

Analyzing the Impact of Detector Rotation Angle on Truck Cargo Scanner System Response with the MCNPX Code

Amirmohamamd Beigzadeh | Ehsan Alibeigi | Mojtaba Askari^{1✉} | Hojjat Mahani | Ali Taheri
| Seyed Pezhman Shirmardi

1. Corresponding Author, Radiation Applications Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute, Tehran, Iran. E-mail: moasgari@aeoi.org.ir

Article Information:

Research Article

Received 30 Oct. 2023

Revised 06 Feb. 2024

Accepted 15 Feb. 2024

Keywords:

Cargo scanner,
MCNPX code,
Industrial imaging,
Non-destructive testing.

ABSTRACT

Modeling and simulation are crucial in designing and developing complex systems, such as cargo scanner systems. A cargo scanner is a device used to scan and inspect cargo transported by air, land, and sea. These scanners are usually used by customs and security centers to identify potential threats such as weapons, explosives, and contraband. One of the key benefits of using modeling and simulation is that it allows designers to test different scenarios and configurations without the need for physical prototypes. This can save time and money, as well as reduce the risk of costly mistakes. This study examines how the parameter angle affects detector responses in truck cargo scanner systems using the MCNPX code. The angle refers to the angle at which the beam generated from the beam generator interacts with the detector's normal surface, an important factor in ensuring the accuracy and reliability of cargo scanning systems in imaging. Initially, the X-ray spectrum output was calculated from the accelerated 6 MV electrons due to tungsten target impact and validated against spectra from other studies. The results demonstrated good agreement between the output spectra. The changes in counts recorded in the vertical direction of the detector arrays showed that the count difference between the lowest pixel and highest pixel is approximately 33%, while the count changes from the closest pixel to the farthest pixel to the beam generator in the horizontal direction are about 60%. Subsequently, the angle of each array was adjusted so that the emitted rays from the cone beam generator were perpendicular, and this case was compared to cases where the array angle was 20 and 30 degrees. The results revealed that when exposed to perpendicular radiation, the signal recorded in detectors is greater than that of a rotated detector, and the count rate in the detector decreases as the angle increases.

Cite this article: Beigzadeh, A., Alibeigi, E., Askari, A., Mahani, H., Taheri, A., & Shirmardi S. P. (2023). Investigating the defects of gas pipes with industrial gamma radiography method and weighted anisotropic-isotropic total variation. *Journal of Nondestructive Testing Technology*, 3 (3), 56-69. <http://doi.org/10.30494/JNDT.2024.422994.1132>

بررسی پارامتر زاویه دوران آشکارسازها بر پاسخ سامانه کارگو اسکنر کامیونی با استفاده از مدل MCNPX

امیرمحمد بیگ زاده | احسان علی بیگی | مجتبی عسکری[✉] | حجت اله ماهانی | علی طاهری | سید پژمان شیرمردی |
 ۱. پژوهشکده کاربرد پرتوها، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، تهران، ایران، رایانامه: moasgari@aeoi.org.ir

چکیده:

مدل‌سازی و شبیه‌سازی نقش مهمی در طراحی و توسعه هر سیستم پیچیده‌ای از جمله سیستم‌های اسکنر محموله ایفا می‌کند. اسکنر محموله وسیله‌ای است که برای اسکن و بازرسی محموله‌هایی که از طریق هوا، زمین و دریا حمل می‌شوند استفاده می‌شود. این اسکنرها معمولاً توسط گمرک و مراکز امنیتی برای شناسایی تهدیدات احتمالی مانند سلاح، مواد منفجره و کالاهای قاچاق استفاده می‌شود. یکی از مزایای کلیدی استفاده از مدل‌سازی و شبیه‌سازی این است که به طراحان اجازه می‌دهد تا سناریوها و پیکربندی‌های مختلف را بدون نیاز به نمونه‌های اولیه فیزیکی آزمایش کنند. این می‌تواند در زمان و هزینه صرفه‌جویی کند و همچنین خطر اشتباهات گران‌قیمت را کاهش دهد. این مطالعه تأثیر پارامتر زاویه بر پاسخ آشکارسازها در سیستم‌های بار اسکنر کامیونی با استفاده از مدل MCNPX را بررسی می‌کند. این پارامتر به زاویه‌ای اشاره دارد که در این زاویه پرتوهای گسیل شده از مولد پرتو با سطح نرمال آشکارساز برهم‌کنش می‌کنند، که عامل مهمی در تعیین دقت و قابلیت اطمینان سیستم‌های اسکنر محموله در تشکیل تصویر است. در این مطالعه ابتدا خروجی طیف ایکس حاصل از الکترونهای ۶ مگا الکترون ولتی شتاب گرفته در اثر برخورد با هدف تنگستنی محاسبه گردید و با طیف‌های موجود در سایر مطالعات اعتبارسنجی شد. نتایج نشان داد که طیف‌های خروجی تطابق خوبی با هم دارند. تغییرات شمارش ثبت‌شده در پیکسل‌های آرایه آشکارسازها در راستای عمودی نشان داد که اختلاف شمارش از پایین‌ترین پیکسل تا بالاترین پیکسل حدود ۳۳ درصد بود و در راستای افقی تغییرات شمارش از نزدیک‌ترین پیکسل نسبت به دورترین پیکسل به مولد پرتو حدود ۶۰ درصد شد. در ادامه زاویه تک تک آرایه‌ها به گونه‌ای تنظیم شد که جهت برخورد پرتوها گسیل شده از مولد پرتوی با هندسه مخروطی به صورت عمود باشد و این حالت با حالت‌هایی که در آن زاویه آرایه‌ها ۲۰ و ۳۰ درجه دوران یافته بود مقایسه شد. نتایج نشان داد که تحت تابش عمود، سیگنال ثبت‌شده در آشکارسازها بیشتر از حالتی است که آشکارساز دوران پیدا کرده باشد و با افزایش زاویه، میزان شمارش در آشکارساز کاهش می‌یابد.

اطلاعات مقاله:

مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت:

۱۴۰۲/۰۸/۰۸

تاریخ بازنگری:

۱۴۰۲/۱۱/۱۷

تاریخ پذیرش:

۱۴۰۲/۱۱/۲۶

کلیدواژگان:

دستگاه کارگواسکنر،

کد MCNPX.

تصویربرداری صنعتی،

آزمون غیرمخرب.

استناد: بیگ زاده، امیرمحمد؛ علی بیگی، احسان؛ عسکری، مجتبی؛ ماهانی، حجت اله؛ طاهری، علی، و شیرمردی؛ سید پژمان. (۱۴۰۲). بررسی پارامتر زاویه دوران آشکارسازها بر پاسخ سامانه کارگو اسکنر کامیونی با استفاده از مدل MCNPX. *مجله فناوری آزمون‌های غیرمخرب*، ۳ (۳)، ۶۹-۵۶

<http://doi.org/10.30494/JNDT.2024.422994.1132>. ۵۶

۱- مقدمه

بستگی دارد. اسکنرهای محموله سطح بالا با ویژگی‌های پیشرفته‌ای مانند تصویربرداری با اشعه ایکس، تشخیص مواد منفجره و تشخیص پرتوی می‌توانند چند صد هزار دلار هزینه داشته باشند [۵]. درحالی‌که هزینه اولیه یک اسکنر محموله قابل توجه به نظر می‌رسد، می‌تواند مزایای قابل توجهی را برای شرکت‌های درگیر در حمل‌ونقل کالا فراهم کند. اسکنرهای بار می‌توانند به شناسایی اقلام غیرقانونی یا خطرناک، جلوگیری از سرقت و اطمینان از رعایت مقررات حاکم، ملی و بین‌المللی کمک کنند. علاوه بر این، بسیاری از اسکنرهای محموله به گونه‌ای طراحی شده‌اند که بادوام و ماندگار باشند و به حداقل تعمیر و نگهداری نیاز داشته باشند. این می‌تواند هزینه کلی مالکیت را در طول عمر اسکنر کاهش دهد. در نتیجه، درحالی‌که هزینه اسکنر محموله ممکن است بالا باشد، با در نظر گرفتن مزایا و صرفه‌جویی در هزینه بالقوه، سرمایه‌گذاری ارزشمندی برای شرکت‌های صنعت حمل‌ونقل است. مدل‌سازی و شبیه‌سازی نقش مهمی در طراحی و توسعه هر سیستم پیچیده‌ای از جمله سیستم‌های اسکنر محموله ایفا می‌کند [۶]. با ایجاد مدل‌ها و شبیه‌سازی‌های دقیق از این سیستم‌ها قبل از ساخت، مهندسان و طراحان می‌توانند ایرادات یا ضعف‌های احتمالی در واحدهای حیاتی تشکیل دهنده این سامانه‌ها از قبیل آشکارسازها و مولدهای پرتوی در طراحی را شناسایی کرده و عملکرد سیستم را بهینه کنند. یکی از مزایای کلیدی استفاده از مدل‌سازی و شبیه‌سازی این است که به طراحان اجازه می‌دهد تا سناریوها و پیکربندی‌های مختلف را بدون نیاز به نمونه‌های اولیه فیزیکی آزمایش کنند. این مهم می‌تواند در زمان و هزینه صرفه‌جویی کند و همچنین خطر اشتباهات گران‌قیمت یا نقص‌های طراحی را که می‌تواند ایمنی یا کارایی سیستم را به خطر بیندازد کاهش دهد.

در مورد سیستم‌های اسکنر محموله، مدل‌سازی و شبیه‌سازی می‌تواند به طراحان کمک کند تا نحوه نمایش انواع محموله‌ها بر روی صفحه‌نمایش اسکنر را تجسم کنند و نقاط کور بالقوه یا تهدیدات از دست‌رفته را شناسایی و مورد بررسی کامل‌تر قرار دهند. همچنین می‌تواند به بهینه‌سازی موقعیت و پیکربندی حسگرها و آشکارسازها کمک کند تا

اسکنر محموله^۱ وسیله‌ای است که برای اسکن و بازرسی محموله‌هایی که از طریق هوا، زمین و دریا حمل می‌شوند استفاده می‌شود. این اسکنرها معمولاً توسط گمرک‌ها و مراکز امنیتی برای شناسایی تهدیدات احتمالی مانند سلاح، مواد منفجره و کالاهای قاچاق استفاده می‌شود [۱]. اسکنرهای بار از فناوری‌های مختلفی برای بازرسی محتویات کانتینرها استفاده می‌کنند. یکی از انواع رایج اسکنر محموله، از فناوری تصویربرداری غیرمخرب با استفاده از پرتوهای پرنفوذ اشعه ایکس برای ایجاد تصاویری از اقلام داخل کانتینر استفاده می‌کند. سپس این تصاویر می‌توانند توسط کارکنان آموزش‌دیده برای شناسایی هرگونه اشیاء مشکوک تجزیه و تحلیل می‌شوند. استفاده از اسکنر محموله در سال‌های اخیر به دلیل افزایش تهدید تروریسم و قاچاق کالاهای غیرقانونی اهمیت فزاینده‌ای پیدا کرده است. دولت‌ها در سراسر جهان سرمایه‌گذاری عظیمی روی این سامانه‌ها برای بهبود امنیت در بندرها و فرودگاه‌ها و جلوگیری از جابجایی کالاهای غیرقانونی از مرزها انجام داده‌اند [۲]. به‌طورکلی، اسکنرهای محموله ابزار قدرتمندی برای تضمین ایمنی و امنیت شبکه‌های حمل‌ونقل جهانی هستند. علاوه بر فناوری‌های تشخیصی مبتنی بر اشعه ایکس و پرتوهای یون‌ساز، اسکنرهای محموله می‌توانند از روش‌های دیگر بازرسی مانند پرتوی گاما، نوترون و القای الکترومغناطیسی نیز استفاده کنند [۳]. این روش‌ها دارای سطوح مختلف اثربخشی هستند و اغلب در ترکیب با یکدیگر برای ارائه آنالیز جامع‌تری از محتویات کانتینرهای بار استفاده می‌شوند. همچنین تحقیق و توسعه مداومی در زمینه فناوری‌های جدید اسکنر محموله وجود دارد که می‌تواند دقت و سرعت بازرسی‌ها را بهبود بخشد. برای مثال، محققان در حال بررسی استفاده از هوش مصنوعی و الگوریتم‌های یادگیری ماشین برای تجزیه و تحلیل داده‌های جمع‌آوری‌شده توسط اسکنرها و شناسایی سریع‌تر و دقیق‌تر تهدیدات بالقوه هستند [۴]. اسکنرهای محموله به دلیل فناوری پیشرفته و ویژگی‌هایی که ارائه می‌دهند می‌توانند بسیار گران‌قیمت باشند. هزینه اسکنر بار به عوامل مختلفی مانند برند، مدل، اندازه و قابلیت‌ها

¹Cargo scanner

طیفی تک فریم برای سیستم بازرسی محموله توسط گیل و همکارانش انجام شد [۹]. آن‌ها روشی را برای شناسایی مواد در سیستم بازرسی اشعه ایکس با انرژی دوگانه پیشنهاد کردند.

اجزای اصلی این سیستم به ترتیب عبارت‌اند از:

۱. مولد پرتوی پرنفوذ

اشعه ایکس شکل نافذ تابش الکترومغناطیسی پرنرژی است. طول موج اشعه ایکس کوتاه‌تر از اشعه ماوراءبنفش و معمولاً بلندتر از اشعه گاما است. در بسیاری از زبان‌ها، تابش ایکس به‌عنوان تابش رونتگن، به نام دانشمند آلمانی ویلهلم کتراد رونتگن که آن را در ۸ نوامبر ۱۸۹۵ کشف کرد، نامیده می‌شود [۱۰ و ۱۱]. پرتوهای ایکس با انرژی فوتون‌های زیاد یعنی بالای ۵ تا ۱۰ کیلو الکترون‌ولت پرتوهای ایکس سخت نامیده می‌شوند و آن دسته از پرتوهایی که انرژی کمتر دارند، اشعه ایکس نرم نامیده می‌شوند. محدوده متوسط با انرژی فوتون چند کیلو الکترون‌ولت، اغلب به‌عنوان اشعه ایکس نرم شناخته می‌شود. با توجه به قابلیت نفوذ، اشعه ایکس سخت، به‌طور گسترده برای تصویربرداری از داخل اشیاء و تصویربرداری صنعتی در پرتونگاری پزشکی و سیستم‌های بازرسی-امنیتی فرودگاه استفاده می‌شود [۱۲]. استفاده از پرتوهای ایکس و گاما در قالب سیستم‌های اسکن چمدانی و ماشینی به‌منظور بازرسی محموله‌های گمرکی، خودروها و همچنین اشیاء ممنوعه، قدمتی حدوداً ۵۰ ساله دارد [۱۳] و امروزه به‌طور چشمگیری در سراسر دنیا به‌منظور جلوگیری از حمل سلاح و قاچاق مورد استفاده قرار می‌گیرند [۱۴].

در سیستم‌های تصویربرداری عبوری عموماً از لامپ پرتو ایکس به‌عنوان چشمه استفاده می‌شود که به‌همراه سیستم آشکارسازی در یک سوی خودرو، کامیون و یا انسان قرار می‌گیرد. در صورت اسکن محموله‌های کامیونی استفاده از شتاب‌دهنده‌های خطی که قابلیت تولید انرژی‌های بالاتر پرتوی ایکس را دارند مرسوم است. سیستم‌های تصویربرداری دارای انواع مختلف چه در نحوه تولید میدان پرتویی و چه در نحوه آشکارسازی می‌باشند. میدان پرتویی را می‌توان به‌صورت پرتو سوزنی و همچنین پرتو مخروطی طراحی کرد [۱۵]. همچنین آشکارساز سیستم می‌تواند بسته به نوع طراحی

اطمینان حاصل گردد که آن‌ها تهدیدات را به‌طور دقیق و کارآمد تشخیص می‌دهند. یکی دیگر از کاربردهای مهم مدل‌سازی و شبیه‌سازی در طراحی سیستم‌های اسکنر محموله، ارزیابی عملکرد آن‌ها در شرایط مختلف محیطی است. برای مثال، طراحان می‌توانند نحوه عملکرد سیستم را در دماهای شدید، رطوبت بالا یا سایر شرایط چالش‌برانگیز که می‌تواند بر دقت یا قابلیت اطمینان آن تأثیر بگذارد، شبیه‌سازی کنند. به‌طور کلی، مدل‌سازی و شبیه‌سازی ابزارهای ضروری برای طراحی و توسعه سیستم‌های اسکنر محموله هستند. آن‌ها به بهبود دقت و اثربخشی سیستم کمک می‌کنند و در عین حال هزینه و خطر مرتبط با نمونه‌سازی فیزیکی را کاهش می‌دهند. همان‌طور که فناوری اسکنر محموله به تکامل خود ادامه می‌دهد، این احتمال وجود دارد که مدل‌سازی و شبیه‌سازی نقش مهمی در حصول اطمینان از بهینه‌سازی این سیستم‌ها برای ایمنی، امنیت و کارایی داشته باشد.

بهره‌گیری از شبیه‌سازی با کدهای ترابرد^۱ پرتو بر روی پارامترهای مختلف سیستم‌های اسکنر محموله توسط افراد مختلفی انجام شده است که در ادامه به برخی از آن‌ها پرداخته خواهد شد. مدل‌سازی محاسباتی MCNPX^۲ برای محاسبه نرخ‌های دوز بالقوه اسکنر محموله توسط گومز و همکارانش انجام شد. این مطالعه بر خطر پرتوگیری بالقوه برای کارکنان، رانندگان کامیون و همچنین افراد غیرقانونی که در کانتینرهای بار حمل می‌شوند تمرکز دارد [۷]. یک سیستم مبتنی بر نوترون سریع و گامای دو انرژی قابل حمل برای تشخیص مواد غیرقانونی توسط کد مونت کارلوی MCNPX مورد ارزیابی قرار گرفت. در تحقیق دیگر یک سیستم پرتونگاری FNGR^۳ قابل حمل با استفاده از کد مونت کارلو MCNPX شبیه‌سازی شده است. این سیستم برای شناسایی مواد ساختاری محموله‌های بزرگ و مشکوک، در نظر گرفته شده است. این سیستم یک نوترون و دو چشمه گاما را ترکیب می‌کند که از طریق دو انرژی، چشمه‌های ^{۱۳۷}Cs و ^{۶۰}Co، به توصیف مواد ساختاری جسم دست می‌یابد. از این‌رو، سیستم مواد مشابه یا حتی یکسان هر یک از این دو نسبت را متمایز می‌کند [۸]. شبیه‌سازی پرتونگاری بر روی اشعه ایکس دو

^۳ Fast neutron and gamma radiography (FNGR)

^۱ Transport

^۲ Monte Carlo N-particle eXtended (MCNPX)

اسکنر، از نوع یکپارچه و یا پیکسل‌بندی شده انتخاب گردند که هر کدام دارای مزایا و معایب مربوط به خود می‌باشد.

۲. آشکارساز سوسوزن^۱

هنگام برخورد پرتو ایکس با یک جسم، سه پدیده امکان وقوع دارند: (۱) جذب فوتوالکتریک، (۲) پراکندگی کامپتون و (۳) تولید زوج. سوسوزن‌ها نوعی از آشکارسازها هستند که با جذب فوتون ایکس، تحریک شده و در آن‌ها الکترون‌ها به ترازهای انرژی بالاتر می‌روند. بازگشت الکترون‌ها به تراز قبلی (کم انرژی‌تر) همراه با تولید نور مرئی خواهد بود. تعداد فوتون‌های نور مرئی با انرژی فوتون آشکار شده و راندمان آشکارساز مرتبط است. در ادامه، با جمع‌آوری نور مرئی تولیدی و سپس تبدیل آن به سیگنال تقویت شده الکتریکی توسط یک لامپ تکثیرکننده نوری^۲، سیگنال نهایی آشکارساز شکل می‌گیرد. با توجه به اینکه در اسکنر پیشنهادی نیاز است تا تصویربرداری با سرعت بالا انجام شود، بایستی از سوسوزن‌ها و لامپ‌های تکثیرکننده فوتونی سریع استفاده نمود. از این رو، امروزه استفاده از سوسوزن‌های پلاستیکی برای تصویربرداری‌های صنعتی رواج بیشتری یافته است [۱۶]. در این مطالعه از آشکارساز سوسوزن $CdWO_4$ کادمیوم تنگستات به‌عنوان واحد آشکارساز استفاده شده است. این نوع از آشکارسازها به‌سبب پایداری پرتوی بالایی که دارند مناسب برای استفاده در سیستم‌های کارگو اسکنر و یا سیستم‌های تشخیصی مبتنی بر پرتوهای ایکس و گاما هستند که نیاز است تا مدت زیادی به‌صورت فعال باشند.

کریستال تنگستات کادمیوم ($CdWO_4$) یک سوسوزن با چگالی $7/9$ گرم بر سانتیمتر مکعب و عدد اتمی موثر $61/2$ با بازده نور نسبتاً بالا است. حداکثر گسیل آن در 475 نانومتر و کل بهره نور 12 تا 15 فوتون در کیلو الکترون‌ولت است. بازده نور نسبت به کریستال $NaI(Tl)$ 30 تا 50 درصد است [۱۷]. از ویژگی‌های آن می‌توان به پس‌تابی کم، مقاومت تابشی بالا، چگالی بالا و عدد اتمی بالا، مناسب با شرایطی که نیاز به شمارش شارهای پایین است و بازده نوری بالایی دارد و از کاربردهای آن می‌توان به بازرسی امنیتی، مقطع‌نگاری کامپیوتری اشعه ایکس، فیزیک با انرژی بالا و پزشکی

هسته‌ای اشاره کرد.

۳. سیستم جمع‌آوری داده و پردازش تصویر

برای داده‌برداری از کارت‌های جمع‌آوری داده استفاده خواهد شد. این کارت، سیگنال‌های خروجی سوسوزن را جمع‌آوری کرده، از نظر زمانی پردازش می‌کند و نویزهای احتمالی را حذف می‌نماید. در نهایت با اسکن کل جسم، اطلاعات لازم از کلیه نقاط آن جسم تهیه شده و نرم‌افزار پردازشی، تصویر نهایی را تولید می‌نماید. شدت پیکسل‌های این تصویر با تعداد فوتون‌های پس پراکنده‌ی آشکار شده در هر تابش پرتو سوسوزنی مرتبط خواهد بود.

برای مدل‌سازی سیستمی مرکب از مولد پرتوی و نیز سامانه آشکارسازی باید از کدی استفاده نمود که قابلیت تعریف هر دوی این موارد در آن میسر باشد. به همین منظور جهت شبیه‌سازی از کد مونت کارلو MCNPX استفاده شد.

در این مطالعه ابتدا سناریوی طراحی یک سیستم اسکنر کارگوی با مولد 6 مگاالکترون‌ولت در نظر گرفته شد. نتیجه خروجی طیف حاصل از شتاب‌دهنده 6 مگاالکترون‌ولتی با طیف‌های به‌دست‌آمده در مطالعات دیگران مورد بررسی قرار و ارزیابی قرار گرفت [۱۸ و ۱۹]. گام بعدی این مطالعه بهبود طراحی اجزای یک سامانه کارگو اسکنر کامیونی بود و در نهایت اثر تغییر زاویه قرارگیری آرایه آشکارسازی نسبت به تابش پرتو که یک عامل حیاتی در تشکیل تصویر نهایی از محموله است مورد بررسی قرار گرفت.

۲- مدل‌سازی سامانه

بخش مدل‌سازی از چندین قسمت تشکیل شده است. ابتدا بدنه اصلی دستگاه با نرم‌افزار SolidWorks طراحی شده و طرح نهایی با کد مونت کارلو MCNPX شبیه‌سازی گردید. MCNPX یک کد شبیه‌سازی است که به‌طور گسترده در زمینه مهندسی هسته‌ای و فیزیک پرتوی استفاده می‌شود. مخفف Monte Carlo N-Particle extended است. MCNPX به کاربران این امکان را می‌دهد تا انواع مختلفی از برهمکنش‌های پرتوی با ماده از جمله نوترون‌ها، فوتون‌ها، الکترون‌ها و پوزیترون‌ها را شبیه‌سازی کنند. این کد با شبیه‌سازی ذرات منفرد هنگام اندرکنش با مواد در یک

³ Interactions

¹ Scintillation detector

² Photomultiplier tube (PMT)

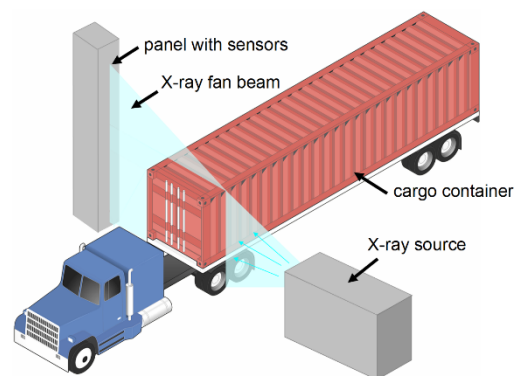
تابش دستگاه کارگو اسکنر مدل‌سازی شده مورد استفاده قرار گرفت. زاویه پرتو بادبزی در اسکنرهای بار کامیون بسته به مدل خاص و سازنده می‌تواند متفاوت باشد. معمولاً بین ۴۰ تا ۹۰ درجه است. در ادامه طراحی سامانه، مولد پرتوی به‌صورت مخروطی با سطح مقطع دایروی برای ایجاد هندسه باریکه جاروبی^۱ با زاویه ۵۹ درجه مدل شد [۲۱]. در گام بعدی اثر پرتوی بر روی آشکارسازهای آرایه‌ای که در راستای عمودی و افقی چیده شده بودند بررسی شد. در ادامه زاویه عمود پرتوی بر روی تک تک آرایه‌های آشکارسازی در ارتفاع‌ها و فواصل مختلف مورد بررسی قرار گرفت. بررسی اثر دوران آشکارسازها از سطح عمود بر پرتو مورد بررسی قرار گرفت و نتایج آن گزارش شد. برای اجرای برنامه‌ها از کامپیوتری با ۱۶ هسته به‌طور موازی بهره برده شد.

۲-۱ مدل‌سازی مولد پرتوی-شتاب‌دهنده ذرات

برای طراحی مولد پرتوی یون‌ساز از هندسه نشان داده‌شده در شکل ۲ استفاده شد. در این هندسه ابتدا باریکه الکترون از چشمه اصلی خارج می‌شود. در ادامه باریکه الکترون در اثر برخورد با هدف تنگستنی در اثر پدیده تابش ترمزی تولید باریکه ایکس می‌کند. طیف پرتوی ایکس تولیدشده نیاز به فیلتر شدن دارد که برای این منظور از یک فیلتر بریلیومی استفاده شد. برمشترالونگ، همچنین به‌عنوان تابش ترمزی شناخته می‌شود، نوعی تابش الکترومغناطیسی است که زمانی که یک ذره باردار، مانند یک الکترون، به دلیل برهمکنش با سایر ذرات باردار یا میدان‌های باردار، شتاب می‌گیرد، تولید می‌شود. تابش ترمزی در سامانه‌های مختلف از جمله شتاب‌دهنده‌های ذرات، تجهیزات تصویربرداری پزشکی و دستگاه‌های اشعه ایکس رخ می‌دهد. مقدار تابش برمشترالونگ تولیدی به عوامل مختلفی مانند انرژی ذره باردار، ماده‌ای که با آن برهمکنش می‌کند و زاویه تابش آن بستگی دارد. تابش تولیدشده می‌تواند از امواج رادیویی کم انرژی تا پرتوهای گاما با انرژی بالا باشد.

سیستم کار می‌کند. این به محققان اجازه می‌دهد تا به‌طور دقیق سیستم‌های پیچیده‌ای را مدل کنند که تجزیه و تحلیل آن‌ها با استفاده از روش‌های دیگر دشوار یا غیرممکن است. MCNPX را می‌توان برای مطالعه طیف گسترده‌ای از کاربردها، از جمله تصویربرداری پزشکی، انرژی هسته‌ای، پرتودرمانی و طراحی شتاب‌دهنده ذرات استفاده کرد. یکی از نقاط قوت MCNPX تطبیق‌پذیری آن است. کد دارای تعداد زیادی پارامتر ورودی است که می‌تواند برای مدل‌سازی سناریوهای مختلف تنظیم شود. این شامل توانایی مدل‌سازی انواع مختلف منابع تابش، مواد هدف و هندسه است. علاوه بر این، MCNPX می‌تواند برای مدل‌سازی طیف انرژی پیوسته و گسسته استفاده شود که آن را برای مطالعه طیف گسترده‌ای از پدیده‌های تابش مفید می‌سازد.

اجزای اصلی دستگاه بخش چارچوب اصلی، مولد پرتوی، حفاظ پرتوی، آرایه آشکارسازی و محموله کارگو است. در شکل ۱ نمونه‌ای از یک سامانه اسکنر کارگو کامیونی نشان داده شده است. در این شکل باریکه خروجی جاروبی، محل قرار گیری کامیون و بخش استقرار آرایه‌های آشکارسازی نشان داده شده است.



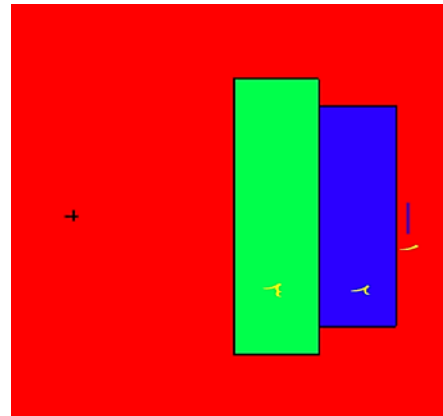
شکل (۱) طرح‌واره‌ای از یک سامانه کارگو اسکنر کامیونی [۲۰]

در ادامه مولد پرتوی که یک شتاب‌دهنده ۶ مگاالکترون‌ولت الکترونی بود، مشابه با نمونه‌های و هندسه طراحی شده در مطالعات دیگران، با کد مونت کارلوی MCNPX شبیه‌سازی گردید و طیف خروجی آن محاسبه شد. طیف حاصل با طیف خروجی نمونه‌های موجود در تحقیقات مقایسه گردید و پس از اطمینان از صحت محاسبات، در بخش چشمه

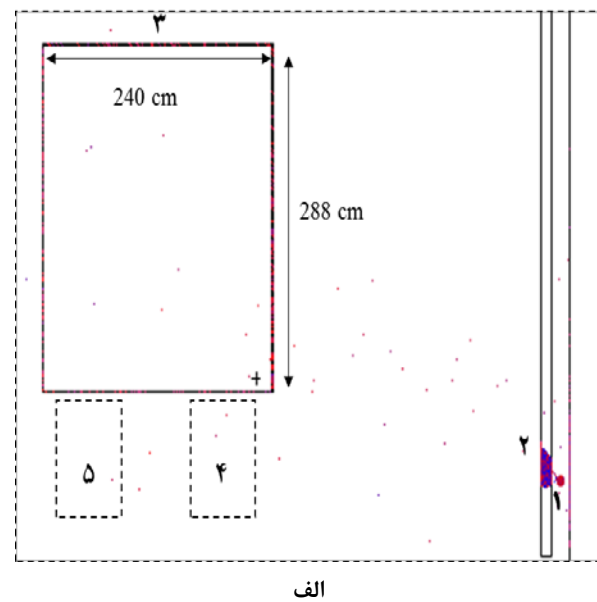
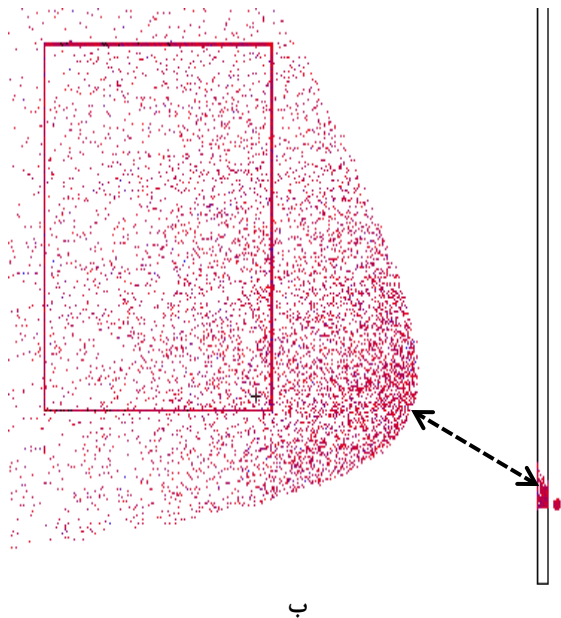
¹ Fan-beam

۲-۲ تنظیم چشمه تابش مخروطی

برای تولید یک پرتوی مخروطی از دستورات مرتبط در کد استفاده گردید. در شکل ۲ نحوه تابش و زاویه تابش چشمه زمانی که هیچ نوع ماده بر سر راه چشمه قرار نگرفته باشد و زمانی که مواد با پرتوهای گسیلی از چشمه برهم کنش کنند، نشان داده شده است. از آنجا که باریکه خروجی از محفظه نگهداری مولد پرتوی واقعی، هندسه مخروطی شکل دارد در این مرحله کد مربوط به مدل سازی چشمه مخروطی به برنامه اضافه گردید. در شکل ۳ می توان سطح مقطع نحوه خروج ذرات از چشمه را مشاهده نمود که به صورت یک مخروط با سطح مقطع دایروی است.



شکل ۲) نمایی از هندسه مورد نظر برای تولید پرتوی ایکس، (۱) مولد الکترون، (۲) هدف تنگستنی و (۳) فیلتر بریلیومی



شکل ۳) سطح مقطع نشان دهنده نحوه تابش چشمه مخروطی، (۱) چشمه مخروطی، (۲) یکسوساز، (۳) بدنه کانتینر ۵ و ۴ چرخ های کامیون (الف)، بدون حضور ماده در مسیر ذرات (از کنار) (ب) با حضور ماده در مسیر ذرات از کنار

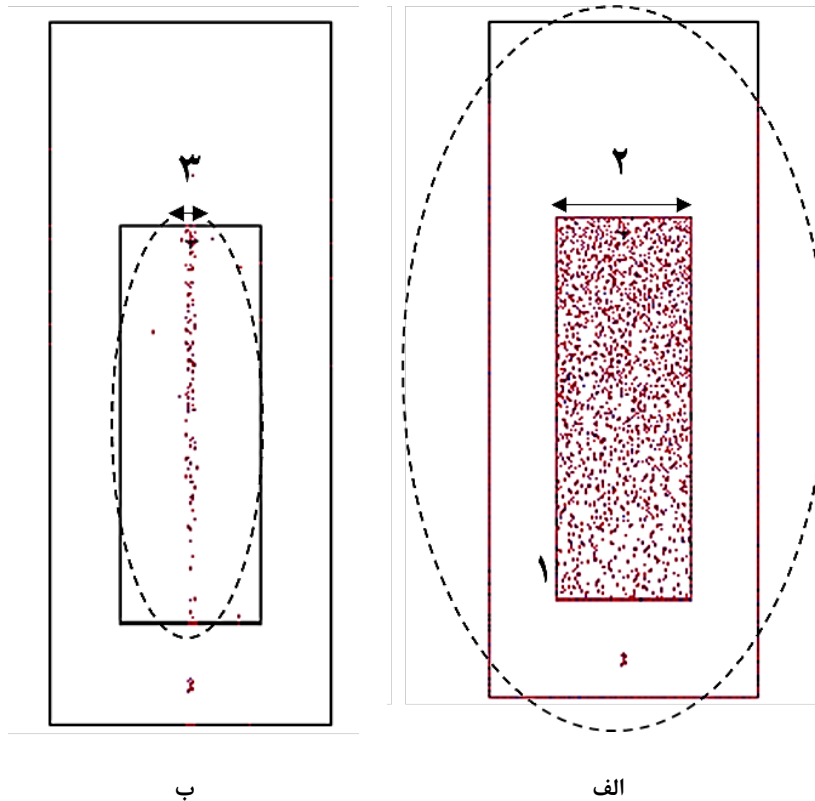
نیز می شود. ناحیه شروع اندرکنش که ردی از ذرات در آنجا وجود دارد در شکل ۳ (ب) نشان داده شده است به این معنی که در این فاصله از مولد پرتوی ذرات پس از خروج از مولد پرتوی، شروع به اندرکنش با ماده می کنند.

۲-۳ استخراج باریکه جارویی از مولد پرتوی

با قرار دادن روزنه دارای شکاف به عرض ۴ میلی متر از توزیع بادبزی ذرات یک توزیع باریکه جارویی استخراج شد

در شکل ۳، بخش مولد پرتوی ایکس، بخش یکسوساز باریکه و بدنه کانتینر نشان داده شده است. در شکل ۳ (الف) نحوه اندرکنش ذرات گسیل شده از مولد بدون حضور ماده به تصویر کشیده شده است. در شکل ۳ (ب) همین پدیده با حضور ماده، یکسوساز و بدنه فلزی کانتینر نمایش داده شده است. همان گونه که شکل ۳ نشان می دهد چشمه به گونه ای قرار گرفته است که مسیر ذرات خروجی از آن تمامی ناحیه کانتینر را پوشش می دهد و این پوشش شامل ناحیه چرخ ها

که در شکل ۴ مشاهده می‌گردد. تولید این باریکه جاروبی جهت تمرکز پرتوها بر روی پیکسل‌های آشکارساز و افزایش مقدار سیگنال به نوبت تولیدی است.



شکل ۴) سطح مقطع نشان دهنده نحوه تابش چشمه مخروطی، (۱) صفحه استقرار آرایه‌های آشکارساز، (۲) پخش ذرات در صفحه آشکارسازها، (۳) تبدیل باریکه واگرا به خط باریکه همگرا (الف)، با حضور ماده در مسیر ذرات (از روبرو) (ب) باریکه جاروبی ایجادشده با حضور ماده در مسیر ذرات (از روبرو)

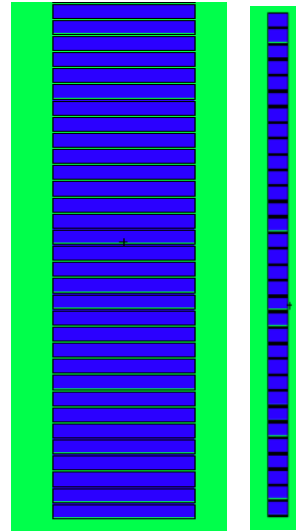
عرض، طول و عمق $4 \times 7 \times 30$ میلی‌متر مکعب مدل‌سازی شد. فاصله مرکز هر پیکسل نسبت به پیکسل مجاور $4/6$ میلی‌متر در نظر گرفته شد. نمایی از طرح یک آرایه از آشکارسازهای مدل‌سازی شده در شکل ۴ نشان داده شده است.

در شکل ۴ اثر یکسوساز بر نحوه گسیل ذرات از مولد پرتوی در صفحه قرارگیری آشکارسازها نشان داده شده است. در صورت عدم حضور یکسوساز همان‌گونه که شکل ۴ (الف)، نشان می‌دهد ذرات به‌صورت پراکنده و با واگرایی بالا بر روی محفظه‌ای که آشکارسازها قرار گرفته‌اند، فرود می‌آیند و در صورت استفاده از یکسوساز به‌صورت یک باریکه خطی (بادبزی) ناحیه حساس آشکارسازها را پوشش می‌دهد. بیضی‌های خط‌چین در شکل ۴ (الف) و (ب) اثر یکسوساز را در تبدیل باریکه واگرای گسیل شده از مولد پرتو را به باریکه همگرای متمرکز بر روی آشکارسازها و تغییر ناحیه پوشش را نمایش می‌دهد.

۲-۴ تعریف هندسه آشکارساز

در کد، آشکارساز کادمیوم تنگستات $CdWO_4$ با ابعاد

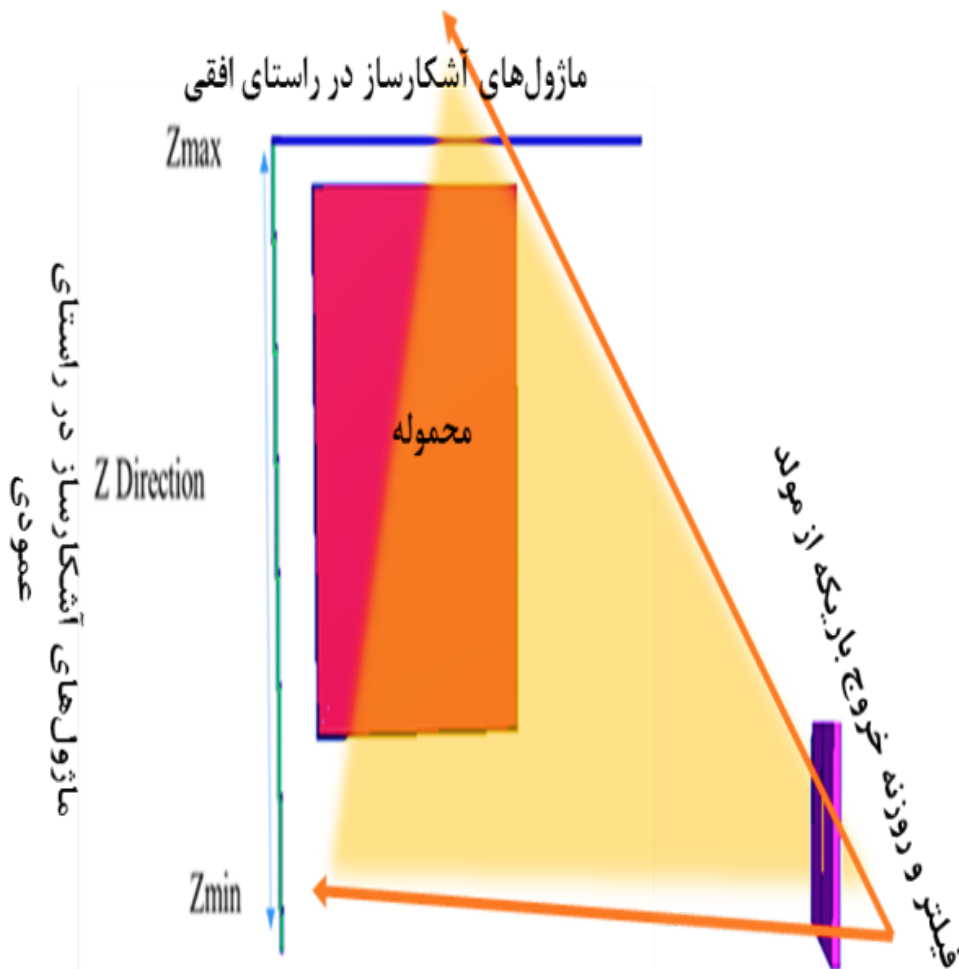
هر ماژول آشکارساز شامل ۳۲ کانال آشکارسازی (پیکسل) می‌باشد. هر پیکسل یا کانال از یک کریستال سوسوزن $CdWO_4$ و یک دیود نوری سیلیکونی متصل به آن تشکیل شده است. بخش جانبی کریستال هنگامی که از مسیر پرتو ورودی دیده شود، دارای ۴ میلی‌متر عرض و ۷ میلی‌متر ارتفاع می‌باشد.



شکل ۵) نمایی از دو وجه آشکارساز آرایه‌ای مدل شده

۲-۵ تعریف هندسه نهایی

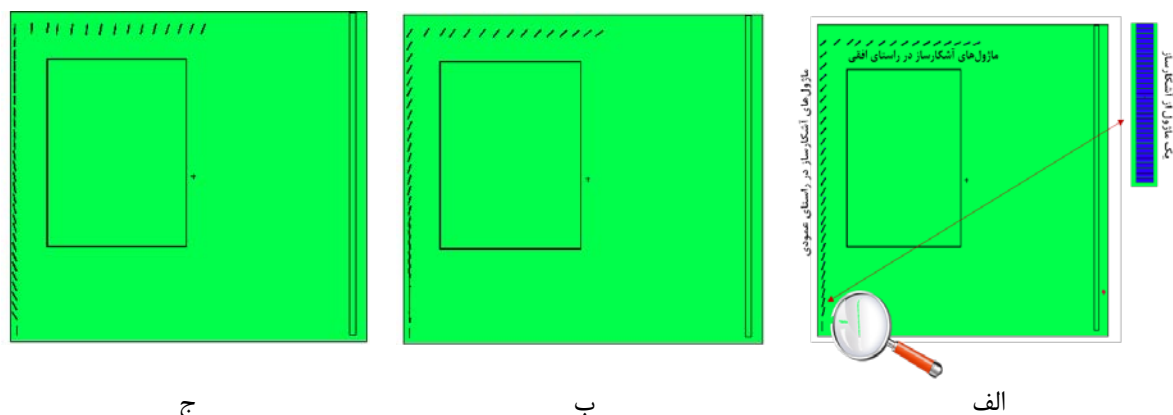
هندسه نهایی در حالت کلی در شکل ۶ نشان داده شده است.



شکل ۶) نمایی از هندسه اصلی

۱-۵-۲ دوران آشکارسازها

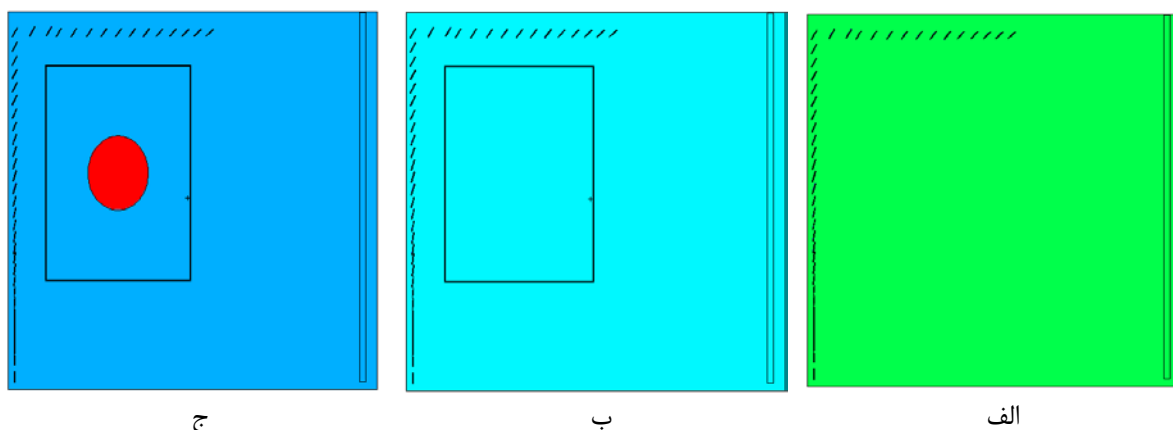
آرایه‌ها به‌گونه‌ای تنظیم شدند که برخورد پرتو بر روی آن‌ها به‌صورت عمود باشد.



شکل ۷) دوران آرایه‌های آشکارساز: (الف) ۰ درجه، (ب) ۲۰ درجه و (ج) ۳۰ درجه

در گام بعدی زاویه آن‌ها از حالت عمود پرتوی به میزان ۲۰ و ۳۰ درجه تغییر یافت و اثر آن بر روی پاسخ آشکارسازها محاسبه شد و با یکدیگر مقایسه شدند. تغییر زاویه از حالت عمود به حالت‌های ۲۰ و ۳۰ درجه نشان‌دهنده این است که باز هم تغییر زاویه آرایه آشکارسازها از حالت برخورد عمود بر مسیر پرتو، باعث کاهش شمارش در آشکارسازها می‌گردد.

در ادامه، برای زاویه برخورد عمودی پرتو بر روی آشکارسازها یا همان حالت بهینه مدل‌سازی دیگری صورت گرفت. بدین ترتیب که ابتدا در فاصله میان آشکارسازها و مولد پرتوی تنها هوا در نظر گرفته شد، در حالت بعدی کانتینر توخالی قرار گرفت و در نهایت ماده آلومینیوم به صورت استولنه در داخل کانتینر مدل گردید تا اثر مواد مختلف بر روی تغییرات شدت ثبت شده در آشکارسازهای افقی و عمودی بررسی شود.

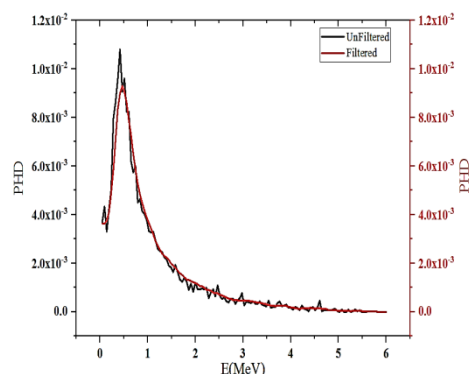


شکل ۸) مدل‌سازی قرارگیری مواد مختلف در مسیر عبور پرتوها جهت بررسی تغییرات شمارش در آشکارسازها به ازای تغییر مواد داخل کانتینر (الف) بدون حضور ماده، (ب) کانتینر توخالی و (ج) آلومینیوم در داخل کانتینر به قطر ۲۰ سانتیمتر

۳- نتایج

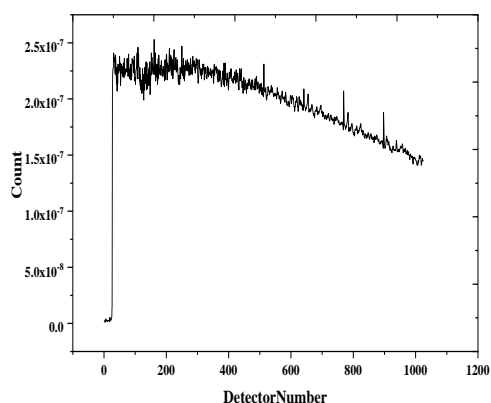
نتایج مدل‌سازی بدنه اصلی سامانه کارگو اسکندر مبتنی بر مولد پرتوی ۶ مگا الکترون‌ولتی و طیف خروجی آن بر اساس نمونه واقعی، هندسه مخروطی سامانه مواد پرتوی مستقر در دستگاه، خروجی باریکه جارویی و در نهایت پاسخ آشکارسازها در حالت‌های مختلف مورد بحث قرار گرفته است.

نتایج مربوط به طیف خروجی بخش مولد پرتوی در شکل ۷ نشان داده شده است.

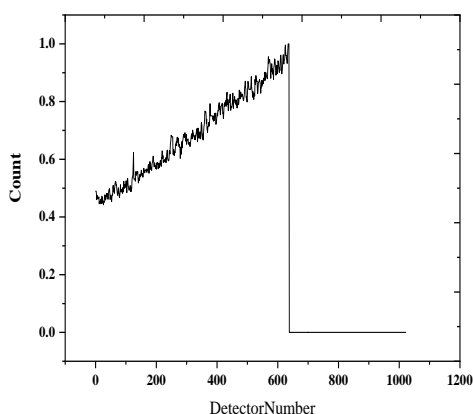


شکل ۷

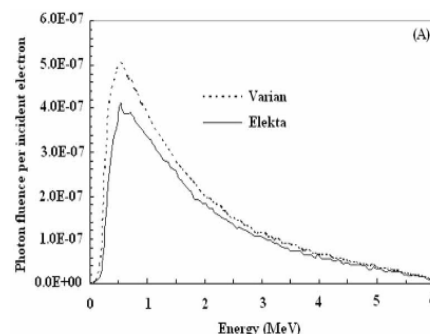
آشکارسازها بر روی هم چیده شوند و در راستای محور Z بدون هیچ تغییر زاویه در هندسه بکار گرفته شوند، پروفایل شدت ثبت‌شده به صورت نمودار شکل ۱۰ خواهد بود. طبق پروفایل تغییرات شمارش ثبت‌شده در پایین‌ترین آشکارساز نسبت به بالاترین آشکارساز ۳۳ درصد می‌باشد. در صورتی که آشکارسازها در راستای محور افقی بدون هیچ تغییر زاویه در هندسه در کنار یکدیگر چیده شوند، پروفایل شدت ثبت‌شده به صورت نمودار شکل ۱۱ خواهد بود. طبق پروفایل، اختلاف شمارش ثبت‌شده در نزدیک‌ترین آشکارساز نسبت به دورترین آشکارساز ۶۰ درصد می‌باشد.



شکل ۱۰) شمارش ثبت‌شده بر پیکسل‌های آشکارساز در بازوی عمودی



شکل ۱۱) شمارش ثبت‌شده بر پیکسل‌های آشکارساز در بازوی افقی



شکل ۹

شکل ۹) (الف) طیف ایکس خروجی بدون و با اثر فیلتر بریلیومی در کار حاضر (ب) در مرجع [۲۲].

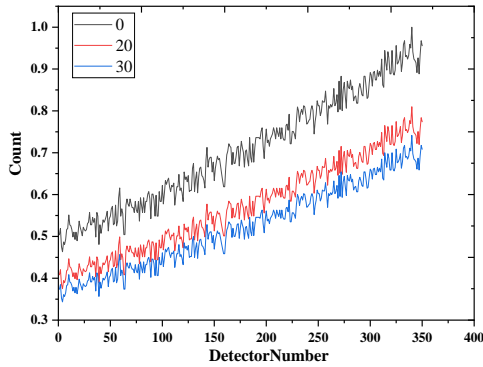
همان‌گونه که نتایج مدل‌سازی در شکل ۹ نشان می‌دهد طیف حاصل با نتایج کارهای تجربی و سامانه‌های شتاب‌دهنده واقعی مطابقت دارد.

۳-۱ بررسی اثر ارتفاع قرارگیری آرایه‌ها در راستای عمودی و افقی

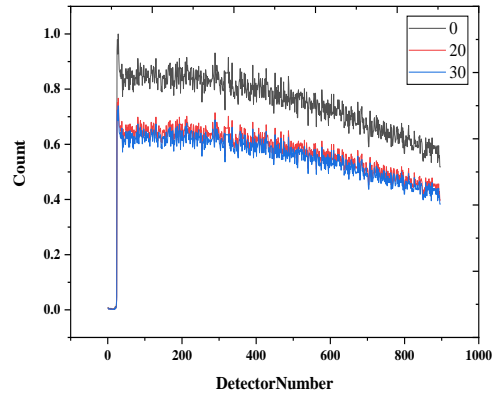
شمارش ثبت‌شده بر پیکسل‌های آشکارساز در راستای محور عمودی و افقی نگه‌دارنده آشکارسازها در شکل ۵ نشان داده شده است. با توجه به شکل مشخص می‌گردد که اگر

۳-۲ بررسی تغییر زاویه قرارگیری آشکارساز نسبت به پرتوهای فرودی^۱

با تغییر زاویه آشکارساز از حالت عمود به مسیر تابش پرتوها به زاویه ۲۰ و ۳۰ درجه شمارش ثبت شده بر روی آشکارسازها کاهش می‌یابد.

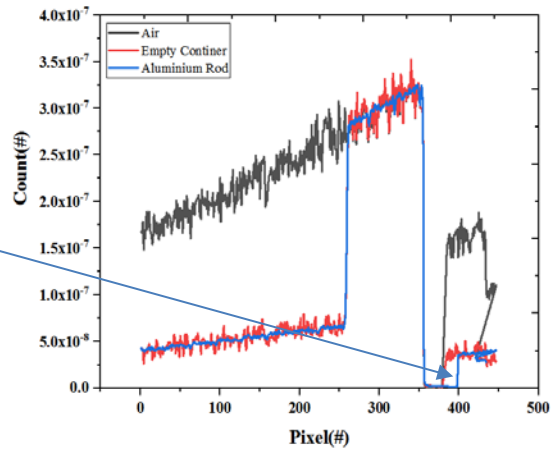
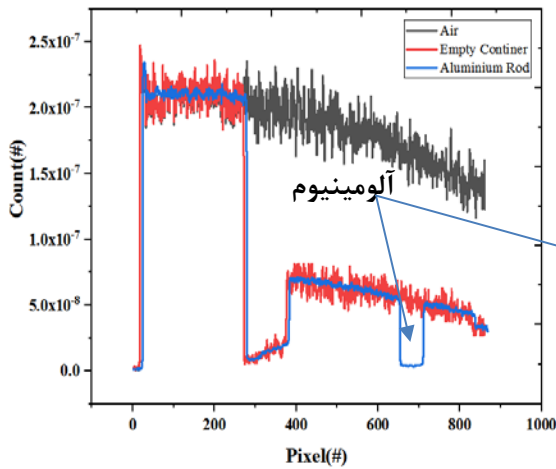


شکل ۱۳) تغییرات شمارش به ازای تغییر زاویه آرایه‌های ستون افقی



شکل ۱۲) تغییرات شمارش به ازای تغییر زاویه آرایه‌های ستون عمودی

۳-۳ بررسی تغییرات شمارش در آرایه‌های آشکارساز به ازای حضور جسم در داخل کانتینر



شکل ۱۴) الف) تغییرات شمارش به ازای تغییر ماده تحت اسکن در آشکارسازهای بازوی عمودی (ب) تغییرات شمارش به ازای تغییر ماده تحت اسکن در آشکارسازهای بازوی افقی

¹ Incident beam

۴- نتیجه‌گیری

از حالت برخورد باریکه عمودی منجر به کاهش سیگنال خواهد شد که در نتیجه آن پارامتر سیگنال به نویز کمتر و در نهایت دریافت تصاویر با کیفیت نامناسب خواهد شد و پس از نصب و راه‌اندازی سامانه‌های واقعی می‌بایست جهت دریافت کیفیت مناسب شدت باریکه فرودی افزایش یابد که این امر منجر به کاهش عمر هدف مولد پرتوی، افزایش دز محیطی و آسیب‌های پرتوی برای جمعیت حاضر خواهد شد.

مدل‌سازی و شبیه‌سازی نقش مهمی در طراحی و توسعه هر سیستم پیچیده‌ای از جمله سیستم‌های اسکنر محموله ایفا می‌کند. با ایجاد مدل‌ها و شبیه‌سازی‌های دقیق از این سیستم‌ها قبل از ساخت، مهندسان و طراحان می‌توانند ایرادات یا ضعف‌های احتمالی در طراحی سامانه‌های تشخیصی غیرمخرب را شناسایی کرده و عملکرد سیستم را بهینه کنند. یکی از مزایای کلیدی استفاده از مدل‌سازی و شبیه‌سازی این است که به طراحان اجازه می‌دهد تا سناریوها و پیکربندی‌های مختلف را بدون نیاز به نمونه‌های اولیه فیزیکی آزمایش کنند. این می‌تواند در زمان و هزینه صرفه‌جویی کند و همچنین خطر اشتباهات گران‌قیمت یا نقص‌های طراحی را که می‌تواند ایمنی یا کارایی سیستم را به خطر بیندازد کاهش دهد. در این مطالعه تأثیر پارامتر زاویه بر پاسخ آشکارسازها در سیستم‌های بار اسکنر کامیون با استفاده از کد MCNPX بررسی شد. پارامتر زاویه به زاویه‌ای اشاره دارد که پرتوهای گسیل‌شده از مولد پرتوی با آشکارساز برهمکنش می‌کند و عامل مهمی در تعیین دقت و قابلیت اطمینان سیستم‌های اسکن محموله است.

۵- تعارض منافع

هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسندگان وجود ندارد.

۶- منابع

[1] Bendahan J. (2017). Vehicle and Cargo Scanning for Contraband. *Physics Procedia*, 90, pp.242-255.

[2] Flynn S.E. (2007). Beyond Border Control. *Foreign Affairs*, 79, p.57.

[3] Vega J.P., Valentin R. (2019). NDE OF ELECTRICAL GENERATORS USING RADIOGRAPHIC INSPECTION: Use of radiography to inspect insulated generator components without the need to strip insulation offers advantages over other inspection methods to assess serviceability and need for repair. *Advanced Materials & Processes*, 177(6), pp.18-23

[4] Olugbade S., Ojo S., Imoize A.I., Isabona J., Alaba M.O. (2022). A Review of Artificial Intelligence and Machine Learning for Incident Detectors in Road Transport Systems. *Mathematical and Computational Applications*, 27(5), p.77.

[5] Altmann J. (2000). Cooperative Monitoring Center Occasional Paper/16: The Potential of Technology for the Control of Small Weapons: Applications in Developing Countries. No. SAND98-0505/16. Sandia National Lab. (SNL-NM), Albuquerque, NM (United States); Sandia National Lab. (SNL-CA), Livermore, CA (United States).

[6] Sokolowski J.A., Catherine M.B. (2011). Principles of Modeling and Simulation: A Multidisciplinary Approach. New York: John Wiley & Sons.

[7] Gomes R.G. et al. (2021). MCNPX Computational Modeling Applied to the Potential Dose Rates Calculation of Cargo Scanning. *Applied Radiation and Isotopes*, 178, p.109967.

[8] Fantidisand J.G., Nicolaou G.E. (2011). A

مطابق با نتایج به دست آمده، ابتدا خروجی طیف ایکس حاصل از شتاب‌دهی الکترون‌های ۶ مگا‌الکترون‌ولت با هدف تنگستنی استخراج شد و با طیف‌های موجود در سایر مطالعات اعتبار سنجی گردید و نتایج نشان داد که خروجی‌ها مطابقت خوبی با هم دارند. تغییرات شدت ثبت‌شده در پیکسل‌های آرایه‌های آشکارسازی در راستای عمودی نشان دادند که اختلاف درصدی شمارش از پایین‌ترین پیکسل تا بالاترین پیکسل حدود ۳۳ درصد است و نیز در راستای افقی تغییرات شمارش از نزدیک‌ترین پیکسل به مولد پرتوی نسبت به دورترین پیکسل حدود ۶۰ درصد می‌باشد که در طراحی الگوریتم‌های ثبت تصاویر باید این تغییرات لحاظ گردد و پارامترهای اصلاحی در نظر گرفته شود.

از طرفی زاویه تک تک آرایه‌ها به‌گونه‌ای تنظیم گردید که سطح برخورد پرتوها از چشمه مخروطی به‌صورت عمود باشد و در ادامه دوران ۲۰ و ۳۰ درجه برای آرایه‌ها در نظر گرفته شد. نتایج نشان می‌دهد که تابش عمودی منجر به بهبود سیگنال ثبت‌شده در آشکارسازهای ستون عمودی و افقی می‌شود، در صورتی که تغییرات و افزایش زاویه انحراف

- [20] Barnes S. et al. (2023). "Cosmic-ray for Border Security. *Instruments*, 7(1), p13.
- [21] Bendahan J. (2011). Multi-view Cargo Scanner", Patent, No. WO2011091070A2.
- [22] Mesbahi A., Mehnati P., Keshtkar A. (2007). A Comparative Monte Carlo Study on 6 MV Photon Beam Characteristics of Varian 21EX and Elekta SL-25 Linacs. *International Journal of Radiation Research*, 5(1), pp. 23-30.
- [9] Gil Y., Oh Y., Cho M., Namkung M. W. (2011). Radiography Simulation on Single-shot Dual-Spectrum X-ray for Cargo Inspection System. *Applied Radiation and Isotopes*, 69(2), pp.389-393.
- [10] Michette A.G., Buckley C.J. (1993). X-ray Science and Technology. Philadelphia: *Institute of Physics Publishing*.
- [11] Assmus A. (1995). Early History of X rays. *Beam Line*.
- [12] Singh A.K. (2005). "Advanced X-ray Techniques in Research and Industry", *IOS press*.
- [13] Jaccard N., Rogers T.W., Morton E.J., Griffin L. D. (2017). Detection of Concealed Cars in Complex Cargo X-ray Imagery using Deep Learning. *Journal of X-ray Science and Technology*, 25(3), pp. 323 – 339.
- [14] Zentai G. (2010). X-ray Imaging for Homeland Security. *International Journal of Signal and Imaging Systems Engineering*, 3(1), pp. 13 – 20.
- [15] Krumrey M., Cibik L., Müller P., Bavdaz M., Wille E., Ackermann M., Collon M.J. (2010). X-ray Pencil Beam Facility for Optics Characterization. *Space Telescopes and Instrumentation 2010: Ultraviolet to Gamma Ray*, 7732.
- [16] Knoll G.F. (2010). Radiation Detection and Measurement. New York: *John Wiley & Sons*.
- [17] Epic-Crystal Co., available at: <http://www.epic-scintillator.com/cwo-crystal-scintillator-3x3x20mm>
- [18] Permatasari I.D.A. (2019). Monte Carlo Simulation of X-ray Spectra Produced by Linac. *In Journal of Physics: Conference Series*, 1153(1), p. 012109.
- [19] Taneja S., Bartol L.J., Culberson W., De Werd, L.A. (2020). Measurement of the Energy Spectrum of a 6 MV Linear Accelerator Using Compton Scattering Spectroscopy and Monte Carlo-Generated Corrections. *International Journal of Medical Physics, Clinical Engineering and Radiation Oncology*, 9(4), pp. 186-200.