

شبیه سازی سیستم CT برای بشکه های پسمان نیروگاه اتمی بوشهر توسط کد MCNPX

مریم احمدی میرزاحسنلو^(۱)، محمد صمدفام^(۱)، امیر موافقی^(۲)

^۱ دانشگاه صنعتی شریف، دانشکده مهندسی انرژی

^۲ سازمان انرژی اتمی تهران، پژوهشگاه علوم و فنون هسته ای، پژوهشکده کاربرد پرتوها

چکیده:

بهره برداری از تاسیسات هسته ای به طور روزمره منجر به تولید مقدار زیادی پسمان های پرتوزا در ماتریس (ساختار) های مختلف می شود. طبق مقررات آژانس و نیز الزامات داخلی بایستی خصوصیات بسته های پسمان مشخص شود که از جمله ای این خصوصیات تعیین شکاف های درون ماتریس بتن و فضاهای خالی می باشد. به این منظور در این تحقیق یک سیستم مقطع نگاری عبوری نسل یک به وسیله کد MCNPX شبیه سازی و الگوریتم های بازسازی تصویر تکرارشونده پیاده سازی شدند. با مقایسه ی نتایج حاصل از بازسازی تصاویر فانتوم های استاندارد با موارد گزارش شده در مقالات معتبر، صحت شبیه سازی ها و خطای بازسازی ای در حد مقادیر گزارش شده را نشان می دهد. در مجموع می توان گفت که روش مقطع نگاری با دقت مناسب می تواند برای این بشکه ها مورد استفاده قرار گیرد.

کلمات کلیدی: بشکه ی پسمان، مقطع نگاری، شبیه سازی، MCNPX، بازسازی تصویر.

مقدمه:

بهره برداری و نگهداری از تاسیسات هسته ای به طور روزمره منجر به تولید مقدار زیادی پسمان های پرتوزا در ماتریس (ساختار) های مختلف می شود. این پسمان ها درون بشکه هایی ۲۰۰ لیتری که نمونه ای از آن در شکل ۱ و مشخصات آن در جدول ۱ آورده شده است، به صورت موقت درون نیروگاه ذخیره شده و پس از اتمام دوره ای معین به پسمان گورها منتقل می شوند؛ اما طبق مقررات آژانس و نیز الزامات داخلی بایستی خصوصیات بسته های پسمان مشخص و شناسنامه ای برای آنها تهیه شود.



شکل ۱: نمونه ای از بشکه های ۲۰۰ لیتری کلاس 3H برای نگهداری از پسمان های نیروگاه اتمی بوشهر

جدول مشخصات بشکه پسمان کلاس 3H

نوع بشکه	بشکه استیل مهر و موم شده با درپوش فوقانی قابل حمل
حجم	۲۰۰ لیتر
قطر خارجی	۶۰۰ mm
قطر داخلی	۵۹۷ mm
ارتفاع	۸۶۴ mm
ضخامت دیواره	۳ mm
وزن	۹۳ Kg

تصویربرداری از بشکه‌ی پسمان با هدف شناسایی ساختار داخلی آن یکی از روش‌هایی است که برای مشخصه‌یابی بشکه‌ی پسمان مورد استفاده قرار می‌گیرد. بر اساس ماتریس بشکه‌ی پسمان، روش‌های مختلفی برای تصویر برداری وجود دارد که از آن جمله می‌توان به رادیوگرافی، توموستنیز و توموگرافی اشاره کرد. با توجه به هدف این تحقیق که یافتن ساختار داخلی پسمان می‌باشد، روش توموگرافی مورد استفاده قرار می‌گیرد.

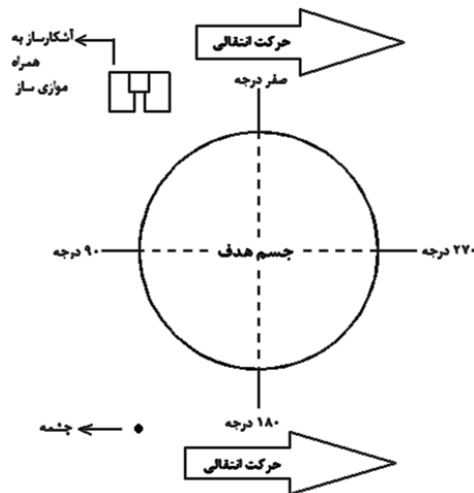
به طور کلی در روش‌های توموگرافی، در هر مقطع از جسم به کمک یک و یا آرایه‌ای از آشکارسازها در اطراف آن، در زوایای مختلف تابش تضعیف‌شده چشمه خارجی (در توموگرافی عبوری) و یا تابش‌های گسیلی از درون بشکه (در توموگرافی گسیلی) ثبت می‌شود و در نهایت برای هر یک از این روش‌ها، داده‌های به دست آمده در هر زاویه در ماتریسی به نام سینوگرام ذخیره و به کمک یک الگوریتم بازسازی مناسب، تصویر مقطعی حاصل می‌شود که این تصویر با توجه به روش توموگرافی مورد استفاده، بیانگر نقشه‌ی تضعیف و یا نقشه‌ی فعالیت در درون بشکه می‌باشد.

با توجه به میزان تضعیف بالای پرتو گاما توسط پسمان، چشمه‌ای که به منظور اسکن استفاده می‌شود بایستی انرژی کافی برای نفوذ در پسمان را داشته باشد؛ چشمه‌ای به این منظور استفاده می‌شود معمولاً شتابدهنده‌ای با انرژی بالا می‌باشد، اما در این پژوهش به منظور امکان‌سنجی، از چشمه‌ی ^{60}Co استفاده می‌شود که در میان چشمه‌های رادیوایزوتوپی، دارای انرژی بالایی می‌باشد.

نکته‌ی دیگری که باید در مقطع‌نگاری بشکه‌های پسمان به آن توجه کرد تأثیر پرتوهای ناشی از مواد داخل بشکه‌ی پسمان است. در این مورد باید گفت اگر شدت پرتو زایی مواد داخل بشکه‌ی پسمان نسبت به شدت پرتو خارجی کمتر باشد، پرتوهای داخلی زمینه به شمار می‌آیند و می‌توان از آن‌ها صرف نظر کرد. این شرایط در مورد پسمان‌های سطح پایین و تا حدودی سطح متوسط که هدف این تحقیق هستند، صدق می‌کند.

روش کار:

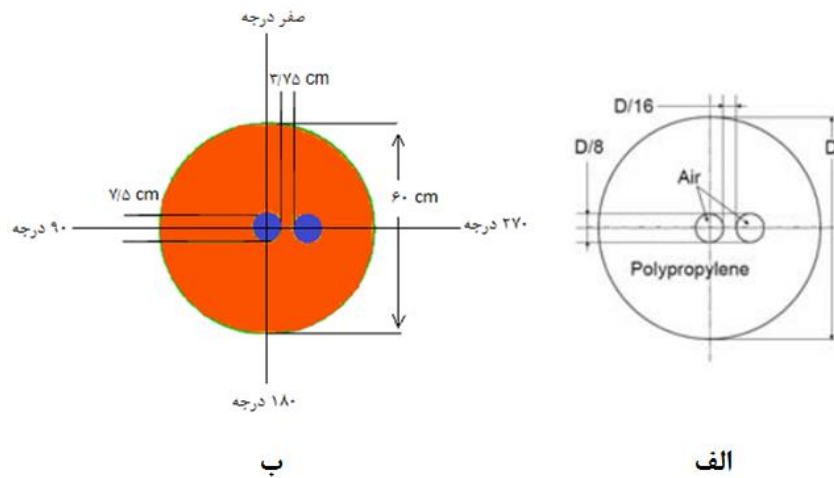
سیستم شبیه‌سازی شده در کد MCNPX شامل یک آشکارساز یدورسدیم (NaI(Tl)) ۲ اینچی به همراه موازی‌سازی سربی با روزنه‌ای به طول ۵cm و قطر ۱ اینچ است که با رویکرد نسل یک، جسم هدف را اسکن می‌کند؛ چشمه‌ی مورد استفاده نیز چشمه‌ی ^{60}Co می‌باشد. تصویری از سیستم شبیه‌سازی شده در یک وضعیت خاص که مربوط به شروع اسکن است، در شکل ۲ نمایش داده شده است.



شکل ۲: پیکربندی نسل یک سیستم مقطع‌نگاری گاما؛ شبیه‌سازی شده با کد MCNPX

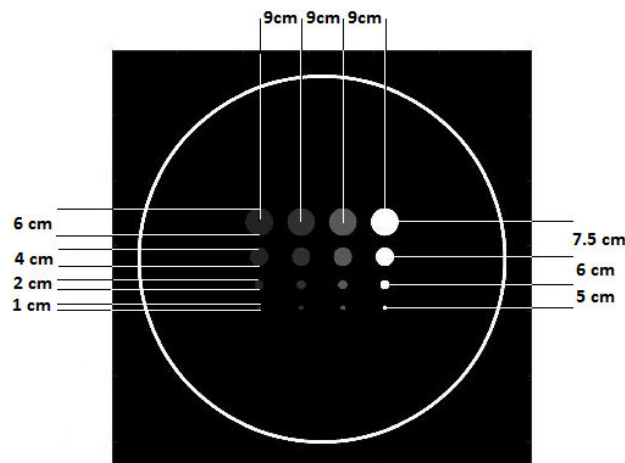
برای ثبت شمارش در حجم آشکارساز از تالی ارتفاع پالس، F8، استفاده شده است و با استفاده از کارت تقسیم انرژی، شمارش ثبت شده در قله‌های انرژی چشمه‌های کبالت-۶۰ با پهنای ۲FWHM به دست آمده و پس از اتمام داده‌برداری‌ها، توسط برنامه‌ی مجزایی داده‌های دو قله‌ی انرژی استخراج و به صورت نما در ستون‌های ماتریس سینوگرام ذخیره می‌شوند.

در بخش شبیه‌سازی فانتوم‌ها، ابتدا فانتوم استاندارد آژانس به منظور اعتبارسنجی شبیه‌سازی شده است. این فانتوم که مقطع آن در شکل ۳-الف مشاهده می‌شود، استوانه‌ای از جنس پلی پروپیلن جامد با چگالی 0.91 g/cm^3 می‌باشد که دو حفره‌ی هوا در آن ایجاد شده است. با توجه به اینکه قطر این فانتوم دلخواه می‌باشد، برای این تحقیق قطر آن برابر با قطر بشکه‌ی پسمان که مورد نظر این پژوهش است، در نظر گرفته شد. مقطعی از فانتوم شبیه‌سازی شده با ابعاد مورد نظر در شکل ۳-ب آورده شده است. همچنین در شکل ۳-ب زوایای نامبرداری مشخص می‌باشد.



شکل ۳: فانتوم استاندارد آژانس: (الف) با ابعاد موجود در سند آژانس و (ب) با ابعاد شبیه سازی شده

سپس فانتوم دیگری که فانتومی با ابعاد استاندارد می باشد به عنوان نمونه ای از پسمان خشک غیر قابل فشرده سازی شبیه سازی شد. تصویر این فانتوم که به نوعی برای تعیین قدرت تفکیک مکانی سامانه نیز به کار می رود، در شکل ۴ آمده است. این فانتوم استوانه ای به قطر $79/6 \text{ cm}$ و با دیواره ای از جنس آهن و به ضخامت 8 mm است که حاوی چهار جنس ماده ی مختلف به شکل استوانه و در ابعاد مختلف می باشد. مواد تشکیل دهنده ی این فانتوم از ستون سمت راست به چپ، به ترتیب آهن، آلومینیوم، تفلون و پلی اتیلن می باشد.



شکل ۴: نمونه ای از پسمان جامد خشک غیر قابل فشرده سازی

در بخش بازسازی تصویر، دو الگوریتم تکرارشونده ی SIRT^۱ و DSGA^۱ پیاده سازی شدند. در کلیه ی الگوریتم های بازسازی تصویر، سطح مورد نظر به صورت یک ماتریس $N \times N$ از پیکسل ها در نظر گرفته

^۱ Simultaneous Iterative Reconstructive Technique

می‌شود که به آن ماتریس تصویر می‌گویند. مسأله بازسازی تصویر سی تی را می‌توان به صورت رابطه‌ی $g = \ln \left(\frac{I}{I_0} \right) = \mu x$ نوشت که شکل ماتریسی آن مطابق رابطه‌ی $g = Af$ می‌باشد که در آن g برداری ستونی حاوی تمام اندازه‌گیری‌ها در نماهای مختلف، f برداری ستونی حاوی مقادیر پیکسل‌های تصویر و A ماتریسی با ابعاد $M \times N$ است که ماتریس وزن و یا ماتریس سیستم نامیده می‌شود و مؤلفه‌ی a_{ij} آن برابر سهم پیکسل j ام در پرتو i ام می‌باشد. M و N به ترتیب برابر با تعداد کل پرتوها و تعداد کل پیکسل‌های تصویر است. معادله به روزرسانی مقادیر پیکسل‌ها در شکل جمع‌شونده‌ی الگوریتم SIRT که اصطلاحاً ASIRT^۱ نامیده می‌شود، از رابطه ۱ تبعیت می‌کند [۱]:

$$f_j^{(k+1)} = f_j^{(k)} + \frac{1}{\sum_{i=1}^m a_{ij}} \sum_{i=1}^m a_{ij} \frac{(g_i - \sum_{h=1}^n a_{ih} f_h^{(k)})}{\sum_{h=1}^n a_{ih}} \quad \forall j \quad (1)$$

که در آن m تعداد کل پرتوهای عبور کرده از پیکسل j ام بوده و n تعداد کل پیکسل‌هایی است که پرتو i ام از آنها عبور کرده است، k شماره تکرار و $f_j^{(k)}$ مقدار پیکسل j ام در تکرار k ام می‌باشد. دیگر الگوریتم به کار گرفته شده، الگوریتم DSGA است که ماهیتی آماری دارد. معادله به روزرسانی مقادیر پیکسل‌ها جهت پیاده‌سازی این الگوریتم، مطابق رابطه ۲ می‌باشد [۲]:

$$\mu_j^{(n+1)} = \mu_j^{(n)} \frac{\sum_{i \in J_j} (d_i e^{-\sum_{k \in I_i} a_{ik} \mu_k^{(n)}} a_{ij})}{\sum_{i \in J_j} Y_i a_{ij}} \quad (2)$$

که در آن J_j و I_i به ترتیب برابر با مجموعه پرتوهایی که از پیکسل j ام عبور کرده‌اند و مجموعه پیکسل‌هایی که پرتو i ام از آنها عبور کرده است، می‌باشند. Y_i نیز تعداد فوتون‌های اندازه‌گیری شده در اندازه‌گیری i ام است که برای هر پیکسل، این مقدار با طول پرتو i ام در آن پیکسل وزندهی شده و به آن پیکسل نسبت داده می‌شود.

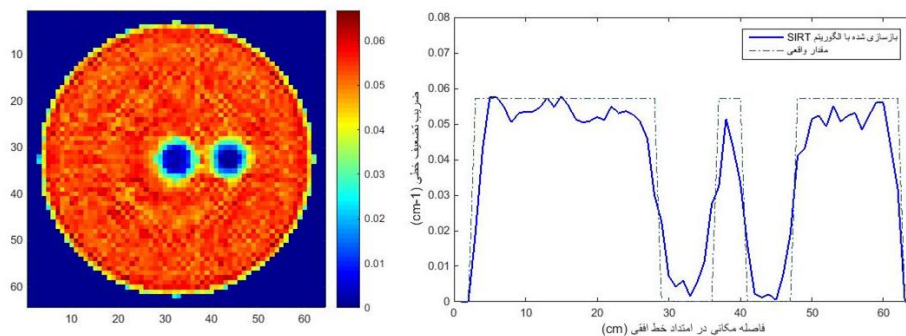
نتایج و بحث

داده‌ها از طریق مقطع‌نگاری در محیط ۱۸۰ درجه‌ای اطراف فانتوم و از ۳۶ نما در محیط شبیه‌سازی به دست آمده است. گام جابه‌جایی آشکارساز در هر نما برابر با ۲/۵ cm انتخاب شده و بنابراین در مورد فانتوم

^۱ Diagonally Scaled Gradient Ascent

^۲ Additive Simultaneous Iterative Reconstruction Technique

آژانس و فانتوم دوم که مدلی برای پسمان جامد است، داده‌برداری در هر نما به ترتیب توسط ۲۵ و ۳۳ جفت چشمه-آشکارساز انجام شده است. در ادامه با استفاده از روش درونیابی بین داده‌های حاصل از مونت کارلو برای هر فانتوم، این تعداد داده‌برداری به ترتیب به ۴۹ و ۶۵ داده توسعه داده شد. تصویر بازسازی شده‌ی این فانتوم با الگوریتم SIRT به همراه پروفایل مرکزی این تصویر در شکل ۶ نمایش داده شده است.



شکل ۶: تصویر و پروفایل مربوط به تصویر بازسازی شده با الگوریتم SIRT در ۱۰۰ تکرار

. به منظور تعیین خطای بازسازی تصویر، از خطای میانگین ریشه^۱ که از رابطه ۳ محاسبه می‌شود، استفاده شد [۳].

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (\mu_{reconstructed,i} - \mu_{known,i})^2}{N}} \quad (3)$$

که در آن N تعداد کل پیکسل‌ها، $\mu_{reconstructed,i}$ ضریب تضعیف بازسازی شده در پیکسل i ام و $\mu_{known,i}$ مقدار واقعی ضریب تضعیف در همان پیکسل است.

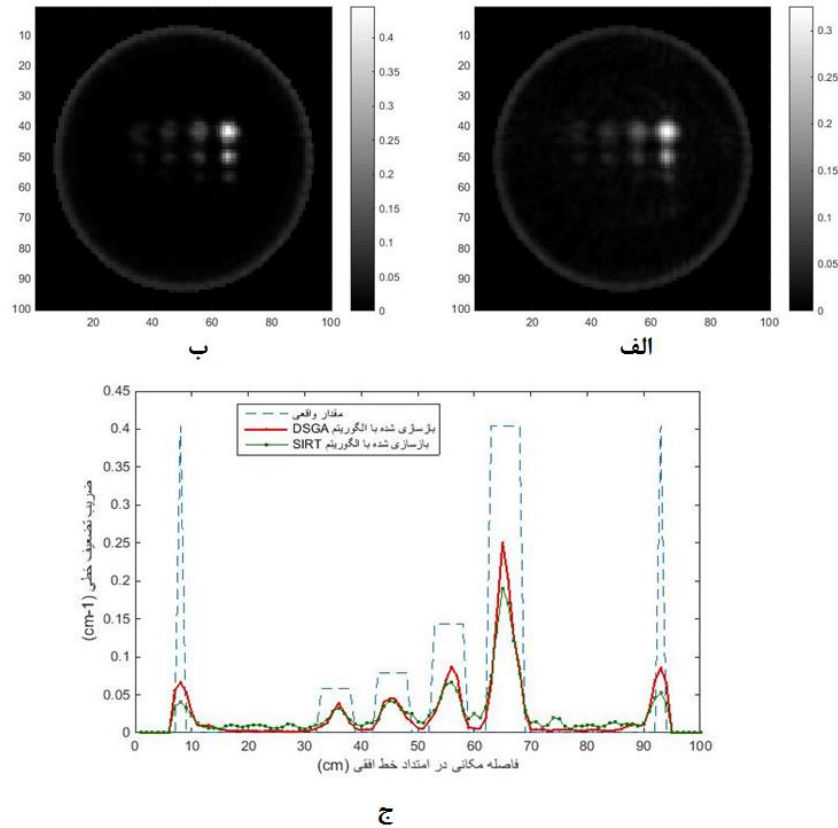
جدول ۲: مقادیر خطا و کتراست تصویر حاصل از بازسازی فانتوم استاندارد آژانس

الگوریتم	خطای RMS	کتراست (%)
SIRT	۰/۰۰۶۵	۸۴

از طرفی خطای گزارش شده برای کار تجربی کره‌ی جنوبی در بازسازی همین فانتوم و البته در شرایط اسکنی که در این سند نیامده، برابر با $1/686 \times 10^{-3}$ می‌باشد که خطای RMS حاصل از این تحقیق خطایی حدود ۳٪ با این مقدار دارد.

^۱ Root Mean Square Error

تصاویر بازسازی شده از فانتوم پسمان نیز به همراه پروفایل مرکزی آنها در شکل ۷ قابل مشاهده است.



شکل ۷: (الف) تصویر بازسازی شده با الگوریتم SIRT در ۱۰۰ تکرار، (ب) تصویر بازسازی شده با الگوریتم DSGA در ۵۰ تکرار و (ج) پروفایل افقی تصاویر بازسازی شده در کنار پروفایل تصویر مرجع

در مورد این فانتوم نیز، مقدار خطای RMS تصاویر بازسازی شده با الگوریتم‌های SIRT و DSGA به ترتیب برابر با ۰/۰۶۰۴ و ۰/۰۵۶۷ به دست آمد. این در حالی است که تصاویری که در پژوهش صورت گرفته توسط کیم و همکاران^۱، با پیکربندی نسل سوم و نیز یک چشمه ^{137}Cs حاصل شد، خطاهای حاصل از بازسازی تصویر با دو الگوریتم ART و DSGA به ترتیب برابر با ۰/۰۷۷۷ و ۰/۰۶۸۳ به دست آمد [۴]. در مجموع این تحقیق نشان می‌دهد که سیستم توموگرافی صنعتی با قابلیت‌های ویژه خود در شناسایی مشخصات شبکه‌های پسمان می‌تواند به کار گرفته شود. در این میان الگوریتم‌های بازسازی تصویر نقش عمده‌ای را در کیفیت تصاویر حاصل و همچنین سرعت پردازش داده‌ها برای ایجاد تصاویر مقطعی ایفا می‌کنند.

^۱ Kim et al.

مراجع

1. T. Yokoi, H. Shinohara, T. Hashimoto, T. Yamamoto, and Y. Nio, "Implementation and performance evaluation of iterative reconstruction algorithms in SPECT: a simulation study using EGS4," in *KEK PROCEEDINGS*, 2000, pp. 224-234.
2. K. Lange, M. Bahn, and R. Little, "A theoretical study of some maximum likelihood algorithms for emission and transmission tomography," *IEEE Transactions on Medical Imaging*, vol. 6, pp. 106-114, 1987.
3. I. TECDOC, "1589, Industrial Process Gamma Tomography, Final Report of a Coordinated Research Project 2003–2007," *International Atomic Energy Agency, Austria*, 2008.
4. J. Kim, S. Jung, J. Moon, and G. Cho, "Industrial gamma-ray tomographic scan method for large scale industrial plants", *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, vol. 640, pp. 139-150, 2011.