

تعیین قدرت تفکیک سامانه کارگو اسکنر رادیوایزوتوپی و آزمون عملکرد آن

علی طاهری، مجتبی عسکری، حجت‌اله ماهانی، امیرمحمد بیگزاده*، جواد کوچک‌پور

۱. پژوهشکده کاربرد پرتوها، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، صندوق پستی: ۳۴۸۶ - ۱۱۳۶۵، تهران، ایران

چکیده:

در بازار جهانی که تجارت غیرقانونی مرزی همچنان در حال رونق است، امنیت این بخش هنوز جدی گرفته نشده است. گمرکات باید از حمل غیرقانونی مواد مخدر، اسلحه، سایر کالاهای غیرقانونی و ... جلوگیری کنند. اسکنرهای کارگو با بهره‌گیری از پرتوهای پرتو، نقش اساسی در بازرسی غیر مخرب واردات، صادرات و کنترل‌های امنیتی دارد. سامانه‌های پرتونگاری با پرتوی گاما که قادر به اسکن خودروها هستند معمولاً از کبالت -۶۰ یا سزیم -۱۳۷ به عنوان منبع رادیواکتیو و یک ستون عمودی از آشکارسازهای گاما استفاده می‌کنند اسکنرهای کارگو زمانی که با روش‌های تصویربرداری و پروفایلینگ تصویر ترکیب می‌شوند می‌توانند عملکرد گمرکی و امنیتی را با غربالگری کالاها و محموله‌ها در مرزهای دریایی و زمینی تا حد زیادی بهبود بخشند. در این مطالعه به بررسی قدرت تفکیک سامانه آشکارسازی دستگاه کارگو اسکنر رادیوایزوتوپی که یکی از پارامترهای مهم در عملکرد بهینه در این دستگاه است پرداخته شده و مقدار آن برای این سامانه به روش استاندارد موجود اندازه‌گیری شد و در نهایت تصویر روبش شده برای سه جسم حقیقی توسط دستگاه به دست آمد.

کلیدواژه‌ها: کارگو اسکنر رادیوایزوتوپی، قدرت تفکیک، چشمه گاما، کاربرد پرتوها، قاچاق، آزمون غیر مخرب.

Determining the resolution of radioisotopic cargo scanner system and testing its performance

Ali Taheri, Mojtaba Askari, Hojatollah Mahani, Amirmohammad Beigzadeh*, Javad Koochak Pour
1. Radiation Application Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute, AEOL, P.O.Box: 11365-3486, Tehran - Iran

Abstract:

In a global marketplace where illicit cross border trade is still thriving, supply chain security has never been more crucial. Customs need to prevent illegal transport of drugs, arms, other illegal goods, and migrants. Cargo scanners play a key role in non-destructive inspection of imports, exports and security controls. Cargo scanners, when combined with image profiling methods, can greatly improve Gamma-ray radiographic systems are capable of scanning vehicles, typically using cobalt-60 or cesium-137 as the radioactive source and a vertical column of gamma-ray detectors. customs and security performance by screening cargo flows at sea and land borders. In this study, the resolution of the native cargo scanner detection system, which is one of the important parameters in the optimal performance of this device, has been investigated and its value measured for this system according to the existing standard method. Finally, the scanned image for the three real objects was obtained by the system.

Keywords: radioisotopic cargo scanner, resolution, gamma source, radiation application, contraband, Nondestructive Test.

Email: beigzadeh_am@yahoo.com

۱. مقدمه

از سال ۱۹۷۰ روش‌های متداول شناسایی با استفاده از اسکن پرتو ایکس و گاما شروع به رشد کرده است و بازرسی محموله با این مولدهای پرتو، برای امنیت ملی و جلوگیری از ورود و خروج کالاهای قاچاق، خیلی سریع به یک ابزار کلیدی در گمرک‌های سراسر جهان تبدیل شده است. یکی از مستعدترین زمینه‌های استفاده از شتاب‌دهنده‌های خطی و در واقع سامانه‌های تصویربرداری با استفاده از تابش ایکس پراثری، مقوله بازرسی کانتینرهای حمل بار در مراکز گمرک، بندرهای کشتی‌رانی و فرودگاه‌ها است. همچنین، امروزه استفاده از این‌گونه تجهیزات برای انجام آزمون‌های غیرمخرب بر روی لوله‌های حامل نفت و سایر تجهیزات مورد استفاده در صنایع پتروشیمی و پالایشگاه‌ها به شدت مورد توجه قرار گرفته است [۱]. اهداف بازرسی محموله‌های تجاری به چند دسته اصلی تقسیم می‌شود:

کشف محموله‌های قاچاق

کشف مواد شکافت‌پذیر و مواد رادیواکتیو

کشف مواد منفجره، مواد مخدر و دارو

مبارزه با هرگونه قاچاق [۲]

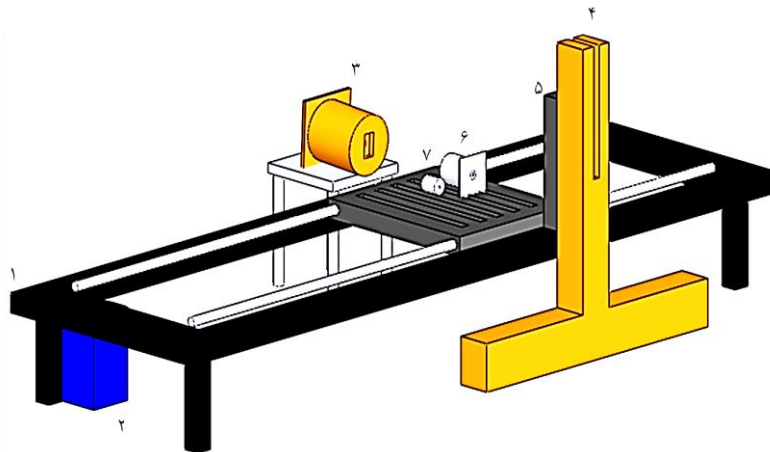
سامانه‌های مورد استفاده در بازرسی محموله‌ها را می‌توان بر اساس مبانی فیزیکی مختلفی طراحی کرد که مهم‌ترین آن‌ها استفاده از تابش نوترون و یا پرتو ایکس است. نقطه مشترک در تمام کاربردهای فوق، استفاده از شتاب‌دهنده‌های الکترون و یا امکان استفاده از آن‌ها است. روش‌های بازرسی محموله که بر مبنای تابش نوترون یا فوتون می‌باشند از واکنش‌های هسته‌ای مختلفی برای شناسایی استفاده می‌کنند. این روش‌ها بر مبنای ذره یا پرتو خروجی از منبع مورد استفاده در شناسایی، پروفایل زمانی و انرژی ذره یا پرتو مورد استفاده، نوع و انرژی ذره‌ها یا پرتوهای ناشی از اندرکنش تقسیم‌بندی می‌شوند. روش‌هایی که مبتنی بر تابش نوترون بر محموله و تحلیل گامای خروجی در اثر اندرکنش نوترون با مواد مورد بررسی می‌باشند؛ بطوری کلی از اندرکنش‌های (n, γ) یا $(n, n' \gamma)$ استفاده می‌کنند و از تحلیل گامای خروجی برای شناسایی مواد موجود در محموله استفاده می‌کنند. روش‌های بازرسی که از تکنیک‌های تابش نوترون و تحلیل نوترون خروجی یا (n, n) بهره می‌برند در واقع مبتنی بر اندرکنش‌های پراکندگی الاستیک و پس‌پراکندگی نوترون می‌باشند. در حالی که روش‌های مبتنی بر تابش فوتون و تحلیل فوتون خروجی از اندرکنش‌های جذب و پراکندگی فوتون‌های در محیط مورد بررسی بهره می‌برند. برای شناسایی مواد شکافت‌پذیر نیز از تکنیک‌های تابش نوترون یا فوتون و تحلیل محصولات اندرکنش شکافت استفاده می‌شود [۳ و ۴]. در کنار افزایش قابلیت‌های انتخاب نوع چشمه پرتوی و بکارگیری منابع مختلف، آرایه قابل ملاحظه‌ای از آشکارسازهای بزرگ و با بازده بالا برای افزایش کیفیت و کمیت شناسایی محموله به کار گرفته می‌شوند، از آنجا که این روش یک روش غیر تماسی است، لذا نتیجه‌گیری نهایی در مورد محموله وابسته به تصاویر دریافتی است که از طریق بخش آشکارسازی این دستگاه اکتساب شده است [۵]. تفسیر دقیق تصاویر به دست آمده و تشخیص ساختار و شکل فیزیکی محتویات محموله بستگی زیادی به قدرت تفکیک بخش آشکارسازی این نوع سامانه‌ها دارد لذا یکی از مهم‌ترین آزمون‌ها برای ارزیابی عملکرد اسکنرهای کارگو، اندازه‌گیری قدرت تفکیک مکانی تصویر است. در این مطالعه پس از طراحی و راه‌اندازی سامانه کارگو اسکنر بومی با استفاده از آزمون استاندارد قدرت تفکیک این سامانه اندازه‌گیری و برای سه جسم واقعی تصاویر رویش شده با استفاده از این دستگاه به دست آمد.

۲. روش کار

دستگاه کارگو بومی متشکل از دو بخش اصلی منبع پرتو و آرایه آشکارسازی است که در طرح شماتیک شکل ۱ نشان داده شده است. سایر اجزای دستگاه از قبیل ریل برای جابه‌جایی اجسام، کلیماتور چشمه و غیره است. با توجه به اینکه سرعت حرکت اجسام عبوری در مقابل سیستم اسکنر بار و انعطاف‌پذیری سیستم فاکتورهای اساسی هستند و از آنجا که نیاز داریم اجسام را در یک راستای خاص به صورت افقی جابجا کنیم، برای این کار کافی است که یک ریل همراه با موتور و گیربکس در اختیار داشته باشیم. ریلی مناسب با موتور و گیربکس برای حرکت اجسام طراحی و ساخته شد.

یک سیستم الکترومکانیکی است که با استفاده از یک ریل محموله را با کمک یک موتور گیربکس الکترونیکی ۱ اسب بخار در راستای مورد نظر با سرعت قابل تنظیم حرکت می‌دهد.

کلیماتور چشمه به‌عنوان محفظه‌ای برای قرارگیری چشمه رادیواکتیو و مسیردهی به گسیل پرتو در راستای مورد نظر است. در داخل کلیماتور، هولدری که برای نگهداری چشمه رادیواکتیو طراحی شده است این قابلیت را دارد که به سهولت درون کولیماتور جایگذاری شود و در صورت عدم نیاز به چشمه به سهولت به محل اصلی خود در درون حفاظ باز گردد. سامانه آشکارسازی مورد استفاده کریستال سوسونز $CdWO_4$ و یک فوتودیود نوری متصل به آن تشکیل شده است. پس از تنظیمات اولیه و مستقر نمودن محموله با استفاده از بخش الکترومکانیکی بر روی ریل در راستای مورد نظر حرکت می‌کند و پس از عبور از فضای میان منبع تابش و بخش آشکارسازی از آن اطلاعات آن به صورت یک آرایه ماتریس در سیستم با استفاده از نرم‌افزار X-View ثبت و در ادامه برای انجام پردازش تصویر بر روی ماتریس‌های ثبت شده از برنامه MATLAB استفاده شد. نرم‌افزار X-View برای مدل‌های مختلف از آشکارسازهای شرکت DT قابل تنظیم است: تنظیمات خاص و پارامترهای راه‌اندازی اولیه سیستم ممکن است وابسته به مدل باشد. یکی از قابلیت‌های X-View، قابلیت توسعه نرم‌افزاری آن بسته به نیاز کاربر است. بدین معنی که کاربر پس از دریافت اطلاعات از واحد آشکارسازی می‌تواند با توجه به نوع کاربرد سیستم تصویر دلخواه را بدست آورد. با توجه به اینکه در این چیدمان به جای تیوپ اشعه ایکس از یک چشمه سزیوم ۱۳۷ استفاده شده است؛ بنابراین تنظیمات دستگاه در مد تک انرژی و در مد پیوسته تنظیم شد.



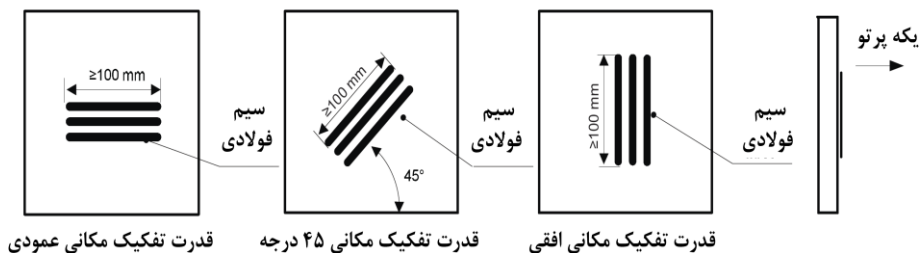
شکل ۱. طرحی از چیدمان دستگاه کارگو: (۱) بدنه اصلی دستگاه (ریل و نگه‌دارنده نمونه) (۲) بخش تنظیمات سرعت حرکت کاناویور (۳) کولیماتور حاوی منبع پرتو (۴) نگه‌دارنده آشکارساز دستگاه (۵) جعبه حاوی آرایه آشکارساز (۶) و (۷) محموله

جهت بررسی قدرت تفکیک سیستم، از آزمون‌های ارائه شده در استاندارد IEC 62523 استفاده شد. صفحه‌ها، سیم‌ها و ورق‌های مورد نیاز جهت ساخت قسمت‌های فلزی فانتوم‌ها، از جنس آهن مطابق استاندارد ISO 4948-1 ساخته شدند [۶].

جدول ۱. شرایط مرجع و شرایط استاندارد آزمون

شرایط محیطی	شرایط مرجع	شرایط استاندارد آزمون
دمای محیط	$20^{\circ}C$	$15^{\circ}C$ تا $25^{\circ}C$
رطوبت نسبی	۶۵٪	۵۰٪ تا ۷۵٪
فشار اتمسفر	$101.3 kPa$	$101.3 kPa$ تا $70 kPa$
آهنگ دُز تابش زمينه	$1.0 \mu Sv \cdot h^{-1}$	آهنگ معادل دُز محیطی کمتر از $1.0 \mu Sv \cdot h^{-1}$
میدان الکترومغناطیسی محیطی	ناچیز	کمتر از پایین‌ترین مقداری که باعث تداخل می‌شود
القای مغناطیسی محیطی	ناچیز	کمتر از دو برابر مقدار القایی به دلیل میدان مغناطیسی زمین

روش‌های متنوعی برای اندازه‌گیری این پارامتر کیفیت تصویر وجود دارند، اما یکی از مرسوم‌ترین روش‌ها، استفاده از سیم‌های با جنس آهن در قطرهای متفاوت بوده که تعیین‌کننده قدرت تفکیک مکانی این دستگاه است. قدرت تفکیک مکانی یک سامانه تصویربرداری بیانگر دقت شناسایی و تفکیک مکانی دو جسم با ابعاد کوچک و نزدیک به همدیگر است. شکل ۲ نمایی از هندسه و چیدمان وسیله در این آزمون را به تصویر کشیده است. پرواضح است که هرچه مقدار توانایی تفکیک مکانی بیشتر باشد، کیفیت تصویر بالاتر بوده و سامانه عملکرد بهتری دارد.



شکل ۲. هندسه و چیدمان وسیله برای آزمون قدرت تفکیک مکانی

در این آزمون قدرت تفکیک از دو دسته سه‌تایی سیم استفاده شد. چیدمان سیم‌ها به گونه‌ای تعیین شد که اگر قطر سیم آهنی برابر d باشد، فاصله (محور تا محور) برابر $2d$ باشد و به عبارت دیگر فاصله لبه تا لبه سیم‌ها همواره برابر d باقی بماند. سیم‌ها بر روی یک صفحه پلکسی گلس (ماده‌ای با عدد اتمی پایین و چگالی کم) با طول ضلع 330 میلی‌متر قرار داده شدند. طول سیم‌ها بیشتر از 100 میلی‌متر در نظر گرفته شد.

دو مجموعه سیم آزمون برای ارزیابی قدرت تفکیک مکانی افقی، عمودی و مایل مطابق استفاده شد. در حالت مایل، زاویه سیم‌ها با محور افقی برابر با 45° تعیین شد. باریکه عمود بر وسیله آزمون و خود وسیله در مرکز میدان دید چشمه قرار داده شد. سامانه روشن شد و پس از کالیبراسیون، وسیله آزمون بر روی نقاله و مابین چشمه و آشکارساز با سرعت ثابت به حرکت در آورده شد. در ادامه، قطر مجموعه سیم‌ها از 4 به 5 میلی‌متر افزایش یافت. مفتول‌های آهنی با ضخامت 4 و 5 میلی‌متر که به وسیله چسب با زوایای صفر، نود و چهل و پنج درجه به صفحات پلکسی گلس متصل شده‌اند، فانتوم‌های لازم برای آزمون را فراهم می‌آورند. هندسه و تجهیزات بکار گرفته شده در انجام آزمون تفکیک مکانی در شکل ۳ دیده می‌شود.

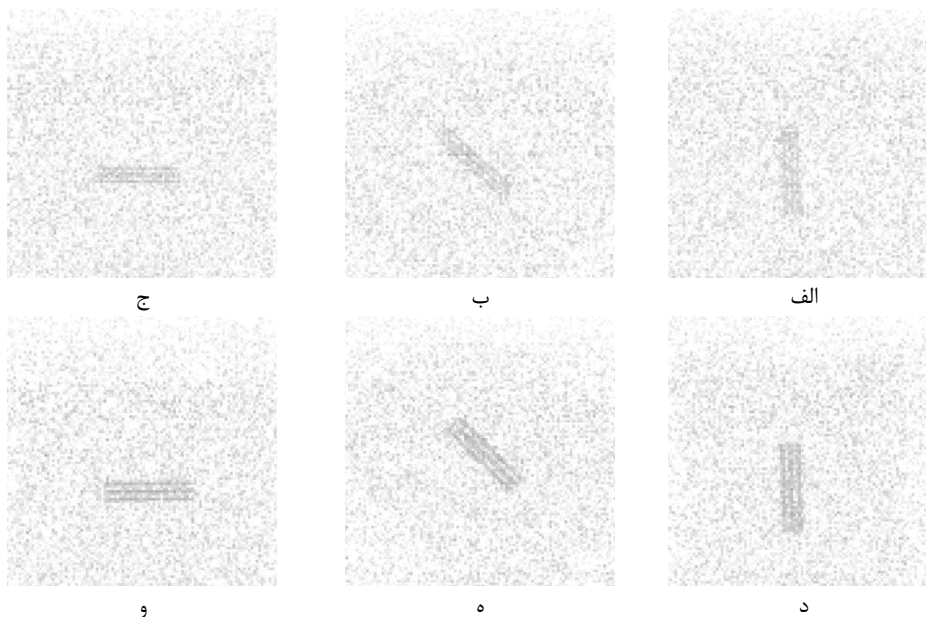


شکل ۳. ابزار و تجهیزات لازم برای آزمون تفکیک مکانی

در شکل ۳ هندسه و چیدمان مربوط به روش آزمون قدرت تفکیک نشان داده شده است. ابتدا با استفاده از یک تراز لیزری موقعیت آشکارساز و منبع پرتو تنظیم می‌شود و در ادامه نمونه آزمون ساخته شده بر روی محل نگهداری ثابت می‌شود و پس از ثابت شدن نمونه با استفاده از کلید رفت و برگشت که موتورگیربکس را برای به حرکت در آوردن نمونه در راستای مورد نظر استفاده می‌شود را فعال می‌کند.

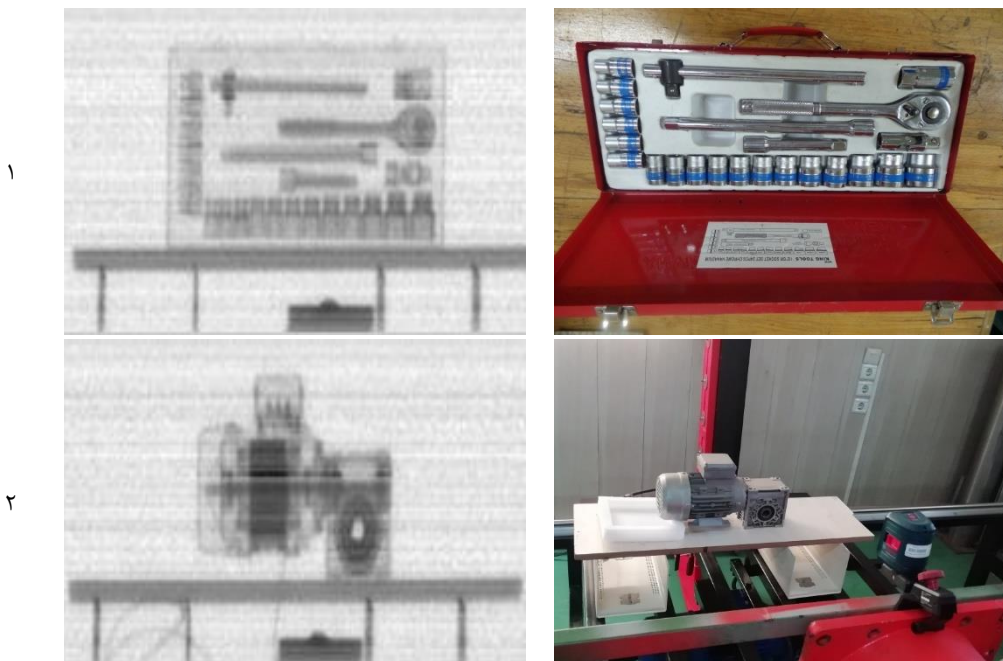
۳. نتایج

شکل ۴ نتایج آزمون قدرت تفکیک مکانی را نشان می‌دهد.

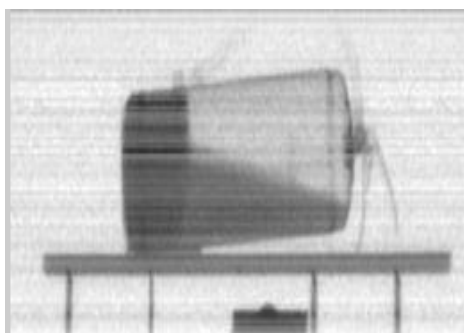


شکل ۴. تصاویر روبش‌شده برای آزمون قدرت تفکیک مکانی با قطر سیم‌های ۴ (ردیف بالا) و ۵ (ردیف پایین) میلی‌متری نصب شده بر روی صفحه پلکسی گلس. قدرت تفکیک مکانی افقی (ج و ه)، قدرت تفکیک مکانی مایل (ب، ه) و قدرت تفکیک مکانی عمود (الف، د).

همان‌طور که در این شکل ۴ مشخص است، سیم‌ها با قطر ۴ میلی‌متری در راستای افقی قابل شناسایی و تفکیک نیستند (شکل ۴، ردیف بالا). قدرت تفکیک مکانی مایل اگرچه بهتر از قدرت تفکیک افقی بوده، اما همچنان سیم‌ها تفکیک نشده‌اند.



۳



شکل ۵: تصاویر روبش شده برای سه جسم واقعی جعبه ابزار (بالا)، موتور و جعبه دنده (وسط) و کپسول (پایین).

پس از اندازه گیری قدرت تفکیک سامانه، عملکرد سامانه برای سه جسم نمونه به عنوان بار شامل (۱) جعبه ابزار، (۲) جعبه دنده و (۳) کپسول آتش-نشانی محتوی پودر اطفای حریق مورد ارزیابی قرار گرفته است که در شکل ۵ نشان داده شده است. ابعاد تصاویر برابر ۱۲۸×۲۵۶ پیکسل است. همان طور که تصویر مشخص است میزان ماده داخلی کپسول اطفای حریق قابل رؤیت است.

۴. نتیجه گیری

امنیت و حفاظت از مرزها اولویت‌های اصلی بسیاری از کشورهای جهان است. به همین سبب، استفاده از روش‌های آزمون غیرمخرب در جهان روبه‌روز در حال گسترش است. یکی از این موارد بهره‌گیری از پرتوها پر نفوذ برای استفاده در بازرسی محموله‌ها در مرزهای و گمرکات برای کنترل ورود و خروج مواد، جلوگیری از قاچاق کالا و نیز جابجایی مواد خطرناک و رادیواکتیو است. در دستگاه‌های کارگو طیف وسیعی از پرتوهای یون‌ساز در قالب شتاب‌دهنده‌های الکترونی و چشمه‌های رادیواکتیو از قبیل گاما، نوترون مورد استفاده قرار می‌گیرد اما مورد مشترک در میان این نوع دستگاه‌ها غیر تماسی بودن، عدم نیاز به باز شدن درب کانتینر و محموله و از همه مهم‌تر تفسیر داده‌های به دست آمده در قالب تصاویر است. یکی از پارامترهای مؤثر در کیفیت تصاویر پارامتر قدرت تفکیک است که در تشخیص و تفکیک بار محموله‌ها یاری می‌رساند. روش‌های متعددی برای اندازه‌گیری این پارامتر وجود دارد، در این مطالعه از یک روش استاندارد برای اندازه‌گیری قدرت تفکیکی سامانه کارگو رادیوازیومی استفاده شد. با استفاده از این آزمون استاندارد، قدرت تفکیک مکانی سامانه برابر با ۵ میلی‌متر اندازه‌گیری شد و در ادامه تصویر تولید شده توسط دستگاه کارگو اسکنر برای سه جسم واقعی به دست آمد.

۵. مراجع

- [1] C. J. Karzmark, S. N. Craig, and E. Tanabe. *Medical electron accelerators*. (McGraw-Hill, 1993).
- [2] Bendahan, Joseph. *Review of active interrogation techniques*. NIM A **954** (161120) 2020.
- [3] J. Rynes, J. Bendahan, T. Gozani, R. Loveman, J. Stevenson and C. Bell. *Gamma-ray and neutron radiography as part of a pulsed fast neutron analysis inspection system*. NIM A, **422**(1-3), (1999).
- [4] Orphan, V. Muenchau, E., Gormley, J., & Richardson, R. *Advanced cargo container scanning technology development*. Science Applications International Corporation, undated. (2009).
- [5] G. Chen. *Understanding X-ray cargo imaging*. NIM B. **241**(1-4), 810-5(2005).
- [6] M. Voytchev, R. Radev, P. Chiaro, I. Thomson, C. Dray and J. Li., *IEC International Standards Under Development For Radiation-Generating Devices* (No. UCRL-PROC-237155). (Lawrence Livermore National Lab.) LLNL, Livermore, CA (United States), 2007).