



بررسی تأثیر هندسه داده‌برداری و روش بازسازی بر تصاویر مقطع‌نگاری نوترونی در رآکتور تحقیقاتی تهران

نفیسه عراقیان^{*}، امیر موافقی، بهروز رکرك، محمدحسین منصوری، زینب نقش‌نژاد، مجتبی فرض‌مهدی
پژوهشکده رآکتور و ایمنی هسته‌ای، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی ایران، صندوق پستی: ۱۴۱۵۵-۱۳۳۹، تهران - ایران

*Email: narghian@aeoi.org.ir

مقاله‌ی پژوهشی

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۰/۱۰/۲۶ تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۱/۵/۲

چکیده

تصویربرداری مقطع‌نگاری نوترونی یکی از کاربردهای مدرن رآکتورهای تحقیقاتی در سرتاسر جهان به‌شمار می‌رود. تلفیق قابلیت نمایش سه‌بعدی تصویربرداری مقطع‌نگاری با ویژگی‌های منحصر به فرد برهم‌کنش نوترون با مواد، می‌تواند اطلاعات بسیار ارزشمندی از ساختار داخلی مواد و تجهیزات را در اختیار محققین قرار دهد. در این تحقیق، تأثیر هندسه داده‌برداری تجربی و روش بازسازی تصویر بر کیفیت تصاویر مقطع‌نگاری نوترونی سامانه تصویربرداری رآکتور تحقیقاتی تهران براساس شاخص وضوح و میزان تولید نویز مورد مطالعه قرار گرفته است. در مرحله داده‌برداری تجربی، دو نمونه مورد آزمون در دو هندسه با چرخش نیم‌صفحه‌ای با نمو زاویه‌ای ۰/۵ و ۱ درجه توسط باریکه نوترون پرتودهی شده‌اند. تصاویر نمونه با استفاده از الگوریتم‌های بازسازی تصاویر مقطع‌نگاری شامل روش‌های تحلیلی FBP و روش‌های تکرارشونده ART، SART و SIRT به دست آمده‌اند. تصویر حجمی نمونه با روی هم قرار دادن پشته‌ای از مجموعه ۱۶۷۰ تایی از تصاویر مقطعی حاصل شده است. از زبان برنامه‌نویسی پایتون برای پردازش و بازسازی تصویر از افکنش استفاده شده است. برای حصول افکنش‌های با کیفیت مناسب برای بازسازی تصویر، ابتدا مشخصات سیستم داده‌برداری تجربی بهینه‌سازی شده‌اند. سپس، با استفاده از پیش‌پردازش، کیفیت تصاویر افکنش‌ها افزایش یافته است. براساس نتایج، اجزای نمونه مورد آزمون و عیوب موجود در آن در تمام تصاویر، از یک‌دیگر قابل تمایز می‌باشند. مقدار وضوح و آهنگ وضوح به نویز در هندسه با نمو زاویه‌ای کم‌تر و با استفاده از روش SIRT بهبود یافته است.

کلیدواژه‌ها: مقطع‌نگاری دیجیتال نوترونی، رآکتور تحقیقاتی تهران، پردازش تصویر، بازسازی تصاویر CT، هندسه‌ی داده‌برداری

Investigating the effect of data acquisition geometry and image reconstruction method on neutron computed tomography images at Tehran Research Reactor

N. Araghian*, A. Movafeghi, B. Rokrok, M.H. Mansouri, Z. Naghshnezhad, M. Farzmaidi

Reactor and Nuclear Safety Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute, AEOI, P.O.Box: 14155-1339, Tehran - Iran

Research Article

Received 16.1.2022, Accepted 24.7.2022

Abstract

Neutron Computed Tomography (nCT) is one of the modern applications of research reactors. The combination of the Three-dimensional representation capability of tomographic imaging and the unique properties of neutron interaction with materials creates valuable information about the internal structure of materials and components. In this study, the effect of data acquisition geometry and method of image reconstruction on tomographic images of the Tehran Research Reactor Imaging Facility (TRRIF) have been investigated based on contrast and the ratio of contrast to noise parameters. In experimental data acquisition, two radiation geometries have been aligned with angular steps of 1 and 0.5 degrees, respectively. Two samples were turned within the neutron radiation field at a half-screen. Image reconstruction has been performed through FBP and ART, SART, and SIRT algorithms, using Python programming language. The stack of images has been rendered to gain sample volume. Initially, in order to reconstruct the image through a high-quality set of projections, experimental data acquisition parameters have been optimized. Then, pre-processing has been carried out on projections. The results showed that the sample components and some defects could be differentiated from each other. Contrast and CNR were improved in data acquisition geometry with smaller angular steps and through SIRT reconstruction method.

Keywords: Neutron computed tomography (nCT), Tehran research reactor, Image processing, CT image reconstruction, Data acquisition geometry



۱. مقدمه

تصویربرداری مقطع‌نگاری کامپیوتری نوترونی (nCT)^۱، یکی از کاربردهای مدرن رآکتورهای تحقیقاتی برای بازرسی و آزمون غیرمخرب مواد و قطعات است [۱]. کاربرد این روش دامنه وسیعی از صنایع مختلف از جمله صنایع نیروگاهی، هسته‌ای، نظامی، مهندسی مواد، آثار باستانی، میراث فرهنگی و زیست‌شناسی را در برمی‌گیرد. پس از ارایه‌ی روش مقطع‌نگاری فوتونی در دهه‌ی ۷۰ میلادی (دهه‌ی ۵۰ هجری شمسی) که منجر به اخذ جایزه نوبل توسط هانسفیلد و کورماک در سال ۱۹۷۹ شد [۲]، استفاده از این روش در پزشکی و صنعت گسترش فراوانی یافته است. در سال‌های دهه‌ی ۹۰ میلادی نیز توسعه‌ی روش غیرمخرب مقطع‌نگاری کامپیوتری با نوترون‌ها، به تدریج در برخی از رآکتورهای تحقیقاتی آغاز گشت.

روش‌های سنتی تصویربرداری نوترونی از جمله پرتونگاری با استفاده از فیلم با قدمتی بیش از ۷۰ سال در حال استفاده‌اند. با این وجود، تصویربرداری مقطع‌نگاری نوترونی پس از ظهور سیستم‌های ثبت دیجیتال تصویر و پیدایش روش‌های بهینه مقطع‌نگاری در سال‌های بعد تحقق یافت [۳، ۴]. در حال حاضر تصویربرداری مقطع‌نگاری نوترونی با دقت و قدرت تفکیک بالا یکی از مدهای تصویربرداری مهم و معمول در پیشرفته‌ترین مراکز تصویربرداری نوترونی در جهان است که هم از رآکتورهای تحقیقاتی و هم از شتاب‌دهنده‌های مولد نوترون به عنوان منبع نوترون استفاده می‌کنند [۵، ۶].

تصویربرداری مقطع‌نگاری نوترونی براساس ثبت تصاویر پرتونگاری دوبعدی از نوترون‌های عبورکننده از نمونه در موقعیت‌های زاویه‌ای مختلف نمونه نسبت به صفحه پرتودهی-آشکارسازی حاصل می‌شود. برای ثبت هر تک تصویر پرتونگاری دوبعدی موسوم به تک-افکنش^۲ [۷]، نمونه تحت تابش یک میدان نوترونی شبه-موازی قرار می‌گیرد. میدان نوترونی بر اثر انجام برهم‌کنش با عناصر موجود در نمونه تضعیف می‌شود. تضعیف میدان نوترونی با سطح مقطع برهم‌کنش نوترون با هسته‌های عناصر موجود در نمونه و ضخامت آن متناسب است. بخشی از نوترون‌ها بدون انجام برهم‌کنش از نمونه عبور نموده و پس از رسیدن به آشکارساز شمارش می‌شوند. میزان نوترون‌های عبوری شمارش شده حاوی اطلاعات ارزشمندی از ساختار داخلی نمونه مورد آزمون است. اعمال الگوریتم‌های بازسازی

تصویر مقطع‌نگاری، بر افکنش‌های به دست آمده، یک نمای سه‌بعدی از جزییات ساختاری نمونه را به نمایش می‌گذارد. برجسته‌ترین ویژگی تصویربرداری مقطع‌نگاری که آن را از روش پرتونگاری معمول متمایز می‌کند، ایجاد یک میدان دید سه‌بعدی و کاهش روی هم‌افتادگی^۳ اجزای تشکیل‌دهنده نمونه است. در پرتونگاری، اطلاعات نمونه در یک صفحه دوبعدی نگاشت می‌شود. داده‌های ثبت شده در دوربین، انتگرال حجمی از نمونه است که توسط پرتو روبش شده است. بنابراین، به دلیل هم‌پوشانی داده‌های ثبت شده در دوربین، امکان مشاهده‌نشدن برخی از ویژگی‌های ساختاری مهم و کوچک در نمونه وجود دارد. این درحالی است که برخلاف پرتونگاری دوبعدی، در نمای سه‌بعدی ایجاد شده در تصویربرداری مقطع‌نگاری، جزییات بیش‌تری از ساختار داخلی مواد از جمله عیوب ساختاری، ترک‌ها، آثار تخریب، اتصالات نادرست و غیره قابل شناسایی خواهد بود.

رآکتور تحقیقاتی تهران دارای چند بیم تیوب مناسب برای استفاده از نوترون تولید شده در قلب رآکتور در مطالعات و اندازه‌گیری‌های کاربردی است. برای طراحی و استقرار یک سامانه تصویربرداری نوترونی در رآکتور تحقیقاتی تهران، تحقیقات امکان‌سنجی و فعالیت‌هایی در سال‌های گذشته برای طراحی و ساخت موازی‌ساز نوترون براساس استفاده رآکتور از سوخت هسته‌ای با غنای بالا (دارای ^{235}U با غنای حدود ۹۰٪) و پس از تغییر آن به سوخت با غنای پایین ۲۰٪ انجام شده است [۸-۱۰]. موازی‌ساز ساخته شده، پس از انجام آزمون‌های کنترل کیفیت مطابق با استاندارد ASTM E۵۴۵، باریکه نوترونی با رده کیفیت I ایجاد نموده است [۱۱]. در سال ۱۳۹۹، اجزای مورد نیاز برای برپایی سامانه تصویربرداری نوترون رآکتور تحقیقاتی تهران (TRRIF)^۴ با قابلیت تصویربرداری به روش پرتونگاری بر پایه فیلم و پرتونگاری دیجیتال زمان واقعی طراحی، ساخته و اجرا شده است [۱۲]. تصویربرداری مقطع‌نگاری سه‌بعدی سامانه در سال ۱۴۰۰، طراحی و پیاده‌سازی گردیده است. در این تحقیق، تأثیر تنظیم هندسه داده‌برداری^۵ تجربی و روش بازسازی تصویر به کار گرفته شده بر کیفیت تصاویر مقطع‌نگاری سامانه مورد مطالعه قرار گرفته است.

3. Superimposed

4. Tehran Research Reactor Imaging Facility

5. Data Acquisition Geometry

Journal of Nuclear Science and Technology

Vol. 44 (3), Serial Number 104, 2023, P 1-12

1. Neutron Computed Tomography

2. Single-Projection



۲. روش‌ها

تحت تابش قرار می‌گیرد. نوترون‌های عبورکننده از نمونه، توسط یک صفحه آشکارساز حساس به نوترون از نوع سنیتلاتور ${}^6\text{LiF/ZnS}$ با ابعاد $25\text{cm} \times 25\text{cm}$ و ضخامت $200\text{ }\mu\text{m}$ ، آشکار شده و نشانک نوری تولید شده در آن توسط یک دوربین اپتیکی ثبت می‌شود. مجموعه تصویربرداری در یک جعبه آندایز شده و عایق نوری موسوم به جعبه تاریک قرار داده شده است. برای حفاظت قطعات الکترونیکی دوربین از بمباران نوترونی، تصویربرداری دیجیتال به روش پریسکوپي با استفاده از یک جعبه تاریک L شکل انجام می‌شود. لذا از یک آینه با سطح انعکاسی تک گانه‌ای آلومینیمی و با ضریب انعکاس نوری بالا برای بازتابش نور تولید شده در سوسوزن به سمت دوربین اپتیکی استفاده شده است. دوربین اپتیکی دیجیتال دارای سنسور CMOS با مبدل آنالوگ به دیجیتال تک‌رنگ ۱۲ بیتی، پیکسل‌بندی شده با ابعاد $3/8\text{ }\mu\text{m}$ و قدرت تفکیک ۱۶ مگاپیکسل، تصاویر نمونه را ثبت می‌کند. میز چرخان نمونه و سیستم تصویربرداری دیجیتال در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل ۱. سیستم تصویربرداری دیجیتال به روش پریسکوپي (بالا)، میز قرارگیری نمونه برای تصویربرداری مقطع‌نگاری نوترونی (پایین).

به طور کلی مراحل اصلی تصویربرداری مقطع‌نگاری نوترونی شامل داده‌برداری^۱ و پردازش تصویر است. در مرحله داده‌برداری که به صورت تجربی انجام می‌شود، ابتدا هندسه داده‌برداری تنظیم می‌گردد. این هندسه شامل پرتوهای نمونه مورد آزمون در زوایای متعدد قرارگیری نمونه نسبت به میدان پرتوهای نوترون‌های حرارتی، آشکارسازی پرتوهای نوترون عبوری از نمونه توسط آشکارساز نوترون، تبدیل و ثبت اطلاعات به نشانک نوری قابل ذخیره در دوربین اپتیکی و تبدیل نشانک نوری به داده‌های دیجیتال است. داده‌های حاصل شده در این مرحله، موسوم به افکنش، ورودی مرحله پردازش و بازسازی تصویر است. در مرحله پردازش تصویر، پیش از اعمال الگوریتم‌های بازسازی تصویر، افکنش‌های دوبعدی خام به دست آمده، پیش‌پردازش شده و آرتیفکت‌های موجود در آن‌ها با اعمال فیلترهای مناسب، تا حد ممکن اصلاح و حذف می‌شوند. سپس با اعمال الگوریتم‌های مناسب بازسازی تصویر، تصاویر مقطعی به همراه نمایش سه‌بعدی از حجم نمونه مورد آزمون حاصل می‌شود. در این مطالعه، برای پردازش و بازسازی تصویر از محیط برنامه‌نویسی پایتون استفاده شده است. توابع، روش‌ها و الگوریتم‌های به کار گرفته شده در برنامه‌نویسی از کتابخانه‌های شامل `neutumpy`, `openCV`, `numexpr`, `numpy` [۱۳]، `astra-toolbox` [۱۴]، `os`، `tqdm` و غیره انتخاب شده‌اند.

۱.۲ مشخصات سیستم تصویربرداری و تنظیم هندسه داده‌برداری

سیستم تصویربرداری شامل باریکه‌ای از نوترون‌های موازی شده توسط همسوساز، میز چرخان نمونه، آشکارساز نوترون و سیستم ثبت تصاویر دیجیتال است [۱۲]. سامانه TRRIF بر روی یکی از تیوب‌های شعاعی رآکتور تحقیقاتی تهران بنا نهاده شده است. نوترون‌های تولید شده در قلب رآکتور که عمدتاً در محدوده انرژی نوترون‌های سریع قرار گرفته‌اند، توسط همسوساز نوترون، طیفی از نوترون‌های حرارتی از مرتبه $10^6\text{ n.cm}^{-2}.s^{-1}$ را در محل نمونه مورد آزمون ایجاد می‌کند. براساس استانداردهای موجود، مقدار شار نوترون حرارتی از مرتبه مذکور برای اهداف تصویربرداری نوترونی در مقیاس صنعتی قابل استفاده می‌باشد [۱۱].

نمونه پس از آن که بر روی یک میز با قابلیت چرخش به میزان 360° (با حداکثر دقت زاویه‌ای 0.1°) تنظیم می‌شود، توسط باریکه‌ی نوترون حرارتی شبه موازی به قطر ۲۵ cm

1. Data Acquisition



تصاویر باریکه باز و جریان تاریک در دوربین به ترتیب در حالت شاتر باز و شاتر بسته و بدون حضور نمونه ثبت شده‌اند. برای کاهش نویز حرارتی، دمای دوربین با استفاده از سیستم خنک‌کننده‌ی داخلی آن تا حد امکان کاهش داده شده است. برای تنظیم دوربین، مشخصات تصاویر دیجیتال و هم‌زمانی اتوماتیک میان چرخش میز و ثبت تصویر از نرم‌افزار رابط کاربری سامانه TRRIF استفاده شده است. تصاویر افکنش با فرمت TIFF، عمق داده‌ی ۱۶ بیت و ابعاد پیکسل بازترکیب شده در آرایه ۲×۲ ثبت شده‌اند. مشخصات هندسه‌های داده‌برداری مقطع‌نگاری در جدول ۱ آمده است.

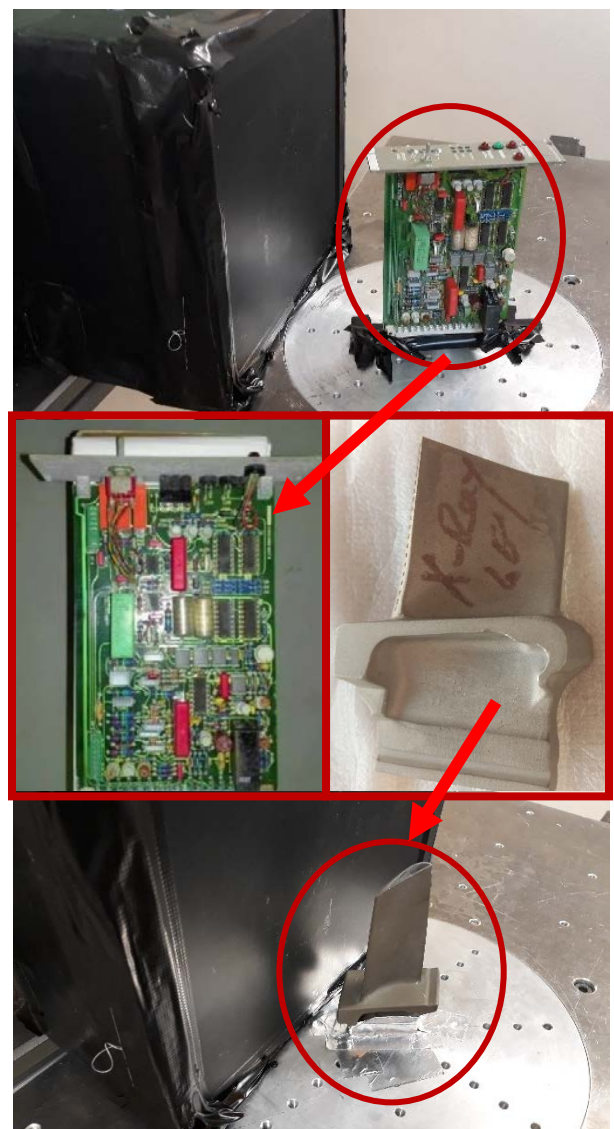
زمان پرتودهی مدت زمانی است که دوربین اپتیکی در حال جمع‌آوری داده و تبدیل آن به سیگنال در پیکسل‌های سنسور است. در سیستم تصویربرداری نوترونی این عمل هم‌زمان با پرتودهی نمونه توسط میدان نوترونی انجام می‌شود. برای مدت زمان پرتودهی یک حد بالا براساس شاخص تبدیل سیگنال آنالوگ به دیجیتال (ADC) دوربین وجود دارد. افزایش بیش از حد زمان پرتودهی، نه تنها باعث بهبود کیفیت تصویر نمی‌شود، بلکه به دلیل اشباع کانال‌های ADC باعث تنزل کیفیت تصویر می‌گردد. دوربین اپتیکی سامانه TRRIF (۱۲ بیت)، مدت زمان پرتودهی برای تصویربرداری مقطع‌نگاری به صورت تجربی به دست آمده است.

بهره دوربین اپتیکی برای تنظیم میزان نور جمع‌آوری شده در حسگر دوربین را به ازای سیگنال تولید شده در هر پیکسل دوربین نشان می‌دهد. با توجه به این که مقدار سیگنال معادل با روشنایی پیکسل مورد نظر است، با افزایش بهره، میزان روشنایی تقویت خواهد شد. تقویت روشنایی ناشی از افزایش بهره به صورت الکترونیکی رخ می‌دهد و در نتیجه نویز نیز هم‌زمان با تقویت سیگنال، افزایش یافته است. به طور کلی در مدت زمان پرتودهی بیشتر، بهره دوربین اپتیکی کم‌تر انتخاب می‌شود. میزان این شاخص نیز به صورت تجربی برای سامانه تصویربرداری مقطع نگاری TRRIF تنظیم گردیده است.

جدول ۱. مشخصات هندسه‌های تنظیم شده برای تصویربرداری مقطع‌نگاری نوترونی در راکتور تحقیقاتی تهران

nCT: ۰.۵°	nCT: ۱°	هندسه داده‌برداری
۴.۵	۴.۵	توان راکتور (MW _{th})
۲۶	۱۶	زمان پرتودهی به ازای هر افکنش (s)
۴۰	۱۲۰	بهره دوربین اپتیکی
۱۸۰	۶۰	مدت زمان داده‌برداری (min)
۳۶۰	۱۸۰	تعداد افکنش
۰.۵°	۱°	گام زاویه‌ای بین دو افکنش متوالی
۱۸۰°	۱۸۰°	کمان نهایی اسکن

دو نمونه برای آزمون تصویربرداری شامل یک برد الکترونیکی و یک پره توربین در نظر گرفته شده‌اند. نمونه مطابق شکل ۲، در مرکز میز چرخان، با فاصله ۶.۵ cm از سوسوزن ثابت شده است. آشکارساز سوسوزن در فاصله ۱۳۵ cm از دهانه همسوساز نوترون قرار دارد. برای تصویربرداری مقطع‌نگاری، نمونه به صورت نیم صفحه در دو حالت به ترتیب با گام زاویه‌ای ۱° و ۰.۵° پرتودهی و تصاویر افکنش دو بعدی آن توسط آشکارساز نوترون ثبت می‌شود. مدت زمان پرتودهی و زمان توقف در هر گام زاویه‌ای همگام با یکدیگر و متناسب با زمان لازم برای ایجاد تصویر با وضوح مطلوب در نظر گرفته شده است.



شکل ۲. تنظیم مکان نمونه برای تصویربرداری مقطع‌نگاری نوترونی.



۳.۲ روش‌های بازسازی تصویر

طبق تعریف هرمان در سال ۱۹۸۰ م، بازسازی تصویر از طریق افکنش‌های داده‌برداری شده را می‌توان به صورت فرایند تولید تصویر مرتبط با یک توزیع دوبعدی (عمدتاً خصوصیات فیزیکی) از طریق تخمین انتگرال‌های خطی در امتداد تعداد مشخصی از خطوط پرتو در موقعیت‌های معین توصیف کرد [۱۷]. برای بازسازی تصاویر مقطع‌نگاری، الگوریتم‌های ریاضی مختلفی توسعه داده شده‌اند که براساس قواعد حاکم بر الگوریتم و نوع داده‌های مقطع‌نگاری دسته‌بندی می‌شوند. روش‌های تحلیلی همانند الگوریتم FBP^۲ بر مبنای وارون تبدیل رادون یا معکوس انتگرال خطی استوارند [۱۷-۱۹].

الگوریتم FBP به بیان ساده محاسبه تبدیل فوریه هر افکنش در فضای فرکانس است. با تبدیل فوریه، هر نقطه واقع در نمونه مورد آزمون در فضای مکان به صورت یک خط پرتو در فضای فرکانس نمایش داده می‌شود که در حقیقت نمایش افکنش در فضای فرکانس است. چپ‌نش افکنش‌ها در زوایای متناسب به هریک از آن‌ها در فضای فرکانس، مجموعه‌ای از خطوط پرتو موسوم به نمایش سینوگرام ایجاد می‌کند. به این فرایند پس‌افکنش^۳ گفته می‌شود. برای تعیین شدت پیکسلی و مکان دقیق هر نقطه واقع در نمونه مورد آزمون، فیلترهای مناسبی نظیر hamming، Ram-Lak و غیره بر سینوگرام اعمال می‌شود. سپس با به کارگیری یک تابع درون‌یابی مناسب و محاسبه معکوس تبدیل فوریه، نقاط نمونه مورد آزمون در فضای مکانی نمایش داده می‌شود. روش FBP عموماً برای بازسازی داده‌های پیوسته یا شبه پیوسته به کار می‌رود و با سرعت بیش‌تری به پاسخ مطلوب ختم می‌شوند.

روش‌های تکرارشونده به دو دسته روش‌های جبری و مدل‌های آماری تقسیم می‌شوند. مبنای روش تکرار، مقایسه افکنش تخمین زده شده با افکنش به دست آمده در داده‌برداری تجربی و یافتن شدت پیکسل‌های تصویر طبق یک معیار تصحیح تعریف شده در الگوریتم است. الگوریتم‌های ART^۴، SART^۵، SIRT^۶، OSEM^۷ و MLEM^۸ نمونه‌هایی از الگوریتم‌های تکرارشونده می‌باشند. روش‌های تکرارشونده معمولاً برای برآورد داده‌های کامل از داده‌های اندازه‌گیری شده ناکامل استفاده می‌شوند و در مقایسه با روش‌های تحلیلی برای

تعداد افکنش انتخاب شده در هندسه داده‌برداری تجربی میزان داده‌های جمع‌آوری شده برای رسم سینوگرام در مرحله بازسازی تصویر و تبدیل سینوگرام‌های حاصل به تصاویر مقطعی را معین می‌کند. بنابراین، زمان پرتودهی به طور مستقیم بر تعداد گام تصویربرداری تأثیرگذار خواهد بود.

۲.۲ اصول تصویربرداری مقطع‌نگاری

تصویربرداری مقطع‌نگاری نوترونی یک از روش‌های تصویربرداری عبوری^۱ است که در آن از نوترون‌های تراگسیل شده از نمونه برای یافتن نقشه یا توزیع مواد داخل آن استفاده می‌شود. با توجه به این‌که تضعیف شدت باریکه نوترون، با سطح مقطع ماکروسکوپی عناصر موجود در نمونه و ضخامت آن متناسب است، شدت درجه خاکستری رنگ ثبت‌شده در دوربین برای هر تک-افکنش طبق رابطه (۱) متناسب است با:

$$I_{\text{projection}} = I_{\text{openBeam}} e^{\int_{-T}^{-\Sigma(t)} dt} \quad (1)$$

که در آن I_{openBeam} ، $I_{\text{projection}}$ و T به ترتیب شدت باریکه نوترون عبوری، شدت باریکه اولیه، سطح مقطع ماکروسکوپی کل، ضخامت نمونه و نمو طولی در امتداد مسیر عبور باریکه نوترون هستند [۱۵]. تقریباً در تمام دوربین‌های دیجیتال، درجه خاکستری رنگ هر پیکسل برای بازسازی تصویر طبق رابطه (۲) تصحیح می‌شود [۱۶]:

$$P_{\text{Corrected}} = -\ln\left(\frac{I_{\text{projection}} - I_{\text{darkCurrent}}}{I_{\text{openBeam}} - I_{\text{darkCurrent}}}\right) \quad (2)$$

در رابطه (۲)، I_{openBeam} و $I_{\text{darkCurrent}}$ به ترتیب شدت باریکه نوترون عبوری در حضور نمونه، باریکه باز و جریان تاریک را نشان می‌دهند. برای به هنجارسازی براساس تصویر باریکه باز و جریان تاریک، در مرحله‌ی داده‌برداری علاوه بر مجموعه تصاویر افکنش، دو مجموعه تصویر بدون حضور نمونه، به ترتیب در حالت شاتر باز و شاتر بسته گرفته شده است. عملیات ریاضی رابطه ۲، بر روی درجه خاکستری رنگ در پیکسل‌های نظیر به نظیر در تصویر نمونه، باریکه باز و جریان تاریک در مرحله پردازش تصویر انجام می‌شود.

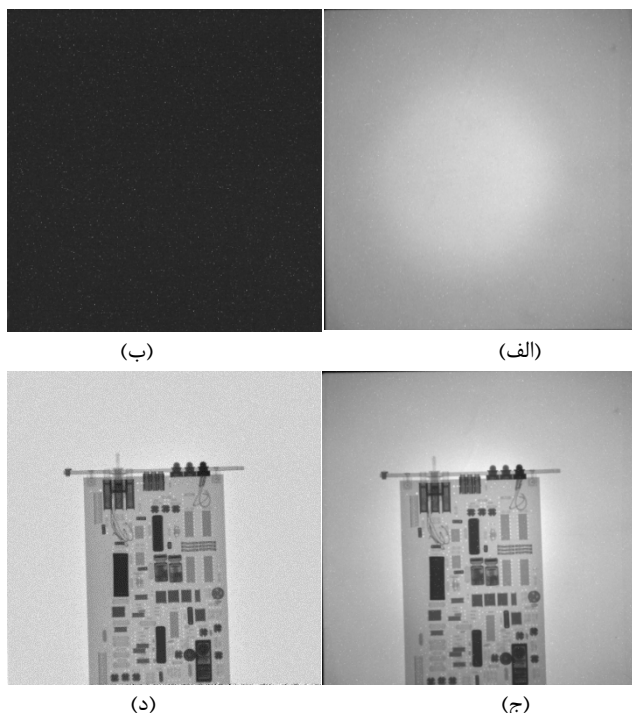
2. Filtered Back Projection
 3. Back Projection
 4. Algebraic Reconstruction Technique
 5. Simultaneous Algebraic Reconstruction Technique
 6. Simultaneous Iterative Reconstruction Technique
 7. Ordered Subset Expectation Maximization
 8. Maximum Likelihood Expectation Maximization
- Journal of Nuclear Science and Technology



یک تک-افکنش خام از مجموعه افکنش‌های برد الکترونیکی مورد آزمون پیش از تصحیح و به‌هنگارش و پس از آن نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، عدم یکنواختی باریکه نوترونی در تصویر باریکه باز (شکل ۳ الف) و تک افکنش قبل از اعمال تصحیحات (شکل ۳ ج) به گونه‌ای است که شدت باریکه نوترونی به تدریج از پیکسل‌های واقع شده در مرکز تصویر به سمت پیکسل‌های دورتر، کاهش یافته است.

۲.۳ بازسازی و نمایش حجم سه بعدی تصویر

در این تحقیق، تصاویر افکنش مرحله داده‌برداری در یک آرایه پیکسلی به تعداد 1760×1760 به دست آمده‌اند. تصاویر مقطع‌نگاری در هندسه‌های پرتودهی توصیف شده، با استفاده از الگوریتم FBP با دو فیلتر Hamming و Ram-Lak و الگوریتم‌های جبری تکرارشونده ART، SART و SIRT بازسازی شده‌اند. مرتبه تکرار هریک از الگوریتم‌ها با توجه به تعداد لازم برای همگرا شدن پاسخ الگوریتم به تصویر نمونه انتخاب می‌شوند. بنابراین حداقل تعداد تکرار برای الگوریتم ART، SART و SIRT به ترتیب برابر با 10^6 ، 10^3 و 10^1 به دست آمده است. با در نظر گرفتن کاهش نسبت نویز به سیگنال و رسیدن به وضوح مطلوب، 1760 مقطع از نمونه‌های مورد آزمون با استفاده از الگوریتم‌های اشاره شده با تعداد تکرار مطابق جدول ۲ بازسازی شده‌اند.



شکل ۳. تصاویر افکنش برد الکترونیکی: الف) باریکه باز، ب) جریان تاریک، ج) تک افکنش قبل از تصحیح، د) تک افکنش پس از تصحیح.

بازسازی، علی‌رغم دقت بالاتر، زمان بیش‌تر و قدرت محاسباتی زیادتری را برای استخراج تصویر صرف می‌کنند. کامپیوترهای محاسباتی پرسرعت امروزی تا حدی این مشکل را برطرف نموده‌اند. مهم‌ترین مزیت الگوریتم‌های تکرارشونده کاهش نویز در تصویر می‌باشد [۲۰].

۴.۲ شاخص‌های کمی محاسبه شده برای تحلیل تصاویر

برای مقایسه تصاویر بازسازی شده، مقدار وضوح تصویر (C) ،^۱ آهنگ مقدار وضوح به نویز (CNR) ^۲ در نواحی مختلف در تصویر به کار می‌روند. مقدار وضوح، توانایی تمایز اختلاف در شدت دو ناحیه مورد نظر (ROI) ^۳ در تصویر است که یکی از آن دو به عنوان پیش‌زمینه در نظر گرفته می‌شود. در محاسبه CNR، مقدار وضوح با نویز ناحیه پیش‌زمینه مقایسه می‌شود. اگر میانگین شدت پیکسل در دو ناحیه به ترتیب I_1 و I_2 و ناحیه ۲ به عنوان پیش‌زمینه با انحراف معیار σ_2 برای شدت پیکسل‌ها در نظر گرفته شود، مقدار C و CNR برای ناحیه ۱ به ترتیب عبارت است از:

$$C = \frac{|I_1 - I_2|}{I_1} \quad (3)$$

$$CNR = \frac{|I_1 - I_2|}{\sigma_2} \quad (4)$$

۳. نتایج و بحث

۱.۳ پیش پردازش تصاویر افکنش

هندسه تصویربرداری مقطع‌نگاری نوترون یک هندسه سه بعدی است که در آن افکنش‌ها به صورت تصاویر دو بعدی ثبت می‌شوند. هر تک-افکنش، پیش از بازسازی تصاویر بایستی از کیفیت تصویر مطلوب برخوردار باشد. بدین منظور، حفاظ‌گذاری دوربین در برابر نوترون‌های پراکنده شده و پرتوهای گامای زمینه، تقویت عایق نوری جعبه تاریک تصویربرداری دیجیتال و بهینه‌سازی پارامترهای دوربین اپتیکی برای ایجاد یک تصویر با قدرت تفکیک و وضوح بالا در مرحله داده‌برداری تجربی انجام شده است. سپس، کیفیت تصاویر افکنش با پیش‌پردازش از طریق اعمال فیلترهای تصویر مناسب برای حذف آرتیفکت ناشی از برخورد پرتوهای گامای پراکنده با سنسور دوربین موسوم به نقاط روشن^۴، اصلاح عدم یکنواختی میدان نوترون و به‌هنگارسازی شدت باریکه نوترون عبوری مطابق با رابطه (۲) افزایش یافته است. در شکل ۳ تصویر باریکه باز، جریان تاریک،

1. Contrast
2. Contrast to Noise Ration
3. Region of Interest
4. White Spot



جدول ۲. الگوریتم‌های ریاضی استفاده شده برای بازسازی تصاویر

مقطع‌نگاری نوترونی در سامانه TRIFF

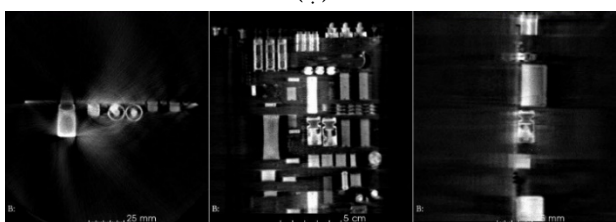
FBP (Hamming)	FBP (Ram-Lak)	ART	SART	SIRT
-	-	3×10^6	5×10^3	۱۰۰-۲۰



(الف)



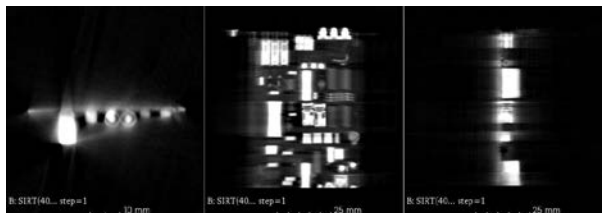
(ب)



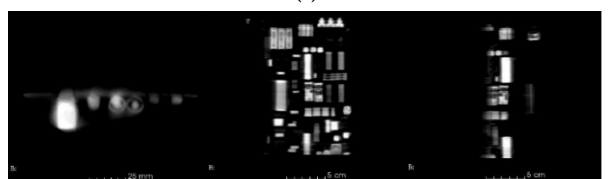
(ج)



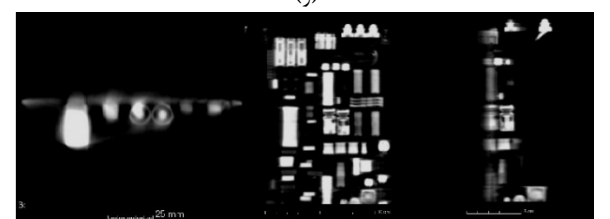
(د)



(ه)



(و)



(ز)

شکل ۴. تصاویر بازسازی شده قطعه الکترونیکی مورد آزمون در هندسه پرتودهی 1° : nCT در یک مقطع محوری، عرضی و طولی: (الف): FBP(Hamming), (ب): FBP(RamLak), (ج): ART(iteration= $3E6$), (د): SART(iteration= $5E3$), (ه): SIRT(iteration=۲۰), (و): SIRT(iteration= 40), (ز): SIRT(iteration=۱۰۰).

در شکل‌های ۴ و ۵، یک مقطع از تصاویر بازسازی شده از قطعه الکترونیکی مورد آزمون از سه زاویه دید محوری، ساجیتال و کروئال نشان داده شده است. در تمام تصاویر بازسازی شده با استفاده از الگوریتم‌های مختلف، اجزای مختلف برد الکترونیکی، از جمله ساختار داخلی دو قطعه خازن مشاهده می‌شود. تعداد گام پرتودهی و روش بازسازی انتخاب شده، بر آرتیفکت‌های موجود در تصاویر تأثیرگذار است. آرتیفکت تصاویر بازسازی شده به روش FBP به صورت محوشدگی ستاره‌ای و در تصاویر ART، SART و SIRT به صورت محوشدگی سراسری مشاهده می‌شود. در تصویر مربوط به الگوریتم ART، میزان آرتیفکت بیش‌تری وجود دارد. وضوح تصاویر مربوط به الگوریتم FBP نسبت به تصاویر ART و SART بیش‌تر است. بیش‌ترین میزان وضوح تصاویر مربوط به الگوریتم SIRT می‌باشد که با متناسب با تعداد تکرار الگوریتم افزایش یافته است.

با این وجود، قدرت تفکیک مکانی در تمام تصاویر به ویژه تصاویر مربوط به الگوریتم SIRT متأثر از شکل نمونه کاهش یافته است. دلیل این مطلب را این گونه می‌توان توصیف نمود. بازیابی تصاویر نمونه از طریق افکنش‌های داده‌برداری به معنای یافتن توزیع حجمی نمونه مورد آزمون است. در فرایند بازیابی نقشه توزیع مکانی اجزای نمونه، هر نقطه با شدت پیکسل معین که در افکنش‌های داده‌برداری به دست آمده است، به کل خط پرتوی نسبت داده می‌شود که از داخل نمونه عبور کرده است. با استفاده از مجموعه خطوط پرتو در موقعیت‌های زاویه‌ای مختلف، توزیع شدت وکسلی (پیکسل سه بعدی) نمونه مورد آزمون از طریق تخمین‌های متوالی به دست می‌آید. در این فرایند، توزیع متقارن شکل فضایی نمونه، فرایند پس‌افکنش و بازیابی نقشه توزیع مکانی اجزای نمونه را تسهیل خواهد نمود. این درحالی است که مسطح بودن قطعه الکترونیکی مورد آزمون از نظر توزیع فضایی انحراف زیادی نسبت به حالت متقارن دارد و تفکیک فضایی پیکسل‌های واقع شده در مرزهای نمونه نسبت به زمینه تصویر دشوار می‌نماید.

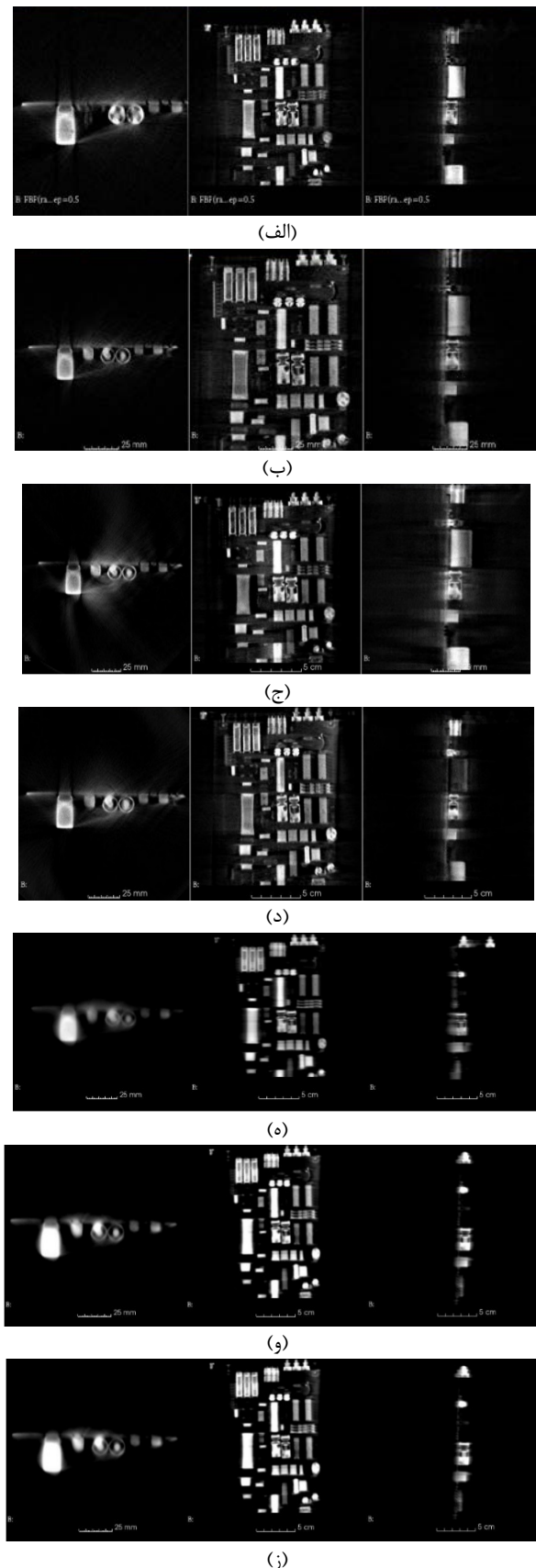


برای مقایسه کمی میزان آرتیفکت تصاویر، یک ROI یکسان در تمام مقاطع بازسازی شده از تصاویر انتخاب و مقدار وضوح و آهنگ وضوح به نويز در آن‌ها، محاسبه گردیده است. در شکل ۶، مقادیر محاسبه شده برای تعدادی از مقاطع بازسازی شده در دو هندسه پرتودهی نشان داده شده است.

مقاطع اول تصویر، مربوط به نواحی می‌باشند که سطح مقطع کوچکی از نمونه در آن‌ها قرار گرفته است. بنابراین، مقادیر وضوح محاسبه شده در آن‌ها به مقدار صفر نزدیک است. برای سایر مقاطع تصویر، در هندسه پرتودهی با گام زاویه‌ای 0.5° نیز نشان داده شده‌اند. بیش‌ترین مقدار محاسبه شده وضوح و آهنگ وضوح به نويز به الگوریتم SIRT تعلق دارد. الگوریتم‌های FBP، SART و ART به ترتیب در جایگاه بعدی قرار گرفته‌اند. مقادیر محاسبه شده برای تصاویر مربوط به الگوریتم‌های مختلف، در هندسه پرتودهی با گام زاویه‌ای 1° نیز از همان ترتیب نزولی اشاره شده برای هندسه پرتودهی با گام زاویه‌ای 0.5° پیروی می‌کند.

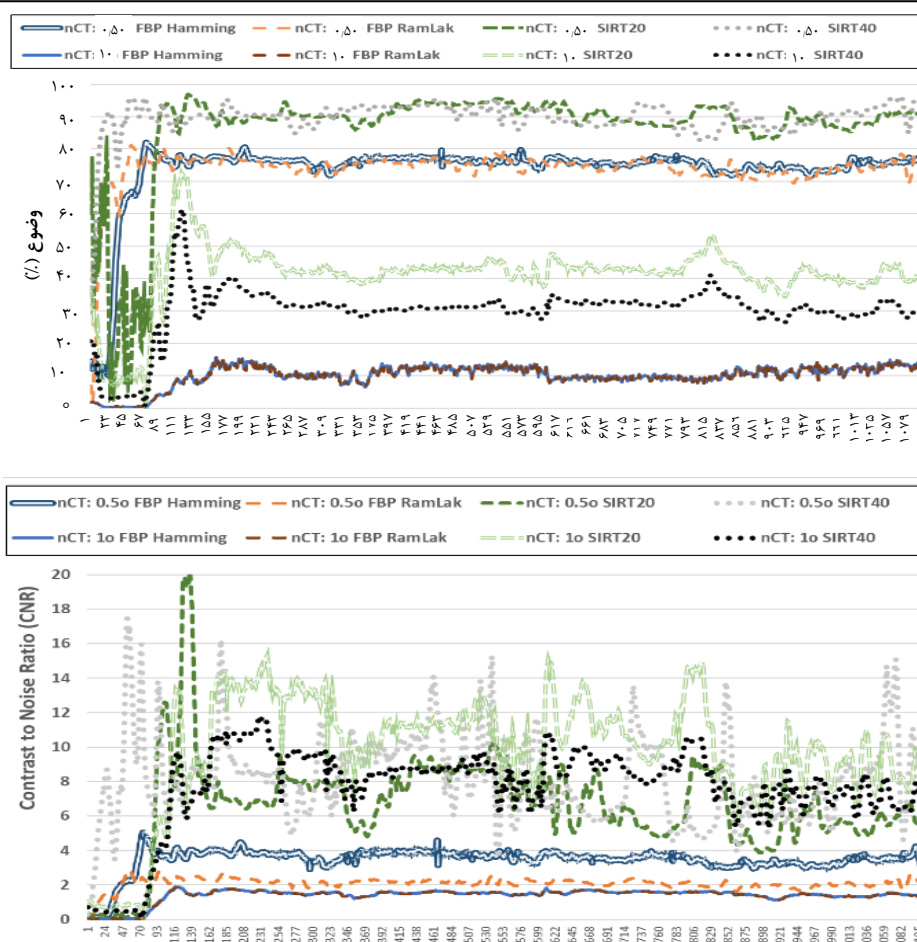
هم‌چنین، مقدار وضوح در هندسه پرتودهی با گام زاویه‌ای 0.5° در تمام الگوریتم‌های بازسازی تصویر نسبت به مقدار وضوح در هندسه پرتودهی با گام زاویه‌ای 1° افزایش داشته است. در مقایسه دو هندسه پرتودهی اشاره شده، مقادیر آهنگ وضوح به نويز از قاعده منظمی در مقاطع مختلف تصویر پیروی نمی‌کند.

در جدول ۳، مقادیر محاسبه شده C و CNR برای دو مقطع به عنوان نمونه آورده شده است. نتایج نشان می‌دهد، با افزایش تعداد گام پرتودهی در حالت پرتودهی دوم، C و CNR در تمام روش‌های بازسازی افزایش یافته است، زیرا افزایش تعداد افکنش، داده بیش‌تری برای بازسازی تصویر ایجاد نموده است. در هندسه پرتودهی دوم با تعداد گام پرتودهی دو برابر نسبت به هندسه پرتودهی اول، C و CNR به ترتیب تقریباً تا ۳۰٪ و ۱٫۵ برابر افزایش یافته‌اند. روش بازسازی تکرارشونده SIRT نسبت به روش تحلیلی FBP، میزان نويز را کاهش داده است. C و CNR در روش SIRT به ترتیب تا ۸۸٪ و ۶ برابر نسبت به روش FBP بهبود یافته است.



شکل ۵. تصاویر بازسازی شده قطعه الکترونیکی مورد آزمون در هندسه پرتودهی 0.5° nCT در یک مقطع محوری، عرضی و طولی: (الف): FBP(Hamming)، (ب): FBP(RamLak)، (ج): ART(iteration=3E6)، (د): SART(iteration=5E3)، (ه): SIRT(iteration=100)، (و): SIRT(iteration=400)، (ز): SIRT(iteration=1000).





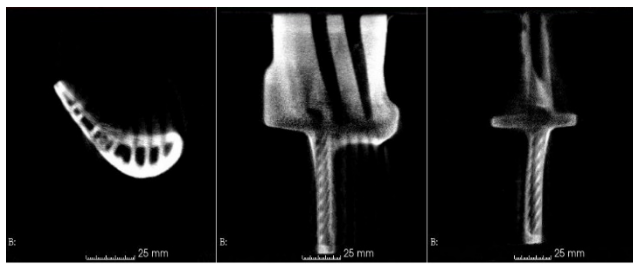
شکل ۶. مقایسه مقادیر C و CNR در دو هندسه پرتو دهی مورد مطالعه برای تعدادی از مقاطع بازسازی شده از قطعه الکترونیکی با استفاده از الگوریتم‌های بازسازی مختلف.

نتایج بازسازی تصویر در جدول ۳ برای الگوریتم تکرارشونده SIRT نشان می‌دهد با افزایش مرتبه تکرار الگوریتم بازسازی، مقدار C تغییر چندانی نداشته است. با این وجود، CNR کاهش یافته است. در الگوریتم‌های تکرارشونده، تخمین‌های متوالی بر مبنای یک معیار تصحیح شدت در پیکسل‌های تصویر و رسیدن به جواب مطلوب تکرار می‌شود. پس از تعداد معینی از تکرار الگوریتم، تصویر با وضوح مطلوب حاصل و به مقدار ثابت می‌رسد. این مقدار ثابت متناسب با وضوح ذاتی تصویر است و با افزایش مرتبه تکرار الگوریتم، تغییری در مقدار آن ایجاد نمی‌شود. هم‌چنین، CNR پس از افزایش تا تعداد معینی از تکرار الگوریتم افزایش و پس از آن کاهش می‌یابد. این نشان می‌دهد که تعداد مرتبه تکرار الگوریتم در ایجاد نویز ناشی از بازسازی تصویر مؤثر بوده و افزایش آن از یک مقدار معین، باعث از هم پاشیدگی و تنزل تصویر می‌گردد. لذا افزایش تعداد تکرار الگوریتم بازسازی تصویر نه تنها باعث افزایش کیفیت تصویر

جدول ۳. مقادیر C و CNR در یک ROI معین مربوط به دو مقطع از تصاویر بازسازی شده با الگوریتم‌های مختلف بازسازی تصویر

	CNR		C(%)		
	nCT: 0.5°	nCT: 1°	nCT: 0.5°	nCT: 1°	
FBP (Hamming)	۴۵۲	۳۲۸	۶۰۶۲	۴۴۶۳	
FBP (RamLak)	۴۲۸	۳۳۰	۶۰۶۲	۴۵۸۷	
ART (iteration=۳E۶)	۴۷۲	۳۲۸	۶۰۸۵	۴۴۶۲	
SART (iteration=۵E۳)	۵۰۶	۳۲۹	۶۳۴۵	۴۵۸۶	
SIRT (iteration=۲۰)	۲۰۷	۱۳۶	۷۵۹۵	۵۰۸۲	
SIRT (iteration=۴۰)	۲۰۲	۱۱۵	۷۶۴۶	۴۶۷۷	
SIRT (iteration=۱۰۰)	۳۶۹	۲۳۹	۷۸۴۵	۷۲۱۸	
	۳۲۱	۲۳۱	۷۴۲۴	۷۲۹۷	
	۲۴۷۱	۱۹۷۱	۸۲۲۸	۸۴۵۰	
	۲۵۱۱	۱۹۰۵	۸۶۱۹	۸۶۶۴	
	۱۵۱۶	۱۸۳۵	۸۰۶۷	۸۵۵۳	
	۱۷۹۹	۱۵۱۴	۸۵۴۴	۸۲۹۵	
	۵۹۹	۶۳۱	۸۹۳۹	۸۷۲۶	
	۷۰۷	۶۰۵	۹۰۶۹	۸۵۰۴	





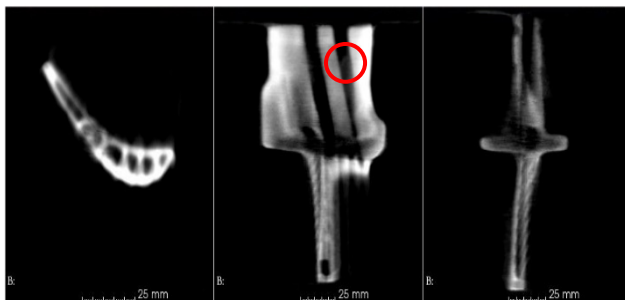
(الف)



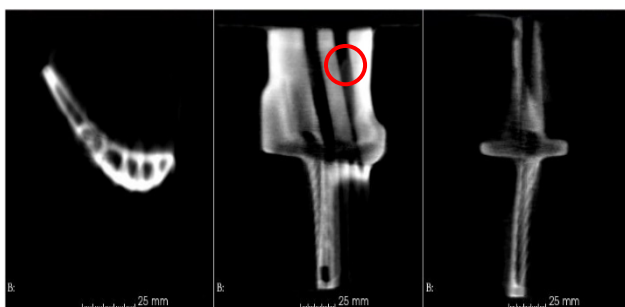
(ب)



(ج)



(د)



(ه)

شکل ۷. تصاویر بازسازی شده پره توربین در هندسه پرتو دهی $nCT: 0.5^\circ$ در یک مقطع محوری، عرضی و طولی: (الف): $FBP(Hamming)$. (ب): $FBP(RamLak)$. (ج): $SIRT(iteration=50)$. (د): $SIRT(iteration=80)$. (ه): $SIRT(iteration=100)$.

نخواهد گردید، بلکه بر زمان رسیدن به تصویر مطلوب (و در نتیجه در کل زمان تصویربرداری مقطع نگاری) اضافه خواهد نمود.

در شکل ۷، یک مقطع از تصاویر بازسازی شده از پره توربین مورد آزمون از سه زاویه دید محوری، ساجیتال و کروئال نشان داده شده است. برخلاف قطعه الکترونیکی، هندسه فضایی پره توربین به صورت یک شکل چندسطحی دارای یک حجم سه‌بعدی است. بنابراین، بازیابی توزیع شدت وکسلی توزیع فضایی پره توربین تسهیل شده و قدرت تفکیک فضایی تصاویر نسبت به قطعه الکترونیکی بهبود یافته است.

در تمام تصاویر، حفره‌های عبوردهنده جریان هوا با وضوح قابل توجهی نسبت به بدنه توربین قابل مشاهده است. بالاتر بودن وضوح تصویر در مقطع بازسازی شده توسط روش تکرارشونده SIRT نسبت به روش FBP منجر شده است تا در تصویر منتسب به روش SIRT بخشی از ماهیچه باقی‌مانده قالب ساخت پره توربین در یکی از مسیرهای عبور جریان هوا به عنوان یکی از عیوب قطعه تشخیص داده شود.

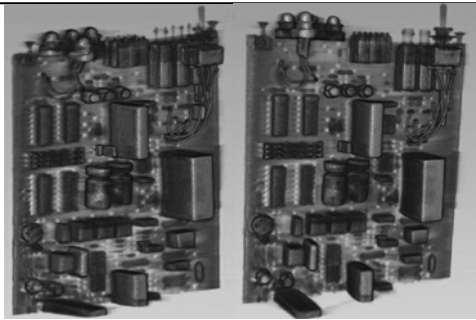
نمودارهای شکل ۸ تأییدکننده مطلب فوق می‌باشند. مقادیر CNR و C در روش تکرارشونده SIRT نسبت به روش FBP با افزایش روبه‌رو بوده است.

در شکل‌های ۹ تا ۱۱، نمای سه‌بعدی از حجم بازسازی شده نمونه‌های مورد آزمون نشان داده شده است.

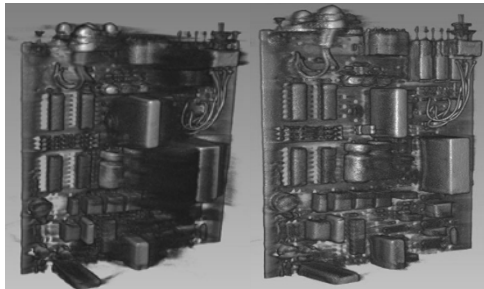
۴. نتیجه‌گیری

روش مقطع‌نگاری دیجیتال نوترونی یک روش مدرن و سودمند برای استفاده در آزمون‌های غیرمخرب مواد و کنترل کیفی تجهیزات است. افزایش کیفیت تصاویر نهایی برای استخراج ویژگی‌های مدنظر از نمونه مورد آزمون، با بهینه‌سازی پارامترهای هندسه داده‌برداری و به کارگیری روش‌های پردازش تصویر مؤثر همواره مورد توجه قرار دارد.

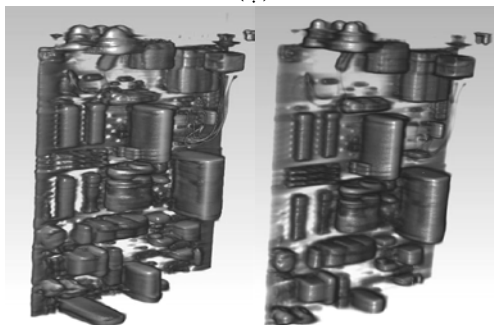




(الف)

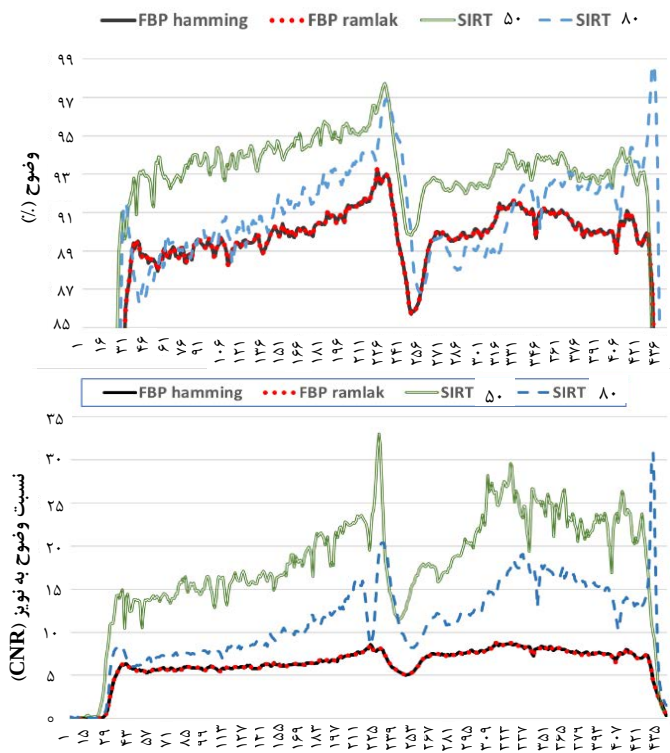


(ب)

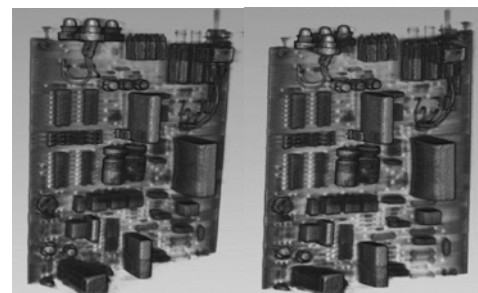


(ج)

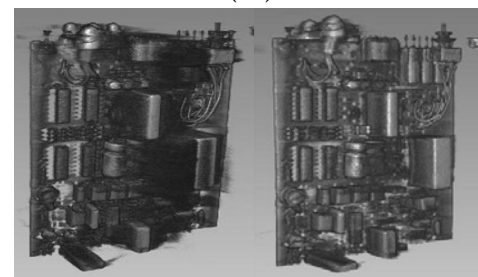
شکل ۸. مقایسه مقادیر C و CNR تعدادی از مقاطع بازسازی شده پره توربین با استفاده از الگوریتم‌های بازسازی مختلف.



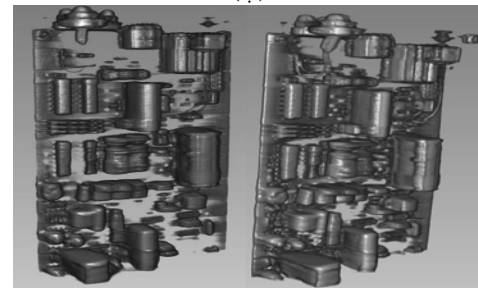
شکل ۸. مقایسه مقادیر C و CNR تعدادی از مقاطع بازسازی شده پره توربین با استفاده از الگوریتم‌های بازسازی مختلف.



(الف)

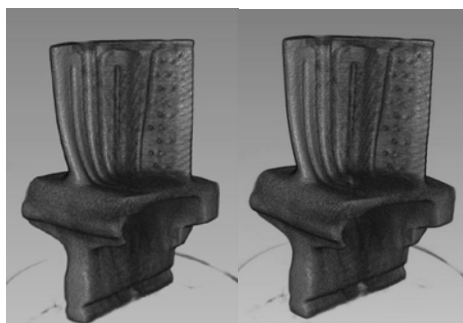


(ب)

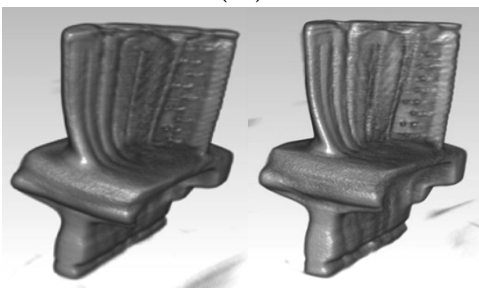


(ج)

شکل ۹. نمای سه‌بعدی از حجم بازسازی شده نمونه در هندسه پرتو دهی ۱° nCT: (الف) روش FBP، (ب) روش ART و SART، (ج) روش SIRT.



(الف)



(ب)

شکل ۱۰. نمای سه‌بعدی از حجم بازسازی شده پره توربین در هندسه پرتو دهی ۰.۵°، (الف) روش FBP، (ب) روش SIRT.



6. International Society for Neutron Radiography (ISNR), <https://www.isnr.de/index.php/facilities/facilities-worldwide>.
7. Iranian National Standardization Organization, *Non-destructive testing — Radiation: methods for computed tomography — Part 1: Terminology*, INSO 15992-1, Identical with ISO 15708-1:2017, 1st ed. (2019).
8. K.K. Moghadam, Z. Tabatabaeian, N. Mirhabibi, *Neutron Radiography Facility for AEOI Nuclear Research Center*, In: *Neutron Radiography*, Edited by J. P. Barton et al., (Springer, Netherlands, 1987).
9. K.K. Moghadam, F. Ziaie, *Modification of the neutron beam spectrum for neutron radiography at Tehran Research Reactor (TRR)*, *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A*, 337 (1996).
10. M.H. Choopan Dastjerdi, Ph.D. dissertation, *Examination of domestic nuclear fuel by design and construction of a new neutron radiography system at Tehran Research Reactor*, *Nuclear Science and Technology Research Institute*, (2015) (In Persian).
11. International American Society for Testing and Metrial, *Standard Method for Determining Image Quality in Direct Thermal Neutron Radiographic Examination*, *Standard ASTM E545*, 4 (2005).
12. B. Rokrok, et al., *Design and Construction of the Neutron Radiography Facility for Tehran Research Reactor with Real-Time Digital Imaging Capability*, *Nondestruct. Test. Evaluation*, 2, 7 (2021) (In Persian).
13. D. Micieli, T. Minniti, G. Gorini, *NeuTomPy toolbox, a Python package for tomographic data processing and reconstruction*, *SoftwareX*, 9 (2019).
14. W. Van Aarle, et al., *The ASTRA Toolbox: A platform for advanced algorithm development in electron tomography*, *Ultramicroscopy*, 157, (2015).
15. A.P. Kaestner, *MuhRec—A new tomography reconstructor*, *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sec., A*, 651, 1, (2011).
16. J.T. Bushberg, et al., *The essential physics of medical imaging*, 3rd ed. (Lippincott Williams and Wilkins, Philadelphia, PA, 2011).
17. E. Seeram, *Computed Tomography: Physical Principles, Clinical Applications, and Quality Control*, (Elsevier Health Sciences, 2015).
18. G.L. Zeng, *Medical Image Reconstruction: A Conceptual Tutorial*, 1st ed. (Springer, 2010).
19. J. Hsieh, *Computed Tomography: principles, Design, Artifacts and Recent Applications*, 3rd ed., (Wiley Inter-Science, 2015).
20. M. Beister, D. Kolditz, W. Kalender, *Iterative reconstruction methods in X-ray*, *CT. Phys. Med.*, 28 (2012).

در این تحقیق، تأثیر هندسه داده‌برداری با گام‌های زاویه‌ای مختلف و روش به کار گرفته شده برای بازسازی تصاویر مقطع‌نگاری براساس الگوریتم FBP و الگوریتم‌های تکرارشونده ART، SART و SIRT بر کیفیت تصویر از نظر مقدار وضوح و میزان تولید نویز مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج این مقاله قابلیت سامانه تصویربرداری نوترونی رآکتور تحقیقاتی تهران در تولید تصاویر مقطع‌نگاری نوترونی با کیفیت مطلوب و امکان تشخیص عیوب نمونه را با استفاده از الگوریتم‌های مختلف بازسازی تصویر نشان می‌دهد. الگوریتم‌های تکرارشونده بازسازی تصویر برای تصویربرداری مقطع‌نگاری نوترونی نتایج بهتری را نسبت به الگوریتم FBP با کاهش نویز به میزان ۶ برابر و افزایش مقدار وضوح تصویر تا ۸۸٪ ایجاد نمودند. تصاویر مقطع‌نگاری مربوط به هندسه با گام زاویه‌ای کوچک‌تر به دلیل برخورداری از تعداد افکنش بیشتر (کاهش نویز به میزان ۱/۵ برابر و افزایش مقدار وضوح تصویر تا ۳۰٪) برابر و و بازسازی با الگوریتم تکرارشونده به دلیل دقت بالاتر، دارای نویز کم‌تر بوده و از کیفیت مطلوب‌تری برخوردارند.

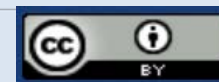
در تمام روش‌های تصویربرداری مقطع‌نگاری، دستیابی به مصالحه میان شاخص مدت زمان تصویربرداری (شامل مدت زمان بازسازی تصاویر مقطعی) و کیفیت تصویر مطلوب به عنوان یکی از چالش‌های اصلی همواره مورد توجه بوده است. با توجه به نتایج این مقاله، ارتقای سامانه تصویربرداری دیجیتال نوترونی با هدف افزایش کیفیت تصاویر دیجیتال و کاهش زمان تصویربرداری در گام بعدی مورد بررسی قرار گرفته است.

مراجع

1. International Atomic Energy Agency, *Neutron Imaging: A non-destructive tool for material testing report of a coordinated research project*, *IAEA-Tecdoc-1604* (2008).
2. The Noble Prize, <https://www.nobelprize.org/prizes/medicine/1979>, Retrived: January (2022).
3. M. Strobl, et al., *Advances in neutron radiography and tomography*, *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 42, 24 (2009).
4. Ian S. Anderson, et al., *Neutron Imaging and Applications*, *A Reference for the Imaging Community* (Springer, 2009).
5. E. Lehmann, *Neutron Imaging Facilities in a Global Context*, *J. Imaging*, 3, (2017).

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

نقیسه عراقیان، امیر موافقی، بهروز رکرك، محمدحسین منصوری، زینب نقش‌نژاد، مجتبی فرض‌مهدی (۱۴۰۲)، بررسی تأثیر هندسه داده‌برداری و روش بازسازی بر تصاویر مقطع‌نگاری نوترونی در رآکتور تحقیقاتی تهران، ۱۰۴، ۱-۱۲

DOI: 10.24200/nst.2022.1038.1700

Url: https://jonsat.nstri.ir/article_1471.html

