

ارزیابی غیرمخرب میله‌های سوخت هسته‌ای با استفاده از روش پرتونگاری نوترونی در رآکتور تحقیقاتی تهران

محمدحسین چوپان دستجردی^۱، حسین خلفی^۱، یاسر کاسه‌ساز*^۱، امیر موافقی^۱، سید ابوطالب کرمانی^۲

۱. پژوهشکده رآکتور و ایمنی هسته‌ای، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی ایران، صندوق پستی: ۱۳۳۹-۱۴۱۵۵، تهران - ایران

۲. مرکز نظام ایمنی هسته‌ای ایران، سازمان انرژی اتمی ایران، صندوق پستی: ۸۳۶-۱۴۳۹۵، تهران - ایران

مقاله‌ی پژوهشی

تاریخ دریافت مقاله: ۹۷/۵/۱۴ تاریخ پذیرش مقاله: ۹۸/۱/۱۶

چکیده: سه میله‌ی سوخت هسته‌ای تازه که حاوی قرص‌هایی با غنای مختلف و ابعاد متفاوت در درون لوله‌های زیرکیمی بودند، در رآکتور تحقیقاتی تهران مورد آزمون پرتونگاری نوترونی قرار گرفتند. برای کسب اطلاعات ساختار داخلی میله‌های سوخت از دو روش متفاوت ثبت تصویر مبتنی بر استفاده از فیلم تک لایه‌ی پرتونگاری و صفحه‌ی تصویر فسفرسان استفاده شد. با استفاده از تصویرهای نوترونی حاصل از این آزمون، ارزیابی‌های کمی و کیفی میله‌های سوخت انجام شد. در ارزیابی کیفی تصویرها، اجزای داخلی میله‌های سوخت نظیر قرص‌ها، فنرها و درپوش‌های انتهایی به‌خوبی قابل مشاهده بودند. فیلم تک لایه‌ی پرتونگاری قدرت تفکیک مکانی بیش‌تری نسبت به صفحه‌ی تصویر داشت به‌گونه‌ای که جزئیات داخلی میله‌ها و فاصله‌های بین قرص‌ها با وضوح بیش‌تری قابل تشخیص بود. در ارزیابی کمی، ابعاد قرص‌ها و فاصله‌ی بین آن‌ها، و وابستگی سطح مقطع جذب به غنای قرص‌ها اندازه‌گیری و با اطلاعات ارایه شده توسط سازنده‌ی سوخت مقایسه شدند. این اطلاعات در توافق خوبی با یکدیگر بودند.

کلیدواژه‌ها: آزمون غیرمخرب، پرتونگاری نوترونی، سوخت هسته‌ای، رآکتور تحقیقاتی تهران

Non-destructive evaluation of nuclear fuel rods using neutron radiography at the Tehran Research Reactor

M.H. Choopan Dastjerdi¹, H. Khalafi¹, Y. Kasesaz*¹, A. Movafeghi¹, A. Kermani²

1. Reactor and Nuclear Safety Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute, AEOI, P.O.Box: 14155-1339, Tehran – Iran
 2. Iran Nuclear Regulatory Authority, AEOI, P.O.Box: 14395-836, Tehran - Iran

Abstract: Three fresh fuel rods containing pellets inside zirconium tubes with three different enrichments and different dimensions have been evaluated using neutron radiography examinations at the Tehran Research Reactor. To obtain the information of the internal structure of the fuel rods, two different imaging methods, based on using single coated radiography film and phosphorous imaging plate were applied. The quantitative and qualitative evaluations of the fuel rods have been made using neutronic images of these examinations. In the qualitative evaluation of the images, the internal components of the fuel rod, such as pellets, springs, and end plugs, were well visible. The single coated radiography film had a better spatial resolution rather than the image plate so that the internal details of the rods and the gaps between the pellets were clearly detectable. In the quantitative evaluation, the pellets dimensions, the gaps between pellets, and the dependence of the absorption cross-section with the pellets enrichment have been measured and compared with the manufacturer specifications. This information was in good agreement with each other.

Keywords: Non-destructive testing, Neutron radiography, Nuclear fuel, Tehran research reactor

*Email: ykasesaz@aeoi.org.ir

۱. مقدمه

آن اهمیت زیادی دارد. همان‌طور که پیش‌تر به آن اشاره شد، آزمون پرتونگاری نوترونی یکی از روش‌های مؤثر در این زمینه است.

چشمه‌ی نوترون، باریکه‌ساز و سیستم ثبت تصویر را می‌توان از الزام‌های اصلی هر سیستم پرتونگاری نوترون برشمرد [۱۴]. رآکتورهای هسته‌ای و شتاب‌دهنده‌ها از جمله‌ی چشمه‌های نوترونی هستند که به طور گسترده‌ای برای تولید نوترون سیستم‌های پرتونگاری نوترونی استفاده شده‌اند [۱۵-۱۷]. پرتونگاری نوترونی عمدتاً با نوترون‌های گرمایی انجام می‌شود [۱۴]. برای دستیابی به یک باریکه‌ی نوترونی مناسب برای پرتونگاری نوترونی، به جهت شار نوترونی، نسبت نوترون به گاما و میزان باریکه‌سازی، از باریکه‌ساز نوترونی استفاده می‌شود [۱۴]. سیستم‌های ثبت تصویر در پرتونگاری نوترونی شامل ترکیبی از مبدل‌های نوترون و صفحه‌های آشکارساز (فیلم پرتونگاری، سوسوزن و دیود نوری) است که انتخاب هر کدام از آن‌ها وابسته به در دسترس بودن آن‌ها، نوع کاربرد و هزینه است [۱۸]. فیلم‌های پرتونگاری نسبت به سایر صفحه‌های آشکارساز، از قدرت تفکیک مکانی بسیار بالاتری (۱۰-۲۰ μm) برخوردارند اما فرایند آماده‌سازی آن‌ها از جمله ظهور و ثبوت باعث طولانی‌شدن فرایند تهیه‌ی تصویر می‌شود [۱۹]. همچنین این فیلم‌ها بازه‌ی دینامیکی کوچکی دارند و در ارزیابی و سنجش کمی عنصرهای موجود در نمونه‌ی تحت آزمون کارایی زیادی ندارند [۱۹]. صفحه‌های تصویر^۳ فسفرسانی بازه‌ی دینامیکی گسترده‌تری نسبت به فیلم‌های پرتونگاری دارند و به دلیل این‌که پس از پرتودهی نیاز به عملیات ظهور و ثبوت ندارند و با روبش لیزری به صورت رقمی درمی‌آیند، سرعت بالاتری در تهیه‌ی تصویر دارند [۲۰]. به رغم این مزیت‌ها، قدرت تفکیک مکانی صفحه‌ی تصویر ($>50 \mu\text{m}$) نسبت به فیلم پرتونگاری پایین‌تر است [۲۰]. این مقاله برای ارزیابی کمی و کیفی میله‌های سوخت هسته‌ای از هر دو روش ثبت تصویر یعنی فیلم پرتونگاری و صفحه‌ی تصویر فسفرسان در ترکیب با مبدل گادولینیم استفاده می‌کند. برای انجام آزمون‌های پرتونگاری از باریکه‌ای که اخیراً در رآکتور تحقیقاتی تهران برای پرتونگاری نوترونی ایجاد شده استفاده شده است [۲۱].

پرتونگاری نوترونی^۱ یکی از روش‌های مؤثر آزمون غیرمخرب^۲ (NDT) در زمینه‌های مختلف ارزیابی و کنترل کیفیت مواد و تجهیزها به‌ویژه در صنایع هسته‌ای، هوا-فضا و میراث فرهنگی است [۱-۵]. میله‌های سوخت هسته‌ای باید با کیفیت بالایی تولید شوند زیرا پس از ورود به قلب رآکتور متحمل شرایط سختی نظیر نوسان‌های دمایی، تابش‌دهی نوترون و گاما و خوردگی در مجاورت آب و هیدروژن می‌شوند [۶]. برای اطمینان از کیفیت میله‌های سوخت پس از ساخته شدن، یعنی زمانی که قرص‌های سوخت درون غلاف قرار می‌گیرند و غلاف آب‌بندی می‌شود، از آزمون‌های غیرمخرب (نظیر آزمون فراصوتی، روبش گاما، پرتونگاری و جریان گردابی) استفاده می‌شود [۶]. یکی از روش‌های کنترل کیفیت غیرمخرب، پرتونگاری است [۷]. پرتونگاری نوترونی در مقایسه با پرتونگاری با پرتو ایکس، به دلیل نفوذ بسیار بالای نوترون‌های گرمایی درون اورانیم اکسید موجود در قرص‌های سوخت (ضریب تضعیف نوترون‌های گرمایی در اورانیم برابر 0.8 cm^{-1} است) و نفوذ کمتر پرتوهای ایکس در آن (ضریب تضعیف پرتوهای ایکس با انرژی 150 keV در اورانیم برابر 50 cm^{-1} است)، یکی از روش‌های بسیار مناسب بازرسی غیرمخرب سوخت‌های هسته‌ای است [۶، ۸، ۹]. نفوذ بالای نوترون‌ها اطلاعات ساختار داخلی قرص‌ها نظیر ترک‌های ماکروسکوپی و تغییرات حجم داخلی قرص را می‌تواند ارائه دهد [۵]. همچنین به دلیل تفاوت قابل‌ملاحظه در سطح مقطع برهم‌کنش ایزوتوپ‌های متفاوت اورانیم با نوترون‌های گرمایی (70.6 b) برای ^{235}U و ^{238}U [۱۰]) امکان تشخیص غنا نیز با این روش وجود دارد. اندازه‌گیری ابعاد قرص‌های درون میله‌های سوخت و فاصله‌ی بین آن‌ها نیز با استفاده از تصویرهای پرتونگاری نوترونی به صورت گسترده و موفقیت‌آمیزی انجام شده است [۱۱-۱۳].

با توجه به پیشرفت‌های بومی در زمینه‌ی تولید سوخت‌های هسته‌ای، انجام آزمون‌های غیرمخرب این سوخت‌ها پیش و پس از پرتودهی به منظور کنترل کیفیت و بررسی تغییرات آن‌ها ضروری است. اطلاعات حاصل از این آزمون‌ها از یک سو برای تولیدکنندگان سوخت و از سوی دیگر برای بهره‌برداران

1. Neutron radiography
2. Non-destructive testing

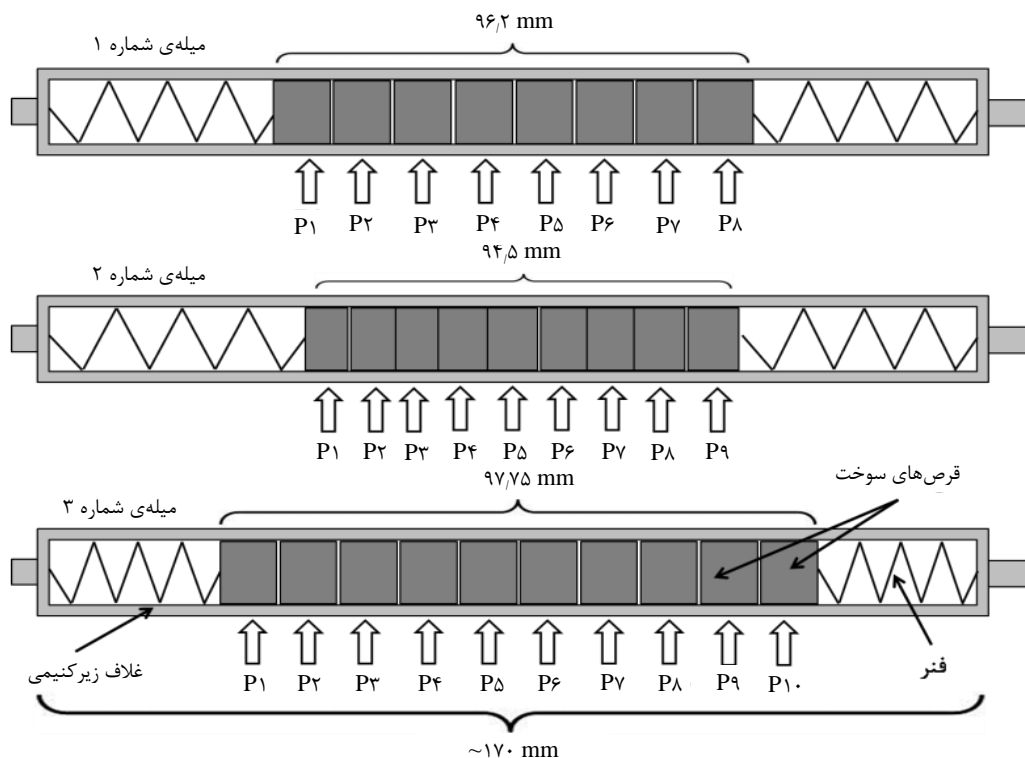
3. Image plate

۲. مواد و روش‌ها

۱.۲ میله‌های سوخت

برای انجام آزمون‌ها، سه نمونه میله‌ی سوخت هسته‌ای تازه با غناهای متفاوت ۱،۳۵٪، ۲،۵۹٪ و ۳،۳۵٪ درصد وزنی ^{235}U ، با قطر (داخلی و خارجی) برابر غلاف، اما با ارتفاع و قطر متفاوت قرص‌های سوخت در شرکت تولید سوخت هسته‌ای ساخته شدند. شکل و مشخصه‌های ابعادی و غنای این سه میله‌ی سوخت در شکل ۱ و جدول ۱ آورده شده است. همان‌طور که

از شکل ۱ پیدا است، طول فعال سوخت هر سه میله (یعنی مکانی که سوخت در آن قسمت وجود دارد) تقریباً با یک‌دیگر برابر است اما به دلیل متفاوت بودن ارتفاع قرص‌های سوخت، تعداد آن‌ها در هر میله متفاوت است. قرص‌های سوخت درون غلافی استوانه‌ای شکل از جنس زیرکونیم توسط فنرهایی که از یک سو با قرص‌ها و از سوی دیگر با درپوش‌های انتهایی در تماس است نصب شده‌اند.



شکل ۱. مقطع طولی سه میله‌ی سوخت ۱ تا ۳ از بالا به پایین.

جدول ۱. مشخصه‌های ابعادی قرص‌های سوخت درون سه میله‌ی سوخت

میل‌های سوخت شماره ۱ با غنای ۱،۳۵٪			میل‌های سوخت شماره ۲ با غنای ۲،۵۹٪			میل‌های سوخت شماره ۳ با غنای ۳،۳۵٪		
شماره‌ی قرص	قطر (mm)	ارتفاع (mm)	شماره‌ی قرص	قطر (mm)	ارتفاع (mm)	شماره‌ی قرص	قطر (mm)	ارتفاع (mm)
P1	۱۱،۶	۱۲،۱۵	P1	۱۱،۰۵	۱۰،۵	P1	۱۱،۸	۹،۹۵
P2	۱۱،۶	۱۱،۴	P2	۱۲،۲۵	۹،۸	P2	۱۱،۸۵	۹،۴۵
P3	۱۱،۶	۱۱،۴۵	P3	۱۱،۳	۱۱،۱۵	P3	۱۱،۸۵	۹،۵
P4	۱۱،۶۵	۱۱،۶۵	P4	۱۱،۱	۱۰،۳۵	P4	۱۱،۸۵	۹،۶
P5	۱۱،۶	۱۲،۱۵	P5	۱۱،۱۵	۱۰،۴۵	P5	۱۱،۹	۹،۶۵
P6	۱۱،۶	۱۲،۴۵	P6	۱۱	۱۰،۵۵	P6	۱۱،۸۵	۹،۷۵
P7	۱۱،۵۵	۱۲،۸	P7	۱۰،۹۵	۱۱	P7	۱۱،۸	۹،۹
P8	۱۱،۶	۱۲،۱۵	P8	۱۱	۱۱،۲	P8	۱۱،۸۵	۹،۹۵
-	-	-	P9	۱۱،۱	۱۰،۵	P9	۱۱،۸	۱۰،۰۵
-	-	-	-	-	-	P10	۱۱،۸	۹،۹۵

۲.۲ باریکه‌ی نوترونی

۱۰ μm است که بر روی یک لایه پلی‌اتیلن به ضخامت در حدود ۲۰۰ μm نشانده شده است. در اثر جذب الکترون‌های تبدیل داخلی گسیل شده از مبدل گادولینیم، نقره هالید به نقره فلزی کاهیده می‌شود و پس از اتمام پرتودهی و عملیات ظهور و ثبوت، تصویر نهایی بر روی فیلم تشکیل می‌شود. صفحه‌ی تصویر فسفرسان درون خود دارای فسفر و مواد گرمالیانی است و شبیه سوسوزن‌ها عمل می‌کند با این تفاوت که به جای یک گسیل نوری آبی، انرژی تابش فرودی در شبکه‌ی بلور ذخیره می‌شود و بعد از اتمام پرتودهی فسفر توسط یک محرک نوری (معمولاً توسط روبش لیزری) خوانده شده و تصویر تشکیل می‌شود [۲۵]. فیلم‌های پرتونگاری یک‌بار مصرف هستند اما صفحه‌های فسفرسان چندین هزار بار قابلیت استفاده دارند. همچنین خروجی صفحه‌های فسفرسان تصویرهای رقمی هستند در حالی که تصویرهای فیلم‌های پرتونگاری یک خروجی قیاسی دارند و برای تبدیل به شکل رقمی باید آن‌ها را با روبشگرهای عبوری رقمی نمود. صفحه‌های تصویر فسفرسان نسبت به فیلم‌های پرتونگاری دارای بازده بیشتر، محدوده‌ی دینامیکی گسترده‌تر هستند اما قدرت تفکیک مکانی به مراتب کم‌تری دارند [۲۰]. اطلاعات کمی و عددی صفحه‌ی تصویر، لومینسانس تابش - القا^۳ (PSL) و از آن فیلم پرتونگاری چگالی نوری^۴ (OD) نامیده می‌شود و متناسب با شدت نوترون‌های فرودی بر سطح صفحه‌ی تصویرگیری است [۲۵]. البته زمانی که طرح رقمی هر دو نوع تصویر مورد ارزیابی قرار می‌گیرد از پارامتر میزان خاکستری^۵ (GL) استفاده می‌شود که در تصاویر ۱۶ بیتی می‌تواند مقدارهایی از صفر (تاریک‌ترین پیکسل) تا ۶۵۵۳۶ (روشن‌ترین پیکسل) داشته باشد. برای دستیابی به مقادیر توصیه شده‌ی PSL و OD در فیلم پرتونگاری و صفحه‌ی تصویر فسفرسان، شدت نوترون تاییده شده به سطح آن‌ها باید در محدوده‌ی $10^8 - 10^9 \text{ cm}^{-2}$ باشد [۱۴]. با توجه به شار نوترونی موجود در سیستم پرتونگاری رآکتور تحقیقاتی تهران، زمان پرتودهی در حدود ۲ تا ۳ min انتخاب شد. محل پرتودهی میله‌ها (و فیلم) در فاصله‌ی ۳m از روزنه‌ی باریکه‌ساز بود که معادل با نسبت باریکه‌سازی ۱۵۰ است ($L/D = 150$).

پرتودهی میله‌های سوخت با استفاده از باریکه‌ی نوترونی پرتونگاری در رآکتور تحقیقاتی تهران انجام شد. رآکتور تحقیقاتی تهران با قدرت ۵ مگاوات از نوع استخری با کندساز (و خنک‌کننده‌ی آب سبک) و سوخت صفحه‌ای با غنای ۲۰ درصد وزنی ^{235}U است [۲۲]. اخیراً برای بهبود پارامترهای باریکه‌ی نوترونی سیستم پرتونگاری نوترونی در رآکتور تحقیقاتی تهران، یک باریکه‌ی نوترونی جدید نصب شده است [۲۱]. جدول ۲ مشخصات این باریکه‌ی نوترونی جدید را در مقایسه با سیستم قبلی و پارامترهای استاندارد مورد نیاز برای آزمون‌های پرتونگاری نوترونی فهرست می‌کند. بالاتر بودن شار نوترون و نسبت نوترون به گاما موجب کاهش زمان پرتودهی و افزایش میزان کنتراست تصویرها می‌شود [۱۸]. مدت زمان پرتودهی با توجه به شار نوترونی باریکه و نوع سیستم ثبت تصویر انتخاب می‌شود که در قسمت بعد توضیح داده شده است.

۳.۲ ثبت تصویرهای پرتونگاری نوترونی

از آنجایی که نوترون‌ها ذره‌های بدون بار هستند، برای آشکارسازی و تصویرگیری آن‌ها، معمولاً با استفاده از مبدل گادولینیم به ذره‌هایی چون الکترون که دارای قابلیت یونندگی مستقیم و آشکارسازی هستند تبدیل می‌شوند [۲۴]. گادولینیم طبیعی یکی از موادی است که به‌عنوان مبدل در پرتونگاری نوترونی استفاده می‌شود [۲۴]. گادولینیم سطح مقطع جذب بسیار بالایی برای جذب نوترون‌های گرمایی (۴۹۷۰۰b) دارد و با جذب نوترون گرمایی، با نسبت ۰/۵۹ الکترون‌های تبدیل داخلی با میانگین انرژی ۷۱ keV در خلاف جهت برخورد نوترون گسیل می‌کند [۲۴]. در این پژوهش از مبدل گادولینیم مطابق با استاندارد EY۴۸ انجمن آمریکایی آزمون و مواد^۱ که به صورت پوششی از گادولینیم با ضخامت ۲۵ μm بر روی لایه‌ای از آلومینیم بود، استفاد شد.

به منظور ثبت و تهیه‌ی تصویرهای پرتونگاری نوترونی از فیلم پرتونگاری تک لایه^۲ با دانه‌بندی ریز، محصول شرکت جنرال الکتریک و صفحه‌ی تصویر فسفرسان محصول شرکت کداک در ترکیب با مبدل گادولینیم استفاده شد. فیلم پرتونگاری به صورت لایه‌ای از نقره هالید با ضخامت در حدود

3. Photo stimulated luminescence

4. Optical density

5. Gray level

1. American Society of Testing and Materials (ASTM)

2. Single coated

جدول ۲. مشخصه‌های باریکه‌ی نوترونی سیستم پرتونگاری رآکتور تحقیقاتی تهران و مقایسه با مقدارهای استاندارد

پارامتر	باریکه‌ی نوترونی جدید [۲۱]	باریکه‌ی نوترونی قبلی [۲۳]	مقدارهای استاندارد توصیه شده [۱۴]
شار نوترون گرمایی در محل نمونه	$6.1 \times 10^6 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$	$4.1 \times 10^4 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$	$> 10^6 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$
نسبت نوترون به گاما (N/G)	$4.85 \times 10^5 \text{ cm}^{-2} \text{ mrem}^{-1}$	$1.2 \times 10^5 \text{ cm}^{-2} \text{ mrem}^{-1}$	$> 10^5 \text{ cm}^{-2} \text{ mrem}^{-1}$
نسبت باریکه‌سازی (L/D)	۲۵۰-۱۵۰	۱۴۰	> 100
درجه‌ی واگرایی (θ)	۲.۶۷	۲.۰۶	< 4

$$I = I_0 \exp - \left\{ \sum_{i=1}^{K_f} n_i \sigma_i t_i + \sum_{i=1}^{K_r} n_i \sigma_i t_r \right\} \quad (2)$$

$$I = I_0 \exp - (P_{fuel} + P_{clad}) \quad (3)$$

در این جا، I_0 شار نوترون فرودی، P_{fuel} و P_{clad} به ترتیب احتمال‌های برهم‌کنش نوترون با سوخت و غلاف هستند.

۳. یافته‌ها و بحث

۳.۱. ارزیابی کیفی

شکل ۴ پرتونگاره‌های فیلمی و صفحه‌ی تصویر فسفرسان را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل ۴ پیدا است پرتونگاره‌ی فیلمی حاصل قدرت تفکیک مکانی بهتری نسبت به صفحه‌ی تصویر فسفرسان دارد. به‌طور مثال، فاصله‌های بین قرص‌ها در پرتونگاره‌های فیلمی با وضوح بیش‌تری از صفحه‌ی تصویر فسفرسان قابل مشاهده‌اند. ساختار داخلی میله‌های سوخت و اجزای تشکیل‌دهنده‌ی آن‌ها از جمله قرص‌های سوخت، فنرها و درپوش‌های انتهایی قابل مشاهده‌اند. از پرتونگاره‌ها پیدا است که طول فنرها در میله‌های شماره‌ی ۲ و ۳ کم‌تر از حدی است که فاصله‌ی بین قرص P_1 و درپوش انتهایی را پر کند و این امر مطلوب نیست زیرا باعث می‌شود قرص‌ها به‌صورت هم‌راستا قرار نگیرند و درون میله‌ی سوخت نیز تغییر مکان دهند. به‌صورت کیفی می‌توان از روی پرتونگاره‌ها دریافت که شدت روشنایی قرص‌ها درون سه میله‌ی سوخت با یکدیگر متفاوت است به گونه‌ای که قرص‌های میله‌ی شماره‌ی ۳ روشن‌تر و قرص‌های میله‌ی شماره‌ی ۱ تیره‌تر از قرص‌های میله‌ی شماره‌ی ۲ هستند. مطابق با جدول ۱، غناهای میله‌های ۱، ۲ و ۳ به‌ترتیب برابر ۱،۳۵، ۲،۵۹ و ۳،۳۵ درصد وزنی ^{235}U است که این تفاوت غنا به‌صورت کیفی نیز در تصویر شکل ۴ قابل تشخیص است. هم‌چنین، به دلیل این‌که مرکز قرص‌ها بیش‌ترین ضخامت را در راستای نفوذ پرتوها دارند، مرکزهای قرص‌ها تیره‌تر هستند.

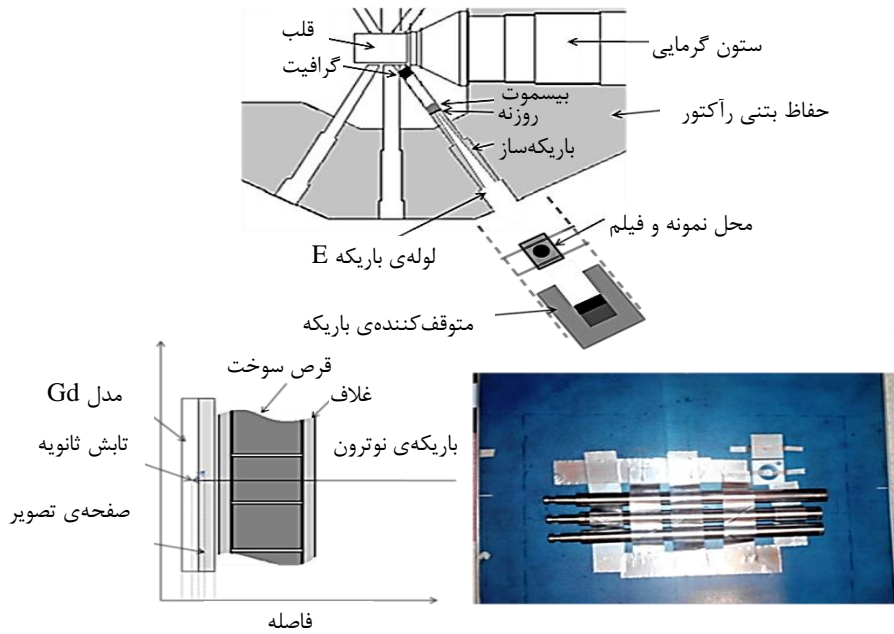
ترتیب آزمایشی مطابق شکل ۲ است که در آن فیلم پرتونگاری (و یا صفحه‌ی تصویر فسفرسان) و مبدل گادولینیم درون کاست مخصوص به‌گونه‌ای که مبدل در پشت فیلم تعبیه شده است قرار دارند. وجود فاصله بین میله‌های سوخت و صفحه‌ی تصویر باعث افزایش پراکندگی نوترون‌ها و کاهش قدرت تفکیک تصویر می‌شود [۶]، بنابراین برای کاهش پراکندگی نوترون‌ها، میله‌های سوخت در نزدیک‌ترین فاصله به فیلم (با چسباندن میله‌ها به سطح کاست توسط چسب آلومینیمی) ثابت و متصل شدند (شکل ۲).

۴.۲ روش پرتودهی مستقیم

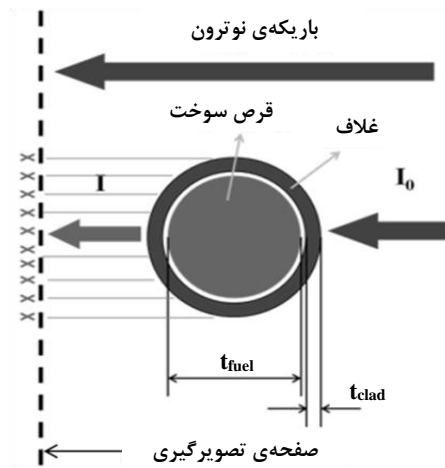
در روش پرتودهی مستقیم، که در این پژوهش مورد استفاده قرار گرفت، باریکه‌ی نوترونی از میان میله‌ی سوخت عبور کرده و به صفحه‌ی تصویرگیری می‌رسد. تضعیف باریکه‌ی نوترونی در میله‌ی سوخت به‌صورت تابعی از حاصل‌ضرب سطح مقطع کل ماکروسکوپی هسته‌های موجود در سوخت (و غلاف) در مسافتی که نوترون در این مواد می‌پیماید و یا به عبارتی احتمال برهم‌کنش نوترون‌های گرمایی است. کاهش شار توسط مواد موجود در قرص و غلاف یا به عبارتی احتمال برهم‌کنش نوترون P_{total} به‌صورت زیر است [۲۶]:

$$P_{total} = \sum_{i=1}^{K_f} n_i \sigma_i t_i + \sum_{i=1}^{K_r} n_i \sigma_i t_r \quad (1)$$

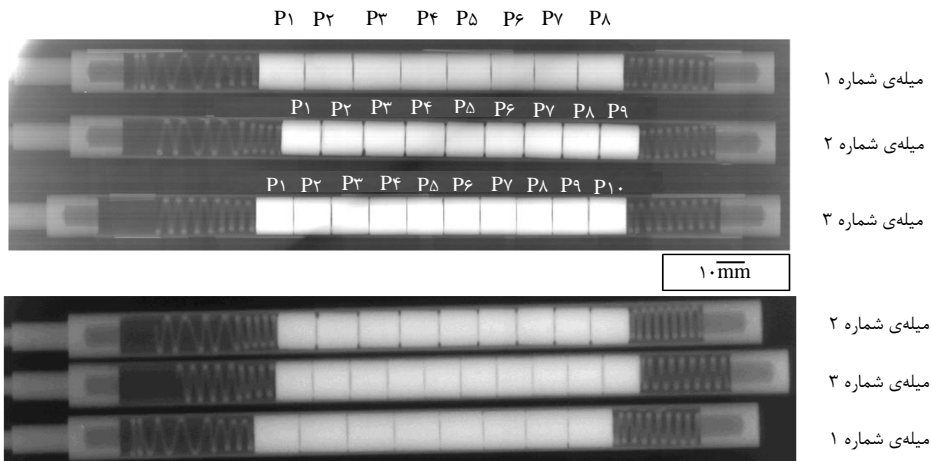
که در آن، n_i تعداد هسته‌های نوع i در یکای حجم (cm^{-3})، σ_i سطح مقطع کل میکروسکوپی هسته‌ی نوع i ، k_1 و k_2 به‌ترتیب تعداد هسته‌های موجود در سوخت و لوله‌ی غلاف و t_1 و t_2 به‌ترتیب مسافت‌هایی هستند که باریکه‌ی نوترونی در قرص و غلاف سوخت طی می‌کند که در ضخیم‌ترین قسمت قرص سوخت برابر با قطر قرص یعنی t_{fuel} است (شکل ۳). شدت باریکه‌ی نوترونی I که به فیلم (یا صفحه‌ی تصویر فسفرسان) می‌رسد را می‌توان چنین نوشت [۲۶].



شکل ۲. ترتیب آزمایشی پرتونگاری نوترونی سوخت هسته‌ای؛ بالا: چیدمان سیستم پرتونگاری نوترونی رآکتور تهران؛ پایین: میله‌های سوخت ثابت شده بر روی کاست (راست) و نحوه‌ی قرارگیری میله‌ی سوخت، مبدل و صفحه‌ی تصویر در مقابل باریکه‌ی نوترون (چپ).



شکل ۳. باریکه‌ی نوترونی با شدت I_0 به میله‌ی سوخت تابیده می‌شود و در اثر تضعیف با شدت I به صفحه‌ی تصویر و مبدل می‌رسد.



شکل ۴. پرتونگاره‌های نوترونی میله‌های سوخت؛ بالا) پرتونگاره‌ی فیلمی؛ پایین) تصویر حاصل از صفحه‌ی تصویر فسفرسان.

۲.۳ ارزیابی کمی

برای اندازه‌گیری قطر قرص‌های سوخت، نمایه‌ی خطی در جهت عمود بر راستای ارتفاع قرص‌ها انتخاب شد. شکل ۵، نمایه‌ی خطی را برای قرص شماره‌ی ۷ در هر سه میله‌ی سوخت نشان می‌دهد. این عمل را می‌توان برای تمام قرص‌ها نیز تکرار نمود. کم‌ترین مقدار شدت روشنایی در این ناحیه‌ها مربوط به مرکز قرص است زیرا در این ناحیه ضخامت قرص بیشینه است و بیش‌ترین تضعیف باریکه‌ی نوترونی در این ناحیه است. به‌رغم بیش‌تر بودن غنای ^{235}U در قرص میله‌ی سوخت شماره‌ی ۲ (۲/۵۹٪) نسبت به غنای ^{235}U در قرص میله‌ی سوخت شماره‌ی ۱ (۱/۳۵٪)، شدت روشنایی در مرکز قرص این دو میله یکسان است. دلیل این امر آن است که قطر قرص میله‌ی سوخت شماره‌ی ۲ (۱۰/۹۵ mm) کم‌تر از قطر قرص میله‌ی سوخت شماره‌ی ۱ (۱۱/۵۵ mm) است.

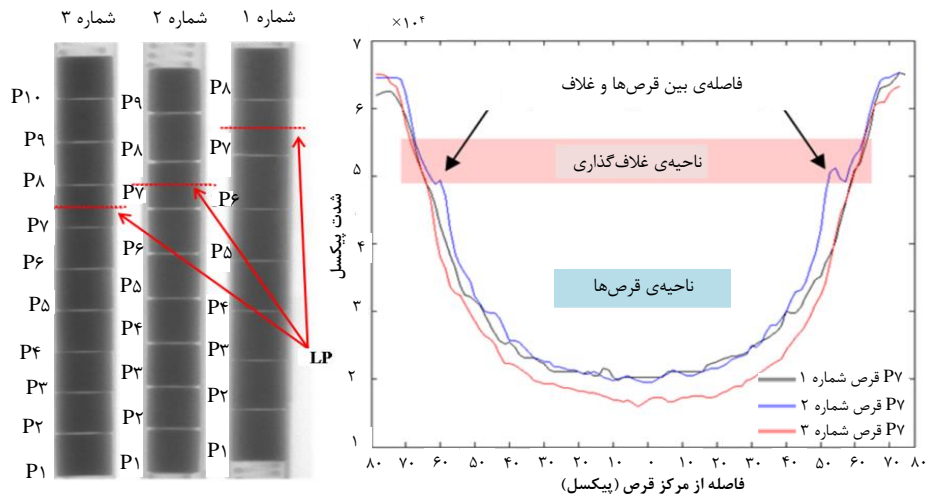
شکل ۶، نمایه‌ی خطی را برای ردیف قرص‌ها در میله‌ی سوخت شماره‌ی ۲ نشان می‌دهد. نمایه‌ی خطی در امتداد ردیف قرص‌ها در نظر گرفته شده است. در این راستا، نمایه‌ی خطی بر روی ضخیم‌ترین قسمت قرص‌ها (قطر آن‌ها) است. در این ناحیه از قرص، به‌دلیل بیش‌تر بودن ضخامت، بیش‌ترین میزان تضعیف روی می‌دهد و به‌همین دلیل است که مرکز قرص‌ها تیره‌تر است. قله‌های نمودار شکل ۶ فاصله‌ی بین قرص‌ها است یعنی جایی که ماده‌ی سوخت وجود ندارد و تضعیف کم‌تری روی می‌دهد. ارتفاع قرص‌های سوخت و فاصله‌ی بین قرص‌ها در میله‌ی سوخت شماره‌ی ۱ با استفاده از همین نمودار تعیین شده‌اند.

ارتفاع و قطر قرص‌های سوخت و فاصله‌ی بین آن‌ها برای میله‌های سوخت شماره‌ی ۱ و ۳ نیز با فرایند مشابه با میله‌ی سوخت شماره‌ی ۲ تعیین شده است و همه‌ی این اطلاعات در جدول ۳ فهرست شده است.

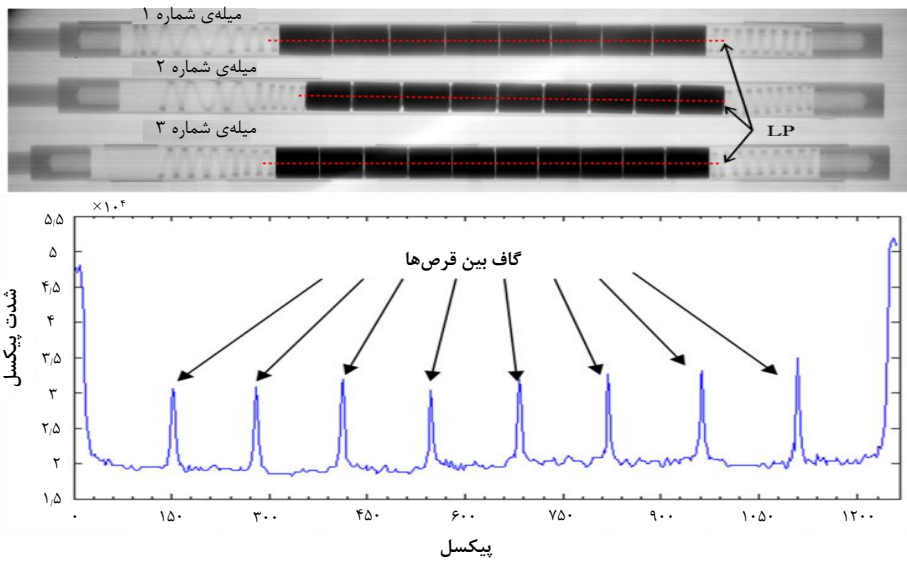
به‌منظور تعیین ابعاد قرص‌های سوخت و فاصله‌ی بین آن‌ها از روش استاندارد ای‌اِس‌تی ام-۱۴۹۶، که روش آزمون استاندارد برای اندازه‌گیری ابعاد نمونه با کمک پرتونگاشت نوترونی است [۲۷]، استفاده شد. این استاندارد، روش دستیابی به ابعاد نمونه‌ی تحت پرتونگاری به‌صورت کمی با استفاده از چگالی‌سنجی دقیق پرتونگاشت حاصله به ویژه در محدوده‌ی لبه‌ها است. روش کلی بر پایه‌ی شناسایی و اندازه‌گیری تغییرات چگالی پرتونگاشت مربوطه است که بر اثر تغییر در نوع یا ضخامت نمونه (هر نوع ناپیوستگی) در محل لبه به وجود می‌آید [۲۷]. این روش به‌دلیل حساسیت بالا، بر روی پرتونگاشت‌هایی جواب درست می‌دهد که باریکه‌های نوترونی برای تهیه‌ی آن‌ها به‌خوبی موازی شده باشند ($L/D > 100$).

همان‌طور که پیش‌تر به آن اشاره شد، برای اندازه‌گیری ابعادی، از فیلم پرتونگاری استفاده شد که پس از عملیات ظهور و ثبوت، توسط یک روبشگر فیلم اسکن‌میکر مدل ۹۸۰۰ ایکس‌اِل^۲ به شکل رقمی تبدیل شد. برای پردازش تصویرهای رقمی و استخراج اطلاعات پیکسل‌های تصویر از جعبه ابزار شناخته شده‌ی پردازش تصویر^۳ و تابع‌های تعریف شده در نرم‌افزار متلب^۴ استفاده شد. به‌عنوان مثال، به‌منظور استخراج مقادیرهای پیکسل‌های تصویر، یک نمایه‌ی (پروفایل) شدت به نام نمایه‌ی خطی^۵ (LP) تعریف می‌شود که در راستای یک مسیر به‌صورت یک خط قرار می‌گیرد و مقادیر پیکسل‌ها را نمایش می‌دهد. نمایه‌ی خطی یک روش آسان و کارآمد در آنالیز کمی اطلاعات تصویر است [۱۲]. مقادیرهای پیکسل‌ها در واقع شدت روشنایی (میزان خاکستری) تصویر در آن نقاط است که متناسب با میزان پرتوگیری فیلم (چگالی نوری و لومینسانس فوتون-القا) در آن نقطه است.

1. ASTM-E1496
2. ScanMaker 9800XL
3. Image processing toolbox
4. MATLAB
5. Line-profile



شکل ۵. رابطه بین شدت روشنایی در جهت عمود بر راستای ارتفاع قرص‌ها و فاصله از مرکز قرص.



شکل ۶. تغییرات شدت روشنایی در راستای ارتفاع ردیف قرص‌های سوخت میله‌ی شماره ۲.

جدول ۳. مقدارهای اندازه‌گیری شده‌ی ابعاد و فاصله‌ی بین قرص‌ها: فاصله‌ی بین قرص‌ها در ردیف بین دو قرص است به‌طور مثال فاصله بین قرص‌های P_1 و P_2 در میله‌ی شماره ۱ برابر با 0.3 mm و فاصله‌ی بین قرص‌های P_1 و P_2 در میله‌ی شماره ۲ برابر با 0.35 mm و ... است (یکای همه‌ی ابعاد mm است)

میله‌ی سوخت شماره ۱			میله‌ی سوخت شماره ۲			میله‌ی سوخت شماره ۳					
شماره‌ی قرص	قطر	ارتفاع	فاصله	شماره قرص	ارتفاع	قطر	فاصله	شماره قرص	ارتفاع	قطر	فاصله
P_1	۱۱،۶۲	۱۲،۱۶	۰،۳	P_1	۱۱،۰۲	۱۰،۴۸	۰،۴۳	P_1	۱۱،۸	۹،۹۳	۰،۴۷
P_2	۱۱،۶	۱۱،۴۲	۰،۳۶	P_2	۱۱،۲۴	۹،۸	۰،۳۹	P_2	۱۱،۸۲	۹،۴۸	۰،۳۵
P_3	۱۱،۶۳	۱۱،۴۸	۰،۲۸	P_3	۱۱،۲۷	۱۰،۱۶	۰،۴۱	P_3	۱۱،۸۳	۹،۴۷	۰،۲۹
P_4	۱۱،۶۴	۱۱،۶۸	۰،۳۲	P_4	۱۱،۰۸	۱۰،۳۷	۰،۳۲	P_4	۱۱،۸۲	۹،۶۱	۰،۲۴
P_5	۱۱،۶۲	۱۲،۱۶	۰،۳	P_5	۱۱،۱۶	۱۰،۴۲	۰،۳۹	P_5	۱۱،۸۷	۹،۶۴	۰،۳۶
P_6	۱۱،۶	۱۲،۴۸	۰،۲۸	P_6	۱۱	۱۰،۵۷	۰،۲۹	P_6	۱۱،۸۱	۹،۷۲	۰،۳۴
P_7	۱۱،۵۸	۱۲،۸	۰،۳۲	P_7	۱۰،۹۳	۱۱،۰۴	۰،۳۲	P_7	۱۱،۸۳	۹،۸۷	۰،۳
P_8	۱۱،۶	۱۲،۱۶	۰،۳۲	P_8	۱۱،۰۴	۱۱،۲	۰،۳۶	P_8	۱۱،۸۲	۹،۹۳	۰،۳۴
P_9	۱۱،۶	۱۱،۴۸	۰،۳۶	P_9	۱۱،۰۸	۱۰،۴۸	۰،۳۶	P_9	۱۱،۷۸	۱۰،۰۴	۰،۳۴
P_{10}	۱۱،۶	۱۱،۴۸	۰،۳۶	P_{10}	۱۱،۰۸	۱۰،۴۸	۰،۳۶	P_{10}	۱۱،۸۱	۹،۹۳	۰،۴۱

۴. نتیجه‌گیری

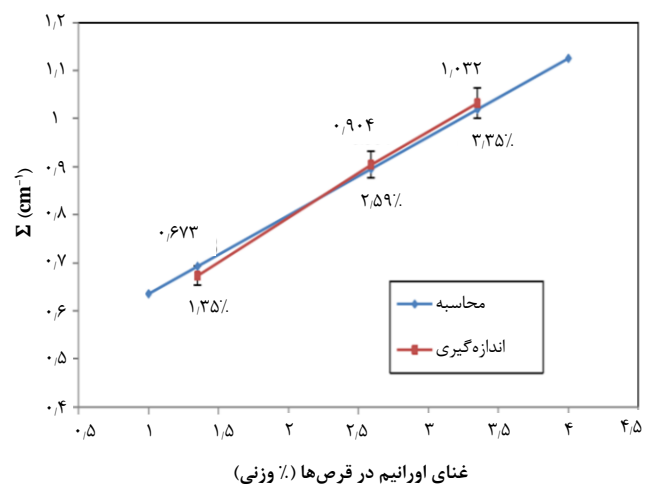
آزمون‌های غیرمخرب سوخت هسته‌ای از یک سو برای تولیدکنندگان سوخت و از سوی دیگر برای بهره‌برداران این سوخت‌ها اهمیت ویژه‌ای دارد. انجام این آزمون‌ها بر روی سوخت‌های تازه و پرتودیده (مصرف شده) برای کنترل کیفیت و صحت عملکرد آن‌ها انجام می‌شود. با توجه به تولید و بهره‌برداری سوخت‌های هسته‌ای در داخل کشور، انجام این آزمون‌ها بر روی سوخت‌های تولید داخل ضروری است. پرتونگاری نوترونی یکی از روش‌های مؤثر در ارزیابی غیرمخرب سوخت‌های هسته‌ای است. در کار حاضر، سه میله‌ی سوخت هسته‌ای تازه (پرتو ندیده) با ابعاد و غناهای متفاوت با استفاده از سیستم پرتونگاری نوترونی رآکتور تحقیقاتی تهران مورد ارزیابی قرار گرفتند. برای تهیه‌ی تصویرهای نوترونی میله‌های سوخت، از دو روش ثبت تصویر فیلم پرتونگاری و صفحه‌ی تصویرفوسفرسان استفاده شد. تصویرهای حاصل مورد ارزیابی کیفی و کمی قرار گرفتند. در ارزیابی کیفی تصویرهای میله‌ها، ساختار داخلی آن‌ها شامل فنرها، قرص‌ها، درپوش‌های انتهایی و همچنین فاصله‌های بین قرص‌ها با کیفیت بسیار خوبی قابل مشاهده بود. پرتونگارهای فیلمی قدرت تفکیک مکانی بهتری نسبت به صفحه‌ی تصویر فوسفرسان دارند. با ارزیابی کمی تصویرها، ابعاد قرص‌ها، فاصله‌ی بین قرص‌ها و حساسیت سیستم ثبت تصویر نسبت به غنای قرص‌ها تعیین شدند. نتیجه‌های اندازه‌گیری‌ها تطابق خوبی با مشخصه‌های سازنده‌ی سوخت داشت. علاوه بر آن، نتیجه‌های به دست آمده نشان داد که انجام آزمون پرتونگاری نوترونی با سیستم پرتونگاری نوترونی راه‌اندازی شده در رآکتور تحقیقاتی تهران عملاً امکان‌پذیر است. در آینده‌ای نزدیک امکان‌سنجی انجام آزمون‌های غیرمخرب سوخت‌های پرتودیده که در زمره‌ی آزمون‌های پساپرتودهی^۱ (PIE) هستند بررسی خواهد شد.

همان‌طور که در رابطه‌ی ۲ به آن اشاره شد، شدت باریکه‌ی نوترونی که به صفحه‌ی تصویرگیری می‌رسد تابع تعداد هسته‌های هر نوع از مواد داخل قرص سوخت است و فراوانی بیش‌تر ایزوتوپ‌های اورانیوم ۲۳۵ که همان غنا است موجب تضعیف بیش‌تر باریکه‌ی فرودی می‌شود. رابطه‌ی ۲ را می‌توان به شکل زیر که تنها برای سوخت تازه معتبر است بازنویسی کرد [۶]:

$$\Sigma_U = \ln(I_0 / I) / d_{fuel} \quad \text{و}$$

$$\Sigma_U = \sigma_{total}^{235U} n_{235U} + \sigma_{total}^{238U} n_{238U} \quad (۴)$$

که در آن I_0 و I شدت باریکه‌ی نوترونی در پشت و جلوی نمونه، d_{fuel} ضخامت قرص سوخت و n و σ به ترتیب تعداد هسته‌ها در یکای حجم و سطح مقطع میکروسکوپی است. سطح مقطع ماکروسکوپی Σ_U با استفاده از اطلاعات عددی تصویرهای مرکز قرص‌های سوخت (ذره‌های نمودار شکل ۵) در ضخیم‌ترین قسمت قرص‌ها (یعنی قطر آن‌ها)، اندازه‌گیری می‌شود. از سوی دیگر با معلوم بودن غنای قرص‌ها و استفاده از سطح مقطع‌های میکروسکوپی، Σ_U تعیین می‌شود و همان‌طور که در شکل ۷ نشان داده شده است این مقدارها با یک‌دیگر مقایسه شده‌اند. منحنی ۷ در واقع یک منحنی درجه‌بندی تعیین غنا با استفاده از صفحه‌ی تصویر است.



شکل ۷. منحنی درجه‌بندی غنای اورانیوم ۲۳۵ با استفاده از مقدارهای نسبت شدت روشنایی تصویر قرص‌های سوخت. داده‌های سطح مقطع ماکروسکوپی به دست آمده با هر دو روش محاسباتی (سطح مقطع ماکروسکوپی) و اندازه‌گیری (نسبت شدت روشنایی) توافق خوبی با یک‌دیگر دارند.

1. International Atomic Energy Agency, TecDOC-1604, *Neutron Imaging: A Non-Destructive Tool for Materials Testing*, Report of the coordinated research project, (IAEA, Vienna, 2008).
2. J. Thornoton, *Enhanced radiography for aircraft materials and components*, Eng. Failure Anal. **11**, 207 (2004).
3. N. Takenaka, et al. In: *Proceedings of the Sixth World Conference of Neutron Radiology*; - Application of Neutron Radiology to Thermal Hydraulic Phenomena (Gordon and Beach Science Publishers, Switzerland, 2001), 503-506 (2001).
4. E.H. Lehmann, S. Hartmann, M.O. Speidel, *Investigation of the content of ancient Tibetan metallic Buddha statues by means of neutron imaging methods*, Archaeometry. **52** (3), 416 (2010).
5. J. Bakker, et al. In: *Proceedings of the 2nd World Conference on Neutron Radiography*; -Neutron radiography of light water fuel rods, (Springer, Paris, 1986) 381-393 (1986).
6. E.H. Lehmann, P. Vontobel, A. Hermann, *Non-destructive analysis of nuclear fuel by means of thermal and cold neutrons*, Nucl. Inst. and Meth. in Phys. Research A. **515**, 745 (2003).
7. P. Von der Hardt, Rottger H., editors, *Neutron radiography handbook*, (D. Reidel Publishing Co., Dordrecht/Boston/London. 1981).
8. A. Alghem, et al., In: *17th World Conference on Nondestructive Testing, NDT As a Tool for Post-Irradiation Examination*, (NDT, Shangai, 2008) 1-6 (2008).
9. M. Helen, et al., *The use of ionizing radiation to image nuclear fuel: A review*, Prog. in Nucl. Ener., **85**, 297 (2015).
10. *Table of simple integral neutron cross-section data*, JEFReport 14, (OECD, Japan, 1994).
11. J.C. Domanus, *Reference Neutron Radiographs of Nuclear Reactor Fuel*, (D. Reidel, Dordrecht, 1984).
12. M. Basturk, H. Tatlisu, H. Bock, *Nondestructive inspection of fresh WWER-440 fuel assemblies*, J. of Nucl. Mater. **350**, 240 (2006).
13. U.K. Chaudhary, M. Iqbal, M. Ahmad, *Defect sizing of post-irradiated nuclear fuels using grayscale thresholding in their radiographic images*, Nucl. Eng. and Des. **240**, 3455 (2010).
14. J.F.W. Markgraf, *Collimators for Thermal Neutron Radiography*, (D. Reidel, Dordrecht, 1987).
15. M. Dinca, M. Pavelescu, C. Iorgulis, *Collimated neutron beam for neutron radiography*, Rom. J. Phys **51**, 435 (2006).
16. D.S. Hussey, et al., *New neutron imaging facility at the NIST*. Nucl. Inst. and Meth. in Phys. Res. A. **542**, 1 (2005).
17. E.H. Lehmann, H. Pleinert, L. Wiesel, *Design of a neutron radiography facility at the spallation source SINQ*. Nucl. Inst. and Meth. in Phys. Res. A. **377**, 14 (1996).
18. G.M. MacGillivray, J.S. Brenizer, *Neutron Radiography System Design and Characterization*, (AECL Res, Chalk River, 1994).
19. R. Yasuda, et al., *Application of Neutron Imaging Plate and Neutron CT Methods on Nuclear Fuel and Materials*, IEEE Trans. On Nucl. Sci. **52**, 1, (2005).
20. N. Chankow, S. Punnachiya, S. Wonglee, *Neutron radiography using neutron imaging plate*, App. Rad. and Iso. **68**, 662 (2010).
21. M.H. Choopan Dastjerdi, et al., *Design, construction and characterization of a new neutron beam for neutron radiography at the Tehran Research Reactor*. Nucl. Inst. and Meth. in Phys. Res. A. **818**, 1 (2016).
22. *Safety Analysis Report of Tehran Research Reactor*, (Atomic Energy Organization of Iran, Tehran, 2009).
23. K.K. Moghadam, A. Tabatabaeian, In: *Proceedings of the 2nd World Conference on Neutron Radiography*; -Neutron Radiography facility for AEOI nuclear research center, (Springer, Paris, 1986) 25-32 (1986).
24. P. Kandlakunta, L.R. Caon, P. Mulligan, *Measurement of internal conversion electrons from Gd neutron capture*, Nucl. Inst. and Meth. in Phys. Res. A. **705**, 36 (2013).
25. S. Fujine, et al., *Application of imaging plate neutron detector to neutron radiography*, Nucl. Inst. and Meth. in Phys. Res. A. **424**, 200 (1999).
26. A.A. Harms, D.R. Wyman, *Mathematics and Physics of Neutron Radiography*, (D. Reidel Publishing Co., Dordrecht, Holland 1986).
27. American Standard and Testing Materials, *Standard Test Method for Neutron Radiographic Dimensional Measurements*. ASTM Standard E1469-97, (ASTM International, USA, 1997).