

شبیه‌سازی یک سیستم برش‌نگاری گامای گسیلی جهت ارزیابی فقدان جزئی مجتمع‌های سوخت هسته‌ای تابش دیده

امیر پایانی و سیدمحمد متولی*

گروه فیزیک هسته‌ای، دانشکده علوم پایه، دانشگاه مازندران، بابلسر، مازندران، ایران.

*مازندران، بابلسر، دانشگاه مازندران، دانشکده علوم پایه، گروه فیزیک هسته‌ای، کدپستی: ۱۳۵۳۴-۴۷۴۱۶

پست الکترونیکی: motavali@umz.ac.ir

چکیده

سیستم برش‌نگاری گامای گسیلی یکی از متداول‌ترین سیستم‌های تصویربرداری پزشکی می‌باشد که در سال‌های اخیر جهت پایش یک‌پارچگی و تعیین عیوب سوخت هسته‌ای استفاده شده است. در این پژوهش، قابلیت سیستم برش‌نگاری گامای گسیلی جهت تصدیق فقدان جزئی مواد هسته‌ای در مجتمع‌های سوخت هسته‌ای تابش دیده مورد بررسی قرار گرفته است. بدین منظور یک سیستم نوعی برش‌نگاری گامای گسیلی شبیه‌سازی شده است. این سیستم قادر است تصاویر سطح مقطعی از سوخت تابش دیده تولید کرده و با پردازش تصاویر مذکور، فقدان جزئی سوخت را مورد بررسی قرار دهد. لازم به ذکر است که در این شبیه‌سازی، اصلاح تضعیف پرتو گاما در نظر گرفته شده است. هم‌چنین با استفاده از الگوریتم توسعه داده شده، توانایی سیستم برش‌نگاری گامای گسیلی در محاسبه توزیع فعالیت نسبی میله‌های سوخت در یک مجتمع سوخت هسته‌ای مورد بررسی قرار گرفته است.

کلیدواژگان: برش‌نگاری گامای گسیلی، سوخت تابش دیده، فقدان جزئی، توزیع فعالیت نسبی.

۱. مقدمه

در این راستی‌آزمایی کامل بودن تعداد میله‌های سوخت در مجتمع‌های سوخت براساس داده‌های اعلام‌شده توسط نیروگاه هسته‌ای مورد بررسی قرار می‌گیرد. در معیارهای پادمانی IAEA^۳، اصطلاح فقدان^۴ استفاده می‌شود که به‌عنوان "تفاوت بین مقدار اعلام‌شده مواد هسته‌ای از سوی نیروگاه و مقدار واقعی موجود" تعریف می‌شود. فقدان مواد هسته‌ای در سه

برش‌نگاری گامای گسیلی (GET^۱) در سال‌های اخیر در زمینه کار با سوخت هسته‌ای مانند تعیین مقدار پارامتر مصرف سوخت، توزیع گرمای واپاشی و میزان نشتی میله‌های سوخت مورد استفاده قرار گرفته است. هم‌چنین یکی از کاربردهای مهم آن راستی‌آزمایی یک‌پارچگی سوخت هسته‌ای است که از جمله فعالیت‌های پادمانی^۲ به‌حساب می‌آید [۴-۱].

^۳ International Atomic Energy Agency

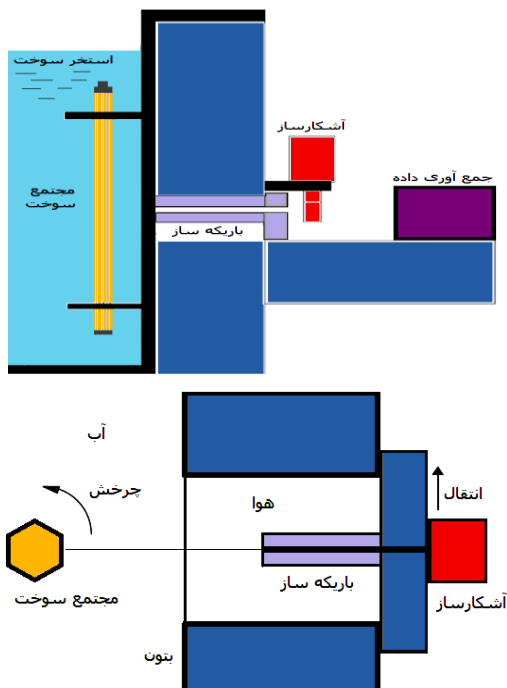
^۴ Defect

^۱ Gamma Emission Tomography

^۲ Safeguards activities

در مورد تصدیق یک پارچگی مجتمع‌های سوخت تابش دیده، از آنجا که این سوخت‌ها دارای ایزوتوپ‌های گسیلنده گاما هستند، لذا خود به‌عنوان منبع تابش گاما عمل می‌کنند. ایزوتوپ‌های متعددی در سوخت تابش دیده خاصیت گسیلندگی گاما را دارند که از جمله مهم‌ترین آن‌ها می‌توان به ایزوتوپ‌هایی مانند $Eu-154$ ، $Cs-134$ و $Cs-137$ اشاره کرد [۷، ۸].

در یک سیستم GET، مجتمع سوخت در گوشه‌ای از استخر سوخت مصرف‌شده^۳ قرار گرفته و مجموعه آشکارساز به‌گونه‌ای 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، نگاره در آن زاویه خاص تولید شود. لازم است زمان برابر برای ثبت تابش گامای گسیلی از مجتمع سوخت مذکور در زوایای مختلف در نظر گرفته شود. در شکل ۱ نمایی از این سیستم مشاهده می‌شود [۲، ۶].



شکل (۱): نمایی از یک سیستم GET (بالا) نمای محوری، (پایین) نمای عرضی.

سطح مختلف مشخص شده است که عبارتند از: فقدان کلی، فقدان جزئی و فقدان ناچیز [۵].

طبق تعریف وقتی فقدان جزئی وجود دارد که 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. برش‌نگاری گامای گسیلی یک ابزار غیرتهاجمی است که قادر است فقدان جزئی مواد هسته‌ای در مجتمع‌های سوخت یک نیروگاه اتمی را مورد ارزیابی قرار دهد [۵].

در این پژوهش، هدف شبیه‌سازی یک سیستم GET به‌منظور مطالعه بر روی تعیین یک پارچگی سوخت و به‌خصوص فقدان جزئی است. هم‌چنین قابلیت سیستم GET در تعیین فعالیت نسبی میله‌های سوخت در یک مجتمع سوخت نیز مورد ارزیابی قرار گرفته است. بدین منظور الگوریتمی توسعه داده شد که پیاده‌سازی آن نسبت به الگوریتم‌های مشابه آسان‌تر بوده و نتایج با دقت مناسب می‌دهد.

۲. معرفی سیستم برش‌نگاری گامای گسیلی

در این سیستم جسم که در واقع سوخت تابش دیده است، منبع تابش گاما بوده و با چرخش آرایه‌ای از آشکارسازهای حساس به گاما در زوایای مشخص حول سوخت می‌توان در هر زاویه، اطلاعاتی از شدت طیف گاما در آشکارسازها را جمع‌آوری کرد که به آن نگاره^۱ می‌گویند. از تجمیع اطلاعات نگاره‌ها در زوایای مختلف، ماتریس نگاره‌ها (سینوگرام^۲) تولید می‌شود. با استفاده از روش‌های بازسازی تصویر، از اطلاعات ماتریس سینوگرام، تصویر سطح مقطع جسم به دست می‌آید [۶].

^۱ Projection

^۲ Sinogram

^۳ Spent Fuel Pool

۱.۳. حل مسأله مستقیم

برای بررسی قابلیت سیستم GET در راستی‌آزمایی یکپارچگی سوخت (فقدان جزئی مواد هسته‌ای) که شامل موارد زیر است، دو فانتوم مختلف از مجتمع سوخت نوعی شبیه‌سازی شدند که در شکل ۳ چیدمان‌های سوخت در این فانتوم‌ها و نحوه قرارگیری آشکارسازها حول آن‌ها نشان داده شده است [۹، ۱۰]:

الف) برداشته‌شدن یک یا چند میله سوخت: برای این منظور مجتمع سوختی تحت عنوان فانتوم ۱ و شامل ۱۷ میله سوخت دارای فعالیت یکسان، یک کانال مرکزی و کانال هدایت که با آب پر شده‌اند، مدل‌سازی شده است.

ب) جایگزینی تعدادی از میله‌های سوخت: برای این منظور مجتمع سوختی تحت عنوان فانتوم ۲ و شامل ۱۶ میله سوخت دارای فعالیت یکسان، دو میله سوخت با فعالیت متفاوت، یک کانال مرکزی که با آب پر شده، مدل‌سازی شده است.

در این شبیه‌سازی یک مجتمع سوخت نوعی شش‌ضلعی شامل ۱۷ میله سوخت و یک کانال مرکزی و یک کانال خالی پر آب توسط کد MCNPX-2.7 که یک کد محاسبات مونت‌کارلو می‌باشد، مدل‌سازی شد [۱۱]. مشخصات میله‌های سوخت و کانال‌ها برگرفته از اطلاعات سوخت با غنای ۱/۱۶٪ نیروگاه اتمی بوشهر است که در فصل ۴ مدرک تحلیل ایمنی نیروگاه اتمی بوشهر (FSAR) ارائه شده است [۱۲].

پس از تأیید صحت ورودی‌های تولیدشده کد MCNPX، با استفاده از کارت Burn، فرآیند مصرف سوخت شبیه‌سازی شده و در بازه‌های یک روزه 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 مصرف سوخت انجام شده است. انتخاب این بازه‌ها جهت دقت در محاسبات مصرف سوخت می‌باشد. سپس با استفاده از خروجی به‌دست آمده، ایزوتوپ‌های تولیدشده گسیلنده گاما به‌عنوان چشمه در

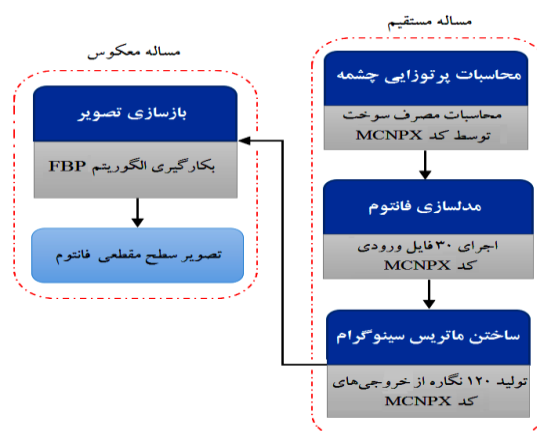
هم‌چنین برای جلوگیری از پراکندگی تابش گامای گسیلی لازم است ابتدا از باریکه‌سازهای^۱ سری استفاده شده و طیف گامای تک‌انرژی ایزوتوپ نشانگر در آشکارسازها اندازه‌گیری شود. برای مثال طیف گامای ایزوتوپ Cs-137 یک قله در انرژی ۶۶۱/۶ keV دارد که از آن برای تصویربرداری استفاده می‌شود. طبق نتایج تجربی به‌دست آمده، مناسب‌ترین آشکارسازهایی که می‌توانند در این سیستم مورد استفاده قرار گیرند، آشکارسازهای سوسوزن بیسموت ژرمانات (BGO) و هایپر ژرمانیوم (HpGe) هستند [۲، ۶].

۳. شبیه‌سازی سیستم برش‌نگاری گامای گسیلی

این شبیه‌سازی همان‌طور که در شکل ۲ مشاهده می‌شود در دو مرحله به‌شرح زیر انجام می‌شود:

الف) حل مسأله مستقیم (یعنی شبیه‌سازی یک مجتمع سوخت نوعی و ثبت تابش گامای حاصل از رادیوایزوتوپ‌های گسیلنده گامای موجود در آن در آشکارسازهای نصب‌شده حول مجتمع سوخت.

ب) حل مسأله معکوس (یعنی تولید تصاویر سطح مقطعی ضریب تضعیف خطی از سوخت با استفاده از تابش‌های گامای ثبت‌شده در آشکارسازها از طریق الگوریتم‌های بازسازی تصویر). در ادامه در خصوص هر یک از مراحل فوق بحث می‌شود.



شکل (۲): روند نمای شبیه‌سازی مسأله مستقیم و مسأله معکوس.

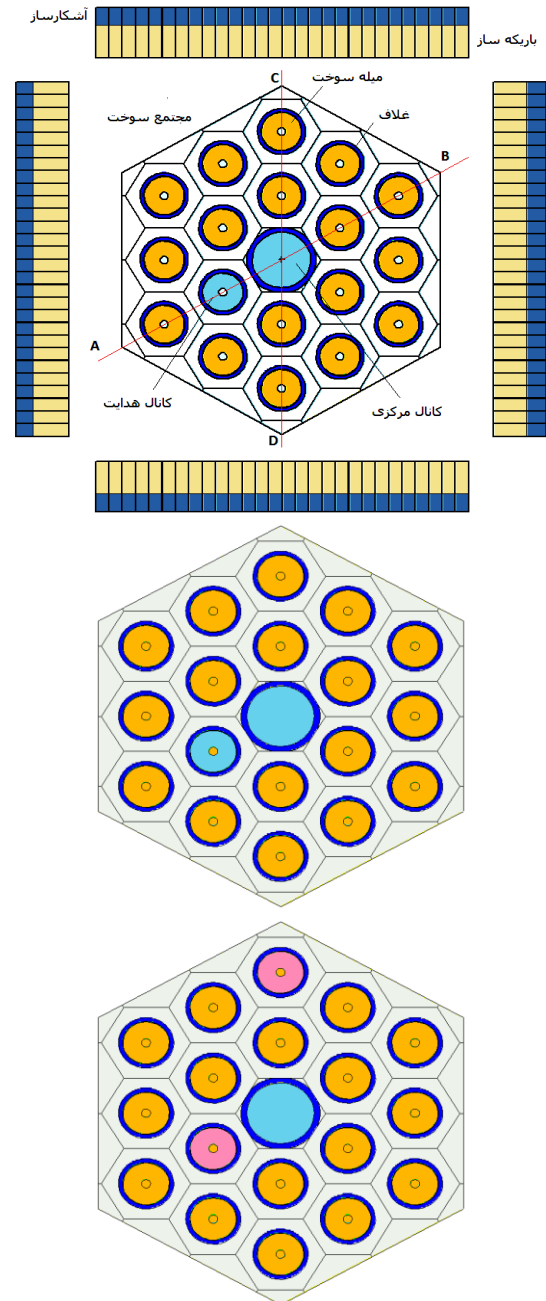
^۱ Collimators

برای انجام شبیه‌سازی مسأله مستقیم، پس از تعیین ایزوتوپ‌های چشمه، ورودی کد MCNPX برای هر یک از فانتوم‌ها ساخته می‌شود. در این ورودی‌ها با استفاده از کارت تالی F4، شار حجمی پرتوهای گاما گسیلی از ایزوتوپ گسیلنده گامای Cs-137 با انرژی قله $661/6\text{keV}$ در آشکارسازها محاسبه می‌شود که در ورودی کد MCNPX پنجره انرژی بین $661/595\text{keV}$ و $661/605\text{keV}$ برای آن در نظر گرفته شده است.

سپس با کارت Trel، مجموعه آشکارسازها با گام‌های سه درجه‌ای از صفر تا ۹۰ درجه چرخانده می‌شود و در هر بار اجرای کد مطابق شکل ۳، چهار نگاره در چهار آرایه آشکارساز حول مجتمع سوخت محاسبه می‌شود. برای هر فانتوم در مجموع ۳۰ فایل ورودی ساخته شده و ۱۲۰ نگاره محاسبه می‌شود. اجرای هر فایل ورودی با نسخه MCNPX 2.7 دارای پردازش موازی بر روی یک سیستم رایانه سرور ۳۰ هسته‌ای (دارای پردازنده Xeon با فرکانس ۲/۶ GHz) حدود ۳۰ دقیقه طول می‌کشد. پس از جمع‌آوری داده‌های خروجی ماتریس سینوگرام با ابعاد 120×28 ساخته می‌شود.

برای کاهش واریانس در MCNPX و همچنین جلوگیری از پراکندگی پرتوهای گاما خارج‌شده از جسم لازم است تا پیکربندی سیستم GET شامل ابعاد باریکه‌سازها، فاصله آن‌ها تا منبع تابش و سایر پارامترهای ابعادی به‌گونه‌ای طراحی شوند که FWHM^۱ که به‌عنوان پهنای کامل در نصف بیشینه قله تصویر نمای یک‌بعدی ناشی از یک منبع تابش تک‌خط تعریف می‌شود کمینه شود. هر قدر مقدار این پارامتر کم‌تر باشد پراکندگی کم‌تر بوده و افزایش توان تفکیک مکانی^۲ خواهیم داشت [۱۳، ۱۴].

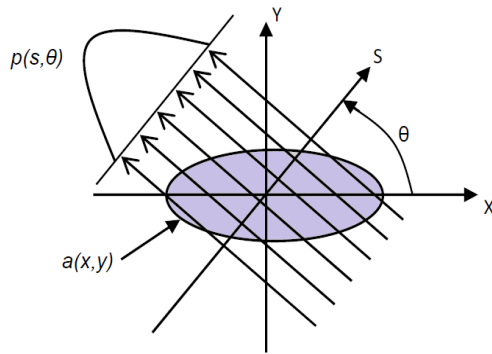
ورودی‌های جدید کد MCNPX برای مدل‌سازی فانتوم‌های ۱ و ۲ استفاده می‌شود. همچنین در این ورودی آشکارسازها همراه با باریکه‌سازها به‌صورت آرایه ۲۸ تایی در چهار طرف مجتمع سوخت در نظر گرفته شده‌اند.



شکل (۳): نمایی از وضعیت مجتمع‌های سوخت شبیه‌سازی شده با کد MCNPX: (بالا) وضعیت قرارگیری آشکارسازها حول فانتوم، (وسط) فانتوم ۱، (پایین) فانتوم ۲.

¹ Full Width at Half Maximum

² Spatial resolution



شکل (۴): فرضیات استفاده‌شده در تبدیل رادون برای ایجاد نگاره.

در تصویربرداری GET اگر از دو سیستم مختصات دکارتی (x, y) و قطبی (S, θ) استفاده کنیم، به‌عنوان تابع نگاره یا تابش گامای اندازه‌گیری‌شده در آشکارسازها و $a(x, y)$ که تابع جسم است، دربردارنده توزیع منبع در نظر گرفته می‌شود. روش‌های تحلیلی متنوعی برای محاسبه $a(x, y)$ با استفاده از $P(S, \theta)$ وجود دارند. در این روش‌ها از معکوس تبدیل رادون استفاده شده و به‌جهت افزایش توان تفکیک و حذف نوفه فرکانس‌های پایین از تصاویر، از فیلترهای عددی مناسب استفاده می‌شود [۱۶، ۱۷].

در این پژوهش از الگوریتم تحلیلی تحت عنوان ^2FBP استفاده شده است که مبتنی بر تبدیل فوریه بوده و توزیع منبع در آن به‌صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$a(x, y) = \int_0^{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} p(s', \theta) e^{-2\pi i w s'} dw \left[F(w) e^{2\pi i w s} dw \right] d\theta \quad (2)$$

که در آن $F(w)$ تابع فیلتر و W مختصه فوریه متناظر با مختصه فضایی S است [۱۷، ۱۸].

در این الگوریتم اگر تعداد نگاره‌ها کافی باشد تصویر مطلوب و دارای خطای بازسازی تصویر پایین به‌دست می‌آید. از این رو لازم است تا با استفاده از درونیابی عددی، ابعاد ماتریس سینوگرام افزایش یابد. یعنی تعداد زوایا و همچنین تعداد نقاط آشکارسازی در سطح حساس آن در هر زاویه افزایش داده شود. جهت درونیابی می‌توان از الگوریتم‌های

در این پژوهش، باریکه‌سازها دارای طول و عرض (Col_w) $2/5 \text{ mm}$ و عمق (Col_D) 10 mm بوده و همچنین فاصله از مرکز سوخت تا آشکارسازها 50 mm ، قطر ستون 30 mm و فاصله بین آشکارساز و مرکز ستون $(Dist_{D2C})$ 50 mm است. با محاسبه $FWHM$ از فرمول زیر مقدار آن برابر $1/25 \text{ mm}$ به‌دست می‌آید که مقدار مناسبی برای تولید تصویر واضح می‌باشد [۱۳، ۱۵]:

$$FWHM = \frac{Col_w \times Dist_{D2C}}{Col_D} \quad (1)$$

در این شبیه‌سازی برای ساده‌سازی مسأله، آشکارسازها به‌صورت ایده‌آل و با بازده صددرصد در نظر گرفته شده‌اند و درواقع آشکارساز نوع مشخصی مدل نشده است. همچنین لازم به ذکر است که تعداد ذرات اجراشده در کد MCNPX دویست میلیون ذره است. همچنین خطا در محاسبه تالی‌ها برابر با $(\sigma) 1/79 \%$ است.

۲.۳. حل مسأله معکوس

در این مرحله با استفاده از ماتریس سینوگرام به‌دست آمده از مرحله قبل و با استفاده از الگوریتم‌های بازسازی تصویر، تصویر سطح مقطعی مجتمع سوخت به‌دست می‌آید. الگوریتم‌های بازسازی تصویر مختلفی مبتنی بر روش‌های تحلیلی، تکرار جبری و تکرار احتمالاتی وجود دارند که هر یک مزایا و معایبی دارند. روش‌های تحلیلی بازسازی تصویر مبتنی بر تبدیل رادون^۱ هستند که در سال ۱۹۱۷ توسط وی ارائه شد. این تبدیل که به آن نما نیز اطلاق می‌شود از جمع انتگرالی خواص جسم مانند توزیع فعالیت در امتداد خطوط گذرنده از داخل جسم تشکیل شده است. شکل‌گیری یک نگاره با استفاده از مجموعه خطوط انتگرالی گذرنده از داخل جسم در شکل ۵ نشان داده شده است [۱۶].

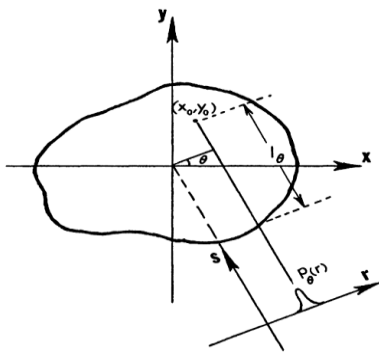
² Filtered-Back Projection

¹ Radon transform

مختلفی وجود دارد که یکی از پرکاربردترین آن‌ها روش چانگ است. این الگوریتم در سال ۱۹۷۸ توسط چانگ ارائه شد. در این الگوریتم پس از بازسازی تصویر برای اصلاح تضعیف، ماتریس تصحیح تضعیف (C) که شامل کلیه نقاط تصویر است تولید شده و در ماتریس تصویر نظیر به نظیر ضرب می‌شود. این ضریب برای هر نقطه تصویر به صورت زیر به دست می‌آید:

$$C(x, y) = \left(\frac{1}{M} \sum_{i=1}^M e^{(\mu s_{i\theta})} \right)^{-1} \quad (3)$$

که در آن M تعداد کل نگاره‌ها و s فاصله نقطه مورد نظر تا مرکز آشکارساز در هر نگاره و μ ضریب تضعیف نقطه مورد نظر است. در شکل ۵ نمایشی از فرضیات الگوریتم چانگ مشاهده می‌شود [۱۹، ۲۰]. جهت انجام تصحیح تضعیف، برنامه‌ای با زبان MATLAB نوشته شد که قادر است با استفاده از نقشه تضعیف فانتوم‌ها، ضرایب $C(x, y)$ در الگوریتم چانگ را محاسبه کند. این ماتریس در نهایت به صورت نظیر به نظیر در ماتریس تصویر بازسازی شده ضرب می‌شود و تصویر نهایی به دست می‌آید که در آن تصحیح تضعیف پرتوهای گاما لحاظ شده است.



شکل (۵): فرضیات استفاده شده در الگوریتم چانگ.

با انجام اصلاح تضعیف مطابق با الگوریتم چانگ، تضعیف در مجتمع‌های نزدیک به مرکز اصلاح شده و توزیع یکنواخت‌تری ایجاد می‌شود.

در شکل‌های ۸ و ۹ تصاویر سطح مقطعی (در نماهای دو و سه بعدی) که حاصل اصلاح تضعیف توسط الگوریتم چانگ بر

مختلفی مانند خطی، مکعبی، نزدیکترین همسایگی‌ها^۱ و اسپیلاین^۲ استفاده کرد. در این پژوهش با انجام درون‌یابی‌های مختلف مشخص شد که بهترین نتایج با به‌کارگیری الگوریتم درون‌یابی اسپیلاین برای زوایای نگاره‌ها و الگوریتم درون‌یابی خطی برای سطح حساس آشکارسازها به دست می‌آید [۱۶].

با استفاده از درون‌یابی انجام‌شده، ماتریس سینوگرام از 28×120 مؤلفه تبدیل به 700×700 مؤلفه می‌شود. در الگوریتم FBP از فیلترهای مختلف برای حذف فرکانس‌های پایین و بهبود تصویر استفاده می‌شود. در این الگوریتم امکان استفاده از فیلترهای مختلف مانند Ramp, Sinc, Cosine, Hamming و Hann نیز وجود دارد.

در برنامه‌ای که با زبان MATLAB نوشته شد، الگوریتم FBP پیاده‌سازی شده و امکان استفاده از فیلترهای مذکور در آن فراهم شد. در این پژوهش بهترین نتایج که دارای خطای بازسازی کمتر بودند با استفاده از فیلتر Hann با فرکانس قطع $0/15$ (برحسب مقیاس بین ۰ و ۱) به دست آمدند. همان‌طور که در شکل‌های ۶ و ۷ مشاهده می‌شود، بازسازی ماتریس سینوگرام با استفاده از ماتریس سینوگرام جدید و توسط الگوریتم FBP، تصاویر سطح مقطعی مطلوبی به دست می‌دهد.

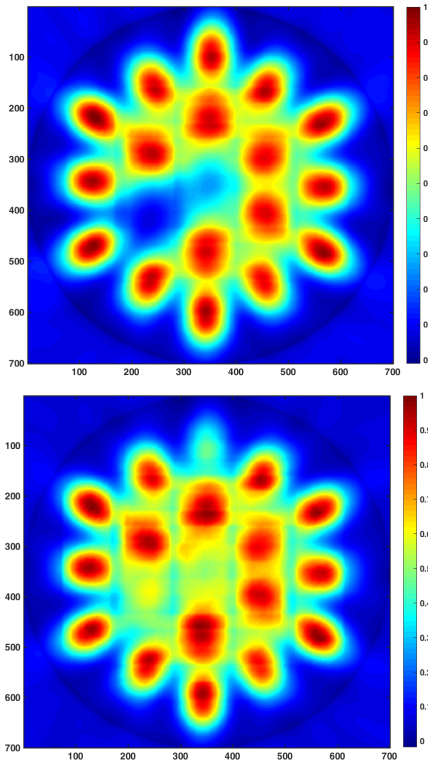
۳.۳. اصلاح تضعیف

یکی از مشکلات مهم در تصاویر بازسازی شده در سیستم GET آن است که بخش‌های داخلی مجتمع‌های سوخت به دلیل تضعیف پرتو گاما، با وضوح و کنتراست پایین‌تر از حد انتظار بازسازی می‌شوند. در واقع بدون تصحیح تضعیف بخش مرکزی تصویر، به خاطر این که تضعیف بیش‌تری دارد، فعالیت کمتری را نشان می‌دهد. برای حل این مشکل روش‌های

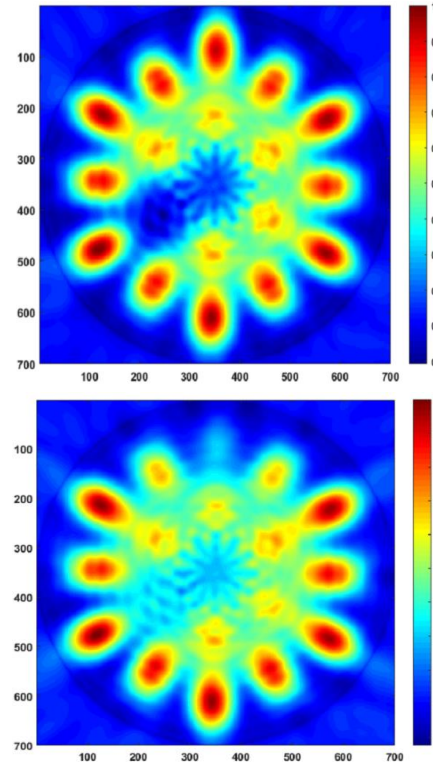
¹ Nearest neighbors

² Spline

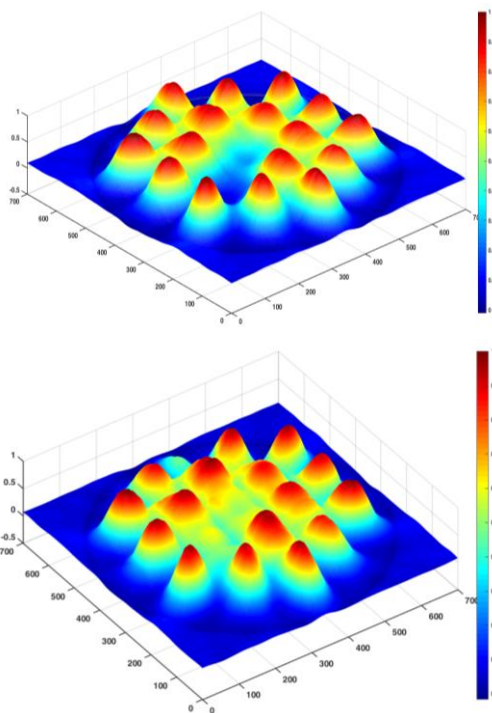
روی تصاویر بازسازی‌شده فانتوم‌های ۱ و ۲ در شکل‌های ۶ و ۷ می‌باشند، ارائه شده‌اند.



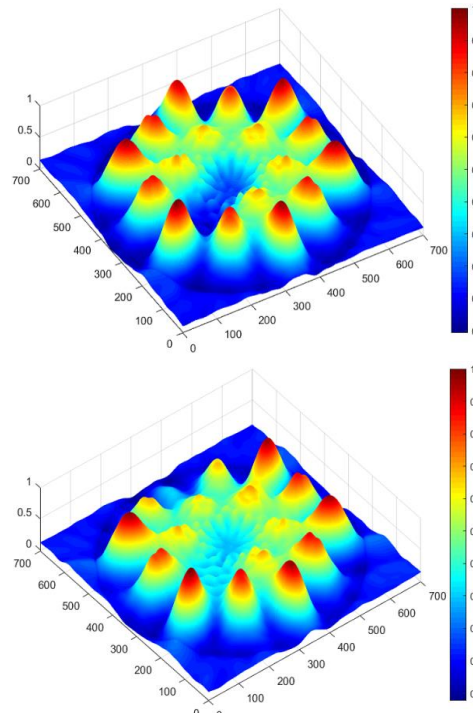
شکل (۸): تصویر بازسازی‌شده سطح مقطعی دوبعدی با اصلاح تضعیف (بالا) فانتوم ۱، (پایین) فانتوم ۲.



شکل (۶): تصویر بازسازی‌شده سطح مقطعی دوبعدی (بالا) فانتوم ۱، (پایین) فانتوم ۲.



شکل (۹): تصویر بازسازی‌شده سطح مقطعی سه‌بعدی با اصلاح تضعیف (بالا) فانتوم ۱، (پایین) فانتوم ۲.



شکل (۷): تصویر بازسازی‌شده سطح مقطعی سه‌بعدی (بالا) فانتوم ۱، (پایین) فانتوم ۲.

(ب) مقایسه پارامتر همبستگی پیرسون^۱: در این روش مطابق فرمول زیر همبستگی پیرسون که عددی بین -۱ و ۱ محاسبه می‌شود [۲۱، ۲۲]:

$$PC(RA_{original}, RA_{recon}) = \frac{COV(RA_{original}, RA_{recon})}{\sigma(RA_{original})\sigma(RA_{recon})} \quad (۴)$$

در این همبستگی عدد به دست آمده قابلیت تطابق فعالیت نسبی (RA) در تصاویر اصلی و بازسازی شده را نشان می‌دهد. عدد -۱ تطابق منفی کامل، عدد ۱ تطابق مثبت کامل و عدد صفر نشان‌دهنده عدم تطابق است. هم‌چنین در فرمول بالا پارامتر COV کواریانس و σ انحراف معیار می‌باشد.

مقادیر محاسبه شده همبستگی پیرسون برای فانتوم‌های ۱ و ۲ به ترتیب برابر ۰/۸۱ و ۰/۷۸ می‌باشد که نشان‌دهنده تطابق قابل قبول فعالیت نسبی در تصاویر اصلی و بازسازی فانتوم‌ها می‌باشد.

۴. محاسبه توزیع فعالیت نسبی میله‌های سوخت در مجتمع سوخت

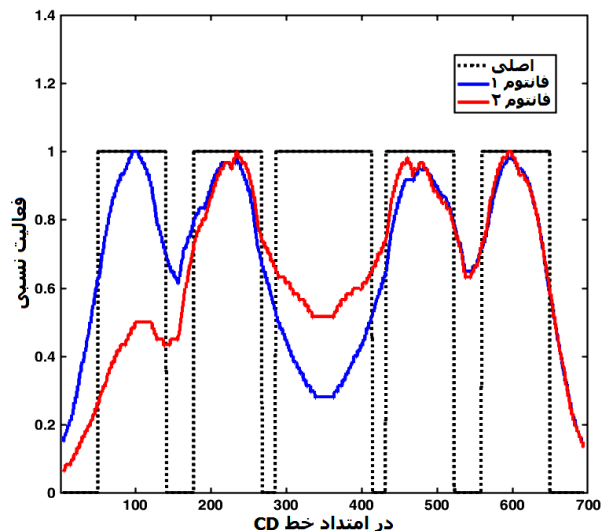
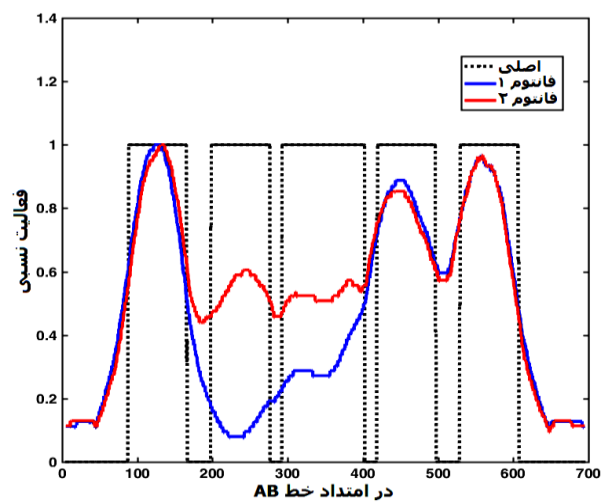
در این قسمت با استفاده از دو روش متفاوت، توزیع فعالیت نسبی میله‌های سوخت در مجتمع‌های سوخت مورد مدل‌سازی، محاسبه می‌شود. در روش اول این توزیع با استفاده از پردازش تصویر بر روی نتایج برش‌نگاری گسیل گاما صورت می‌گیرد و در روش دوم با مدل‌سازی این مجتمع‌های سوخت تابش دیده با کد MCNPX و محاسبه توزیع توان گرمایی، توزیع مذکور محاسبه می‌شود. نتایج این دو روش در شکل ۱۱ مقایسه شده‌اند.

۴.۱. محاسبه توزیع فعالیت نسبی با استفاده از پردازش تصاویر بازسازی شده در GET

جهت به دست آوردن فعالیت نسبی در هر میله سوخت با استفاده از پردازش تصویر مقطعی به دست آمده از مرحله

علاوه بر انجام مقایسه کیفی نتایج که در شکل‌های ۸ و ۹ ارائه شده است، لازم است مقایسه‌های کمی نیز در نتایج صورت گیرد. برای انجام مقایسه‌های کمی از دو روش زیر استفاده شده است:

(الف) مقایسه فعالیت نسبی بازسازی شده و اصلی در امتداد خطوط گذرنده از داخل فانتوم‌ها: این مقایسه‌ها در امتداد خط‌های AB و CD که در شکل ۳ مشخص شده‌اند، انجام شده است و نتایج آن در شکل ۱۰ ارائه شده است.

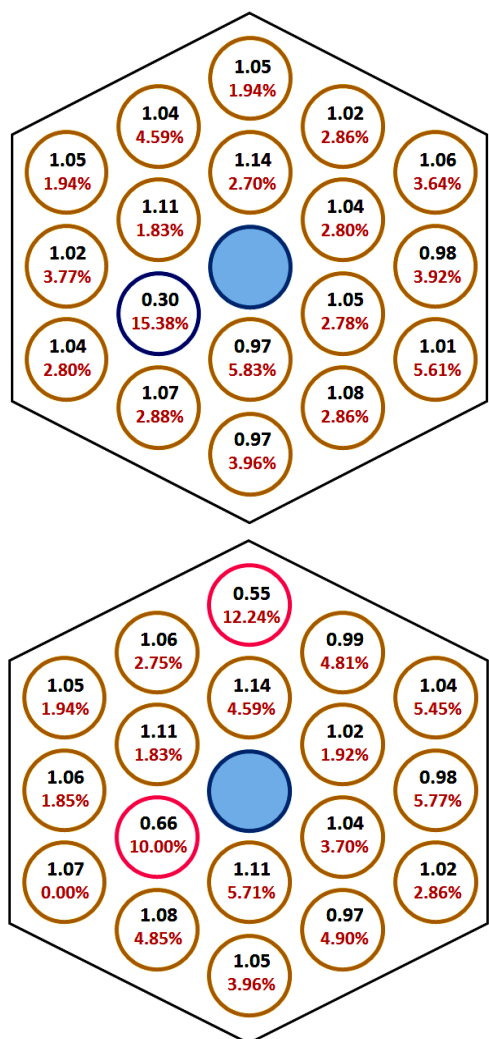


شکل (۱۰): مقایسه فعالیت نسبی بازسازی شده و اصلی در امتداد خطوط گذرنده از داخل فانتوم‌های ۱ و ۲ (بالا) در امتداد خط AB، (پایین) در امتداد خط CD.

^۱ Pearson correlation

می‌شود. این تالی مقدار انرژی حاصل از اندرکنش ذره بر واحد جرم یک سلول و به عبارتی گرمای ناشی از تابش گاما در آن را محاسبه می‌کند. بدین طریق توزیع توان گرمایی در مجتمع‌های سوخت محاسبه می‌شود که توزیع نسبی توان گرمایی معادل با توزیع فعالیت نسبی می‌باشد.

نتایج به‌دست آمده برای فعالیت نسبی در فانتوم‌های ۱ و ۲ در شکل ۱۱ نشان داده شده است. در شکل مذکور در هر میله سوخت عدد اول مقدار محاسبه‌شده با پردازش نتایج GET و عدد دوم قدرمطلق خطای نسبی مقادیر محاسبه‌شده با پردازش نتایج GET (روش اول) و نتایج MCNPX (روش دوم) می‌باشد.



شکل (۱۱): توزیع فعالیت نسبی میله‌های سوخت در (بالا) فانتوم ۱، (پایین) فانتوم ۲.

قبل الگوریتمی طراحی شده که در زبان MATLAB پیاده‌سازی شد [۲۱، ۲۲].

در این الگوریتم از آن‌جا که مختصات مرکز میله‌ها در مجتمع سوخت مشخص است لذا با مقیاس‌بندی در ماتریس تصویر بازسازی‌شده، مرکز سوخت‌ها تعیین می‌شود. سپس ماسک دایره‌ای شکل به قطر میله سوخت در این نقاط قرار گرفته و میانگین عددی سطح خاکستری^۱ پیکسل‌های واقع در آن محاسبه می‌شود.

از آن‌جا که ممکن است در فرآیند بازسازی تصویر، مکان میله‌ها اندکی جابه‌جایی داشته باشند، لذا در الگوریتم فرض می‌شود که مرکز میله در دایره‌ای به شعاع $R_m = R_s - r$ حرکت می‌کند که در آن r شعاع میله سوخت و R_s شعاع دایره جاروب می‌باشد که به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

$$R_s = P - r - \alpha \quad (5)$$

که در آن P طول گام شبکه میله‌های سوخت و α پارامتر تنظیم می‌باشد. پارامتر α جهت محدودسازی R_s و ایجاد فاصله دایره جاروب با سوخت مجاور در نظر گرفته شده است [۱۵].

در این الگوریتم، پس از جاروب سطح دایره مذکور توسط ماسک دایره‌ای و محاسبه میانگین عددی سطح خاکستری پیکسل‌های واقع در ماسک برای هر موقعیت جدید، بیش‌ترین مقدار محاسبه‌شده به‌عنوان فعالیت میله سوخت در نظر گرفته می‌شود. زیرا احتمال حضور میله در این ناحیه بیش‌تر است. فعالیت نسبی از تقسیم فعالیت هر میله سوخت بر میانگین فعالیت میله‌های سوخت به‌دست می‌آید [۲۲].

۲.۴. محاسبه توزیع فعالیت نسبی با استفاده از

مدل‌سازی توسط کد MCNPX

در این روش مجتمع‌های سوخت تابش‌دیده در کد MCNPX مدل‌سازی شده و در فایل ورودی از کارت تالی F6:p استفاده

^۱ Gray scale

۵. نتیجه گیری

جهت مقایسه نتایج بازسازی شده دو نوع مقایسه کیفی و کمی انجام شده است. در شکل های ۸ و ۹ نتایج بازسازی سطح مقطع برای فانتوم های ۱ و ۲ با اصلاح تضعیف پرتوهای گاما نشان داده شده است که در آن ها به وضوح وجود کانال هدایت در فانتوم ۱ و همچنین وجود دو میله سوخت با فعالیت متفاوت با سایر میله های سوخت در فانتوم ۲ مشخص است. همچنین برای مقایسه کمی در شکل ۱۰، مقادیر بازسازی شده ی فعالیت نسبی در امتداد دو خط گذرنده از مدل یعنی خطوط AB و CD (مطابق شکل ۳) برای دو فانتوم مذکور استخراج شده و نمودار مقایسه ای ترسیم شده است. این نمودارها نیز تمایزها را نشان می دهند. علاوه بر آن هم بستگی پیرسون نیز تطابق فعالیت نسبی در تصاویر اصلی و بازسازی شده فانتوم ها را نشان می دهد. با توجه به موارد فوق می توان به این نتیجه

رسید که تمایز بین میله های سوخت های مختلف در یک مجتمع سوخت با روش GET امکان پذیر بوده و از این روش می توان به عنوان ابزاری مناسب جهت تصدیق یک پارچگی سوخت و فقدان جزئی مواد هسته ای استفاده کرد.

همچنین جهت بررسی قابلیت GET در محاسبه توزیع فعالیت نسبی میله های سوخت در مجتمع سوخت، همان طور که در بخش ۴ بحث شد از دو روش متفاوت این پارامتر محاسبه شد. در شکل ۱۱ مقدار محاسبه شده با پردازش نتایج GET و قدرمطلق خطای نسبی مقادیر محاسبه شده با پردازش نتایج GET و نتایج MCNPX برای فانتوم های ۱ و ۲ نمایش داده شده است. بیش ترین مقدار خطا در فانتوم های ۱ و ۲ به ترتیب برابر با ۱۵/۳۸ و ۱۲/۲۴ درصد و میانگین خطا در فانتوم های ۱ و ۲ به ترتیب برابر ۴/۰۱ و ۴/۴۰ درصد می باشد که مقادیر قابل قبولی می باشند.

۶. مراجع

- [1] S. Holcombe, S. Jacobsson Svård, K. Eitheim, L. Hallstadius and C. Willman. Feasibility of identifying leaking fuel rods using gamma tomography, *Annals of Nuclear Energy*, 57(2013) 334–340.
- [2] S. Jacobsson, C. Andersson, A. Hakansson and A. Backlin. A Tomographic Method for Verification of the Integrity of Spent Nuclear Fuel Assemblies- I: Simulation Studies, *Nuclear Technology*, 135(2) (2001) 131–145.
- [3] S. Caruso, M. Murphy, F. Jatuff and R. Chawla. Determination of within-rod caesium and europium isotopic distributions in high burnup fuel rods through computerised gamma-ray emission tomography, *Nuclear Engineering and Design*, 239(7) (2009) 1220–1228.
- [4] H.M.D. Parker and M.J. Joyce. The use of ionising radiation to image nuclear fuel: A review, *Progress in Nuclear Energy*, 85(2015) 297–318.
- [5] IAEA Safeguards Glossary, Vienna, International Atomic Energy Agency, (2003).
- [6] S. Jacobsson, A. Hakansson, P. Jansson and A. Backlin. A Tomographic Method for Verification of the Integrity of Spent Nuclear Fuel Assemblies- II: Experimental Investigation, *Nuclear Technology*, 135(2) (2001) 146–153.
- [7] M. Chadwick, M. Herman, P. Obložinský, M.E. Dunn, Y. Danon, A. Kahler, D.L. Smith, B. Pritychenko, G. Arbanas and R. Arcilla. ENDF/B-VII. 1 nuclear data for science and technology: cross sections, covariances, fission product yields and decay data, *Nuclear data sheets*, 112(12) (2011) 2887–2996.
- [8] E.A. Miller, L.E. Smith, R.S. Wittman, L.W. Campbell, N.S. Deshmukh, M.A. Zalavadia, M.A. Batie and V.V. Mozin, Hybrid Gama Emission Tomography (HGET): FY16 Annual Report, Pacific Northwest National Lab (PNNL), Richland, WA (United States), (2017).
- [9] Y. Ham, P. Kerr, S. Sitaraman, R. Swan, R. Rossa and H. Liljenfeldt. Partial defect verification of spent fuel assemblies by PDET: Principle and field testing in Interim Spent fuel Storage Facility (CLAB) in Sweden, 4th International Conference on Advancements in Nuclear Instrumentation Measurement Methods and their Applications (ANIMMA) IEEE, (2015).
- [10] S. Jacobsson Svård, A. Hakansson, A. Backlin, P. Jansson, O. Osifo and C. Willman. Tomography for partial-defect verification: experiences from measurements using different devices, *ESARDA Bulletin*, 33(2006) 15–25.
- [11] G. Mckinney, J. Durkee, J. Hendricks, M. James and D. Pelowitz. MCNPX Users Manual, Version 2.7.0., LANL, Los Alamos, (2011).
- [12] Final safety Analysis Report for Bushehr NPP Unit1, Vol.4, Moscow, Atom Extroy Export, (2014).
- [13] G. Park, C.H. Kim, M.C. Han, S.H. Jung, J.B. Kim and J. Moon. Optimization of detection geometry for industrial SPECT by Monte Carlo simulations, *Journal of Instrumentation*, 8(04) (2013) C04006.
- [14] H.J. Choi, I.S. Kang, K.B. Kim, Y.H. Chung and C.H. Min. Optimization of single-photon emission computed tomography system for fast verification of spent fuel assembly: a Monte Carlo study, *Journal of Instrumentation*, 14(07) (2019) T07002.
- [15] S.M. Motevalli and A. Payani. Feasibility of gamma emission tomography for safeguard verification of fuel assemblies, *Radiation Effects and Defects in Solids*, 175(2020) 779–790.
- [16] S. Jacobsson Svård, S. Holcombe and 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 Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 783(2015) 128–141.
- [17] A.C. Kak and M. Slaney. Principles of computerized tomographic imaging, The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc, (1988).
- [18] G.T. Herman. Fundamentals of computerized tomography: image reconstruction from projections, Springer Science & Business Media, (2009).
- [19] L.-T. Chang. A method for attenuation correction in radionuclide computed tomography, *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 25(1) (1978) 638–643.
- [20] B.M. Tsui, H.B. Hu, D.R. Gilland and G.T. Gullberg. Implementation of simultaneous attenuation and detector response correction in SPECT, *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 35(1) (1988) 778–783.
- [21] A. Davour, S.S. Jacobsson and S. Grape. Image analysis methods for partial defect detection using tomographic images on nuclear fuel assemblies. in 37th annual ESARDA Symposium, Manchester, UK, (2015).
- [22] A. Davour, S.J. Svård, P. Andersson, S. Grape, S. Holcombe, P. Jansson and M. Troeng. Applying image analysis techniques to tomographic images of irradiated nuclear fuel assemblies, *Annals of Nuclear Energy*, 96(2016) 223–229.