



Semnan University



Research Article

Performance Evaluation of Car Cargo Scanner Systems for Determining Linear Attenuation Coefficients of Aluminum Metal Sheets: Modeling

Amir Mohammad Beigzadeh ^{a,*}, Mojtaba Askari ^a

^a Radiation Application Research School, NSTRI, Tehran, Iran

PAPER INFO

Paper history:

Received: 2023-12-06

Revised: 2024-04-09

Accepted: 2024-04-20

Keywords:

MCNPX;
Cargo scanner;
Linear attenuation coefficient;
Array detector;
Histogram;
Radiography.

ABSTRACT

This study has investigated the performance of the car scanner cargo system in determining the linear attenuation coefficient of aluminum metal from the images obtained from a modeled car scanner imaging system. This system is based on a scintillation array detector and a radiation generator based on gamma emitter isotope. This research includes modeling the interaction of gamma radiation with the commonly used metal aluminum and analyzing the properties of its linear attenuation coefficient based on the data obtained from the scintillation detector system. For this purpose, radiographic images of aluminum sheets with different thicknesses were first extracted using modeling. Mcnpx monte Carlo code was used to model the system. The obtained images were processed using the algorithm written with MATLAB. Linear attenuation coefficient histograms were obtained from the processed images. Eight conventional functions were fitted on histogram graphs of linear attenuation coefficient. The parameters of the fitted graphs and the fitting accuracy of each were obtained and compared with each other. The average value of the calculated linear attenuation coefficient was compared with the experimental and modeling results of other researches, which showed a good agreement with each other.

DOI: <https://doi.org/10.22075/jme.2024.32585.2577>

© 2024 Published by Semnan University Press.

This is an open access article under the CC-BY 4.0 license. (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

* Corresponding author.

E-mail address: abeigzadeh@aeoi.org.ir

How to cite this article:

Beigzadeh, A., & Askari, M. (2024). Performance Evaluation of Car Cargo Scanner Systems for Determining Linear Attenuation Coefficients of Aluminum Metal Sheets: Modeling. *Journal of Modeling in Engineering*, 22(79), 121-134. doi: 10.22075/jme.2024.32585.2577

ارزیابی عملکرد سیستم های اسکنر محموله خودرو برای تعیین ضرایب تضعیف خطی ورق های فلزی آلومینیوم: مدل سازی

امیر محمد بیگزاده^{۱*}، مجتبی عسکری^۱

اطلاعات مقاله	چکیده
دریافت مقاله: ۱۴۰۲/۰۹/۱۵	این مطالعه به بررسی عملکرد سامانه کارگو اسکنر خودرویی در تعیین ضریب تضعیف خطی فلز آلومینیوم از تصاویر به دست آمده از یک سامانه تصویربرداری اسکنر خودرویی مدل سازی شده پرداخته است. این سامانه مبتنی بر آشکارساز آرایه ای سوسوزن و مولد پرتوی مبتنی بر رادیوایزوتوپ گاما است. این تحقیق شامل مدل سازی اندرکنش پرتوهای گاما با فلز پرکاربرد آلومینیوم و تجزیه و تحلیل خواص ضریب تضعیف خطی آن بر اساس داده های به دست آمده توسط آشکارساز سوسوزن است. برای این منظور ابتدا تصاویر پرتونگاری از ورقه های آلومینیوم با ضخامت های مختلف با استفاده از مدل سازی استخراج گردید. جهت مدل سازی سامانه از کد مونت کارلوی mcnpX استفاده شد. تصاویر به دست آمده با بهره گیری از الگوریتم نوشته شده با متلب پردازش گردید. نمودارهای هیستوگرام ضریب تضعیف خطی از روی تصاویر پردازش شده به دست آمد. هشت تابع مرسوم بر روی نمودارهای هیستوگرام ضریب تضعیف خطی برازش گردید. پارامترهای نمودارهای برازش شده و دقت برازش هر کدام به دست آمد و با یکدیگر مقایسه گردید. مقدار میانگین ضریب تضعیف خطی محاسبه شده با نتایج تجربی و مدل سازی تحقیقات دیگر مقایسه گردید که تطابق خوبی را با یکدیگر نشان دادند.
بازنگری مقاله: ۱۴۰۳/۰۱/۲۱	
پذیرش مقاله: ۱۴۰۳/۰۲/۰۱	
واژگان کلیدی: کد مونت کارلوی MCNPX، اسکنر محموله، ضریب تضعیف خطی، آشکارساز آرایه ای، هیستوگرام، پرتونگاری.	

DOI: <https://doi.org/10.22075/jme.2024.32585.2577>

© 2024 Published by Semnan University Press.

This is an open access article under the CC-BY 4.0 license. (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

۱- مقدمه

در برابر خوردگی بسیار مقاوم است که دلیل دیگری برای استفاده گسترده از آن در صنعت است. این مقاومت در برابر خوردگی به دلیل تشکیل یک لایه نازک از اکسید آلومینیوم بر روی سطح فلز است که به عنوان یک لایه محافظ در برابر اکسیداسیون بیشتر عمل می کند. آلومینیوم علاوه بر خواص فیزیکی، قابلیت بازیافت بالایی نیز دارد و آن را به گزینه ای سازگار با محیط زیست برای بسیاری از کاربردها تبدیل می کند [۲]. بازیافت آلومینیوم تنها به ۵ درصد انرژی مورد نیاز برای تولید آلومینیوم جدید از مواد خام نیاز دارد و آلومینیوم بازیافتی می تواند برای تولید طیف وسیعی از محصولات از جمله قوطی، فویل و مصالح ساختمانی استفاده

آلومینیوم، فلزی سبک وزن و به رنگ سفید مایل به نقره ای است که به دلیل خواص منحصر به فردش کاربرد فراوانی در صنایع مختلف دارد. این فلز فراوان ترین فلز در پوسته زمین است که تقریباً ۸ درصد از سطح سیاره را تشکیل می دهد [۱]. یکی از قابل توجه ترین ویژگی های آلومینیوم چگالی کم آن است که آن را برای استفاده در کاربردهایی که وزن مهم است، به طور مثال در صنعت هوافضا، ایدئال می کند. با وجود چگالی کم، آلومینیوم بسیار قوی و بادوام است و آن را به گزینه ای محبوب برای استفاده در ساخت وساز و مهندسی تبدیل می کند. آلومینیوم همچنین

* پست الکترونیک نویسنده مسئول: abeigzadeh@acoil.org.ir

۱. پژوهشکده کاربرد پرتوها، پژوهشگاه علوم و فنون هسته ای، تهران، ایران

استناد به این مقاله:

شود [۲].

و پس از عبور از ماده می‌توان ضریب تضعیف خطی را محاسبه کرد. این ضریب برای تعیین کمیت توانایی مواد در تضعیف تابش استفاده می‌شود و برای طراحی حفاظ‌های پرتوی مؤثر بسیار مهم است.

علاوه بر این، ضریب تضعیف خطی برای بهینه‌سازی طراحی سامانه‌های حفاظ‌های تابشی برای دستیابی به سطح مطلوب حفاظت در برابر تابش و در عین حال به حداقل رساندن حجم و وزن مواد حفاظ مهم است. این امر به ویژه در کاربردهایی که فضا و وزن محدود است، مانند تجهیزات تصویربرداری، هوافضا و پزشکی اهمیت دارد.

اندازه‌گیری ضریب جذب خطی توسط محققین مختلف انجام شده است. برای مثال، قدر^۲ ضریب تضعیف چهار نوع فلز را با منابع گامای مختلف و آشکارساز NaI(Tl) اندازه‌گیری کرده است [۸]. شیرمردی و همکاران خواص حفاظ پرتوی بتن‌های باریتی و سرب مختلف را در سه انرژی گامای بالا ۰/۶۶۲، ۱/۱۷۳ و ۱/۳۳۲ MeV با استفاده از کد MCNP-4C و مقایسه با پیش‌بینی‌های کد XCOM و داده‌های تجربی بررسی کردند [۹]. در تحقیق حسیب و همکاران، ضرایب تضعیف نمونه‌های پلی‌آمید با استفاده از شبیه‌سازی تجربی و MCNP5 تعیین شده است. در راه‌اندازی آزمایشی یک چشمه گاما از کبالت-۶۰ و یک آشکارساز NaI(Tl) استفاده شد [۱۰]. محاسبه ضرایب تضعیف ماتریس‌های طلا، برنز و آب با استفاده از MCNP، WinXCom و داده‌های تجربی توسط اسفندیاری و همکاران انجام شد [۱۱]. در مطالعه حاضر با استفاده از سیستم مدل‌سازی شده یک اسکنر محموله خودروبی واقعی مجهز به چشمه گاما از سزیم-۱۳۷ و آرایه آشکارساز خطی، ضریب تضعیف خطی ورقه‌های آلومینیومی با ضخامت بین ۱ تا ۱۰۰ میلی‌متر از تصاویر ثبت شده توسط آشکارساز محاسبه شد. این مطالعه دارای دو مرحله است: (۱) هندسه اسکنر محموله خودروبی واقعی با استفاده از شبیه‌سازی مونت‌کارلو مدل‌سازی شد (۲) تصاویر به‌دست‌آمده از شبیه‌سازی برای محاسبه ضریب تضعیف خطی برای ضخامت‌های مختلف توسط کد توسعه داده شده در نرم‌افزار متلب پردازش شدند. مدل‌سازی برای ورق‌های آلومینیومی با ابعاد ۳۰۰×۳۰۰ میلی‌متر مربع با استفاده از اسکنر محموله انجام شد و میزان ضریب تضعیف خطی آنها در ضخامت‌های مختلف از تصاویر به‌دست‌آمده محاسبه شد.

آلومینیوم به دلیل خواص منحصر به فرد خود کاربردهای بی‌شماری در صنعت هسته‌ای دارد. یکی از مهم‌ترین کاربردهای آلومینیوم در صنعت هسته‌ای در سازه‌های مربوط به راکتورهای هسته‌ای است. آلومینیوم به دلیل استحکام بالا، وزن سبک و مقاومت عالی در برابر خوردگی در ساخت مخازن راکتور، غلاف سوخت و سایر اجزای ساختاری استفاده می‌شود. از آلومینیوم در تولید سوخت هسته‌ای نیز استفاده می‌شود. این ماده به عنوان یک ماده روکش برای میله‌های سوخت هسته‌ای استفاده می‌شود و یک حفاظ برای سوخت ایجاد می‌کند و عملکرد ایمن و کارآمد آن را تضمین می‌کند. استفاده از آلومینیوم در پوشش سوخت هسته‌ای به حفظ یکپارچگی میله‌های سوخت و جلوگیری از انتشار مواد رادیواکتیو کمک می‌کند. علاوه بر این، آلومینیوم در تولید ظروف پسماندهای هسته‌ای و چلیک‌های ذخیره‌سازی استفاده می‌شود. این ظروف باید در شرایط سخت نگهداری پسماندهای هسته‌ای از جمله دمای بالا، تشعشعات و محیط‌های خوردنده مقاومت کنند. مقاومت در برابر خوردگی و دوام آلومینیوم آن را به یک ماده ایدئال برای این کاربردها تبدیل کرده است [۳-۶]. علاوه بر این، آلومینیوم در تولید مواد حفاظ برای تأسیسات هسته‌ای استفاده می‌شود. آلومینیوم یک ماده محافظ مؤثر برای محافظت از کارگران و محیط زیست در برابر پرتوگیری است. در ساخت پانل‌ها، درها و پنجره‌های حفاظ تابشی و همچنین در تولید لباس‌ها و تجهیزات محافظ استفاده می‌شود [۷].

در مورد بهره‌گیری از آلومینیوم در حوزه حفاظت در برابر پرتو و یا هر ماده دیگری که می‌تواند به عنوان حفاظ پرتوی در تأسیسات هسته‌ای با مراکز کار با پرتوهای یون‌ساز مورد استفاده قرار گیرد پارامتر مهم وابسته به ماده، ضریب تضعیف خطی نامیده می‌شود که معیاری از توانایی ماده در جذب پرتوهای یون‌ساز است. مواد مختلف ضرایب تضعیف خطی متفاوتی دارند که به نوع و انرژی تابش و همچنین ساختار اتمی و مولکولی ماده بستگی دارد. اندازه‌گیری ضریب تضعیف خطی شامل تعیین کاهش شدت پرتو هنگام عبور از ضخامت خاصی از ماده است. این اندازه‌گیری با استفاده از تجهیزات تخصصی مانند آشکارسازهای پرتوی و طیف‌سنج‌ها انجام می‌شود. با اندازه‌گیری شدت تابش قبل

² Ghadr

ماده (cm) هستند.

۳- مواد و روش ها

۳-۱- رادیوایزوتوپ

در این مطالعه طبق نمونه تجربی از چشمه گامزای سزیم-۱۳۷ در مدل سازی استفاده گردید. سزیم-۱۳۷ که اغلب با نام اختصاری Cs-137 شناخته می شود، ایزوتوپ رادیوایزوتوپ از ماده سزیم است. این رادیوایزوتوپ به صورت مصنوعی تولید می گردد و به عنوان محصول جانبی شکافت هسته ای در راکتورهای هسته ای تولید می شود. با نیمه عمر تقریبی ۳۰ ساله که دارد مورد توجه بسیاری قرار گرفته است و کاربردهای مختلفی در صنعت، پزشکی و تحقیقات پیدا کرده است. پرتوهای گامای گسیل شده از آن سطوح انرژی نسبتاً بالایی در مقدار ۶۶۷ کیلو الکترون ولت هستند که آنها را برای طیف وسیعی از کاربردها از جمله پرتونگاری صنعتی، تصویربرداری پزشکی و پرتودرمانی مناسب می کند. در زمینه پرتونگاری صنعتی، در بازرسی جوش، خطوط لوله و اجزای سازه ای استفاده می شود.

۳-۲- آشکارساز

تنگستات کادمیم^۵ یک ماده کریستالی سوسوزن است که معمولاً در ساخت آشکارسازهای آرایه خطی برای تصویربرداری پرتو گاما و طیفسنجی استفاده می شود. این کریستال دارای خواص منحصر به فردی است که آن را برای آشکارسازی و اندازه گیری تابش های گاما در کاربردهای مختلف از جمله تصویربرداری پزشکی، کنترل امنیتی و تحقیقات فیزیک هسته ای مناسب می کند. یکی از ویژگی های کلیدی کادمیم تنگستات چگالی بالا به مقدار ۷/۹ گرم بر سانتیمتر مکعب و عدد اتمی موثر آن ۶۶ است که به قدرت تفکیک انرژی و کارایی عالی آن در تشخیص پرتوهای گاما کمک می کند [۱۳].

این کریستال شفاف است و هنگامی که با پرتوهای گاما و ایکس اندرکنش می کند، نور گسیل می کند. بیشینه طول موج سوسوزن آن ۴۸۰ نانومتر (با گستره گسیل بین ۳۸۰ تا ۶۶۰ نانومتر)، و بازده ۱۳۰۰۰ فوتون/MeV است. بازده نور نسبتاً بالایی دارد، خروجی نور آن حدود ۴۰ درصد کریستال سوسوزن NaI(Tl) است، اما زمان سوسوزنی آن بسیار طولانی است (۱۲-۱۵ میکرو ثانیه). اغلب در مقطع نگاری رایانه ای استفاده می شود. این امر آن را به ویژه برای شناسایی و تعیین

توزیع مقدار ضریب تضعیف خطی از روی هیستوگرام تصاویر به دست آمده، محاسبه گردید. بر روی نمودارهای هیستوگرام توابع مناسب برازش شدند. دقت برازش هر کدام تعیین و پارامترهای اساسی آنها لیست گردید.

۲- تئوری

هنگامی که پرتو تک انرژی از پرتوهای گاما به سمت ماده هدایت می شود، برخی از فوتون ها در اندرکنش^۳ با اتم های موجود در ماده جذب می شوند. این باعث کاهش تعداد فوتون هایی می شود که از هدف عبور می کنند و در نتیجه پرتو تضعیف می شود. درجه تضعیف به عوامل مختلفی از جمله ترکیب ماده و چگالی ماده مورد نظر بستگی دارد. ساز و کار حاکم بر این تضعیف را می توان با استفاده از رابطه ۱ به صورت ریاضی توصیف کرد [۱۲]، که شدت اولیه پرتو، ضخامت ماده هدف، و ضریب تضعیف ماده برای پرتوهای گاما در انرژی مشخص را در نظر می گیرد. معادله لامبرت-بیرز^۴ به صورت زیر بیان می شود:

$$I = I_0 e^{-\mu x} \quad (1)$$

که در آن، I و I_0 به ترتیب شدت های اولیه و عبوری فوتون ها هستند و μ ضریب تضعیف خطی نمونه بر حسب cm^{-1} است. همچنین x ضخامت جسم (سانتی متر) است. ضریب تضعیف خطی یک پارامتر اساسی است که در توصیف نفوذ و انتقال پرتوهای گاما در یک ماده استفاده می شود. معادله نشان می دهد که با افزایش ضخامت هدف یا افزایش چگالی ماده جاذب، شدت پرتو عبوری به صورت نمایی کاهش می یابد. این پدیده اساس بسیاری از روش های مورد استفاده در تصویربرداری پزشکی، مانند سی تی اسکن که در آن جذب پرتوهای گاما توسط بافت های مختلف بدن امکان تولید تصاویر دقیق را فراهم می کند.

ضریب تضعیف خطی شامل احتمال تمام برهمکنش های بین پرتو گاما و اتم است. احتمال برهمکنش فوتون با یک ماده، در واحد طول مسیر، به طور معمول μ ضریب تضعیف خطی نامیده می شود. ضریب تضعیف خطی به چگالی ماده، انرژی فوتون فرودی و عدد اتمی ماده جاذب وابسته است (معادله ۲).

$$\mu = \frac{1}{x} \ln\left(\frac{I_0}{I}\right) \quad (2)$$

که μ و x به ترتیب ضریب تضعیف خطی (cm^{-1}) و ضخامت

⁵ Cadmium tungstate (CdWO₄ or CWO)

³ interaction

⁴ Beer-Lambert law

آزمایشگاهی ساده تا تأسیسات هسته‌ای پیچیده. **هندسه پیچیده:** می‌تواند هندسه‌های سه‌بعدی پیچیده را مدیریت کند و برای شبیه‌سازی سیستم‌های واقعی با ساختارهای پیچیده مناسب است. این قابلیت برای تجزیه و تحلیل رفتار پرتوی در محیط‌های واقعی مانند نیروگاه‌های هسته‌ای یا تأسیسات تصویربرداری پزشکی ضروری است.

مدل‌سازی چشمه پرتوی و مولدهای پرتو: امکان مدل‌سازی دقیق چشمه‌های تابشی مختلف از جمله چشمه‌های همسانگرد و جهت‌دار و همچنین چشمه‌ها با طیف انرژی را فراهم می‌کند. این برای مطالعه اثرات انواع مختلف تابش بر مواد و سیستم‌های زیستی^۸ ضروری است. معیار و اعتبارسنجی: MCNPX به طور گسترده با داده‌های تجربی محک و تأیید شده است و آن را به ابزاری قابل اعتماد برای شبیه‌سازی ترابرد تابش تبدیل می‌کند. این اعتبارسنجی تضمین می‌کند که نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی‌های MCNPX دقیق هستند و می‌توان با اطمینان در کاربردهای عملی از آنها استفاده کرد.

در این مطالعه با بهره‌گیری از این کد، مدل‌سازی یک هندسه واقعی از سامانه عبوری تصویربرداری مبتنی بر رادیوایزوتوپ گاما و آشکارساز آرایه خطی سوسوزن انجام گردید و عملکرد برای اندازه‌گیری ضریب تضعیف خطی از روی پرتو نگاره‌های به دست آمده از آن مورد سنجش قرار گرفت. نمایی از سامانه مدل‌سازی شده در شکل ۱ نشان داده شده است [۱۶، ۱۷].

در شکل (۱) نمایی از هندسه دو بعدی و سه‌بعدی سامانه اندازه‌گیری نشان داده است. در شکل ۱ الف) هندسه سه بعدی سامانه متشکل از بخش چشمه و نگهدارنده چشمه، محل قرارگیری نمونه ی مورد نظر برای ارزیابی و بخش آشکارسازی صفحه‌ای نشان داده شده است. این مدل روش اندازه‌گیری عبوری نامیده می‌شود که در آن نمونه مورد نظر در بین چشمه پرتوزا و آشکارساز مستقر می‌گردد. زمانیکه شار پرتوهای گاما از سمت چشمه به نمونه گسیل می‌گردد، بخشی از فوتون‌های گاما در ماده جذب می‌شوند و بخشی دیگر پراکنده و عبور می‌کند. نسبت پرتوهای عبوری به پرتوهای اولیه گسیل شده از چشمه از طریق معادله نشان داده شده در رابطه ۱ به یکدیگر مربوط

کمیت سطوح انرژی پرتوهای گاما گسیل شده از چشمه‌های رادیواکتیو مؤثر می‌کند. قدرت توقف بالای کادمیوم تنگستات همچنین امکان جذب طیف گسترده‌ای از انرژی‌های پرتو گاما را فراهم می‌کند و آن را برای استفاده در انواع سیستم‌های آشکارسازی پرتوی و تصویربرداری همه‌کاره می‌کند. در زمینه آشکارسازهای آرایه خطی، کریستال‌های کادمیوم تنگستات اغلب در یک پیکربندی خطی مرتب می‌شوند تا یک سیستم آشکارسازی بسیار حساس و با قدرت تفکیک مکانی خوب را تشکیل دهند. هنگامی که پرتوهای گاما با کریستال کادمیوم تنگستات برهمکنش می‌کنند، نور سوسوزنی تولید می‌کنند که سپس توسط آشکارسازهای نوری مانند لوله‌های تقویت‌کننده نوری با فوتودایودهای نوری سیلیکونی شناسایی می‌شود. شدت و توزیع فضایی نور سوسوزن اطلاعاتی را در مورد موقعیت و انرژی پرتوهای گاما فرودی ارائه می‌کند و امکان ایجاد تصاویر و طیف‌های دقیق را فراهم می‌کند [۱۴].

۳-۳- شبیه‌سازی با کد MCNPX

MCNPX^۶ یک بسته نرم‌افزاری پرکاربرد برای شبیه‌سازی انتقال انواع مختلف ذرات مانند نوترون، فوتون و الکترون از طریق ماده است. در زمینه‌های مهندسی هسته‌ای، حفاظت در برابر پرتو، فیزیک پزشکی و سایر کاربردهای مربوط به انتقال و برهم‌کنش پرتوها ارزشمند است. یکی از مزایای کلیدی این کد توانایی آن در انجام شبیه‌سازی دقیق سناریوهای پیچیده ترابرد^۷ پرتوی با در نظر گرفتن اندرکنش ذرات با مواد و هندسه‌های مختلف است. این قابلیت آن را به ابزاری ارزشمند برای طراحی و تجزیه و تحلیل سیستم‌های آشکارسازی پرتوی، پرتودرمانی، راکتورهای هسته‌ای و سایر کاربردهای مرتبط با پرتوهای یون‌ساز تبدیل می‌کند [۱۵]. برخی از مزایای کلیدی استفاده از آن برای مدل‌سازی عبارتند از:

دقت: MCNPX بر اساس روش مونت کارلو است که امکان شبیه‌سازی بسیار دقیق انتقال ذرات و برهمکنش‌ها را فراهم می‌کند.

انعطاف‌پذیری: درجه بالایی از انعطاف‌پذیری را در مدل‌سازی مواد مختلف، هندسه‌ها و برهمکنش‌های ذرات ارائه می‌دهد. این به محققان و مهندسان اجازه می‌دهد تا طیف گسترده‌ای از سناریوها را شبیه‌سازی کنند، از امور

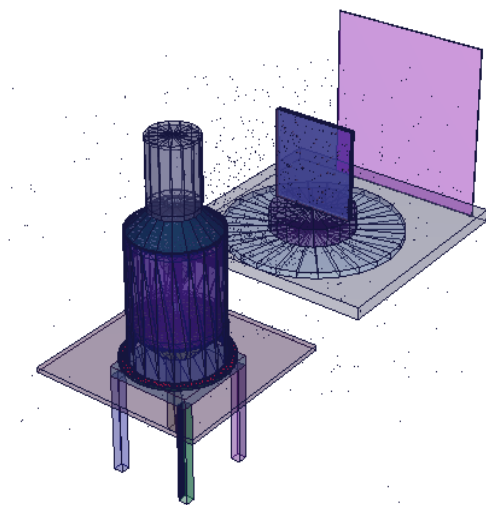
^۸ biology

^۶ (Monte Carlo N-Particle eXtended)

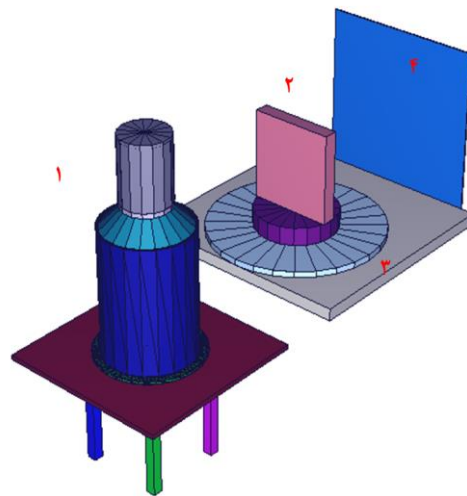
^۷ transportation

فضای اطراف پراکنده می شوند (نقاط قرمز رنگ). شکل (۱-د) مشابه شکل (۲-ج) است با این تفاوت که تراپرد ذرات در فضای دو بعدی با حضور مواد در مسیر پرتوهای گسیل شده از چشمه (اثر حفاظ و یکسوساز) صورت گرفته است. همانگونه که شکل نشان می دهد، ذرات فقط در راستای خروجی دهانه یکسوساز و به سمت نمونه و آشکارساز گسیل می گردند.

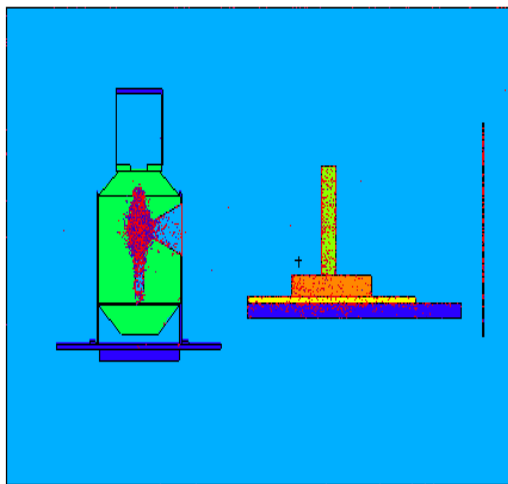
می شوند. شکل (۱-ب) گسیل ذرات در هندسه سه بعدی فضای مونت کارلو را نشان می دهد. در شکل (۱-ج) تصویر دو بعدی از هندسه نمایش داده شده است، این شکل تراپرد ذرات در فضای دو بعدی بدون حضور هیچ ماده ای در مسیر پرتوهای گسیل شده از چشمه را می دهد، به سبب انتخاب یک چشمه همسانگرد نقطه ای، بدون حضور نگهدارنده چشمه که هم به عنوان یکسوساز و هم به عنوان حفاظ پرتوی نقش ایفا می کند، ذرات گسیلی از چشمه در تمامی



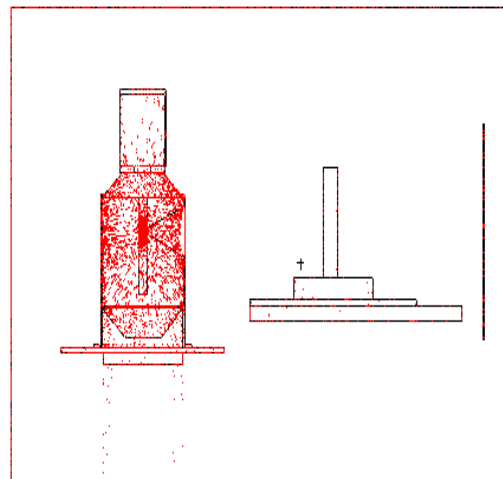
ب



الف



د



ج

شکل ۱- هندسه مدل سازی شده در فضای مونت کارلو، الف) هندسه سه بعدی (۱) یکسوساز و نگهدارنده چشمه (۲) نمونه آلومینیوم (۳) میز چرخان و نگهدارنده نمونه (۴) آشکارساز سوسوزن تخت، ب) تراپرد ذرات در فضای دو بعدی بدون حضور هیچ ماده ای در مسیر پرتوهای گسیل شده از چشمه (ج) تراپرد ذرات در فضای دو بعدی با حضور مواد در مسیر پرتوهای گسیل شده از چشمه (اثر حفاظ و یکسوساز)

خلاصه مراحل انجام کار در این مطالعه بدین صورت بود.

- خواندن و پردازش داده ها: فایل های مدل سازی فراخوانی شدند و برخی عملیات از جمله تغییر شکل، چرخش و نمایش داده ها روی داده ها انجام گردید.
- محاسبه و تجزیه و تحلیل داده ها: کد پارامترهای مختلفی مانند نسبت شدت، ضرایب تضعیف را محاسبه می کند و تجزیه و تحلیل هیستوگرام را روی داده ها انجام می دهد.
- برازش داده ها: کد با استفاده از توابع از پیش تعریف شده بر روی داده ها برازش انجام می دهد و پارامترهای برازش و داده های جدید را به ترتیب در آرایه ها و آرایه های سلولی ذخیره می کند.

پس از دریافت تصاویر، از الگوریتم های پردازش تصویر و معادلات مربوطه برای به دست آوردن هیستوگرام برای هر ضخامت استفاده شد. پس از آن، هشت تابع برازش معمولی به نام های کوشی^{۱۱}، گاوسین درجه یک^{۱۲}، لاجیستیک^{۱۳}، پیرسون درجه چهار^{۱۴}، سینوسی درجه دو^{۱۵}، STF، رشنال درجه دو^{۱۶} و سینوسی درجه سه^{۱۷} به هیستوگرام ها اعمال شد. سپس پارامترهای کلیدی مرتبط با هر تابع برای ارزیابی اثربخشی آنها در نمایش دقیق داده ها مقایسه شد. این مرحله ما را قادر می سازد تا مناسب ترین تابع (های) برازش را که می تواند برای نمایش داده ها با دقت بالا مورد استفاده قرار گیرد، تعیین کنیم. علاوه بر این، عملکرد هر تابع برازش بر اساس معیارهای مختلفی مانند ریشه میانگین مربعات خطا^{۱۸}، میانگین خطای مطلق^{۱۹} و ضریب تعیین^{۲۰} ارزیابی شد. این معیارها ما را قادر می سازد تا عملکرد عملکردهای مختلف برازش را به صورت کمی مقایسه کنیم و بهترین را برای کاربرد خاص خود انتخاب کنیم. به طور کلی، این فرآیند به ما امکان داد تا مؤثرترین تابع مناسب را برای نمایش دقیق داده ها و به دست آوردن بینش ارزشمند از تصاویر به دست آمده شناسایی کنیم و همچنین عملکرد سامانه اسکنر عبوری که برای کاربردهای اسکن محموله های خودروبی استفاده می شود از حیث

هندسه شبیه سازی شامل یک منبع تابش سزیوم-۱۳۷ با انرژی گامای ۶۶۷ کیلو الکترون ولت و نگه دارنده آن است که یک باریکه جارویی^۹ ایجاد می کند. آشکارساز صفحه ای تخت در این مجموعه از ماده سوسوزن کادمیوم تنگستات با ابعاد ۴/۶ میلی متر در ۴/۶ میلی متر در هر پیکسل، با گام پیکسل ۰.۶ میلی متر ساخته شده است. علاوه بر این، نمونه ای متشکل از ورقه های آلومینیومی در چیدمان موجود است.

در شکل (۱-الف) نمایی از هندسه سه بعدی چیدمان نشان داده شده است. در شکل (۱-ب) پخش ذرات از چشمه به فضای پیرامونی نشان داده شده است. این حالت شرایطی را نشان می دهد که چشمه پرتوزا در محیط اطراف با نبود حضور هیچ گونه حفاظ پرتوی گسیل می گردد و با هیچ نوع ماده ای اندرکنش نمی کند همانگونه که مشخص است ذرات در فضای اطراف به صورت همسانگرد گسیل می شود و این امر موجب آلودگی پرتوی محیط، حضور پرتوهای پراکنده شده در تشکیل تصویر و در نهایت ایجاد تصاویر با نویز بالا خواهد شد. شکل (۱-ج) حالتی است که چشمه در داخل حفاظ به سمت نمونه گسیل می شود و در فضای اطراف گسیل ذرات وجود ندارد و پرتوها به صورت همگرا به سمت نمونه و سپس به سمت آشکارساز گسیل می گردند.

۳-۴- تحلیل داده با الگوریتم توسعه داده شده در متلب^{۱۰}

برای تحلیلی نتایج از کد توسعه داده شده در متلب استفاده شد. متلب یک زبان برنامه نویسی سطح بالا و محیط تعاملی برای محاسبات عددی، تجسم و برنامه نویسی است. به طور گسترده در مهندسی، علم و اقتصاد برای کارهایی مانند تجزیه و تحلیل داده ها، توسعه الگوریتم و ایجاد مدل ها و برنامه ها استفاده می شود. متلب امکان دستکاری آسان ماتریس، ترسیم توابع و داده ها، پیاده سازی الگوریتم ها و ایجاد رابط های کاربری را فراهم می کند. متلب با کتابخانه گسترده ای از توابع و جعبه ابزار داخلی، بستری قدرتمند برای حل مشکلات پیچیده و انجام تحقیقات پیشرفته فراهم می کند.

¹⁵ Sin2

¹⁶ Rational2

¹⁷ Sin3

¹⁸ root-mean-square error (RMSE)

¹⁹ mean absolute error (MAE)

²⁰ R-Squared (R² or the coefficient of determination)

⁹ Fan Beam

¹⁰ Matrix Laboratory (MATLAB)

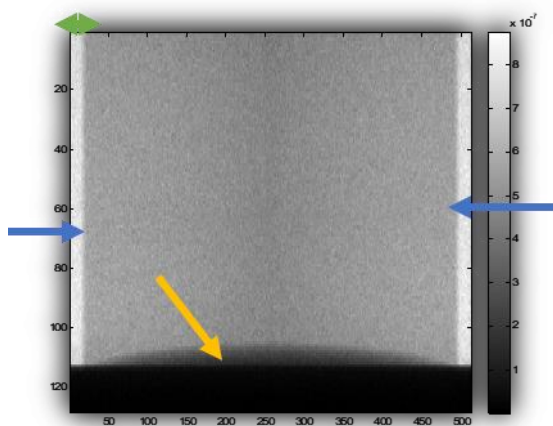
¹¹ Kushi

¹² Gaussian1

¹³ Logistic

¹⁴ Pearson4

۵۰ و ۱۰۰ میلی متر نشان داده شده است. در شکل (۲) ال، مرز میان نمونه تضعیف کننده و فضای آزاد چندان مشخص نیست به اصطلاح تباین پایین است ولی با افزایش ضخامت نمونه جاذب همانگونه که در شکل های (۲-ب) تا (ج) مشخص است تباین میان مرز روشن و تاریک مناسب است.



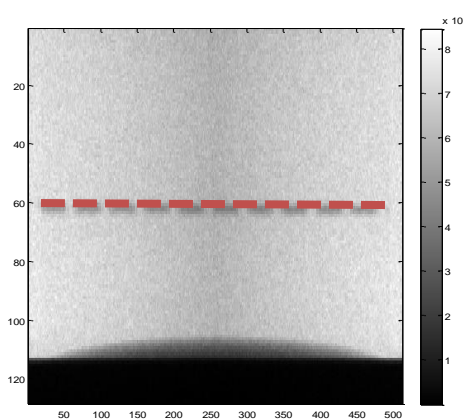
ب

تشخیص نوع ماده و ضریب تضعیف آن قبل از آزمایش تجربی مورد ارزیابی قرار دهیم.

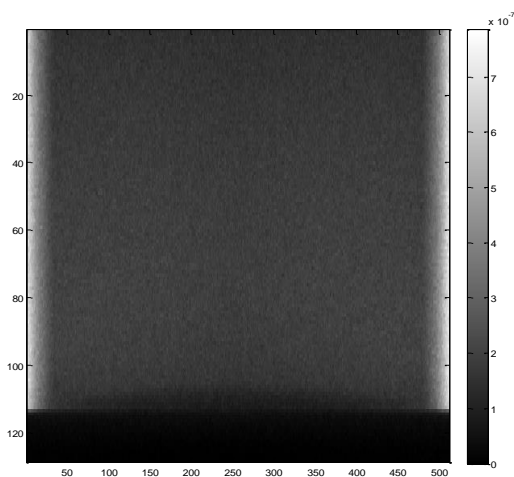
۴- نتایج

در ابتدا تصاویر ثبت شده از ورقه های آلومینیوم توسط سیستم اسکنر نشان داده شده است.

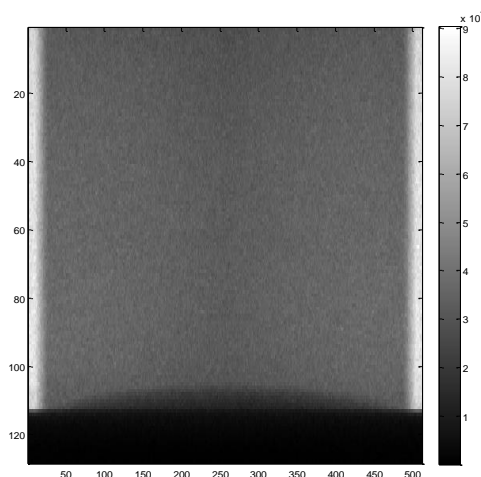
در شکل ۲ تصاویر ثبت شده برای ورقهای ۱ میلی متر، ۲۰،



الف



د

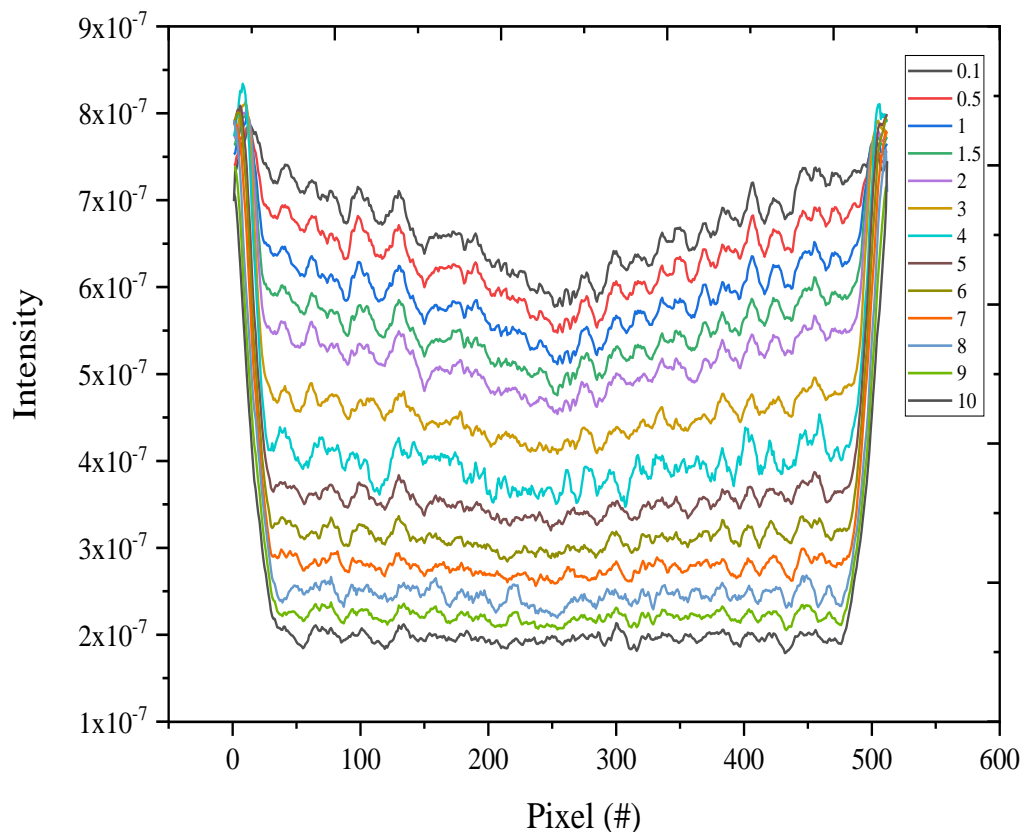


ج

شکل ۲- تصاویر پرتونگاری از نمونه های آلومینیوم با سامانه مدل شده (الف) ۱، (ب) ۲۰، (ج) ۵۰ و (د) ۱۰۰ میلی متر بردار آبی (مرز نمونه جاذب)، بردار سبز (مرز روشنایی) و بردار زرد سایه-تصویر نگه دارنده نمونه

مختلف ورق آلومینیوم را نشان می دهد. پروفایل ها نوساناتی را نشان می دهند که در درجه اول به عدم قطعیت های آماری شبیه سازی مونت کارلو نسبت داده می شود. با این حال، شکل به وضوح نشان می دهد که چهار ضخامت های بررسی شده را می توان به راحتی تشخیص داد که کاربرد اسکنر محموله را در تخمین ضریب تضعیف خطی برجسته می کند.

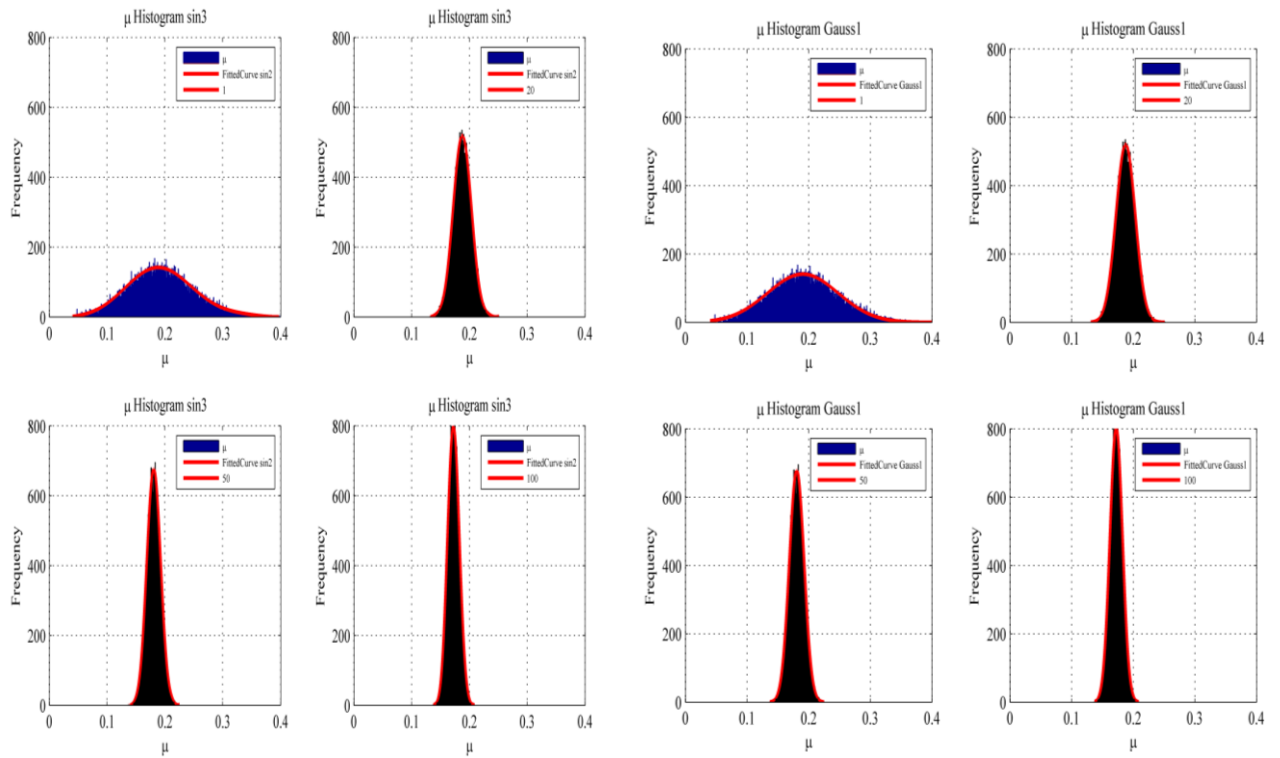
شکل ۲ تصاویر پرتونگاری از ورق های آلومینیومی با ضخامت های ۱، ۲۰، ۵۰ و ۱۰۰ میلی متر را نشان می دهد که با استفاده از اسکنر محموله مبتنی بر پرتوی گاما بدست آمده است. همانطور که در شکل ۲ نشان داده شده است، ضخامت بیشتر آلومینیوم منجر به درجه بالاتری از تضعیف پرتو گاما می شود. شکل ۳ شمارش های ثبت شده به دست آمده از اسکنر محموله شبیه سازی شده برای ضخامت های



شکل ۳- پروفایل شدت خط افقی (خط چین شکل ۲-الف) تصویر شبیه‌سازی برای ضخامت‌های مختلف نمونه جاذب (از ۱ تا ۱۰۰ میلی‌متر)

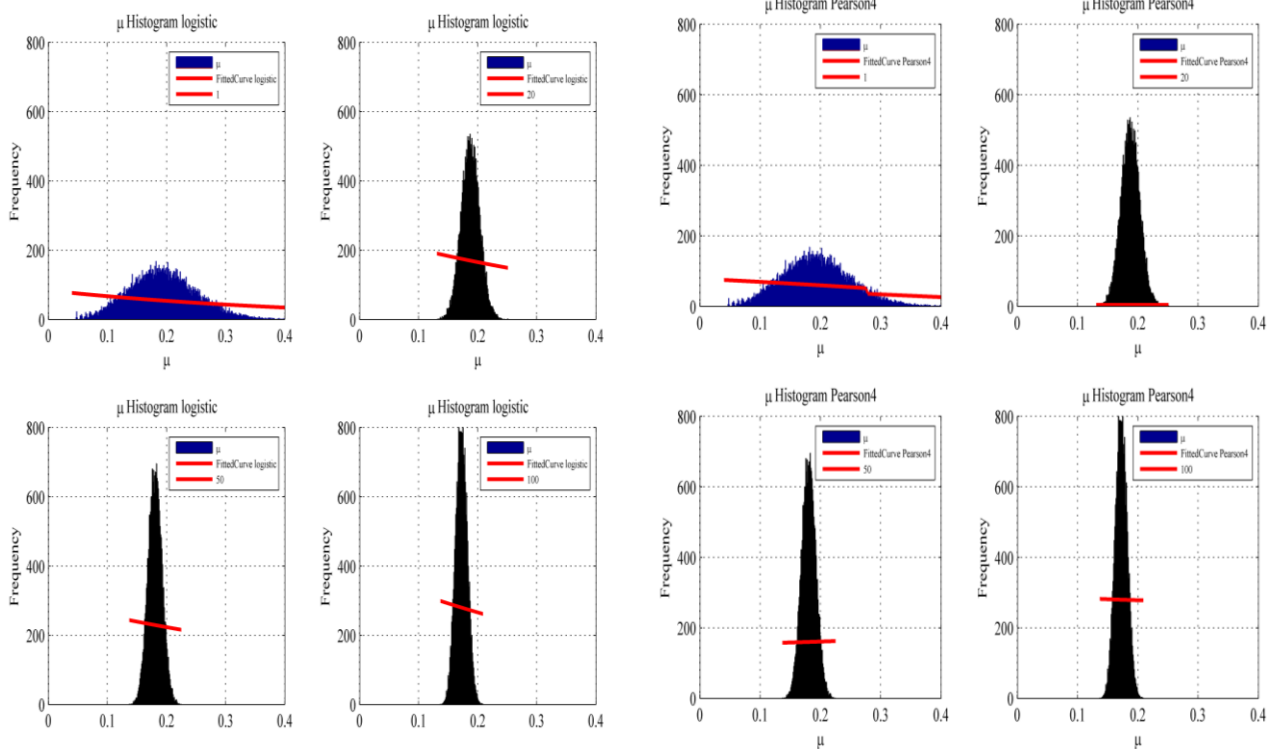
نشان می‌دهد که یک پارامتر خاص برای تابع قابل اعمال نیست. ستون ضریب تعیین (R^2) در جدول به عنوان نشانگر خوبی برازش برای هیستوگرام داده شده است. این اندازه‌گیری ما را قادر می‌سازد تا میزان همسویی تابع برازش با داده‌های واقعی را ارزیابی کنیم و به انتخاب مناسب‌ترین تابع برای مدل‌سازی ضریب تضعیف خطی کمک می‌کند.

هیستوگرام ضریب تضعیف خطی برای یک سری از تصویر گرفته شده توسط آشکارساز دو بعدی مدل‌سازی شده در شکل ۴ ارائه شده است. برای شناسایی بهترین تابعی که ضریب تضعیف خطی را تقریب می‌کند، هشت تابع برازش تعیین شده با پارامترهای مختلف ارزیابی شدند. جدول ۱ یک تفکیک کمی از این هشت تابع، از جمله عبارات آنها و پارامترهای تعیین‌کننده مربوطه را ارائه می‌دهد. درج خالی



ب

الف



د

ج

شکل ۴- توزیع ضریب تضعیف خطی در تصاویر ثبت شده توسط پیکسل های موجود در آرایه های آشکارساز خطی، منحنی های هیستوگرام و برازش با توابع الف) گاوسین درجه ۱، ب) سینوسی درجه ۳، ج) پیرسون ۴ و د) لاجستیک بر روی آنها، ضخامت ورق ۱، ۲۰، ۵۰ و ۱۰۰ میلی متر،

جدول ۱- پارامترهای مربوط به توابع برازش شده بر روی منحنی‌های هیستوگرام

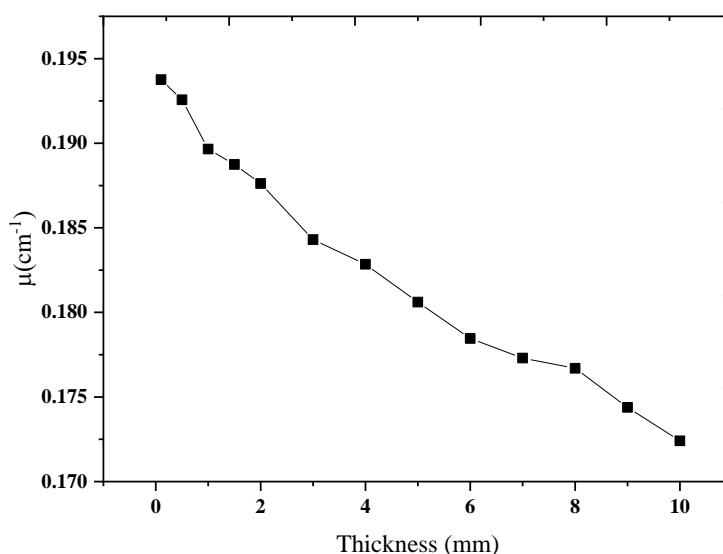
Fitting function and its expression	a1	b1	c1	d1	e1	f1	g1	h1	i1	R-Square	
Gaussian1											
$f(x) = a1 * \exp(-((x-b1)/c1)^2)$	141.309	0.190	0.081							0.977	0.194
	520.828	0.188	0.022							0.995	0.188
	678.649	0.181	0.017							0.996	0.181
	803.384	0.172	0.014							0.994	0.172
Kushi											
$a1 / [(x-b1)^2 + c1^2]$	0.466	0.190	-0.055							0.948	0.194
	0.125	0.188	0.015							0.953	0.188
	0.097	0.181	-0.012							0.953	0.181
	0.083	0.172	0.010							0.949	0.172
Pearson4											
$(a1 * \exp(-b1 * \text{atan}((x-c1)/d1)) / (1 + ((x-e1)/f1)^2))^g1$	22.985	0.119	0.277	0.000	0.533	-0.098	-0.305			0.266	0.194
	0.961	0.977	1.027	0.000	0.644	0.956	0.393			-0.805	0.188
	5.165	2.116	2.058	0.000	-0.463	5.087	-6.898			-0.085	0.181
	10.215	2.103	2.199	0.006	0.303	1.077	-0.875			0.000	0.172
logistic											
$a1 * \exp(-b1 * (x-c1)) / (1 + \exp(-d1 * (x-e1)))^2$	8.317	2.544	1.123	0.750	-1.535					0.119	0.194
	7.622	1.508	2.580	1.196	1.233					0.004	0.188
	8.529	1.644	2.440	0.703	-1.883					-0.001	0.181
	1.722	2.207	2.598	1.408	-1.225					0.000	0.172
STF											
$[a1 * \text{sech}(b1 * x + c1)] / [d1 * (x^2 + e1 * x + f1)]$	0.912	0.326	0.127	0.398	0.620	-0.003			-0.689	-0.689	0.194
	1.317	0.034	0.523	0.012	-0.112	0.033			-0.276	-0.276	0.188
	2.558	0.798	0.577	0.934	0.453	-0.068			-0.618	-0.618	0.181
	0.450	-0.004	0.914	0.759	0.709	-0.107			-0.902	-0.902	0.172
Sin2											
$a1 * \sin(b1 * x + c1) + a2 * \sin(b2 * x + c2)$	95.126	8.182	-0.007	39.615	24.948	3.111				0.968	0.194
	372.484	32.410	1.771	134.195	99.283	1.798				0.992	0.188
	500.752	43.971	-0.087	165.237	135.114	2.317				0.995	0.181
	596.807	52.426	-1.183	192.472	160.458	5.350				0.994	0.172
sin3											
$a1 * \sin(b1 * x + c1) + a2 * \sin(b2 * x + c2) + a3 * \sin(b3 * x + c3)$	92.332	7.933	0.026	8.536	41.368	0.152	40.960	23.728	-2.901	0.979	92.332
	332.554	28.061	2.590	30.596	146.081	-6.975	156.203	85.309	-8.146	0.996	332.554
	426.848	35.753	1.397	40.665	190.577	-7.676	209.281	109.572	-5.642	0.996	426.848
	550.645	47.243	-0.290	27.973	242.554	-8.668	221.118	142.881	-10.474	0.995	550.645
Rational02											
$(a1) / (x^2 + b1 * x + c1)$	0.466	-0.379	0.039							0.948	0.194
	0.125	-0.375	0.035							0.953	0.188
	1.045	0.304	-0.054							-0.703	0.181
	1.388	0.428	-0.071							-0.715	0.172

نیز محاسبه شد و جزئیات هر تابع برازش در جدول ۱ ارائه شده است. توابع گاوسی درجه یک، سینوسی درجه سه، کوشی، رشنال درجه دو و سینوسی درجه سه دارای R^2 مقدار در محدوده ۰/۹۹ تا ۰/۹۴ هستند که مقدار قابل قبولی است.

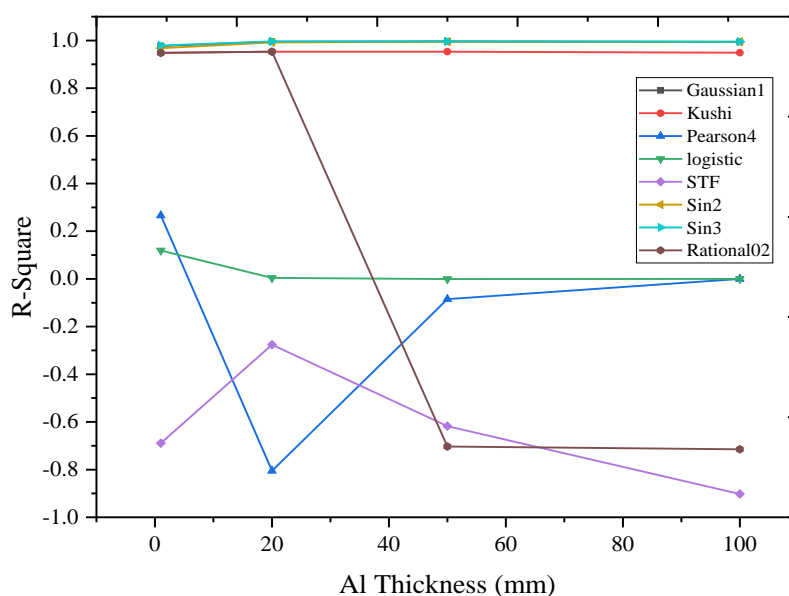
در این مطالعه ضریب تضعیف خطی آلومینیوم با مدل سازی مونت کارلو بر اساس تصاویر پرتونگاری به دست آمده از اسکندر محموله برآورد شد. هیستوگرام نقشه‌های ضریب تضعیف خطی برای ۴ ضخامت مختلف نشان داده شده است. برای هر مورد، مقدار R^2 که بیانی از دقت برازش است،

همانگونه که شکل (۵) نشان می دهد مقدار ضریب تضعیف خطی ماده جاذب (آلومینیوم) با افزایش ضخامت روند کاهشی دارد که این موضوع توسط کارهای تجربی محققان انجام شده برای مواد مختلف حفاظ مورد تأیید است [۲۰-۲۲]. تغییر R^2 برای ضخامت های مختلف ماده جاذب برای توابع برازش مختلف که نماینده دقت برازش بر حسب نوع تابع بکار برده شده است در شکل (۶) نشان داده شده است.

بقیه توابع پیرسون درجه چهار، لاجیستیک و STF دقت رضایت بخشی نداشتند. نتایج شبیه سازی در این تحقیق با نتایج به دست آمده از مطالعات که به صورت تجربی و نظری اندازه گیری و محاسبه شده اند، مقایسه شد که تطابق خوبی با یکدیگر داشتند. میانگین ضریب تضعیف خطی آلومینیوم (در ۶۶۲ کیلو الکترون ولت سزیوم-۱۳۷) برای محاسبه شبیه سازی به ترتیب 0.19 ± 0.02 سانتی متر^{-۱} است. نتایج تأیید می کند که اسکنر محموله مدل شده می تواند روش انتخابی برای اندازه گیری ضریب تضعیف خطی مواد باشد.



شکل ۵- مقادیر ضریب تضعیف خطی محاسبه شده در این مطالعه و مقایسه با سایر مطالعات [۱۸، ۱۹]



شکل ۶- تغییر R^2 برای ضخامت های مختلف ماده جاذب برای توابع برازش مختلف

۵- بحث و نتیجه‌گیری

در مطالعه حاضر، ضرایب تضعیف خطی نمونه‌های آلومینیوم از تصاویر ثبت شده توسط سیستم اسکنر محموله شبیه‌سازی شده محاسبه شد. در طول شبیه‌سازی، تصاویری برای نمونه‌های آلومینیوم به دست آمد که امکان محاسبه ضریب تضعیف خطی را فراهم می‌کند. منحنی‌های هیستوگرام برای هر ضخامت ایجاد شد که مقادیر ضریب تضعیف خطی را منعکس می‌کند. توابع مختلفی به این منحنی‌ها برازش داده شد و دقت برازش ارزیابی شد. مقدار ضریب تضعیف خطی محاسبه شده در این مطالعه عدد ۰/۱۹ بود که مطابق با مقادیر حاصل از مطالعات کارهای سایر افراد بود. علاوه بر این، این مطالعه یک روش جدید برای محاسبه دقیق ضریب تضعیف خطی مواد با استفاده از مدل مونت کارلو از یک سیستم اسکنر محموله مبتنی بر رادیوایزوتوپی معرفی کرد. اگرچه تمرکز اولیه روی

آلومینیوم بود که به طور گسترده در صنعت مورد استفاده قرار می‌گیرد، این روش را می‌توان بدون از دست دادن دقت به سایر مواد نیز تعمیم داد. یک نمونه واقعی از سیستم کارگو اسکنر با تمام جزئیات مربوطه مدل‌سازی گردید. نحوه عملکرد سیستم کارگو اسکنر در تخمین ضریب تضعیف خطی مواد که یکی از پارامترهای اساسی در تعیین نوع ماده در داخل محموله است ارزیابی شد. پاشندگی ضریب تضعیف خطی از طریق اندازه‌گیری میزان فراوانی داده‌های ثبت شده از تصاویر و همچنین برازش نمودارهای هشت تابع مختلف بررسی شد و دقت برازش هر کدام تعیین شد. مدل‌سازی چنین سامانه‌هایی در فاز تحقیقات قبل از راه‌اندازی نمونه‌های تجربی بسیار کارآمد می‌باشد زیرا عملکرد این سامانه‌ها مستلزم بکارگیری مولدهای پرتوی و چشمه‌های رادیواکتیو می‌باشد لذا مدل‌سازی می‌تواند از پرتوگیری پرسنل جلوگیری نماید.

مراجع

- [1] E.L. Rooy. "Introduction to aluminum and aluminum alloys." *In Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials*, pp. 3-14. ASM International, 1990.
- [2] G.S. Cole, and A.M. Sherman. "Light weight materials for automotive applications." *Materials Characterization* 35, no. 1 (1995): 3-9.
- [3] A. Sverdlin. "Properties of pure aluminum." *In Encyclopedia of Aluminum and Its Alloys, Two-Volume Set (Print)*, pp. 2060-2089. CRC Press, 2018.
- [4] R.B. Rebak. "Iron-chrome-aluminum alloy cladding for increasing safety in nuclear power plants." *EPJ Nuclear Sciences & Technologies* 3 (2017): 34.
- [5] J. Konys, W. Krauss, and N. Holstein. "Aluminum-based barrier development for nuclear fusion applications." *Corrosion* 67, no. 2 (2011): 026002-1.
- [6] M.H. Al Hasa, M. Masrukan, and A.S. Adhi. "Materials Development and Hardness Properties of Aluminum Alloy." *Applied Mechanics and Materials* 575 (2014): 83-87.
- [7] C. Lobascio, M. Briccarello, R. Destefanis, M. Faraut, G. Gialanella, G. Grossi, V. Guarnieri et al. "Accelerator-based tests of radiation shielding properties of materials used in human space infrastructures." *Health Physics* 94, no. 3 (2008): 242-247.
- [8] H.M. Qadr. "Calculation of gamma-ray attenuation parameters for aluminium, iron, zirconium and tungsten." *Вопросы атомной науки и техники* (2020).
- [9] S.P. Shirmardi, M. Shamsaei, and M. Naserpour. "Comparison of photon attenuation coefficients of various barite concretes and lead by MCNP code, XCOM and experimental data." *Annals of Nuclear Energy* 55 (2013): 288-291.
- [10] A. Abdel-Haseiba, Z. Ahmeda, and M.M. Hassanb. "Investigation of the gamma rays attenuation coefficients by experimental and MCNP simulation for polyamide 6/acrylonitrile-butadiene-styrene blends." *J Nucl Radiat Phys* 13, no. 1 (2018): 81-89.
- [11] M. Esfandiari, S.P. Shirmardi, and M.E. Medhat. "Element analysis and calculation of the attenuation coefficients for gold, bronze and water matrixes using MCNP, WinXCom and experimental data." *Radiation Physics and Chemistry* 99 (2014): 30-36.
- [12] Swinehart, Donald F. "The beer-lambert law." *Journal of Chemical Education* 39, no. 7 (1962): 333.

- [13] Y. Abraham, N.A.W. Holzwarth, and R.T. Williams. "Electronic structure and optical properties of CdMoO₄ and CdWO₄." *Physical Review B* 62, no. 3 (2000): 1733.
- [14] S.L. Fritz, and L.T. Cook. "High-resolution digital x-ray detector utilizing a discrete array of CdWO₄ scintillators and a self-scanned photodiode array." *Medical Physics* 14, no. 2 (1987): 244-248.
- [15] L.S. Waters, G.W. McKinney, J.W. Durkee, M.L. Fensin, J.S. Hendricks, M.R. James, R.C. Johns, and D.B. Pelowitz. "The MCNPX Monte Carlo radiation transport code." *In AIP conference Proceedings*, vol. 896, no. 1, pp. 81-90. American Institute of Physics, 2007.
- [16] R. Zhang, J.D. Fontenot, D. Mirkovic, J.S. Hendricks, and W.D. Newhauser. "Advantages of MCNPX-based lattice tally over mesh tally in high-speed Monte Carlo dose reconstruction for proton radiotherapy." *Nuclear Technology* 183, no. 1 (2013): 101-106.
- [17] A. Taheri, S. Heidary, and H. Shahrabi. "Monte Carlo simulation of a SPECT system: GATE, MCNPX or SIMIND?(a comparative study)." *Journal of Instrumentation* 12, no. 12 (2017): P12022.
- [18] S. Yıldırım, A. Tugrul, B. Buyuk, and E. Demir. "Gamma attenuation properties of some aluminum alloys." *Acta Physica Polonica A* 129, no. 4 (2016): 813-815.
- [19] M.J. Berger, and J.H. Hubbell. XCOM: Photon cross sections on a personal computer. No. NBSIR-87-3597. National Bureau of Standards, Washington, DC (USA). Center for Radiation Research, 1987.
- [20] W.Z. Majeed, N.B. Naji, S.D. Mohammed, and N. Fawzi. "Attenuation coefficient of reactive powder concrete using different energies." *International Journal of Advanced Research* 4, no. 7 (2016): 72-82.
- [21] F. Seif, M.J. Tahmasebi-Birgani, and M.R. Bayatiani. "An analytical-empirical calculation of linear attenuation coefficient of megavoltage photon beams." *Journal of Biomedical Physics & Engineering* 7, no. 3 (2017): 225.
- [22] B.N. Ghafoor, and Y.H. Shawn. "Investigate shielding of standard materials and glass for stopping 660 keV gamma ray penetrations." *Tikrit Journal of Pure Science* 28 (2023): 2.