

استفاده از روش نوترون رادیوگرافی برای تشخیص نقوش و آسیب‌های کوزه باستانی سمیران

در راکتور تحقیقاتی تهران

امیر موافقی^{*}، محمدحسین چوپان دستجردی^۱، بهروز رکرك^۱، عفت یاحقی^۲، عیسی نگهدارزاده^۲

ذوالفقار کشاورزخانی^۳، آرش ضیاآبادی^۳

^۱ سازمان انرژی اتمی تهران، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای

^۲ دانشگاه بین المللی امام خمینی (ره)، دانشکده علوم پایه، گروه فیزیک

^۳ سازمان میراث فرهنگی، صنایع دستی و گردشگری استان قزوین

(تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۶/۰۴/۲۲ - تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۶/۰۸/۰۹)

چکیده

آزمونه‌های غیر مخرب یکی از مهمترین ابزارها در مطالعات آثار باستانی به شمار می‌روند. هدف این تحقیق استفاده از نوترون رادیوگرافی برای اخذ اولین تصاویر آثار باستانی کشور در سیستم جدید نوترون رادیوگرافی راکتور تحقیقاتی تهران است. نوترون رادیوگرافی به عنوان یک ابزار مکمل در کنار رادیوگرافی معمولی با پرتوهای ایکس و گاما قرار می‌گیرد. اندرکنش‌های متفاوت نوترون نسبت به پرتوهای ایکس و گاما و حساسیت بالای نوترون رادیوگرافی نسبت به هیدروژن آن را به ابزار بسیار کارآمد برای شناسایی آثار سفالی و اشیاء باستانی تبدیل کرده است. در این تحقیق از یک کوزه باستانی متعلق به منطقه سمیران استان قزوین، نوترون رادیوگرافی به عمل آمده است. تصاویر با استفاده از صفحات تصویرساز با فرمت دیجیتال ذخیره شده و برخی پردازش‌های تصویری در آن صورت گرفته است تا نقوش و آسیب‌های کوزه بهتر آشکار گردند. نتایج نشان می‌دهند که سیستم جدید نوترون رادیوگرافی راکتور تحقیقاتی تهران با کیفیت بسیار مطلوب در مطالعات باستان‌شناسی می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد.

واژه‌های کلیدی: اشیاء عتیقه، نوترون رادیوگرافی، پردازش تصویر، کوزه سفالی.

* تهران، انتهای کارگر شمالی، سازمان انرژی اتمی ایران، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای.

۱. مقدمه

آثاری که از کاوش‌های باستان‌شناسی به دست می‌آیند، مهمترین منابع مادی اطلاعاتی گذشته هستند. به همین دلیل وظیفه یک کاوشگر تنها کشف و بررسی این آثار نیست بلکه باید برای حفظ و حراست از آن‌ها نیز به همان اندازه تلاش داشته باشد. استفاده از روش‌هایی که بدون تخریب این آثار به شناسایی نقوش و آسیب‌های آن‌ها کمک کند، ارزشمند است. استفاده از آزمون‌های غیر مخرب مانند رادیوگرافی صنعتی، امواج صوتی و جریان‌های گردابی که اساس فیزیکی دارند، امروزه در صنعت کاربردهای زیادی دارند. در علم باستان شناسی نیز استفاده از رادیوگرافی برای تشخیص نقوش داخلی اشیاء عتیقه اهمیت زیادی دارد. نوترونگرافی نیز برای شناسایی اشیاء قدیمی که دارای عدد اتمی پایین هستند مفید است [۱-۴].

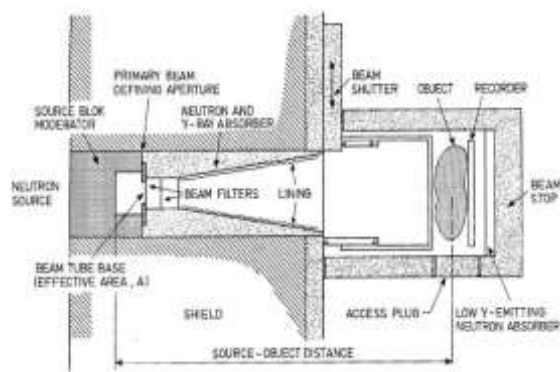
رادیوگرافی نوترونی برای حل بسیاری از مسائل مربوط به بازرسی اجسامی که با دیگر روش‌های آزمون غیر مخرب (رادیوگرافی با اشعه X، امواج فراصوتی و ...) امکان پذیر نیست، استفاده می‌شود. بسیاری از استانداردهای روش‌های رادیوگرافی نوترونی عمدتاً توسط موسسه^۱ ASTM توصیف شده است. از جمله آن‌ها می‌توان به استانداردهای ASTM E543، E748، E803، E2003 و E2023 و استاندارد ملی ۲۰۷۱۱ اشاره کرد [۵-۱۰].

روش‌های زیادی جهت بازرسی رفتار درونی مواد وجود دارد، مانند روش‌های فراصوتی، رادیوگرافی با اشعه X و گاما و ... در بسیاری از شرایط این روش‌های تست غیر مخرب، راحت تر، قابل حمل و کم هزینه تر از رادیوگرافی نوترونی هستند. رادیوگرافی نوترونی با اشعه X اغلب روش‌های مکمل هستند،

به خصوص موقعی که نوترون‌های کم انرژی استفاده می‌شود. اشعه X با الکترون‌های مداری اندر کنش انجام داده و به شدت وابسته به چگالی جسم مورد آزمایش است. ولی نوترون با هسته اتم‌های جسم اندرکنش انجام داده و تنها به سطح مقطع عناصر تشکیل دهنده جسم در برابر نوترون بستگی دارد. همانطور که از روی شکل ۱ مشخص است ضریب جذب جرمی عناصر در برابر اشعه X به صورت پیوسته و برای نوترون به صورت تصادفی با افزایش عدد اتمی عناصر تغییر می‌کند. در نتیجه برای هر کاربرد خاص، بایستی رفتار این ذرات مورد بررسی قرار گرفته و سپس نوع ذره و انرژی آن تعیین گردد.

همچنین به علت وجود اختلاف بین سطح مقطع‌های مواد مختلف (حتی ایزوتوپ‌های همجوار)، در برابر نوترون‌های کم انرژی تفکیک مواد تشکیل دهنده جسم مورد آزمایش، با رادیوگرافی نوترونی امکان پذیر خواهد بود. به خاطر اینکه این روش بر پایه تضعیف نوترون در بیم موازی استوار است، هم پراکندگی و هم جذب نوترون در جسم باعث تغییر شدت بیم خواهد شد. عناصر با عدد اتمی پایین مانند هیدروژن به خاطر پراکندگی و عناصری مانند بور و کادمیوم به خاطر جذب بالا به خوبی تصویربرداری می‌شوند. از کاربردهای رایج رادیوگرافی نوترونی می‌توان، بازرسی آثار هنری، وسایل دارای مواد منفجره، تیغه‌های توربین‌های مولد انرژی و رادیوگرافی میله های سوخت را نام برد. پرتونگاری نوترون در مقایسه با پرتونگاری اشعه ایکس، بدلیل نفوذ بسیار بالای نوترون‌های حرارتی درون اکسید اورانیوم موجود در قرص‌های سوخت (ضریب تضعیف نوترون‌های حرارتی در اورانیوم برابر cm^{-1} ۰/۸) و نفوذ کمتر پرتوهای ایکس در آن (ضریب تضعیف پرتوهای ایکس ۱۵۰ keV در اورانیوم برابر cm^{-1} ۵۰)، یکی از

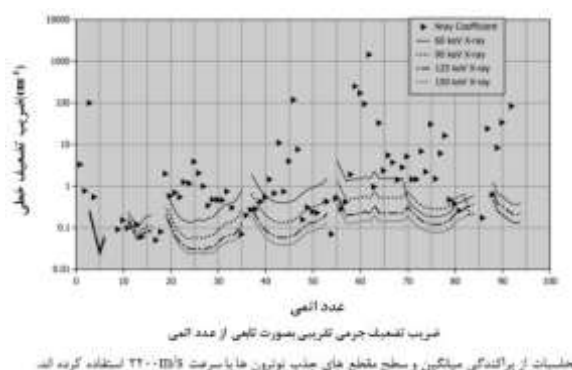
^۱ American Society for Testing and Materials



شکل ۲. یک سیستم نوترون رادیوگرافی راکتوری [۲]

استفاده از بیم نوترونی مناسب مهمترین نقش را در افزایش کیفیت تصاویر رادیوگرافی نوترونی دارد. پرتونگاری نوترونی عمدتاً با نوترون‌های حرارتی انجام می‌شود. برای دستیابی به یک باریکه‌ی نوترونی مناسب برای پرتونگاری نوترونی، از موازی‌ساز نوترونی استفاده می‌شود. این موازی‌ساز نوترونی مناسب، نسبت نوترون به گاما و میزان موازی‌سازی را تعیین خواهد کرد. سیستم‌های ثبت تصویر در پرتونگاری نوترونی شامل ترکیبی از مبدل‌های نوترون و صفحات آشکارساز (فیلم پرتونگاری، سوسوزن و فوتودیود) می‌باشد که انتخاب هر کدام از آن‌ها وابسته به در دسترس بودن آن‌ها، نوع کاربرد و هزینه می‌باشد. فیلم‌های پرتونگاری نسبت به سایر صفحه‌های آشکارسازی قدرت تفکیک مکانی بسیار بالاتری ($10-20 \mu m$) دارند، اما فرایند آماده‌سازی آن‌ها از جمله ظهور و ثبوت باعث طولانی شدن تهیه تصویر می‌گردد. همچنین این فیلم‌ها بازه‌ی دینامیکی کوچکی دارند و در ارزیابی و سنجش کمی عناصر موجود در نمونه‌ی تحت آزمون کارایی زیادی ندارند. صفحات تصویر^۱ فوسفرانی بازه‌ی دینامیکی گسترده‌تری نسبت به فیلم‌های پرتونگاری دارند و بدلیل این‌که پس از پرتودهی نیاز به عملیات ظهور و ثبوت نداشته و با اسکن لیزری

روش‌های بسیار سودمند بازرسی غیرمخرب سوخت‌های هسته‌ای است [۱۱].



شکل ۱. ضریب تضعیف خطی نوترون‌ها در مقایسه با

پرتوهای ایکس برای مواد مختلف [۱۰]

شرایط موجود در موارد بالا عبور امواج فراصوتی را مشکل کرده و بنابراین تنها رقیب اصلی رادیوگرافی نوترونی، از روشهای NDT، رادیوگرافی اشعه X و گاما باقی می‌ماند. ولی به علت سطح مقطع عناصر موجود در این مواد و تداخل ذرات ساطع شده از سوخت‌های هسته‌ای، تصاویر حاصل از بیم نوترون وضوح بالاتری خواهد داشت. چشمه‌های مورد استفاده جهت تولید نوترون برای رادیوگرافی، شتابدهنده‌ها، راکتورهای هسته‌ای و چشمه‌های نوترونی حاصل از تلاشی عناصر سنگین می‌باشد. در حال حاضر از بین منابع نوترونی ذکر شده فقط راکتورهای تحقیقاتی هستند که شار مناسب را برای رادیوگرافی نوترونی با کیفیت عالی را می‌توانند فراهم کنند. هم‌اکنون بیش از ۱۰۰ مرکز در این زمینه در جهان فعالیت می‌کنند، که حدود ۷۵ درصد از آنها از راکتورهای هسته‌ای استفاده می‌کنند. شکل ۲ مثالی را از اجزای یک سیستم نوترون رادیوگرافی راکتوری نشان می‌دهد.

^۱ Imaging plate: IP

به صورت دیجیتال تبدیل شده، سرعت بالاتری در تهیه تصاویر دارند. با وجود این مزایا، قدرت تفکیک مکانی صفحه تصویر ($>50 \mu m$) نسبت به فیلم پرتونگاری پایین تر است.

۲. روش کار

این تحقیق برای رادیوگرافی نوترون از سیستم جدید نوترون رادیوگرافی راکتور تحقیقاتی تهران استفاده شده است. راکتور تحقیقاتی تهران با قدرت ۵ مگاوات از نوع استخری با کندکننده (و خنک کننده آب سبک) و سوخت صفحه‌ای با غنای ۲۰ درصد وزنی ^{235}U می باشد که در آذر ماه سال ۱۳۴۶ راه اندازی شده است. هسته مرکزی این راکتور در عمق ۸ متری استخری با ظرفیت ۵۰۰ متر مکعب قرار دارد. این راکتور شامل مجموعه ای از قسمت اصلی در داخل یک گنبد محافظ و سیستم های جانبی خنک کننده و پمپاژ آب و تصفیه یونی در مساحتی حدود ۲ هکتار قرار گرفته است.

پس از تعویض سوخت قدیمی HEU در سال ۱۳۷۲، این راکتور با بسته های سوخت با غنای ۲۰٪ LEU مشغول به کار بوده است. وضعیت نرمال کاری قلب راکتور حاوی ۲۲ الی ۳۰ بسته سوخت می باشد. این راکتور یکی از انواع راکتورهای استخری چند منظوره بوده و در نوع خود از کاراترین انواع راکتورهای تحقیقاتی دنیا در زمینه علمی و صنعتی می باشد. طیف نوترون های خروجی از قلب راکتورهای تحقیقاتی، از جمله راکتور تهران، در محدوده وسیعی از انرژی ها قرار دارد.

پرتونگاری نوترونی در راکتور تحقیقاتی تهران انجام شده است. اخیراً جهت بهبود پارامترهای باریکه نوترونی سیستم پرتونگاری نوترونی در راکتور تحقیقاتی تهران، یک باریکه نوترونی جدید نصب شده و پرتو دهی آثر باستانی در این تحقیق

با استفاده از باریکه ی جدید انجام شده است. جدول ۱ مشخصات این باریکه نوترونی جدید را در مقایسه با سیستم قبلی و پارامترهای استاندارد مورد نیاز برای آزمون های پرتونگاری نوترونی نشان می دهد [۱۲]. بالاتر بودن شار نوترون و نسبت نوترون به گاما در سیستم جدید، موجب کاهش زمان پرتو دهی و افزایش میزان کنتراست تصاویر می شود. مدت زمان پرتو دهی با توجه به شار نوترونی باریکه و نوع سیستم ثبت تصویر انتخاب می شود که در قسمت بعد توضیح داده شده است.

جدول ۱. مشخصات باریکه نوترونی سیستم پرتونگاری

راکتور تحقیقاتی تهران و مقایسه با مقادیر استاندارد [۱۲]

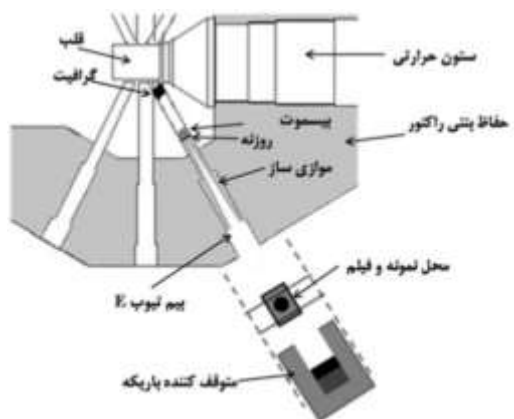
پارامتر	باریکه نوترونی جدید	باریکه نوترونی قبلی	مقادیر توصیه شده استاندارد
شار نوترون حرارتی در محل نمونه	$n \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ $6/1 \times 10^{11}$	$n \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ $4/1 \times 10^4$	$n \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ $> 10^{11}$
نسبت نوترون به گاما (N/G)	$n \text{ cm}^{-2} \text{ mrem}^{-1}$ $4/85 \times 10^5$	$n \text{ cm}^{-2} \text{ mrem}^{-1}$ $1/2 \times 10^5$	$n \text{ cm}^{-2} \text{ mrem}^{-1}$ $> 10^5$
نسبت موازی سازی (L/D)	۱۵۰-۲۵۰	۱۴۰	>۱۰۰
درجه واگرایی (θ)	$2/67^0$	$2/06^0$	$< 4^0$

۱.۲. سفال تاریخی ناحیه سمیران

قلعه سمیران مربوط به دوران های تاریخی پس از اسلام

کوزه تاریخی فوق‌الذکر با استفاده از سیستم جدید نوترون رادیوگرافی و بیم E در قدرت ۳ مگاوات رادیوگرافی شد. برای ثبت نتایج از سیستم رادیوگرافی دیجیتال با صفحات تصویر فسفرسانس و بازه‌ی دینامیکی گسترده استفاده شد. از شاخصهای نشانگر کیفیت تصویر نوترونی استفاده شد. تصویر به کمک اسکنر لیزری مخصوص با قدرت متوسط و رزولوشن مکانی $50 \mu m$ بدست آمد. شکل ۴ آرایش هندسی مورد استفاده و بیم E و موقعیت قلب راکتور را نشان می‌دهد. با توجه به مشکلات موجود در شاتر قدیمی و عدم تکمیل و نصب شاتر جدید، راکتور ابتدا بحرانی شد و به قدرت ۳ مگاوات رسانیده شد. پس از دستیابی به قدرت پایدار و بیم یکنواخت نوترونی، کاست حاوی مبدل و فیلم دیجیتال رادیوگرافی به صورت دستی در محل خود جای داده شد. زمان پرتودهی نوترون حدود دو دقیقه و با فلاکس نوترونی از مرتبه 10^6 بود.

همچنین در شکل ۵ موقعیت هندسی واقعی و محل پرتودهی و بیم E نشان داده شده‌اند. پارامتر مهم L/D برای این تحقیق حدود ۱۵۰ بود.



شکل ۴. آرایش هندسی مورد استفاده برای نوترون رادیوگرافی و موقعیت قلب راکتور

است و در شهرستان قزوین، روستای بهرام آباد واقع شده و این اثر در تاریخ ۱۴ فروردین ۱۳۷۸ با شماره ثبت ۲۳۰۹ به‌عنوان یکی از آثار ملی ایران به ثبت رسیده است. دژ سمیران یک مقر حکومتی بوده و برای همین مرکز ساخت سفال برای مصارف گوناگون بوده است. بعضی از سفال‌های پیدا شده در این منطقه ساده و بدون نقش هستند. لعاب استفاده شده در این سفال‌ها از مناطق دیگر آورده می‌شده است و عمده سفال‌های این منطقه بدون رنگ بوده‌اند. کوزه سفالی که در شکل ۳ دیده می‌شود برای نگهداری آب و شیر استفاده می‌شده و سفالی ساده با قسمت بیرونی دود زده است. نواحی نقوش و عیوب با پیکان مشخص شده است. قدمت این ظرف به دوره میانی اسلام یعنی قرون شش تا هشت هجری می‌رسد. بدلیل لزوم انتقال آثار هنری به محل راکتور تهران، در این مرحله اولیه از اثری استفاده شد که ارزش قیمتی کمتری داشته باشد.



شکل ۳. تصویری از کوزه تاریخی منطقه باستانی سمیران که در این تحقیق نوترون رادیوگرافی شده است.

۲.۲. چیدمان اولین رادیوگرافی نوترون آثار باستانی

در کشور

دارند گفته می‌شود. Θ زوایای صافی گابور را نشان داده و Ψ فاز است. σ تغییرات پوش تابع گوسین و γ نسبت ابعاد فضایی را نشان می‌دهند. [۱۴]. در صافی گابور دو پارامتر اصلی داریم فرکانس یا طول موج و پارامتر بعدی زاویه یا جهت صافی است.

با توجه به مستقل بودن تغییرات مولفه‌های حقیقی و موهومی در فیلتر گابور و با فرض اینکه تغییرات آن‌ها دارای توزیع نرمال با واریانس مشابه باشند می‌توان از توزیع رایلی برای محاسبه سطح آستانه با توجه به اطلاعات دامنه بدون اثر گذاشتن بر اطلاعات فاز استفاده کرد که در آن تابع چگالی احتمال توزیع عبارت است از [۱۴]:

$$R(x) = \frac{x}{\sigma_g^2} \exp\left(-\frac{x^2}{2\sigma_g^2}\right) \quad (۳)$$

که σ_g^2 انحراف معیار توزیع گوسی دو بعدی در محل بردار پاسخ فیلتر است و متوسط تابع توزیع رایلی چنین محاسبه می‌شود:

$$\mu_r = \sigma_g \sqrt{\frac{\pi}{2}} \quad (۴)$$

و انحراف معیار آن چنین است:

$$\sigma_r^2 = \frac{4-\pi}{2} \sigma_g^2 \quad (۵)$$

آستانه با توجه به مقادیر چنین محاسبه می‌شود.

$$T = \mu_r + k\sigma_r \quad (۶)$$

با اعمال این سطح آستانه به مولفه‌های جهتی و مقیاسی می‌توان از ترکیب آن‌ها تصویری بدون نویز ساخت که در آن‌ها نقوش و عیوب مشخص تر از تصویر اولیه رادیوگرافی باشند.

۳. نتایج و بحث

شکل ۶ الف تصویر بدست آمده را همراه با شاخص‌های نشانگر کیفیت تصویر نوترونی در گوشه سمت چپ نشان می‌دهد. تصویر نوترون رادیوگرافی آثار هنری، اولین تصویر از این



شکل ۵. موقعیت هندسی محل پرتو دهی و بیم E

۳.۲. صافی گابور

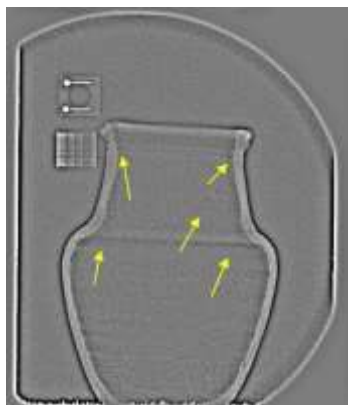
صافی گابور بر تجزیه اطلاعات تصویر با موجک گابور کار می‌کند. اساس این موجک یک تابع گوسی مدوله شده با یک تابع سینوسی مختلط است که می‌تواند به عنوان آشکارسازهای جهت‌دار و تطبیق پذیر با مقیاس، بهترین محلی‌سازی همزمان اطلاعات مکانی و فرکانسی را ارائه دهد [۱۳-۱۴]. از مزایای استفاده از صافی گابور این است که تابع‌های موجک با فرکانس‌ها و زوایای فاز مختلف می‌توانند وجود داشته باشند که هر کدام اطلاعات خاصی از تصویر را در جهات و فرکانس‌های مختلف در بر دارند. صافی گابور دارای یک جزء حقیقی و یک جزء موهومی است که عبارتند از [۱۴]:

$$g = \exp\left(-\frac{x'^2 + \gamma^2 x'^2}{2\sigma^2}\right) \exp\left(i\left(2\pi \frac{x'}{\lambda} + \Psi\right)\right) = K + iM \quad (۱)$$

که در آن قسمت نمایی حقیقی پوش سیگنال و قسمت نمایی دوم تابع مختلط هستند. جزئی حقیقی و موهومی چنین بدست می‌آیند:

$$K = \exp\left(-\frac{x'^2 + \gamma^2 x'^2}{2\sigma^2}\right) \cos\left(2\pi \frac{x'}{\lambda} + \Psi\right) \\ M = \exp\left(-\frac{x'^2 + \gamma^2 x'^2}{2\sigma^2}\right) \sin\left(2\pi \frac{x'}{\lambda} + \Psi\right) \quad (۲)$$

که در این روابط x' و γ مختصات یک نقطه از تصویر و λ معرف طول موج سینوسی می‌باشد. طول موج به فاصله بین دو قله متوالی موج یا بین هر دو نقطه تکراری موج که شکل یکسان



شکل ۷. تصویر بازسازی شده با صافی گابور در ۶ فرکانس و ۲۰ زاویه فضایی مختلف

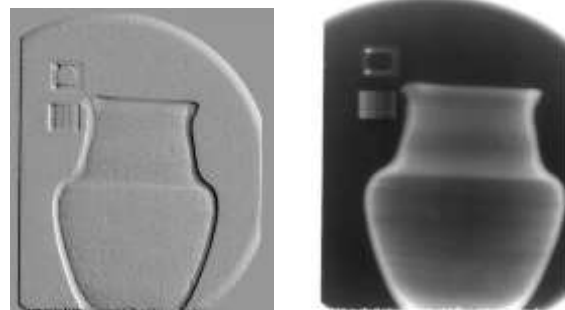
این تحقیق نشان می‌دهد که سیستم جدید نوترون رادیوگرافی تهران به خوبی می‌تواند در مطالعه آثار هنری بکار گرفته شود و به ویژه در مطالعات باستانشناسی ابزار کم نظیری را برای باستان‌شناسان فراهم می‌سازد. این تحقیق به صورت یک امکان‌سنجی اولیه و بدست آوردن تصویر اولیه بود. بدیهی است مطالعات تکمیلی و بررسی‌های کامل برای استفاده بهینه از این سیستم رادیوگرافی نوترون باید صورت پذیرد.

مراجع

- [1] IAEA, TECDOC-1604, Neutron Imaging: A Non-Destructive Tool for Materials Testing, Report of the coordinated research project, 2008.
- [2] Practical neutron radiography edited by J.C. Domanus, KLUWER ACADEMIC PUBLISHERS, 1992
- [3] Neutron Imaging and Applications, by Ian S. Anderson, Springer, 2009.
- [4] Physical techniques in the study of art, archeology and cultural heritage, by D. Bradley, Elsevier, 2006.
- [5] ASTM International, ASTM E748, Practices for Thermal Neutron Radiography of Materials, 2014.
- [6] ASTM International, ASTM E545: Standard Test Method for Determining Image Quality in Direct Thermal Neutron Radiographic Examination, 2014.

نوع در کشور است. وجود برخی ناهمگنی‌ها و عیوب در قسمت دهانه کوزه مشهود است. همچنین با توجه به کیفیت مناسب تصویر می‌توان برخی آنالیزهای کمی را نیز در مورد آن انجام داد. علاوه بر آن وجود یک تصویر دیجیتال این امکان را فراهم می‌سازد که از تکنیک‌های مختلف پردازش تصویر بر روی تصویر اصلی استفاده کرده و تصاویر با ویژگی‌های مورد نظر را ایجاد کرد. نمونه‌ای از این تکنیک برای پیدا کردن عمق تصویر در شکل ۶ ب ارائه شده است.

برای مشخص تر شدن نقوش که در تصویر رادیوگرافی بسختی دیده می‌شوند از صافی گابور روی تصویر استفاده شد. نتایج حاصل از اعمال صافی با $\lambda=2$ در ۶ فرکانس و ۲۰ جهت مختلف فضایی در شکل ۷ مطابق الگوریتم بخش ۲,۲ نشان داده شده است. در شکل نقوش نواحی سر و فرورفتگی ناحیه بالایی کوزه کاملاً مشخص تر شده ، طوریکه طرح فرو رفته دایره ای سر و گردن کوزه بهتر دیده می‌شوند.



ب

الف

شکل ۶. الف) تصویر نوترون گرافی کوزه تاریخی منطقه باستانی سمیران قزوین و ب) تصویر پردازش شده آن

- [7] ASTM International, ASTM E 803, Standard Test Method for Determining the L/D Ratio of Neutron Radiography Beams, 2013.
- [8] ASTM International, ASTM E 2003, Standard Practice for Fabrication of the Neutron Radiographic Beam Purity Indicators, 2014.
- [9] ASTM International, ASTM E2023, Standard Practice for Fabrication of Neutron Radiographic Sensitivity Indicators, 2014.
- [10] INSO-20711, Iranian National Standardization Organization, Determining image quality in direct thermal neutron radiographic examination-Test method, 2016 in Persian.
- [11] R. Yasuda, et al., Application of Neutron Imaging Plate and Neutron CT Methods on Nuclear Fuel and Materials, IEEE TRANSACTIONS ON NUCLEAR SCIENCE, VOL. 52, NO. 1, FEBRAURY 2005
- [12] M.H. Choopan Dastjerdi, et al., Design, construction and characterization of a new neutron beam for neutron radiography at the Tehran Research Reactor. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 818 (2016) 1-8
- [13] R. J. Ferrari, R. M. Rangayyan, J. E. L. Desautels, A. F. Frère, Analysis of Asymmetry in Mammograms via Directional Filtering With Gabor Wavelets, IEEE Trans. on Medical Imaging, Vol. 20, No. 9, 953-964, 2001.
- [14] A. Serrano, I. M. de Diego, C. Conde, E. Cabello, Analysis of variance of Gabor filter banks parameters for optimal face recognition, Pattern Recognition Letters, 1998-2008, 2011.

Neutron radiography for Evaluation of Designs and Defects of Cultural Vase of Samiran at Tehran Research Reactor

**A. Movafeghi¹, M.H. Choopan-dastjerdi¹, B. Rokrok¹, E. Yahaghi², Eissa Neghahdarzadeh²,
A. Keshavarz-Khani³ and A. Zia-abadi³**

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

2. Department of Physics, Imam Khomeini International University

3. Cultural Heritage, Handcrafts and Tourism Organization of Qazvin province

* Corresponding author's E-mail: amovafeghi@aeoi.org.ir

(Received: 13/07/2018- Accepted: 30/11/2018)

ABSTRACT

Neutron radiography (NR) is a useful technique in non-destructive testing (NDT) of cultural heritage objects. NR is complementary to X and gamma radiography. A new NR beam line has recently been built at the Tehran Research Reactor (TRR) in order to expand the national applications of NR. The examination and characterization of internal structure and composition can be difficult task, in particular for cultural heritage objects. With NR, it is possible to visualize hydrogen-containing materials inside metal artefacts much better than with X-rays. In this research, a historical object has been radiographed by means of new neutron beam line of TRR. The object was a vase from Samiran region of Qazvin Province, Iran. The digital neutron radiography technique was used by the digital imaging plates (or Computed Radiography: CR). The image was obtained and saved in digital format. Digital image processing was implemented for enhancing the image. This was the first neutron radiography image of new NR facility at TRR. The results showed that the new system can be used effectively for the neutron radiography of cultural heritage objects.

Keywords: Neutron radiography; Cultural Vase; Non-destructive testing, Image processing