

بهبود کنتراست تصاویر نوترون رادیوگرافی به دست آمده با کمک دستگاه IECF بر پایه

بهینه‌سازی فاکتورهای هندسی مبتنی بر شبیه‌سازی MCNP

INC29-1095

محسن محرابی^{۱*}، سارا وثوقی^۱، نفیسه سالک^۲

۱. پژوهشکده کاربرد پرتوها، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، ۱۱۳۶۵۸۴۸۶، تهران - ایران

۲. پژوهشکده مواد و چرخه سوخت هسته‌ای، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، ۱۱۳۶۵۸۴۸۶، تهران - ایران

چکیده:

رادیوگرافی نوترونی برای حل بسیاری از مسائل مربوط به بازرسی اجسامی که با دیگر روش‌های تست‌های غیر مخرب همچون رادیوگرافی با اشعه X و امواج فراصوتی امکان‌پذیر نیست، استفاده می‌شود. به خاطر اینکه این روش بر پایه تضعیف نوترون در باریکه موازی استوار است، هم پراکندگی و هم جذب نوترون در جسم باعث تغییر شدت باریکه و تأثیر در کنتراست تصاویر نوترون رادیوگرافی خواهد شد. دستگاه هم‌جوشی هسته‌ای به روش محصورسازی الکتروستاتیکی جرمی (IECF) به دلیل توانایی آن در تولید نوترون‌های سریع با شار بالا یک دستگاه عالی برای رادیوگرافی نوترونی است. در این مطالعه، ابتدا با کمک کد مونت‌کارلو MCNP فرآیند رادیوگرافی نوترونی شبیه‌سازی شد سپس با توجه به نتایج به دست آمده از بهینه‌سازی پارامترهای هندسی، کنتراست تصاویر نوترون رادیوگرافی مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان می‌دهد که بهینه‌سازی پارامترهای هندسی سیستم رادیوگرافی مبتنی بر استفاده از دستگاه IECF، باعث انطباق خوب تصویر و شیء نسبت به هم، کاهش محوشدگی در تصویر و نیز افزایش کنتراست می‌گردد. لذا بهترین کنتراست در فاصله بهینه شیء-آشکارساز ۵۰ سانتی‌متر و فاصله بهینه منبع-شیء ۱۵۰ سانتیمتری در نظر گرفته شد. **کلیدواژه‌ها:** رادیوگرافی نوترون، مونت‌کارلو، IECF، کنتراست.

Improving the Contrast of Neutron Radiography Images Obtained by IECF Device Based on MCNP Simulation and Optimization of Geometric Factors

M. Mehrabi^{1*}, S. Vosoughi¹, N. Salek²

1. Radiation Application Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute (NSTRI), P.O.BOX: 11365-8486, Tehran, Iran.

2. Nuclear Fuel Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute (NSTRI), P.O.BOX: 11365-8486, Tehran, Iran.

Abstract:

Neutron radiography is used to solve many problems related to the inspection of objects that are not possible with other non-destructive testing methods such as x-ray radiography and ultrasound waves. Because this method is based on the attenuation of neutrons in the parallel beam, both scattering and absorption of neutrons in the object will change the intensity of the beam and affect the contrast of neutron radiographic images. The inertial electrostatic confinement fusion (IECF) is an excellent device for neutron radiography due to its ability to produce fast neutrons with high flux. In this study, first the process of neutron radiography was simulated with the help of MCNP code, then the contrast of neutron radiography images was evaluated according to the results obtained from the optimization of geometrical parameters. The results show that the optimization of the geometrical parameters of the radiographic system based on the use of the IECF device causes a good adaptation of the image and the object to each other, reducing blurring in the image and increasing the contrast. Therefore, the best contrast was considered at the optimal object-detector distance of 50 cm and the optimal source-object distance of 150 cm.

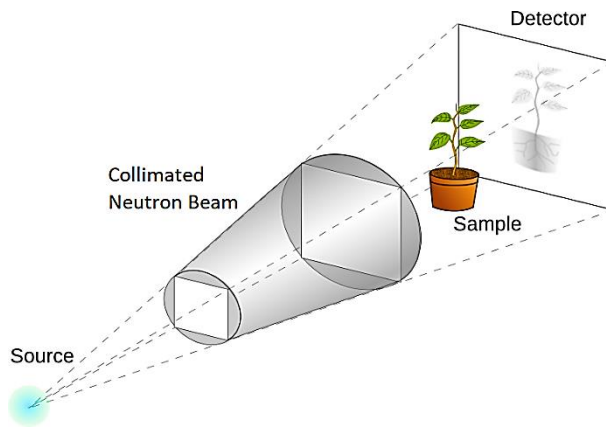
Keywords: Neutron radiography, Monte-Carlo, IECF, Contrast.

۱. مقدمه

تصویربرداری نوترونی به‌عنوان یکی از روش‌های آزمون غیر مخرب مواد، به‌سرعت در حال توسعه و پیشرفت بوده که دارای مزیت‌های بارزی نسبت به تصویربرداری پرتوی ایکس معمول است. برخلاف پرتوهای ایکس، نوترون‌ها با مواد گوناگونی با سطح مقطع‌های مشخص که تا حد زیادی مستقل از عدد اتمی مواد (Z) است برهم‌کنش می‌کنند، در نتیجه تصویربرداری نوترونی قادر به تشخیص مواد با عدد اتمی یکسان و یا مواد با عدد اتمی پایین است حتی اگر این مواد توسط موادی با عدد اتمی بالا پوشیده شده باشند.

نوترون رادیوگرافی^۱ (NRG) ایجاد تصویر از اشیاء به‌وسیله عبور تابش نوترون از آن می‌باشد. تصویر شکل‌گرفته بر اساس تضعیف باریکه نوترونی عبوری از شیء مورد نظر می‌باشد که بسیار شبیه به تصویربرداری با اشعه ایکس است [۱]. ضریب تضعیف نوترون‌های حرارتی از ماده‌ای به ماده دیگر به‌شدت متفاوت است بنابراین در بعضی موارد بسته به سطح مقطع جذب نوترون‌های حرارتی اجزای جسم ممکن است واضح‌تر شوند.

در شکل ۱ اصول پیکربندی یک سیستم تصویربرداری نوترونی به شکل ساده‌ای نشان داده شده است. نوترون‌های ساطع‌شده از چشمه توسط یک موازی‌ساز به سمت جسم هدایت شده و با مواد نمونه برهم‌کنش می‌کنند [۲]. آشکارساز در پشت جسم، تمامی نوترون‌های عبوری چه آن‌هایی که با جسم برهم‌کنش کرده‌اند و چه آن‌هایی که برهم‌کنش نکرده‌اند را ثبت می‌نماید. صفحه آشکارساز عمدتاً به‌طور عمود بر باریکه قرار می‌گیرد و به‌صورت یک آرایه دوبعدی از نقاط تصویر می‌باشد. یک تصویر دوبعدی را می‌توان به‌صورت یک تابع دومتغیره $f(x,y)$ تعریف کرد، که x و y جهت‌های مختصات فضایی هستند و دامنه f در مختصات (x,y) شدت و یا تراز خاکستری^۲ تصویر در هر نقطه نامیده می‌شود. تراز خاکستری می‌تواند بیان‌کننده هر خصوصیتی از جسم باشد و بستگی به چشمه‌ای که برای ایجاد تصویر مورداستفاده قرار می‌گیرد دارد. در حالت کلی هر نوع تصویری از جسم، می‌تواند بیان‌کننده پارامترهای فیزیکی متفاوتی از آن جسم باشد [۳].



شکل ۱. پیکربندی ساده‌ای از یک سیستم تصویربرداری نوترونی.

در تصویربرداری نوترونی، دسترسی به چشمه‌های نوترونی با شار بالا حائز اهمیت می‌باشد. به‌منظور انجام رادیوگرافی نوترونی می‌توان از منابع نوترونی مناسب مانند راکتورهای تحقیقاتی شکافت، چشمه‌های رادیواکتیو مانند امرسیوم-برلیوم و یا کالیفرنیم-۲۵۲، شتابدهنده‌ها و مولدهای نوترونی استفاده نمود [۴]. دستگاه محصورسازی الکترواستاتیکی-اینرسی (IECF^۳) به‌عنوان یک مولد نوترون، از معدود دستگاه‌های گداخت هسته‌ای است که کارکرد پیوسته داشته و می‌تواند منبع تولید انواع پرتوهای یون‌ساز باشد. در صورت تزریق گاز دوتریوم، نوترون‌های ناشی از واکنش گداخت D-D تولید می‌شوند که دارای انرژی ۲٫۴۵ MeV هستند و در صورت تزریق مخلوط گاز تریتیوم و دوتریوم، نوترون‌های

¹ Neutron Radiography

² Gray level

³ Inertial Electrostatic Confinement Fusion

حاصل از واکنش گداخت D-T، با انرژی ۱۴٫۱ MeV تولید می‌شود. در این دستگاه شاری در حدود 10^{11} و در شرایطی 10^{13} نوترون بر ثانیه (n/s) می‌تواند گسیل شود [۵].

پراکندگی نوترون باعث تیرگی و ماتی در تصویربرداری رادیوگرافی نوترون می‌شود. این تعریف یکی از مشکلات مهم در رادیوگرافی نوترونی می‌باشد. لذا بهینه‌سازی فاکتورهای هندسی سیستم تصویربرداری می‌تواند به بهبود کیفیت تصاویر و افزایش کنتراست کمک نماید. از همین رو در این مطالعه ابتدا با کمک کد مونت کارلو MCNP فرآیند رادیوگرافی نوترونی شبیه‌سازی می‌گردد و پس از آن با توجه به نتایج به دست آمده از بهینه‌سازی پارامترهای هندسی سیستم تصویربرداری، کنتراست تصاویر نوترون رادیوگرافی مورد ارزیابی قرار خواهد گرفت.

۲. روش کار

رادیوگرافی نوترونی مبتنی بر تصویربرداری از جسم مورد بررسی پس از عبور نوترون از آن است. بسته به تضعیف نوترون‌ها در طول مسیر، تصویر سایه‌ای از جسم بر روی آشکارساز ثبت می‌گردد. این تصویر سایه‌ای دوبعدی از نمونه، اطلاعات اولیه در ارتباط با جزئیات داخلی جسم در مقیاس ماکروسکوپی ارائه می‌دهد. اگر نمونه‌ای را با ضریب تضعیف Σ (cm^{-1}) در نظر بگیریم شدت تابش عبوری I، از یک نمونه را می‌توان با استفاده از رابطه ۱ به دست آورد:

$$I = I_0 \exp(-\Sigma x) \quad (1)$$

در این معادله I_0 شدت اولیه‌ای است که توسط آشکارساز از پرتو نوترون در غیاب نمونه ثبت می‌گردد و x ضخامت نمونه است. به‌عنوان یک مورد ساده، اگر در این نمونه، یک ناهمگنی وجود داشته باشد و یا برخی از ساختارهای دارای ضخامت x' با ضریب تضعیف Σ' در نظر گرفته شود شدت پرتوی عبوری I_x ثبت شده توسط آشکارساز از رابطه ۲ به دست می‌آید:

$$I_x = I_0 \exp(-(\Sigma(x-x') + \Sigma'x')) \quad (2)$$

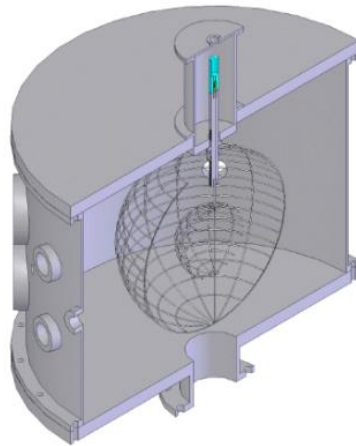
الگوی شدت ثبت شده توسط آشکارساز الگویی متفاوت را در موقعیتی منطبق با محل ناهمگنی درون نمونه با توجه به کل تصویر نشان می‌دهد. این اصل، اساسی است که برای شبیه‌سازی‌های انجام شده برای NRG دنبال می‌شود. دستگاه IECF، شامل دو الکتروود کروی مشبک هم‌مرکز بوده که الکتروود مرکزی کاتد به ولتاژ بالای منفی و الکتروود بیرونی آند به زمین متصل شده و دو الکتروود در داخل یک محفظه خلأ (10^{-6} Torr) قرار می‌گیرند. در این دستگاه پس از تزریق گاز کاری دوتریوم به داخل محفظه، بر اثر تخلیه الکتریکی در فشار پایین، یونیزاسیون رخ داده و یون‌های تولیدشده بین دو الکتروود کروی مشبک شتاب داده می‌شوند. یون‌ها به سمت مرکز الکتروود کروی شتاب گرفته و در اثر برخوردی پی‌درپی در مرکز کره، انجام واکنش هم‌جوشی هسته‌ای را سبب می‌شوند. میدان الکتریکی کروی بین دو الکتروود باعث شکل‌گیری پلاسمای نسبتاً چگال و داغ در مرکز الکتروود مرکزی شده و حالت مناسبی برای واکنش‌های گداخت هسته‌ای پیوسته فراهم می‌شود [۶].

به‌منظور درک اثرات فیزیکی و تعیین کمی نتایج آن‌ها در رادیوگرافی نوترون، شبیه‌سازی مونت کارلو آزمایش‌ها، ابزار مؤثری است. تأثیر پارامترهایی همچون انرژی نوترون، پراکندگی نوترون، واگرایی پرتو، حساسیت آشکارساز، حفاظ سازی و غیره را می‌توان توسط شبیه‌سازی بررسی نمود و شرایط بهینه جهت حصول بهترین تصویر را تعیین کرد. در مقایسه با حل معادلات دیفرانسیل انتقال نوترون به صورت عددی، شبیه‌سازی مونت کارلو ابزار مناسبی برای محاسبه رادیوگرافی نوترونی است.

در این مطالعه، شبیه‌سازی با استفاده از کد مونت کارلو MCNPX2.7 انجام شده است. کد MCNP یکی از قوی‌ترین کدهای محاسباتی در انجام محاسبات هسته‌ای است که مهم‌ترین ویژگی آن استفاده از داده‌های انرژی پیوسته است. توسط این کد می‌توان هندسه و انتقال ذرات را در مسائل پیچیده با دقت بسیار خوبی مدل کرد. ویژگی‌های مهمی که MCNP را بسیار حائز اهمیت می‌کند شامل یک منبع عمومی قدرتمند، مجموعه گسترده از داده‌ها و واکنش‌های هسته‌ای که به صورت کتابخانه داده‌ها ارائه شده است، ساختار آماری دقیق، استفاده از تالی‌ها برای به دست آوردن کمیت‌های فیزیکی، تخمین خطاها و مجموعه‌ای بسیار غنی از تکنیک‌های کاهش واریانس می‌باشد که این

امکان را ایجاد می‌کند که بتوان تقریباً هر چیزی را که قابل تصور باشد به راحتی محاسبه نمود. این کد از داده‌های کتابخانه ENDF/B-VII برای سطح مقطع کل و جذب میکروسکوپی نوترون حرارتی استفاده می‌کند و برهم‌کنش‌های نوترونی را برای انرژی‌هایی تا 150 MeV به خوبی توصیف می‌کند [۷]. امروزه با ظهور قابلیت محاسبات رادیوگرافی با نسخه MCNPX، با استفاده از تالی رادیوگرافی TIR5 و نیز مش تالی، می‌توان تصاویر رادیوگرافی نوترونی را به خوبی به دست آورد. تکنیک رادیوگرافی MCNPX بر اساس تکنیک آشکار ساز نقطه‌ای می‌باشد که در آن آرایشی از آشکار سازهای نقطه‌ای، نقش فیلم عمل می‌کنند. این آشکار سازها به قدری به یکدیگر نزدیک هستند که می‌توانند تشکیل تصویر بدهند. هر آشکار ساز نقطه‌ای نقش یک المان از تصویر را ایفا می‌کند. با توجه به اینکه قابلیت جدا کردن مؤلفه‌های مختلف نوترون‌های پراکنده، نوترون‌های عبوری و نیز ترکیب هر دو نوع تابش وجود دارد، تالی رادیوگرافی TIR5 به یک ابزار قوی جهت مدل‌سازی رادیوگرافی و مخصوصاً رادیوگرافی نوترونی تبدیل شده است. موقعیت مکانی هر رد نوترون در خروجی کد متناسب با تالی استفاده شده در جدول داده‌ها ثبت می‌گردد. این داده‌های خروجی در رادیوگرافی پس از اجرای برنامه بایستی پردازش شوند تا به خروجی مناسب که قابل نمایش و تحلیل باشد تبدیل گردد.

در این شبیه‌سازی، با توجه به تشکیل پلاسمای داغ و چگال در مرکز کاتد و تقارن سیستم محفظه دستگاه، ناحیه تابش نوترون به صورت یک چشمه نوترونی همسانگرد در مرکز کاتد در نظر گرفته شد. محفظه خلأ به صورت استوانه‌ای با قطر و ارتفاع 60 cm و ضخامت 1 cm از جنس استیل ضدزنگ در نظر گرفته شده است. توزیع انرژی نوترون‌ها، به صورت تک انرژی با انرژی 2.45 MeV (گاز کاری دوتریوم) با شار 10^7 n/s در نظر گرفته شده است. شماتیک هندسه شبیه‌سازی شده در شکل ۲ نشان داده شده است.



شکل ۲. شماتیک هندسه شبیه‌سازی شده در MCNPX.

در این مطالعه به منظور بررسی فاکتورهای هندسی تأثیرگذار بر تصویر، از یک قطعه سرب ضخیم حاوی حفره‌هایی با سایزهای متفاوت در خارج از دستگاه تولید نوترون استفاده شده است. این حفره‌ها به طول 10 سانتی‌متر و دارای قطرهای مختلف 0.5 میلی‌متر، 1 میلی‌متر، 2 میلی‌متر، 3 میلی‌متر و 4 میلی‌متر در نظر گرفته شدند. برای به دست آوردن تصاویر رادیوگرافی از اجسامی که در برابر باریکه‌ای از ذرات نوترون قرار گرفته‌اند، از خاصیت تالی رادیوگرافی به روش Transmitted Image Projection استفاده گردید. در این روش آشکار ساز به صورت شبکه‌ای از آشکار سازهای نقطه‌ای با استفاده از کارت‌های FSN و Cn پیکسل بندی می‌شود. در واقع شبکه، نقش یک موازی‌ساز در جلوی آشکار ساز را ایفا می‌کند. به این صورت که برای هر واقعه از پرتوهای چشمه یا پرتوهای پراکنده شده، یک توزیع عبور پرتویی در هر یک از بسته‌های شبکه‌ای آشکار ساز ایجاد می‌شود که جهت آن‌ها برای هر نقطه‌ای شبکه کاملاً مشخص می‌باشد و یک توزیع عبور پرتوی ضعیف شده برای آن در نظر گرفته می‌شود. نوترون‌های خارج شده از چشمه با توجه به زاویه واگرایی باریکه به نمونه مورد نظر برخورد کرده و شدت نوترون‌ها به کمک تالی رادیوگرافی TIR5، بر

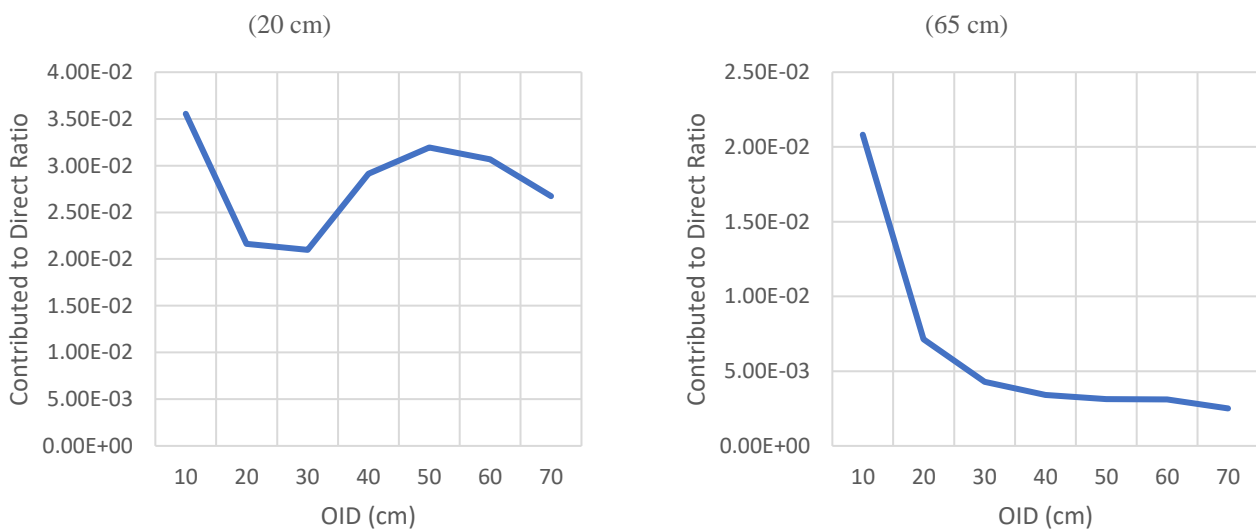
روی صفحه آشکار سازی پیکسل بندی شده، ثبت می شوند. تالی رادیوگرافی این قابلیت را دارد که می‌تواند علاوه بر به‌دست‌آمده آوردن توزیع کلی نوترون‌ها، توزیع نوترون‌های پراکنده‌شده را نیز بر روی صفحه آشکار ساز به دست آورد. به‌منظور بررسی تأثیر فاکتورهای هندسی در میزان کنتراست تصاویر نوترون رادیوگرافی و بهینه سازی آن، مقدار کمی کنتراست حفره‌ها طبق رابطه وبر^۴ که به‌صورت ذیل می‌باشد محاسبه گردید.

$$C = \frac{I - I_b}{I_b} \quad (3)$$

در این رابطه I و I_b به ترتیب شدت پرتوهای عبوری و پرتوهای زمینه می‌باشند.

۳. بحث و تحلیل نتایج

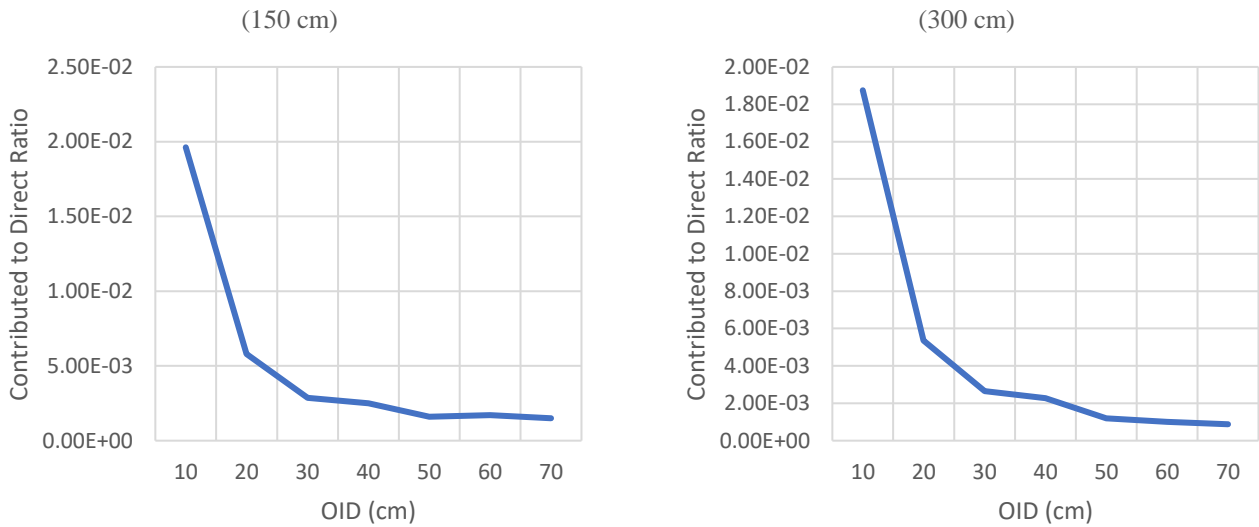
به‌منظور بررسی فاکتورهای هندسی تأثیرگذار بر تصویر، فاصله جسم تا منبع^۵ در ۴ حالت ۲۰، ۶۵، ۱۵۰، ۳۰۰ سانتیمتر و فاصله آشکار ساز تا جسم^۶ در ۴ حالت از ۱۰ تا ۷۰ سانتیمتر با گام‌های ۲۰ سانتیمتری مورد بررسی قرار گرفت. در شبیه‌سازی انجام‌شده تعداد ذرات نوترون ترابرد شده در حدود ۱۰^۷ ذره می‌باشد. همچنین در تمام محاسبات و شبیه‌سازی‌ها خطای آماری زیر ۱/۲٪ در نظر گرفته شد تا کیفیت تصویربرداری نوترون بالا رود. همان‌گونه که در شکل ۳ قابل‌مشاهده است، برای فاصله چشمه تا شیء ۲۰ سانتیمتری، به دلیل واگرایی زیاد باریکه پرتوهای چشمه نوترونی، با افزایش فاصله آشکار ساز تا جسم، سهم نوترون‌های پراکنده از روند مشخصی پیروی نمی‌کند. اما برای فواصل ۶۵، ۱۵۰ و ۳۰۰ سانتیمتر با افزایش فاصله آشکار ساز تا نمونه، به دلیل کاهش زاویه فضایی باریکه نوترونی و ایجاد باریکه‌ای تقریباً موازی، سهم پراکندگی در رادیوگراف‌ها کاهش می‌یابد. همچنین همان‌طور که از شکل ۳ قابل‌مشاهده است، برای فاصله آشکار ساز تا نمونه ۵۰ سانتیمتر، سهم نوترون‌های پراکنده تقریباً ۱/۰٪ از سهم نوترون‌های عبوری است. علاوه بر این از نمودارها دیده می‌شود که برای فواصل آشکار ساز تا شیء بزرگ‌تر از ۵۰ سانتیمتر، نسبت پرتوهای پراکنده به عبوری با شیب کمتری کاهش یافته و تقریباً ثابت است. بنابراین بهینه فاصله آشکار ساز تا شیء ۵۰ سانتیمتر در نظر گرفته شد. به‌منظور تعیین بهینه فاصله شیء تا چشمه، تصاویر نوترون رادیوگرافی به‌دست‌آمده از فانتوم بررسی گردیده و با توجه به کنتراست محاسبه‌شده، این فاصله بهینه تعیین شده است. مقادیر کمی کنتراست حفره‌ها برای فواصل مختلف شیء تا چشمه، در شکل ۴ آورده شده است.



⁴ Weber

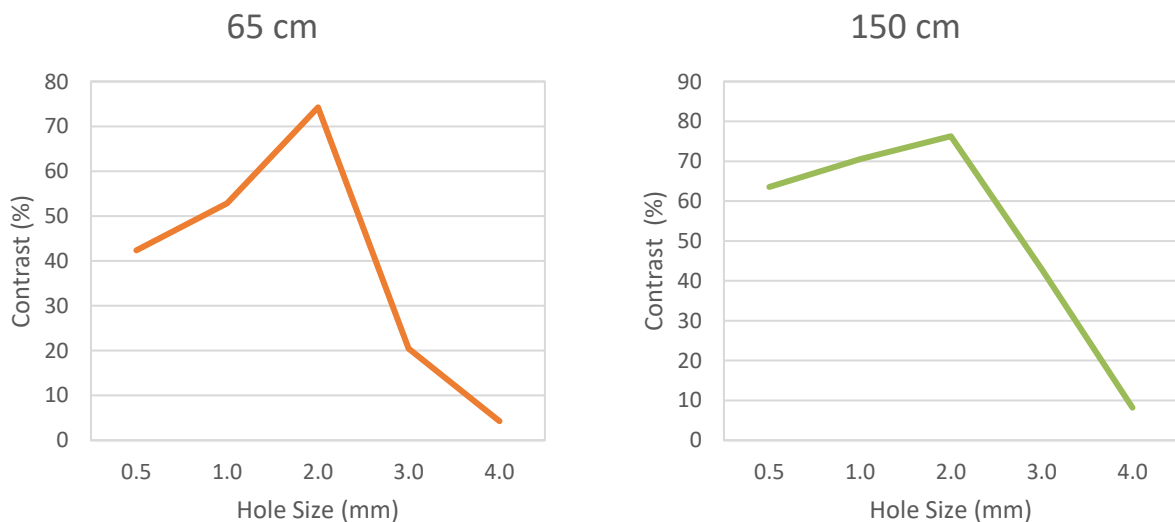
⁵ Source to Object Distance (SOD)

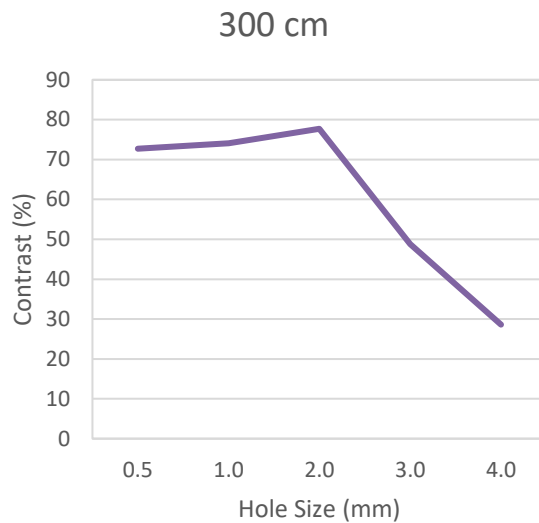
⁶ Object to Image Receptor Distance (OID)



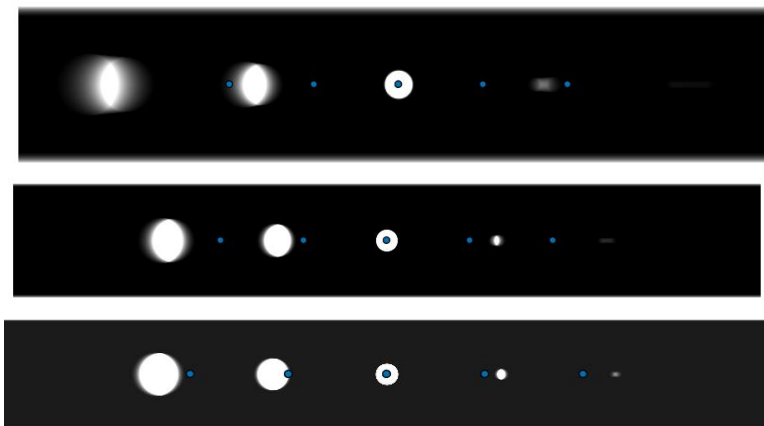
شکل ۳. نسبت نوترون‌های پراکنده به نوترون‌های مستقیم برای فواصل مختلف SOD بر حسب OID.

همان‌گونه که از شکل ۴ دیده می‌شود بهترین درصد کنتراست برای حفره‌ها در سه فاصله ۶۵، ۱۵۰ و ۳۰۰ سانتی‌متری برای حفره با قطر ۲ میلی‌متر می‌باشد و با افزایش و یا کاهش قطر حفره‌ها درصد کنتراست کاهش می‌یابد. این نتیجه بدین دلیل است که حفره با قطر ۲ میلی‌متر هم‌راستا با چشمه قرار دارد و دسته پرتو چشمه نوترونی برای این حفره کمترین واگرایی را دارد در حالی که سایر حفره‌ها در برابر باریکه‌ای واگرا قرار دارند. لذا برای تعیین بهینه فاصله شیء تا چشمه که دسته پرتویی موازی ایجاد می‌کند، کنتراست حفره ۲ میلی‌متری به‌عنوان مبنا در نظر گرفته می‌شود. نتایج نشان می‌دهد که برای هر قطر ثابت از حفره‌ها، با افزایش فاصله چشمه از شیء و به دلیل کاهش واگرایی باریکه و به سبب آن کاهش نوترون‌های پراکنده، درصد کنتراست حفره‌ها افزایش پیدا می‌کند و باعث می‌شود تصویر حفره‌ها برای کوچک‌ترین قطر نیز قابل مشاهده باشد. نتایج به‌دست‌آمده نشان داد که برای حفره با قطر ۲ میلی‌متر، مقدار کنتراست برای فاصله ۱۵۰ و ۳۰۰ سانتی‌متری به ترتیب برابر ۷۶/۲٪ و ۷۷/۷٪ است با توجه به اینکه مقادیر به‌دست‌آمده، کمتر از ۱۰ درصد اختلاف دارند لذا با در نظر گرفتن محدودیت فضایی و اجتناب از اختصاص فضای بزرگ‌تر برای تصویربرداری فاصله ۱۵۰ سانتی‌متری به‌عنوان فاصله بهینه در نظر گرفته می‌شود که نتایج برای تصاویر بازسازی شده به‌دست‌آمده از شبیه‌سازی در شکل ۵ قابل مشاهده می‌باشند.





شکل ۴. مقادیر کنتراست حفره‌ها برای SOD های مختلف در $OID=50$ سانتی‌متر.



شکل ۵. تصاویر بازسازی شده از حفره‌ها با قطرهای مختلف داخل نمونه سربی. به ترتیب از بالا به پایین برای $SOD=65cm$ ، $SOD=300cm$ و $SOD=150cm$

۴. نتیجه‌گیری

در این تحقیق، تأثیر فاکتورهای هندسی بر تصاویر شکل‌گرفته از نوترون رادیوگرافی، با استفاده از کد شبیه‌سازی مونت‌کارلوی MCNPX، برای نوترون‌های حاصل از واکنش گداخت D-D در دستگاه IECF با انرژی ۲٫۴۵ MeV مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج به‌دست‌آمده نشان داد که برای فواصل OID بزرگ‌تر از پنج برابر بعد عمود بر محور باریکه تابشی، سهم نوترون‌های پراکنده تقریباً ۰٫۱٪ از سهم نوترون‌های عبوری است. علاوه بر این با توجه به درصد کنتراست محاسبه‌شده و تصاویر بازسازی‌شده، فاصله SOD برابر با ۱۵۰ سانتی‌متر به‌عنوان فاصله بهینه جسم تا چشمه انتخاب گردید. نتایج این مطالعه در آزمایش‌های اولیه برای پروژه نوترون رادیوگرافی با استفاده از دستگاه IECF موجود در سازمان انرژی اتمی، به کار گرفته می‌شود.

۵. مراجع

1. P. von der Hardt and H. Röttger, Neutron radiography handbook: nuclear science and technology: Springer Science & Business Media, 2012.

2. Manual for the Syllabi Contained in AIEA-TECDOC-628 , 1992, Training Guidelines in Non-destructive Testing Techniques, International Atomic Energy Agency.
3. Berger, H, 1965, Neutron Radiography: Methods, Capabilities and Applications. Elsevier Publishing, New York.
4. G. Imel and G. McClellan, "Survey of neutron radiography facilities," Argonne National Lab. 1996.
5. H. Berger, Practical applications of neutron radiography and gaging: ASTM International, 1976.
6. V. Damideh, A. Sadighzadeh, A. Koohi, A. Aslezaem, A. Heidarnia, N. Abdollahi, et al., "Experimental study of the Iranian inertial electrostatic confinement fusion device as a continuous neutron generator," Journal of fusion energy, vol. 31, pp. 109-111, 2012.
7. M.B. Chadwick, P. Obložinský, M. Herman, N.M. Greene, R.D. McKnight, D.L. Smith, P.G. Young, R.E. MacFarlane, G.M. Hale, S.C. Frankle, and A.C. Kahler, "ENDF/B-VII. 0: next generation evaluated nuclear data library for nuclear science and technology", Nuclear data sheets, 107(12), pp.2931-3060, 2006.