

شبیه‌سازی مونت کارلو دستگاه IECF با استفاده از Geant4 به منظور استفاده در نوترون رادیوگرافی

سارا وثوقی^۱، پیمان رفیعی‌پور^۲، محسن محرابی^۱، مریم قیابوری^۳، نفیسه سالک^۴

۱. پژوهشکده کاربرد پرتوها، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی ایران، صندوق پستی: ۱۱۳۶۵-۳۴۸۶، تهران - ایران

۲. گروه مهندسی هسته‌ای، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه شیراز، صندوق پستی: ۷۱۹۳۶۱۶۵۴۸، شیراز - ایران

۳. پژوهشکده پلاسما و گداخت هسته‌ای، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی، صندوق پستی: ۱۴۳۹۹-۵۱۱۱۳، تهران - ایران

۴. پژوهشکده چرخه سوخت هسته‌ای، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی ایران، صندوق پستی: ۱۱۳۶۵-۸۴۸۶، تهران - ایران

*Email: m.ghapanvari@tabrizu.ac.ir

مقاله‌ی پژوهشی

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۰/۸/۱۸ تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۱۱/۳۰

چکیده

نوترون رادیوگرافی (NRG) یک روش تصویربرداری غیرمخرب جهت ایجاد تصویر با استفاده از تابش نوترون می‌باشد. در این پژوهش، مطالعات امکان‌سنجی رادیوگرافی نوترون با استفاده از منبع نوترونی مبتنی بر محصورسازی الکترواستاتیکی-اینرسی (IECF) توسط شبیه‌سازی به وسیله ابزار شبیه‌سازی مونت کارلو Geant4 انجام گردید. به منظور درک بهتر کارایی دستگاه جهت نوترون رادیوگرافی، اثر ضخامت‌های مختلف سرب بر روی تصویر و امکان تشخیص حفره‌هایی با سایزهای مختلف درون یک قطعه ضخیم سرب، بررسی شده است. کیفیت تصاویر حاصل شده برای پارامترهای مختلف برحسب کنتراست بررسی شده است. نتایج شبیه‌سازی، کارآمدی و محدودیت‌های NRG را برای تصویربرداری با استفاده از این دستگاه و مناطق احتمالی (از نظر ضخامت سرب و سایز حفره‌ها) که NRG می‌تواند اجرا شود، نشان داده است.

کلیدواژه‌ها: رادیوگرافی نوترونی، شبیه‌سازی مونت کارلو، Geant4، IECF

Monte Carlo simulation of IECF using Geant4 for neutron radiography

S. Vosoughi¹, P. Rafiepour², M. Mehrabi¹, M. Ghapanvari³, N. Salek⁴

1. Radiation Application Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute, AEOI, P.O.Box: 11365-3486, Tehran - Iran

2. Department of Nuclear Engineering, Faculty of Mechanical Engineering, Shiraz University, P.O. Box: 7193616548, Shiraz - Iran

3. Plasma and Nuclear Fusion Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute, AEOI, P.O. Box: 14399-51113, Tehran - Iran

4. Nuclear Fuel Cycle Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute, AEOI, P.O.Box: 11365-3486, Tehran - Iran

Research Article

Received 9.11.2021, Accepted 19.2.2022

Abstract

Neutron radiography (NRG) is a non-destructive imaging technique for image generation using neutron radiation. In this paper, feasibility studies of neutron radiography for IECF were performed by Geant4 Monte Carlo code. The effects of the different thicknesses of lead on the image and the detection possibility of cavities with different sizes inside a thick lead have been investigated to understand the performance of the device for neutron radiography purposes. The quality of the images was evaluated in terms of contrast. The simulation results showed the efficiency and limitations of NRG for IECF devices and the potential areas where NRG can be performed.

Keywords: Neutron radiography, Monte Carlo simulation, Geant4, IECF



۱. مقدمه

پرتونگاری نوترونی یا نوترون رادیوگرافی^۱ ایجاد تصویر از اشیاء به وسیله عبور تابش نوترون از آن می‌باشد. تصویر شکل گرفته بر اساس تضعیف باریکه نوترونی عبوری از شیء مورد نظر به دست می‌آید که این فرایند بسیار شبیه به تصویربرداری با اشعه ایکس می‌باشد. با توجه به متفاوت بودن نحوه تضعیف نوترون و اشعه ایکس در ماده، ایجاد تصویر توسط اشعه ایکس برای بعضی از مواد تقریباً غیرممکن بوده درحالی‌که تصویربرداری با استفاده از باریکه نوترونی به راحتی امکان پذیر است.

نوترون رادیوگرافی به‌عنوان یک روش غیرمخرب، جهت تصویربرداری از قطعات در حوزه‌های مختلف اعم از فضاوردی، انرژی و صنایع دفاعی کاربرد فراوانی دارد. علاوه بر این نوترون رادیوگرافی برای تصویربرداری از اشیاء پنهان شده، می‌تواند جهت کنترل عبور و مرور از مبادی و مکان‌های حساس به کار گرفته شود [۱]. در روش نوترون رادیوگرافی به‌منظور حصول تصویر با کیفیت بالا، باریکه موزی از نوترون‌ها با شار از مرتبه‌ی بیش‌تر از 10^4 n/s.cm² مورد نیاز می‌باشد. هرچه باریکه نوترونی شار بیش‌تر و واگرایی کم‌تری داشته باشد کیفیت تصاویر بالاتر خواهد بود [۲]. با وجود آن‌که در سال‌های اخیر مطالعات زیادی در این زمینه انجام شده است، نوترون رادیوگرافی هنوز به عنوان یک روش استاندارد و مرسوم مانند تصویربرداری با اشعه ایکس مورد استفاده قرار نگرفته است چراکه تصویربرداری با کیفیت عالی، نیازمند شار بالای نوترونی می‌باشد و ساخت چنین چشمه‌هایی بسیار پیچیده‌تر از مولدهای اشعه ایکس است [۱].

نوترون رادیوگرافی، کمی بعد از کشف نوترون در سال ۱۹۳۲ آغاز شد. آزمایش‌های اولیه در نوترون رادیوگرافی در آلمان در اواخر دهه‌ی ۱۹۴۰ توسط کالمن^۲ و کوهن^۳ انجام شد. در سال‌های ۱۹۳۵ تا ۱۹۳۸، به‌منظور بهبود روش‌های آشکارسازی فوتوگرافیکی نوترون‌ها، چشمه‌های Ra-Be و یک مولد نوترونی کوچک در آزمایشگاه تحقیقاتی استفاده گردید. بعد از جنگ جهانی دوم، رآکتورهای تحقیقاتی بسیاری ساخته شدند که همین امر باعث پیشرفت تحقیقات بر روی رادیوگرافی نوترونی گردید. دومین پیشرفت بزرگ در این مسیر، پیشرفت

در صنعت دستگاه‌های تصویربرداری دیجیتال از قبیل دوربین CCD^۴ بوده است [۳-۵].

به‌منظور انجام نوترون رادیوگرافی می‌توان از منابع نوترونی مناسب مانند رآکتورهای تحقیقاتی شکافت، چشمه‌های رادیواکتیو مانند امرسیوم-برلیوم و یا کالیفرنیم-۲۵۲، شتاب‌دهنده‌ها و مولدهای نوترونی استفاده نمود [۶، ۷].

در مورد تصویربرداری با نوترون ترمال/اپی‌ترمال، اجزای اصلی مانند منبع نوترونی، کولیماتور، سیستم پردازش تصویر و غیره به خوبی بهینه شده‌اند و طی سال‌ها در کاربردهای مختلف مورد استفاده قرار گرفته‌اند. با این حال، گزارش‌های بسیار کمی در مورد رادیوگرافی نوترونی سریع وجود دارد.

در سال ۱۹۹۷ رایموند^۵ و همکاران یک سیستم رادیوگرافی نوترون سریع را راه‌اندازی نمودند. با سیستم طراحی شده، از اجسامی به کوچکی یک سکه و به بزرگی یک ظرف ۱۹ لیتری رادیوگرافی گرفته شد. چشمه نوترون یک مولد نوترون MF Physics A-۷۱۱ بود که 3×10^{13} n/s با انرژی متوسط ۱۴/۵ MeV تولید می‌کرد. این گروه نشان دادند که رادیوگرافی نوترون سریع ابزار مفیدی برای تجزیه و تحلیل غیرمخرب بوده و هم‌چنین، از آن جایی که سطح مقطع با انرژی تغییر می‌کند، این روش می‌تواند به عنوان مکمل سایر اشکال رادیوگرافی که به صورت تجاری در دسترس هستند مورد استفاده قرار گیرد [۸]. توسعه یک سیستم رادیوگرافی نوترون سریع مبتنی بر مولد نوترون پرتابل در سال ۲۰۱۶ توسط چیاپی^۶ انجام شد. در مطالعه صورت گرفته تأثیر مخرب اشعه ایکس بر تصویر، به وسیله ترکیبی از یک ماده محافظ که بین دو صفحه تصویربرداری یکسان قرار گرفته است، کم شده و نتایج بهتری حاصل گردید [۹]. رادیوگرافی نوترون سریع با استفاده از چشمه نوترونی DT قابل حمل با بازده بالا، توسط دیوید^۷ و همکاران در سال ۲۰۲۰ انجام شد. در مطالعه مذکور، یک مولد نوترون قابل حمل با بازده 3×10^9 n/s برای تابش جسم با نوترون استفاده شد و تصاویر با رزولوشن فضایی ۰/۳۵ سیکل بر میلی‌متر حاصل گردید [۱۰].

دستگاه محصورسازی الکترواستاتیکی- اینرسی^۸ (IECF) 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،

4. Charge-Coupled Device

5. Raymond

6. Chia Jia Yi

7. David

8. Inertial Electrostatic Confinement Fusion

Journal of Nuclear Science and Technology

1. Neutron Radiography

2. H. Kallmann

3. Khun



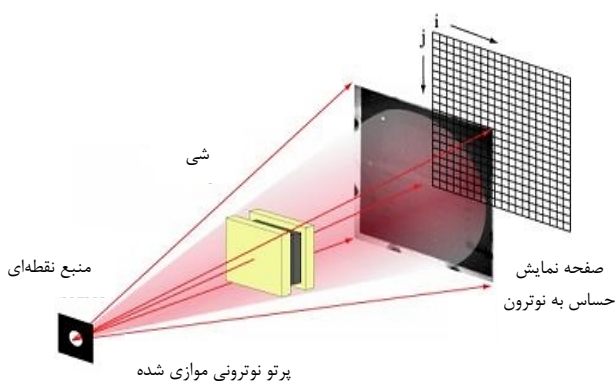
ساخت پایین به جهت سادگی نسبی ساختار، جابه‌جایی آسان، استحکام و امکان نصب در نزدیکی کاربر نهایی، این دستگاه به‌عنوان یکی از بهترین گزینه‌ها جهت تولید نوترون (در صورت استفاده از گازهای کاری دوتریوم و تریتیوم) شناخته شده است. در مطالعه حاضر به منظور بررسی کارایی دستگاه IECF موجود در سازمان انرژی اتمی ایران جهت نوترون رادیوگرافی، اثر ضخامت‌های مختلف سرب بر روی تصویر و بررسی حساسیت تشخیص حفره‌هایی با سایزهای مختلف درون یک قطعه سرب ضخیم، با استفاده از ابزار مونت‌کارلوی Geant4، برای نوترون‌هایی با انرژی ۲/۴۵ MeV و ۱۴/۱ MeV انجام گردید.

۲. روش کار

۱.۲ اصول نوترون رادیوگرافی

اصول پیکربندی یک سیستم تصویربرداری نوترونی در شکل ۱ به شکل ساده‌ای نشان داده شده است.

پروژه نوترون رادیوگرافی به طور کلی شامل مراحل زیر است: تولید نوترون توسط یک منبع نوترونی، همگرایی نوترون‌ها و ایجاد یک باریکه تقریباً تک جهت نوترونی، قرار دادن جسم در مسیر باریکه نوترون به منظور تصویربرداری از آن، و نهایتاً ایجاد تصویر از باریکه عبوری (باریکه فرودی تضعیف شده به خاطر اندرکنش‌های پراکندگی و جذب با هسته‌های اتمی موجود در عناصر نمونه). آشکارسازی که در پشت نمونه قرار دارد، یک تصویر دو بعدی از نمونه می‌دهد، لذا مطالعات در مورد مشخصات و ساختار داخلی نمونه بدون تخریب آن حاصل می‌گردد و عیب‌هایی مثل خلأ، ترک و تخلخل آشکار می‌شود [۱-۵].



شکل ۱. شماتیک سیستم تصویربرداری نوترونی.

نوترون‌های ناشی از واکنش گداخت D-D تولید می‌شوند که دارای انرژی ۲/۴۵ MeV هستند و در صورت تزریق مخلوط گازهای تریتیوم و دوتریوم، نوترون‌های حاصل از واکنش گداخت D-T، با انرژی ۱۴/۱ MeV تولید می‌شود. در این دستگاه حدود ۱۰^{۱۱} و در شرایطی ۱۰^{۱۳} نوترون می‌تواند گسیل شود [۱۱-۱۶].

استفاده از IECF به‌عنوان یک منبع نوترونی مفید برای نوترون رادیوگرافی، برای اولین بار در مرکز اتمی ژاپن انجام شد. در پژوهش انجام شده، مطالعات امکان‌سنجی نوترون رادیوگرافی با استفاده از یک منبع نوترونی الکترواستاتیک انجام شده و تصاویر توسط صفحه تصویربرداری نوترون (NIP^۱) ساخته شد. هم‌چنین به‌منظور تحلیل و ارزیابی امکان آزمایش نوترون رادیوگرافی، از کد مونت‌کارلو PHITS^۲ استفاده شده است [۱۷].

در مطالعه‌های دیگر، آزمایشات تصویربرداری با استفاده از یک منبع نوترونی IECF متوسط، به‌صورت غیرمستقیم با استفاده از یک فویل دیسپرسیوم (Dy) و یک صفحه تصویربرداری انجام شد. تصاویر نوترونی از اشیاء متشکل از شش پایه Cd و آرایه‌ای از پودر B^۴C موجود در یک تیغه فولاد ضدزنگ به‌دست آمد. نتایج شبیه‌سازی و آزمایشات تجربی تأیید کرد که منبع نوترونی IECF، حتی در شار نوترون نسبتاً کم ۱۰^۲ n/scm^۲ می‌تواند در رادیوگرافی نوترون به‌کار رود [۱۷]. طراحی یک سیستم FNR با استفاده از یک مولد نوترون D-T، توسط پیشرونی^۳ و همکاران در سال ۲۰۱۶ انجام شده است. مطالعات شبیه‌سازی با استفاده از کد GEANT4 انجام شده است. نتایج نشان داد که سیستم رادیوگرافی نوترونی سریع دارای سیستم تصویربرداری مبتنی بر دوربین ICCD، می‌تواند جهت تصویربرداری نوترونی مورد استفاده قرار گیرد [۱۸]. در سال ۲۰۲۱، مطالعه دیگری مبنی بر امکان استفاده از سیستم IECF جهت رادیوگرافی نوترون، توسط محققان ژاپنی انجام گردید. تجزیه و تحلیل اولیه تصاویر حاصل نشان داد که کنتراست تصاویر منطقی بوده است. با این حال برای انجام رادیوگرافی نوترون با دقت بالاتر، بهینه‌سازی پارامترهای تجربی مورد نیاز است [۱۹].

با در نظر گرفتن مزایای منبع نوترونی IECF، هم‌چون تولید نوترون در تمامی جهات (۴π)، منبع حجمی فشرده، هزینه

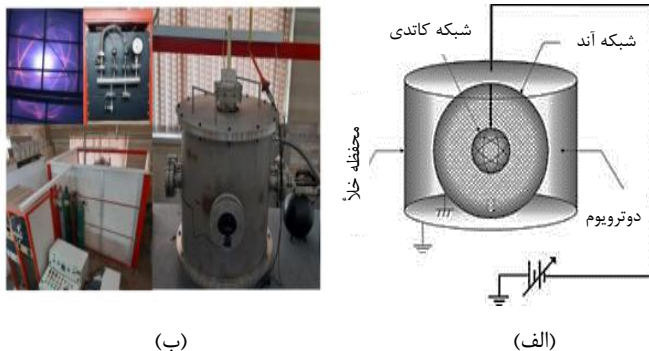
1. Neutron Imaging Plates
2. Particle and Heavy Ion Transport Code System
3. Bishoni



در SPNF-INST طراحی و ساخته شد. برای این دستگاه ولتاژ ۱۴۱ kV و جریان ۰/۱ mA و استفاده از گاز کاری دوتریوم، آهنگ تولید ۱۰^۷ نوترون MeV ۲/۴۵ در ثانیه گزارش شده است [۲۰]. در شکل ۲ (ب) نمایی از دستگاه IR-IECF نشان داده شده است. در حال حاضر به منظور بالا بردن نرخ واکنش هم‌جوشی هسته‌ای و افزایش شار نوترون تا ۱۰^{۱۰} (n/s)، طراحی و ساخت یک نمونه ارتقاء یافته از دستگاه IECF در این مرکز در حال انجام است. پارامترهای طراحی و بهره‌برداری دستگاه IR-IECF در جدول ۱ آورده شده است.

۳.۲ مدل‌سازی NRG

دستگاه نوترون رادیوگرافی معمولی متشکل از یک منبع نوترون، یک کولیماتور برای شکل دادن نوترون‌ها به شکل یک بیم نسبتاً جهت‌دار با میزان پراکندگی حداقلی، جسم مورد بررسی و یک مجموعه آشکارساز حساس به نوترون برای ثبت تصویر است. پراکندگی پرتوها در جهت‌های گوناگون اثر نامطلوبی در کیفیت تصویر نهایی خواهد داشت لذا یکی از مهم‌ترین بخش‌های رادیوگرافی نوترون هنگامی که منبع پرتو نوترونی به صورت نقطه‌ای است، موازی‌سازی پرتو می‌باشد. موازی‌سازی به دو صورت استفاده از دیواره‌های موازی و واگرا انجام می‌شود که دیواره‌ها نقش اساسی در حذف پرتوهای غیرموازی را دارند.



شکل ۲. الف) پیکربندی کلی دستگاه IECF، ب) محفظه اصلی و سیستم کنترل دستگاه IR-IECF.

پارامتر	مقدار
قطر کاتد	۱۳/۵ سانتی‌متر
قطر آند	۴۱ سانتی‌متر
قطر محفظه خلأ	۶۰ سانتی‌متر
ارتفاع محفظه خلأ	۶۰ سانتی‌متر
ولتاژ کاتد	۰-۸۰ کیلوولت
فشار دوتریوم	۱۰ ^{-۲} -۱۰ ^{-۳} × ۳/۴۹ میلی‌بار

همان‌گونه که گفته شد، 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 جزییات داخلی جسم در مقیاس میکروسکوپی ارائه می‌دهد. اگر نمونه‌ای را با ضریب میرایی خطی μ (cm⁻¹) در نظر بگیریم شدت تابش عبوری I، از یک نمونه را می‌توان با استفاده از رابطه ۱ به دست آورد.

$$I = I_0 \exp(-\mu y) \quad (1)$$

در این معادله I₀ شدت اولیه‌ای است که توسط آشکارساز از پرتو نوترون در غیاب نمونه ثبت می‌گردد و y ضخامت نمونه است. به عنوان یک مورد ساده، اگر در این نمونه، یک ناهمگنی وجود داشته باشد و یا برخی از ساختارهای دارای ضخامت x با ضریب میرایی خطی μ' در نظر گرفته شود شدت عبوری I_x ثبت شده توسط آشکارساز از رابطه ۲ به دست می‌آید:

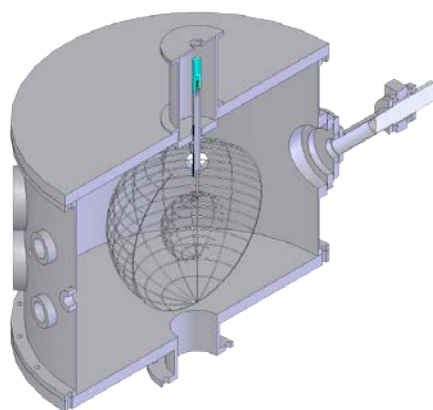
$$I_x = I_0 \exp(-(\mu(y-x) + \mu'x)) \quad (2)$$

الگوی شدت ثبت شده توسط آشکارساز در محل ناهمگنی‌ها (مثل ترک و تخلخل ...)، نسبت به الگوی ثبت شده بقیه تصویر، متفاوت است. شبیه‌سازی‌های انجام شده به منظور NGR، بر همین اصل استوار است.

۲.۲ مشخصات دستگاه IR-IECF

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 (۱۰^{-۹} Torr) قرار می‌گیرند. در این دستگاه پس از تزریق گاز کاری به داخل محفظه، بر اثر تخلیه الکتریکی در فشار پایین، یونیزاسیون رخ داده و یون‌های تولید شده بین دو الکتروود کروی مشبک شتاب داده می‌شوند. یون‌ها به سمت مرکز الکتروود کروی شتاب گرفته و در اثر برخوردهای 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. شکل ۲ (الف) پیکربندی کلی دستگاه IECF را نشان می‌دهد. اولین دستگاه ایرانی IR-IECF، در سال ۲۰۱۱





شکل ۳. شماتیک هندسه شبیه‌سازی شده در Geant4.

۲.۳.۲ نمونه در نظر گرفته شده

در این مطالعه به منظور امکان‌سنجی نوترون رادیوگرافی با دستگاه IECF، دو نمونه با هندسه‌های متفاوت به صورت زیر در نظر گرفته شده است:

نمونه ۱: گوه سربی با ضخامت‌های مختلف.

نمونه ۲: یک قطعه سرب ضخیم حاوی حفره‌هایی با سایزهای مختلف درون آن به منظور بررسی حساسیت تشخیص.

ترکیب عنصری مواد مختلف استفاده شده در شبیه‌سازی در جدول ۲ آورده شده است.

۳.۳.۲ اثر ضخامت سرب روی تصویر

به منظور بررسی اثر ضخامت نمونه بر تصویر، یک گوه پلکانی از جنس سرب با عرض و ارتفاع ۱ cm و ضخامت متغیر از ۲ cm تا ۲۸ cm با گام‌های ۲ cm در نظر گرفته شد. آشکارساز یک استوانه با ضخامت ۲ cm و شعاع ۸ cm تعریف گردید. پیکربندی این نمونه در ابزار شبیه‌سازی Geant4 در شکل ۴ نشان داده شده است.

۴.۳.۲ بررسی حساسیت تشخیص حفره‌هایی با سایزهای مختلف

درون یک قطعه سرب ضخیم

نمونه از یک بلوک جامد مستطیل شکل از جنس سرب (عرض = ۱ سانتی‌متر، ارتفاع = ۷ سانتی‌متر، ضخامت = ۱۰ سانتی‌متر) با تعدادی حفره هوا داخل آن تشکیل شده است. این حفره‌ها به طول ۱۰ سانتی‌متر و دارای قطرهای مختلف ۰/۵ میلی‌متر، ۱ میلی‌متر، ۲ میلی‌متر، ۳ میلی‌متر و ۴ میلی‌متر در نظر گرفته شدند. پیکربندی شی به عنوان فایل ورودی Geant4 در شکل ۵ نشان داده شده است.

در این مطالعه، شبیه‌سازی با استفاده از ابزار شبیه‌سازی مونت‌کارلوی Geant4 [۲۱] نسخه ۱۰/۷ انجام شده است. Geant4 یک محیط مجازی کارآمدی برای مدل‌سازی برهم‌کنش ذرات با ماده در طیف وسیعی از انرژی فراهم می‌سازد. مؤلفه‌های اصلی این ابزار شبیه‌سازی که در این مطالعه مورد استفاده قرار گرفته‌اند عبارتند از: کلاس Primary-Generator (برای تولید نوترون)، کلاس Detector-Construction (جهت ساخت چیدمان نمونه سربی و آشکارساز)، کلاس Physics-List (برای تعریف فیزیک مناسب جهت شبیه‌سازی برهم‌کنش‌های نوترون سریع) و کلاس Stepping-Action (جهت ذخیره‌سازی اطلاعات ترابرد به صورت گام‌به‌گام). در این شبیه‌سازی، از کتابخانه فیزیکی QGSP-BIC-HP برای تعریف فیزیک برهم‌کنش‌ها استفاده شد. این بسته با دقت بالا از داده‌های کتابخانه ENDF/B-VII استفاده می‌کند و برهم‌کنش‌های نوترونی را برای انرژی‌های کم‌تر از ۲۰ MeV به خوبی توصیف می‌کند [۲۲]. موقعیت مکانی هر ردّ نوترون به صورت هیستوگرام دوبعدی با استفاده از ابزار آماری ROOT [۲۳] ثبت گردید. هم‌چنین توزیع شار نوترون در آشکارساز، با استفاده از روش مش‌بندی به دست آمد.

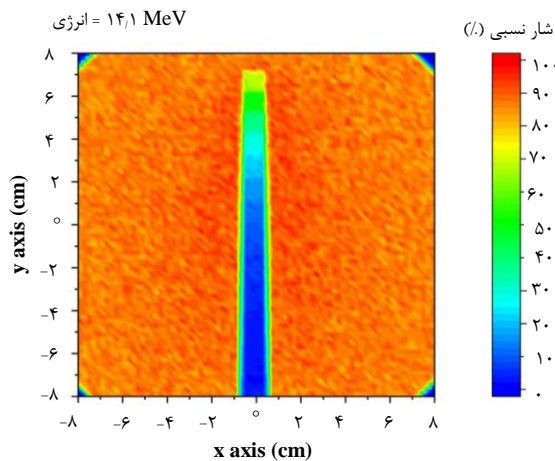
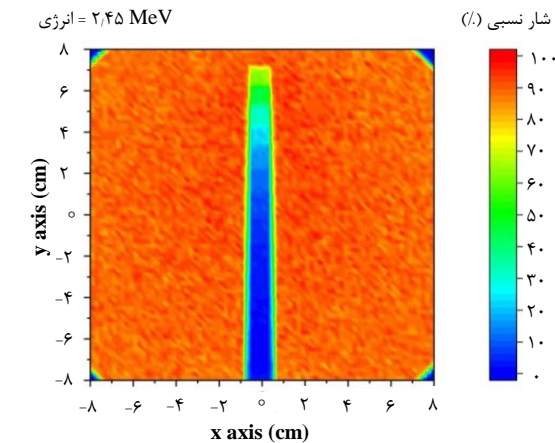
۱.۳.۲ چشمه نوترونی

در این شبیه‌سازی، با توجه به تشکیل پلاسمای داغ و چگال در مرکز کاند و تقارن سیستم محفظه دستگاه، ناحیه تابش نوترون به صورت یک چشمه نوترونی همسانگرد در مرکز کاند در نظر گرفته شد. محفظه خلأ به صورت استوانه‌ای با قطر و ارتفاع ۶۰ cm و ضخامت ۱ cm از جنس استیل ضدزنگ در نظر گرفته شده است. به دلیل وجود موازی‌ساز در دهانه خروجی دستگاه، نوترون‌ها در یک مخروط فضایی با زاویه رأس ۱۳ درجه به سمت نمونه سربی گسیل می‌شوند. توزیع انرژی نوترون‌ها، به صورت تک انرژی با انرژی‌های ۲/۴۵ MeV (گاز کاری دوتریوم) و ۱۴/۱ MeV (گاز کاری دوتریوم-تری‌تیوم) در نظر گرفته شد. فاصله چشمه نقطه‌ای نوترون تا سطح انتهایی نمونه مورد مطالعه برابر با ۶۵ cm، بهره نوترونی دستگاه 10^{10} n/s، فاصله آشکارساز تا چشمه ۷۵ cm و جنس آشکارساز ZnS(Ag) در نظر گرفته شده است. شماتیک هندسه شبیه‌سازی شده در شکل ۳ نشان داده شده است.

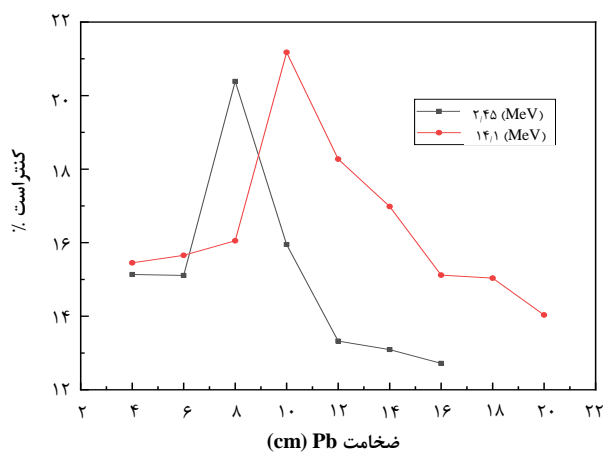


$$C = \frac{I - I_b}{I_b} \quad (3)$$

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



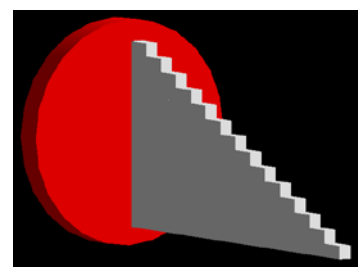
شکل ۶. شار نسبی نوترون‌های عبوری از گوه سربی و فرودی بر آشکارساز حاصل از Geant4 برای نوترون‌هایی با انرژی ۲٫۴۵ MeV و ۱٫۴۱ MeV.



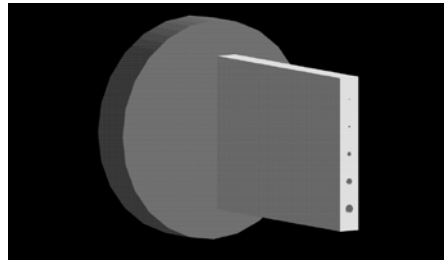
شکل ۷. نمودار کنتراست نسبی در مرزها برای گوه پلکانی با ضخامت ۲ تا ۲۸ سانتی‌متر برای نوترون‌هایی با انرژی ۲٫۴۵ MeV و ۱٫۴۱ MeV.

جدول ۲. ترکیب عنصری مواد مورد استفاده در شبیه‌سازی Geant4

ماده	ترکیب	کسر تشکیل‌دهنده (%)	چگالی (g/cm ³)
استیل ضد زنگ	C	۰٫۱۵	۸
	Si	۰٫۵	
	P	۰٫۰۲۳	
	S	۰٫۰۱۵	
	Cr	۱۹	
	Mn	۱	
	Fe	۶۹٫۴۴۸	
	Ni	۱۰	
سرب	سرب	۱۰۰	۱۱٫۳۵
هوا	نیتروژن	۷۰	۰٫۰۰۱۲۹
	اکسیژن	۳۰	



شکل ۴. شماتیک هندسه شبیه‌سازی‌شده در Geant4 برای ضخامت‌های مختلف سرب.



شکل ۵. شماتیک پیکربندی نمونه ۲ در نظر گرفته شده (بلوک سربی حاوی حفره‌هایی با قطر متفاوت).

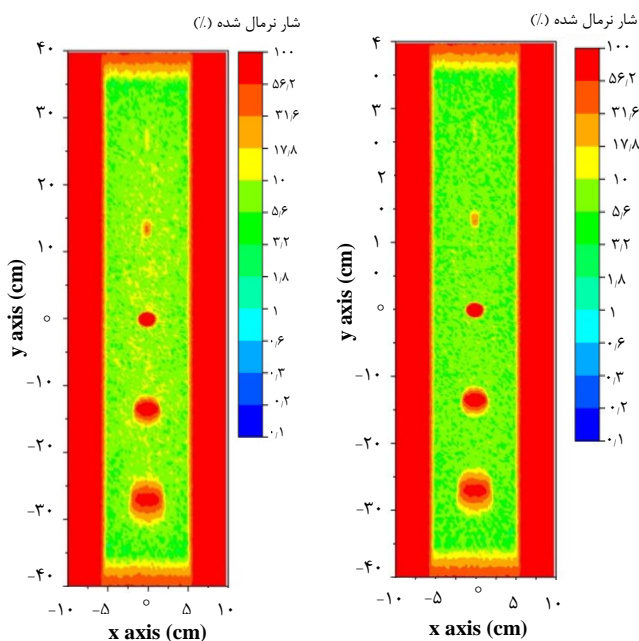
۳. نتایج و بحث

۱۱.۳ اثر ضخامت سرب روی تصویر

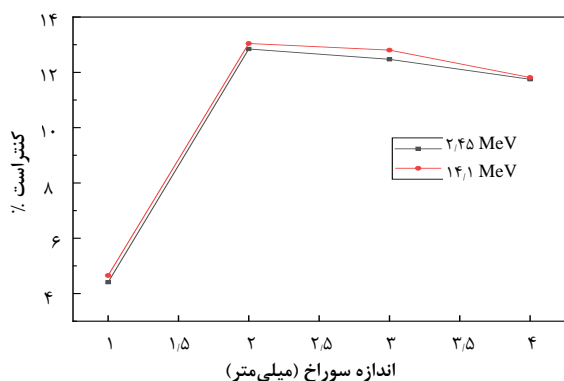
در این شبیه‌سازی، توزیع دو بعدی نوترون انتقال‌یافته از نمونه‌های سربی با ضخامت‌های مختلف، با استفاده از ابزار مونت‌کارلوی Geant4، برای انرژی‌های نوترونی ۲٫۴۵ MeV و ۱٫۴۱ MeV جمع‌آوری و تصویر ساخته شده است. توزیع‌های به‌دست آمده برای انرژی‌های مختلف نوترون، در شکل ۶ و شکل ۷ مشاهده می‌شود. برای محاسبه کنتراست از رابطه ویرا^۱ به شرح ذیل استفاده شده است:

1. Weber





شکل ۸. تصاویر به دست آمده از بلوک سربی حاوی حفره‌های هوا با ابعاد متفاوت برای نوترون‌هایی با انرژی ۲٫۴۵ MeV (الف) و ۱۴٫۱ MeV (ب) با استفاده از Geant4.



شکل ۹. کنتراست حفره‌های در نظر گرفته شده برای نوترون‌هایی با انرژی ۲٫۴۵ MeV و ۱۴٫۱ MeV.

۴. نتیجه‌گیری

در این تحقیق، با استفاده از ابزار شبیه‌سازی مونت‌کارلوی Geant4، کارآمدی روش نوترون رادیوگرافی جهت تصویربرداری مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج حاکی از آن است که در صورت استفاده از نوترون با انرژی‌های بالاتر (۱۴٫۱ MeV)، محدوده ضخامت قابل تشخیص با کنتراست نسبتاً خوب، به حدود ۲۰ سانتی‌متر افزایش می‌یابد در صورتی که برای انرژی ۲٫۴۵ MeV برای ضخامت‌های بالاتر از ۱۶ سانتی‌متر، مطلوب نیست. این مطالعه اهمیت استفاده از نوترون رادیوگرافی را بیان می‌کند. لذا امید است نتایج این مطالعه در آزمایشات اولیه برای پروژه نوترون رادیوگرافی با استفاده از دستگاه IECF موجود در سازمان انرژی اتمی، به‌کار گرفته شود.

همان‌گونه که در شکل‌های ۶ و ۷ مشاهده می‌شود، گوه پله‌ای توانایی انتقال بالای نوترون‌ها برای سرب را دارد. نوترون‌های با انرژی ۲٫۴۵ MeV قادر به نفوذ و تشخیص ضخامت‌های متغیر از ۲ cm تا ۱۶ cm بوده و می‌توان گفت که توانایی تشخیص ضخامت‌های بالاتر از ۱۶ cm را ندارند، زیرا میزان شار عبوری از نمونه سربی با این ضخامت و بیشتر، به کم‌تر از ۱۰٪ می‌رسد. در مورد نوترون‌های با انرژی ۱۴٫۱ MeV تشخیص ضخامت تا ۲۰ cm امکان‌پذیر بوده، اما امکان تشخیص برای ضخامت‌های بالاتر وجود ندارد. مقدار کمی کنتراست ارزیابی شده از میان لبه‌ها در شکل ۷ نشان داده شده است. همان‌طور که از شکل مشاهده می‌شود، حداکثر کنتراست برای انرژی نوترون ۲٫۴۵ MeV و ۱۴٫۱ MeV به ترتیب ۲۰٪ و ۲۱٪ می‌باشد. این مقدار برای انرژی نوترون ۱۴٫۱ MeV بین ۸ cm و ۱۰ cm سرب، و برای انرژی نوترون ۲٫۴۵ MeV بین ۶ cm و ۸ cm سرب وجود دارد و در ضخامت بیشتر یا کم‌تر به ترتیب به دلیل افزایش تضعیف یا کاهش تضعیف و پراکندگی کاهش می‌یابد.

۲.۳ بررسی حساسیت تشخیص حفره‌هایی با سایزهای مختلف درون یک قطعه سرب ضخیم

تصاویر به دست آمده از بلوک سربی حاوی حفره‌های هوا با اندازه‌های مختلف، برای دو انرژی نوترون ۲٫۴۵ MeV و ۱۴٫۱ MeV در شکل ۸ نشان داده شده است. علاوه بر این کنتراست محاسبه گردیده و در شکل ۹ نشان داده شده است. همان‌طور که از شکل ۸ مشاهده می‌شود، تمامی حفره‌ها به جز حفره با قطر ۰٫۵ میلی‌متر به وضوح در تصویر ساخته شده متمایز هستند. از شکل ۹ دیده می‌شود که کنتراست برای انرژی ۱۴٫۱ MeV بالاتر بوده و در هر دو انرژی نوترون، حفره با سایز ۲ mm بالاترین کنتراست را دارد. برای حفره‌هایی با سایز کوچک‌تر از ۲ mm، کنتراست بسیار پایین بوده و برای حفره‌هایی با سایز بزرگ‌تر، این مقدار کاهش یافته اما همچنان قابل قیاس با ماکزیمم کنتراست می‌باشد.

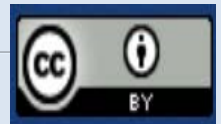


مراجع

1. P. Von der Hardt, H. Röttger, *Neutron radiography handbook: nuclear science and technology*, Springer Science & Business Media, (2012).
2. H. Berger, *Practical applications of neutron radiography and gaging*, ASTM International, (1976).
3. A. Shaikh, *Neutron Radiography Facility at CIRUS Reactor for NDE Applications*, in *Proceedings of the national Seminar & Exhibition on Nondestructive Evaluation, ISNT-NDE*, 148-151, (2009).
4. A. Heller, J. Brenizer, *Neutron radiography*, in *Neutron imaging and applications*: Springer, 67-80 (2009).
5. J. Barton, *Neutron radiography—an overview*, *Practical Applications of Neutron Radiography and Gaging*, (1976).
6. F. Abbasi Davani, et al, *Neutron spectrum measurement in D+Be reaction*, *Iranian Journal of Physics Research*, **3** (2), 101-7 (2019).
7. N. Tsoulfanidis, S. Landsberger, *Measurement & detection of radiation*, CRC Press, (2021).
8. R.T. Klann, *A system for fast neutron radiography*, in *AIP Conference Proceedings*, American Institute of Physics, **392**(1), 883-886 (1997).
9. C.J. Yi, S. Niluwankositi, *Development of fast neutron radiography system based on portable neutron generator*, in *AIP Conference Proceedings*, AIP Publishing LLC, **1704**(1), 030007 (2016).
10. D.L. Williams, et al, *A Fast Neutron Radiography System Using a High Yield Portable DT Neutron Source*, *Journal of Imaging*, **6**(12), 128, (2020).
11. G.H. Miley, *A portable neutron/tunable X-ray source based on inertial electrostatic confinement*, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, **422**(1-3), 16-20, (1999).
12. G.H. Miley, S.K. Murali, *Inertial electrostatic confinement (IEC) fusion*, *Fundamentals and Applications*, (2014).
13. R. Ashley, et al, *Steady-state D3He proton production in an IEC fusion device*, *Fusion Technology*, **39**(2P2), 546-551 (2001).
14. G.L. Kulcinski, J.F. Santarius, *New opportunities for fusion in the 21st century-advanced fuels*, *Fusion Technology*, **39**(2P2), 480-485 (2001).
15. K. Yoshikawa, et al., *Research and development of a compact discharge-driven D-D fusion neutron source for explosive detection*, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, **261**(1-2), 299-302 (2007).
16. R.W. Bussard, *Waste Transmutation by High Flux DT Fusion Neutrons from Inertial Electrostatic Fusion (IEF) Systems*, *Global 1993 International Conference and Technology Exhibition on Future Nuclear Systems*, Sep. 12-17, (1993).
17. K. Takakura, et al., *Neutron Radiography Using Inertial Electrostatic Confinement (IEC) Fusion*, *Plasma and Fusion Research*, **13**, 2406075-2406075 (2018).
18. S. Bishnoi, et al, *Fast Neutron Radiography With DT Neutron Generator*, in *Indian National Seminar and Exhibition on Non-Destructive Evaluation NDE*, Dec, 68-73 (2016).
19. M. Bakr, et al, *Characterization of an ultra-compact neutron source based on an IEC fusion device and its prospective applications in radiography*, *Fusion Engineering and Design*, **167**, 112346 (2021).
20. V. Damideh, et al., *Experimental study of the Iranian inertial electrostatic confinement fusion device as a continuous neutron generator*, *Journal of Fusion Energy*, **31**(2), 109-111 (2012).
21. S. Agostinelli, et al, *GEANT4—a simulation toolkit*” *NIM A506 250–303*, ed, (2003).
22. A. Bungau, et al., *Proposal for an electron antineutrino disappearance search using high-rate li 8 production and decay*, *Physical Review Letters*, **109**(14), 141802 (2012).
23. I. Antcheva, et al., *ROOT—A C++ framework for petabyte data storage, statistical analysis and visualization*, *Computer Physics Communications*, **182**(6), 1384-1385 (2011).

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

سارا وثوقی، پیمان رفیعی‌پور، محسن محرابی، مریم قبانوری، نفیسه سالک (۱۴۰۲)، شبیه‌سازی مونت کارلو دستگاه IECF با استفاده از Geant4 به منظور استفاده در نوترون رادیوگرافی، ۱۰۴، ۲۲-۲۹

DOI: [10.24200/nst.2023.1368](https://doi.org/10.24200/nst.2023.1368)

Url: https://jonsat.nstri.ir/article_1368.html

