DOI: 10.30494/jndt.2021.276160.1059 Received: March 04, 2021 - Accepted: May 04, 2021

Archive of SID

Design and Construction of the Neutron Radiography Facility for Tehran Research Reactor with Real-Time Digital Imaging Capability

B. Rokrok[1*], MHC Dastjerdi[1], M. Farzmehdi[1], M. Zahmatkesh[2], MH Mansouri[1], H. Ghods[1], A. Ezzati[1], N. Sadeghi[1], S. Vahedigherdeh[2], M. Afshani[2], A.M Bagheri[2], M. Ashrafifard[1], M. Hamid[1], E. Nazemi[1], Z. Naghshnejad[1], M. Haddadi[1], R. Adeli[1], E. Asadi[1], M. Haerizadeh[1], Y. Kasesaz[1], S. Bostanmanesh[2] and A. Movafeghi[1]

1- Reactor and Nuclear Safety Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute (NSTRI), Tehran, Iran.

2- Nuclear Science and Technology Research Institute (NSTRI), Tehran, Iran.

*brokrok@aeoi.org.ir

Abstract

Neutron radiography is one of the most advanced methods in non-destructive testing. The application of this useful and unique method is very wide and diverse and includes from the nuclear industry to the power plant industry, military industry, study of antiquities and research on new materials. In this method, neutrons are attenuated after passing through the material and interacting with the test sample, in proportion to the cross-section of neutron interaction with the nuclei and the thickness of material. The amount of radiation reaching to detector contains valuable information from inside the test material, which by detecting and converting into an image, the structural details of the material can be realized. Tehran Research Reactor, with several suitable neutron ports, is the most important neutron source in the country for applied research such as neutron radiography. The main requirements for neutron imaging are the source of neutron, the neutron beam shaping (collimator), the beam shutter, the sample table, the imaging medium, the beam catcher and the shielding room. In the present project, apart from the collimator which has been previously designed and built, other components required to create and set up a neutron radiography system has been designed and made in accordance with the principles of radiation protection and current knowledge in the field of neutron radiography. This design can implement two imaging methods based on film and digital imaging. Direct real time neutron radiography has been designed and implemented in this project for the first time in the country.

Keywords: Neutron Radiography, Tehran Research Reactor, Film radiography, Digital Neutron Imaging, Neutron Beam-line.

www.SID.ir

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۱۲/۱۴ - تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۲/۱۴
DOI: 10.30494/jndt.2021.276160.1059
Archive of SID

طراحی و ساخت ملزومات سامانهٔ پرتونگاری نوترونی راکتور تحقیقاتی تهران با قابلیت تصویربرداری دیجیتال زمان واقعی

بهروز رکرک[1*]، محمدحسین چوپان دستجردی[1]، مجتبی فرض‌مهدی[1]، میثم زحمتکش[2]، محمدحسین منصوری[1]، حسین قدس[1]، ارسلان عزتی[1]، ناهید صادقی[1]، سجاد واحدی گرده[2]، مجتبی افشانی[2]، مهدی حمید[2]، امین‌محمد باقری[2]، محمد اشرفی‌فرد[1]، مهدی حمید[1]، احسان ناظمی[1]، زینب نقش‌نژاد[1]،محمد حدادی[1]، روح اله عادلی[1]، ابراهیم اسدی[1]، مجید حائری‌زاده[1]، یاسر کاسه‌ساز[1]، سعید بستان‌منش[2] و امیر موافقی[1]

۱- پژوهشکدهٔ راکتور و ایمنی هسته‌ای، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، تهران، ایران.

۲- پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، تهران، ایران.

*brokrok@aeoi.org.ir

چکیده

پرتونگاری نوترونی یکی از روش‌های پیشرفته و بسیار کارآمد در آزمون غیرمخرب مواد و تجهیزات است. حوزه کاربردهای این روش سودمند و منحصر به فرد بسیار گسترده و متنوع است و از صنعت هسته‌ای تا صنایع نیروگاهی، صنایع نظامی، مطالعه آثار باستانی و تحقیقات مواد جدید را شامل می‌شود. در این روش، یک دسته نوترون پس از عبور از ماده و انجام برهمکنش با نمونه تحت آزمون، متناسب با سطح مقطع برهمکنش نوترون با هسته‌ها و ضخامت ماده، تضعیف می‌شوند و به آشکارساز می‌رسند. میزان پرتو رسیده به آشکارساز حاوی اطلاعات ارزشمندی از درون ماده آزمون است که با آشکار نمودن و تبدیل آن به تصویر، میتوان به جزئیات ساختاری ماده پی برد. راکتور تحقیقاتی تهران با دارا بودن چند پورت مناسب نوترون، مهمترین منبع نوترونی کشور برای انجام تحقیقات کاربردی و توسعه‌ای مانند پرتونگاری نوترونی است. از الزامات اصلی برای تصویربرداری نوترونی می‌توان منبع تولید نوترون، شکل دهنده باریکه (کولیماتور)، شاتر، میز نمونه، محیط ثبت تصویر، متوقف کننده باریکه و اتاقک حفاظ را نام برد. در پروژه حاضر، به غیر از کولیماتور که قبلا ساخته شده است، دیگر اجزاء مورد نیاز برای برپایی یک سامانه پرتونگاری نوترونی با رعایت اصول حفاظت در برابر اشعه و مطابق دانش روز حوزه پرتونگاری نوترونی مبتنی بر دو روش تصویربرداری بر پایه فیلم و تصویربرداری دیجیتال طراحی و ساخته شده است. پرتونگاری نوترونی دیجیتال به روش مستقیم برای اولین بار در کشور در این پروژه طراحی و پیاده‌سازی شده است.

واژگان کلیدی: پرتونگاری نوترونی، راکتور تحقیقاتی تهران، پرتونگاری فیلم، تصویربرداری نوترونی دیجیتال، باریکهٔ نوترونی.

۱- مقدمه

رادیوگرافی صنعتی یکی از مهمترین روش‌های آزمون‌های غیرمخرب است که توانائی آشکار سازی عیوب عمقی در مواد مختلف را دارد. در روش معمول رادیوگرافی صنعتی از پرتوهای ایکس و گاما و یا به عبارت دیگر "فوتون‌ها" برای تصویربرداری استفاده می‌شود. این روش مبتنی بر تضعیف فوتون‌هاست که معمولا به عدد اتمی عناصر وابسته است و با بالارفتن عدد اتمی تفاوت کنتراست تصاویر بیشتر خواهد شد (شکل ۱). رادیوگرافی با کمک منابع نوترونی یا نوترون رادیوگرافی به عنوان یک روش مکمل در کنار روش سنتی عمل میکند و توانایی رادیوگرافی از عناصر سبک را با کنتراست بالا فراهم می‌کند .با توجه به اندرکنش‌های متفاوت نوترون‌ها در مقایسه با فوتون‌ها، تصاویر رادیوگرافی نوترونی و فوتونی متفاوت از هم خواهند بود و اطلاعات متفاوتی را فراهم خواهند ساخت (شکل ۱).

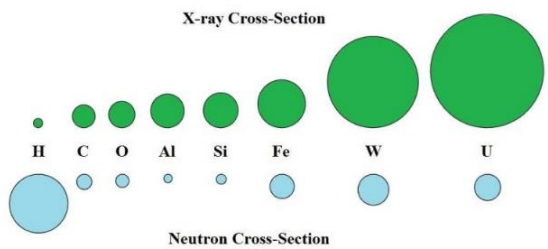
حوزه کاربردهای رادیوگرافی نوترونی منحصر به فرد و بسیار گسترده و متنوع است و از صنایع هسته‌ای تا صنایع

www.SID.ir

Archive of SID

نیروگاهی، صنایع نظامی، مطالعه آثار باستانی و تحقیقات مواد پیشرفته و جدید را شامل می‌شود. در این روش، یک دسته پرتو نوترونی موازی شده بر یک جسم تابیده می شود و نوترون‌ها پس از عبور از ماده و انجام برهمکنش با نمونه تحت آزمون، متناسب با سطح مقطع برهمکنش نوترون با هسته ها و ضخامت ماده، تضعیف می‌شوند و به آشکارساز می‌رسند [۳-۱]. میزان پرتوهای رسیده به آشکارساز حاوی اطلاعات ارزشمندی از درون ماده مورد آزمون است که با آشکار نمودن و تبدیل آن به تصویر، می توان به وجود ناپیوستگی ها و جزئیات ساختاری ماده پی برد. نوترون‌ها به ویژه در تصویربرداری از مواد حاوی اتم هیدروژن کنتراست بسیار مطلوبی را فراهم می‌کنند و این خود به دلیل هم جرم بودن نوترون و اتم هیدروژن می‌باشد.

از پرتونگاری نوترونی می‌توان برای تصویربرداری از سوخت‌های هسته‌ای تازه و مصرف شده استفاده کرد. از آنجایی‌که سوخت هسته‌ای حاوی مواد با عدد اتمی بالاست، تصویر برداری از آن با پرتوهای ایکس و گاما کیفیت بالایی از تصویر را ایجاد نمی‌کند. در این مورد استفاده از پرتونگاری نوترونی می‌تواند به عنوان یک روش کاملا مناسب تصاویری با کیفیت بالا ایجاد نماید. در مورد سوخت‌های مصرف شده که پرتوزایی بالایی دارند نیز تنها گزینه مناسب پرتونگاری نوترونی است.

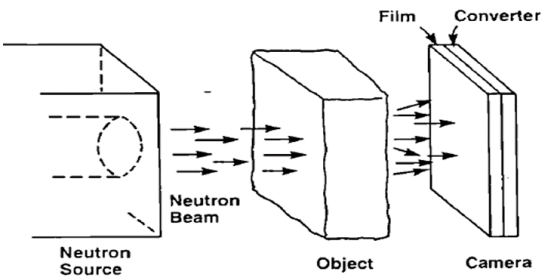


شکل ۱- تفاوت احتمال اندرکنش فوتونی و نوترونی برای چند عنصر مهم

در راکتور تحقیقاتی تهران نیز در سال‌های گذشته تحقیقات و فعالیت‌هایی در حوزه پرتونگاری نوترونی انجام شده است. اولین سیستم پرتونگاری نوترونی در ایران در راکتور تحقیقاتی تهران و در بیم تیوب H بوده است [۴ و ۵]. این سیستم زمانی نصب شده است که سوخت راکتور با غنای بالا (۹۰ درصد اورانیوم235) بوده است. با تغییر سوخت رأکتور از غنای بالا به غنای پایین و نیز تغییر ساختار قلب، کیفیت این سیستم نیز کاهش یافته است و تقریباً بدون استفاده باقی مانده است .در پروژه دانشجوی دکتری پژوهشگاه [۶] با انجام محاسبات مربوط به طیف نوترون و گاما، طراحی و ساخت یک باریکه‌ساز جهت دستیابی به یک باریکه مناسب و بهینه در بیم تیوب E راکتور تهران طراحی شده که در سال ۱۳۹۴ عملیات نصب و آزمون‌های آن انجام شده است و نتایج حاصل نشان داده‌اند که رتبه I استاندارد ASTME 545 حاصل شده است[۷].

۲- مواد و روش‌ها

همانگونه که اشاره شد پرتونگاری نوترونی یکی از روش-های پیشرفته و بسیار کارآمد در آزمون غیرمخرب مواد و تجهیزات است. در ساده‌ترین حالت ممکن رادیوگرافی نوترون شامل سه جز اصلی است: الف) پرتو نوترونی مناسب ، ب) جسم مورد نظر برای رادیوگرافی ، ج) دستگاهی برای ثبت اطلاعات مربوط به شدت تابش باریکه نوترونی عبور کرده از جسم.



شکل ۲- تصویر شماتیکی از سه جز اصلی پرتونگاری نوترونی را نشان می‌دهد.

۲-۱ منبع تولید نوترون

رادیوگرافی نوترون به طور عمده با نوترون‌های حرارتی انجام می‌شود. با این حال ، استفاده از نوترون‌های سریع، اپی‌ترمال یا پایین‌تر از محدوده حرارتی (نوترون سرد) نیز ممکن است در کاربردهای خاص مناسب‌تر باشند. پرتوهای نوترون برای رادیوگرافی نوترون عموماً از سه نوع منبع نوترونی زیر سرچشمه می‌گیرد:

۱) راکتورهای هسته‌ای؛ ۲) شتاب‌دهنده‌ها؛ ۳) رادیوایزوتوپ‌ها.

در انتخاب نوع منبع، شار منبع نوترونی و هزینه‌های آن نقش اساسی دارند. نوترون‌ها از تمام منابع موجود با انرژی زیاد متولد می‌شوند، بین Mev ۲ (در راکتورهای هسته-ای) و MeV ۱۴ (در شتاب‌دهنده‌ها)، در حالی که

www.SID.ir

Archive of SID

رادیوگرافی نوترون به نوترون‌هایی در محدوده ۰٫۰۱ eV تا ۱۰ eV نیاز دارد. بنابراین در یک راکتور هسته‌ای، انرژی نوترون ها باید توسط یک کندکننده مناسب به محدوده انرژی نوترون حرارتی / اپی‌ترمال کاهش یابند. برای این منظور، مواد کندکننده با سطح مقطع جذب نوترون کم مانند آب، آب سنگین، گرافیت، بریلیوم، پلی‌اتیلن در اطراف منبع قرار می‌گیرند. از آنجا که نوترون‌ها بصورت کاملاً تصادفی از کندکننده خارج می‌شوند و نمی‌توانند متمرکز شوند، برای تشکیل دسته پرتو قابل استفاده به کولیماتور نیاز است. نمونه‌ای از رادیوایزوتوپ کالیفورنیوم-۲۵۲ برای پرتونگاری نوترونی در شکل ۳ نشان داده شده است. شار نوترونی ناشی از رادیوایزوتوپ‌ها برای رادیوگرافی نسبتا پایین است.

شکل۳- رادیوایزوتوپ کالیفورنیوم-۲۵۲ برای پرتونگاری نوترونی در مقایسه ابعادی با تمبر پستی

از میان گزینه‌های متعددی که به عنوان منابع تولید نوترون مطرح می‌شوند، راکتورهای هسته‌ای بدلیل شار بالا و پایدار با اقبال بیشتری مواجه شده‌اند به گونه‌ای که بیش از ۸۰ درصد سیستم‌های رادیوگرافی نوترونی در جهان بر مبنای راکتورهای هسته‌ای بنا شده‌اند [۸و ۹]. هرچند که نمی‌توان عدم متحرک بودن این منابع نوترونی را نادیده گرفت و همین امر از معایب بزرگ این تاسیسات به شمار می‌رود. جدول ۱ مروری بر این چشمه های نوترونی دارد [۱۰].

۲-۲ راکتور تحقیقاتی تهران

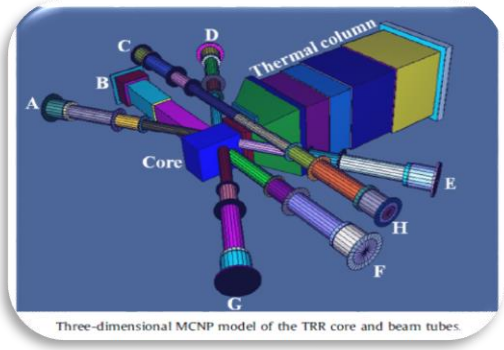
راکتور تحقیقاتی تهران یک راکتور با قدرت حرارتی 5 MW از نوع استخری است که دارای کانال ها و پورت‌های متعدد برای پرتودهی و قابل استفاده به عنوان چشمه نوترون است [۱۱]. از بیم تیوب E راکتور تهران به عنوان منبع نوترون برای تصویربرداری در سامانه پرتونگاری استفاده شده است. شکل ۴ نمائی از راکتور تحقیقاتی تهران ، باریکه‌های آن و باریکهٔ مورد استفاده در این تحقیق را نشان می‌دهد. همچنین نمائی از کالیماتور نوترونی طراحی شده در این تصویر دیده می‌شود. این کالیماتور با شبیه سازی در کد MCNP طراحی و بهینه سازی شده است تا بیم مناسب برای تصویربرداری را فراهم کند. مطابق نتایج آزمایشات ردهٔ I (بهترین رده) بیم‌های نوترونی حاصل شده است [۶].

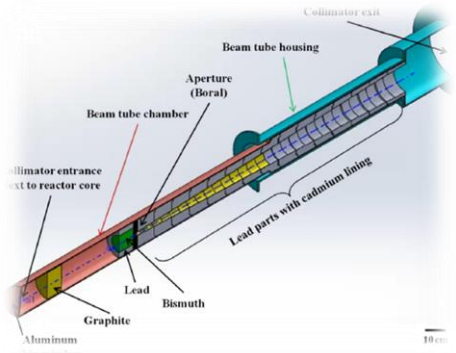
جدول ۱- مروری بر چشمه‌های نوترونی به منظور استفاده در تصویربرداری

نوع چشمه	راکتور هسته‌ای	نوترون ژنراتور	چشمه اسپالیشن	رادیوایزوتوپ
برهمکنش	شکافت	همجوشی D-T	تلاشی توسط پروتون ها	برهمکنش γ-n وα-n
مواد مورد استفاده	U-235	دوتریوم ، تریتیوم	هسته های بسیار سنگین	Am , Be
شدت نوترون ها(n/s)	10^{16}	4×10^{11}	10^{15}	10^{8}
شدت باریکه (n/cm^2s)	10^{6} تا 10^{9}	10^{5}	10^{6} تا 10^{7}	10^{3}
انرژی نوترون	سریع، حرارتی و سرد	سریع ، حرارتی	سریع، حرارتی و سرد	سریع، حرارتی
محدودیت استفاده	Burn up	طول عمر تیوب	طول عمر هدف	نیمه عمر
دوره کارکرد نوعی	۱ ماه	۱۰۰۰ ساعت	۱ سال	۴۳۲ سال
قیمت تاسیسات	بالا	متوسط	بسیار بالا	پائین

www.SID.ir

Archive of SID

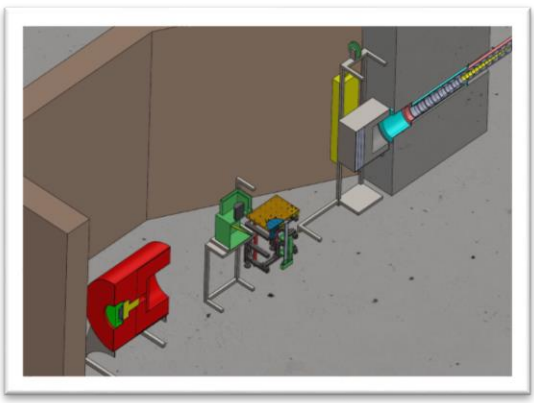


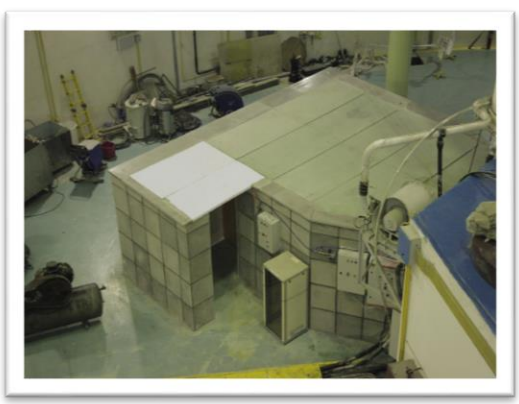


شکل ۴- نمائی از راکتور تحقیقاتی تهران، بیم تیوب‌های آن و بیم تیوب مورد استفاده E در این تحقیق به همراه نمائی از کالیماتور نوترونی طراحی شده

۲-۳ اتاق پرتونگاری

اتاق پرتونگاری و متوقف کننده بیم پرتو، به گونه ای طراحی شده‌اند که پرتوهای نوترون و گاما را در حد قابل قبول از نظر الزامات حفاظت در برابر اشعه و فیزیک بهداشت کاهش دهند. بدین منظور درب اطاق نیز در انتهای یک مارپیچ (Maze) قرار گرفته است. طراحی درب اتاق به گونه ای است که با نیروی فشار باد (پنوماتیک) کنترل می‌شود و قابلیت باز و بسته کردن درب به صورت دستی در صورت بروز اشکال در سیستم پنوماتیک نیز پیش‌بینی شده است. با توجه به فضای موجود در جلوی بیم تیوب E و اطراف آن و با بررسی‌های مختلف هم از نظر فضای کاری و هم از بعد تأثیر اتاق بر کیفیت تصویر، طرح نشان داده شده در شکل زیر به عنوان اتاق حفاظ انتخاب شد و ضخامت دیواره ها با استفاده از شبیه سازی توسط کد MCNP تعیین شد. قفل‌های ایمنی (اینترلاک‌های) لازم بین درب اتاق حفاظ و شاتر باریکه طراحی و پیاده سازی شده است. اندازه‌گیری‌های پس از ساخت اتاق نشان می دهند که معیارهای حفاظت در برابر پرتوها به خوبی رعایت شده‌اند و فضای ایمن برای پرتونگاران و اپراتورهای راکتور فراهم شده است. شکل ۵ نمائی از این اطاق را نشان می‌دهد.





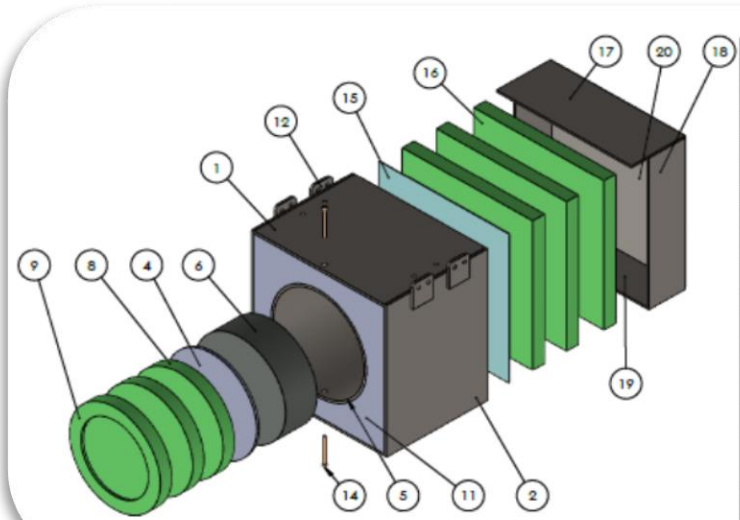
شکل ۵- اتاق رادیوگرافی نصب شده در باریکهٔ E و نمائی برش خورده از کالیماتور، شاتر، میز رادیوگرافی، متوقف کنندهٔ بیم و دیوارهای بتونی

www.SID.ir

Archive of SID

۲-۴ شاتر باریکه

برای باز و بسته کردن خروجی بیم نوترونی (بدون آنکه نیازی به خاموش کردن راکتور باشد) استفاده از شاتر نوترونی الزامی است. شاتر مشتمل بر حفاظی به صورت ترکیبی از مواد کند کننده و جاذب نوترون و تضعیف کننده پرتوهای گاما در لایه‌های مختلف می‌باشد و با استفاده از شبیه‌سازی و اندازه‌گیری‌های تجربی به گونه‌ای طراحی شده است که کاهش قابل توجهی بر میزان پرتوهای خروجی بیم تیوب اعمال نماید. نیروی محرکه شاتر، به صورت پنوماتیک با فشار ۷ بار طراحی شده است و زمان باز شدن و بسته شدن شاتر در حدود ۴ ثانیه است. همچنین طراحی به گونه‌ای است که در صورت قطع احتمالی برق، بلافاصله شاتر بسته شود و ایمنی ذاتی فراهم گردد. شاتر از سه مجموعه حفاظ، پایه نگهدارنده و سیستم پنوماتیک برای حرکت حفاظ تشکیل شده است. شکل ۶ نمائی از این شاتر را نشان می‌دهد.



ITEM NO.	PART NUMBER	DESCRIPTION	QTY.
1	Steel Plate 01	580*450*10	2
2	Steel Plate 02	600*450*10	2
3	Triangular		8
4	Boral 01		1
5	Steel Tube		1
6	Lead		1
7	Steel Plate 07	160*77*10	4
8	Borated Polyethylene 02		2
9	Borated Polyethylene 01		1
10	Steel Plate 08	210*90*10	4
11	Concret		1
12	Steel plate 09	100*90*10	4
13	Part a		2
14	Bolt(M10)	M10*110	2
15	Boral 02	590*580*3	1
16	Borated Polyethylene 03	590*580*53	3
17	Steel Plate 03	600*240*8	1
18	Steel Plate 04	600*163*8	2
19	Steel Plate 05	584*163*8	1
20	Steel Plate 06	600*600*2	1

شکل ۶ - نمائی از شاتر بیم نوترونی: طراحی، ساخت و نصب

www.SID.ir

Archive of SID

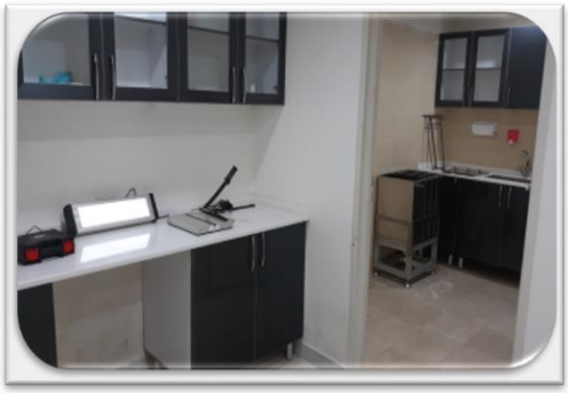
۲-۵ میز نمونه

با قابلیت حرکت در دو محور X و Z و نیز چرخش نمونه به میزان ۳۶۰ درجه با دقت و تکرار پذیری بالا و خطای کم طراحی و ساخته شده است. دقت چرخش در حد دهم درجه ودقت جابجایی در حد دهم میلیمتر است و میز تحمل وزن بیش از ۱۰۰ کیلوگرم را دارد. پیش‌بینی‌های توسعه‌ای لازم برای برپایی سامانهٔ تصویربرداری به صورت مقطع نگاری (Neutron CT) در طراحی و ساخت میز نمونه پیش بینی و اجرا شده است. شکل ۷ این میز را نشان می‌دهد.

شکل ۷- میز نمونه با پیش بینی‌های توسعه ای لازم برای برپایی سامانه تصویربرداری به صورت مقطع‌نگاری

۲-۶ پرتونگاری بر روی فیلم

در تصویربرداری بر پایه فیلم در این سامانه از فیلم‌های با رزولوشن بالا و تک لایه D3sc و مبدل گادولونیوم استفاده می‌شود. برای عملیات پردازش فیلم و تفسیر پرتونگاشت، یک آزمایشگاه شامل تجهیزات تاریکخانه و مشاهده و تفسیر پرتونگاشت طراحی و ساخته شده است. با انجام آزمایشات تصویربرداری بر روی فیلم و محاسبات مربوطه، تصاویر پرتونگاری بر روی فیلم رده I استاندارد رادیوگرافی نوترون را کسب می‌کند (شکل ۸).



شکل ۸ - آزمایشگاه فیلم شامل اتاق تفسیر و تاریک‌خانهٔ خشک و تر

۲-۷ سامانه تصویربرداری دیجیتال زمان واقعی (Real time)

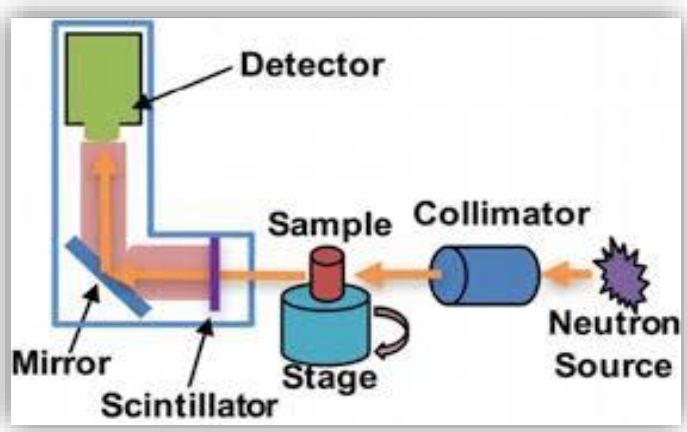
تصویربرداری نوترونی دیجیتال به روش مستقیم برای اولین بار در کشور در این تحقیق انجام شده است. با ایجاد این سامانه زیرساخت‌های لازم برای گام‌های بعدی از جمله تصویربرداری به صورت مقطع نگاری نوترونی فراهم شده است. برای تصویربرداری دیجیتال از روش پریسکوپی با استفاده از یک دوربین با حسگر سایز بزرگ و رزولوشن بالا و عمق تصویر ۱۲ بیتی استفاده شده است (شکل ۹). محیط حساس به نوترون یک سنتیلاتور LiFZnS با ضخامت ۲۰۰ میکرومتر است. این سینتیلاتور با استفاده از اندرکنش هسته‌ای لیتیوم با نوترون ابتدا ذرهٔ آلفا تولید می‌کند و سپس این ذره در سینتیلاتور آشکار می‌گردد (رابطهٔ ۱).

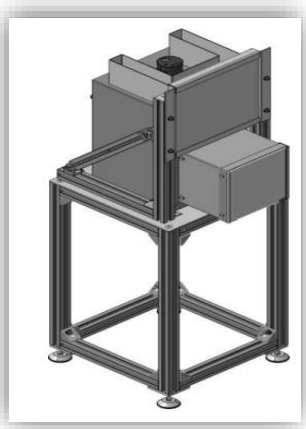
$$^{6}Li + n = {}^{3}H + \alpha + 4.78\,MeV \qquad (۱)$$

همچنین یک آینه با سطح انعکاسی آلومینیوم و با ضریب انعکاس نور بالا ساخته شده است تا برای محافظت از دوربین در برابر باریکهٔ پرتو، به شکل پریسکوپی تصویر شکل گرفته در سنتیلاتور را به دوربین منتقل کند. این مجموعه در یک باکس آلومینیومی درزبندی شده برای ممانعت از عبور نور تعبیه شده است. نرم افزار رابط کاربری سامانهٔ تصویربرداری نوترونی برای کنترل و تنظیم میز نمونه و تصویربرداری دیجیتال در محیط ویژوال استودیو و به زبان برنامه نویسی C++ نوشته شده است.

www.SID.ir

Archive of SID





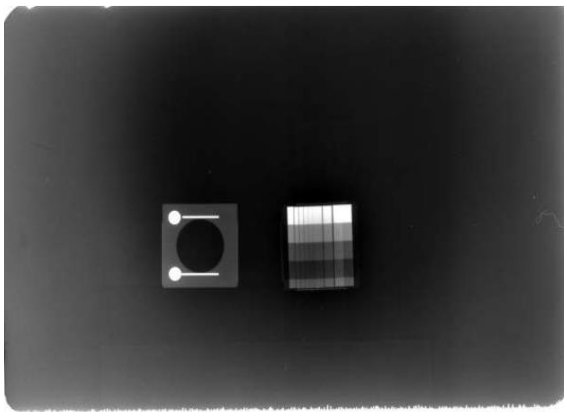
شکل ۹ – سیستم تصویربرداری دیجیتال نوترونی با زمان حقیقی و روش پریسکوپی برای جلوگیری از آسیب به دوربین به همراه نمای طراحی محفظهٔ پریسکوپ و دوربین

۲-۸ راه‌اندازی سیستم رادیوگرافی نوترونی فیلم و دیجیتال

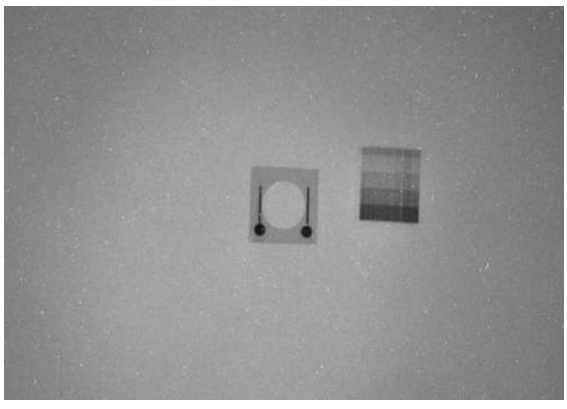
پس از نصب و راه اندازی اجزا مختلف سیستم، سرانجام در آبان ماه ۱۳۹۹ راه اندازی اولیهٔ سیستم انجام گرفت. ابتدا سیستم با روش نوترون رادیوگرافی با فیلم آزمون شد و با استفاده از IQI های مخصوص نوترون(BPI & SI) کیفیت باریکهٔ نوترونی ردهٔ I تعیین شد [۱۲ و ۱۳]. نمونهٔ تصویر اخذ شده از این IQI ها در شکل ۱۰ نشان داده شده است. این تصویربرداری در توان 3 MW و با زمان پرتودهی ۱۰ دقیقه انجام شده است. امکان تصویربرداری در راکتور تهران برای توان ۱ تا ۵ مگا وات وجود دارد.

پس از اطمینان از کیفیت باریکه، دوربین تصویربرداری و سینتیلاتور و آئینهٔ پریسکوپی در محل خود نصب گردید. پس از آن با قدرت راکتور حدود ۳ مگاوات، اولین تصویر رادیوگرافی نوترونی زمان واقعی از IQI های نوترونی با موفقیت اخذ و ذخیره شد. شکل ۱۱ اولین تصویر نوترونی کشور از این نوع را نشان می‌دهد. این سیستم بسته به قدرت راکتور و خروجی باریکهٔ نوترونی می‌تواند بصورت دینامیکی با حداقل فواصل زمانی حدود ۲ تا ۴ ثانیه تصویر نوترونی اخذ و بصورت دیجیتال ذخیره نماید.

بدین ترتیب اولین سامانه از این نوع در کشور با موفقیت نصب و راه‌اندازی گردید.



شکل ۱۰ –نمونه تصویر اخذ شده از IQI های نوترونی با فیلم برای ارزیابی کیفیت باریکهٔ نوترونی



شکل ۱۱ – اولین تصویر دیجیتالی زمان حقیقی نوترونی کشور

www.SID.ir

Archive of SID

شکل ۱۲ - نمونه‌ای از یک گوشی همراه و تصویر آن که با این سیستم اخذ گردیده است.

۴- نتیجه‌گیری

اولین سیستم رادیوگرافی نوترونی با قابلیت تصویر برداری با فیلم و دیجیتال زمان واقعی طراحی، نصب و راه اندازی گردید. شکل ۱۱ نمونه‌ای از تصویر یک گوشی موبایل که با این سیستم اخذ گردیده است را نشان می‌دهد. با راه-اندازی این سیستم امکان سرویس دهی مستمر و با کیفیت به بخش‌های مختلف در حوزهٔ تصویربرداری نوترونی فراهم گردیده است. تصویربرداری نوترونی کاربردهای بسیار متنوع و در مواردی منحصر بفرد در صنایع گوناگون از قبیل صنعت هسته‌ای، صنایع نیروگاهی، صنایع نظامی، مطالعات باستان شناسی،مطالعات کشاورزی، صنایع مرتبط با انرژی و ... دارد.

۵- منابع

[1] Domanus, J. C., Bayon, G., Greim, L., Harms, A. A. (1992). Practical Neutron Radiography, KLUWER ACADEMIC PUBLISHERS, LONDON.

[2] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY (2008). Neutron Imaging: A Non-Destructive Tool for Materials Testing, IAEATECDOC- 1614, IAEA, Vienna

[3] von der Hardt, P., and Röttger, H. (1981) Neutron Radiography Handbook. D. Reidel Publishing Company.

[4] Moghadam K.K. and Tabatabaeian Z. (1991) NR facility for AEOI nucl. Research center, Proc. 9nd World, Conf on NR, Paris, France.

[5] Moghadam, K., Kamali Dj., and Ziaie F. (1996) Modification of the neutron beam spectrum for neutron radiography at Tehran Research Reactor (TRR). Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment 377,1,: 54-57.

[۶] چوپان دستجردی م. (۱۳۹۴)آزمون سوخت هسته‌ای تولید داخل با استفاده از ساخت یک سیستم جدید پرتونگاری نوترونی در راکتور تحقیقاتی تهران، رساله دکتری، پژوهشگاه علوم و فنون هسته ای.

[7] American Society for Testing and Materials International, (2005) Standard Method for Determining Image Quality in Direct Thermal Neutron Radiographic Examination. Standard ASTM E545-04.

[8] https://www.iaea.org/resources/databases/research-reactor-database-rrdb,

[9] IAEA Nuclear Energy Series (2014) No.NP-T-523, "Applications of Research Reactors", VIENNA,.

[10] Harms, A.A., and Wyman, D. (1986) Mathematics and Physics of Neutron Radiography. Reidel Publishing Company

[11] Safety analysis report of Tehran Research Reactor, (2009) prepared by AEOI, vol.1, Junuary.

[12] ASTM International (2010) Standard Practice for Fabrication of the Neutron Radiographic Sensitivity Indicator. ASTM Standard E2023-10.

[13] ASTM International (2010) Standard Practice for Fabrication of the Neutron Radiographic Beam Purity Indicators. ASTM Standard E 2003-10.

www.SID.ir