شبیه سازی یک سیستم توموگرافی گامای گسیلی برای تشخیص یکپارچگی مجتمع های سوخت راکتورهای هسته‌ای

پایانی،امیر * (۲و۱)- متولی، سید محمد(۱)

(۱) دانشگاه مازندران، دانشکده علوم پایه، گروه فیزیک هسته‌ای

(۲) سازمان انرژی اتمی، شرکت توسعه ایمنی نیروگاه‌های اتمی (توانا)

چکیده:

پایش صحت و سلامت سوخت هسته‌ای یا "یکپارچگی سوخت" یکی از وظایف مهم سازمانهای بهره‌بردار نیروگاه اتمی می‌باشد. همچنین آژانس بین المللی انرژی اتمی مسوول نظارت بر کنترل موجودی هسته‌ای کشورهای عضو است. از اینرو نیاز به ابزارهایی جهت تعیین یکپارچگی سوخت تابش‌دیده می‌باشد. سیستم توموگرافی گامای گسیلی (GET) یکی از متداول‌ترین سیستم‌های تصویربرداری است که در سالهای اخیر جهت پایش یکپارچگی و تعیین عیوب سوخت استفاده شده است. در این پژوهش یک سیستم GET شبیه‌سازی شده است. این سیستم قادر است تصاویر سطح مقطعی از سوخت تابش دیده در استخر سوخت را بدست داده و با تحلیل آن یکپارچگی سوخت را مورد بررسی قرار دهد.

کلمات کلیدی: *یکپارچگی سوخت- توموگرافی گامای گسیلی(GET)-سوخت تابش دیده*

Simulation of a Gamma Emission Tomography System for Distinguishing the Fuel Integrity of Nuclear Reactor Fuel Assemblies

Payani, Amir[1,2]; Motavalli, Seyed Mohammad[1]

[1] **Department of Nuclear Physics, Faculty of Science, University of Mazandaran**

[2] **NPPs Safety Development & Improvement Company (TAVANA)**

Abstract:

Monitoring the health and safety of nuclear fuel or "fuel integrity" is one of the important tasks of the nuclear power plant operators. The International Atomic Energy Agency (IAEA) is also responsible for monitoring the nuclear inventory control of member states. Therefore, there is a need for tools to determine the integrity of the irradiated fuel. The Gamma Emission Tomography (GET) system is one of the most common imaging systems that have been used to monitor the integrity and defect of fuel in recent years. In this research, a GET system is simulated. This system is capable for obtaining cross-sectional images of the irradiated fuels in the fuel pool and investigating the fuel integrity by analyzing them.

Key words: Fuel Integrity – Gamma Emission Tomography (GET)- Irradiated Fuel

مقدمه :

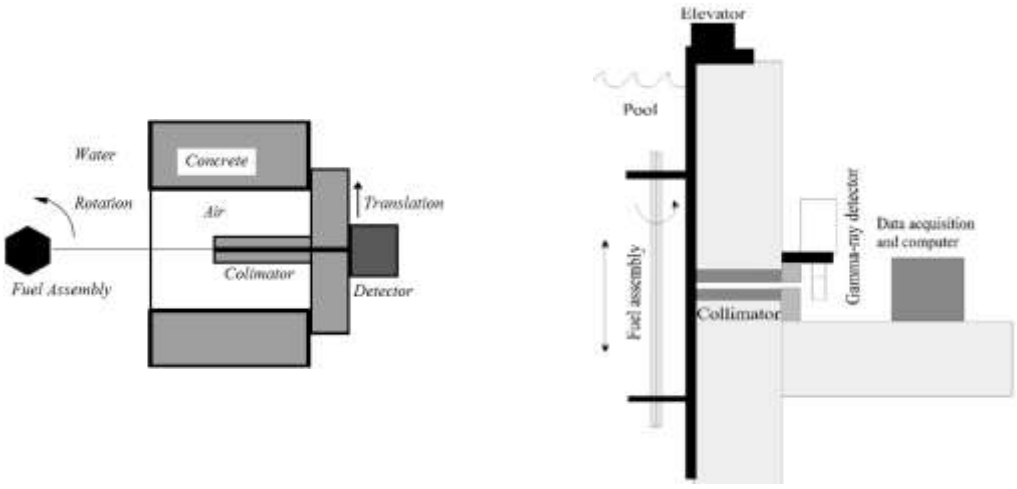
توموگرافی گامای گسیلی(GET) که در پزشکی به توموگرافی کامپیوتری تک فوتون (SPECT) مشهور است سالهاست که بعنوان یک سیستم تصویربرداری قدرتمند در عرصه تصویربرداری پزشکی از تشخیص تومورهای خوش خیم و بدخیم گرفته تا بررسی کارکرد قلب استفاده می شود. این ابزار در صنعت نیز راه پیدا کرده و در سالهای اخیر در فناوری هسته‌ای نیز کاربردهای متعددی برای آن پیدا شده است. یکی از این کاربردها در زمینه کار با سوخت هسته‌ای می‌باشد. در این زمینه مدتی است که تحقیقات گسترده ای از سوی گروههای تحقیقاتی در دانشگاه ها و مراکز علمی معتبر در کشورهای مختلف انجام می‌شود و هدف آنها بکارگیری GET برای کاربردهایی مانند موارد زیر است [۱ و۲ و۳]:

- تصدیق یکپارچگی سوخت(Fuel Integrity)
- تشخیص فقدان جزیی مواد هسته‌ای (Partial Defect)
- تعیین مقدار پارامتر مصرف سوخت برای میله‌های یک مجتمع سوخت
- تعیین توزیع گرمای واپاشی در میله‌های یک مجتمع سوخت
- تعیین میزان نشتی میله‌های سوخت در یک مجتمع سوخت

یک از مهمترین فعالیتهای پادمانی (Safeguards)، تصدیق یکپارچگی سوخت است، یعنی تایید کامل بودن میله‌های سوخت در یک مجتمع سوخت در مقابل داده‌های اعلام شده توسط نیروگاه. در معیارهای پادمانی IAEA [۱۳]، اصطلاح فقدان استفاده می شود، که به عنوان "تفاوت بین مقدار اعلام شده مواد هسته‌ای و مقدار واقعی موجود" تعریف می‌شود. فقدان مواد هسته‌ای در سه سطح مختلف مشخص شده است که عبارتند از:فقدان کلی، فقدان جزیی و فقدان ناچیز. طبق تعریف وقتی فقدان جزئی داریم که کسری از مواد هسته‌ای معرفی شده در یک سوخت ، از دست رفته باشد. یعنی تعدادی از میله‌های سوخت یک مجتمع سوخت وجود نداشته باشند یا محتوای ایزوتوپی آنها تغییر کرده باشد. GET یک ابزار غیر تهاجمی است که قادر است فقدان جزئی را مورد ارزیابی قرار دهد. در این پژوهش هدف ما شبیه سازی یک سیستم GET به منظور مطالعه بر روی تعیین یکپارچگی سوخت و بخصوص فقدان جزیی است [۱].

معرفی سیستم توموگرافی گامای گسیلی(GET) :

در این سیستم جسم که در واقع سوخت تابش دیده است منبع تابش گاما بوده و با چرخش آرایه ای از آشکارسازهای حساس به گاما در زوایای مشخص حول جسم می توان در هر زاویه، اطلاعاتی از شدت طیف گاما درآشکارسازها جمع آوری کرد که به آن نما[۱]می‌گویند. از جمع اطلاعات نماها در زاویای مختلف، ماتریس نماها (سینوگرام[۲]) تولید می شود. با استفاده از روش‌های باز سازی تصویر، از اطلاعات ماتریس نمای تصویر سطح مقطع جسم بدست می‌آید. در مورد مجتمع های سوخت ، از آنجا که برای تصدیق یکپارچگی آنها با مجتمع های سوخت تابش دیده سر و کار داریم این سوخت‌ها خود دارای عناصر اکتیو گسیلنده گاما هستند. ایزوتوپ‌هایی متعددی در سوخت مصرف شده این خاصیت را دارند که از جمله مهمترین آنها می‌توان به ایزوتوپ‌های Xe-135،Xe-133،Ba-140، Eu-154، Cs-134 و Cs-137 اشاره کرد [۱و۲].



شکل ۱- نمایی از یک سیستم GET (راست) نمای محوری (چپ) نمای عرضی

در یک سیستم GET، مجتمع سوخت در گوشه ای از استخر سوخت قرار گرفته و مجموعه آشکار ساز بگونه‌ای طراحی می‌شود که در یک ارتفاع خاص ثابت شده و در زوایای مختلف با گام مشخص حول مجتمع سوخت تابش دیده چرخیده و در هر زاویه با جاروب عرضی آشکارساز، نما در آن زاویه خاص تولید شود. لازم است زمان برابر برای اندازه گیری در زوایای مختلف در نظر گرفته شود. در شکل ۱ نمایی از این سیستم مشاهده می شود. همچنین برای

[۱] Projection

[۲] Sinogram

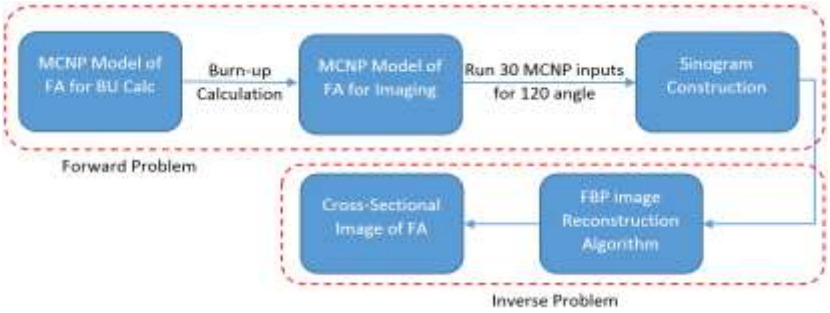
جلوگیری از پراکندگی تابش گامای گسیلی لازم است ابتدا از موازی‌سازهای[۱] سربی استفاده شده و همچنین طیف گامای تک انرژی در آشکار سازها اندازه‌گیری شود. برای مثال طیف Cs-137 یک پیک در انرژی ٦٦٢ keV دارد که از آن برای تصویربرداری استفاده می شود. مناسب ترین آشکار سازهایی که می توانند در این سیستم مورد استفاده قرار گیرند آشکارسازهای سوسوزن بیسموت ژرمانات (BGO) و هایپر ژرمانیوم (HpGe) هستند [۱و٤].

شبیه سازی سیستم GET

این شبیه سازی در دو مرحله انجام می شود: الف) حل مساله مستقیم (شبیه سازی سوخت و ثبت تابش حاصل از رادیوایزوتوپ‌های موجود در آن در آشکارسازهای نصب شده در حول سوخت)

ب) حل مساله معکوس (تولید تصاویر سطح مقطعی ضریب تضعیف خطی از سوخت با استفاده از تابش‌های ثبت شده در آشکار سازها)

در ادامه در خصوص هر یک از مراحل فوق بحث می‌شود.



شکل ۲- نمودار گردشی شبیه‌سازی مساله مستقیم و مساله معکوس

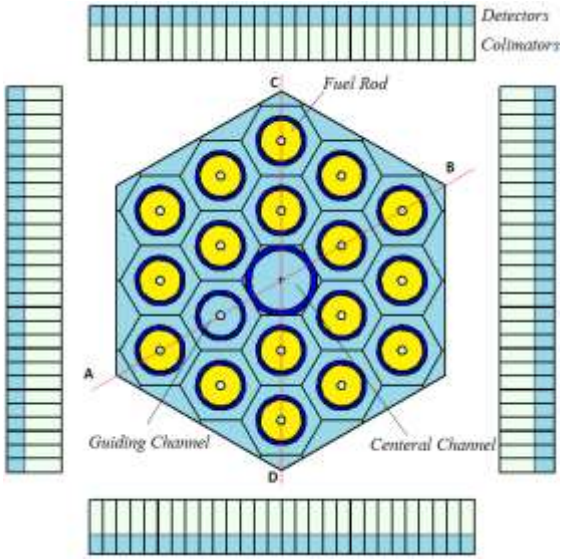
حل مساله مستقیم

[۱] Collimators

در این شبیه سازی یک مجتمع سوخت نمونه شش ضلعی شامل ۱۷ میله سوخت و یک کانال مرکزی و یک کانال خالی پر آب توسط کد MCNPX-2.7 مدل‌سازی شد. مشخصات میله‌های سوخت و کانال‌ها برگرفته از اطلاعات سوخت با غنای ۱/٦٪ نیروگاه اتمی بوشهر است که در فصل ٤ مدرک FSAR ارایه شده است[۵]. پس از تایید صحت ورودی‌های تولید شده، با استفاده از کارت Burn ،فرآیند مصرف سوخت شبیه‌سازی شده و در بازه‌های ۱روزه برای ۱۰ روز ابتدای سیکل و سپس ۲۰ روزه تا انتهای سیکل و دو گام ۱۰ روزه در حالت خاموشی بعد از انتهای سیکل محاسبات آن انجام شده است. انتخاب این بازه‌ها جهت دقت در محاسبات مصرف سوخت است.

سپس با استفاده از خروجی بدست آمده، ایزوتوپ های تولید شده انتخاب شده و بعنوان چشمه در ورودی جدید کد MCNPX استفاده می‌شود. این ایزوتوپ‌ها گسیلنده گاما هستند. همچنین در این ورودی آشکارسازها همرا با موازی‌سازهای‌شان بصورت آرایه ۲۸ تایی در چهار طرف مجتمع سوخت قرار داده می‌شوند. در شکل ۳ نحوه قرارگیری آشکارسازها حول مجتمع سوخت نشان داده شده است.

با استفاده از تالی F4 شار حجمی پرتوهای گاما گسیلی از ایزوتوپ Cs-137 با انرژی ٦٦٢ keV در آشکارسازها اندازه‌گیری می شود. سپس با دستور Trcl مجموعه آشکارسازها با گامهای سه درجه‌ای از صفر تا ۹۰ درجه چرخانده می‌شود و در هر با اجرا چهار نما محاسبه می‌شود. در مجموع ۳۰ فایل ورودی ساخته شده و ۱۲۰ نما محاسبه می‌شود. اجرای هر فایل با نسخه MCNPX 2.7 دارای پردازش موازی بر روی یک سرور ۳۰ هسته‌ای زیون با فرکانس GHz ۲/٦ حدود ۳۰ دقیقه طول می‌کشد. پس از جمع آوری داده های خروجی، ماتریس نما با ابعاد ۲۸*۱۲۰ ساخته می‌شود. لازم بذکر است که برای ساده سازی مساله، آشکارسازها بصورت ایده‌ال با راندمان صد در صد در نظر گرفته شده‌اند و در واقع آشکارساز نوع مشخصی مدل نشده است.



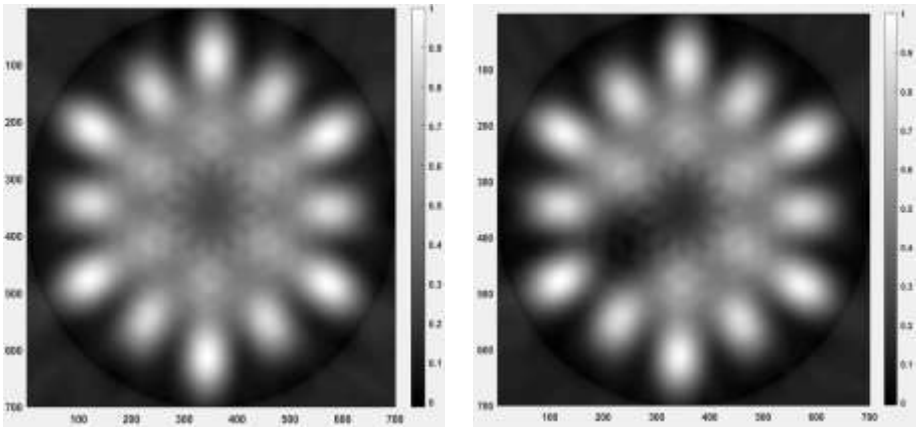
شکل ۳- نمایی از مجتمع سوخت نمونه شبیه‌سازی شده با MCNPX

حل مساله معکوس

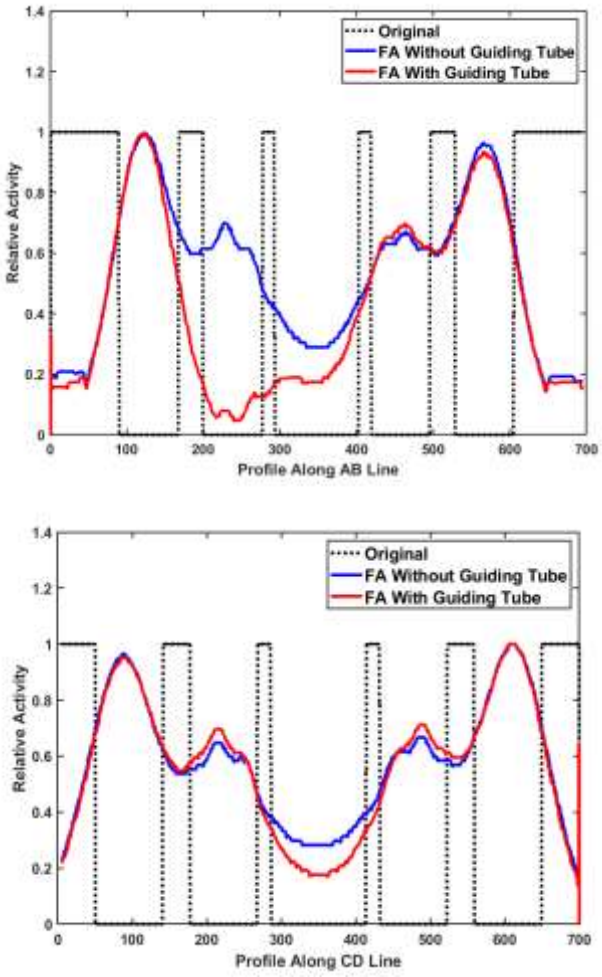
در این مرحله با ا ستفاده از ماتریس نماهای بد ست آمده از مرحله قبل و با ا ستفاده از الگوریتم‌های باز سازی ت صویر، تصویر سطح مقطعی مجتمع سوخت بدست می‌آید.الگوریتم‌های بازسازی تصویر مختلفی مبتنی بر روش های تحلیلی، تکرار جبری و تکرار احتمالاتی وجود دارند که هریک مزایا و معایبی دارند.

در این شبیه سازی از الگوریتم تحلیلی تحت عنوان Filtered-Back Projection یا FBP استفاده شده است. این الگوریتم یکی از متداولترین و پایه‌ای‌ترین الگوریتم‌های بازسازی تصویر است که روابط ریاضی و جزییات آن در مراجع زیادی آورده شده است [٦]. در این الگوریتم اگر تعداد نماها کافی باشد تصویر مطلوب و دارای خطای بازسازی ت صویر پایین بد ست می‌آید. از این رو لازم ا ست تا با ا ستفاده از درونیابی عددی، ابعاد ماتریس نماها افزایش یابد یعنی تعداد زوایا و همچنین تعداد آشکارسازها در هر زاویه افزایش داده شود. جهت درونیابی در نرم‌افزار MATLAB می‌توان از الگوریتم‌های مختلفی مانند Linear، Cubic، Nearest و Spline استفاده کرد. با استفاده از این الگوریتم‌ها درونیابی انجام شده و م شخص شد که بهترین الگوریتم درونیابی برای زوایای نماها، الگوریتم Spline و برای آ شکار سازها ، الگوریتم Linear ا ست. با ا ستفاده از درونیابی، ماتریس نما از ۱۲۰*۲۸ مولفه تبدیل به ۷۲۰*۷۰۰ مولفه شد که این ماتریس با باز سازی تو سط الگوریتم FBP ت صویر مطلوب بد ست می‌دهد. در الگوریتم FBP از فیلترهای مختلف برای

حذف فرکانس‌های پایین و بهبود ت صویر ا ستفاده می شود. در نرم افزار MATLAB می‌توان با ا ستفاده از تابع Iradon الگوریتم FBP را پیاده ســازی کرد. در این الگوریتم امکان اســتفاده از فیلترهای مختلف مانند فیلترهای Cosine، Sinc ،Hamming،Ramp و Hann وجود دارد. در این پژوهش بهترین نتایج که دارای خطای باز سازی کمتر بودند با ا ستفاده از فیلتر Hann با فرکانس قطع ۰/۱۵ هرتز بدست آمدند.



شکل ٤- تصویر بازسازی شده سطح مقطعی از مجتمع سوخت (راست) با کانال هدایت (چپ) بدون کانال هدایت

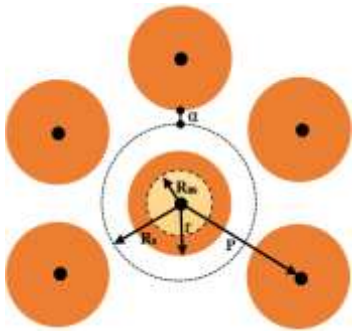


شکل ۵- مقایسه فعالیت بازسازی شده در امتداد خطوط گذرنده از مجتمع سوخت برای مجتمع سوخت با و بدون کانال هدایت نسبت که مجتمع سوخت اصلی (بالا) در امتداد خط AB (پایین) در امتداد خط CD

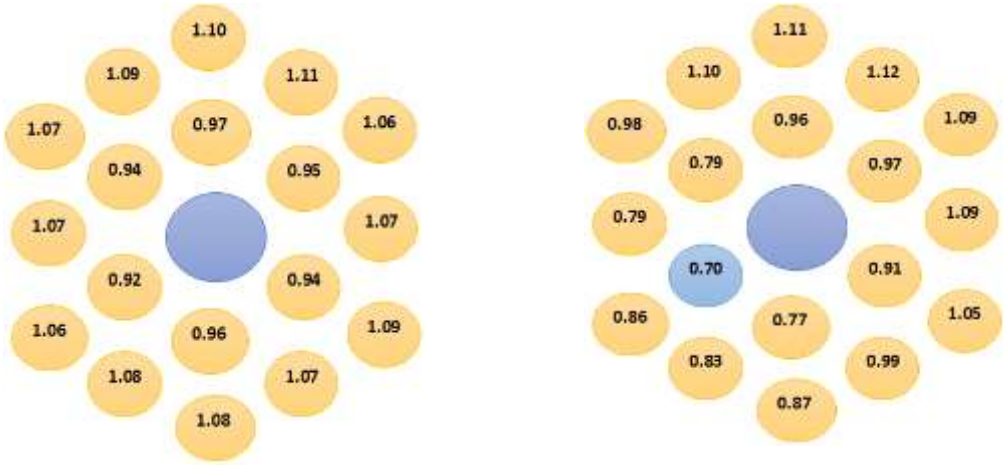
محاسبه توزیع فعالیت نسبی میله‌های سوخت در مجتمع سوخت

جهت بدست آوردن فعالیت نسبی در هر میله سوخت با استفاده از پردازش تصویر سطح مقطعی بدست امده از مرحله قبل الگوریتمی طراحی و با نرم افزار MATALB پیاده سازی شد. در این الگوریتم از آنجا که مختصات مرکز میله‌ها در

مجتمع سوخت مشخص است لذا با مقیاس بندی در ماتریس تصویر بازسازی شده ، ماسک دایره‌ای شکل به ابعاد میله سوخت در ماتریس تصویر حرکت کرده و میانگین عددی شدت پیکسل های واقع در ماسک را محاسبه می‌کند. از آنجا که ممکن است در فرایند بازسازی تصویر مکان میله‌ها اندکی جابجایی داشته باشند لذا مرکز میله در دایره ای به شعاع Rm=Rs-r حرکت می‌کند که در آن Rs=P-r-α ، P طول گام شبکه میله‌های سوخت، r شعاع میله سوخت و α پارامتر تنظیم است. جزییات در شکل ٦ نمایش داده شده است. پس از جاروب سطح دایره مذکور توسط ماسک دایره‌ای، بیشترین مقدار متوسط بدست آمده بعنوان فعالیت نسبی میله سوخت در نظر گرفته می‌شود زیرا احتمال حضور میله در این ناحیه بیشتر است [۷ و۸] . نتایج بدست آمده برای فعالیت نسبی میله‌های سوخت در مجتمع‌های سوخت با و بدون کانال هدایت در شکل ۷ نشان داده شده است.



شکل ٦-پارامترهای الگوریتم محاسبه توزیع فعالیت نسبی میله های سوخت



شکل ۷–توزیع فعالیت نسبی میله های سوخت در مجتمع سوخت (راست) با کانال هدایت (چپ) بدون کانال هدایت

نتیجه‌گیری

جهت مقایسه نتایج بازسازی شده دو نوع مقایسه کیفی و کمی انجام شده است. در شکل شماره ٤ نتایج بازسازی سطح مقطع برای دو حالت مجتمع سوخت با و بدون کانال هدایت نشان داده شده است که به وضوح فقدان کانال هدایت در آن مشخص است. همچنین برای مقایسه کمی در شکل ۵ مقادیر بازسازی شده اکتیویته نسبی در امتداد دو خط گذرنده از مدل یعنی خطوط AB و CD (شکل۳) برای دو حالت مجتمع سوخت استخراج شده و نمودار مقایسه‌ای ترسیم شده است. نمودارها نیز تمایز فقدان کانال هدایت را نشان می دهند. نتایج بدست آمده فوق که نشان می‌دهند که تمایز بین میله‌های سوخت‌های مختلف در یک مجتمع سوخت با روش GET امکانپذیر بوده و از این روش می‌توان بعنوان ابزاری مناسب جهت تصدیق یکپارچگی سوخت و فقدان جزیی مواد هسته‌ای استفاده کرد. همچنین جهت بهبود نتایج در آینده می‌توان موارد زیر را در فرایند شبیه سازی GET بکار برد:

- بکارگیری الگوریتم‌های باز سازی تصویر مبتنی بر تکرار با احتمالات مانند ML-EM که با تعداد نماهای کم نیز قادر هستند تصاویر مطلوب تولید کنند. با این الگوریتم‌ها می‌توان کیفیت تصویر بازسازی شده را افزایش داده و به تبع آن دقت محاسبه فعالیت نسبی میله های سوخت را بالا برد.
- استفاده از طیف انرژی گاما عناصر با انرژی گاما مشخصه بالاتر رزولوشن تصویر بهبود خواهد یافت.
- افزایش تعداد زوایای تصویربرداری یعنی افزایش تعداد نماها.

مراجع :

1- S. Jacobsson *et all*, "A Tomographic Method for Verification of the Integrity of Spent Nuclear Fuel Assemblies—I: Simulation Studies", Nucl. Technol., **135**, 131 (2001).
2- S. Holcombe *et all*, "Feasibility of identifying leaking fuel rods using gamma tomography", Annals of Nuclear Energy, 57, 334–340,(2013).
3- S. Jacobsson, S. Grape, "Applicability of a set of tomographic reconstruction algorithms for quantitative SPECT on irradiated nuclear fuel assemblies", Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A ,**783**,128–141 (2015).
4- S. Holcombe , S. Jacobsson, L. Hallstadius, "A Novel gamma emission tomography instrument for enhanced fuel characterization capabilities within the OECD Halden Reactor Project", Annals of Nuclear Energy ,**85**, 837–845,(2015).
5- "Final safety Analysis Report for Bushehr NPP Unit1", Rev.1, Chapter 4, (2014).
6- A. C. Kak and M. Slaney, Principles of computerized tomographic imaging. IEEE press New York, 1988.
7- Anna Davour *et all*, "Applying image analysis techniques to tomographic images of irradiated nuclear fuel assemblies", Annals of Nuclear Energy, **96**,223-229 (2016).
8- P. Andersson , S. Holcombe, " A computerized method (UPPREC) for quantitative analysis of irradiated nuclear fuel assemblies with gamma emission tomography at the Halden reactor", Annals of Nuclear Energy, **110** ,88–97(2017).