

اجرای رادیوگرافی نوترونی در راکتور تحقیقاتی کم قدرت MNSR

محمدحسین چوپان دستجردی^{*}، جواد مختاری، جمشید خورسندی و افروز عسگری

پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی ایران، اصفهان، ایران.

^{*} اصفهان، سازمان انرژی اتمی ایران، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، پژوهشکده راکتور و ایمنی هسته‌ای، صندوق پستی: ۸۱۴۶۵/۱۵۸۹

پست الکترونیکی: mdastjerdi@aeoi.org.ir

چکیده

رادیوگرافی نوترونی یک روش آزمون غیرمخرب پیشرفته، سودمند و منحصر به فرد در صنایع و تحقیقات مختلف می‌باشد. راکتورهای هسته‌ای منابع قدرتمند و پایدار تولید شار نوترون برای سیستم رادیوگرافی نوترونی محسوب می‌شوند. در این پژوهش، از راکتور تحقیقاتی MNSR به عنوان منبع نوترونی یک سیستم رادیوگرافی نوترونی استفاده شده و پارامترهای باریکه نوترونی آن مورد ارزیابی قرار گرفت. همچنین با استفاده از روش تبدیل مستقیم و مبدل گادولینیومی، تصویر نوترونی در باریکه نوترونی آن تهیه شد و با استفاده از استاندارد مخصوص سنجش کیفیت تصویر یعنی استاندارد ASTM-E545، کیفیت تصویر نوترونی آن مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج اندازه‌گیری نشان می‌دهد شار نوترونی باریکه این سیستم در بیشینه توان راکتور برابر با $3 \times 10^6 \text{ n.cm}^{-2}.\text{s}^{-1}$ و نسبت موازی‌سازی ۱۰۰ می‌باشد. ارزیابی کیفیت تصویر نیز نشان داد کیفیت تصویر رتبه V (رتبه پنج) بر اساس رتبه بندی کیفیت استاندارد ASTM-E545 می‌باشد.

کلیدواژگان: رادیوگرافی نوترونی، راکتور MNSR، باریکه نوترونی، شاخص کیفیت تصویر، استاندارد ASTM.

۱. مقدمه

رادیوایزوتوپی نوترون دارند، روش رادیوگرافی نوترونی به عنوان یک روش آزمون غیرمخرب جدید و مکمل رادیوگرافی ایکس توسعه یافته است [۳].

در رادیوگرافی نوترونی یک تصویر از ساختار داخلی جسم تهیه می‌شود که شدت نور هر پیکسل تصویر مبین میزان تضعیف نوترون‌های عبوری از جسم در همان نقطه است و می‌تواند اطلاعات سودمندی را از نوع مواد داخل جسم ارائه دهد. بدلیل تضعیف بیشتر نوترون‌ها در مواد سبک (نظیر هیدروژن و آب) نسبت به رادیوگرافی ایکس دارای قدرت

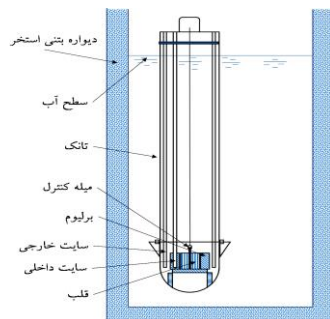
رادیوگرافی نوترونی یک روش آزمون غیرمخرب سودمند و منحصر به فرد می‌باشد که به طور گسترده‌ای در زمینه‌های صنعتی، متالورژی، هسته‌ای، کشاورزی، میراث فرهنگی و ... مورد استفاده قرار گرفته است [۱]. هر سیستم رادیوگرافی نوترونی شامل اجزایی اصلی از جمله منبع تولید نوترون، مجموعه شکل دهنده باریکه نوترونی و سیستم ثبت تصویر است [۲]. با در دسترس شدن راکتورهای تحقیقاتی در دهه‌های اخیر که قابلیت تولید باریکه‌های نوترونی به مراتب قوی‌تر و پایدارتری را نسبت به شتابدهنده‌ها و چشمه‌ها

نوترون انجام شد. همچنین با استفاده از یک مبدل فلزی گادولینیوم و روش ثبت تصویر مستقیم، یک تصویر نوترونی از شاخص‌های کیفیت تصویر شامل شاخص خلوص باریکه^۲ (BPI) و شاخص حساسیت^۳ (SI) مطابق با استاندارد ASTM^۴-E545 تهیه شد و مورد ارزیابی قرار گرفت.

۲. مواد و روش‌ها

۲.۱. راکتور تحقیقاتی MNSR

راکتور تحقیقاتی MNSR یک راکتور کم قدرت با حداکثر توان ۳۰ kW می‌باشد که آب سبک در آن به عنوان خنک‌کننده، کند کننده و حفاظ بیولوژیکی به کار رفته است [۴]. قلب راکتور که متشکل از میله‌های سوخت با غنای ۹۰/۳٪ اورانیوم ۲۳۵ می‌باشد به همراه بازتابنده برلیومی و سایت‌های پرتودهی داخلی و سایت‌های پرتودهی خارجی آن درون تانک آلومینیومی راکتور نصب شده‌اند. تانک راکتور نیز درون استخر راکتور واقع شده است و هر دو تانک و استخر با آب سبک پر شده‌اند (شکل ۱). تانک راکتور از جنس آلومینیوم با قطر خارجی ۶۰ cm و ارتفاع ۵۴۰ cm می‌باشد که درون استخری از جنس بتن با قطر ۲۶۰ cm و ارتفاع ۷۰۰ cm می‌باشد. هدف اصلی طراحی این راکتور آنالیز به روش فعال‌سازی نوترونی، تولید رادیو ایزوتوپ‌های نیمه عمر متوسط و کوتاه، و آموزش بوده است.



شکل (۱): نمایی از راکتور MNSR و نمایش اجزای استخر و تانک.

تباین بیشتری برای تشخیص مواد سبک در ماتریس مواد سنگین است. از سوی دیگر، نوترون بدلیل اینکه ذره‌ای بدون بار است قابلیت نفوذ بیشتری در مواد نسبت به پرتو ایکس دارد. محدودیت این روش نسبت به رادیوگرافی ایکس عمدتاً در دسترسی به منابع تولید نوترون و مباحث حفاظت بیولوژیکی آن است.

اکثر راکتورهای تحقیقاتی دارای تجهیزات پرتودهی داخل و خارج از قلب خود هستند که دستیابی به شار نوترون و گامای تولید شده در قلب راکتور را امکان‌پذیر می‌سازد [۳]. تجهیزات پرتودهی خارج از قلب که باریکه نوترون و گاما را به بیرون از حفاظ بیولوژیکی راکتور هدایت می‌کنند با عنوان بیم تیوب شناخته می‌شوند. رادیوگرافی نوترونی در واقع یک کاربرد راکتورهای تحقیقاتی با استفاده از تجهیزات پرتودهی خارج از قلب می‌باشد. برخی راکتورهای تحقیقاتی صرفاً دارای تجهیزات پرتودهی داخل قلب خود هستند به عبارتی فاقد بیم تیوب هستند. راکتور تحقیقاتی MNSR^۱ از نوع تانک-استخری با حداکثر توان ۳۰ kW یکی از راکتورهای است که با توجه به هدف طراحی اصلی خود که آنالیز به روش فعال‌سازی نوترونی می‌باشد، فاقد بیم تیوب خارجی است [۴].

در این پژوهش، ارزیابی‌هایی پیرامون استخراج باریکه نوترونی به خارج از حفاظ بیولوژیکی در این راکتور با استفاده از یک لوله آلومینیومی خارج از تانک راکتور انجام شد. پارامترهای باریکه نوترونی که از نظر رادیوگرافی نوترونی نیز اهمیت دارند، نظیر شار نوترون، نسبت شار نوترون به دز گاما، و نسبت موازی‌سازی باریکه (نسبت طول به قطر باریکه) مورد ارزیابی قرار گرفتند. اندازه‌گیری شار نوترون با استفاده از روش فعال‌سازی پولک ایندیوم و اندازه‌گیری دز گاما با استفاده از دزیومتر گرمالیانی TLD-700 در محل خروجی باریکه

^۲ Beam Purity Indicator

^۳ Sensitivity Indicator

^۴ American Standard for Testing and Materials

^۱ Miniature Neutron Source Reactor

جذب نوترون در هسته گادولینیوم (^{157}Gd) یک الکترون تبدیل داخلی با انرژی ۲۹ تا ۲۴۶ keV با بیشینه شدت ۷۱ keV گسیل می‌کند [۵]. هر فیلم رادیوگرافی نیز از یک لایه پایه $200-170 \mu\text{m}$ و یک لایه امولسیون حساس با ضخامت $10-5 \mu\text{m}$ تشکیل شده است. لایه امولسیون حاوی هالیدهای نقره است که در اثر جذب الکترون تبدیل داخلی درون لایه حساس نقره احیا می‌شود و تصویر نهان در همان نقطه برخورد الکترون تشکیل می‌شود. با انجام عملیات ظهور و ثبوت، تصویر نهان به صورت مرئی بر روی فیلم تشکیل می‌شود. اگرچه این روش بسیار زمان‌بر است اما به دلیل قدرت تفکیک مکانی بسیار بالایی که دارد همچنان مورد استفاده قرار می‌گیرد. معیاری که برای بررسی پرتوگیری فیلم استفاده می‌شود میزان تیرگی آن و به عبارت دیگر چگالی نوری فیلم است. چگالی نوری نسبت لگاریتمی شدت نور اولیه به نور عبوری از فیلم است. چگالی نوری قابل قبول برای فیلم‌های رادیوگرافی در رادیوگرافی نوترونی بین ۲ تا ۳ می‌باشد که معادل با دریافت شار مجموع نوترونی $10^9-10^8 \text{ n.cm}^{-2}$ می‌باشد [۶]. در این تحقیق از روش ثبت تصویر مستقیم تأخیری با مبدل گادولینیوم و فیلم رادیوگرافی AGFA D3 استفاده شد.

۳.۲. سنجش کیفیت باریکه با شاخص کیفیت تصویر

کیفیت باریکه یک اندازه‌گیری بر روی قدرت تفکیک سیستم رادیوگرافی است [۷]. شاخص‌های کیفیت باریکه ^1BQI یا به عبارتی دیگر، شاخص‌های کیفیت تصویر ^2IQI شامل دو وسیله با نام‌های شاخص خلوص باریکه BPI و شاخص حساسیت SI هستند. با تجزیه و تحلیل دانسیتومتری تصویر رادیوگرافیکی شاخص کیفیت باریکه، پارامترهایی نظیر میزان نوترون‌های حرارتی، میزان نوترون‌های پراکنده، میزان گاما و میزان تولید زوج را در یک باریکه‌ی نوترونی می‌توان

این راکتور پنج سایت پرتودهی داخل بازتابنده برلیوم و پنج سایت پرتودهی خارج از بازتابنده برلیوم دارد و دستیابی به این سایت‌ها از طریق سیستم ربیت راکتور امکان‌پذیر است [۴]. سایت‌های پرتودهی امکان دستیابی به حداکثر شار نوترون و گامای تولید شده پیرامون قلب را فراهم می‌سازند به گونه‌ای که در حداکثر توان نامی راکتور شار نوترونی درون سایت پرتودهی داخلی به میزان $10^{12} \text{ n.cm}^{-2}.\text{s}^{-1}$ می‌باشد [۴].

برای استخراج یک باریکه نوترونی جهت انجام رادیوگرافی نوترونی در این راکتور، با توجه به برخی محدودیت‌های ابعادی یک لوله آلومینیومی با یک سر بسته به طول ۵۰۰ cm و قطر ۵ cm در نظر گرفته شد و محل نصب آن در فضای بیرون از تانک راکتور و درون استخر تعیین شد به گونه‌ای که انتهای بسته آن در قسمت پایین تانک (نزدیک به قلب) و انتهای باز آن در قسمت بالایی تانک قرار گیرد. زمانی که این لوله آلومینیومی نصب می‌شود در واقع یک ستون هوا درون حفاظ بیولوژیک راکتور (آب استخر) ایجاد می‌کند و امکان ترابرد نوترون و گاما را به خارج از قلب فراهم می‌نماید و مانند یک بیم تیوب عمل می‌کند و زمانی که راکتور روشن باشد باعث تولید یک باریکه نوترونی در خروجی خود می‌شود.

پس از نصب این لوله آلومینیومی راکتور در توان ۳۰ kW روشن شد و در محل خروجی، یکبار پولک ایندیومی و یکبار دزیمتر TLD-700 جهت اندازه‌گیری شار نوترون و دز گاما قرار گرفت.

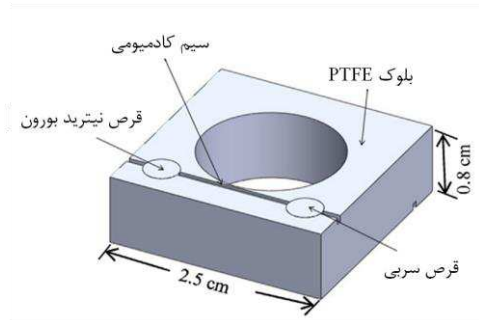
۲.۲. ثبت تصویر به روش مستقیم تأخیری

یکی از روش‌های ثبت تصویر در رادیوگرافی نوترونی، روش مستقیم تأخیری است که در آن یک مبدل نوترونی نظیر گادولینیوم در تماس با فیلم رادیوگرافی به عنوان سیستم ثبت تصویر در معرض تابش باریکه نوترونی قرار می‌گیرند. در اثر

¹ Beam Quality Indicators

² Image Quality Indicators

(شکل ۳). یک نمونه از هر ماده در هر دو طرف این وسیله قرار داده شده است [۸].



شکل (۳): نمایی از BPI با نمایش اجزاء و ابعاد (تمام اجزای این سطح نیز روی سطح دیگر، در جهت مقابل قرار دارند).

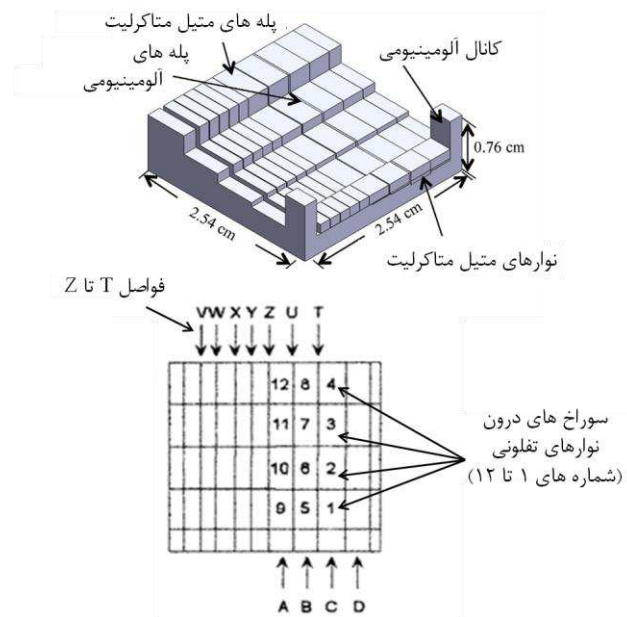
تجزیه و تحلیل دانسیتومتری رادیوگراف هر کدام از این وسیله‌ها اطلاعاتی راجع به باریکه‌ی نوترونی تولید می‌کند. با اندازه‌گیری دانسیته‌ی نوری فیلم در نقاط مختلف تصویر شاخص خلوص باریکه مطابق جدول ۱ و با استفاده از روابط ۱ تا ۴ می‌توان میزان نوترون حرارتی باریکه (NC)، میزان نوترون پراکنده (S)، میزان تولید زوج (P) و میزان گامای (γ) باریکه را تعیین نمود.

جدول (۱): چگالی‌های نوری در قسمت‌های مختلف BPI.

محل	توضیح
D _B	چگالی‌های اندازه‌گیری شده فیلم در تصاویر قرص‌های نیتريد بورون
D _L	چگالی‌های اندازه‌گیری شده فیلم در تصاویر قرص‌های سربی
D _H	چگالی اندازه‌گیری شده فیلم در مرکز سوراخ BPI
D _T	چگالی اندازه‌گیری شده فیلم در تصویر پلی تترافلورواتیلن
ΔD_L	اختلاف بین مقادیر D _L
ΔD_B	اختلاف بین دو مقدار D _B

در استاندارد ASTM-E545 جدولی وجود دارد که با توجه به مقادیر اندازه‌گیری شده توسط BPI و SI یعنی مقادیر P، γ، S، NC و H و G یک سیستم رتبه‌بندی کیفیت تصویر

اندازه‌گیری نمود [۸]. تصویرگیری این دو شاخص هم‌زمان با تصویرگیری از نمونه انجام می‌شود. شکل‌های ۲ و ۳ به ترتیب جزئیات شاخص‌های SI و BPI را نشان می‌دهند. شاخص حساسیت یک کانال U شکل آلومینیومی است که با نوارهای متناوبی از متیل متاکرلیت^۱ و آلومینیوم پر شده است (شکل ۲). نوارهای باریک آلومینیومی (با حروف T تا Z مشخص شده‌اند) به صورت شکاف عمل می‌کنند و در محدوده‌ای از ۰/۰۲۵۴ cm تا ۰/۰۱۲۷ cm متغیر هستند. چهار نوار باریک متیل متاکرلیت زیر نوارهای اصلی قرار دارند (شکل ۲). سوراخ‌های روی این نوارهای باریک (از ۱ تا ۱۲ شماره‌گذاری شده‌اند) و قطر آن‌ها بین ۰/۰۵۰۸ cm و ۰/۰۱۲۷ cm می‌باشد و به عنوان عیوب ساختگی در شاخص عمل می‌کنند. نوارهای بالایی به صورت پله‌ای تراش خورده‌اند [۸].



شکل (۲): نماهایی از SI، (بالا) نمایش اجزاء و ابعاد، (پایین) نمایش حفره‌ها (سوراخ‌ها) و فواصل.

شاخص خلوص باریکه (BPI) از یک بلوک پلی تترافلورواتیلن (PTFE) تشکیل شده است. این وسیله شامل دو قرص نیتريد بورون، دو قرص سربی و دو سیم کادمیومی است

¹ Methylmethacrylate

می‌باشد. با مشخص بودن جرم پولک ایندیوم و استفاده از رابطه ۵، شار نوترون تعیین می‌شود:

$$A = \sigma \phi m \frac{N_{Av}}{M} (1 - e^{-\lambda t}) \quad (5)$$

که در آن A میزان اکتیویته (فروپاشی در واحد زمان)، σ سطح مقطع جذب نوترون در ایندیوم، ϕ شار نوترون، m جرم ایندیوم، N_{Av} عدد آووگادرو، λ ثابت فروپاشی و t مدت زمان پرتودهی می‌باشد. برای شمارش پرتوهای گامای گسیل شده از ایندیوم نیز از یک آشکارساز فوق خالص ژرمانیومی (HPGe) استفاده شد. برای اندازه‌گیری دز پرتوهای گاما در محل رادیوگرافی نوترونی که در واقع همان محل خروجی باریکه در کانال خشک می‌باشد از دزیمترهای گرمالیانی TLD700 استفاده شد. دزیمترهای TLD700 متشکل از ${}^7\text{Li}$ (۹۹/۹۳٪) می‌باشند و به میزان اندکی حاوی ${}^6\text{Li}$ (۰/۰۷٪) هستند و سطح مقطع ${}^7\text{Li}$ برای نوترون‌های حرارتی ${}^{14/7}$ بارن است [۱۰]. حساسیت دزیمترهای TLD700 برای نوترون‌های کم انرژی قابل اغماض است و پاسخ دز TLD700 به نوترون‌های با انرژی کم و متوسط قابل توجه نیست و می‌توان دز تخمینی TLD700 را سهم دز گاما در نظر گرفت [۱۰، ۱۱]. در مکان پرتودهی سه عدد TLD700 پرتودهی شده است. پیش از پرتودهی، دزیمترهای اصطلاحاً آنیل می‌شوند و پس از پرتودهی نیز با استفاده از فرآیند گرمادهی و قرائت شدت تابش TLDها میزان دز گاما با استفاده از رابطه ۶ تعیین می‌شود:

$$D = Q \times CF \quad (6)$$

که در اینجا D میزان دز گاما بر حسب $m\text{Gy}$ ، Q میزان بار الکتریکی قرائت شده بر حسب $n\text{C}$ و CF فاکتور کالیبراسیون می‌باشند. کلیه پرتودهی‌ها در بیشینه قدرت راکتور یعنی 30 kW و در محل خروجی باریکه انجام شد.

رادیوگرافی حاصل از باریکه‌ی مورد آزمون را ارائه می‌دهد (جدول ۲).

$$NC = \frac{D_H - (\text{higher} D_B + \Delta D_L)}{D_H} \times 100 \quad (1)$$

$$S = \left(\frac{\Delta D_B}{D_H} \right) \times 100 \quad (2)$$

$$\gamma = \left(\frac{D_T - \text{lower} D_L}{D_H} \right) \times 100 \quad (3)$$

$$P = \left(\frac{\Delta D_L}{D_H} \right) \times 100 \quad (4)$$

جدول (۲): رده‌بندی کیفیت باریکه‌ی نوترونی با استفاده از تحلیل

تصاویر BPI و SI.

رده	NC	H	G	S	γ	P
I	۶۵	۶	۶	۶	۳	۳
II	۶۰	۶	۶	۶	۴	۴
III	۵۵	۵	۵	۵	۵	۵
IV	۵۰	۴	۵	۵	۶	۶
V	۴۵	۳	۵	۵	۷	۷
کار حاضر	۴۴	۵	۵	۸	۷	۶

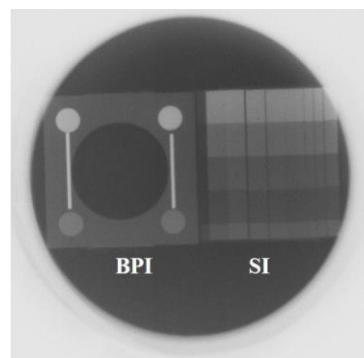
برای دستیابی به نتایج خوب، باید BPI و SI به صورت عمود بر باریکه، تا حد امکان موازی با سطح فیلم و نزدیک به آن و به گونه‌ای باشند که سیم کادمیومی عمود بر نزدیک‌ترین لبه‌ی فیلم باشد.

۴.۲. اندازه‌گیری شار نوترون و دز گاما

برای اندازه‌گیری شار نوترون در محل رادیوگرافی نوترونی که در واقع همان محل خروجی باریکه در کانال خشک می‌باشد از روش شناخته شده‌ی فعالسازی پولک فلزی استفاده شد [۹]. در این آزمایش از یک پولک بسیار نازک فلزی ایندیوم استفاده شد. ایندیوم در اثر جذب نوترون پرتوزا می‌شود و پرتوهای بتا و گاما گسیل می‌کند. سطح مقطع جذب نوترونی در ایندیوم تقریباً 200 بارن و نیمه عمر فروپاشی آن در حدود یک ساعت

۳. نتایج و بحث

شکل هندسی باریکه نوترونی حاصل از نصب بیم تیوب (لوله آلومینیومی) در محل خروجی آن دایره‌ای با قطر ۵ cm شد و با توجه به ابعاد بیم تیوب، نسبت موازی‌سازی باریکه برابر با ۱۰۰ تعیین شد. با استفاده از میزان پرتوزایی پولک ایندیومی پس از پرتودهی و استفاده از رابطه ۵، مقدار شار نوترون برابر با $2/96 \times 10^5 \pm 5\% \text{ n.cm}^{-2}.\text{s}^{-1}$ تعیین شد. برای تعیین نسبت شار نوترون به دز گاما، علاوه بر میزان شار نوترون، دز گاما نیز با استفاده از قرائت میزان درخشندگی TLD700 پس از پرتودهی و رابطه ۶ برابر با $3/39 \pm 0/05 \text{ mGy}$ تعیین شد. بنابراین میزان نسبت نوترون به گاما که برای مقاصد رادیوگرافی نوترونی نیز بایستی مشخص شود برابر با $7/65 \times 10^5 \pm 5/1\% \text{ n.cm}^{-2}.\text{mR}^{-1}$ تعیین شد. نتایج نشان می‌دهند این مقادیر برای انجام آزمون رادیوگرافی مناسب هستند. با توجه به این مقدار شار اندازه‌گیری شده و نکته‌ای که در بخش ۲.۲ برای رسیدن به سطح دانسیته نوری قابل قبول برای تصویر مطرح شد (شار مجموع)، مدت زمان پرتودهی با استفاده از این باریکه در حدود ۳۰ دقیقه در توان ۳۰ kw راکتور محاسبه شد.



شکل (۴): تصویر رادیوگرافی نوترونی حاصل از شاخص‌های کیفیت تصویر.

تصویر رادیوگرافی نوترونی حاصل از پرتودهی BPI و SI با روش ثبت تصویر تأخیری در میدان تابشی باریکه نوترونی

حاصل از بیم تیوب در شکل ۴ نشان داده شده است. میزان دانسیته نوری نقاط تعریف شده در جدول ۱ توسط دانسیتومتر نوری اندازه‌گیری شد. بیشترین دانسیته نوری در این تصویر، یعنی DH برابر با ۲ اندازه‌گیری شد. با استفاده از مقادیر اندازه‌گیری شده دانسیته نوری و روابط ۱ تا ۴، پارامترهای P، γ ، S، NC، H و G تعیین و سطر آخر جدول ۲ نمایش داده شده است. با مقایسه این مقادیر و مقادیر سطرهای بالایی که رده‌بندی ASTM هستند می‌توان نتیجه گرفت رده کیفی تصویر حاصله رده پنجم است.

اگرچه قطر این باریکه نوترونی کوچک است، نتایج نشان می‌دهند با این باریکه نوترونی و روش ثبت تصویری که در این تحقیق مورد استفاده قرار گرفت می‌توان تصاویر رادیوگرافی نوترونی قابل قبول و با کیفیتی تهیه نمود.

۴. نتیجه‌گیری

در این تحقیق، با استفاده از نصب یک لوله آلومینیومی خارج از تانک و درون استخر راکتور به عنوان بیم تیوب خارجی یک باریکه نوترونی با پارامترهای مناسب برای رادیوگرافی نوترونی استخراج شد. پارامترهای نوترونی از جمله شار نوترون و نسبت نوترون به گاما اندازه‌گیری شدند. همچنین برای سنجش کیفیت این باریکه، یک تصویر رادیوگرافی نوترونی از شاخص‌های کیفیت تصویر از استاندارد ASTM-E545 با روش ثبت تصویر مستقیم تهیه و آنالیز شد. نتایج اندازه‌گیری‌ها نشان داد تصویر حاصل با توجه به قرارگیری در رده بندی استاندارد ASTM-E545 کیفیت قابل قبولی دارد بدیهی است با افزودن یک بیم تیوب خارجی و انجام رادیوگرافی نوترونی در راکتور MNSR که منجر به توسعه کاربردهای آن می‌شود می‌توان تحقیقات مرتبط با این روش و ارائه خدمات آزمون غیرمخرب به صنایع را انجام داد.

۵. مراجع

- [1] International Atomic Energy Agency, Neutron Imaging: A Non-Destructive Tool for Materials Testing, IAEA TECDOC 1604, Vienna, (2008).
- [2] M. Dinca, M. Pavelescu and C. Iorgulis. Collimated neutron beam for neutron radiography, Romanian Journal of Physics, 51(3) (2006) 435–441.
- [3] H. Berger. Advances in neutron radiographic techniques and applications: a method for nondestructive testing, Applied radiation and isotopes, 61 (2004) 437–442.
- [4] AEOI, Isfahan Miniature Neutron Source Reactor (MNSR) Safety Analysis Report (SAR), AEOI Internal Report. NSTRI, Iran (2011).
- [5] P. Kandlakunta, L.R. Caon and P. Mulligan. Measurement of internal conversion electrons from Gd neutron capture, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 705 (2013) 36–41.
- [6] S.W. Morgan and J.C. King. Neutron Beam Characterization of the Neutron Beam Facilities at the GSTR TRIGA Reactor, Transactions of the American Nuclear Society, 104 (2011) 205–206.
- [7] T. Nemeč, J.J. Rant, E. Kristof and B. Glumac. Characterization of the Ljubljana TRIGA thermal column neutron radiographic facility, Second Regional Meeting of the nuclear society of Slovenia, Portoroz, Slovenia (1995).
- [8] American Society for Testing and Materials International, Standard Method for Determining Image Quality in Direct Thermal Neutron Radiographic Examination, Standard ASTM E545-05 (2005).
- [9] American Society for Testing and Materials International, Standard Test Method for Determining Neutron Fluence, Fluence Rate, and Spectra by Radioactivation Techniques, ASTM International, ASTM Standard E261-10, (2010).
- [10] F.Y. Hsu, M.C. Chiu, Y.L. Chang, C.C. Yu and H.M. Liu. Estimation of photon and neutron dose distributions in the THOR BNCT treatment room using dual TLD method, Radiation Measurements 43 (2008) 1089–1094.
- [11] H.R. Vega-Carrilloa, K.A. GuzmanGarcia, E. Gallego and A. Lorente. Passive neutron area monitor with pairs of TLDs as neutron detector, Radiation Measurements 69 (2014) 30–34.