

طراحی و ساخت یک سیستم جدید پرتونگاری نوترونی در رآکتور تحقیقاتی تهران

محمدحسین چوپان دستجردی*، حسین خلفی، یاسر کاسه ساز، جواد امامی، حسین قدس و ارسلان عزتی

پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، تهران، ایران.

*تهران، انتهای خیابان کارگر شمالی، سازمان انرژی اتمی ایران، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، پژوهشکده رآکتور، کدپستی: ۱۴۳۹۹-۵۱۱۱۳

پست الکترونیکی: mdastjerdi@aeoi.org.ir

چکیده

برای دستیابی به یک باریکه‌ی نوترون حرارتی برای مقاصد پرتونگاری نوترونی، یک کولیماتور جدید نوترون در رآکتور تحقیقاتی تهران طراحی، نصب و مشخصه‌یابی شده است. رآکتور تحقیقاتی تهران، با قدرت ۵ مگاوات از نوع استخریاز با کندکننده‌ی آب سبک و دارای هفت بیم تیوب می‌باشد. کولیماتور نوترونی، که قسمت مهمی از سیستم پرتونگاری نوترونی است، درون بیم تیوب شش اینچی E نصب شده است. طراحی کولیماتور با استفاده از کد MCNPX انجام شده است. در طراحی کولیماتور نوترونی به منظور بهبود کیفیت باریکه، از پلی کریستال بیسموت به عنوان فیلتر گاما و گرافیت به عنوان کندکننده نوترون‌های سریع استفاده شده است. بر اساس این طراحی، نسبت L/D کولیماتور در محدوده‌ی ۱۵۰ تا ۲۵۰ قابل تغییر است. شار نوترون حرارتی در صفحه‌ی تصویر بین مقادیر $۱۰^6 \times ۶/۵$ تا $۱۰^6 \times ۲/۶$ می‌تواند متفاوت باشد. اندازه‌گیری‌های اولیه بر روی باریکه‌ی نوترونی پس از نصب کولیماتور درون بیم تیوب با استفاده از فعال‌سازی پولک‌های ایندیوم برای اندازه‌گیری شار نوترون و دزیمر TLD700 برای اندازه‌گیری دز گاما انجام شده است. نتایج نشان می‌دهد که تطابق خوبی بین نتایج محاسباتی و اندازه‌گیری وجود دارد و همچنین باریکه‌ی نوترونی سیستم حاضر، جهت مقاصد پرتونگاری نوترونی کیفیت مناسبی دارد و پارامترهای آن قابل قیاس با سایر سیستم‌های پرتونگاری نوترونی در دنیا است.

کلیدواژگان: پرتونگاری نوترونی، کولیماتور نوترون، MCNP، رآکتور تحقیقاتی تهران.

۱. مقدمه

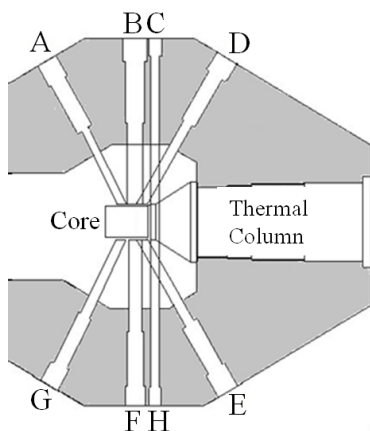
می‌گیرند [۲]. یک باریکه‌ی نوترونی مناسب برای پرتونگاری نوترونی باید حداکثر شدت نوترون‌های حرارتی ($۱۰^6 >$) با بیشترین میزان توزیع فضایی یکنواختی شدت و حداقل آلودگی به پرتوهای گاما ($۱۰^0 >$ n cm⁻² mrem⁻¹) را در صفحه تصویر داشته باشد [۳و۲]. برای دستیابی به چنین باریکه‌ای از یک کولیماتور نوترون استفاده می‌شود. کولیماتور نوترون علاوه بر موازی‌سازی نوترون‌های حاصل از منبع

هر سیستم پرتونگاری نوترونی از سه قسمت اصلی منبع تولید نوترون، کولیماتور و سیستم ثبت تصویر تشکیل می‌شود [۲و۱]. رآکتورهای هسته‌ای به دلیل شار پایدار و نسبتاً بالایی که ایجاد می‌کنند معمولاً بیشتر به عنوان منابع تولید نوترون سیستم‌های پرتونگاری نوترونی مورد استفاده قرار

۲. طراحی و شبیه‌سازی کولیماتور

۱.۲. انتخاب بیم تیوب رآکتور

رآکتور تحقیقاتی تهران از نوع استخری با قدرت ۵ مگاوات است. کندکننده و خنک‌کننده رآکتور آب سبک می‌باشد. همان‌طور که در شکل (۱) پیداست، رآکتور دارای هفت بیم تیوب می‌باشد که عملاً دستیابی به نوترون‌های تولید شده در قلب را به خارج از حفاظ بیولوژیکی آن فراهم می‌کنند [۸].



شکل (۱): نمای رآکتور تهران و موقعیت بیم تیوب‌ها نسبت به قلب

از میان بیم تیوب‌های رآکتور تحقیقاتی تهران، بیم تیوب ۶ اینچی E با توجه به برخی ملاحظات و محدودیت‌های فنی انتخاب گردید. این بیم تیوب به صورت شعاعی با زاویه‌ی ۶۰ درجه نسبت به قلب رآکتور قرار دارد و شامل یک لوله‌ی آلومینیومی درون یک محفظه‌ی استوانه‌ای از جنس استیل است که طول کلی آن ۳۰۴/۸ سانتی‌متر است.

همان‌طور که در شکل (۲) پیداست، بیم تیوب به صورت تلسکوپی و از سه قسمت با طول و قطر متفاوت تشکیل شده است: قسمت اول با طول ۱۷۶/۲ سانتی‌متر و قطر ۱۶/۶ سانتی‌متر، قسمت دوم با طول ۹۳/۳ سانتی‌متر و قطر ۲۰/۵ سانتی‌متر، و قسمت سوم با طول ۳۵/۳ سانتی‌متر و قطر ۳۵/۷ سانتی‌متر. ابعاد و شکل هندسی بیم تیوب یکی از محدودیت‌های ذاتی طراحی کولیماتور محسوب می‌شوند.

نوترونی، پرتوهای گاما و نوترون‌های سریع را به حداقل مقدار خود کاهش می‌دهد. بنابراین فیلترهای نوترون و گاما نیز بخشی از کولیماتور نوترونی محسوب می‌شوند. در هر سیستم پرتونگاری نوترونی، باید یک کولیماتور متناسب با شرایط و محدودیت‌های چشمه‌ی نوترونی موجود طراحی شود [۳و۴]. یک سیستم پرتونگاری نوترونی در بیم تیوب سراسری رآکتور تهران نصب شده است [۵]. پارامترهای باریکه‌ی نوترونی این سیستم در جدول (۱) نشان داده شده است.

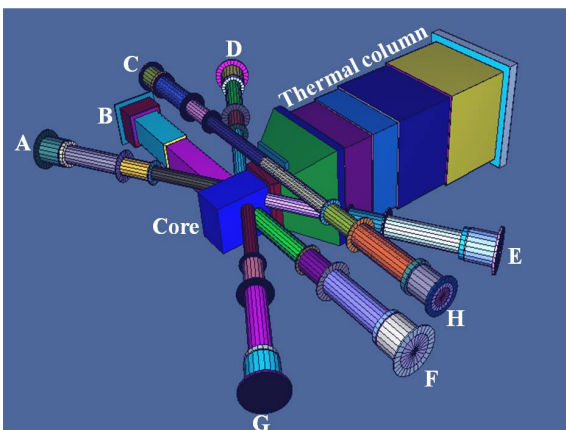
جدول (۱): مشخصات باریکه‌ی نوترونی سیستم پرتونگاری رآکتور تهران [۵].

پارامتر	مقدار
شار نوترون	$2/1 \times 10^4 \text{ n cm}^{-1} \text{ s}^{-1}$
نسبت نوترون به گاما	$4/14 \times 10^0 \text{ n cm}^{-1} \text{ mR}^{-1}$
L/D	۱۲۰

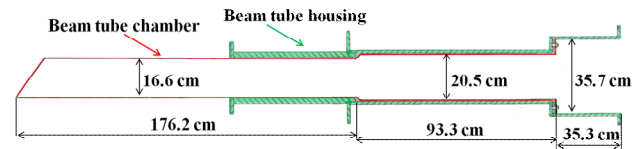
شار نوترون نسبتاً پایین این سیستم موجب افزایش زمان تصویرگیری می‌گردد که این امر، باعث افزایش دز گاما در محل صفحه تصویر و نهایتاً مه آلود شدن و افت کیفیت تصویر می‌گردد. در این پروژه، به منظور دستیابی به یک باریکه‌ی نوترونی مناسب جهت مقاصد پرتونگاری نوترونی، یک سیستم جدید پرتونگاری نوترونی با استفاده از رآکتور تحقیقاتی تهران به عنوان منبع نوترونی طراحی و ساخته شده است.

شبیه‌سازی‌های رآکتور و کولیماتور نوترون توسط کد محاسباتی MCNPX انجام شده است [۶]. شار نوترون و دز گاما نیز پس از نصب کولیماتور درون بیم تیوب به ترتیب توسط فعال‌سازی پولک و دزیترهای TLD700 اندازه‌گیری شده است [۷]. به عنوان اولین کاربرد این سیستم، یک شاخه گل رز و سه میله‌ی سوخت هسته‌ای تازه، با سه غنای متفاوت پرتونگاری شدند.

ساخت قطعات استفاده شود. برای افزایش میزان نوترون‌های حرارتی باریکه (TNC) و یکنواخت کردن توزیع شدت نوترون‌ها در ورودی بیم تیوب، یک قطعه گرافیت با خلوص هسته‌ای به طول ۱۰ سانتی‌متر و قطر ۱۶/۶ سانتی‌متر (برابر با قطر داخلی بیم تیوب) در ابتدای بیم تیوب، نزدیک به قلب رآکتور در نظر گرفته شد. برای کاهش میزان پرتوهای گامای باریکه، یک قطعه پلی کریستال بیسموت به طول و قطر ۱۰ سانتی‌متر به عنوان فیلتر گاما استفاده شد. از آنجایی که فیلتر گاما یک منبع پراکنده نوترون‌ها محسوب می‌شود [۱]، این قطعه بین گرافیت و قبل از روزنه قرار می‌گیرد. روزنه باید به گونه‌ای باشد که فقط اجازه ورود نوترون‌ها به کولیماتور را از حفره مرکزی خود بدهد و در نقاط دیگر جذب نماید. بنابراین یک دیسک از جنس بورال (آلیاژ آلومینیوم و B_4C) که جاذب قوی نوترون است به ضخامت ۳ سانتی‌متر با حفره‌ای دایره‌ای شکل به قطر ۲ سانتی‌متر در مرکز آن به عنوان روزنه استفاده شد. بدنه‌ی اصلی کولیماتور هم از جنس سرب که سطح خارجی آن استوانه‌ای و سطح داخلی آن به صورت مخروطی و اگر انتخاب شد. به‌منظور عدم ورود و جذب نوترون‌های پراکنده ای که به دیواره‌ی داخلی کولیماتور برخورد می‌کنند، دیواره‌ی داخلی کولیماتور با لایه‌ای از کادمیوم به ضخامت یک میلی‌متر پوشیده شد.



شکل (۳): مدل سه بعدی شبیه‌سازی MCNP قلب و بیم تیوب‌ها



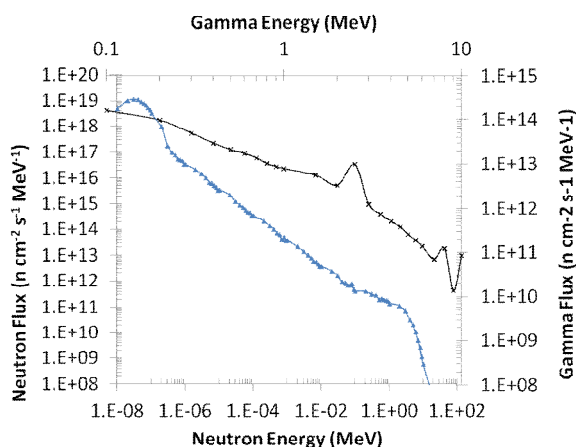
شکل (۲): نمایش اجزای بیم تیوب E به همراه ابعاد

۲.۲. طراحی کولیماتور

طراحی کولیماتور نوترونی تعیین‌کننده‌ی مشخصات باریکه‌ی نوترونی است. از این رو طراحی‌های کولیماتورهای سیستم‌های متعددی مطالعه شدند [۹-۱۲]. یکی از مدل‌هایی که بیشترین طراحی‌ها بر اساس آن انجام شده است، مدل واگرا می‌باشد. کولیماتورهای واگرا نسبت به سایر کولیماتورها تفکیک مکانی بهتری دارند [۲۱]. در این حالت یکی از پارامترهای مهم، نسبت موازی سازی یا همان L/D است که D قطر روزنه ورودی کولیماتور و L فاصله بین روزنه و صفحه تصویر می‌باشد. نسبت L/D تعیین کننده‌ی عدم تیزی هندسی می‌باشد به گونه‌ای که هرچه میزان این نسبت بیشتر باشد قدرت تفکیک افزایش می‌یابد.

در این پروژه مدل کولیماتور از نوع واگرا انتخاب شد. پارامترهای طراحی برای دستیابی به یک باریکه با شار نوترون حرارتی بیشتر از $10^6 \text{ n cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ در صفحه تصویر، نسبت موازی‌سازی (L/D) بیشتر از ۱۳۰ و واگرایی باریکه زیر ۴ درجه در نظر گرفته شدند. علاوه بر آن، طراحی بر مبنای یک باریکه با توزیع یکنواخت شار با قطر ۲۰ سانتی‌متر بر روی صفحه تصویر با نسبت نوترون به گامای بیشتر از $10^2 \text{ n cm}^{-2} \text{ mrem}^{-1}$ انجام شده است.

همان‌گونه که پیشتر اشاره شد، اولین محدودیت ذاتی طراحی کولیماتور، شکل هندسی و ابعاد بیم تیوب می‌باشد. یکی از محدودیت‌های دیگر، دسترسی به مواد جهت ساخت قطعات می‌باشد. کلیه‌ی طراحی‌ها به گونه‌ای انجام شدند که جهت کاهش هزینه‌ها، از مواد موجود و در دسترس برای



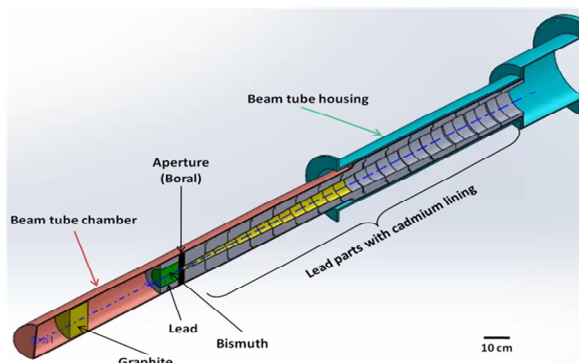
شکل (۵): طیف نوترون و گامای محاسبه شده در ابتدای بیم تیوب E

شار نوترون حرارتی و آهنگ دز گاما در امتداد بیم تیوب، زمانی که کولیماتور درون بیم تیوب قرار گرفته است، در شکل (۶) نشان داده شده است. در اثر حضور قطعات گرافیتی و پلی کریستال بیسموت قبل از روزنه، میزان نوترون حرارتی باریکه از ۵۲ درصد به ۷۹ درصد در محل روزنه افزایش یافته است. هدف اصلی از قرار دادن گرافیت در ابتدای بیم تیوب کاستن سهم نوترون‌های سریع طیف و همچنین یکنواخت کردن توزیع شار نوترون در ورودی بیم تیوب بوده است و ضخامت ۱۰ سانتی‌متر یک ضخامت بهینه است زیرا ضخامت‌های بیشتر منجر به جذب بیشتر نوترون‌های حرارتی و افزایش دز گامای ورودی به کولیماتور می‌شود. شار نوترون حرارتی در فاصله ۳۰۰ سانتی‌متری از روزنه (L/D برابر با ۱۵۰) برابر با $n \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ $6/5 \times 10^6$ محاسبه شد. همان‌گونه که در شکل (۶) مشاهده می‌شود، حضور بیسموت به‌عنوان فیلتر گاما و همچنین حفاظ سربی خارجی کولیماتور منجر به کاهش شدید دز گاما در صفحه تصویر (L/D برابر با ۱۵۰) از مقدار $9/08 \text{ rem/s}$ به $13/4 \text{ mrem/s}$ شده است.

نسبت نوترون به گاما در این حالت برابر با $n \text{ cm}^{-2}$ $4/85 \times 10^0 \text{ mrem}^{-1}$ محاسبه شد.

۳.۲. محاسبات و شبیه‌سازی‌ها

شبیه‌سازی‌ها در دو مرحله انجام شد. در مرحله اول، به‌منظور به‌دست آوردن طیف نوترون و گاما در ورودی بیم تیوب E، مجموعه‌ای قلب رآکتور، محیط اطراف آن (بیم تیوب‌ها) شبیه‌سازی انجام شد. در مرحله دوم، کولیماتور طراحی شده در بیم تیوب E قرار داده شد و تراپد نوترون و گاما به‌منظور بررسی عملکرد کولیماتور و محاسبه پارامترهای باریکه‌ی خروجی شبیه‌سازی شد. مدل سه‌بعدی MCNP قلب رآکتور (و محیط اطراف آن) و مدل طراحی شده‌ی کولیماتور به‌ترتیب در شکل‌های (۳) و (۴) نشان داده شده‌اند.



شکل (۴): مدل سه‌بعدی کولیماتور طراحی شده مورد استفاده در

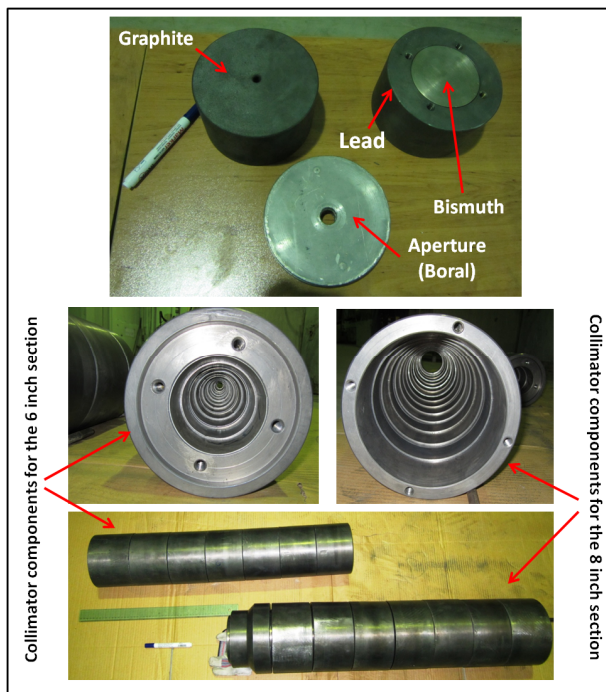
شبیه‌سازی MCNP

طیف نوترون و گامای محاسبه شده در ابتدای بیم تیوب E در شکل (۵) نشان داده شده است. شار نوترون کل و حرارتی در ابتدای بیم تیوب به‌ترتیب $7/2 \times 10^{12}$ و $n \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ $4/52 \times 10^{12}$ محاسبه شد. میزان نوترون‌های حرارتی این باریکه ۶۳ درصد است که نشان می‌دهد این بیم تیوب برای مقاصد پرتونگاری نوترونی مناسب است. میزان دز گامای باریکه برابر $88/54 \text{ Mrem/hr}$ محاسبه شد که این مقدار بالای دز گاما ناشی از شعاعی بودن بیم تیوب E می‌باشد زیرا این بیم تیوب دید مستقیم به قلب رآکتور دارد و پرتوهای گامای حاصل از شکافت و پاره‌های شکافت مستقیماً وارد آن می‌شوند.

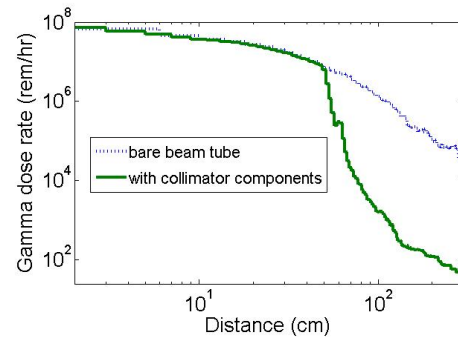
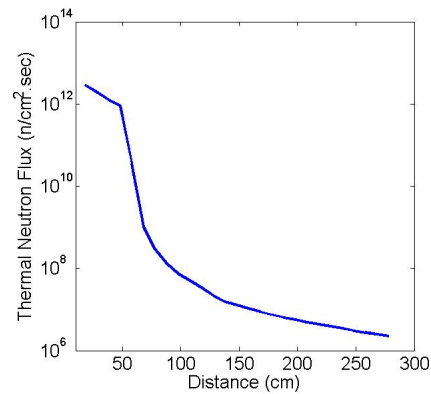
به منظور اطمینان از نصب کولیماتور درون بیم تیوب، به دلیل سنگین بودن مجموع وزن آن‌ها (بیش از ۷۰۰ کیلوگرم)، تحلیل تنش و تغییر شکل بیم تیوب توسط نرم‌افزار ABAQUS انجام شد. بیشینه‌ی تنش برابر $2/16 \text{ MPa}$ می‌باشد و در پوسته‌ی بیرونی بیم تیوب روی می‌دهد. این میزان تنش در مقایسه با حد تسلیم بیم تیوب (آلیاژ آلومینیوم ۶۰۶۱) که برابر با 110 MPa می‌باشد بسیار ناچیز است. بیشینه‌ی تغییر شکل بیم تیوب برابر با $0/11$ میلی‌متر است که در سر بیم تیوب روی می‌دهد و در مقایسه با طول کل بیم تیوب قابل اغماض است. نتایج حاصل از این تحلیل نشان می‌دهند که آسیبی به بیم تیوب در اثر نصب قطعات کولیماتور وارد نخواهد شد.

۳. ساخت، نصب و مشخصه‌یابی

همان‌طور که در شکل (۸) نشان داده شده است، طراحی مکانیکی و ساخت کولیماتور به صورت مدولار (قطعه‌قطعه) انجام شد.



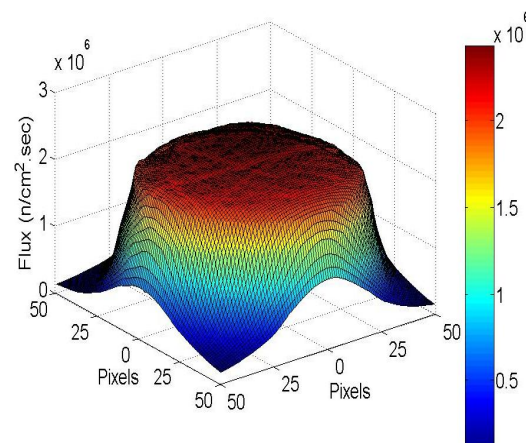
شکل (۸): قطعات ساخته شده‌ی کولیماتور نوترون



شکل (۶): بالا: شار نوترون حرارتی در امتداد بیم تیوب. پایین:

آهنگ دز گاما در امتداد بیم تیوب

توزیع مکانی شدت نوترون‌ها در خروجی کولیماتور در شکل (۷) نشان داده شده است. توزیع شدت نوترون‌ها بر روی صفحه‌ای به قطر ۲۰ سانتی‌متر، یکنواختی قابل قبولی دارد (با ± 2 درصد انحراف از مقدار میانگین). این توزیع شدت مناسب را می‌توان ناشی از پوشش داخلی کولیماتور دانست زیرا که با جذب نوترون‌های پراکنده شده از مسیر اصلی باریکه، اجازه‌ی ورود آن‌ها را به مسیر باریکه‌ی اصلی نمی‌دهند.



شکل (۷): توزیع فضایی شار نوترون بر روی صفحه تصویر

شار نوترون در ابتدای بیم تیوب برابر با $n \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ $7/3 \times 10^{12}$ با نسبت حرارتی ۶۱ درصد و در صفحه تصویر برابر $n \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ $6/1 \times 10^6$ با نسبت حرارتی ۷۰ درصد اندازه گیری شد. آهنگ دز گاما در صفحه تصویر نیز توسط ۵ عدد دزیتر TLD700 انجام شد. میزان دز گاما برابر با mrem/s $13/9$ اندازه گیری شد که در نتیجه نسبت نوترون به گاما برابر با $n \text{ cm}^{-2} \text{ mrem}^{-1}$ $4/85 \times 10^0$ اندازه گیری شد. شایان ذکر است که همه ی پرتودهی ها در قدرت ۳ مگاوات انجام شده است.

به عنوان اولین کاربرد از این سیستم پرتونگاری نوترونی یک نمونه ی گل رز و سه میله ی سوخت هسته ای با غناهای متفاوت (۱/۳۵، ۲/۵۹ و ۳/۳۵ درصد وزنی اورانیوم ۲۳۵) نیز مورد آزمون قرار گرفته شد. شکل (۹) تصاویر پرتونگاری نوترونی این نمونه ها را نشان می دهد. ثبت تصویر این نمونه ها با استفاده از مبدل گادولینیوم با ضخامت ۲۵ میکرومتر و فیلم AGFA structurix D3 انجام شد. در تصویر پرتونگاری نوترونی از گل رز، ساختار درونی آوند و هم چنین لایه های گلبرگ آن قابل مشاهده است. این امر را می توان ناشی از حضور آب درون آوند و گلبرگ ها دانست زیرا آب موجود در آن ها عامل ایجاد کنتراست در پرتونگاری نوترونی می باشد. در تصویر پرتونگاری نوترونی میله های سوخت، اجزای داخلی میله های سوخت نظیر فنرها و قرص ها به خوبی قابل مشاهده است. به علاوه، قرص های این میله ها با سطوح تیرگی متفاوتی دیده می شوند که این امر ناشی از غنای متفاوت این قرص ها است. قرص های تیره تر حاوی مقادیر بیشتری از اورانیوم ۲۳۵ می باشند (تضیف بیشتر) زیرا نوترون های حرارتی سطح مقطع های متفاوت و زیادی برای ایزوتوپ های اورانیوم ۲۳۵ (۷۰۰ بارن) و اورانیوم ۲۳۸ (۱۲ بارن) دارند [۱۳] و تشخیص مقادیر پایین تفاوت غنا نیز با این روش به صورت کیفی و کمی امکان پذیر است.

این نوع طراحی علاوه بر سهولت ساخت و نصب، این امکان را فراهم می کند که به منظور تغییر برخی پارامترهای باریکه ی نوترونی، تنها جزیی از کولیماتور را تغییر داد و نیازی به تغییر کل کولیماتور نیست. این قطعات پس از خالی نمودن بیم تیوب E درون آن نصب شدند و پس از آن پارامترهای باریکه ی نوترونی اندازه گیری شدند.

اندازه گیری شار نوترون کل و حرارتی توسط فعال سازی هم زمان پولک لخت ایندیوم و پولک با پوشش کادمیومی ایندیوم انجام شد. کادمیوم یک آستانه برای جذب نوترون های با انرژی کمتر از $0/4 \text{ eV}$ دارد و اکتیویته ای که پولک لخت پیدا می کند ناشی از سهم همه ی نوترون هاست اما اکتیویته ی پولکی که در پوشش کادمیوم است ناشی از سهم همه ی نوترون ها منهای نوترون های زیر $0/4 \text{ eV}$ می باشد. از این طریق می توان نسبت نوترون های حرارتی به کل نوترون ها را اندازه گیری نمود [۷].

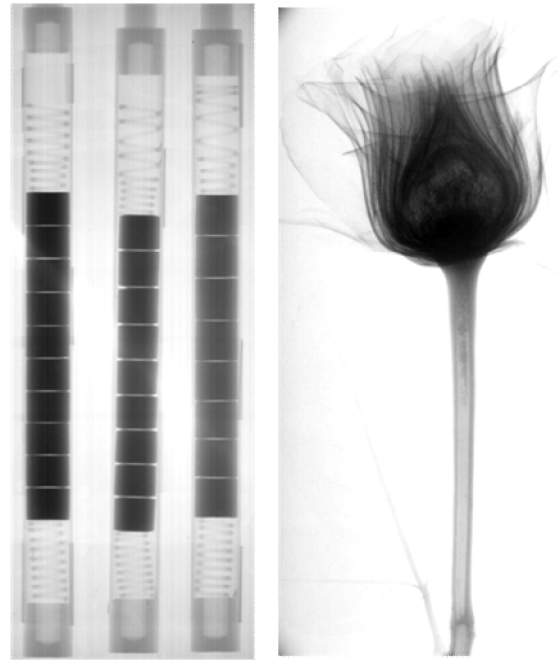
جدول (۲): مقایسه مشخصات باریکه ی نوترونی سیستم جدید

پرتونگاری رآکتور تهران با سایر سیستم های پرتونگاری دنیا

نام مرکز	منبع نوترون و شار آن ($n \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$)	شار نوترون ($n \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$)	L/D
رآکتور تهران (این پروژه)	رآکتور ۵ مگاوات $7/12 \times 10^{12}$	$2/26 \times 10^6$ تا	۱۵۰
North Carolina State University (NCSU) [4]	رآکتور یک مگاوات $2/5 \times 10^{12}$	$1/8 \times 10^6$ تا	۱۰۰
National Institute of Standards and Technology (NIST) [3]	رآکتور ۲۰ مگاوات 4×10^{14}	$4/75 \times 10^6$ تا	۲۸۰
Paul Scherrer Institute (PSI) [5]	چشمه اسپالیشن $1/1 \times 10^{14}$	$1/84 \times 10^7$ تا	۵۶۰
		$3/96 \times 10^6$ تا	۲۰۰
		$2/82 \times 10^7$ تا	۵۵۰

۴. نتیجه گیری

به منظور توسعه کاربردهای پرتونگاری نوترون در ایران یک سیستم پرتونگاری نوترون جدید در بیم تیوب E رآکتور تحقیقاتی تهران طراحی، نصب و مشخصه‌یابی شد. محاسبات طراحی توسط کد MCNPX انجام شد. طراحی‌ها با در نظر گرفتن همه‌ی محدودیت‌ها در جهت حصول بهترین باریکه‌ی نوترونی صورت گرفته است. اندازه‌گیری‌های باریکه نوترونی نشان می‌دهد شار نوترون حرارتی در صفحه تصویر تقریباً برابر با $4/1 \times 10^6 \text{ n cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ با نسبت نوترون به گامای برابر با $4/85 \times 10^0 \text{ cm}^{-2} \text{ mrem}^{-1}$ در نسبت L/D برابر با ۱۵۰ می‌باشد و این نتایج همان‌گونه که در جدول (۲) مشاهده می‌شود در محدوده سیستم‌های معتبر پرتونگاری نوترون در جهان هستند. در آینده‌ای نزدیک این سیستم به تجهیزات تصویربرداری دیجیتال و امکانات تصویربرداری از سوخت‌های پرتو دیده مجهز خواهد شد.



شکل (۹): تصاویر پرتونگاشت‌های نوترونی میله‌های سوخت هسته‌ای (چپ) و گل رز طبیعی (راست)

۵. مراجع

- [1] J.C. Domanus, Practical Neutron Radiography, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Holland, (1992).
- [2] IAEA, TECDOC-1604, Neutron Imaging: A Non-Destructive Tool for Materials Testing, Report of the coordinated research project, (2008).
- [3] J.F.W. Markgraf, Collimators for Thermal Neutron Radiography, D. Reidel, Dordrecht, (1987).
- [4] M. Dinca, M. Pavelescu, C. Iorgulis, Collimated neutron beam for neutron radiography, Rom. J. Phys (2006) 51 (3-4), 435-441.
- [5] K.K. Moghadam, A. Tabatabaieian, Neutron Radiography facility for AEOI nuclear research center, Proceedings of the Second World Conference on Neutron Radiography, Paris, (1986) 25-32.
- [6] D.B. Pelowitz, MCNPX user's manual, Los Alamos National Laboratory, Los Alamos, (2005).
- [7] ASTM International E261-10, Standard Practice for Determining Neutron Fluence, Fluence Rate, and Spectra by Radioactivation Techniques. Unated States of America (2010).
- [8] Safety Analysis Report of Tehran Research Reactor, Atomic Energy Organization of Iran, Tehran, Iran (2009).
- [9] K.K. Mishra, Ayman I. Hawari, and V.H. Gillette, Design and Performance of a Thermal Neutron Imaging Facility at the North Carolina State University PULSTAR Reactor, IEEE TRANSACTIONS ON NUCLEAR SCIENCE, VOL. 53, NO. 6, DECEMBER (2006) 3904-3911.
- [10] D.S. Hussey, D.L. Jacobson, M. Arif, P.R. Huffman, R.E. Williams, J.C. Cook, New neutron imaging facility at the NIST, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 542 (2005) 9-15.
- [11] E. Lehmann, H. Pleinert, L. Wiesel, Status of the installation of a new neutron radiography facility at the spallation neutron source SINQ, Proceedings of the Fifth World Conference on Neutron Radiography, Berlin, (1996), 444.
- [12] U. Garbe, T. Randall, C. Hughes, The new neutron radiography/tomography/imaging station DINGO at

OPAL, Nuclear Instruments and Methods in Physics
Research A 651 (2011) 42–46.

[13] JEFReport 14 , Table of simple integral neutron
cross-section data. OECD, France (1994).