

Implementation of the Neutron Computed Tomography by Means of Filtered-Back Projection Algorithm in Tehran Research Reactor

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

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

*naraghian@aeoi.org.ir

Abstract

Neutron Computed Tomography (nCT) is proposed as one of the modern and high accuracy 3-dimensional imaging modalities of nondestructive testing of the materials and components. Volumetric rendering and representation capability of tomographic imaging has many advantages for interrogating the internal structures, defect detection, and quality testing of objects. Implementation of Filtered Back-Projection (FBP) reconstruction method for nCT facility at Tehran Research Reactor has been investigated in this study. The facility consists of experimental data acquisition system, integrated automation digital imaging system, image processing, FBP reconstruction, and 3D visualization softwares. Test subject was turned within the neutron radiation field at half screen and 360 two-dimensional projections were acquired through data acquisition. Preprocessing was performed on projections and tomographic images of test subject were reconstructed using MuhrRec software and FBP algorithm. The results were indicated that reconstructed images have appropriate quality. Internal defects were recognizable having dimensions above the maximum spatial resolution of the facility (~200 μm).

Keywords: Neutron Computed Tomography (nCT), Tehran Research Reactor, Nondestructive Testing (NDT), CT Image Reconstruction with FBP method

پایه‌سازی مقطع‌نگاری رایانه‌ای نوترونی با روش بازسازی تصاویر FBP در راکتور تحقیقاتی تهران

نقیسه عراقیان*، امیر موافقی، بهروز رکرک، مجتبی فرض‌مهدی، محمد حسین منصوری، زینب نقش‌نژاد

پژوهشکده راکتور و ایمنی هسته‌ای، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، تهران، ایران
narghian@aeoi.org.ir*

چکیده

تصویربرداری مقطع‌نگاری کامپیوتری نوترونی یکی از روش‌های تصویربرداری سه‌بعدی نوین و با دقت بالا برای بازرسی و آزمون غیرمخرب مواد و قطعات است. تصویر حجمی ایجادشده توسط این روش، برای بررسی ساختار داخلی، شناسایی عیوب و سنجش کیفیت نمونه‌های مورد آزمون بسیار کارآمد است. در این مقاله، پایه‌سازی مقطع‌نگاری کامپیوتری نوترونی با روش بازسازی تصاویر FBP در راکتور تحقیقاتی تهران برای اولین بار در کشور مورد مطالعه قرار گرفته است. سامانه شامل سیستم داده‌برداری تجربی، سیستم اتوماسیون یکپارچه تصویربرداری دیجیتال، پردازش و بازسازی تصویر با روش FBP و نمایش سه‌بعدی از حجم نمونه طراحی و راه‌اندازی گردیده است. نمونه مورد آزمون در میدان حاصل از باریکه نوترونی، به صورت نیم‌صفحه‌ای چرخانده و تعداد ۳۶۰ پروجکشن دو بعدی تصویربرداری شده است. تصاویر پروجکشن با استفاده از نرم‌افزار MuhRec پیش‌پردازش و تصاویر مقطع‌نگاری با استفاده از الگوریتم FBP بازسازی شده‌اند. براساس نتایج، کیفیت تصاویر حاصل از بازسازی مناسب ارزیابی می‌شود. عیوب داخلی نمونه با توجه به بیشینه قدرت تفکیک مکانی سامانه در حدود $200 \mu\text{m}$ ، قابل تشخیص می‌باشند.

واژگان کلیدی: مقطع‌نگاری رایانه‌ای نوترونی، آزمون غیرمخرب، راکتور تحقیقاتی تهران، بازسازی تصاویر CT با روش FBP

۱- مقدمه

خودروسازی فورد، اولین سیستم CT را برای ارزیابی عیوب ساختاری مواد سرامیکی اتومبیل توسعه داد. تست غیرمخرب براساس CT، توسط نگوین و همکاران وی از جنرال الکتریک توصیف شده است. هس و همکاران وی در پروژه JSF^۲ چرخه حیات اجزای کلیدی هوانوردی را بر اساس CT پیش‌بینی کردند. با توجه به رشد روزافزون تصویربرداری رادیوگرافی دیجیتال و موفقیت استفاده از روش‌های مقطع‌نگاری در آزمون غیرمخرب مواد، راهنماها و استانداردهای مربوط به روش تصویربرداری، دزیمتری، انتخاب سیستم CT و به ویژه روش تست مقطع‌نگاری دیجیتال غیرمخرب در ریخته‌گری توسط انجمن ASTM تدوین گردیده است [۳-۱۰]. پس از دو دهه از توسعه CT براساس استفاده از پرتوهای ایکس (xCT)^۳، روش غیرمخرب مقطع‌نگاری کامپیوتری با نوترون با ابداع روش‌های ثبت دیجیتال تصاویر نوترون و پیدایش روش‌های بهینه مقطع‌نگاری، به عنوان یکی از کاربردهای راکتورهای تحقیقاتی آغاز گشت [۱۱]. پس از آن، مراکز تصویربرداری

تصویربرداری مقطع‌نگاری کامپیوتری نوترونی (nCT)^۱، یک روش مدرن بازرسی و آزمون غیرمخرب مواد و قطعات به شمار می‌رود. تصاویر حاصل از این روش در طیف گسترده‌ای از آزمون‌های غیرمخرب صنعتی و تحقیق و توسعه از جمله صنایع نیروگاهی، هسته‌ای، نظامی، مهندسی مواد، آثار باستانی، میراث فرهنگی و زیست‌شناسی استفاده می‌شود.

تئوری ریاضی تصویربرداری CT با معرفی روش‌های تبدیل رادون و به کارگیری آن برای بازسازی تصویر در سال ۱۹۱۷ م. آغاز گردید [۱]. اختراع گابریل فرانک در سال ۱۹۴۰ م.، ارائه روش تصویربرداری غیرمخرب به روش مقطع‌نگاری فوتونی توسط هانسفیلد و کورماک در دهه ۷۰ میلادی (دهه ۵۰ هجری شمسی) و اخذ جایزه نوبل توسط آنان در سال ۱۹۷۹ م. شالوده‌ای برای توسعه تصویربرداری CT و کاربرد آن در صنعت و پزشکی تا به امروز گردید [۱، ۲]. در دهه ۱۹۸۰ م. فیزیکی‌دانی به نام فلدکمپ از شرکت

³ x-ray Computed Tomography

¹ neutron Computed Tomography

² Joint Strike Fighter

نمای سه‌بعدی ایجادشده در تصویربرداری مقطع‌نگاری می‌تواند جزئیات بیشتری از ساختار داخلی مواد از جمله عیوب ساختاری، ترک‌ها، آثار تخریب، اتصالات نادرست و غیره را به نمایش بگذارد.

راکتور تحقیقاتی تهران دارای چند بیم تیوب مناسب برای استفاده از نوترون تولیدشده در قلب راکتور در مطالعات و اندازه‌گیری‌های کاربردی است. برای طراحی و استقرار یک سامانه تصویربرداری نوترونی در راکتور تحقیقاتی تهران، تحقیقات امکان‌سنجی و فعالیت‌هایی از سال‌های گذشته انجام شده است. اولین مطالعات با هدف طراحی اولین سامانه رادیوگرافی نوترونی در ایران در راکتور تحقیقاتی تهران و با طراحی موازی‌ساز نوترون در بیم تیوب مماس به قلب راکتور موسوم به بیم تیوب H انجام شد [۱۴، ۱۵]. این سامانه براساس استفاده راکتور از سوخت هسته‌ای با غنای بالا (دارای ^{235}U با غنای ۰.۹۰٪) طراحی شده است. پس از تغییر سوخت راکتور از غنای بالا به غنای پایین و نیز تغییر ساختار قلب، کیفیت این سیستم نیز کاهش یافته است. برای دستیابی به یک باریکه مناسب و بهینه، در یک رساله دکتری پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای [۱۶]، طراحی و ساخت موازی‌ساز در بیم تیوب دیگر راکتور پیشنهاد گردید که به طور شعاعی و به طور مستقیم در مقابل قلب راکتور قرار دارد. با انجام محاسبات مربوط به طیف نوترون و گاما، موازی‌ساز نوترون در بیم تیوب E طراحی و عملیات نصب و تست‌های کنترل کیفیت آن در سال ۱۳۹۴ انجام شده است. براساس نتایج، کیفیت باریکه نوترون حاصل شده دارای رتبه I استاندارد ASTM E545 است [۱۷]. در سال ۱۳۹۹، اجزای مورد نیاز برای برپایی سامانه تصویربرداری نوترون راکتور تحقیقاتی تهران (TRRIF)^۲ با رعایت اصول حفاظت در برابر اشعه و مطابق با دانش روز حوزه تصویربرداری نوترونی طراحی، ساخته و اجرا شده است [۱۸]. این سامانه با قابلیت تصویربرداری به روش رادیوگرافی بر پایه فیلم و رادیوگرافی دیجیتال زمان واقعی راه‌اندازی و پیش‌بینی‌های لازم برای تصویربرداری مقطع‌نگاری سه بعدی انجام شده است. در این مقاله، طراحی و اجرای تصویربرداری مقطع‌نگاری نوترونی در سامانه تصویربرداری نوترون راکتور تحقیقاتی تهران مورد مطالعه قرار گرفته است.

نوترونی در جهان بر پایه راکتورهای تحقیقاتی و شتابدهنده‌های مولد نوترون توسعه یافتند و در حال حاضر، مقطع‌نگاری دیجیتال نوترونی با دقت و رزولوشن بالا یکی از روش‌های تصویربرداری مهم و معمول مراکز پیشرفته محسوب می‌شود [۱۲، ۱۳].

روش تصویربرداری nCT تقریباً مشابه با روش تصویربرداری مقطع‌نگاری با پرتوهای ایکس انجام می‌شود. با این وجود، تفاوت ماهیت برهم‌کنش نوترون و پرتوهای ایکس با مواد منجر می‌شود تا اطلاعات متمایزی از تصاویر nCT به دست آید. برهم‌کنش پرتوهای ایکس عمدتاً با ابر الکترونی اتم صورت می‌گیرد. لذا، ضریب تضعیف پرتوهای ایکس با مواد به عدد اتمی وابسته است. در حالی که نوترون به دلیل عمق نفوذ بیشتر با هسته‌های ایزوتوپ‌ها برهم‌کنش می‌کند. ماهیت برهم‌کنش نوترون با مواد به گونه‌ایست که عمدتاً عناصر سبک، مواد هیدروژنی یا ایزوتوپ‌هایی همچون ^{10}B ، Cd ، Gd و غیره، جاذب و تضعیف‌کننده خوبی برای نوترون محسوب می‌شوند.

در تصویربرداری مقطع‌نگاری نوترونی، نمونه در موقعیت‌های زاویه‌ای متعدد نسبت به میدان تابشی باریکه شبه موازی نوترون پرتودهی می‌شود. باریکه نوترون‌های عبورکننده از نمونه در اثر برهم‌کنش با ایزوتوپ‌های موجود در نمونه، متناسب با سطح مقطع برهم‌کنش نوترون با هسته‌های عناصر و ضخامت نمونه تضعیف می‌شوند. متناسب با شدت باریکه تضعیف شده نوترون، یک تصویر دو بعدی از نمونه در آشکارساز نوترون ثبت می‌شود که اطلاعات ارزشمندی از اجزای داخلی نمونه ایجاد می‌کند. با استفاده از الگوریتم‌های بازسازی تصویر، تصاویر مقطع‌نگاری از ساختار داخلی با قابلیت نمایش سه‌بعدی از حجم نمونه، از تصاویر حاصل در موقعیت‌های زاویه‌ای مختلف موسوم به مجموعه داده‌های پروجکشن به دست می‌آید.

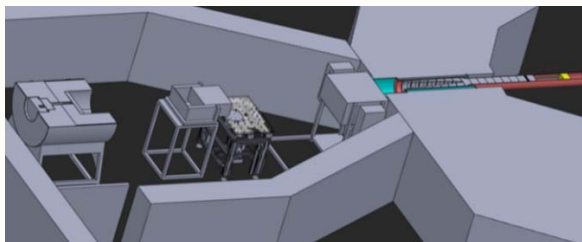
ایجاد یک میدان دید سه بعدی و کاهش روی هم‌افتادگی^۱ اجزای تشکیل‌دهنده نمونه در تصویربرداری مقطع‌نگاری، ویژگی منحصر به فردی است که در بازرسی غیرمخرب مواد به ویژه برای تعیین مکان و ابعاد ساختارهای مهم و کوچک به کار می‌رود. در رادیوگرافی، اطلاعات حجم روبش شده از نمونه توسط پرتو در یک صفحه دوبعدی نگاشت شده و منجر به همپوشانی داده‌های حجمی می‌شود. با این وجود،

^۲ Tehran Research Reactor Imaging Facility

^۱ superimposed

۲- روش‌ها

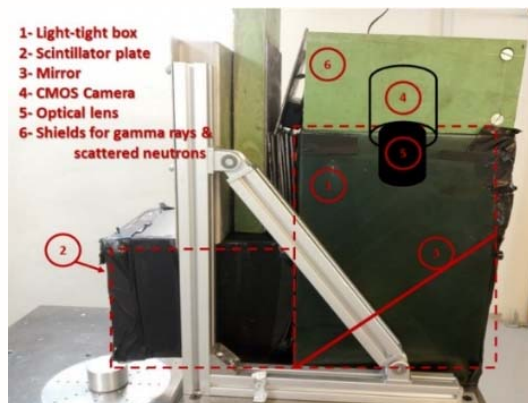
به طور کلی مراحل اصلی تصویربرداری مقطع‌نگاری نوترونی شامل داده‌برداری^۱ و پردازش تصویر است. در مرحله داده‌برداری که به صورت تجربی انجام می‌شود، ابتدا هندسه داده‌برداری^۲ تنظیم می‌گردد. این هندسه شامل پرتوهای نمونه مورد آزمون در زوایای متعدد قرارگیری نمونه نسبت به میدان پرتوهای نوترون‌های حرارتی، آشکارسازی پرتوهای نوترون عبوری از نمونه توسط آشکارساز نوترون، تبدیل و ثبت اطلاعات به سیگنال نوری قابل ذخیره در دوربین اپتیکی و تبدیل سیگنال نوری به داده‌های دیجیتال است. داده‌های حاصل شده در این مرحله، موسوم به پروجکشن، ورودی مرحله پردازش تصویر است. در مرحله پردازش تصویر، پیش از اعمال الگوریتم‌های بازسازی تصویر، پروجکشن‌های خام به دست آمده، پیش‌پردازش شده و آرتیفکت‌های موجود در آن‌ها با اعمال فیلترهای مناسب اصلاح و حذف می‌شوند. سپس با اعمال الگوریتم FBP برای بازسازی تصویر، تصاویر مقطعی به همراه نمایش سه بعدی از حجم نمونه مورد آزمون حاصل می‌شود.



الف



ب



ج

شکل ۱ - (الف) سیستم تصویربرداری نوترونی راکتور تحقیقاتی تهران، (ب) موقعیت نمونه نسبت به باریکه نوترون و دهانه دوربین، (ج) دوربین تصویربرداری دیجیتال به روش پریسکوپ

تصویربرداری دیجیتال به روش پریسکوپ با استفاده از یک جعبه تاریک L شکل انجام می‌شود (شکل ۱). چیدمان هندسی پریسکوپ موجب می‌شود که دوربین و اجزای الکترونیکی آن، از مسیر مستقیم بیم نوترونی خارج شوند و از بمباران نوترونی که موجب آسیب رسیدن به قطعات الکترونیکی می‌گردد، در امان باشند. جعبه تاریک شامل یک صفحه آشکارساز از نوع سنتیلاتور ${}^6\text{LiF/ZnS}$ با ابعاد $25\text{cm} \times 25\text{cm}$ و ضخامت $200\ \mu\text{m}$ ، یک آینه با سطح انعکاسی آلومینیوم و با ضریب انعکاس نوری بالا و یک

۲-۱ مشخصات سیستم داده‌برداری تجربی

در شکل ۱، نمایی از سامانه تصویربرداری نوترونی راکتور تحقیقاتی تهران و اجزای تصویربرداری دیجیتال نشان داده شده است. سیستم تصویربرداری شامل باریکه نوترون موازی شده، میز محل قرارگیری نمونه و آشکارساز نوترون و سیستم ثبت تصاویر دیجیتال است. باریکه نوترون حرارتی شبه موازی به قطر $25\ \text{cm}$ ، توسط کالیماتور نصب شده در بیم تیوب E راکتور تحقیقاتی تهران تولید می‌شود. یک شاتر به عنوان حفاظ پرتوی در مقابل دهانه بیم تیوب قرار داده شده است و تنها در زمان پرتوهای نمونه باز می‌شود. محل قرارگیری نمونه یک میز دارای دو درجه آزادی برای جابجایی انتقالی نمونه در دو راستای افقی (x) و عمودی (z) و یک درجه آزادی چرخشی به میزان 360° حول محور z است. دقت چرخش و جابجایی میز با تکرارپذیری بالا و خطای کم به ترتیب در حد 0.1° و $0.1\ \text{mm}$ است [۱۸].

² Data acquisition geometry

¹ Data acquisition

۲-۳ تنظیم هندسه داده برداری

برای بررسی عملکرد سیستم تصویربرداری مقطع‌نگاری نوترونی، مطابق شکل ۲ از یک برد الکترونیکی به عنوان اولین نمونه استفاده گردیده است. این برد الکترونیکی با ابعاد (ارتفاع) $15/2 \text{ cm}$ × (عرض) $10/2 \text{ cm}$ در مرکز میز چرخان ثابت شده است (شکل ۱). آشکارساز سنتیلاتور در فاصله 135 cm از دهانه کالیماطور نوترون قرار دارد. برای کاهش عدم وضوح و محوشدگی لبه در تصاویر ناشی از اثر نیم سایه باریکه نوترونی بر روی صفحه آشکارساز، نمونه در نزدیکترین فاصله ممکن نسبت به آشکارساز سنتیلاتور نوترونی قرار داده شده است. با توجه به ابعاد نمونه و فضای لازم برای چرخش میز، این فاصله در $6/5 \text{ cm}$ تنظیم شده است.



شکل ۲- برد الکترونیکی به عنوان نمونه مورد آزمون برای تصویربرداری مقطع‌نگاری نوترونی

تصویربرداری مقطع‌نگاری، نمونه در یک نیم صفحه با گام زاویه‌ای 0.5° پرتودهی و مجموعه تصاویر پروجکشن آن توسط آشکارساز نوترون ثبت شده است. زمان پرتودهی با توجه به میزان شارش (فلوئنس) نوترونی مورد نیاز برای ایجاد تصویر با کنتراست مطلوب تنظیم شده است. زمان توقف در هر گام زاویه‌ای به گونه‌ای تنظیم شده است تا مدت زمان گسیل نور از آشکارساز سنتیلاتور و ثبت تصویر در دوربین اپتیکی را پوشش دهد (۲۶ ثانیه). علاوه بر مجموعه تصاویر پروجکشن، دو مجموعه تصویر بدون حضور نمونه در حالت شاتر باز و شاتر بسته به ترتیب موسوم به میدان روشن^۵ و میدان تاریک^۶ برای اصلاح اثر عدم یکنواختی باریکه نوترون و نرمالیزاسیون در تصاویر گرفته

دوربین اپتیکیال نوپز پائین است. آینه با زاویه 45° نسبت به آشکارساز سنتیلاتور، نور تولید شده در اثر برهم کنش نوترون با صفحه سنتیلاتور را به سمت دوربین اپتیکی بازمی‌تاباند. دوربین اپتیکی دیجیتال دارای سنسور CMOS با مبدل مونوکروم آنالوگ به دیجیتال ۱۲ بیتی، پیکسل بندی شده با ابعاد $3/8 \mu\text{m}$ و رزولوشن ۱۶ مگاپیکسل، تصاویر نمونه را ثبت می‌کند. برای کاهش نویز حرارتی، این دوربین مجهز به سیستم خنک کننده داخلی است که دمای دوربین را نسبت به محیط حدود 45 درجه کاهش می‌دهد.

۲-۲ ثبت تصاویر دیجیتال و پیاده‌سازی سیستم اتوماتیک و یکپارچه کنترل همزمانی چرخش میز و زمان پرتودهی

برای ثبت تصاویر دیجیتال نمونه، کنترل و تنظیم میز نمونه، یک نرم افزار رابط کاربر در محل سامانه تصویربرداری نوترونی در محیط ویژوال استودیو و به زبان برنامه نویسی C++ نوشته شده است [۱۸]. این نرم افزار با هدف اتوماسیون تصویربرداری مقطع‌نگاری و همگام‌سازی^۱ زمان توقف نمونه در هر گام زاویه‌ای پرتودهی با زمان پرتودهی و ثبت تک-پروجکشن در دوربین، به‌روزرسانی شده است. با هدف افزایش دقت درجه چرخش در هر گام زاویه‌ای، دستورات فرمان به PLCهای کنترل‌کننده حرکت میز متناسب با تعداد سیگنال بر دور چرخش تنظیم شده‌اند. کنترل تنظیمات تصویر، تنظیمات داده‌برداری و توان خنک‌کنندگی دوربین از طریق نرم‌افزار رابط کاربری سامانه انجام می‌شود. علاوه بر این، دستورات مربوط به فرماندهی و همگام‌سازی با نرم‌افزارهای دیگری که برای کنترل دوربین به کار می‌روند، به نرم‌افزار رابط کاربری سامانه افزوده شده‌اند. برنامه به‌روزرسانی شده علاوه بر آنکه داده‌برداری مقطع‌نگاری را به صورت اتوماتیک انجام می‌دهد، قابلیت ذخیره تصاویر با فرمت بدون افت داده‌های دیجیتال نظیر TIFF^۲ و FITS^۳، با عمق بیت بالا (۱۶ بیت)، تنظیم میدان دید^۴ مناسب و غیره را دارد.

⁴ Field of view

⁵ Flat field

⁶ Dark field

¹ Synchronization

² Tag Image File Format

³ Flexible Image Transport System

که در آن I_0 ، I و T و dt به ترتیب شدت باریکه نوترون عبوری، شدت باریکه اولیه، سطح مقطع ماکروسکوپیکی کل، ضخامت نمونه و نمو طولی در امتداد مسیر عبور باریکه نوترون هستند [۱۹]. لگاریتم رابطه (۱)، یک تک-پروجکشن را نشان می‌دهد:

$$p = \int_{dt \in T} -\Sigma dt = -\ln\left(\frac{I}{I_0}\right) \quad (2)$$

رابطه انتگرالی برای مسیر عبور باریکه نوترون نشان دهنده درهم‌تنیدگی داده‌های خروجی از نمونه و ثبت شده در آشکارساز به ازای هر پروجکشن تصویر است. بنابراین، تنها با استفاده از یک تک-پروجکشن، نمی‌توان به موقعیت مواد و اجزای درون نمونه و در نتیجه توزیع مواد درون نمونه پی برد. راه حل مساله، به دست آوردن اطلاعات کافی نسبت به نمونه مورد آزمون با افزایش تعداد پروجکشن در گام‌های زاویه‌ای بیشتر است. سپس با اعمال روش‌های بازسازی تصویر بر پروجکشن‌های حاصل شده، ساختار داخلی نمونه به صورت تصاویر مقطع به مقطع استخراج می‌شود.

تقریباً در تمام دوربین‌های دیجیتال، درجه سطح خاکستری هر پیکسل از یک تک پروجکشن طبق رابطه (۳) تصحیح می‌شود [۲۰]:

$$P_{corrected} = -\ln\left(\frac{I_{projection} - I_{dark field}}{I_{open field} - I_{dark field}}\right) \quad (3)$$

در این رابطه، $I_{projection}$ ، $I_{open field}$ و $I_{dark field}$ به ترتیب شدت باریکه نوترون عبوری در حضور نمونه، میدان روشن و میدان تاریک را نشان می‌دهند.

۲-۵ بازسازی تصاویر با روش معکوس پروجکشن فیلترشده (FBP)^۳

برای تولید تصویر یک تابع توزیع دوبعدی از داده‌های اندازه‌گیری شده فرآیندی با استفاده از تخمین انتگرال‌های خطی از تعداد معینی از خطوط پرتو در موقعیت‌های مختلف، طی می‌شود که از آن با عنوان بازسازی تصویر با استفاده از پروجکشن تعبیر می‌شود [۲۱]. در تصویربرداری nCT، تابع توزیع دوبعدی متناسب با ضرایب تضعیف نوترون مواد نمونه مورد آزمون و هر پروجکشن، مجموع یا انتگرال خطی ضرایب تضعیف در امتداد مسیر پرتوی معین خواهد

شده است. مشخصات هندسه‌های داده‌برداری مقطع‌نگاری در جدول ۱ آمده است.

جدول ۱- مشخصات هندسه داده برداری مقطع‌نگاری نوترونی

در راکتور تحقیقاتی تهران	
هندسه داده‌برداری	nCT-0.5 ^۱
توان راکتور (MW _{th})	۴٫۵
زمان پرتودهی به ازای هر پروجکشن (s)	۲۶ (gain=۴۰)
تعداد پروجکشن	۳۶۰
مدت زمان داده‌برداری (min)	۱۸۰
گام زاویه‌ای بین دو پروجکشن متوالی	۰٫۵°
زاویه اسکن کامل	۱۸۰°

برای تنظیم دوربین و مشخصات تصاویر دیجیتال شامل میدان دید، فرمت تصویر، بهره، شدت روشنایی، مدت زمان ثبت تصویر توسط سنسور و توان خنک‌کننده دوربین از نرم‌افزار SharpCap استفاده شده است. به کمک این نرم افزار میتوان فرامین کنترلی را مستقیماً با دوربین مبادله کرد. میدان دید دوربین با توجه به ابعاد نمونه در نظر گرفته شده است. برای ثبت تصاویر با کیفیت بهتر و افزایش نسبت سیگنال به نویز، پیکسل‌های دوربین به صورت یک آرایه الکترونیکی ۲×۲^۱ با یکدیگر ترکیب شده‌اند. تصاویر پروجکشن با فرمت TIFF و عمق داده ۱۶ بیت ثبت شده‌اند.

۲-۴ اصول تصویربرداری مقطع‌نگاری

تصویربرداری مقطع‌نگاری نوترونی یک از روش‌های تصویربرداری عبوری^۲ است که در آن از نوترون‌های تراگسیل شده از نمونه برای یافتن نقشه یا توزیع مواد داخل آن استفاده می‌شود. نقشه توزیع مواد داخل نمونه با سطح مقطع ماکروسکوپیکی عناصر موجود در آن متناسب است. داده‌های ثبت شده در آشکارساز نوترون نیز متناسب با نرخ شدت باریکه نوترون عبوری نسبت به شدت باریکه ورودی به نمونه است. شدت باریکه نوترون پس از برهم کنش با عناصر و ایزوتوپ‌های موجود در نمونه و عبور از آن، طبق رابطه (۱) تضعیف می‌شود:

$$\frac{I}{I_0} = \exp\left(\int_{dt \in T} -\Sigma dt\right) \quad (1)$$

¹ Binning

² Transmission imaging

³ Filtered Back Projection

یک تصویر رادیوگرافی دیجیتال نوترونی است و پیش از آنکه در مرحله تصویربرداری مقطع‌نگاری و بازسازی تصاویر نمونه از پروجکشن مورد استفاده قرار گیرد، بایستی از کیفیت تصویر مطلوب برخوردار باشد. بدین منظور، ابتدا شرایط فیزیکی در مرحله داده‌برداری تنظیم شده است. حفاظ‌گذاری دوربین اپتیکی در برابر نوترون‌های پراکنده‌شده و پرتوهای گامای زمینه، تقویت عایق نوری جعبه تاریک تصویربرداری دیجیتال و بهینه‌سازی پارامترهای دوربین اپتیکی شامل توان خنک‌کنندگی، بهره، شدت روشنایی و تنظیم میدان دید، برای ایجاد یک تصویر با رزولوشن و کنتراست بالا مواردی هستند که در مرحله داده‌برداری تجربی انجام شده است. حفاظ گاما برای حفاظت از دوربین اپتیکی در محیط‌های آمیخته نوترون-گاما و جلوگیری از ایجاد آرتیفکت‌های موسوم به نقاط روشن^۲ در تصویر اثرگذار است. نقاط روشن توده‌های پیکسلی با شدت روشنایی سفید هستند که در اثر برخورد پرتوهای گامای پراکنده با سنسور دوربین ایجاد می‌شوند. حفاظ نوترون علاوه بر محافظت از تخریب سنسور نوری دوربین اپتیکی، از تولید پیکسل‌های مرده نیز جلوگیری می‌کند و در نتیجه کیفیت تصاویر دیجیتال را افزایش می‌دهد. پیکسل‌های مرده در اثر تخریب ناشی از برخورد پرتوهای نوترون پراکنده شده به سنسور دوربین ایجاد می‌شوند. عایق‌بندی نوری کامل جعبه تاریک تصویربرداری، نویز ناشی از پرتوهای نور مرئی را حذف می‌کند. توان خنک‌کنندگی دوربین با هدف کاهش نویز حرارتی و پایایی در طول زمان پرتودهی تنظیم می‌شود. بهره و شدت روشنایی براساس میزان داده نوری لازم برای ایجاد درجه خاکستری رنگ مطلوب بر روی سنسور دوربین و متناسب با زمان پرتودهی تعیین می‌شوند. تنظیم میدان دید نیز متناسب با ابعاد نمونه صورت می‌گیرد.

پس از بهینه‌سازی شرایط فیزیکی داده‌برداری، کیفیت تصاویر پروجکشن با پیش‌پردازش از طریق اعمال فیلترهای تصویر مناسب برای حذف آرتیفکت، اصلاح عدم یکنواختی میدان نوترون و نرمالیزاسیون شدت باریکه نوترون عبوری افزایش می‌یابد. در شکل ۳، تصویر خام^۳ بخشی از قطعه الکترونیکی مورد آزمون نشان داده شده است. آرتیفکت‌های

بود. برای بازسازی تصویر از انتگرال‌های خطی مذکور، رویکردهای متفاوتی وجود دارد. روش‌های تحلیلی همانند الگوریتم FBP یکی از رایج‌ترین و اساسی‌ترین روش‌های مورد استفاده برای بازسازی تصویر از مجموعه پروجکشن مربوط به هندسه‌های پرتودهی موازی است. رادون روش FBP را براساس تئوری مقطع فوریه و قضیه مقطع‌گیری مرکزی توسعه داده است [۱، ۲۲]. برای هر پروجکشن، با اعمال تبدیل فوریه، خطی در فضای دو بعدی فوریه به دست می‌آید. با افزایش تعداد پروجکشن به حد کافی در کمان 180° ، فضای فوریه به طور کامل از داده‌های نمونه مورد آزمون پر می‌شود. سپس با اعمال تبدیل معکوس فوریه دو بعدی تصویر نمونه در مختصات فضایی دکارتی بازسازی می‌شود. در این فرآیند، هر نقطه از پروجکشن در فضای فوریه با فرکانسی به شکل یک باریکه نواری ظاهر می‌شود. بنابراین، با تبدیل معکوس تمام پروجکشن‌ها توزیعی از شدت منتسب به نقطه مذکور با بیشینه شدت در مکان آن نقطه و شدت یکنواخت غیر صفر حول آن ایجاد می‌شود. برای تصحیح، از فیلترهای هم‌پیمایی با اثرگذاری کاهش‌یافته بر شدت حول نقطه توصیف شده همانند Hamming، RamLak و غیره استفاده می‌شود. روش FBP عموماً برای بازسازی داده‌های پیوسته یا شبه پیوسته به کار می‌رود و با سرعت بیشتری به پاسخ مطلوب ختم می‌شود. در این تحقیق، برای بازسازی تصاویر nCT از روش FBP در نرم افزار MuhRec استفاده شده است [۱۹]. این نرم افزار توسط انستیتوی پاول شرر برای پردازش و بازسازی تصاویر مقطع‌نگاری کامپیوتری نوترونی بصورت کد-آزاد^۱ توسعه داده شده است. در این نرم‌افزار پس از تنظیم هندسه داده‌برداری، داده‌های پروجکشن قرائت و پردازش اولیه شده و سپس تصاویر نمونه به صورت اسلایس‌های متوالی بازسازی و استخراج می‌شوند.

۳- نتایج و بحث

۳-۱ پیش‌پردازش تصاویر پروجکشن

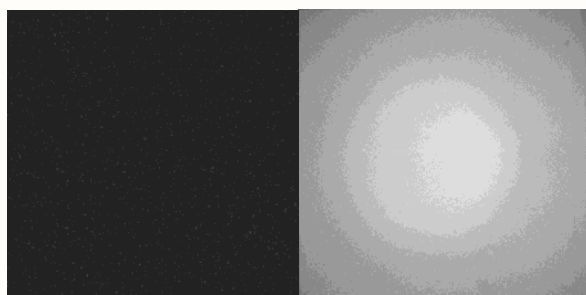
داده برداری در تصویربرداری مقطع‌نگاری نوترون در مختصات سه بعدی انجام و مجموعه پروجکشن‌ها به صورت تصاویر دوبعدی ثبت می‌شوند. هر پروجکشن در حقیقت

³ raw image

¹ Open source

² White spot

[۲۰]. این مقادیر به ترتیب به میزان ۱/۴۴ و ۱۷/۹۰ برابر بهبود یافته‌اند.



(الف) (ب)

شکل ۴- تصاویر میدان روشن (شاتر باز و بدون حضور نمونه) و میدان تاریک (شاتر بسته و بدون حضور نمونه)

جدول ۲- مقادیر C و CNR قبل و بعد از اعمال فیلتر حذف نویز و نرمالیزاسیون شدت در یک پروجکشن در یک ROI یکسان

normalized projection	raw projections	
۴۹/۷۵	۳۵/۴۲	(%) C
۱۳/۲۴	۰/۷۴	CNR

۲-۳ بازسازی و نمایش حجم سه بعدی تصویر

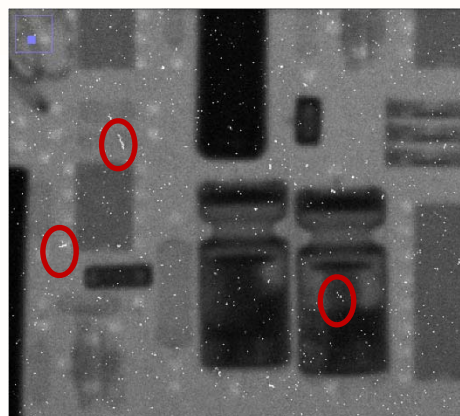
تصاویر مقطع‌نگاری برد الکترونیکی در ۱۷۶۰ اسلایس با ضخامت $131.7 \mu\text{m}$ در راستای ارتفاع بازسازی شده‌اند. در شکل ۶، تعدادی از مقاطع بازسازی شده را به عنوان مثال نشان داده شده است. در تصاویر مقاطع نشان داده شده، ساختار داخلی دو خازن الکتریکی با محلول الکترولیت تخلیه شده آن به خوبی قابل تشخیص است. از برخی قطعات دیگر، جزئیات کمتری قابل مشاهده است.

در جدول ۳ مقادیر C و CNR در یک ROI یکسان از دو اسلایس مختلف تصویر محاسبه شده است. این مقادیر با استفاده از الگوریتم‌های پردازش تصویر مناسب قابل ارتقا می‌باشند. در شکل ۷، نمای سه بعدی از حجم برد الکترونیکی از سه زاویه دید مختلف نمایش داده شده است.

جدول ۳- مقایسه CNR در یک ROI معین از تصاویر بازسازی شده در اسلایس‌های مختلف

Slice 2	Slice 1	
۶۰،۶۲	۶۰،۶۲	(%) C
۴،۵۲	۴،۲۸	CNR

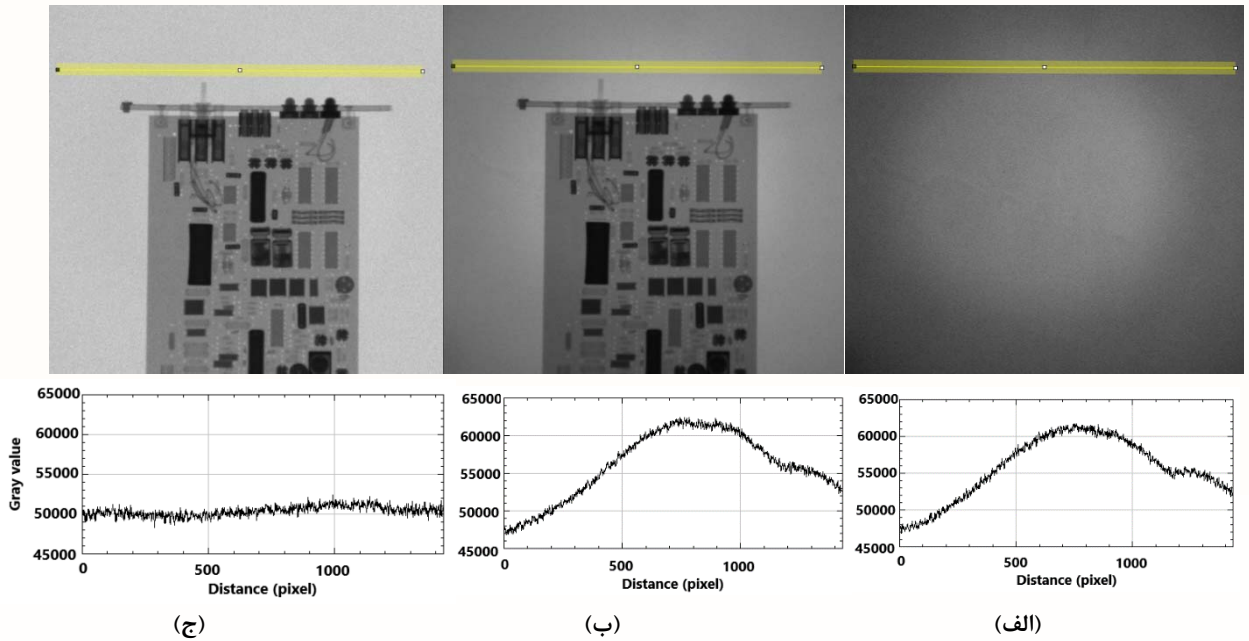
ناشی از پرتوهای گاما به صورت توده‌های پیکسلی کاملاً روشن در تصویر خام تولید شده‌اند. نویز حرارتی و نویز الکتریکی، تک پیکسل‌های با درجه خاکستری کاملاً روشن هستند. برای حذف این موارد، از فیلتر موسوم به "remove outlier" استفاده شده است. برخلاف سایر فیلترهایی که برای حذف نویز پراکنده شده در تصویر با استفاده از میانگین گیری سراسری به کار می‌روند، فیلتر مذکور با میانگین گیری موضعی، تاثیر بسیار کمتری بر شدت پیکسل‌های مجاور دارد.



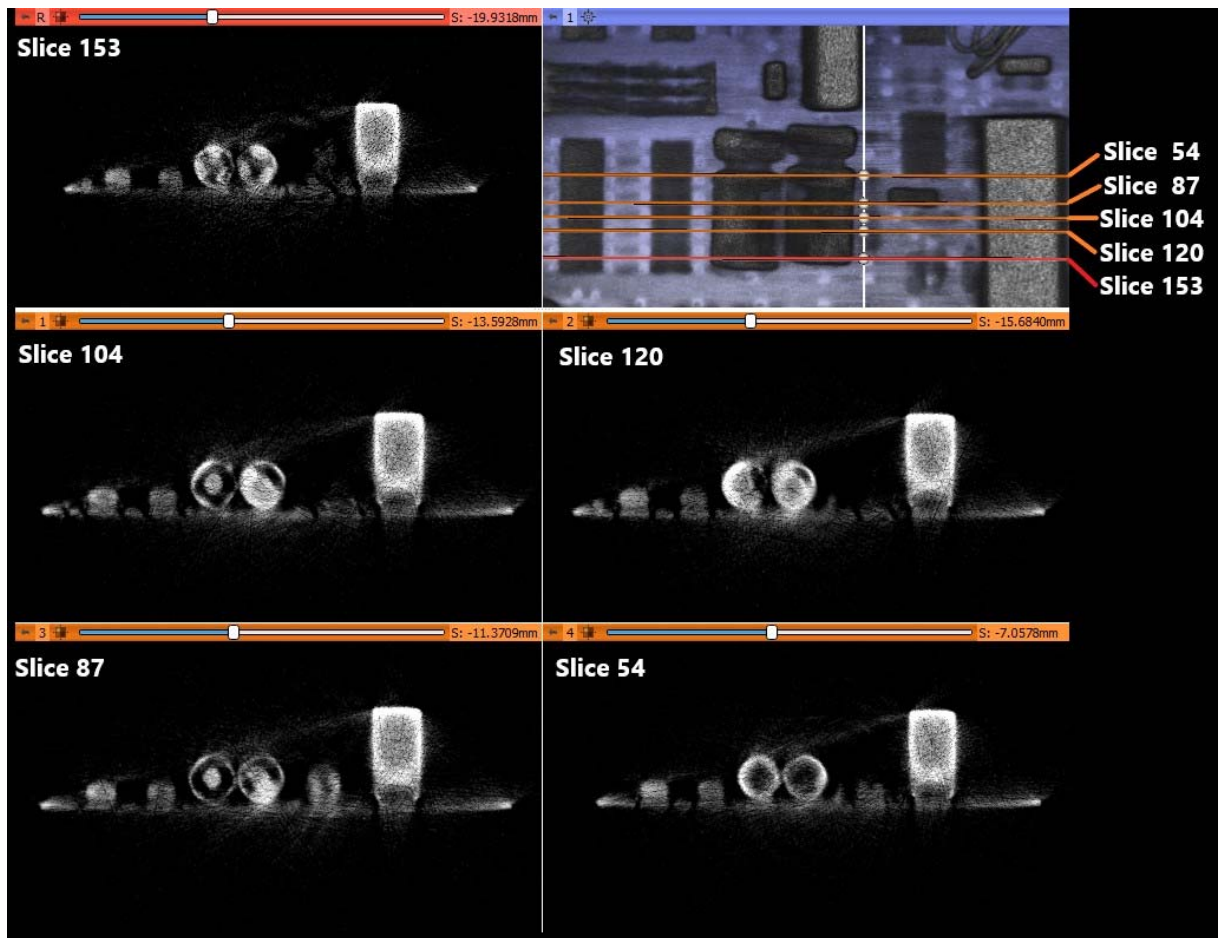
شکل ۳- قسمتی از پروجکشن خام به دست آمده در داده برداری به همراه آرتیفکت‌های نقاط روشن و نویزهای تک پیکسلی

در شکل ۴، میدان روشن (شاتر باز و بدون حضور نمونه) و میدان تاریک (شاتر بسته) نشان داده شده است. با اعمال اثر میدان تاریک و میدان روشن مطابق با رابطه (۳) و نرمالیزاسیون شدت روشنایی، بین اختلاف درجه خاکستری رنگ تصویر و تضعیف شدت باریکه نوترون عبوری از مواد موجود در نمونه تناسب صحیح برقرار می‌شود.

شکل ۵، اثر عدم یکنواختی باریکه نوترون در میدان دید تصویربرداری را نمایش می‌دهد. با رسم یک خط پروفایل یکسان در تصویر رادیوگرافی نوترونی قطعه الکترونیکی مورد آزمون و تصویر میدان روشن (الف و ب در شکل ۵) تفاوت شدت باریکه نوترون در نقاط مختلف مشهود است. تفاوت بیشینه و کمینه شدت باریکه نوترون در خط پروفایل شکل ۵ تقریباً ۱/۲۵ برابر است. بنابراین، درجه رنگ خاکستری در پیکسل‌های تصویر وزن یکسان ندارند. جدول ۲، مقادیر کنتراست (C)، نرخ کنتراست به نویز (CNR) که براساس تعریف بوشبرگ محاسبه شده را نشان می‌دهد



شکل ۵- مقایسه شدت روشنایی تصاویر رادیوگرافی نوترونی در یک پروفایل یکسان: الف) شاتر باز و بدون حضور نمونه، ب) نمونه قبل از تصحیح، ج) نمونه پس از تصحیح



شکل ۶ - مقطعی از تصاویر بازسازی شده برد الکترونیکی مورد آزمون با استفاده از نرم افزار MuhRec

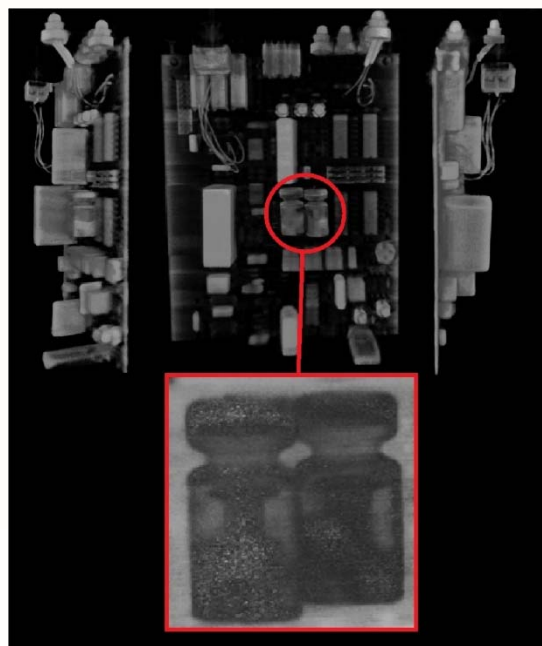
نوترونی از جمله نسبت فاصله دهانه تا آشکارساز به ابعاد دهانه باریکه (پارامترهای تست کیفیت باریکه براساس استاندارد ASTM E545) وابسته است. با توجه به این موارد، رزولوشن مکانی سامانه تصویربرداری نوترونی راکتور تحقیقاتی تهران حداکثر

$200 \mu\text{m}$ تخمین زده می‌شود. در سامانه های تصویربرداری نوترونی بین‌المللی مشابه، رزولوشن مکانی متفاوتی گزارش شده است. موسسه پاؤول شرر سوئیس به عنوان یکی از سامانه‌های تصویربرداری بسیار مدرن، برای میدان دید در بازه $5 \times 400 - 5 \times 400 \text{ mm}^2$ رزولوشن مکانی در محدوده $5 - 200 \mu\text{m}$ را گزارش نموده است [۲۳]. سه سامانه مستقر در این موسسه با عنوان سامانه بیشینه، سامانه میانه و سامانه میکرومتر به ترتیب دارای رزولوشن مکانی در مرتبه $200 \mu\text{m}$ ، $100 \mu\text{m}$ ، $5 \mu\text{m}$ می‌باشند. بنابراین، از نظر رزولوشن مکانی، سامانه تصویربرداری نوترونی راکتور تحقیقاتی تهران را با سامانه بیشینه موسسه پاؤول شرر می‌توان قابل قیاس دانست. همچنین، عیوب داخلی نمونه که دارای ابعاد بالاتر از $200 \mu\text{m}$ اند، توسط سامانه تصویربرداری نوترونی کنونی راکتور تحقیقاتی تهران قابل تشخیص می‌باشند.

قابلیت نمایش سه بعدی تصویربرداری مقطع‌نگاری نوترونی، امکان مطالعه و ارائه خدمات به طیف گسترده‌ای از مطالعات و نیازمندی‌ها در صنایع مختلف از جمله تشخیص عیوب، تجزیه و تحلیل ناپیوستگی‌ها و نقصان‌ها، اندازه‌گیری ابعادی، مونتاژ قطعات و مهندسی معکوس را پوشش می‌دهد. ارتقای سامانه تصویربرداری دیجیتال نوترونی با هدف افزایش کیفیت تصاویر دیجیتال و کاهش زمان تصویربرداری در گام بعدی مورد بررسی قرار گرفته است.

۵- منابع

- [1] S. Carmignato and W.D., Richard Leach, *Industrial X-Ray Computed Tomography*. Springer, 2018.
- [2] The Noble Prize, <https://www.nobelprize.org/prizes/medicine/1979>, retrived: January 2022.
- [3] International American Society for Testing and Material, *Standard Guide for Computed Tomography (CT) Imaging*. Standard ASTM E1441, 2011.
- [4] International American Society for Testing and Material, *Standard Practice for Computed Tomography (CT) Examination*. Standard ASTM E1570, 2011.
- [5] International American Society for Testing and Material, *Standard Guide for Computed Tomography (CT) System Selection*. Standard ASTM E1672, 2001



شکل ۷- نمای سه بعدی از حجم بازسازی شده برد الکترونیکی با استفاده از الگوریتم FBP

۴- نتیجه‌گیری

راکتور تحقیقاتی تهران یک منبع نوترون مناسب برای انجام تحقیقات کاربردی در کشور محسوب می‌شود. با هدف توسعه روش‌های تصویربرداری مدرن برای به کارگیری در حوزه‌های مرتبط، سامانه تصویربرداری مقطع‌نگاری کامپیوتری نوترونی در راکتور تحقیقاتی تهران با روش بازسازی FBP در این تحقیق طراحی و به اجرا درآمده است. سامانه داده‌برداری تجربی، اتوماسیون تصویربرداری دیجیتال، نرم‌افزار پردازش، بازسازی و نمایش سه‌بعدی تصویر با موفقیت تست و راه‌اندازی شده‌اند. با بهینه‌سازی پارامترهای هندسه پرتودهی، سامانه ثبت تصاویر دیجیتال، پردازش تصویر و به کارگیری الگوریتم‌های بازسازی تصویر با دقت بالاتر، تصاویر مقطع‌نگاری با کیفیت مطلوب حاصل شده است.

ابعاد پیکسل موثر برای ثبت پروجکشن‌های مربوط به نمونه برد الکترونیکی $130 \times 130 \mu\text{m}^2$ است. ابعاد میدان دید، ترکیب آرایه الکترونیکی دوربین و فاصله کانونی لنز دوربین، ابعاد پیکسل موثر را محدود می‌کند. اندازه‌گیری‌های اولیه در سامانه تصویربرداری نوترونی راکتور تحقیقاتی تهران نشان دهنده آن است که رزولوشن اپتیکی این سامانه کمتر از $192 \mu\text{m}$ است. رزولوشن مکانی سامانه نیز به عواملی نظیر ضخامت آشکارساز سنتیلاتور و خصوصیات باریکه

- [15] K.K. Moghadam and F. Ziaie, Modification of the neutron beam spectrum for neutron radiography at Tehran Research Reactor (TRR). *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, Vol. 337, 1996.
- [16] M.H. Choopan Dastjerdi, *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, Iran, Ph.D. Thesis (2016) (In Persian).
- [17] International American Society for Testing and Material, *Standard Method for Determining Image Quality in Direct Thermal Neutron Radiographic Examination*. Standard ASTM E545, Vol. 4, 2005.
- [18] B. Rokrok, et al., Design and construction of the neutron facility for Tehran Research Reactor with real-time digital imaging capability, *Nondestructive Testing Technology*, Vol. 2, No. 7, 2021. (In Persian)
- [19] A. P. Kaestner, MuhRec—A new tomography reconstructor. *Nuclear Instrument and Methods Physics Research Section A*, Vol. 651, No. 1, 2011.
- [20] J. T. Bushberg, et al. *The essential physics of medical imaging*, Lippincott Williams and Wilkins, Philadelphia, PA, 2020.
- [21] E. Seeram, *Computed Tomography: Physical Principles, Clinical Applications, and Quality Control*, Elsevier Health Sciences, 2015.
- [22] Hsieh, J., *Computed Tomography: Principles, Design, Artifacts, and Recent Advances*, SPIE and John Wiley & Sons, Washington and New Jersey, Inc. 2009.
- [23] M. Morgano, et al., Unlocking high spatial resolution in neutron imaging through an add-on fibre optics taper, *Optics Express*, Vol. 26, No. 2, p. 1809-16, 2018.
- [6] International American Society for Testing and Material, *Standard Practice for Computed Tomography (CT) Examination of Casting*. Standard ASTM E1814.
- [7] International American Society for Testing and Material, *Standard Guide for Compton Tomography (CT)*, Standard ASTM E1931.
- [8] International American Society for Testing and Material, *Standard Test Method for Measurement of Computed Tomography (CT) System Performance*. Standard ASTM E1695, 2013.
- [9] International American Society for Testing and Material, *Standard Test Method for Measurement of Calibrating and Measuring CT Density*. Standard ASTM E1635, 2013.
- [10] International American Society for Testing and Material, *Standards Practice for Digital Imaging and Communication in Nondestructive Evaluation (DICONDE) for X-ray Computed Tomography (CT) Test Methods*. Standard ASTM E2767, 2011.
- [11] M. Strobl, et al., Advances in neutron radiography and tomography. *Journal of Physics D: Applied Physics*, Vol. 42, No. 24, p. 243001, 2009.
- [12] International Society for Neutron Radiography (ISNR), <https://www.isnr.de/index.php/facilities/facilities-worldwide>.
- [13] E. Lehmann, Neutron Imaging Facilities in a Global Context. *Journal of Imaging*, Vol. 3, 2017.
- [14] K.K. Moghadam, Z. Tabatabaeian and N. Mirhabibi. Neutron Radiography Facility for AEOI Nuclear Research Center, in: *Neutron Radiography*, edited by J. P. Barton et al. Springer, Netherlands, 1987.