



مقطع‌نگاری کامپیوتری نوترونی از میله سوخت تابش‌ندیده

احسان ناظمی^۱، امیر موافقی*^۱، بهروز رکرک^۱، مارین دینکا^۲، محمد حسین چوپان دستجردی^۱
۱. پژوهشکده راکتور و ایمنی هسته‌ای، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، صندوق پستی: ۱۳۳۹-۱۴۱۵۵، تهران - ایران
۲. مؤسسه تحقیقات هسته‌ای، میوونی - رومانی
*Email: amovafeghi@aeoi.org.ir

مقاله‌ی پژوهشی

تاریخ دریافت مقاله: ۹۸/۱۱/۲۱ تاریخ پذیرش مقاله: ۹۹/۴/۴

چکیده

به دلیل شرایط ویژه و پرتلاطم محل قرارگیری سوخت در قلب راکتورهای هسته‌ای، بازرسی و کنترل کیفی سوخت تابش‌ندیده پس از تولید در کارخانه و قبل از بارگذاری در قلب راکتور امری ضروری است. این فرایند با استفاده از آزمون‌های غیرمخرب متعددی صورت می‌پذیرد. به طور کلی، رادیوگرافی نوترونی یکی از مهم‌ترین ابزارها برای آزمون غیرمخرب سوخت تابش‌ندیده به شمار می‌رود. در این پژوهش، مقطع‌نگاری کامپیوتری نوترونی از یک میله سوخت تهیه شده از ایزوتوپ اورانیوم ۲۳۵ مربوط به راکتور TRIGA با استفاده از یک سیستم آشکارسازی دیجیتال مشتمل بر صفحه سوسوزن، آینه و دوربین CCD بررسی شده است. آزمایش‌های مربوطه در سامانه رادیوگرافی نوترون INUS انجام گرفته است. نتایج نشان می‌دهند که با استفاده از مقطع‌نگاری کامپیوتری نوترونی، ساختار و اجزای داخلی میله سوخت، مانند قرص‌ها و فنر، به خوبی قابل مشاهده بوده و می‌توان از این روش برای بررسی دقیق ساختار میله‌های سوخت پس از تولید در کارخانه استفاده نمود.

کلیدواژه‌ها: مقطع‌نگاری کامپیوتری نوترونی، میله سوخت، آزمون غیرمخرب، رادیوگرافی، راکتور TRIGA

Neutron Computerized Tomography (CT) of the non-irradiated fuel rod

E. Nazemi¹, A. Movafeghi*¹, B. Rokrok¹, M. Dinca², M.H. Choopan Dastjerdi¹

1. Reactor and Nuclear Safety Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute, P.O.Box: 14155-1339, Tehran - Iran

2. Institute for Nuclear Research (INR), Mioveni -Romania

Research Article

Received 10.2.2020, Accepted 24.6.2020

Abstract

Due to the special and difficult conditions for the fuel rods inside the reactor core, inspection and quality control of the fuel after the production at the factory and before loading in the core of the reactor is essential. This process is carried out using various non-destructive tests. Generally, neutron radiography is one of the most important non-destructive tools for fresh fuel inspection. In the present work, neutron computerized tomography (CT) of a depleted TRIGA fuel rod is investigated using a digital detection system which includes a scintillator screen, a mirror, and a CCD camera. The experiments were performed in the INUS neutron radiography facility. The results show that the structure and components of the fuel rod such, as pellets and springs, are well visible by using the neutron tomography technique and it can be utilized for precise investigation of the fuel rod's structure after production at the factory.

Keywords: Neutron CT, Fuel rod, Non-destructive test, Radiography, TRIGA reactor



۱. مقدمه

سوخت رآکتورهای هسته‌ای به مدت طولانی در قلب رآکتور و محیط زیر آب تحت شرایط ویژه و دشواری نظیر چگالی قدرت بالا، نوسانات دمایی، فشار و تابش مورد استفاده قرار می‌گیرند. تحت این شرایط، چنانچه سوخت‌ها به صورت استاندارد و با کیفیت بالا ساخته و آزموده نشده باشند، ممکن است در اثر سازوکارهایی هم‌چون سایش شبکه به میله، فرسایش رسوبی، خوردگی، برهم‌کنش قرص با غلاف و هیدراته شدن در حین فعالیت رآکتور دچار آسیب و نقص عملکرد شده و موجب اختلال در عملکرد رآکتور و انتشار مواد رادیواکتیو نظیر پاره‌های شکافت به بیرون از عنصر سوخت گردند. بنابراین سوخت‌ها باید در حین تولید، پس از تولید و پیش از ورود به قلب رآکتور و حتی در زمان مصرف سوخت و نهایتاً در زمانی که موعد پسمانداری آن‌ها فرا می‌رسد، مورد آزمون‌های متعدد استاندارد جهت حصول اطمینان از صحت عملکرد، کیفیت، وضعیت فیزیکی و ساختاری آن‌ها و... قرار گیرند [۱]. روش‌هایی که برای ارزیابی سوخت‌های هسته‌ای مورد استفاده قرار می‌گیرد به دو صورت مخرب و غیرمخرب هستند. روش مخرب، همان‌طور که از نامش پیداست، باعث تخریب سوخت می‌شود و تنها زمانی مورد استفاده قرار می‌گیرد که پس از ارزیابی دیگر نیازی به استفاده‌ی مجدد سوخت نباشد. در آزمون غیرمخرب به سوخت آسیبی وارد نمی‌شود و در عملکرد آتی آن تأثیری نخواهد داشت. برای ارزیابی غیرمخرب میله‌های سوخت از آزمون‌های فراصوتی، جریان‌گردابی و رادیوگرافی استفاده می‌گردد که در این میان، آزمون رادیوگرافی نسبت به سایر روش‌ها دارای کاربرد بیشتری بوده و خود نیز به دو روش رادیوگرافی فوتون و نوترون تقسیم‌بندی می‌گردد.

در سال‌های اخیر پژوهش‌های متعددی در زمینه رادیوگرافی نوترون و فوتون از سوخت‌های هسته‌ای صورت گرفته است که نشان از اهمیت این موضوع دارد. در سال ۲۰۰۳، Casalta و همکاران از پرتو ایکس و نوترون به همراه تکنیک تصویربرداری دیجیتال برای تست دو میله سوخت استفاده کردند [۲]. در این کار از رادیوگرافی ایکس برای سوخت پرتو ندیده و از رادیوگرافی نوترونی برای سوخت پرتودیده در دو بازه زمانی مختلف استفاده شده است. نتایج رادیوگرافی نوترونی سوخت نشان می‌دهد عناصر داخلی میله سوخت پس از پرتو دهی مقداری جابه‌جا شده‌اند. هم‌چنین نتایج به دست آمده نشان می‌دهد قطر داخلی غلاف پس از پرتو دهی حدود ۸٪ افزایش داشته است. در سال ۲۰۰۳، Lehmann و همکاران با استفاده از نوترون‌های حرارتی و سرد به مطالعه میله‌های سوخت و عیوب مربوطه آن‌ها پرداختند [۱]. آن‌ها از تأسیسات رادیوگرافی NEUTRA واقع در کشور

سوئیس برای انجام آزمایش‌های خود استفاده کردند. در این مرکز از یک شتاب‌دهنده پروتونی برای تولید باریکه نوترونی پالسی جهت رادیوگرافی نوترونی استفاده می‌شود. در بخش اول این مطالعه، ابتدا از دو میله سوخت تابش‌دیده که دارای عیوب مختلف هستند، تصویربرداری شده است. در تصاویر به دست آمده از این دو میله، ترک موجود در یکی از قرص‌ها و هم‌چنین لب‌پریدگی یکی از قرص‌ها مشاهده شد. در بخش دوم، توزیع و مقدار هیدروژن تجمع یافته در داخل غلاف یک میله سوخت با استفاده از روابط تئوری و رادیوگرافی نوترونی محاسبه و اندازه‌گیری شده است. در بخش سوم، به کمک روش مقطع‌نگاری کامپیوتری نوترونی از یک سوخت کروی رآکتور Pebble bed با قطر ۶۰ mm که دارای حدود ۸۵۰۰ ذره ^{235}U با غنای کم می‌باشد، تصویربرداری شده است. آنالیز تصاویر سه‌بعدی به دست آمده نشان می‌دهد که تعداد ذرات سوخت حدود ۸۵۰۰ است که با اطلاعات سازنده این سوخت‌ها دارای تطابق خوبی می‌باشد. در سال ۲۰۰۵، Yasuda و همکاران با استفاده از روش رادیوگرافی نوترونی و ایکس موفق به تصویربرداری از یک میله سوخت کالیبراسیون تابش‌ندیده شدند [۳]. برای رادیوگرافی نوترونی از رآکتور تحقیقاتی ژاپن و برای رادیوگرافی ایکس از تیوب پرتو ایکس با ولتاژ ۱۵۰ kV و جریان ۲۵۰ mA به مدت ۱ ثانیه استفاده گردیده است. آن‌ها از یک میله سوخت کالیبراسیون با ویژگی‌های خاص به منظور مقایسه بهتر روش‌ها استفاده نمودند. این میله سوخت دارای ۷ قرص سوخت غنی‌شده توخالی با ابعاد متفاوت و دو قرص سوخت با غنای طبیعی و توپر می‌باشد. آن‌ها نشان دادند در تصویر به دست آمده از روش رادیوگرافی نوترونی جزئیات بیشتری مانند نقاط توخالی داخل قرص‌های غنی‌شده، تفاوت بین اندازه قرص‌ها، فاصله بین قرص‌ها و غلاف و فاصله بین قرص‌ها با یک‌دیگر قابل مشاهده می‌باشد. در سال ۲۰۱۶، دستجردی و همکاران با راه‌اندازی یک سیستم رادیوگرافی نوترونی جدید در رآکتور تحقیقاتی تهران [۴] موفق شدند سه نمونه میله سوخت تابش‌ندیده با غنای مختلف و قرص‌های سوخت با ابعاد متفاوت را با استفاده از روش رادیوگرافی نوترونی و فیلم معمولی مورد آزمون کمی و کیفی قرار دادند [۵]. پرتونگاشت‌های نوترونی حاصل، ساختار و اجزاء داخلی میله‌ها شامل فنرها، قرص‌ها، درپوش‌های انتهایی و هم‌چنین فواصل بین قرص‌ها را به خوبی نشان داد. در این کار، اطلاعاتی نظیر توزیع غنا در قرص‌ها و هم‌راستایی آن‌ها درون غلاف با استفاده از پردازش پرتونگاشت‌های نوترونی نیز استخراج گردیده است.

به‌طور کلی هر یک از دو روش رادیوگرافی نوترون و فوتون دارای مزایا و معایب خاص خود برای تست سوخت‌های



دقیق اجزای داخلی جسم و همچنین شکل و اندازه آن‌ها می‌باشد.

۲. مواد و روش‌ها

۱.۲ معرفی سامانه رادیوگرافی نوترون

آزمایش‌های تجربی در این مقاله در سامانه رادیوگرافی نوترون INUS^۲- واقع در رآکتور مؤسسه تحقیقات هسته‌ای کشور رومانی صورت گرفته است. این رآکتور تحقیقاتی از نوع تریگا^۳ و دارای توان ۵۰۰ kW در شرایط پایدار و ۲۰۰۰۰ MW در حالت پالسی می‌باشد. سامانه رادیوگرافی نوترون INUS شامل چهار قسمت اصلی موازی‌ساز، میز چرخان، سیستم آشکارسازی و سیستم کامپیوتر جهت کنترل تجهیزات و پردازش و بازسازی تصاویر می‌باشد که در ادامه هر یک به اختصار توضیح داده می‌شوند [۶-۷].

۱.۱.۲ موازی‌ساز

موازی‌ساز موجود در سامانه INUS به صورت واگرا و در چهار بخش مجزا طراحی و نصب گردیده است و هدف عمده آن یکسو کردن پرتوها در جهت درجه خروجی لوله باریکه^۴ می‌باشد. مطابق طرح‌واره‌ای که در شکل ۱ نشان داده شده است، این موازی‌ساز در یکی از لوله باریکه‌های رآکتور که مماس بر قلب و در فاصله ۵۰ cm از آن قرار دارد، جای گرفته است. این موازی‌ساز دارای یک روزنه به قطر ۴٫۵ cm می‌باشد که در فاصله ۱۵۵٫۵ cm از منور^۵ گرافیتی قرار گرفته است. در داخل این موازی‌ساز حلقه‌هایی از جنس پلی‌اتیلن، سرب و بورال^۶ با ابعاد مختلف قرار داده شده که وظیفه آن‌ها به ترتیب کندسازی نوترون‌های سریع، حذف پرتوهای گاما و نوترون‌های حرارتی می‌باشد که در خارج از مسیر اصلی باریکه حرکت می‌کنند [۶]. مشخصات هندسی موازی‌ساز و همچنین مشخصات باریکه خروجی از آن در جدول ۱ گزارش شده است.

جدول ۱. مشخصات هندسی موازی‌ساز و مشخصات باریکه خروجی از آن

مقدار	مشخصه
۳٫۳۴°	زاویه واگرایی موازی‌ساز
۳٫۹۷°	زاویه واگرایی باریکه در محل قرارگیری نمونه
۴٫۵ cm	قطر روزنه
۹۳٫۳۶	نسبت موازی‌سازی (L/D)
۲۸٫۸ cm	قطر باریکه در محل قرارگیری نمونه
7.2×10^{-4} n.s.cm ^۲	شار نوترون حرارتی خروجی از موازی‌ساز با قطعه بیسموت
۹۴۰ μSv/h	دز پرتو گاما خروجی از موازی‌ساز با قطعه بیسموت
1.2×10^{-5} n.s.cm ^۲	شار نوترون حرارتی خروجی از موازی‌ساز بدون قطعه
۷۴۰ mSv/h	دز پرتو گاما خروجی از موازی‌ساز بدون قطعه

هسته‌ای می‌باشند. به‌عنوان مثال ویژگی مهم رادیوگرافی فوتونی قابلیت حمل آسان منبع تابشی (که معمولاً یک تیوب پرتو ایکس ولتاژ بالا می‌باشد) و همچنین تست برخط سوخت حین تولید در کارخانه می‌باشد؛ در حالی که چنین قابلیت‌هایی در رادیوگرافی نوترون، که معمولاً منبع تابشی آن رآکتورهای تحقیقاتی می‌باشند، وجود ندارد. از طرفی رادیوگرافی نوترون دارای برتری‌های بالقوه‌ای نسبت به رادیوگرافی فوتون می‌باشد که در این جا به برخی از آن‌ها اشاره می‌گردد [۱]: ۱) ضریب تضعیف نوترون حرارتی برای اورانیم طبیعی از مرتبه 0.18 cm^{-1} است در حالی که برای پرتوهای ایکس با انرژی ۱۵۰ keV، این ضریب از مرتبه 50 cm^{-1} است که نشان‌دهنده قابلیت بالای نفوذ نوترون در سوخت و در نتیجه مشاهده جزییات بیشتر داخل قرص سوخت می‌باشد. ۲) سطح مقطع برهم‌کنش نوترون با ماده بر خلاف فوتون به نوع ایزوتوپ نیز وابسته است. در حالی که رادیوگرافی فوتون نمی‌تواند هیچ تمایزی بین ایزوتوپ ۲۳۵ و ۲۳۸ اورانیم قائل شود، رادیوگرافی نوترون می‌تواند ۶۰ مرتبه بهتر ایزوتوپ ۲۳۵ را از ۲۳۸ تشخیص دهد. این توانایی باعث می‌شود که بتوان غنای سوخت و همچنین نحوه توزیع ایزوتوپ ۲۳۵ در سوخت را به‌خوبی مشاهده کرد.

در رادیوگرافی علاوه بر نوع پرتو، روش ثبت پرتو نیز مهم است. روش‌های ثبت پرتو در رادیوگرافی فوتونی به دو دسته رادیوگرافی با فیلم معمولی و دیجیتال تقسیم‌بندی می‌شوند که مورد دوم خود نیز شامل رادیوگرافی کامپیوتری و رادیوگرافی مستقیم می‌باشد. روش‌های ثبت پرتو در رادیوگرافی نوترونی نیز به دو دسته عمده تأخیری و آنی تقسیم‌بندی می‌شوند. دسته اول شامل سه روش مستقیم (فیلم رادیوگرافی فوتونی معمولی همراه با یک مبدل نوترون به فوتون یا الکترون)، انتقالی و حک ردپای ذرات و دسته دوم شامل دو روش ترکیب صفحه سوسوزن با دوربین CCD^۱ و صفحات تصویربرداری می‌باشد.

در این پژوهش، مقطع‌نگاری کامپیوتری نوترونی از یک میله سوخت تابش‌نندیده که سوخت اورانیم آن از ایزوتوپ ۲۳۵ تهی شده است، با استفاده از روش ثبت پرتو ترکیب صفحه سوسوزن با دوربین CCD بررسی می‌گردد. همان‌طور که اشاره گردید، در مطالعات پیشین عمدتاً از رادیوگرافی معمولی (تصویربرداری دوبعدی) برای تصویربرداری میله‌های سوخت استفاده شده است، در حالی که در این کار از روش مقطع‌نگاری کامپیوتری نوترونی (تصویربرداری سه‌بعدی) برای تصویربرداری یک میله سوخت استفاده خواهد شد. برتری عمده مقطع‌نگاری کامپیوتری نسبت به رادیوگرافی معمولی، امکان مشاهده محل

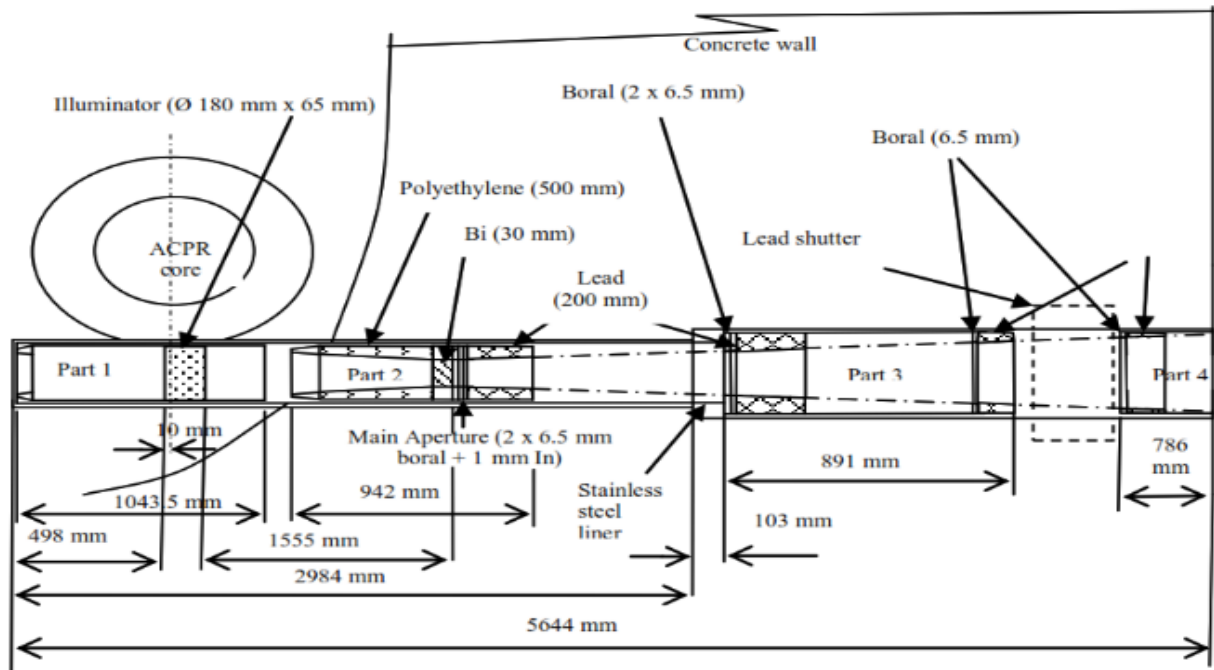
1. Charge-Coupled Device

مجله علوم و فنون هسته‌ای

جلد ۹۴، شماره ۴، زمستان ۱۳۹۹، ص ۵۵-۶۴



2. Instalatie de Neutronografie UScata (INUS)
 3. Training, Research, Isotopes, General Atomics (TRIGA)
 4. Beam Tube
 5. Illuminator
 6. Boron Carbide (B4C)+Aluminum
 Journal of Nuclear Science and Technology
 Vol. 94, No 4, 2021, P 55-64



شکل ۱. طرحواره موازی‌ساز موجود در سامانه رادیوگرافی INUS [۶].

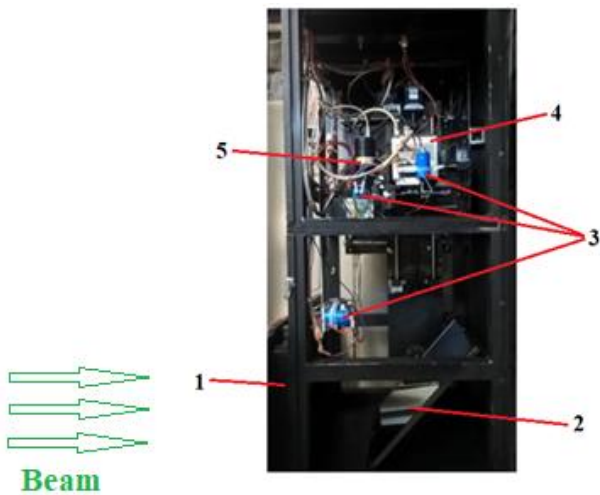
۲.۱.۲ میز چرخان

میز چرخان موجود در این سامانه دارای قابلیت چرخش در ۳۶۰ درجه با گام حداقل ۰/۴۵ درجه، تحمل وزن ۲۰۰ kg، حرکت ۶۰ cm در جهت طولی و ۱۹ cm در جهت عمودی می‌باشد.

۳.۱.۲ سیستم آشکارسازی

سیستم آشکارسازی متشکل از دو صفحه سوسوزنی، یک آینه و دو دوربین CCD به همراه لنز نوری است که همگی در یک جعبه تاریک آلومینیمی که قابلیت جابه‌جایی نیز دارد، قرار داده شده‌اند. سیستم آشکارسازی در شکل ۲ نمایش داده شده است.

یکی از صفحات سوسوزنی از جنس $LiF-ZnS:Cu$ با ضخامت ۰/۳ mm و دیگری از جنس $Gd_2O_3S:Tb$ با ضخامت ۰/۱۲ mm می‌باشد. ابعاد دو صفحه با یکدیگر یکسان و برابر با 30×30 cm^۲ می‌باشد. برای محافظت از صفحات، یک ورقه آلومینیمی با ضخامت ۱ mm مقابل آن‌ها قرار داده شده است. تصویر دو صفحه سوسوزن در شکل ۳ نشان داده شده است. این صفحات به یک موتور پله‌ای^۱ متصل می‌باشند که امکان جابه‌جایی آن‌ها را فراهم نموده و می‌توان متناسب با نوع آزمایش، هریک از آن‌ها را به‌راحتی انتخاب نمود.



Beam

شکل ۲. سیستم آشکارسازی موجود در سامانه رادیوگرافی INUS: (۱) صفحات سوسوزنی (۲) آینه (۳) موتور پله‌ای (۴) دوربین CCD مدل Hamamatsu به همراه لنز نوری Xenon (۵) دوربین CCD مدل Starlight به همراه لنز نوری مدل Pentax



(ب)

(الف)

شکل ۳. صفحات سوسوزنی مورد استفاده در سیستم آشکارسازی سامانه رادیوگرافی INUS (الف) صفحه $Gd_2O_3S:Tb$ (ب) صفحه $LiF-ZnS:Cu$.

1. Stepper Motor





شکل ۴. الف) دوربین EM-CCD مدل C9100-02 Hamamatsu به همراه لنز نوری Xenon 0.95/25 (ب) دوربین CCD مدل STARLIGHT XPRESS SXV-H9 به همراه لنز نوری Pentax C6Z1218M3-5.

۴.۱.۲ سیستم کنترلی و پردازش تصاویر

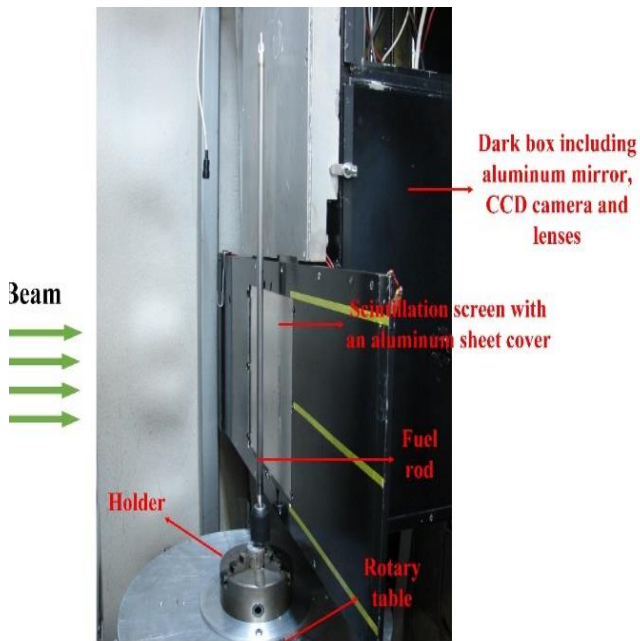
در این سامانه از ۱۱ موتور پله‌ای به منظور حرکت و جابه‌جایی دو دوربین CCD، حرکت مجموعه کلی سیستم آشکارسازی (جعبه تاریک آلومینیمی)، جابه‌جایی صفحات سوسوزنی، حرکت نگه‌دارنده نمونه در جهت افقی و عمود بر باریکه و هم‌چنین چرخش و حرکت نمونه به سمت بالا، پایین، چپ و راست استفاده شده است. این ۱۱ موتور پله‌ای توسط برنامه‌ای که با استفاده از نرم‌افزار LabView برای آن‌ها نوشته شده و در سیستم کامپیوتری واقع در محل میز کار نصب گردیده است، کنترل می‌شوند. برای مشاهده و کنترل بهتر تجهیزات در حین پرتودهی، یک دوربین مداربسته معمولی در بالای اتاق حفاظ بیولوژیکی نصب گردیده و نمایشگر مربوط به آن روی میز کار قرار داده شده است. لازم به ذکر است میز کار در فاصله ۷ متری از سیستم تصویربرداری قرار دارد و به وسیله یک حفاظ بیولوژیکی از آن جدا شده است. نرم‌افزارهای دو دوربین CCD نیز که وظیفه تعیین زمان موردنیاز برای جمع‌آوری داده، تغییر حالت تصویربرداری خودکار به دستی و ... را به عهده دارند، در سیستم کامپیوتر میز کار نصب گردیده‌اند. پس از انجام آزمایش‌ها، تصاویر ثبت شده توسط دوربین CCD در کامپیوتر ذخیره می‌گردند. برای پردازش و آنالیز تصاویر و هم‌چنین برای بازسازی تصاویر مقطع‌نگاری

آینه موجود در سیستم آشکارسازی متشکل از یک زیر لایه شیشه‌ای به ضخامت $2/3$ mm و ابعاد 30×40 cm² می‌باشد که یک لایه نازک آلومینیم به ضخامت ۱۰۰ nm روی آن لایه‌نشانی شده است. هم‌چنین برای محافظت از لایه آلومینیمی، یک لایه نازک SiO₂ به ضخامت ۳ nm روی آن نیز لایه‌نشانی شده است. این آینه با زاویه ۴۵ درجه نسبت به باریکه فرودی و در مقابل صفحه سوسوزن قرار گرفته و نور خروجی از صفحه سوسوزنی را با زاویه ۹۰ درجه به سمت دوربین بازتاب می‌کند. بازدهی نوری آینه برای انعکاس نور حدود ۹۱/۵٪ می‌باشد.

سیستم آشکارسازی شامل دو دوربین CCD است و هر دوربین دارای لنز مخصوص به خود است. این دو دوربین به همراه لنزهایشان به کمک یک موتور پله‌ای قابل جابه‌جا شدن بوده و می‌توان به دلخواه از هر یک از آن‌ها در آزمایش‌های استفاده نمود. مدل دوربین اول STARLIGHT XPRESS SXV-H9 با اندازه پیکسل $6/45 \mu\text{m}$ است که به لنز نوری مدل Pentax C6Z1218M3-5 متصل می‌باشد. این لنز نوری خود نیز شامل دو قسمت اولیه و ثانویه است که یک تیوب تشدیدکننده تصویر (نوع XD-4 مدل XX2051D) بین آن‌ها قرار گرفته است. نور بازتابیده از آینه آلومینیمی توسط لنز نوری اولیه بر روی فوتوکاتد تیوب تشدیدکننده تصویر متمرکز می‌گردد. در داخل تیوب تشدیدکننده تصویر، نور برخورد کرده به فوتوکاتد به الکترون تبدیل شده و سپس تعداد این الکترون‌ها توسط یک تکثیرکننده الکترونی^۲ افزایش یافته و در نهایت به یک صفحه فسفر برخورد داده می‌شوند و مجدد فوتون تولید می‌شود. تصویر تشدید شده خروجی از این تیوب توسط لنز نوری ثانویه بر روی حسگر دوربین CCD متمرکز شده و تصویر نهایی ایجاد می‌شود. اما دوربین دوم که ساخت شرکت Hamamatsu و دارای مدل تجاری C9100-02 و اندازه پیکسل $8 \mu\text{m}$ می‌باشد، نسل جدیدتر این نوع از دوربین‌ها است که دارای قابلیت تکثیرکننده الکترونی بوده و با نام EM-CCD^۳ شناخته می‌شوند. دوربین‌های EM-CCD نیاز به تشدیدکننده تصویر ندارند و به همین دلیل این دوربین فقط به یک لنز نوری مدل Xenon 0.95/25 متصل می‌باشد. تصویر دو دوربین CCD به همراه لنزهای نوری در شکل ۴ نشان داده شده است.

1. Image Intensifier
2. Electron Multiplier
3. Electron Multiplying Charge Coupled Device (EM-CCD)





شکل ۵. چیدمان آزمایشگاهی استفاده شده برای مقطع‌نگاری کامپیوتری نوترونی میله سوخت.

همان‌طور که پیش‌تر اشاره گردید، سیستم آشکارسازی موجود در سامانه رادیوگرافی نوترونی INUS دارای دو صفحه سوسوزنی است که متناسب با هر آزمایش می‌توان از هر یک از آن‌ها استفاده نمود. بدین‌منظور، در این پژوهش ابتدا هر یک از صفحات سوسوزنی مقابل میله سوخت قرار گرفتند و به ازای زمان ۴۰ ثانیه، تصویربرداری از میله سوخت انجام شد. با مقایسه تصاویر به دست آمده از دو صفحه سوسوزنی که در بخش بعد (قسمت نتایج) نیز به‌طور مفصل توضیح داده خواهد شد، مشخص شد که استفاده از صفحه سوسوزنی $Gd_2O_3:Tb$ برای این آزمایش مناسب‌تر است. هم‌چنین از بین دو دوربین CCD مدل Hamamatsu و Starlight، دوربین Hamamatsu انتخاب گردید، چون این دوربین دارای زمان جمع‌آوری داده^۲ کم‌تری بوده و با توجه به زمان محدود فعالیت رآکتور، که ۳ ساعت است، برای تصویربرداری مقطع‌نگاری کامپیوتری در این آزمایش مناسب‌تر است. دوربین Hamamatsu دارای ۱۰۰۰ پیکسل در دو راستای طولی و عرضی می‌باشد. میدان دید^۳ برای دوربین CCD را می‌توان با تغییر فاصله از آینه آلومینیمی و در جهت عمودی تغییر داد. بیشینه میدان دید قابل‌دستیابی ۳۰ cm است که برابر با ابعاد صفحه سوسوزن می‌باشد. اما افزایش میدان دید باعث کاهش رزولوشن تصویر نیز می‌گردد. در این آزمایش با توجه به اینکه هدف تصویربرداری از هم فاصله بین دو قرص

کامپیوتری از نرم‌افزار Octopus نصب شده بر روی کامپیوتر، استفاده می‌شود.

۲.۲ آزمایش‌های تجربی

۱.۲.۲ مقطع‌نگاری میله سوخت

تمامی آزمایش‌های موجود در این پژوهش در مدت زمان ۳ ساعت فعالیت رآکتور در حالت پایدار صورت پذیرفته است. به‌دلیل زمان محدود فعالیت رآکتور و تعداد زیاد تصویربرداری‌های مورد نیاز برای انجام مقطع‌نگاری، قطعه بیسموت داخل موازی‌ساز توسط یک کابل به بالا کشیده شد تا شار نوترونی افزایش یابد، هرچند این امر باعث افزایش شار پرتوهای گاما نیز می‌گردد، با این حال فواید آن بر این مشکل برتری داده شد.

تصویربرداری از یک میله سوخت تهی‌شده از ایزوتوپ اورانیم ۲۳۵ رآکتور تریگا انجام شده است. این میله سوخت دارای ۴ قرص با طول ۱۴ cm و قطر ۱۳ mm می‌باشد و در قسمت پایینی آن یک فنر قرار داده شده است. ضخامت غلاف زیرکونیمی میله نیز برابر با ۰/۴ mm می‌باشد. قسمت انتهایی این میله که فنر نیز در آن وجود دارد، به‌صورت عمودی در مرکز میز چرخان و در مقابل صفحه سوسوزنی قرار داده شده است. برای نگاه‌داشتن میله به‌صورت عمودی، یک نگه‌دارنده طراحی و ساخته شد و روی میز چرخان نصب گردید. برای کاهش عیب مصنوعی حلقه‌ای^۱ در تصاویر بازسازی شده، به جای قرار دادن میله در مرکز میز چرخان، میله در فاصله ۱ cm از آن قرار گرفت. لازم به ذکر است که به‌دلیل قطر کم میله و هم‌چنین پراکندگی زیاد پرتوهای نوترون‌ها از داخل میله، اگر میله دقیقاً در مرکز چرخش قرار گیرد، پس از بازسازی تصاویر یک حلقه سفید رنگ با ضخامت چند میلی‌متر اطراف تصویر میله مشاهده می‌شود. فاصله مرکز چرخش (وسط میز چرخان) تا صفحه سوسوزن ۳۰/۲۵ mm انتخاب شد. چیدمان آزمایشگاهی در شکل ۵ نشان داده شده است.

2. Acquisition Data

3. Field of View

Journal of Nuclear Science and Technology

Vol. 94, No 4, 2021, P 55-64

1. Ring Artefact



آزمایش، مقدار ضریب تکثیر الکترونی دوربین CCD صفر انتخاب شد، هر چند این مقدار می‌تواند بین ۰ تا ۲۰۰ انتخاب گردد؛ هرچه این مقدار افزایش پیدا کند میزان شدت تصویر نیز افزایش یافته و متعاقباً زمان اندازه‌گیری کاهش می‌یابد، ولی افزایش آن باعث افزایش نویز در تصاویر نیز می‌شود.

پس از ثبت ۲۰۰ تصویر (پروجکشن) و هم‌چنین ۱۰ تصویر تاریک و ۱۰ تصویر پروفایل باریکه، فرایند بازسازی تصویر میله سوخت آغاز گردید. برای بازسازی تصویر از نسخه ۸/۹ نرم‌افزار Octopus استفاده شد. در این نرم‌افزار ابتدا پوشه حاوی پروجکشن‌ها فراخوانی می‌گردد. سپس مشخصات باریکه مانند فاصله چشمه تا مرکز چرخش، فاصله مرکز چرخش تا آشکار، اندازه پیکسل تصاویر و آخرین زاویه چرخش جسم باید وارد گردد. پس از آن، قسمت مورد نیاز از تصویر که قرار است بازسازی روی آن اعمال گردد انتخاب یا به اصطلاح چیده^۴ می‌شود. این عمل باعث کاهش زمان بازسازی تصویر می‌شود. در مرحله بعد، میزان شدت اعمال فیلتر نقطه‌ای بر روی تصاویر انتخاب می‌شود. سپس عمل نرمالیزه کردن تصاویر انجام می‌شود که برای این منظور باید ناحیه‌ای از تصویر که جسم در آن قرار ندارد، انتخاب شود و به نرم‌افزار معرفی گردد. هدف از نرمالیزه کردن در واقع حذف نوسانات باریکه در حین آزمایش می‌باشد. پس از انجام پردازش بر روی پروجکشن‌ها، سینوگرام‌های مربوطه ساخته می‌شود. در نرم‌افزار Octopus برای بازسازی تصویر دو الگوریتم پروجکشن برگشتی^۵ و تکرارشونده^۶ قرار داده شده است که می‌توان از هر یک از آن‌ها استفاده نمود. در این پژوهش به علت تعداد نسبتاً کم پروجکشن‌ها، از الگوریتم تکرار شونده برای بازسازی تصویر استفاده شد؛ زیرا توانایی این الگوریتم برای مواقعی که تعداد پروجکشن‌ها کم و یا زاویه چرخش بزرگ باشد، بیش‌تر است. در انتها عملیات بازسازی تصویر انجام می‌شود اما پیش از بازسازی کامل تصویر، نرم‌افزار این قابلیت را در اختیار کاربر قرار می‌دهد که پارامترهای مختلف مؤثر بر بازسازی را که به‌طور خودکار تشخیص داده است را ارزیابی نموده و مقادیر بهینه را انتخاب کند. به‌طور مثال پارامترهایی مانند مرکز چرخش جسم، میزان پیچش و زاویه‌دار بودن جسم نسبت به خط عمود به‌طور خودکار توسط نرم‌افزار تشخیص داده می‌شود اما کاربر باید با تغییر مقادیر این پارامترها حول مقدار حدس زده شده توسط نرم‌افزار، بهترین مقدار را انتخاب نماید.

در میله و هم فنر موجود در آن بود، زاویه دید برابر با ۲۲/۶ cm انتخاب گردید. بدین ترتیب فقط ۲۲/۶ cm از طول میله سوخت تصویربرداری گردید. لازم به ذکر است که رزولوشن تصاویر برابر با رزولوشن دوربین CCD که ۸ μm است، نمی‌باشد بلکه از تقسیم میدان دید (۲۲/۶ cm) بر تعداد پیکسل‌های آن (۱۰۰۰) حاصل می‌شود که برابر با ۲۲۶ μm می‌باشد. فاصله چشمه (محل دیافراگم موزی‌ساز) تا مرکز چرخش میله و هم‌چنین فاصله مرکز چرخش میله تا صفحه سوسوزنی به ترتیب ۴۲۰/۱۵ mm و ۳۰/۲۵ mm انتخاب گردید.

پس از انتخاب تجهیزات و پارامترهای مناسب، آزمایش‌های تجربی مقطع‌نگاری میله سوخت آغاز گردید. در ابتدا قبل از این‌که رآکتور شروع به فعالیت کند، ۱۰ تصویر تاریک^۱ ثبت گردید. تصاویر تاریک برای اصلاح نواقص مختلف آشکارساز به کار می‌رود. با استفاده از میانگین تصاویر تاریک، جریان تاریک و نویز قرائت دوربین CCD توسط نرم‌افزار مربوط به بازسازی تصویر جبران می‌شود. برای این تصاویر، ضروری است که مدت زمان ثبت برابر با زمان ثبت بقیه تصاویر در حین آزمایش انتخاب گردد. نکته دیگری که در حین ثبت این تصاویر باید رعایت گردد این است که اتاق آزمایش باید کاملاً تاریک نگه داشته شود. پس از ثبت تصاویر تاریک، نوبت به ثبت تصاویر اصلی از میله سوخت می‌رسد. با توجه به زمان محدود فعالیت رآکتور (۳ ساعت)، گام چرخش میله و زمان استخراج تصویر در هر گام، به ترتیب ۱/۸ درجه و ۴۰ s انتخاب گردید. زمان لازم برای هر چرخش نیز حدود ۱ s می‌باشد. بدین ترتیب به ازای چرخش کامل میله حول مرکز (۳۶۰ درجه)، تعداد ۲۰۰ تصویر ثبت گردید. به‌منظور کاهش نویز در تصاویر، به جای استخراج یک تصویر در مدت زمان ۴۰ s، با استفاده از قابلیت موجود در نرم‌افزار دوربین Hamamatsu، چهار تصویر در مدت زمان ۱۰ s استخراج شده و سپس از آن‌ها میانگین‌گیری شد و به‌عنوان یک تصویر در کامپیوتر ذخیره گردید. در پایان آزمایش و پس از ثبت تصاویر اصلی، میز چرخان که میله سوخت نیز روی آن قرار دارد، با کمک موتور پله‌ای در جهت افقی به اندازه ۳۰ cm حرکت داده شد تا هیچ جسمی در مقابل صفحه سوسوزن قرار نداشته باشد. سپس ۱۰ تصویر پروفایل باریکه^۲ یا باریکه باز^۳ ثبت گردید. میانگین این تصاویر در نرم‌افزار مربوط به بازسازی تصویر، برای اصلاح نقوص پروفایل باریکه و هم‌چنین صفحه سوسوزنی، به کار می‌رود. برای ثبت تمامی تصاویر در این

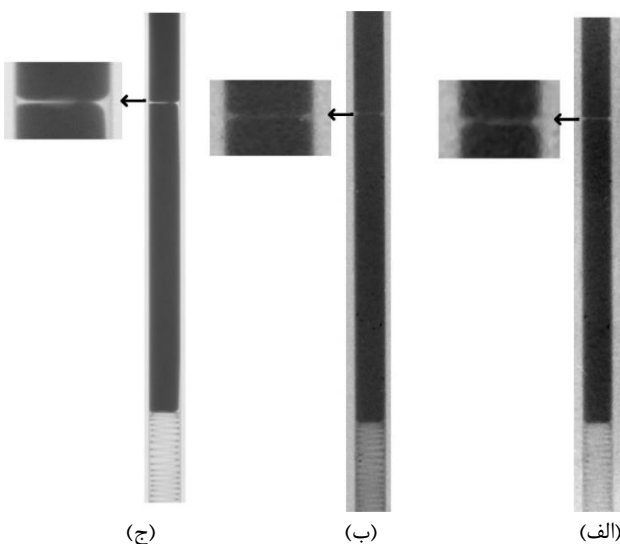
4. Crop
5. Filter Back Projection
6. Iterative

1. Dark Image
2. Beam Profile
3. Open Beam



۳. بحث و نتایج

تصاویر حاصل از رادیوگرافی نوترونی میله سوخت با استفاده دوربین CCD و دو صفحه سوسوزنی ${}^6\text{LiF-ZnS:Cu}$ و $\text{Gd}_2\text{O}_3\text{S:Tb}$ به ازای پرتو دهی ۴۰ s و همچنین تصویر حاصل از فیلم رادیوگرافی معمولی در شکل ۷ نشان داده شده است. از این شکل می‌توان مشاهده نمود که رزولوشن تصویر حاصل از فیلم رادیوگرافی معمولی به مراتب از تصاویر حاصل از دوربین CCD و دو صفحه سوسوزنی بهتر بوده و جزئیاتی مانند غلاف میله و همچنین شکل نایکنواخت قرص پایینی در میله به خوبی مشاهده می‌شود. همچنین از مقایسه تصاویر حاصل از دو صفحه سوسوزنی ${}^6\text{LiF-ZnS:Cu}$ و $\text{Gd}_2\text{O}_3\text{S:Tb}$ می‌توان گفت که در تصویر حاصل از صفحه سوسوزنی $\text{Gd}_2\text{O}_3\text{S:Tb}$ غلاف میله قدری بهتر از تصویر حاصل از صفحه سوسوزنی ${}^6\text{LiF-ZnS:Cu}$ مشاهده می‌شود. همچنین به دلیل ضخامت کمتر صفحه سوسوزنی $\text{Gd}_2\text{O}_3\text{S:Tb}$ نسبت به ${}^6\text{LiF-ZnS:Cu}$ ، میزان عدم وضوح^۱ در تصویر حاصل از این صفحه نیز کمتر است. به همین جهت برای انجام آزمایش‌های مقطع‌نگاری از صفحه سوسوزنی $\text{Gd}_2\text{O}_3\text{S:Tb}$ استفاده گردید. ذکر این نکته ضروری است که اگر چه سطح مقطع جذب نوترون $\text{Gd}_2\text{O}_3\text{S:Tb}$ بیش‌تر از ${}^6\text{LiF-ZnS:Cu}$ می‌باشد، اما حساسیت آن به پرتوهای گاما نیز بیش‌تر است که باعث کاهش کیفیت تصاویر رادیوگرافی نوترونی می‌شود؛ بنابراین در هر آزمایش باید صفحه مناسب انتخاب شود.

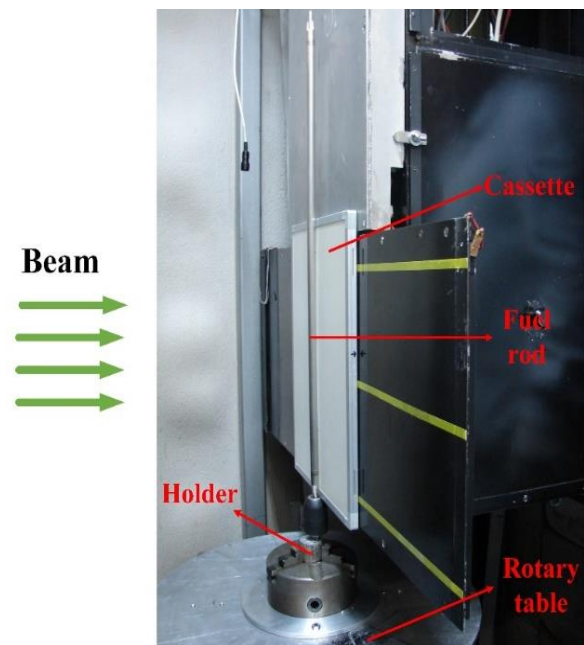


شکل ۷. تصاویر حاصل از رادیوگرافی نوترونی میله سوخت: (الف) دوربین CCD و صفحه سوسوزنی LiF-ZnS:Cu (ب) دوربین CCD و صفحه سوسوزنی $\text{Gd}_2\text{O}_3\text{S:Tb}$ (ج) فیلم رادیوگرافی معمولی.

۲.۲.۲ رادیوگرافی میله سوخت با فیلم معمولی

به‌منظور مقایسه کیفیت تصاویر حاصل از رادیوگرافی نوترون با استفاده از سیستم‌های دیجیتال و فیلم‌های رادیوگرافی معمولی، رادیوگرافی نوترونی از میله سوخت با استفاده از فیلم رادیوگرافی معمولی نیز انجام شد. فیلم رادیوگرافی معمولی فقط به تابش‌های فوتون و الکترون حساس می‌باشد و به‌طور مستقیم نسبت به پرتو نوترون حساسیت ندارد. برای تصویربرداری نوترونی با استفاده از این نوع فیلم‌ها، باید یک صفحه مبدل نوترون به فوتون و الکترون به کار گرفته شود. بدین‌منظور یک فیلم رادیوگرافی معمولی پزشکی مدل MXG در تماس نزدیک با یک صفحه سوسوزنی $\text{Gd}_2\text{O}_3\text{S:Tb}$ در درون یک کاست قرار داده شد و سپس کاست در مقابل میله سوخت قرار گرفت. چیدمان آزمایشگاهی مربوط به این قسمت در شکل ۶ نشان داده شده است.

کاست حاوی فیلم رادیوگرافی معمولی و صفحه سوسوزنی $\text{Gd}_2\text{O}_3\text{S:Tb}$ به مدت ۲۱۰ ثانیه در مقابل باریکه نوترونی قرار داده شد. پس از پرتو دهی، فیلم رادیوگرافی معمولی در داخل اتاق تاریک از کاست خارج شد و عملیات ظهور و ثبوت با استفاده از محلول‌های شیمیایی روی آن انجام گرفت. بعد از ظهور و ثبوت و خشک شدن، فیلم توسط یک اسکنر با رزولوشن ۶۰۰ dpi اسکن گردید.



شکل ۶. چیدمان آزمایشگاهی مربوط به رادیوگرافی نوترونی از میله سوخت با استفاده از فیلم رادیوگرافی معمولی.



سوسوزن ${}^6\text{LiF-ZnS:Cu}$ و $\text{Gd}_2\text{O}_3\text{:Tb}$ و یک تصویر با استفاده از نرم‌افزار ImageJ استخراج گردیده است، با میزان شفافیت زیاد و کم به ترتیب در شکل ۸ الف و ۸ ب نشان داده شده است. اجزای داخل غلاف میله سوخت مانند قرص‌ها و فنر به خوبی در شکل ۸ الف دیده می‌شود.

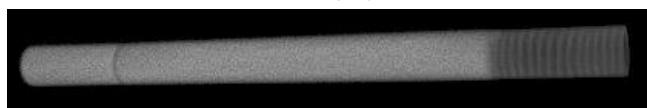
برای مشاهده جزئیات بیشتر، چند برش^۱ از نواحی مختلف تصویر بازسازی شده در شکل ۹ نشان داده شده است. برش در صفحه XY از ناحیه تماس بین دو قرص، وسط یکی از قرص‌ها و ناحیه‌ای که فنر در آن موجود است، همراه با نمودار پروفایل خطی شدت به ترتیب در شکل‌های ۹-۱، ۹-۲ و ۹-۳ نشان داده شده است. برش در صفحه XZ از ناحیه $y=0\text{ mm}$ (مرکز میله) و $y=-6\text{ mm}$ نیز به ترتیب در شکل‌های ۹-۴ و ۹-۵ نشان داده شده است. با توجه به شکل ۹-۱ می‌توان گفت که ناحیه انتهایی قرص‌ها به صورت تخت نمی‌باشد، بلکه به صورت یک نمودار تقریباً سینوسی است، یعنی ابتدا به صورت محدب، سپس به صورت مقعر و در نهایت مجدداً به صورت مقعر می‌باشد.

برای درک بهتر شکل انتهایی قرص‌ها، طرح‌واره آن‌ها در شکل ۱۰ نشان داده شده است.

در شکل ۹-۲ فقط قرص مشاهده می‌شود و غلاف میله سوخت به خوبی قابل مشاهده نیست. در شکل ۹-۳ که مربوط به برش از ناحیه فنر می‌باشد، می‌توان قسمتی از فنر که در سمت چپ میله واقع شده است را مشاهده نمود. در این شکل غلاف میله سوخت هم تا حدی قابل تشخیص است. در شکل ۹-۴ ساختار ناحیه انتهایی دو قرص سوخت به خوبی دیده می‌شود و در واقع این تصویر مکمل شکل ۹-۱ می‌باشد. شکل ۹-۵ مربوط به برش از ناحیه‌ای است که قرص‌ها در تماس با یکدیگر هستند، بنابراین نقاط انتهایی دو قرص به صورت تخت دیده می‌شوند.



(الف)



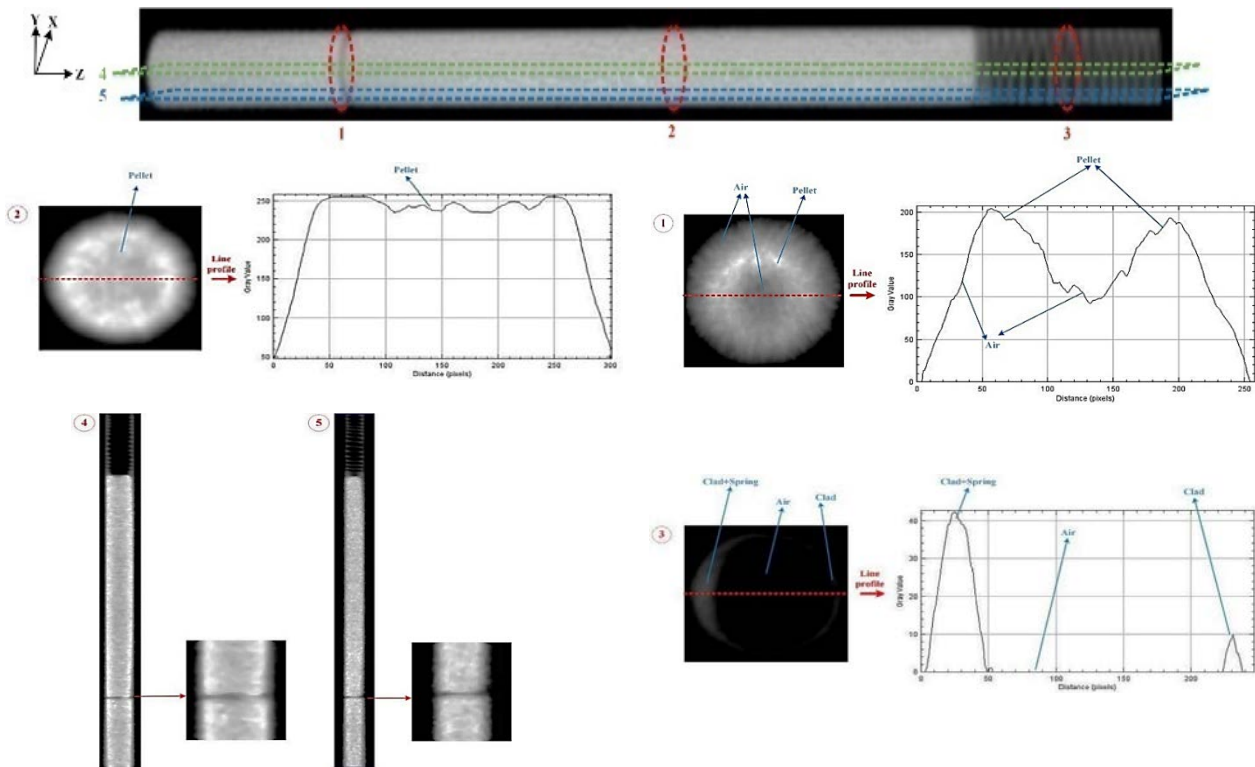
(ب)

شکل ۸. نمای حجمی تصویر بازسازی شده میله سوخت: الف) با میزان شفافیت زیاد (ب) با میزان شفافیت کم.

۴. نتیجه‌گیری

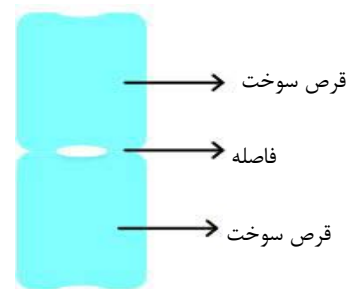
در این پژوهش، مقطع‌نگاری کامپیوتری نوترونی از یک میله سوخت تهی‌شده (غناى صفر درصد اورانیم ۲۳۵) رآکتور تریگا با استفاده از یک سیستم آشکارسازی دیجیتال متشکل از صفحه سوسوزن، آینه و دوربین CCD در سامانه رادیوگرافی INUS صورت گرفت. ابتدا برای مقایسه کلی تصاویر حاصل از رادیوگرافی نوترون با استفاده از روش دیجیتال و فیلم معمولی، دو تصویر از میله سوخت با استفاده از صفحات





شکل ۹. برش از نواحی مختلف تصویر بازسازی شده: (۱) ناحیه تماس بین دو قرص در صفحه XY به همراه پروفایل خطی شدت (۲) ناحیه وسط قرص اول در صفحه XY به همراه پروفایل خطی شدت (۳) ناحیه حاوی فنر در صفحه XY به همراه پروفایل خطی شدت (۴) ناحیه $y=0$ mm (مرکز میله) در صفحه XZ (۵) ناحیه $y=-6$ mm در صفحه XZ.

3. R. Yasuda, et al, *Application of neutron imaging plate and neutron CT methods on nuclear fuels and materials*, **IEEE. T. NUCL. SCI.**, **52**, 313-316 (2005).
4. M.H. Choopan Dastjerdi, *Examination of domestic nuclear fuel by design and construction of a new neutron radiography system at Tehran Research Reactor*, **Nuclear Science and Technology Research Institute, Iran, Ph.D. Thesis** (2016) (In Persian).
5. M.H.C. Dastjerdi, et al, *Inspection of domestic nuclear fuel rods using neutron radiography at the Tehran Research Reactor*, **MATER. TEST.**, **58**, 763-766 (2016).
6. M. Dinca, *Status of the Imaging Facility INUS at INR*, **Physcs. Proc.**, **88**, 167-174 (2017).
7. M. Dinca, M. Pavelescu, C. Iorgulis, *Collimated neutron beam for neutron radiography*, **Rom. Journ. Phys.**, **51**, 535-544 (2006).



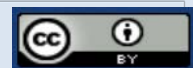
شکل ۱۰. طرح‌واره ناحیه انتهایی قرص‌های موجود در میله.

مراجع

1. E.H. Lehmann, P. Vontobel, A. Hermann, *Non-destructive analysis of nuclear fuel by means of thermal and cold neutrons*, **NUCL. INSTRUM. METH. A.**, **515**, 745-759 (2003).
2. S. Casalta, et al, *Digital image analysis of X-ray and neutron radiography for the inspection and the monitoring of nuclear materials*, **NDT&E. INT.**, **36**(5), 349-355 (2003).

COPYRIGHTS

©2021 The author(s). This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, as long as the original authors and source are cited. No permission is required from the authors or the publishers.



استناد به این مقاله

احسان ناظمی، امیر موافقی، بهروز رکرک، مارین دینکا، محمد حسین چوپان دستجردی (۱۳۹۹)، مقطع‌نگاری کامپیوتری نوترونی از میله سوخت تابش‌نندیده، ۹۴، ۵۵-۶۴

DOI: 10.24200/nst.2021.1170

Url: https://jonsat.nstri.ir/article_1170.html

