



مقایسه پارامترهای کیفیت تصاویر پرتونگاری نوترونی با باریکه تکفام و غیر تکفام در راکتور

تحقیقاتی تهران

سیاوشی فخر، فائزه*^(۱) - جعفری، حمید^(۱) - کاسه ساز، یاسر^(۲) - غلامزاده، زهره^(۲) - اصلانی مناره

بازاری، زینب^(۱)

(۱) دانشگاه شهید بهشتی، دانشکده مهندسی هسته‌ای، کاربرد پروتوها

(۲) سازمان انرژی اتمی، پژوهشکده علوم و فنون هسته‌ای، پژوهشکده راکتور و ایمنی

چکیده:

در این پژوهش، پرتونگاری نوترونی در دو کانال D و E راکتور تحقیقاتی تهران که به ترتیب باریکه نوترون حرارتی تکفام و غیر تکفام تولید میکنند، با دو نمونه استاندارد شاخص خلوص باریکه و شاخص حساسیت مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهد که تصاویر با باریکه تکفام محتوای پراکندگی کمتری نسبت به تصاویر با باریکه غیر تکفام دارند، همچنین باریکه تکفام در زمینه‌های دیگر از جمله محتوای تولید زوج، گاما و پراکندگی با درصد اختلاف به ترتیب $48/8\%$ ، $94/48\%$ ، $61/31\%$ نسبت به باریکه غیر تکفام بهینه‌سازی شده است. بنابراین برای نمونه‌های صنعتی که محتوای پراکندگی تصاویر در آن‌ها حائز اهمیت است، بهتر است تصویربرداری با باریکه تکفام انجام شود.

کلمات کلیدی: پرتونگاری نوترونی، باریکه تکفام، راکتور تهران، شاخص خلوص باریکه، شاخص حساسیت

۱. مقدمه

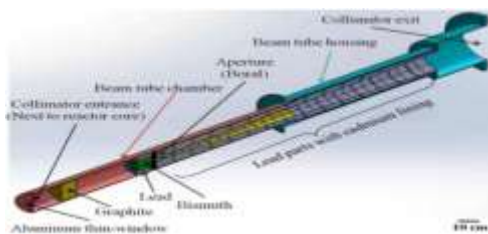
پرتونگاری نوترونی به عنوان یک روش مکمل تصویربرداری پرتو ایکس به صورت یک آزمون غیر مخرب در صنعت، بسیار مورد توجه می‌باشد. فرایند اصلی در اینجا برخورد نوترون‌های حاصل از یک چشمه تولید کننده نوترون (مانند راکتور) به یک جسم، تضعیف نوترون‌ها در آن و ثبت توسط یک آشکارساز حساس به مکان در پشت جسم می‌باشد [1]. پرتونگاری نوترونی معمولاً از باریکه سفید (غیر تکفام) حرارتی یا سرد برای دستیابی به شار نوترونی بالا (نسبت به روش تکفام) و در نتیجه مدت زمان کمتر پرتو دهی استفاده می‌کند. با این حال، به علت اینکه برخی ویژگی‌های اجسام که بسیار وابسته به طول موج هستند با پرتونگاری غیر تکفام قابل مشاهده و بررسی نیستند، در بعضی از موارد از پرتونگاری تکفام (با یک طول موج مشخص و نه طیف پیوسته‌ای از طول موج‌ها) استفاده میشود. در روش غیر تکفام مشکلات بسیاری برای اندازه‌گیری اجزای نمونه در تصویر به علت دو پدیده پراکندگی و سختی باریکه، ناشی از وابستگی ضریب تضعیف اجزای نمونه به انرژی‌های مختلف باریکه فرودی، وجود دارد که تصویربرداری با باریکه نوترون تکفام اثرات سختی باریکه را حذف میکند و همینطور در صورتی که طول موج‌های مورد استفاده فراتر از لبه‌های براگ نمونه باشد ($\lambda > 2d_{max}$ که d_{max} بزرگترین فاصله شبکه بلوری در ماده نمونه است) پراکندگی براگ نیز متوقف می‌شود.

با حذف پراکندگی، پراکندگی هایی که از مواد هیدروژنی موجود در ماده نمونه به وجود می آیند و یکی از عوامل نویز زمینه هستند، نیز حذف شده در نتیجه تصویری با کنتراست بالا خواهیم داشت. بنابراین در برخی موارد که وضوح و قدرت تفکیک تصویر اهمیت بیشتری دارد حتی با بهای از دست دادن بخش قابل توجهی از باریکه نوترونی و در نتیجه کمتر شدن شدت باریکه و در نهایت بیشتر شدن مدت زمان تابش دهی، اولویت با پرتونگاری تکفام است [2]. تکفام سازی باریکه نوترونی با استفاده از تکفام سازهای برشگرهای انتخاب سرعت، تکفام سازهای دو بلوری یا چند بلوری (روش اسلیت) و روش زمان پرواز (در منابع پالسی) انجام می پذیرد.

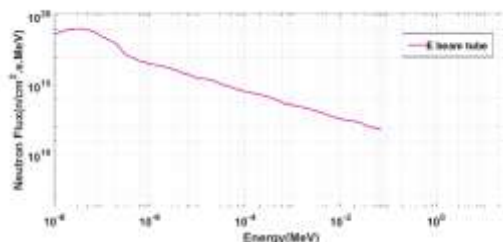
پارامترهای کیفیت تصاویر نشان دهنده ویژگی های باریکه از جمله محتوای نوترون حرارتی، گاما، تولید زوج و پرتوهای پراکنده میباشد که از طریق بررسی چگالی نوری در بخش های مختلف تصاویر دو شاخص خلوص باریکه و شاخص حساسیت طبق استاندارد E 545-05 از استاندارد های ASTM^۱ بدست می آید [3].

۲. باریکه های نوترونی راکتور تحقیقاتی تهران

راکتور تحقیقاتی تهران با توان 5 MW دارای ۸ کانال پرتویی است. کانال ها عموماً از جنس آلومینیوم هستند که داخل حفاظ بتنی راکتور قرار گرفته اند. شار نوترون حرارتی تولید شده در این راکتور $3/5 \times 10^{13} \text{ ncm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ است. 7 کانال پرتوی (A, B, C, D, E, F, G) به صورت شعاعی هستند و کانال هشتم (H) به صورت مماسی است. در چند سال اخیر سیستم پرتونگاری نوترونی با باریکه حرارتی غیر تکفام در کانال E راکتور راه اندازی شده است. همسوساز مورد استفاده دارای نسبت L/D ۱۵۰ و شار نوترونی این کانال در محل نمونه $6/1 \times 10^6 \text{ ncm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ میباشد [4]. شماتیک همسوساز نصب شده در این کانال شعاعی در شکل ۱ (ب) نمایش داده شده است. طیف نوترونی دهانه خروجی کانال E در شکل ۱ (الف) نشان داده شده است.



(ب)

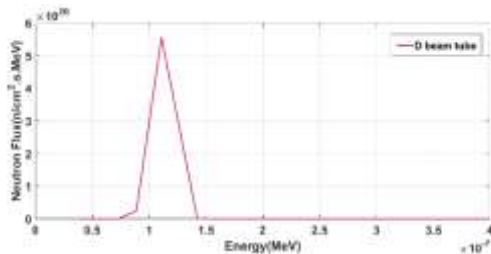


(الف)

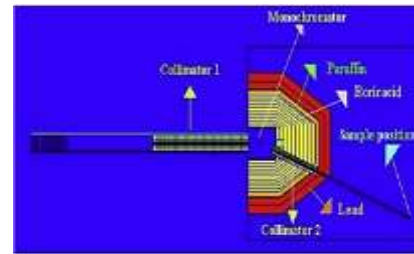
شکل ۱-الف: طیف نوترون دهانه خروجی کانال E. ب: همسوساز کانال E

^۱American Society for Testing and Materials

کانال D راکتور تهران مجهز به سیستم تکفام سازی باریکه نوترونی است و اجزای آن به ترتیب شامل همسوساز اول، از جنس فولاد با ابعاد $7 \times 11 \times 120 \text{ cm}^3$ ، تکفام ساز HOPG (بلور تکفام ساز) در فاصله 15 cm همسوساز اول، همسوساز دوم با ابعاد $6 \times 10 \times 60 \text{ cm}^3$ ، حفاظ متشکل از جعبه آهنی، پارافین، بوریک اسید و سرب به جهت کاهش دز نوترون های سریع و گاما ها که به عنوان تابش زمینه عمل میکنند، دریچه، محل قرارگیری نمونه، همسوساز سوم و در نهایت آشکارساز نوترونی است (شکل ۲. الف). طبق محاسبات انجام شده با کد Vitess باریکه نوترون تکفام بازتاب شده از HOPG دارای بیشینه شار $7 \times 10^6 \text{ n cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ است. همچنین بنا بر نتایج استنباط شده از این کد پس از بازتاب باریکه و ورود به همسوساز دوم هیچ اثری از نوترون های سریع به عنوان زمینه در این همسوساز وجود ندارد [5]. باریکه تکفام نوترونی در این کانال مطابق با زوایای مختلف قرارگیری بلور HOPG متفاوت است و در این مقاله طیف تکفام بدست آمده در زاویه ۷۵ درجه مطابق شکل ۲. ب، مورد بررسی قرار میگیرد که طیف آن در بازه طول موجی $1-1/5 \text{ \AA}$ قرار دارد و میانگین شار در این زاویه $5/16 \times 10^6 \text{ n cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ و در واقع شبیه سازی پرتونگاری با این طیف انجام میگردد.



(ب)



(الف)

شکل ۲، الف: نمایی از کانال D و تکفام ساز آن. ب: شار نوترون برحسب انرژی پس از بازتاب از تکفام ساز

۳. شاخص کیفیت تصویر

شاخص های کیفیت تصویر (IQI) توسط ASTM برای بررسی ویژگی تصاویر پرتونگاری که مستقیماً توسط آزمون پرتونگاری نوترون حرارتی تولید شده اند، طراحی شده است. استاندارد E 545-05 شاخص های کیفیت باریکه و استفاده از آن ها برای بررسی کیفیت باریکه نوترونی در یک پرتونگاری نوترون حرارتی توصیف میکند. شاخص های کیفیت باریکه شامل شاخص خلوص باریکه BPI و شاخص حساسیت SI^۵ میشوند [3].

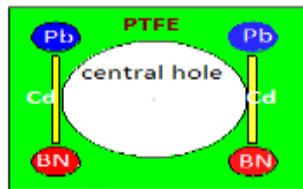
^۱Highly Oriented pyrolytic graphite

^۲Image Quality Indicator

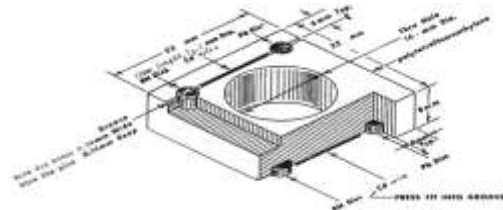
^۳Beam Purity Indicator

^۴Sensitivity Indicator

BPI یک مکعب از جنس PTFE^۱ با ابعاد $۲/۵ \times ۲/۵ \times ۸/۵$ cm است که شامل استوانه های بوران نیتريدی و سربی و یک سیم کادمیومی بین استوانه هاست (همین هندسه در سمت دیگر آن در سطح زیرین مکعب تکرار شده است). همچنین یک حفره بزرگ نیز در مرکز آن قرار دارد. چگالی نوری مربوط به هر یک از قسمت های مختلف این شاخص نشانگر یک پارامتر باریکه نوترونی توسط کد مونت کارلوی MCNPX [6] در این پژوهش نشان داده شده است. هندسه نمونه SI شبیه سازی شده نیز در شکل ۴ آورده شده است. این نمونه استاندارد 5 پله پلی اتیلنی است با ابعاد $1 \times 1 \times 2/25$ است. ضخامت های متفاوت پله ها منجر به ایجاد نواحی با اکتیویته متفاوت در صفحه تصویر (فیلم) میشوند و به این ترتیب پله ها در صفحه تصویر قابل شناسایی میشوند [7]. هر کدام از این نمونه ها به ترتیب در مقابل باریکه نوترونی غیرتکفام (کانال E) و تکفام (کانال D) قرار گرفته اند. برای بررسی داده های خروجی تصاویر شامل پرتوهای عبوری و پراکنده شده نیز از تالی پرتونگاری استفاده شده است. فاصله صفحه تصویر برای هر کدام از نمونه های BPI و SI به ترتیب $0/2$ cm و $1/5$ cm پشت آنها واقع در محور z است.

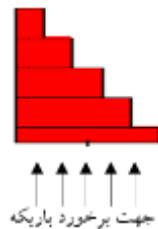


(الف)

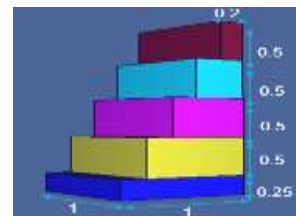


(ب)

شکل ۳، الف: شماتیکی از هندسه استاندارد BPI، ب: هندسه شبیه سازی شده با کد MCNPX



(ب)



(الف)

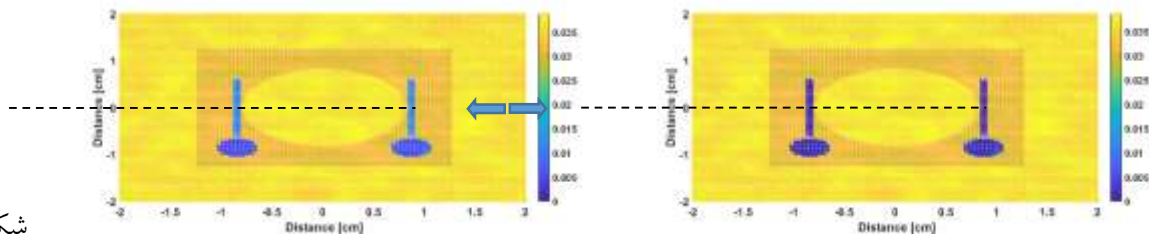
شکل ۴، الف: شماتیکی از هندسه استاندارد SI (ابعاد همگی به سانتی متر هستند)، ب: هندسه شبیه سازی شده

با کد MCNPX

^۱Polytetrafluoroethylene

۴. نتایج

تصاویر گرفته شده مربوط به پرتوهای عبوری و پراکندگی از نمونه BPI با طیف تکفام و غیر تکفام در شکل ۵ و ۶ به نمایش گذاشته شده است. اجزای نمونه به خوبی در تصاویر قابل مشاهده و تمایز هستند. تصاویر پرتونگاری حاصل از پرتوهایی هستند که بدون برهمکنش از نمونه عبور میکنند. استوانه‌های بوران نیتريدی و سیم‌های کادمیومی در تصویر تکفام با کمترین شار نمایش داده شده اند که علت آن جذب نوترون حرارتی توسط این جاذب‌ها است و نوترون کمی توانایی عبور و رسیدن به صفحه تصویر را داشته است. همچنین در تصویر غیر تکفام این استوانه‌ها و سیم‌ها قابل تمایز هستند با این تفاوت که سیم‌های کادمیومی شار بیشتری را نسبت به تصویر تکفام در صفحه تصویر نشان میدهند که علت آن محتوای پراکندگی بیشتر در این باریکه است (جدول ۱). حفره داخلی، مکعب PTFE و استوانه‌های سربی به ترتیب با شار بیشتری ظاهر شده اند که نشان میدهد نوترون حرارتی بیشتر از آن‌ها عبور کرده و جذب کمتر صورت گرفته است. چگالی‌های نوری مربوط به هر ۴ استوانه‌های روی سطح بالایی و پایینی، حفره داخلی و مکعب محاسبه شده و در فرمول‌های استاندارد برای بدست آوردن پارامترهای باریکه [3]، جاگذاری شده است. نتایج حاصل از این محاسبات در جدول ۱ به نمایش گذاشته شده است.



شکل ۵:

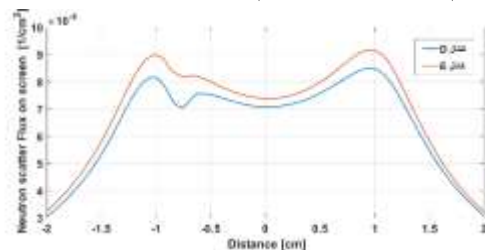
شکل ۶: تصویر BPI با نوترون غیر تکفام کانال E تصویر BPI با نوترون تکفام کانال D

جدول ۱: پارامترهای باریکه در دو کانال E و D

محتوای پراکندگی (S)	محتوای گاما (γ)	محتوای تولید زوج (P)	محتوای نوترون حرارتی (NC)	دسته بندی باریکه	پارامترهای باریکه
0/25%	0/16%	1/07%	79/51%	I	کانال D (تکفام)
0/63%	2/9%	2/09%	85/82%	I	کانال E (غیر تکفام)

طبق جدول ۱، محتوای نوترون حرارتی کانال E از کانال D، ۷/۳٪ بیشتر است. با استناد به جدول دسته بندی باریکه‌ها [3] هر دو باریکه در دسته اول قرار میگیرند. باریکه تکفام در زمینه‌های دیگر از جمله محتوای تولید زوج، گاما و پراکندگی

با درصد اختلاف به ترتیب $48/8\%$ ، $94/48\%$ ، $61/31\%$ نسبت به باریکه غیر تکفام بهینه سازی شده است. شکل ۷ مقایسه محتوای پراکندگی تصاویر دو کانال را در برشی از سطر مرکزی ماتریس تصاویر (فلش های آبی و خط چین ها در شکل ۵ و ۶) نشان می‌دهد. این شکل (۷)، نشان می‌دهد محتوای پراکندگی کانال E بیشتر از کانال D است. اگر در شکل ۷ از سمت چپ به راست حرکت کنیم مشاهده میکنیم که ابتدا پراکندگی افزایش پیدا میکند (تا نقطه $x = -0/44$)، با توجه به شکل های ۵ و ۶ این محدوده از بدو ورود به مکعب PFTE است تا جایی که به سیم کادمیومی میرسیم، در محدوده $x = -0/42$ تا $x = -0/38$ کاهش پراکندگی را مشاهده میکنیم که مربوط به سیم کادمیومی روی سطح بالایی است، سپس تا $x = -0/36$ به علت اینکه وارد مکعب میشویم پراکندگی افزایش میابد و مجددا با ورود به حفره داخلی پراکندگی کاهش میابد. روند افزایشی-کاهشی-افزایشی-کاهشی پراکندگی پس از خروج از حفره داخلی به ترتیب به علت ورود به مکعب، سیم کادمیومی روی سطح پایینی، ورود به مکعب و خروج کامل از مکعب ادامه پیدا میکند. با مقایسه محتوای پراکندگی دو باریکه در این تصویر به این نتیجه میرسیم که بیشترین اختلاف پراکندگی در نقاط ورود به مکعب تا حفره داخلی است که در این نقاط تصویر تکفام کمتر از غیر تکفام پراکنده شده است.

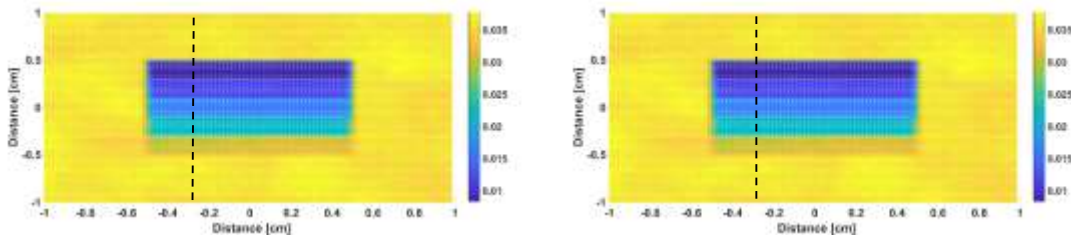


شکل ۷: پروفایل مقایسه محتوای پراکندگی دو تصویر تکفام و غیر تکفام نمونه BPI

تصاویر گرفته شده از نمونه SI توسط باریکه نوترونی حرارتی تکفام و غیر تکفام در شکل های ۸ و ۹ نشان داده شده است. هر ۵ پله در هر دو تصویر قابل تشخیص است. هر چه ضخامت پله ها افزایش پیدا میکند (از پایین تا بالا) شار صفحه تصویر کاهش پیدا میکند. برای بررسی این دو تصویر از لحاظ محتوای پراکندگی، ماتریس شار کل صفحه تصویر در حالتی که نمونه نداشته باشیم نسبت به ماتریس تصاویر پراکندگی هر دو باریکه تکفام و غیر تکفام بررسی کردیم و نتایج را در جدول ۲ گزارش کرده ایم. طبق جدول ۲ به این نتیجه میرسیم که پراکندگی در تصویر غیر تکفام کانال E $6/67\%$ بیشتر از تصویر تکفام کانال D است. شکل ۱۰ مقایسه محتوای پراکندگی تصاویر دو کانال را در برشی از ستون مرکزی ماتریس تصاویر نشان می‌دهد (فلش و خط چین در شکل ۸ و ۹ نشان دهنده مکان این ستون است). اگر طبق شکل های ۸ و ۹ از پایین به بالا و در شکل ۱۰ از سمت چپ به راست بررسی انجام دهیم، در ابتدا تا نقطه $0/08 \text{ mm}$ $y =$ (تا آخر پله سوم) روند پراکندگی افزایشی است. وقتی وارد پله چهارم میشویم تا آخر پله پنجم با یک روند کاهشی



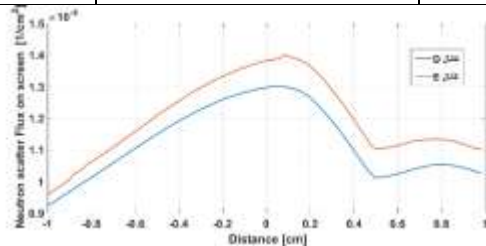
روبرو هستیم (به علت افزایش ضخامت) و سپس بدو ورود به فضای اطراف پراکندگی افزایش پیدا میکند. در تمامی این مراحل محتوای پراکندگی غیر تکفام بیشتر از تکفام است.



شکل ۸: تصویر SI با نوترون تکفام کانال D شکل ۹: تصویر SI با نوترون غیر تکفام کانال E

جدول ۲: مقایسه محتوای پراکندگی دو باریکه تکفام و غیر تکفام طبق تصاویر SI

میزان پراکندگی	میانگین ماتریس کل بدون نمونه	میانگین ماتریس پراکندگی با نمونه	نسبت ماتریس پراکندگی به ماتریس کل بدون نمونه
کانال D	0/03542	۰/۰۰۰۱۰۱	۰/۰۰۲۸
کانال E	0/03542	0/000107	۰/۰۰۳۰



شکل ۱۰: پروفایل مقایسه محتوای پراکندگی تصاویر تکفام نمونه SI کانال D و غیر تکفام کانال E

۵. بحث و نتیجه گیری

هدف این مقاله مقایسه دو باریکه نوترونی تکفام و غیر تکفام راکتور تحقیقاتی تهران در زمینه پرتونگاری بوده است. این مقایسه با استفاده از دو نمونه استاندارد BPI و SI صورت گرفت. طبق نتایج، هر دو باریکه تصاویر مناسبی ایجاد میکنند اما اگر این تصاویر با پارامترهای دیگر همچون پراکندگی سنجیده شوند، این نتیجه حاصل می شود که باریکه تکفام بهتر از باریکه غیر تکفام عمل کرده است. طبق تصاویر نمونه BPI، باریکه تکفام در مواردی از جمله محتوای تولید زوج، گاما و پراکندگی با درصد اختلاف به ترتیب ۴۸/۸٪، ۹۴/۴۸٪، ۶۱/۳۱٪ نسبت به باریکه غیر تکفام بهینه سازی شده است. با بررسی تصاویر SI نیز این نتیجه حاصل می شود که محتوای پراکندگی باریکه غیر تکفام در مقایسه با تکفام 6/97% بیشتر است. بنابراین در کل می توان نتیجه گیری کرد با توجه به اینکه پارامتر پراکندگی یکی از عوامل مهم در کیفیت



تصاویر پرتونگاری نوترونی به خصوص برای نمونه هایی شامل ترکیبات هیدروژن دار می باشد، استفاده از سیستم پرتونگاری نوترونی با باریکه تکفام کانال D راکتور تهران یک گزینه مناسب در این زمینه می باشد.

مراجع:

- 1- Sarah W. Morgan, Jeffrey C. King, Simulation of neutron radiograph images at the Neutron Radiography Reactor, 2013
- 2- M. Schulz, P. Böni, E. Calzada, M. Mühlbauer Energy-dependent neutron imaging with a double crystal monochromator at the Antares facility at FRM II.
- 3- Standard Test Method for Determining Image Quality in Direct Thermal Neutron Radiographic Examination1, Designation: E 545 – 05
- 4- M.H. Choopan Dastjerdi, H. Khalafi, Y. Kasesaz, S.M. Mirvakili, Design, construction and characterization of a new neutron beam for neutron radiography at the TRR, 2016
- 5- Z. Gholamzadeh, E. Bavarnegin, M. Lamehi Rashti, Modeling of neutron diffractometry facility of Tehran Research Reactor using Vitess 3.3a code and MCNPX codes.2017
- 6- MCNPX user's manual, Version 2.6.0, April 2008
- 7- Sarah W. Morgan, Jeffrey C. King, Simulation of neutron radiograph images at the Neutron Radiography Reactor