



انجمن حفاظت در برابر اشعه ایران

## مقاله پژوهشی



مجله سنجش و ایمنی پرتو، جلد ۹، شماره ۴، پاییز ۱۴۰۰، صفحه ۲۳-۳۰

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۰/۰۶/۰۱، تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۰۹/۱۲

# مقایسه منحنی‌های تفکیک مواد حاصل از چهار الگوریتم $R-T$ ، $\log-\log$ ، $r-\theta$ و $\alpha_2-\alpha_1$ در

## یک سیستم تصویربرداری دو انرژی

میثم غائبی<sup>۱</sup>، مجتبی تاجیک<sup>۱\*</sup> و روح‌الله عظیمی‌راد<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup>دانشکده فیزیک، دانشگاه دامغان، دامغان، سمنان، ایران.

<sup>۲</sup>دانشکده فیزیک، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران.

\*سمنان، دامغان، دانشگاه دامغان، دانشکده فیزیک، کدپستی: ۳۷۱۶-۴۱۱۶۷

پست الکترونیکی: tajik@du.ac.ir

### چکیده

تصویربرداری پرتوی ایکس دو انرژی یکی از فناوری‌های بازرسی مهم در تصویربرداری از محموله‌های بزرگ برای یافتن مواد غیرقانونی از قبیل مواد منفجره، مواد مخدر، اسلحه‌ها و ... است. ویژگی مفید تصویربرداری پرتوی ایکس دو انرژی، امکان شناسایی و تفکیک مواد با اعداد اتمی متفاوت است که این امر با تصویربرداری از محموله‌های بزرگ در دو انرژی متفاوت پرتو ایکس (معمولاً بالای ۳ MeV) صورت می‌گیرد. در این پژوهش، ابتدا یک سیستم تصویربرداری پرتوی ایکس دو انرژی شامل چشمه‌های پرتو ایکس، موزی‌ساز و آرایه آشکارساز با استفاده از کد MCNPX شبیه‌سازی شده است. سپس داده‌های حاصل از این سیستم تصویربرداری برای چهار گوه پله‌ای از جنس‌های گرافیت، آلومینیوم، استیل و سرب جمع‌آوری شده و منحنی‌های تفکیک مواد با استفاده از چهار الگوریتم  $R-T$ ،  $\log-\log$ ،  $r-\theta$  و  $\alpha_2-\alpha_1$  به دست آمده است. نتایج حاصل نشان می‌دهد که از بین الگوریتم‌های پیشنهادی برای تفکیک مواد، الگوریتم‌های  $R-T$ ،  $r-\theta$  و  $\alpha_2-\alpha_1$  دارای عملکرد بهتری هستند و الگوریتم  $R-T$  با توجه به هم‌پوشانی کمتر منحنی‌های تفکیک مواد برای ضخامت‌های پایین نمونه‌ها، می‌تواند انتخاب مناسب‌تری برای به دست آوردن منحنی‌های تفکیک مواد در سیستم‌های تصویربرداری دو انرژی باشد.

**کلیدواژگان:** تصویربرداری، پرتو ایکس، دو انرژی، تفکیک مواد، شبیه‌سازی، الگوریتم.

### ۱. مقدمه

چگالی مواد موجود در بار را با استفاده از الگوریتم‌های تفکیک مواد و دو تصویر به دست آمده از محموله در دو انرژی مختلف فراهم کرده و کمک می‌کنند تا مواد موجود در محموله با دقت بالایی شناسایی شوند [۶-۸]. بنابراین این سیستم‌ها نسبت به سیستم‌های تصویربرداری پرتو ایکس تک‌انرژی که مواد مختلف را تنها برحسب چگالی آن‌ها شناسایی می‌کنند، مفیدتر و کاربردی‌تر هستند [۹-۱۰]. در این سیستم‌های تصویربرداری، پرتوهای ایکس با دو طیف انرژی مختلف

تصویربرداری پرتو ایکس دو انرژی که یکی از مهم‌ترین و پر کاربردترین فناوری‌های بازرسی است، به‌طور گسترده‌ای در امنیت عمومی، فرودگاه‌ها، بنادر، گمرک و ... مورد استفاده قرار می‌گیرد [۱-۲]. از این فناوری برای بازرسی محموله‌های با اندازه بزرگ برای یافتن مواد منفجره، چشمه‌های رادیواکتیو، اسلحه، مواد هسته‌ای، مواد مخدر و سایر مواد غیرقانونی استفاده می‌شود [۳-۵]. سیستم‌های تصویربرداری پرتو ایکس دو انرژی، امکان به دست آوردن اطلاعات در مورد عدد اتمی و

پیچیدگی و زمان‌بر بودن شبیه‌سازی سیستم‌های تصویربرداری پرتو ایکس دو انرژی باعث شده است که مطالعات بسیار کمی در زمینه بررسی و مقایسه الگوریتم‌های مختلف تفکیک مواد صورت بگیرد. در حالی که انتخاب الگوریتم مناسب برای تفکیک مواد از مهم‌ترین مراحل در تفکیک بهینه مواد در سیستم‌های بازرسی است.

در این مطالعه، ابتدا یک سیستم تصویربرداری پرتو ایکس دو انرژی شامل چشمه‌های پرتو ایکس، موزای‌ساز و آرایه آشکارساز پرتو ایکس با استفاده از کد MCNPX شبیه‌سازی شده است. سپس داده‌های شبیه‌سازی برای چهار گوه پله‌ای از جنس‌های گرافیت، آلومینیوم، استیل و سرب جمع‌آوری شده و با استفاده از چهار الگوریتم  $\alpha_2-\alpha_1$ ,  $r-\theta$ ,  $R-T$ ,  $\text{Log-Log}$  منحنی‌های تفکیک مواد برای عناصر ذکر شده به دست آمده است. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که از بین الگوریتم‌های مورد استفاده برای تفکیک مواد، الگوریتم‌های  $r-\theta$ ,  $R-T$  و  $\alpha_2-\alpha_1$  دارای عملکرد بهتری هستند و تفکیک بهتری را فراهم می‌کنند. همچنین با توجه به نتایج به دست آمده و از آنجا که در الگوریتم  $R-T$ ، منحنی‌های تفکیک مواد برای ضخامت‌های کم گوه‌ها، هم‌پوشانی کمتری نسبت به سایر الگوریتم‌ها دارند، می‌تواند بهترین انتخاب برای استفاده در سیستم‌های تصویربرداری دو انرژی باشد.

## ۲. مواد و روش‌ها

### ۱,۲. شبیه‌سازی

به‌طور کلی یک سیستم تصویربرداری پرتو ایکس دو انرژی از یک چشمه پرتو ایکس، موزای‌سازها و فیلترهای باریکه، آشکارسازهای پرتو ایکس، تجهیزات اکتساب و جمع‌آوری داده، سیستم کنترل، کامپیوترها و حفاظ‌های تابشی تشکیل می‌شود [۱۴]. چشمه پرتو ایکس استاندارد معمولاً یک شتاب‌دهنده خطی است که پالس‌های پرتو ایکس پی‌درپی با دو انرژی متفاوت (۴ و ۶ MeV یا ۶ و ۹ MeV) تولید می‌کند و با یک بار عبور پرتو ایکس از یک محموله، امکان تفکیک مواد را فراهم می‌آورد. چشمه پرتو ایکس مورد استفاده در این پژوهش، یک شتاب‌دهنده خطی است که پالس‌های پرتو ایکس

توسط یک چشمه پرتوی ایکس (عموماً یک شتاب‌دهنده خطی) تولید شده و از محموله بار عبور می‌کنند و سپس توسط آرایه‌ای از آشکارسازها، آشکارسازی می‌شوند. لازم به ذکر است که به‌منظور تصویربرداری از محموله‌های بار با اندازه بزرگ، پرتوهای ایکس پرنرژی (معمولاً تا ۹ MeV) با توانایی نفوذ بالا مورد نیاز است [۱۱-۱۲]. در این محدوده انرژی، تفکیک مواد بر پایه وابستگی‌های غیرخطی برهم‌کنش کامپتون و اثر تولید زوج به انرژی است. در انرژی‌های بالاتر پرتو ایکس، تولید زوج با احتمال بالاتری رخ می‌دهد و در نتیجه با افزایش انرژی چشمه پرتو ایکس، تفکیک مواد بهبود می‌یابد [۷، ۱۳].

به‌طور کلی برای بررسی و تفکیک مواد در مقیاس بزرگ نظیر محموله‌های بار، تفکیک حداقل چهار گروه از مواد پایه با دسته‌بندی زیر مطلوب است [۱]:

۱. مواد سبک یا آلی با عدد اتمی کوچک ( $10 < Z$ )

۲. مواد دارای عدد اتمی متوسط ( $20 < Z < 10$ )

۳. مواد غیر آلی ( $50 < Z < 20$ )

۴. فلزات سنگین با عدد اتمی بالا ( $Z > 50$ )

در این پژوهش، چهار عنصر گرافیت، آلومینیوم، استیل و سرب که به ترتیب نماینده مواد سبک یا آلی با عدد اتمی کوچک، مواد دارای عدد اتمی متوسط، مواد غیرآلی و فلزات سنگین با عدد اتمی بالا هستند، مورد استفاده قرار گرفته‌اند.

طی دهه‌های اخیر، پژوهش‌های مختلفی در زمینه تفکیک مواد با استفاده از الگوریتم‌های مختلف صورت گرفته است. در سال ۲۰۰۷، وو و همکاران با استفاده از روش منحنی  $\alpha$ ، منحنی‌های تفکیک مواد شبیه‌سازی و تجربی را به دست آورده و سپس با استفاده از نتایج حاصل، حدود انرژی‌های بالا و پایین به‌کار رفته در تصویربرداری با پرتو ایکس دو انرژی را بهینه‌سازی کردند. در سال ۲۰۱۱، گیل و همکاران با استفاده از الگوریتم  $R-T$  موفق شدند نتایج شبیه‌سازی خوبی را در زمینه تفکیک مواد مختلف به دست آورند. لی و همکاران در سال ۲۰۱۶، الگوریتمی را بر پایه روش منحنی  $\alpha$  ارائه کردند که با استفاده از آن، عملکرد تفکیک مواد تجربی و شبیه‌سازی در حالتی که دو یا چند ماده هم‌پوشانی دارند، بهبود می‌یابد.

مجدداً دو چشمه سطحی پرتوی ایکس به‌دست آمده و شبیه‌سازی‌ها مجدداً انجام گرفت. در این حالت، بیشترین خطای شبیه‌سازی که مربوط به ضخامت ۱۰ cm از گوه پله‌ای سرب بود، حدود ۶٪ بود. از آن‌جا که سیستم‌های معمولی (رایانه با رم ۸ GB و پردازنده Intel Core i7 با فرکانس ۲/۸ GHz) توان پردازش شبیه‌سازی با این تعداد الکترون اولیه را نداشتند (زمان بسیار طولانی در حد چند سال مورد نیاز بود)، لذا از سرور محاسباتی با توان پردازشی بسیار بالا استفاده شد (رم ۱۲۸ GB و ۱۶۰ هسته با فرکانس ۳/۶ GHz). زمان تقریبی انجام این شبیه‌سازی حدود ۶ ماه بود.

دلیل این‌که برای انجام شبیه‌سازی، دو چشمه سطحی پرتو ایکس با استفاده از کارت‌های SSW و SSR حاصل شد، این بود که شبیه‌سازی باید بارها تکرار می‌شد و اجرای چندباره شبیه‌سازی از ابتدا (یعنی برخورد  $10^{12} \times 10$  الکترون اولیه به هدف و تولید فوتون و ...) بسیار زمان‌بر بود و عملاً امکان انجام آن وجود نداشت.

آرایه آشکارساز خطی به‌کار رفته در این پژوهش شامل ۴۲ ماژول است که هر ماژول از ۳۲ پیکسل آشکارساز تشکیل شده است. هر پیکسل دارای سطح مقطع  $5/2 \times 5/2 \text{ mm}^2$  و ضخامت ۵۰ mm است و با یک لایه سوسوزن ساخته شده از بلور CsI(Tl) به‌صورت نوری جفت شده است. با توجه به پیچیدگی هندسه آرایه آشکارساز و زاویه منحصربه‌فرد هر کدام از این ماژول‌ها با زمین، مشکلاتی در شبیه‌سازی این آرایه در کد MCNPX پیش آمد. لذا تصمیم گرفته شد که ابتدا هندسه آرایه در برنامه AutoCAD تعریف گردد و سپس با استفاده از برنامه Visual Editor به‌صورت سطوح قابل استفاده در کد MCNPX استخراج شود. هنگام استخراج هندسه آشکارسازها از برنامه AutoCAD، تعداد بسیار زیادی سطح تکراری تولید شد که برای حذف این سطح‌های تکراری، از برنامه پس‌پردازشی نوشته شده در کد پایتون استفاده شد.

موازی‌ساز به‌کار رفته در پژوهش از جنس سرب و دارای ارتفاع ۳۰۰ cm و ضخامت ۴۰ cm است که دریچه‌ای با عرض ۱ cm بر روی آن تعبیه شده است. برای به‌دست آوردن منحنی‌های تفکیک مواد برای چهار عنصر گرافیت، آلومینیوم و

پی‌درپی با دو انرژی ۴ و ۶ MeV را از طریق برخورد الکترون‌های شتاب‌دار به هدف تنگستنی تولید می‌کند. هم‌چنین از یک فیلتر سربی با ضخامت ۲ mm به‌عنوان فیلتر باریکه در جلوی خروجی باریکه پرتو ایکس از شتاب‌دهنده استفاده شده است تا بخش فوتون‌های کم‌انرژی از باریکه حذف شود. این کار باعث افزایش تفکیک بین میانگین‌های انرژی دو باریکه پرتو ایکس شده و به‌نوبه خود کیفیت نتایج نهایی را بهبود می‌بخشد. لازم به ذکر است که با توجه به ضخامت زیاد گوه‌ها، فوتون‌های کم‌انرژی در گوه‌ها جذب شده و اغلب فوتون‌های رسیده به آرایه آشکارساز از نوع فوتون‌های پرنرژی هستند. در این محدوده انرژی، واکنش‌های کامپتون و تولید زوج واکنش‌های غالب خواهند بود.

شبیه‌سازی این شتاب‌دهنده قبلاً در مرجع [۱۵] توسط نویسندگان این پژوهش انجام گرفته و طیف‌های پرتو ایکس خروجی از این شتاب‌دهنده به‌دست آمده است. با استفاده از نتایج این مرجع و با استفاده از کارت‌های SSW و SSR در کد MCNPX، ابتدا دو چشمه سطحی پرتو ایکس با انرژی‌های الکترون اولیه ۴ و ۶ MeV حاصل شد. برای به‌دست آوردن چشمه‌های سطحی، ابتدا یک سطح در خروجی شتاب‌دهنده تعریف شده و سپس با اجرای برنامه، کلیه اطلاعات مربوط به پرتوهای ایکس رسیده به این سطح در یک فایل ثبت می‌شود (با استفاده از کارت SSW). سپس این سطح به‌عنوان چشمه فوتونی در برنامه اصلی فراخوانی می‌شود (کارت SSR). تعداد الکترون‌های اولیه برای دو انرژی ذکر شده برابر با  $2/1 \times 10^9$  انتخاب گردید.

با توجه به این‌که تعداد فوتون‌های تولید شده در این حالت نسبتاً پایین بود و در سیستم‌های تصویربرداری دو انرژی، فاصله بین شتاب‌دهنده و آرایه آشکارساز زیاد است (در این پژوهش تقریباً برابر با ۶۸۴ cm در نظر گرفته شد)، در نتیجه تعداد فوتون‌های رسیده به پیکسل‌های آرایه آشکارساز در این حالت پایین بوده و خطای شبیه‌سازی (تالی F1) خصوصاً برای ضخامت‌های بالای گوه‌ها بالا بود (در بعضی از ضخامت‌ها خطای شبیه‌سازی تا ۸۰٪ نیز می‌رسید). در نتیجه برای حل این مشکل، تعداد الکترون‌های اولیه برابر با  $10 \times 10^{12}$  تعیین شده و

به پیکسل‌های آرایه آشکارساز کمتر می‌شود و این کاهش با افزایش ضخامت گوه بیش‌تر می‌شود. ضمن این‌که برای عناصر مختلف این کاهش تعداد فوتون‌ها متفاوت است. این اساس کار جداسازی و تفکیک مواد محسوب می‌شود.

برای به‌دست آوردن نتایج نهایی شبیه‌سازی، هر کدام از گوه‌های پله‌ای با گام  $5/2 \text{ mm}$  (عرض یک پیکسل آشکارساز) در فضای بین چشمه و آشکارساز جابه‌جا شده و پس از هر بار جابه‌جایی، یک بار کد اجرا شده و نتیجه (شمارش فوتون‌ها در پیکسل‌های آرایه آشکارساز) به‌دست آمد.

این جابه‌جایی گوه‌ها و اجرای کد تا زمانی‌که تمام گوه‌ها (به طول  $1 \text{ m}$ ) از فضای بین چشمه و آشکارساز عبور کنند ادامه می‌یافت. با توجه به این‌که این جابه‌جایی‌ها باید  $200$  مرتبه تکرار می‌شد، از یک برنامه پس‌پردازشی نوشته شده با کد پایتون برای انجام جابه‌جایی و اجرای مجدد شبیه‌سازی پس از هر بار جابه‌جایی استفاده شد.

این روند یک بار برای چشمه  $4 \text{ MeV}$  و بار دیگر برای چشمه  $6 \text{ MeV}$  پرتو ایکس انجام شد تا نتایج نهایی برای دو چشمه پرتو ایکس به‌دست آید. ضمن این‌که برای هر کدام از چشمه‌های پرتو ایکس، یک بار شبیه‌سازی در غیاب گوه‌های پله‌ای اجرا شد تا شمارش فوتون‌ها در پیکسل‌های آرایه آشکارساز در این حالت به‌دست آید. در نهایت نتایج شبیه‌سازی برای هر عنصر (گوه پله‌ای) به‌صورت  $200$  ماتریس ستونی  $1 \times 1344$  به‌دست آمد. در ادامه با استفاده از کد پایتون برنامه‌ای پس‌پردازشی نوشته شد که این ماتریس‌های ستونی را در کنار هم قرار داده و برای هر عنصر دو ماتریس نهایی (یک ماتریس مربوط به انرژی  $4 \text{ MeV}$  و یک ماتریس مربوط به انرژی  $6 \text{ MeV}$ ) تشکیل گردید که مؤلفه‌های آن، تعداد فوتون‌های رسیده به پیکسل‌های آرایه آشکارساز هستند.

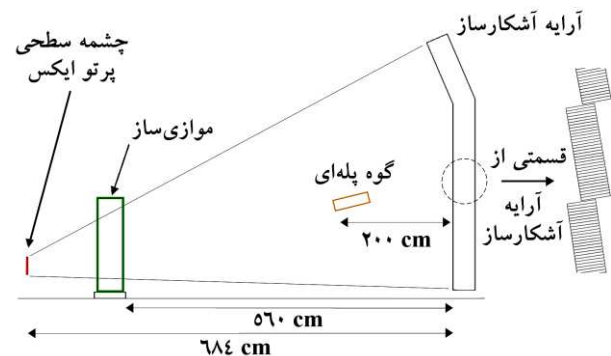
ماتریس ستونی (a) در شکل ۳، مربوط به شمارش فوتون‌های چشمه پرتو ایکس  $6 \text{ MeV}$  در تعدادی از پیکسل‌های آرایه آشکارساز در غیاب گوه پله‌ای و ماتریس ستونی (b)، مربوط به شمارش فوتون‌ها در همان پیکسل‌ها پس از عبور فوتون‌ها از ضخامت  $8 \text{ cm}$  گوه پله‌ای آلومینیوم است.

استیل و سرب، تعداد چهار گوه پله‌ای با سطح مقطع‌های برابر با  $200 \text{ mm}^2$  و ضخامت‌های مختلف برای هر عنصر شبیه‌سازی گردید. در جدول ۱ ضخامت‌های گوه‌های پله‌ای برای هر کدام از این عناصر آمده است.

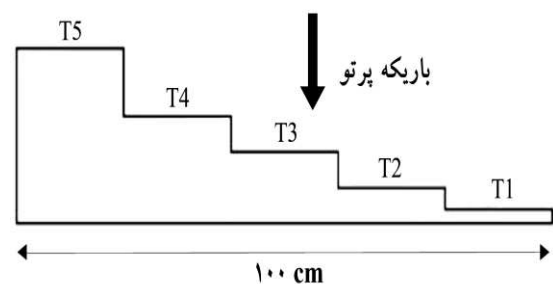
جدول (۱): ضخامت‌های گوه‌های پله‌ای.

ضخامت ماده	T1 (mm)	T2 (mm)	T3 (mm)	T4 (mm)	T5 (mm)
سرب	۱۰	۲۰	۴۰	۶۰	۱۰۰
استیل	۱۵	۳۰	۶۰	۹۰	۱۵۰
آلومینیوم	۴۰	۸۰	۱۶۰	۲۵۰	۴۰۰
گرافیت	۱۰۰	۲۰۰	۴۰۰	۶۰۰	

در شکل ۱، نمای شماتیکی از آرایش اجزای شبیه‌سازی قابل مشاهده است. هم‌چنین در شکل ۲ چگونگی قرارگیری گوه‌های پله‌ای در برابر چشمه پرتو ایکس نشان داده شده است.



شکل (۱): نمای شماتیک از آرایش شبیه‌سازی به‌کار رفته در پژوهش.



شکل (۲): نحوه قرارگیری گوه پله‌ای در برابر چشمه پرتو ایکس.

لازم به ذکر است که اساس این پژوهش بر پایه شمارش فوتون‌های رسیده به پیکسل‌های آرایه آشکارساز است. مشخص است که زمانی‌که گوه پله‌ای مربوط به یک عنصر در مقابل چشمه پرتو ایکس قرار می‌گیرد، تعداد فوتون‌های رسیده

ضخامت ماده است. از آنجا که ضرایب تضعیف مواد مختلف به انرژی فوتون ایکس بستگی داشته و پرتوهای ایکس دارای طیف‌های پیوسته با انرژی‌های متفاوت فوتون هستند، در نتیجه اثر نهایی از طریق انتگرال‌گیری بر روی رابطه ۱ حاصل می‌شود:

$$I = \int I_0(E) \cdot e^{-\mu(E,Z) \cdot t} dE \quad (2)$$

با توجه به رابطه فوق برای شفافیت داریم:

$$T = \frac{\int I_0(E) \cdot e^{-\mu(E,Z) \cdot t} dE}{\int I_0(E) dE} \quad (3)$$

در این دو معادله، E انرژی فوتون است. رابطه فوق به این معنی است که شفافیت به صورت نسبت سیگنال آشکارساز در حالتی که جسم حضور دارد، نسبت به حالتی که جسم حضور ندارد تعریف می‌شود. برای یک سیستم تصویربرداری پرتو ایکس دو انرژی:

$$T_H = \frac{I_{HM}}{I_{H0}} = e^{-\mu_H t} \quad (4)$$

$$T_L = \frac{I_{LM}}{I_{L0}} = e^{-\mu_L t} \quad (5)$$

که اندیس‌های H و L به ترتیب مربوط به انرژی‌های الکترون ۶ MeV و ۴ MeV هستند. I<sub>H0</sub> و I<sub>L0</sub> شدت‌های پرتو ایکس در غیاب جسم (شدت در هوا)، I<sub>HM</sub> و I<sub>LM</sub> شدت‌های پرتو ایکس در حضور جسم (شدت‌های پرتو ایکس پس از عبور از جسم)، t ضخامت جرمی ماده و μ<sub>H</sub> و μ<sub>L</sub> ضرایب تضعیف هستند.

از آنجایی که مقادیر μ با توجه به انرژی پرتو ایکس تغییر می‌کند، در نتیجه روابط ۴ و ۵ را نمی‌توان به پرتوهای ایکس ترمزی که دارای طیف‌های پیوسته انرژی هستند، اعمال کرد. با این حال از آنجا که پارامتر I از طریق انتگرال‌گیری روی کل محدوده انرژی، نمایانگر طیف گسترده است، μ را می‌توان به عنوان ضریب تبدیل بین I<sub>H0</sub> و I<sub>HM</sub> (یا I<sub>L0</sub> و I<sub>LM</sub>) در نظر گرفت [۱۶-۱۷].

تاکنون الگوریتم‌های مختلفی برای به دست آوردن منحنی‌های تفکیک مواد مورد استفاده قرار گرفته است که در این پژوهش با استفاده از داده‌های حاصل از شبیه‌سازی، منحنی‌های تفکیک مواد با استفاده از چهار الگوریتم به دست

...	...
...	...
۲۲۰۷۰	۷۹۷۶
۲۲۰۷۳	۷۹۸۲
۲۲۰۷۲	۷۹۸۹
۲۲۰۷۸	۷۹۸۸
۲۲۰۷۵	۷۹۸۵
۲۲۰۷۰	۷۹۸۴
...	...
...	...

(a)

(b)

شکل (۳): (a) شمارش فوتون‌های چشمه پرتو ایکس ۶ MeV در تعدادی از پیکسل‌های آرایه آشکارساز در غیاب گوه پله‌ای. (b) شمارش فوتون‌ها در همان پیکسل‌ها پس از عبور فوتون‌ها از ضخامت ۸ cm گوه پله‌ای آلومینیوم.

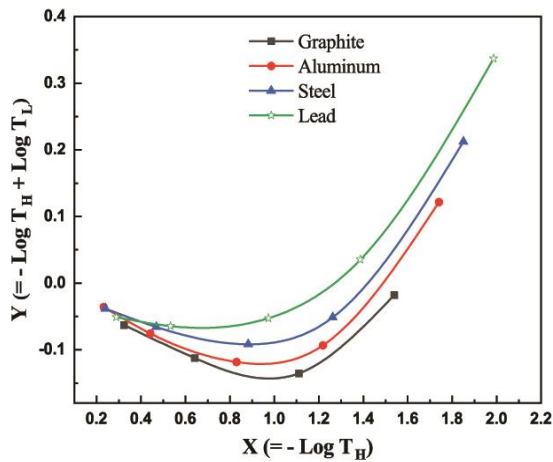
لازم به ذکر است که میانگین شمارش فوتون‌ها در پیکسل‌هایی از آرایه آشکارساز که فوتون‌ها پس از عبور از ضخامت‌های گوه پله‌ای به آن‌ها می‌رسند، کمیت‌های I<sub>HM</sub> و I<sub>LM</sub> و میانگین شمارش فوتون‌ها در همان پیکسل‌ها در غیاب گوه پله‌ای کمیت‌های I<sub>H0</sub> و I<sub>L0</sub> را تشکیل می‌دهند که در بخش بعد به طور کامل در این مورد بحث خواهد شد.

## ۲.۲. الگوریتم‌های تفکیک مواد

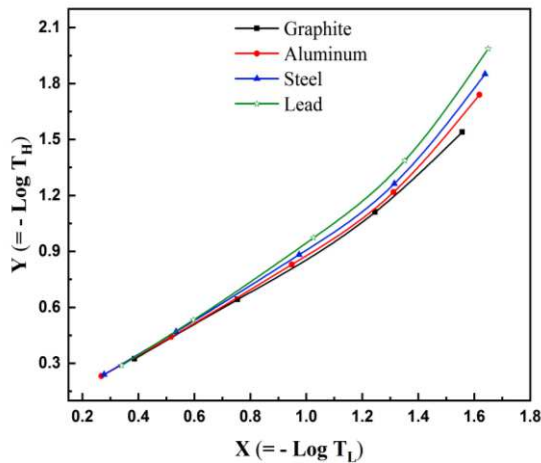
تفکیک مواد در یک سیستم بازرسی بار با به دست آوردن داده‌ها (شمارش فوتون‌ها در پیکسل‌های آرایه آشکارساز) در دو انرژی مختلف انجام می‌گیرد. بر پایه داده‌های حاصل، ویژگی‌هایی از قبیل چگالی و عدد اتمی مواد موجود در محموله بار را می‌توان محاسبه کرد. برای به دست آوردن منحنی‌های تفکیک مواد از الگوریتم‌ها و روش‌های مختلفی استفاده می‌شود. این روش‌ها بر پایه کمیتی به نام شفافیت (T) عمل می‌کنند. اساس تصویربرداری پرتو ایکس دو انرژی بر پایه قانون تجربی تضعیف تابش فوتونی استوار است:

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

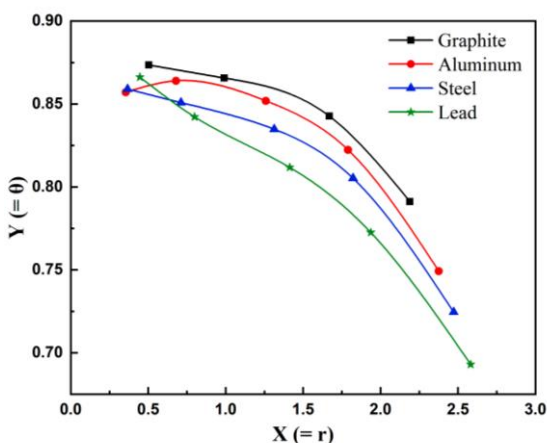
که در آن I و I<sub>0</sub> به ترتیب، شدت‌های باقیمانده و اولیه (قبل از نفوذ به ضخامت x ماده) پرتو ایکس، μ ضریب تضعیف و x



شکل (۴): منحنی‌های تفکیک مواد حاصل از الگوریتم  $\alpha_2-\alpha_1$ .



شکل (۵): منحنی‌های تفکیک مواد حاصل از الگوریتم Log-Log.



شکل (۶): منحنی‌های تفکیک مواد حاصل از الگوریتم r-0.

آمده است که در ادامه، توضیح مختصری در مورد هر کدام از این الگوریتم‌ها ارائه می‌شود.

### ۱.۲.۲ الگوریتم $\alpha_2-\alpha_1$ :

مختصات مورد استفاده در این الگوریتم به صورت زیر است:

$$(x) \alpha_1 = -\text{Log } T_H \quad (6)$$

$$(y) \alpha_2 = -\text{Log } T_H + \text{Log } T_L \quad (7)$$

### ۲.۲.۲ الگوریتم Log-Log:

این الگوریتم مشابه الگوریتم  $\alpha_2-\alpha_1$  است و از مختصات زیر استفاده می‌کند:

$$x = -\text{Log } T_L \quad (8)$$

$$y = -\text{Log } T_H \quad (9)$$

### ۳.۲.۲ الگوریتم r-0:

این الگوریتم از تبدیل الگوریتم Log-Log به مختصات قطبی حاصل می‌شود:

$$(x) r = \sqrt{(\text{Log } T_H)^2 + (\text{Log } T_L)^2} \quad (10)$$

$$(y) \theta = \tan^{-1} (\text{Log } T_L / \text{Log } T_H) \quad (11)$$

### ۴.۲.۲ الگوریتم R-T:

این الگوریتم از مختصات زیر استفاده می‌کند:

$$x = -\text{Ln } T_H \quad (12)$$

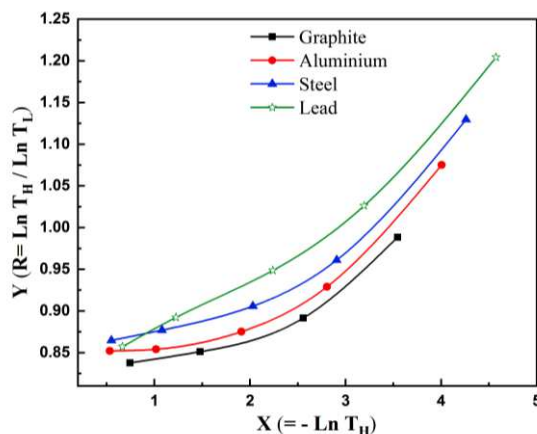
$$(y) R = \text{Ln } T_H / \text{Ln } T_L \quad (13)$$

## ۳. بحث و نتایج

با استفاده از الگوریتم‌های توصیف شده در بخش قبل منحنی‌های تفکیک مواد، برای چهار عنصر گرافیت، آلومینیوم، استیل و سرب به دست آمد که در شکل‌های ۴ تا ۷ نشان داده شده‌اند.

ایکس، موزی‌ساز و آرایه آشکارساز انجام شد. در ادامه نتایج شبیه‌سازی (شمارش فوتون‌ها در پیکسل‌های آرایه آشکارساز) با استفاده از گوه‌های پله‌ای با ضخامت‌های مختلف از جنس عناصر گرافیت، آلومینیوم، استیل و سرب که به ترتیب نماینده مواد سبک یا آلی با عدد اتمی کوچک، مواد دارای عدد اتمی متوسط، مواد غیر آلی و فلزات سنگین با عدد اتمی بالا هستند، به دست آمد. سپس با استفاده از داده‌های حاصل از شبیه‌سازی، منحنی‌های تفکیک مواد با استفاده از الگوریتم‌های Log-Log, R-T, r-θ و α<sub>2</sub>-α<sub>1</sub> به دست آمد.

نتایج حاصل نشان داد که تفکیک مواد با استفاده از هر چهار الگوریتم قابل انجام است، اما سه الگوریتم R-T, r-θ و α<sub>2</sub>-α<sub>1</sub> دارای عملکرد بهتری بوده و تفکیک مناسب‌تری را فراهم می‌کنند. همچنین مشاهده شد که منحنی‌های تفکیک مواد حاصل از الگوریتم α<sub>2</sub>-α<sub>1</sub> نسبت به الگوریتم‌های دیگر دارای شکل پیچیده‌تری بوده و تقریباً به شکل سهمی هستند. در حالی که منحنی‌های تفکیک مواد حاصل از الگوریتم‌های R-T و r-θ دارای شکل ساده‌تری بوده و بسیار مشابه هم هستند. لذا برای به دست آوردن روابط ریاضی برای منحنی‌های تفکیک مواد حاصل از این الگوریتم‌ها که می‌توان از آن‌ها در کالیبراسیون سیستم‌های تصویربرداری دو انرژی استفاده کرد، الگوریتم‌های R-T و r-θ انتخاب مناسب‌تری هستند. ضمناً نتایج حاصل نشان داد که از میان الگوریتم‌های R-T, r-θ و α<sub>2</sub>-α<sub>1</sub>، به دلیل این‌که منحنی‌های تفکیک مواد حاصل از الگوریتم R-T برای ضخامت‌های پایین دارای هم‌پوشانی کمتری نسبت به دو الگوریتم دیگر است، در حالت کلی انتخاب مناسب‌تری برای استفاده در سیستم‌های دو انرژی است.



شکل (۷): منحنی‌های تفکیک مواد حاصل از الگوریتم R-T.

با توجه به شکل‌ها مشاهده می‌شود که تفکیک مواد با استفاده از هر چهار الگوریتم انجام گرفته است. اما الگوریتم‌های R-T, r-θ و α<sub>2</sub>-α<sub>1</sub> دارای عملکرد بهتری بوده و تفکیک مناسب‌تری را فراهم می‌کنند. همچنین مشاهده می‌شود که منحنی‌های تفکیک مواد حاصل از دو الگوریتم R-T و r-θ بسیار مشابه هم هستند. منحنی‌های تفکیک مواد حاصل از الگوریتم α<sub>2</sub>-α<sub>1</sub> دارای شکل پیچیده‌تری بوده و تقریباً به شکل سهمی هستند. با توجه به شکل‌ها مشاهده می‌شود که از میان الگوریتم‌های R-T, r-θ و α<sub>2</sub>-α<sub>1</sub>، به دلیل این‌که منحنی‌های تفکیک مواد حاصل از الگوریتم R-T برای ضخامت‌های پایین دارای هم‌پوشانی کمتری نسبت به دو الگوریتم دیگر است، در حالت کلی انتخاب مناسب‌تری برای استفاده در سیستم‌های دو انرژی است.

#### ۴. نتیجه‌گیری

در این پژوهش، ابتدا شبیه‌سازی یک سیستم تصویربرداری پرتو ایکس دو انرژی شامل اجزایی از قبیل چشمه‌های پرتو

## ۵. مراجع

- [1] D. Lee, J. Lee, J. Min, B. Lee, B. Lee, K. Oh, J. Kim and S. Cho. Efficient material decomposition method for dual-energy X-ray cargo inspection system, *Nucl Instrum Methods Phys Res A*, 884 (2018) 105-112.
- [2] S. Abbasi, M. Mohammadzadeh and M. Zamzamin. A novel dual high-energy X-ray imaging method for materials discrimination, *Nucl Instrum Methods Phys Res A*, 930 (2019) 82-86.
- [3] J. Kwong and W.G.J. Langeveld. A Noise Spectroscopy Detector Array for Non-Intrusive Cargo Inspection, *IEEE Trans Nucl Sci*, 63 (2016) 516-523.
- [4] A.J. Gilbert, B.S. McDonald and M.R. Deinert. Advanced algorithms for radiographic material discrimination and inspection system design, *Nucl Instrum Methods Phys Res B*, 385 (2016) 51-58.
- [5] J. Bendahan. Vehicle and Cargo Scanning for Contraband, *Phys Procedia*, 90 (2017) 242-255.
- [6] J. Lee, Y. Lee and S. Cho. A Dual-energy Material Decomposition Method for High-energy X-ray Cargo Inspection, *J Korean Phys Soc*, 61 (2012) 821-824.
- [7] L. Li, R. Li, S. Zhang, T. Zhao and Z. Chen. A dynamic material discrimination algorithm for dual MV energy X-ray digital radiography, *Appl Radiat Isot*, 114 (2016) 188-195.
- [8] L. Li, T. Zhao and A.Z. Chen. First Dual MeV Energy X-ray CT for Container Inspection: Design, Algorithm, and Preliminary Experimental Results, *IEEE Access*, 6 (2018) 45534-45542.
- [9] S. Ogorodnikov and V. Petrunin. Processing of interlaced images in 4–10 MeV dual energy customs system for material recognition, *Phys Rev ST Accel Beams*, 5(10) (2002) (1-11).
- [10] Y. Gil, Y. Oh, M. Cho and W. Namkung. Radiography simulation on single-shot dual-spectrum X-ray for cargo inspection system, *Appl Radiat Isot*, 69 (2011) 389-393.
- [11] Y. Xing, L. Zhang, X. Duan, J. Cheng and Z. Chen. A Reconstruction Method for Dual High-Energy CT with MeV X-Rays, *IEEE Trans Nucl Sci*, 58(2) (2011) 537-546.
- [12] G. Chen, G. Bennett and D. Perticone. Dual-energy X-ray radiography for automatic high-Z material detection, *Nucl Instrum Methods Phys Res B*, 261 (2007) 356-359.
- [13] P.M. Shikhaliev. Large-scale MV CT for cargo imaging: A feasibility study, *Nucl Instrum Methods Phys Res A*, 904 (2018) 35-43.
- [14] S.P. Osipov, S.V. Chakhlov, O.S. Osipov, S. Li, X. Sun, J. Zheng, X. Hu and G. Zhang. Physical and Technical Restrictions of Materials Recognition by the Dual High Energy X-ray Imaging, *Int J Appl Eng Res*, 12(23) (2017) 13127-13136.
- [۱۵] میثم غائبی، مجتبی تاجیک و روح‌الله عظیمی‌راد. شبیه‌سازی مونت‌کارلوی طیف پرتوی ایکس شتاب‌دهنده Linatron mi-6 برای دو انرژی ۴ و ۶ MeV با استفاده از کد MCNPX. کنفرانس فیزیک ایران، دانشگاه رازی کرمانشاه، (۱۳۹۹) ۳۱۱-۳۱۴.
- [16] P.M. Shikhaliev. Megavoltage cargo radiography with dual energy material decomposition, *Nucl Instrum Methods Phys Res A*, 882 (2018) 158-168.
- [17] M. Kurudirek and A. Çelik. A simple method to determine effective atomic numbers of some compounds for multi-energetic photons, *Nucl Instrum Methods Phys Res A*, 689 (2012) 75-78.