۲] برای این روش به صورت زیر تعریف می-گردد[3]:

$$\zeta_l^n = \frac{100}{\sum_{i=1}^{N} \alpha_i \frac{(S_{li})^2}{\sigma^2(S_{li})}} \sum_{i=1}^{N} \alpha_i \frac{(\beta R_i - S_{li})^2}{\beta^2 \sigma^2(R_i) + \sigma^2(S_{li})} \quad (۱)$$

که در آن R_i، i مین مشخصه اندازگیری شده از یک هدف ناشناخته، S_{li}، iمین مشخصه از الگو و N تعداد مشخصه هایی از پاسخ های جمع آوری شده از هر هدف و الگو می باشد. β نیز پارامتر مقیاس می باشد که مقادیر اندازگیری شده از الگوها و اهداف را در یک مقیاس قرار می‌دهد. σ^2 واریانس، و α_i فاکتور وزن می‌باشد که برای حالت یکنواخت مساوی با $\alpha_i=1/N$ خواهد بود. معیار شایستگی و انحراف معیار آن را می توان به منظور تشخیص بین اهداف منفجره (اهدافی که دارای مواد منفجره هستند) و اهداف بی‌اثر (اهدافی که محتوی مواد منفجره نیستند) مورد استفاده قرار داد.

مواد و روش‌ها:

شبیه سازی مونت کارلو:

شبیه سازی‌های مونت کارلو با استفاده از کد MCNP-4C انجام شد. مشخصات منبع نوترون مانند اندازه، مکان، طیف نوترون خروجی و جهت نوترونهای خروجی در کد تعریف شد. به منظور رعایت نمودن الزامات ایمنی و همچنین هم جهت نمودن نوترون‌ها و ممانعت از ورود مستقیم نوترون به آشکارساز باید از حفاظهای مناسب استفاده نمود. در شکل شماره ۱ چشمه و حفاظهای آن آورده شده است [4].

شکل ۱: تولید کننده نوترون و حفاظ مربوط به آن. لایه خاکستری پلی اتیلن و لایه سیاه استیل می‌باشد

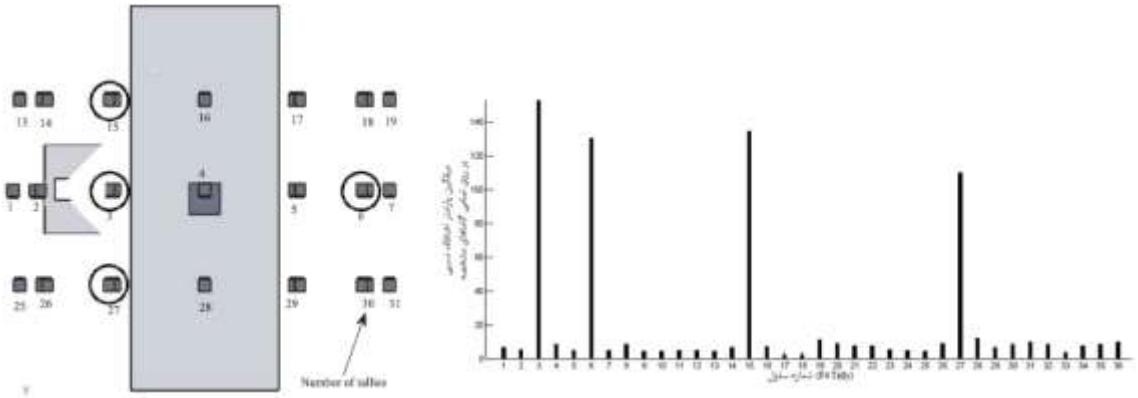
[2] normalized FOM

در این تحقیق کانتینرهای دریایی با اندازه واقعی مد نظر قرار گرفت. ابعاد کانتینر ۲,٤×٦,۲×۲,٦ متر مکعب می‌باشد و دیواره آن از جنس استیل با ضخامت ۰/۳٤٦ ساخته شده است. کانتینرها از مواد بی اثر مانند هوا، چوب، کاغذ و گوشت پر شده اند. در سامانه‌های بازرسی انواع آشکارسازهای گاما را می‌توان به کار گرفت. مکان، اندازه، نوع و حساسیت آشکارساز می‌تواند در کد تعریف گردد. در این پژوهش از تالی نوع ٤ استفاده شده است و آشکارساز گامای سوسوزن لانتانیوم برمید با دوپ سریم شبیه سازی گردیده است. موادی که برای شبیه‌سازی در کد تعریف شدند عبارتند از هوا، استیل، چوب، کاغذ ، پلی‌استر، گوشت و همچنین مواد منفجره مانند RDX,TNT و نیتروگلیسیرین. چگالی هر یک از این مواد و همچنین درصد وزنی ترکیبات آن در مقالات مختلف آورده شده است [4].

نتایج:

نتایج بهینه سازی آشکارسازها:

اولین هدف در این پژوهش تشخیص مکانی بود که در آنجا میزان نسبت سیگنال به نویز برای آشکارسازها بیشینه باشد. بدین منظور ابتدا ۳٦ عدد آشکارساز تعریف گردید که کانتینر را احاطه کرده بودند. این تالیها بر روی ۳ حلقه با شعاع ۳ متر قرار داشتند (۱۲ عدد بر روی هر حلقه). فاصله این تالها از هم مساوی در نظر گرفته شد. همچنین پارامتر اختلاف نسبی به منظور برآورد نسبت سیگنال به نویز به صورت نسبت اختلاف اندازه پیک در دو حالت حضور و عدم حضور ماده منفجره به اندازه پیک در حالت عدم حضور ماده منفجره تعریف گردید. این پارامتر برای تمامی تالیها محاسبه گردید. در انتها مشخص گردید که در بین ۳٦ تالی، ٤ مکان دارای بیشترین میزان اختلاف نسبی هستند. این ٤ مکان در ادامه شبیه‌سازیها مورد استفاده قرار گرفت. در شکل شماره ۲ پیکربندی سامانه شبیه سازی شده به همراه میانگین پارامتر اختلاف نسبی بر روی گاماهای نشان برای ۳٦ تالی آورده شده است. در این شکل تالیهای انتخاب شده نیز مشخص شده اند.



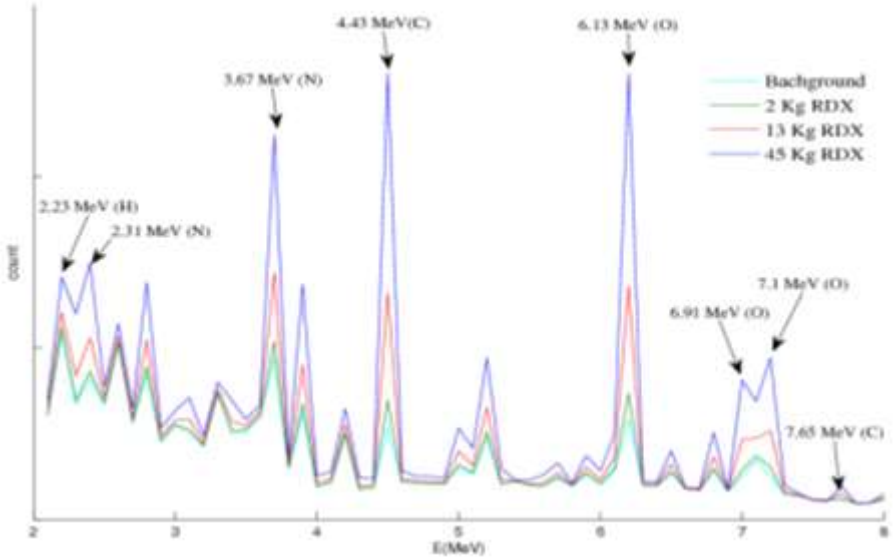
شکل(۲): پیکربندی سامانه (چپ) و میانگین پارامتر اختلاف نسبی بر روی تمامی گاماهای مشخصه (راست)

سیگنال خروجی از کانتینرهای خالی حاوی مواد منفجره:

شبیه سازی برای حضور ماده منفجره با جرم‌های مختلف در کانتینرهای خالی انجام گرفت. در این مرحله هیچ ماده دیگری در کانتینر بغیر از ماده منفجره و هوا وجود ندارد. به عنوان نمونه در شکل شماره ۳ منحنی طیف خروجی از کانتینر خالی حاوی جرمهای مختلف ماده منفجره RDX آورده شده است. در این شکل گاماهای مشخصه نشان داده شده اند. با اضافه شدن مقدار ماده منفجره ارتفاع پیک مربوط به گاماهای مشخصه افزایش می یابد. با توجه به این نکته می توان استدلال نمود که پیک های مرتبط شده به مواد منفجره قابل قبول می‌باشند.

ماده منفجره در کانتینر پر و استفاده از محاسبات معیار شایستگی :

هنگامیکه مواد دیگری در داخل کانتیر وجود داشته باشد (حالت واقعی)، توانایی یافتن ماده منفجره محدود می‌گردد. تکنیک SBRS در این حالت بکار گرفته می‌شود. ۳۲ نشان (۸ نشان برای هر تالی) برای این محاسبات مورد استفاده قرار می‌گیرد. فاکتور وزن در حالت یکنواخت $\frac{1}{32}$ در نظر گرفته می شود. چهار ماده بی‌اثر (هوا، گوشت، چوب و کاغذ) و دو ماده منفجره (TNT,RDX) در ۳ جرم (۰و ۱۰ و ۲۵ کیلوگرم) مورد شبیه سازی قرار گرفت. تعداد ۲۰ حالت مخلتف مورد ارزیابی قرار گرفت. معیار شایستگی برای تمامی این حالات محاسبه گردید. فاکتور β نیز برابر نسبت ارتفاع پیک 2.22 MeV در یک نمونه مورد بازرسی به نمونه الگو قرار گرفت.



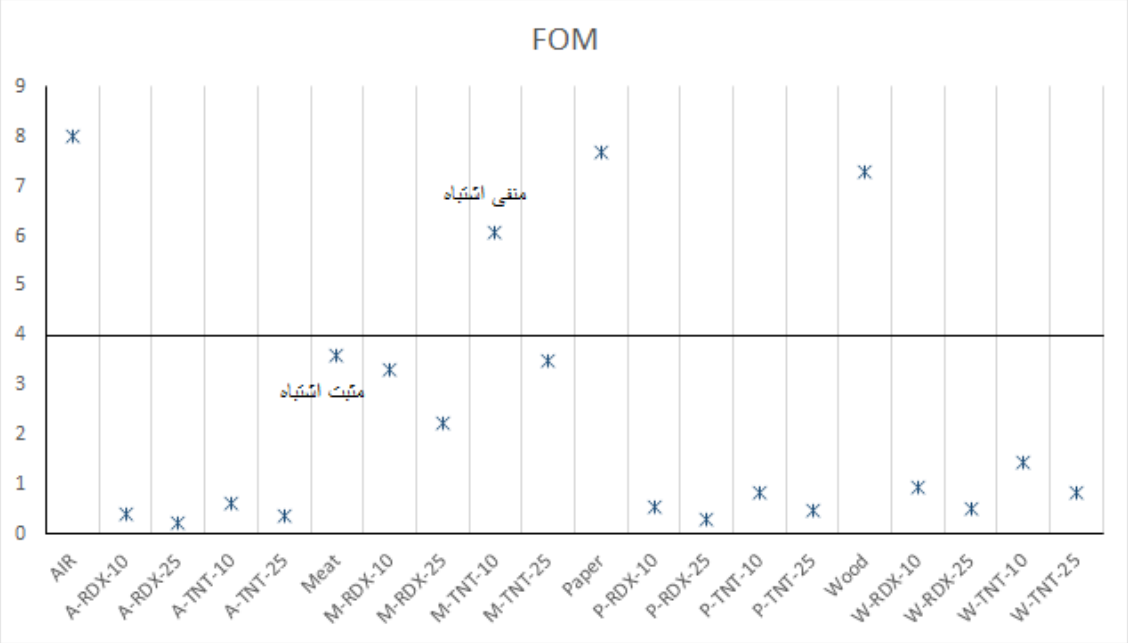
شکل (۳): طیف استخراج شده از آشکارساز در حضور جرمهای مختلف RDX

به منظور مختصر نویسی از نمادهای استفاده گردید. به عنوان مثال W-TNT-01 نمایشگر وجود یک کیلوگرم ماده منفجره TNT در کانتینر حاوی چوب می باشد. نتایج حاصل از محاسبات در نمودار شماره ٤ آورده شده است. با در نظر گرفتن $\zeta_0 = 4$ در بین ١٦ نمونه حاوی مواد منفجره ١٥ نمونه درست تشخیص داده شده (یک منفی اشتباه: ١٠ کیلوگرم TNT در کانتینر حاوی گوشت تشخیص داده نشد) و در بین ٤ ماده بی اثر یک

نمونه به اشتباه منفجره تشخیص داده شد (یک مثبت اشتباه: کانتینر حاوی گوشت به علت جرم بالای نیتروژن به اشتباه منفجره تشخیص داده شد).

ضریب تشخیص[3] که به صورت نسبت تعداد منفی‌های درست به مجموع تعداد منفی های درست و مثبتهای اشتباه تعریف می شود، برای سامانه مورد بررسی برابر ۷۵ درصد گردید.

از طرف دیگر حساسیت که به صورت نسبت مثبتهای صحیح به مجموع مثبتهای صحیح و منفی های اشتباه تعریف می شود، برای سامانه مورد بررسی برابر ۹۳ درصد گردید.



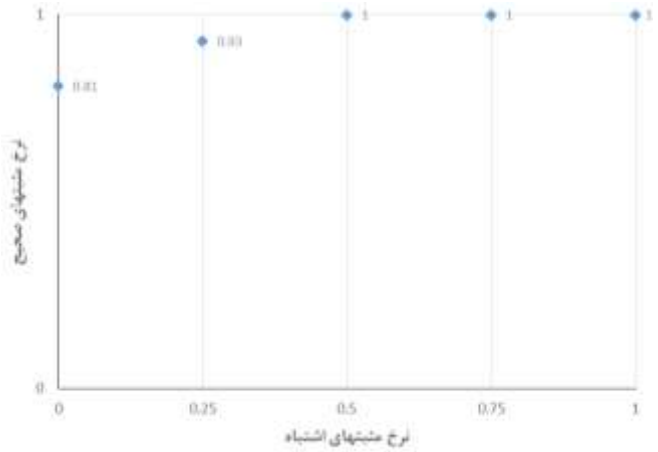
شکل (٤): معیار شایستگی محاسبه شده با استفاده از روش SBRS

ارزیابی عملکرد الگوریتم:

در این پژوهش به منظور ارزیابی عملکرد سامانه از منحنی‌های مشخصه عملکرد سامانه[4] استفاده شده است. این منحنی‌ها ابزار مفیدی هستند که می‌توانند میزان عملکرد سامانه آشکارسازی را نشان دهند. در این منحنی-هامبادله بین حساسیت و ضریب تشخیص تشریح می‌شود. سطح زیر این منحنی میزان عملکرد سامانه را بیان می نماید. در این منحنی نرخ مثبتهای صحیح بر حسب نرخ مثبتهای اشتباه ترسیم می‌گردد. نرخ مثبهای اشتباه بنابر تعریف برابر (ضریب تشخیص-۱) و نرخ مثبتهای صحیح برابر حساسیت می باشد.

در شکل شماره ۸ منحنی‌های مشخصه عملکرد سامانه آورده شده است. با استفاده از این منحنی و با علم به اینکه سطح زیر منحنی برابر با عملکرد سامانه است ، عملکرد برابر ۹۵/۸۷ بدست می‌آید که در مقایسه با کارهای مشابه عدد معقولی می باشد [4].

[3] specificity
[4] receiver operating characteristic



شکل (۸): منحنی‌های مشخصه عملکرد سامانه برای سامانه بازرسی با استفاده از نوترون

بحث و نتیجه‌گیری:

نتایج نشان داد که استفاده از سامانه بازرسی به وسیله نوترون با استفاده از ٤ آشکارساز گاما به همراه تکنیک اسکن تابش بر پایه نشان می‌تواند با حساسیت خوب (۰/۹۳) و ضریب تشخیص خوب (۰/۷۵) می تواند بین کانتینرهای حاوی مواد منفجره و کانتینرهای عادی تفاوت قائل شود. عملکرد کلی این سامانه با استفاده از منحنی های مشخصه عملکرد سامانه به میزان ۹۵/۸۷ محاسبه گردید که نسبت به کارهای مشابه قابل قبول می باشد. میزان موفقیت این روش به مواد موجود در کانتینر بستگی دارد. هنگامیکه کانتینر حاوی مواد چگال باشد احتمال خارج شدن پرتو گاما کاهش یافته در نتیجه موفقیت سامانه کاهش می یابد. همچنین اگر کانتینر حاوی موادی باشد که در ترکیب آنها نیتروژن وجود دارد (مانند گوشت) احتمال اینکه آلارم اشتباه رخ دهد افزایش می‌یابد. در این حالت گاماهای نشان که مرتبط با نیتروژن می باشند عملکرد قابل قبولی در محاسبه معیار شایستگی ندارند و به همین دلیل آلارم اشتباه افزایش خواهد یافت.

مراجع

[1] T. Gozani, , P.Ryge, , P.Shea, , C. Seher, , R.E. Morgado, ,. Explosive detection system based on thermal neutron activation. *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine* 4 (1989) 17-20.

[2] S.Pesente, et al., Effects of soil moisture on the detection of buried explosives by radiative neutron capture. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A* 459 (2001) 577-580.

[3] S.A.Heider, W.L.Dunn, A simulation study of fast neutron interrogation for standoff detection of improvised explosive devices. *Radiation Physics and Chemistry* 116 (2015) 341-344

[4] M. R. Pahlavani, A. Mostaar, J. Nadali-Varkani, Configuration of gamma detectors in a neutron interrogation system for detection of explosives. *Applied Radiation and Isotopes* 132 (2018) 18-23.