

## Design and Construction of a Prototype Industrial Tomography System and evaluation of Its Performance

Mojtaba Askari<sup>1</sup>  | AmirMohammad Beigzadeh<sup>1</sup>  | Ali Taheri<sup>1</sup>  | Mohsen Sharifzadeh<sup>1</sup>

1. Radiation Applications Research Institute, Nuclear Science and Technology Research Institute, Tehran, Iran, Email: [moasgari@aeoi.org.ir](mailto:moasgari@aeoi.org.ir)

### ABSTRACT

#### Article Information:

##### Research Article

Received 20 Oct. 2025

Revised 17 Feb. 2026

Accepted 19 Feb. 2026

##### Keywords:

Tomography,  
X-ray generator,  
Quality Control,  
Array Detector,  
Non-Destructive Test.

This paper presents the design and construction of a prototype industrial computed tomography (CT) system, along with an initial performance evaluation. The proposed system enables advanced imaging capabilities, offering high spatial resolution three-dimensional images of various industrial components. The prototype consists of three main elements: 1) an X-ray source that generates the required high-penetration radiation, 2) a flat panel detection system that captures the X-rays and converts them into images, and 3) a powerful data processing unit that analyzes the acquired data. To evaluate the system's performance, a series of experiments were conducted using specially designed phantoms. The goal of these experiments was to assess the image quality and overall reliability of the system. The results from these evaluations demonstrated that the system was capable of achieving a spatial resolution of 2 mm, indicating its high imaging accuracy. In the next phase, a contrast phantom was created to examine the system's ability to differentiate materials with varying densities. The images of cross-sectional slices of the object were reconstructed using the MLEM algorithm. The results showed that the system successfully distinguished between materials with different densities, such as air, steel, and mercury. During the experiments, images of the phantoms were acquired at various voltages and currents, allowing for a comprehensive comparison of the images and their dependency on these parameters. The results revealed that the prototype system has significant potential for use in a variety of industrial environments. It can be particularly beneficial in applications such as quality control, non-destructive testing, and maintenance methods, which are crucial for ensuring the integrity and performance of industrial components. Future research will focus on optimizing the system for specific industrial applications, and integrating additional features to enhance its overall performance. These improvements will expand the system's applicability and further solidify its role in industrial environments.

**Cite this article:** Askari, M., Beigzadeh, A. M., Taheri, A. & Sharifzadeh, M. (2025). Design and Construction of a Prototype Industrial Tomography System and evaluation of Its Performance. *Journal of Nondestructive Testing Technology*, 4 (2), 52-64.



© The Author(s).

DOI: <http://doi.org/10.30494/jndt.2026.554229.1172>

Publisher: Iranian Society for Nondestructive Testing

## طراحی و ساخت نمونه اولیه یک سامانه مقطع‌نگاری صنعتی و بررسی عملکرد آن

مجتبی عسکری<sup>۱</sup> | امیرمحمد بیگ زاده<sup>۱</sup> | علی طاهری<sup>۱</sup> | محسن شریف زاده<sup>۱</sup><sup>۱</sup> پژوهشکده کاربرد پرتوها، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، تهران، ایران، رایانامه: moasgari@aeoi.org.ir

## چکیده:

این مقاله به طراحی و ساخت نمونه اولیه یک سیستم مقطع‌نگاری صنعتی و ارزیابی عملکرد اولیه آن پرداخته است. سیستم پیشنهادی امکان تصویربرداری پیشرفته با تولید تصاویر سه‌بعدی با تفکیک مکانی بالا از قطعات صنعتی را فراهم می‌کند. نمونه اولیه شامل سه بخش اصلی است: (۱) مولد اشعه ایکس برای تولید پرتوی پرنفوذ، (۲) سیستم آشکارساز آرایه‌ای برای ثبت پرتوها و تبدیل آن‌ها به تصاویر، و (۳) واحد پردازش داده برای تحلیل داده‌های جمع‌آوری شده. برای ارزیابی عملکرد سیستم، مجموعه‌ای از آزمایش‌ها با استفاده از فانتوم‌های طراحی شده ویژه انجام شد. هدف این آزمایش‌ها ارزیابی کیفیت تصویر و بررسی قابلیت اطمینان کلی سیستم بود. نتایج این ارزیابی‌ها نشان داد که سیستم توانسته قدرت تفکیک مکانی ۲ میلی‌متر را به خوبی ارائه دهد. در مرحله بعد، فانتوم کنتراسی برای بررسی عملکرد سامانه در تفکیک چگالی‌های مختلف طراحی شد. برای بازسازی تصاویر سطح مقطع، از روش MLEM استفاده گردید. نتایج نشان داد که سامانه مقطع‌نگاری به خوبی قادر است تفاوت‌های چگالی میان مواد مختلف مانند هوا، استیل و جیوه را شناسایی کند. در طول آزمایش‌ها، تصاویری از فانتوم‌ها در ولتاژ و جریان‌های مختلف ثبت شد که این امکان را فراهم کرد تا وابستگی تصاویر به جریان و ولتاژ بررسی و مقایسه شوند. بر اساس نتایج حاصل، مشخص شد که نمونه اولیه دارای پتانسیل بالایی برای استفاده در محیط‌های صنعتی مختلف است و می‌تواند در کاربردهایی مانند کنترل کیفیت، آزمایش‌های غیرمخرب و روش‌های نگهداری برای اطمینان از یکپارچگی و عملکرد اجزای صنعتی مفید باشد. تحقیقات آینده بر بهینه‌سازی سیستم برای کاربردهای خاص صنعتی تمرکز خواهد کرد و ادغام ویژگی‌های اضافی که می‌توانند عملکرد سیستم را ارتقاء دهند و دامنه کاربرد آن را گسترش دهند، بررسی خواهد شد.

## اطلاعات مقاله:

مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت:

۱۴۰۴/۰۷/۲۸

تاریخ بازنگری:

۱۴۰۴/۱۱/۲۸

تاریخ پذیرش:

۱۴۰۴/۱۱/۳۰

کلیدواژگان:

مقطع نگاری،

مولد ایکس،

کنترل کیفیت،

آشکارساز آرایه‌ای،

آزمون غیرمخرب.

استناد: عسکری، مجتبی؛ بیگ زاده، امیرمحمد؛ طاهری، علی و شریف زاده، محسن. (۱۴۰۴). طراحی و ساخت نمونه اولیه یک سامانه مقطع‌نگاری صنعتی و بررسی عملکرد آن. *مجله فناوری آزمون‌های غیرمخرب*، ۴ (۲)، ۶۴-۵۲.

© نویسندگان

ناشر: انجمن آزمون‌های غیرمخرب ایران

DOI: <http://doi.org/10.30494/jndt.2026.554229.1172>

## ۱- مقدمه

مقطع‌نگاری رایانه‌ای<sup>۱</sup> روشی نوین است که در علوم تشخیصی در صنعت و در پزشکی برای کاربردهای تحقیقاتی و درمانی کاربردهای فراوانی دارد. با استفاده از این روش، شئی یا کالبد انسان به صورت لایه به لایه اسکن می‌شود و بدین ترتیب بخش‌های درونی آن نیز برای محققان و یا پزشکان قابل رؤیت است. این روش برای قطعات مختلف صنعتی از جمله فلزات کاربردهای بسیاری دارد؛ اما در پزشکی به دلیل چگالی کمتر استخوان به نسبت فلزات، انرژی منبع<sup>۲</sup> مورد استفاده در مقطع‌نگاری پزشکی پایین‌تر از مقطع‌نگاری صنعتی است.

با افزایش نیاز به کنترل کیفیت قطعات مهندسی پیچیده سه‌بعدی و هم‌زمان با پیشرفت‌های چشمگیر در حوزه تصویربرداری و پردازش تصویر، استفاده از مقطع‌نگاری رایانه‌ای به‌عنوان یک ابزار کارآمد در بازرسی‌های صنعتی در سال‌های اخیر رشد قابل توجهی داشته است. در این روش، از سامانه‌های ویژه پرتو ایکس به همراه آشکارسازهای تابشی بهره گرفته می‌شود تا تصاویر متعددی از زوایای مختلف ثبت گردد. سپس داده‌های حاصل توسط رایانه پردازش شده و برای بازسازی<sup>۳</sup> و نمایش مقاطع داخلی جسم مورد بررسی به کار می‌رود [۱].

مقطع‌نگاری مبتنی بر پرتو گاما یا پرتو ایکس به خواصی مانند انرژی تابش، چگالی ماده و عدد اتمی اجزای محیط وابسته است و تغییرات این پارامترها را به‌خوبی آشکار می‌کند. به همین دلیل، در بسیاری از کاربردهای تخصصی آزمون و ارزیابی قطعات، به‌ویژه زمانی که روش‌های دیگر به دلیل ماهیت مخرب<sup>۴</sup> یا محدودیت‌های فنی قلیل استفاده نیستند، این فناوری عملاً تنها گزینه قلیل اتکا محسوب

می‌شود. از نظر تفکیک مکانی نیز این روش‌ها دامنه وسیعی را، از مقیاس نانومتری تا سانتی‌متری، پوشش می‌دهند و با توجه به سرعت پردازش سامانه می‌توانند پاسخ‌هایی نسبتاً سریع و در عین حال دقیق ارائه دهند. با این حال، چالش اصلی آن‌ها بیش از آنکه فناوریانه باشد، به هزینه بالای تجهیزات و زیرساخت‌های موردنیاز مربوط است. از آنجا که در این پروژه از سامانه مقطع‌نگاری مبتنی بر مولد<sup>۵</sup> پرتو ایکس استفاده خواهد شد، در ادامه این روش با جزئیات بیشتری تشریح می‌شود.

مقطع‌نگاری مبتنی بر پرتو به‌طور کلی به دو رویکرد عبوری<sup>۶</sup> و پراکندگی<sup>۷</sup> تقسیم می‌شود. در روش عبوری، منبع تابش و آشکارساز در دو سوی مقابل جسم تحت اسکن قرار می‌گیرند، به‌گونه‌ای که پرتو پس از عبور از جسم مستقیماً توسط آشکارساز ثبت می‌شود. در مقابل، در روش پراکندگی، آشکارساز خارج از مسیر مستقیم پرتو اولیه قرار داده می‌شود تا تابش‌های پراکنده‌شده درون جسم را اندازه‌گیری کند. شدت تابش ثبت‌شده توسط آشکارساز، که معمولاً به‌صورت تعداد فوتون در واحد زمان بیان می‌شود، به تعداد برهم‌کنش‌های رخ داده در داخل جسم و همچنین به فعالیت منبع یا جریان تیوپ پرتو ایکس وابسته است.

در مقطع‌نگاری عبوری، معمولاً یک یا چند منبع تابش در یک سوی جسم قرار می‌گیرند و آرایه‌ای از آشکارسازها در سوی مقابل مستقر می‌شود، به‌طوری‌که آشکارسازها پرتوهای عبوری از کل حجم یا سطح مؤثر جسم را ثبت می‌کنند. در روش پراکندگی، در مقابل، آشکارسازها برای ثبت تشعشعات پراکنده‌شده ناشی از برهم‌کنش<sup>۸</sup> پرتو با ماده به کار می‌روند. شماتیک اصول عملکرد روش‌های مقطع‌نگاری عبوری و پراکندگی در شکل ۱ ارائه شده است [۲].

<sup>5</sup> Generator

<sup>6</sup> Transmission

<sup>7</sup> Backscatter

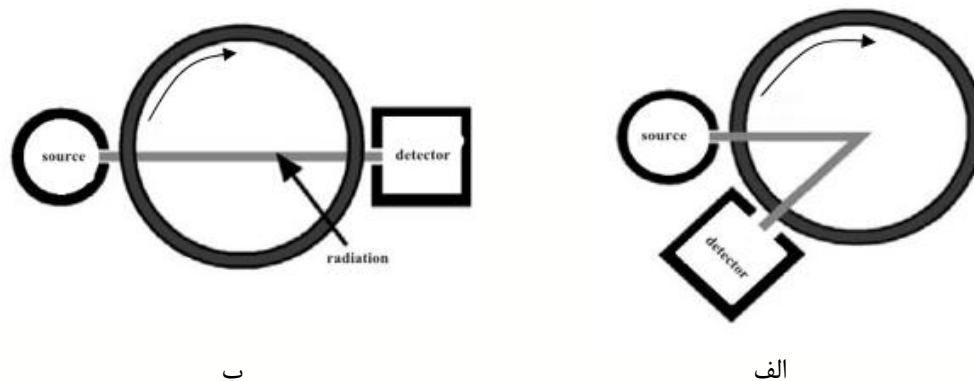
<sup>8</sup> Interaction

<sup>1</sup> Computed Tomography

<sup>2</sup> Source

<sup>3</sup> Reconstruction

<sup>4</sup> Destructive



شکل ۱) دو نوع روش مقطع‌نگاری صنعتی: الف) روش پراکندگی، ب) روش عبوری [۲].

شناسایی عیوب داخلی فلزات و همچنین بررسی ریزساختار مواد کامپوزیتی استفاده می‌شود. مهندسان عمران نیز از آن برای مطالعه ساختار سنگ‌ها، کانی‌ها و عیوب ریزساختاری بتن بهره می‌برند [۱]. از نخستین گزارش‌های کاربرد این فناوری در حوزه میراث فرهنگی می‌توان به پژوهش نوتمن و همکاران در سال ۱۹۸۶ اشاره کرد [۵ و ۶]. علاوه بر این، کاربردهایی نظیر تحلیل ساختاری فلزات و کامپوزیت‌ها نیز در مطالعات متعددی گزارش شده است [۷-۱۱].

بیگزاده و همکاران در پژوهش‌های پیشین خود، امکان‌سنجی مقطع‌نگاری با استفاده از چشمه رادیوایزوتوپی و آشکارساز خطی را بررسی کرده و نتایج مدل‌سازی و آزمایشگاهی را برای یک فانتوم میله‌ای و یک سازه گچی مقایسه نمودند. در پژوهش حاضر نیز یک سامانه مقطع‌نگاری مبتنی بر مولد پرتو ایکس و آشکارساز صفحه تخت طراحی و ساخته شده و عملکرد اولیه آن با استفاده از دو فانتوم تباین<sup>۲</sup> و چگالی ارزیابی شده است [۱۲ و ۱۳].

## ۲- تجزیه

### ۲-۱ طراحی سیستم

نمای شماتیک سه‌بعدی از چینش آزمایشگاهی در شکل ۲ نشان داده شده است.

اجزای اصلی این سیستم به ترتیب عبارت‌اند از:  
۱. آشکارساز صفحه تخت<sup>۳</sup>

در روش عبوری، چشمه تابش و آشکارساز در دو سوی جسم مورد بررسی قرار می‌گیرند تا پرتو پس از عبور مستقیم از ماده ثبت شود. در مقابل، در روش پس‌پراکندگی، آشکارساز خارج از مسیر مستقیم باریکه قرار می‌گیرد و وظیفه آن اندازه‌گیری پرتوهای پراکنده‌شده ناشی از برهم‌کنش تابش با ساختار داخلی جسم است. شدت باریکه، که معمولاً به صورت تعداد فوتون در واحد زمان بیان می‌شود، به میزان اندرکنش‌های رخ داده در داخل جسم وابسته بوده و به‌طور پیوسته توسط آشکارساز ثبت و پایش می‌شود [۳ و ۴].

در دو دهه اخیر، پژوهش‌های گسترده‌ای در سطح بین‌المللی به توسعه و به‌کارگیری فناوری مقطع‌نگاری محاسباتی در حوزه‌های متنوع مهندسی انجامیده است. پیشرفته‌ترین مطالعات عمدتاً بر بررسی درون‌ساختاری مواد مهندسی، به‌ویژه سازه‌ها، متمرکز بوده‌اند [۱]. این تکنیک که بر پایه جذب پرتوهای نافذ گاما و ایکس عمل می‌کند، امکان بازسازی و نمایش ساختار داخلی مواد را با تفکیک مکانی در حد میکرومتر و بسته به توان سامانه تصویربرداری حتی مقادیر دیگر فراهم می‌سازد.

مقطع‌نگاری امروزه به ابزاری ضروری در دیرینه‌شناسی<sup>۱</sup> و مطالعات میراث فرهنگی تبدیل شده است، زیرا می‌تواند بدون آسیب‌رساندن (در اغلب موارد) به نمونه‌های ارزشمند و منحصربه‌فرد، اطلاعات دقیقی از ساختار داخلی آن‌ها ارائه دهد [۳ و ۴]. در مهندسی مکانیک، از این روش برای

<sup>3</sup> Flat Panel Detector

<sup>1</sup> Paleontology

<sup>2</sup> Contrast

ابعاد هر پیکسل  $140 \times 140$  میکرومتر مربع است که به‌طور خاص برای دستیابی به دقت بالا در ثبت تصویر و کاهش نویز در تصاویر نهایی انتخاب شده است. کوچک بودن ابعاد پیکسل‌ها امکان تفکیک جزئیات ریزتر را فراهم کرده و منجر به تولید تصاویر با کیفیت بالاتر می‌شود.

این آشکارساز از ماده سوسوزن یدید سزیم (CSI) ساخته شده است. مواد سوسوزن به دلیل کارایی بالا در جذب پرتو ایکس و تبدیل آن به سیگنال‌های الکتریکی، انتخابی رایج در سامانه‌های تصویربرداری پرتو ایکس به‌شمار می‌روند. حساسیت بالای CSI به تابش پرتو ایکس، امکان تولید تصاویر شفاف و دقیق از ساختار داخلی اجسام را فراهم می‌سازد.

مهمترین مشخصه‌های آشکارسازها عبارتند از: پوشش میدان دید<sup>۱</sup>، ویژگی‌های هندسی، بازده کوانتومی<sup>۲</sup>، حساسیت<sup>۳</sup>، وضوح فضایی<sup>۴</sup>، نویز، محدوده دینامیکی<sup>۵</sup>، یکنواختی پاسخ<sup>۶</sup>، سرعت جمع‌آوری داده، وزن و هزینه.

در این سامانه، به‌منظور فراهم‌سازی امکان تصویربرداری از نمونه‌های با ابعاد بزرگ، از یک آشکارساز صفحه‌تخت با ابعاد  $472 \times 472$  میلی‌متر مربع استفاده شده است. این آشکارساز شامل  $3072 \times 3072$  پیکسل بوده و در مجموع  $9,437,184$  پیکسل را در بر می‌گیرد. تعداد بالای پیکسل‌ها نقش مستقیمی در افزایش دقت و وضوح تصاویر حاصل دارد؛ ویژگی‌ای که در مقطع‌نگاری، به‌دلیل نیاز به استخراج جزئیات دقیق ساختار داخلی، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است.



شکل ۲) نمای شماتیک از جانمایی تجهیزات در هندسه نهایی، (۱) مولد اشعه ایکس، (۲) پنجره خروجی باریکه ایکس، (۳) جعبه مدارهای کنترلی، (۴) سازه، (۵) محل استقرار نمونه-میز گردان، (۶) استپ موتور، (۷) آشکارساز صفحه تخت، (۸) اتاقک حفاظ پرتوی، (۹) چراغ هشدار سامانه و (۱۰) الکترونیک مولد ایکس

برای دریافت تصاویر خام اولیه از آشکارساز، از نرم‌افزار اختصاصی آن با نام X Discovery استفاده شد. نرم‌افزار X

سیستم جمع‌آوری داده و پردازش تصویر

- 4 Spatial resolution
- 5 Dynamic range
- 6 Uniformity

- 1 Field coverage
- 2 Quantum efficiency
- 3 Sensitivity

فرمول‌بندی نظری الگوریتم MLEM را می‌توان به صورت زیر بیان کرد:

$$\hat{f}_j^{(k+1)} = \hat{f}_j^{(k)} \cdot \frac{\sum_i \frac{p_{ij}}{g_i(\hat{f}^{(k)})}}{\sum_j \frac{p_{ij}}{g_i(\hat{f}^{(k)})}} \quad ۱$$

که  $\hat{f}_j^{(k)}$  مقدار تخمینی تصویر در تکرار  $k$ ،  $p_{ij}$  نشان‌دهنده داده‌های طرح ریزی اندازه‌گیری شده و  $g_i(\hat{f}^{(k)})$  پیش‌بینی رو به جلوی برآورد فعلی  $\hat{f}^{(k)}$  است.

### ۳. مولد ایکس

لامپ پرتو ایکس، هسته اصلی سامانه مقطع‌نگاری به‌شمار می‌رود و وظیفه تولید تابش را بر عهده دارد. در این لامپ، الکترون‌ها پس از گسیل از کاتد، تحت تأثیر اختلاف پتانسیل بالا شتاب گرفته و به سمت یک هدف فلزی در آند هدایت می‌شوند. برخورد پرتو الکترون‌ها با آند منجر به تولید پرتو ایکس می‌شود. ساختار لامپ به‌طور معمول شامل دو بخش اصلی، یعنی کاتد و آند است؛ کاتد نقش منبع الکترون و آند که غالباً از جنس تنگستن انتخاب می‌شود محل تولید تابش است.

در هنگام برخورد الکترون‌ها به آند، انرژی جنبشی آن‌ها عمدتاً به گرما و تنها بخشی به پرتو ایکس تبدیل می‌شود؛ از این رو مدیریت حرارتی لامپ اهمیت بالایی دارد. مولد پرتو ایکس به‌کاررفته در این پروژه، مجهز به مدار تنظیم آنالوگ است که امکان کنترل دقیق ولتاژ و جریان را فراهم کرده و در نتیجه پایداری و یکنواختی تابش تولیدی را تضمین می‌کند. این مولد ساخت کشور مجارستان بوده و به دلیل قابلیت اطمینان و کیفیت عملکرد، در بسیاری از کاربردهای صنعتی و پژوهشی مورد استفاده قرار می‌گیرد.

به‌منظور دفع حرارت تولیدشده و جلوگیری از افت کارایی یا آسیب به تجهیزات، از یک سامانه خنک‌کننده آب‌گرد استفاده شده است. گردش مداوم آب، دمای مولد را در محدوده‌ای ایمن و پایدار نگه می‌دارد و امکان بهره‌برداری پیوسته و بدون وقفه از سیستم را فراهم می‌سازد.

Discovery Flat Panel به مجموعه‌ای از برنامه‌ها اطلاق می‌شود که به‌منظور پردازش دیجیتال و ذخیره‌سازی تصاویر پرتو ایکس طراحی شده‌اند و به‌طور ویژه برای بهره‌برداری بهینه از آشکارسازهای صفحه‌تخت به کار می‌روند. این نرم‌افزار از مدل‌های متنوعی از آشکارسازهای پرتو ایکس پشتیبانی کرده و فرایند اخذ و مدیریت تصاویر استاتیک و پویا<sup>۱</sup> را تسهیل می‌کند.

یکی از نمونه‌های این نرم‌افزار، dicomPACS®DX-R است که به‌عنوان یک نرم‌افزار حرفه‌ای اکتساب تصویر، با چندین سامانه رادیوگرافی رایانه‌ای و آشکارسازهای صفحه‌تخت سازگار می‌باشد. این نرم‌افزار بر روی پلتفرم ویندوز ۱۰ نصب و مورد استفاده قرار گرفت. تصاویر به‌صورت پیش‌فرض با نرخ ۱۶ فریم بر ثانیه ذخیره شده و حجم هر فریم از تصاویر خام حدود ۱۸ مگابایت بود.

پردازش تصاویر نهایی در این پژوهش با استفاده از یک بسته نرم‌افزاری توسعه‌یافته در محیط MATLAB انجام شد. در تصاویر حاصل، شدت هر پیکسل با تعداد فوتون‌های پس‌پراکنده آشکارسازی شده در هر تابش باریکه پرتو سوزنی ارتباط مستقیم دارد.

با پیشرفت توان محاسباتی رایانه‌ها، بازسازی تصویر به روش‌های تکرارشونده به‌طور فزاینده‌ای جایگزین روش‌های تحلیلی کلاسیک شده است. در این دسته از روش‌ها، بازسازی تصویر از طریق حل دستگاهی از معادلات خطی و کمینه‌سازی یک تابع هدف انجام می‌شود. برای این منظور، الگوریتم‌های متعددی جهت بهینه‌سازی تابع هدف و حل معادلات ارائه شده‌اند که در میان آن‌ها، الگوریتم حداکثرسازی امید ریاضی درست‌نمایی<sup>۲</sup> (MLEM) به دلیل پایداری و کارایی، کاربرد گسترده‌تری دارد. هدف اصلی این الگوریتم‌ها کاهش نویز تصویر، بدون افت محسوس در قدرت تفکیک مکانی سامانه، است.

الگوریتم MLEM با تکیه بر داده‌های افکنده<sup>۳</sup> اندازه‌گیری شده، تصویری را برآورد می‌کند که بیشترین احتمال سازگاری با داده‌های مشاهده شده را داشته باشد. به بیان دیگر، این روش با بیشینه‌سازی تابع درست‌نمایی، محتمل‌ترین توزیع شدت یا ضریب تضعیف را در فضای تصویر تخمین می‌زند.

<sup>3</sup> Projection

<sup>1</sup> Dynamics

<sup>2</sup> Maximum Likelihood Expectation Maximization

## ۴. اتاقلک حفاظ

از آنجا که مولد پرتو ایکس قادر به تولید سطوح بالایی از تابش یون‌ساز است، به‌کارگیری یک اتاقلک حفاظ مناسب برای مهار و جذب پرتوهای ناخواسته، یک الزام ایمنی محسوب می‌شود و نه یک گزینه اختیاری. در صورت نبود حفاظ مؤثر، خطر پرتودهی ناخواسته به کاربران و محیط اطراف به‌طور جدی افزایش می‌یابد و بهره‌برداری از سامانه عملاً غیرقابل قبول خواهد بود.

اتاقلک حفاظ با استفاده از مواد جاذب تابش، علاوه بر کاهش نشت پرتو و تضمین ایمنی پرسنل، یک محیط پایدار و کنترل‌شده برای عملکرد بهینه مولد نیز فراهم می‌کند. این شرایط به پایداری اندازه‌گیری‌ها و تکرارپذیری نتایج کمک کرده و از تأثیر عوامل محیطی بر کیفیت تصویربرداری جلوگیری می‌کند. پس از طراحی مهندسی و محاسبه ضخامت حفاظ، اتاقلک ساخته و نصب شد و کارایی آن از نظر ایمنی پرتویی مورد ارزیابی قرار گرفت تا اطمینان حاصل شود که هم تجهیزات و هم کاربران در شرایط ایمن قرار دارند، بدون آنکه کارایی سامانه کاهش یابد.

بر این اساس، اتاقلک حفاظ بخشی جدایی‌ناپذیر از سامانه مقطع‌نگاری پرتو ایکس است و نقش اساسی در فراهم‌سازی محیطی ایمن، استاندارد و قابل اعتماد برای انجام آزمایش‌ها ایفا می‌کند.

## ۵. محل استقرار نمونه

محل نمونه در یک سامانه مقطع‌نگاری به نقطه‌ای اطلاق می‌شود که جسم مورد تصویربرداری در آن قرار می‌گیرد و معمولاً در مرکز یک دیسک چرخان مستقر می‌شود تا امکان تصویربرداری ۳۶۰ درجه از نمونه فراهم شود. دیسک چرخان نقش حیاتی در این فرآیند دارد، زیرا با گردش نمونه، سیستم تصویربرداری قادر می‌شود داده‌ها را از زوایای مختلف جمع‌آوری کرده و بازسازی سه‌بعدی دقیقی از ساختار داخلی جسم ارائه دهد.

برای دستیابی به حرکت کنترل‌شده و دقیق دیسک، از یک موتور پله‌ای<sup>۱</sup> استفاده می‌شود. در این پروژه، موتور پله‌ای مدل 42CM04 ساخت شرکت لیدشاین به کار گرفته شده است که دارای گشتاور ۴kg·cm و قطر ۴۲mm است.

<sup>1</sup>Step Motor

این موتور با قابلیت حرکت گام‌به‌گام، امکان موقعیت‌یابی دقیق نمونه را فراهم کرده و می‌تواند نمونه را در زوایای مورد نیاز برای بازسازی مقطع‌نگاری با دقت بالا بچرخاند. موتور مذکور معمولاً در سیستم‌های اتوماسیون صنعتی، رباتیک و پرینترهای سه‌بعدی استفاده می‌شود و با ولتاژهای ۱۲ یا ۲۴ ولت کار می‌کند.

به کمک این اجزاء، نمونه به‌طور دقیق در زوایای مشخص قرار می‌گیرد و با جمع‌آوری داده‌های چندزویه‌ای، امکان تولید تصاویر با وضوح و کیفیت بالا در سیستم مقطع‌نگاری فراهم می‌شود.

## ۲-۲ طراحی فانتوم

برای طراحی فلنتوم، از ترکیبی از مواد پلی‌اتیلنی و میله‌های فلزی با قطرهای مختلف بهره گرفته شد. شکل‌های ۳ و ۴ نمونه فانتوم‌های ساخته شده برای ارزیابی عملکرد سامانه مقطع‌نگاری را نشان می‌دهند.

فانتوم شماره ۱: این فانتوم شامل یک استوانه پلی‌اتیلنی با ارتفاع ۸ سانتی‌متر و قطر ۱۰.۳ سانتی‌متر است. درون استوانه، شش حفره با قطرهای متفاوت (۰.۲، ۰.۴، ۰.۶، ۰.۸، ۱ و ۱.۲ سانتی‌متر) به‌صورت دقیق و در امتداد یک خط مطابق شکل ۳ تعبیه شده‌اند.

هدف از طراحی این فانتوم، سنجش توانایی سامانه در شناسایی و تفکیک ساختارهای کوچک با دقت بالا در محیطی یکنواخت و کم‌چگالی بود. انتخاب پلی‌اتیلن به دلیل ویژگی‌های فیزیکی آن، از جمله چگالی پایین و همگنی ماده، این امکان را فراهم می‌کند که شرایط واقعی شبیه‌سازی شده و صحت عملکرد دستگاه در تشخیص تغییرات جزئی چگالی به‌طور مؤثر ارزیابی شود.

### ۳- نتایج

نتایج بازسازی تصاویر فانتوم و دریافت مقطع‌های عرضی آن، عملکرد سامانه مقطع‌نگاری را به‌وضوح نشان می‌دهد. فرآیند تصویربرداری با تنظیمات استاندارد، شامل جریان‌های ۱ و ۲ میلی‌آمپر و ولتاژهای ۱۰۰، ۱۲۵ و ۱۵۰ کیلوولت مولد پرتو ایکس انجام شد. دستگاه، فانتوم را در زوایای مختلف اسکن کرد و تصاویر ثبت‌شده با استفاده از نرم‌افزارهای پیشرفته پردازش تصویر بازسازی شدند تا قابلیت سامانه در تشخیص و اندازه‌گیری دقیق حفره‌ها ارزیابی شود.

مطابق شکل‌های ۵ و ۶، سامانه توانست هر شش حفره فانتوم شماره ۱ را به‌طور کامل شناسایی کند. تصاویر بازسازی‌شده نشان دادند که حتی کوچک‌ترین حفره با قطر ۲ میلی‌متر نیز به‌وضوح قابل تفکیک است. اندازه‌گیری‌ها با ابعاد واقعی حفره‌ها تطابق بسیار خوبی داشت و این امر قدرت تفکیک بالا و توانایی دستگاه در شناسایی جزئیات ریز را تأیید می‌کند.

پیش از انجام هر اندازه‌گیری، تعیین ابعاد پیکسل‌های تصویر مقطع‌نگاری ضروری است. برای این منظور از یک فانتوم با ابعاد مشخص (شکل ۳) استفاده شد که شامل ساختارهایی با اندازه دقیق است و امکان کالیبراسیون دستگاه را فراهم می‌کند. با این کالیبراسیون، ابعاد فیزیکی هر پیکسل محاسبه شده و سپس اندازه‌گیری‌ها به واحدهای واقعی مانند میلی‌متر تبدیل می‌شوند.

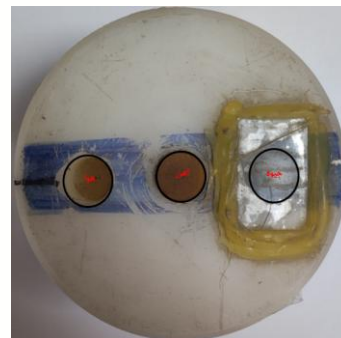
در تصاویر نهایی مقطع‌نگاری، هر پیکسل مربعی با طول ۴۲۰ میکرومتر ثبت شد. قطر استوانه فانتوم در تصویر مقطع‌نگاری حدود ۳۱۰ پیکسل اندازه‌گیری شد که معادل ۱۰۴ میلی‌متر است که نشان‌دهنده تطابق دقیق مقیاس تصویر با ابعاد فیزیکی واقعی نمونه می‌باشد.



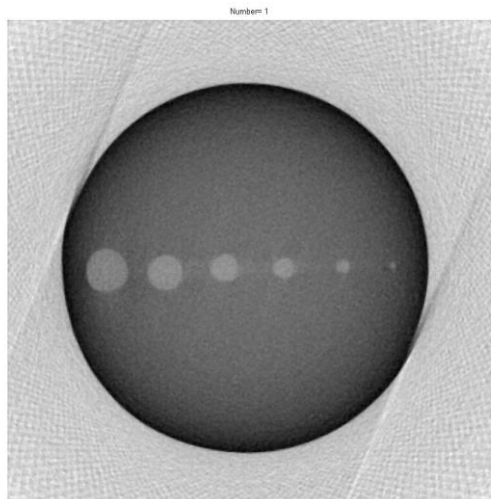
شکل ۳) نمایی از فانتوم شماره ۱

فانتوم شماره ۲: شامل یک استوانه پلی‌اتیلنی با ارتفاع ۹.۷ سانتی‌متر و قطر ۱۰.۴ سانتی‌متر مطابق شکل ۴ است. درون این استوانه، سه حفره به‌صورت خطی و در امتداد محور استوانه با قطر ۱.۵ سانتی‌متر تعبیه شده‌اند.

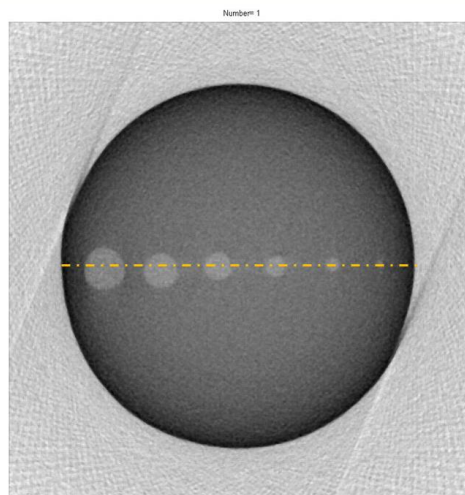
ویژگی متمایز این فانتوم، پر شدن هر یک از حفره‌ها با مواد متفاوت است: حفره اول کاملاً خالی و حاوی هوا، حفره دوم با قطعه‌ای از آهن و حفره سوم با جیوه پر شده است. هدف از طراحی این فانتوم، سنجش توانایی سامانه مقطع‌نگاری در تشخیص و تفکیک مواد با چگالی‌های بسیار متفاوت در یک محیط پلی‌اتیلنی بود. این اختلاف‌های چگالی امکان ارزیابی عملکرد دستگاه در شرایطی شبیه به کاربردهای واقعی را فراهم می‌کند، جایی که مواد با خصوصیات فیزیکی مختلف به‌طور همزمان در یک ساختار حضور دارند.



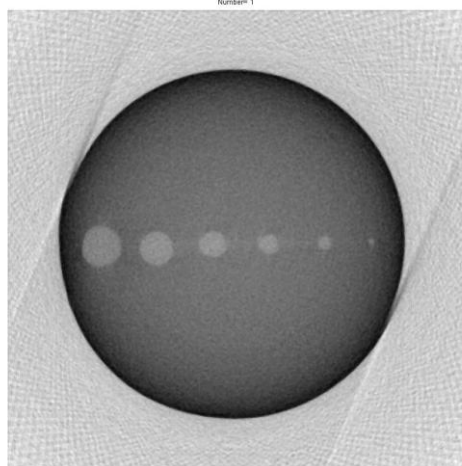
شکل ۴) نمایی از فانتوم شماره ۲



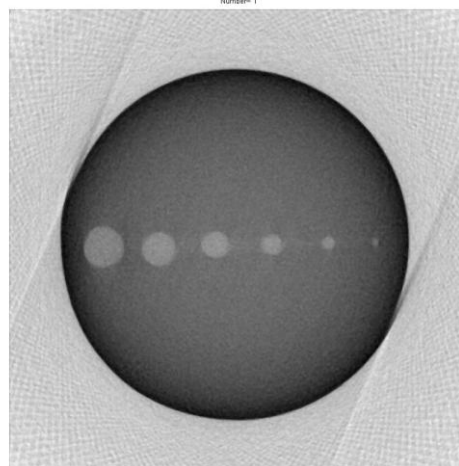
ب



الف



د

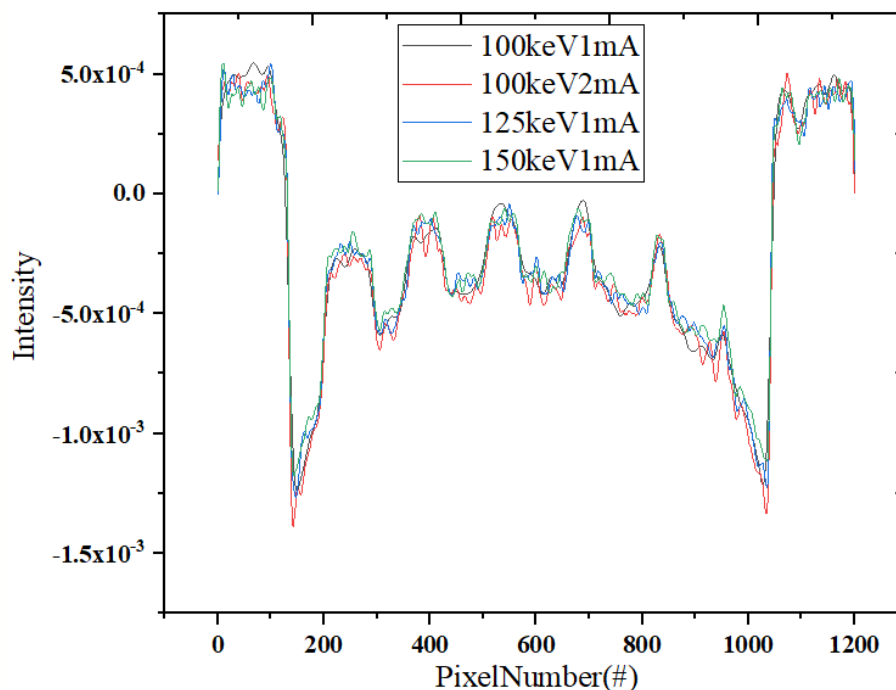


ج

شکل ۵) تصویر فانتوم شماره ۱: الف) با جریان 1 mA و ولتاژ 100 kV، ب) با جریان 1 mA و ولتاژ 125 kV، ج) جریان 1 mA و ولتاژ 150 kV و د) با جریان 2 mA و ولتاژ 100 kV

ارزیابی شود. نتایج مطابق شکل ۵ نشان می‌دهد که دستگاه مقطع‌نگاری تمامی شش حفره را به‌طور دقیق شناسایی کرده و حتی کوچک‌ترین حفره با قطر ۰.۲ سانتی‌متر نیز به‌وضوح قابل تفکیک است.

فرآیند تصویربرداری با تنظیمات استاندارد، شامل جریان‌های ۱ و ۲ میلی‌آمپر و ولتاژهای ۱۰۰، ۱۲۵ و ۱۵۰ کیلوولت مولد اشعه ایکس، انجام شد. دستگاه فانتوم را در زوایای مختلف اسکن کرد و تصاویر ثبت‌شده با استفاده از نرم‌افزارهای پیشرفته پردازش تصویر بازسازی شدند تا توانایی سامانه در شناسایی و اندازه‌گیری دقیق حفره‌ها



شکل ۶) تغییرات شدت به ازای تغییر ولتاژ و جریان مولد ایکس

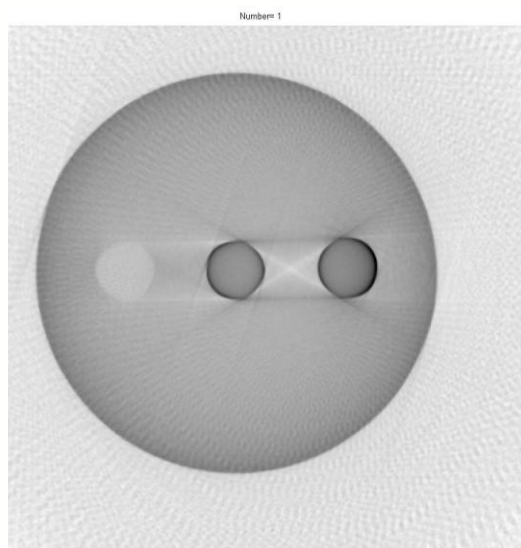
جدول (۱) مقایسه مقادیر واقعی و محاسبه شده

خطا	مقادیر محاسبه شده (mm)	مقادیر واقعی (mm)	قطر اجزای فانوم اصلی (mm)
۰/۰۲۵	۱۲.۳	۱۲	قطر حفره یک
۰/۰۳	۹.۷	۱۰	قطر حفره دو
۰/۰۲۵	۷.۸	۸	قطر حفره سه
۰/۰۱۶	۶.۱	۶	قطر حفره چهار
۰/۰۲۵	۴.۱	۴	قطر حفره پنج
۰/۰۰۵	۲.۱	۲	قطر حفره شش

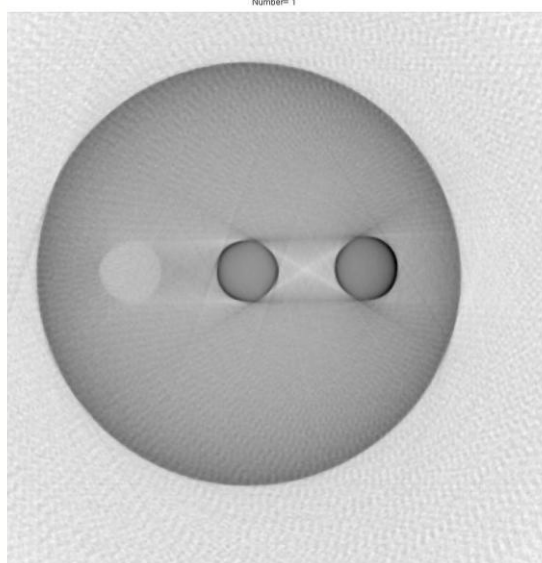
دستگاه توانست اندازه هر حفره را دقیقاً مطابق با ابعاد واقعی آن تعیین کند، که این امر نشان‌دهنده قدرت تفکیک بالای سامانه و توانایی آن در شناسایی جزئیات بسیار ریز است. همچنین، تطابق نزدیک بین ابعاد اندازه‌گیری شده و ابعاد واقعی حفره‌ها، دقت بالای عملکرد دستگاه را به وضوح تأیید می‌کند.

نمودار ارائه شده در شکل ۶، شدت سیگنال را در طول پیکسل‌های یک مسیر مشخص نشان می‌دهد. مسیر انتخاب شده برای رسم خط پروفایل با خط چین زرد در شکل ۵الف مشخص شده است. محور افقی نمودار شماره پیکسل‌ها و محور عمودی شدت سیگنال هر پیکسل را نمایش می‌دهد. چهار منحنی در نمودار نشان‌دهنده شرایط مختلف آزمایشی هستند که شامل ترکیب‌های متفاوت ولتاژ (۱۰۰، ۱۲۵ و ۱۵۰ کیلوولت) و جریان (۱ و ۲ میلی‌آمپر) می‌شوند. تغییرات مشاهده شده در شدت سیگنال نشان می‌دهد که تغییرات ولتاژ و جریان تأثیر قابل توجهی بر نتایج ندارد و پاسخ سامانه نسبتاً پایدار است.

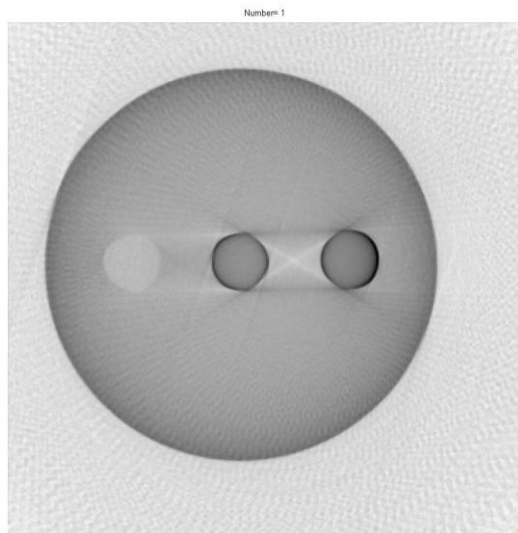
در جدول ۱، مقادیر واقعی حفره‌ها با ابعاد محاسبه شده از تصاویر مقطع‌نگاری مقایسه شده‌اند. میانگین خطای اندازه‌گیری برای تمام حفره‌ها ۲.۸ درصد گزارش شده است که دقت بالای سامانه در تعیین ابعاد واقعی را تأیید می‌کند.



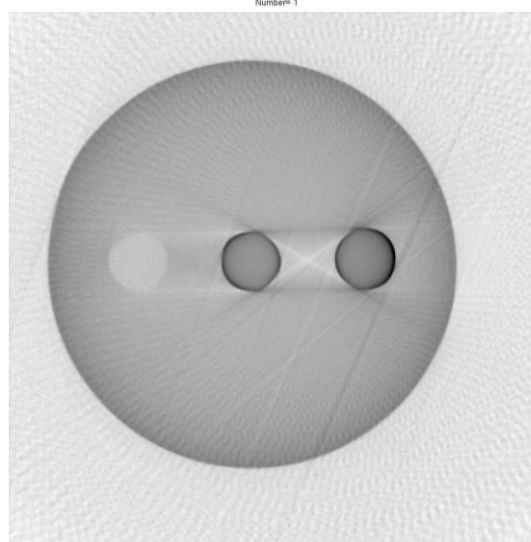
ب



الف



د



ج

شکل ۷) تصویر فانتوم شماره ۲: الف) با جریان 1 mA و ولتاژ 100 kV، ب) با جریان 1 mA و ولتاژ 125 kV، ج) جریان 1 mA و ولتاژ 150 kV و د) جریان 2 mA و ولتاژ 100 kV

حفره دوم (آهن): حفره حاوی قطعه آهن به‌عنوان ناحیه‌ای با چگالی بالا نمایش داده شد. دقت سامانه در شناسایی آهن و تمایز آن از پلی‌اتیلن، توانایی دستگاه در تفکیک مواد با چگالی بالا را نشان می‌دهد.

حفره سوم (جیوه): جیوه به‌عنوان ماده‌ای با چگالی بسیار بالا و جذب قابل توجه پرتو ایکس، در تصاویر به‌خوبی قابل شناسایی بود. تغییرات چگالی ناشی از حضور جیوه به‌درستی ثبت شد و موقعیت آن با دقت بالا تعیین گردید.

نتایج آزمایش نشان داد که سامانه مقطع‌نگاری توانایی بالایی در تفکیک چگالی‌های متفاوت دارد و قادر است اختلافات میان هوا، آهن و جیوه را به‌طور دقیق شناسایی کند. در تصاویر بازسازی‌شده:

حفره اول (هوا): این حفره به‌وضوح به‌عنوان ناحیه‌ای با چگالی بسیار پایین مشخص شد. مرز بین هوای خالی و بافت پلی‌اتیلن اطراف به‌درستی شناسایی شده و تفکیک واضحی از ماده مجاور ارائه شد.

۰/۲ سانتی‌متر نیز به‌وضوح قابل تفکیک بود. همچنین، اندازه هر حفره مطابق با ابعاد واقعی آن تعیین شد که بیانگر قدرت تفکیک بالا و توانایی دستگاه در شناسایی جزئیات بسیار ریز است. تطابق نزدیک بین ابعاد اندازه‌گیری‌شده و واقعی نیز دقت بالای سامانه را تأیید کرد.

در فانتوم دوم، دستگاه به‌خوبی توانست تفاوت‌های چگالی میان هوا، آهن و جیوه را شناسایی کرده و موقعیت و ابعاد هر ماده را با دقت بالا بازسازی کند، که نشان‌دهنده قابلیت سامانه برای کاربردهای پیچیده و نیازمند دقت بالا است.

#### ۵- تعارض منافع

هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسندگان وجود ندارد.

#### ۶- منابع

- [1] Yao, J., & Takei, M. (2017). APPLICATION OF PROCESS TOMOGRAPHY TO MULTIPHASE FLOW MEASUREMENT IN INDUSTRIAL AND BIOMEDICAL FIELDS: A REVIEW. *IEEE Sensors Journal*, 17(24), 8196–8205.
- [2] Stitt, H. (2016). INDUSTRIAL TOMOGRAPHY: SYSTEMS AND APPLICATIONS. *Johnson Matthey Technology Review*, 60(2), 145–146.
- [3] Vicente, M. A., González, D. C., & Mínguez, J. (2019). RECENT ADVANCES IN THE USE OF COMPUTED TOMOGRAPHY IN CONCRETE TECHNOLOGY AND OTHER ENGINEERING FIELDS. *Micron*, 118, 22–34.
- [4] More, N., Basse-Cathalinat, B., Baquey, C., Lacroix, F., & Ducassou, D. (1983). APPLICATION OF NOVEL TECHNIQUES OF MEDICAL IMAGING TO THE NON-DESTRUCTIVE ANALYSIS OF CARBON-CARBON COMPOSITE MATERIALS. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*, 214(2–3), 531–536.
- [5] Lambert, J., Chambers, A. R., Sinclair, I., & Spearing, S. M. (2012). 3D DAMAGE CHARACTERISATION AND THE ROLE OF VOIDS IN THE FATIGUE OF WIND TURBINE BLADE MATERIALS. *Composites Science and Technology*, 72(2), 337–343.
- [6] Notman, D. N., Tashjian, J., Aufderheide, A. C., Cass, O. W., Shane III, O. C., Berquist, T. H., Gray, J. E., & Gedgudas, E. (1986). MODERN IMAGING AND ENDOSCOPIC BIOPSY TECHNIQUES IN EGYPTIAN MUMMIES. *American Journal of Roentgenology*, 146(1), 93–96.

تصاویر حاصل از فانتوم نشان داد که دستگاه مقطع‌نگاری توانایی بالایی در تشخیص دقیق مرزها و تفاوت‌های میان مواد مختلف درون حفره‌ها دارد. نتایج نشان می‌دهد که سامانه قادر است مواد متفاوت را بدون ایجاد تداخل یا خطای قابل توجه تفکیک کند و ابعاد دقیق هر ماده را به‌درستی تعیین نماید. تصویر فانتوم شماره ۲ به‌خوبی عملکرد دستگاه در شناسایی و تفکیک مواد با چگالی‌های متفاوت را ارزیابی کرد. توانایی دستگاه در اندازه‌گیری دقیق هوا، آهن و جیوه داخل فانتوم، پتانسیل آن را برای کاربردهای پیچیده و نیازمند دقت بالا تأیید می‌کند. این آزمایش به‌وضوح نشان‌دهنده قدرت تفکیک و دقت سامانه در شرایطی است که مواد با ویژگی‌های فیزیکی بسیار متفاوت در کنار یکدیگر قرار دارند.

#### ۴- نتیجه‌گیری

مقطع‌نگاری رایانه‌ای با بهره‌گیری از پرتوهای یون‌ساز با نفوذ بالا، امکان بازسازی سه‌بعدی ساختارهای داخلی و خارجی یک جسم اسکن شده را فراهم می‌کند و کاربرد وسیعی در بازرسی قطعات صنعتی دارد. در این مطالعه، یک سامانه مقطع‌نگاری صنعتی اولیه متشکل از مولد پرتو ایکس و آشکارساز صفحه‌تخت طراحی و ساخته شد.

برای ارزیابی عملکرد سامانه، ابتدا یک فانتوم استوانه‌ای با حفره‌هایی با قطرهای مختلف ساخته شد تا توانایی دستگاه در شناسایی و تفکیک جزئیات ریز بررسی شود. در گام بعدی، فانتوم دومی طراحی شد تا عملکرد سامانه در تشخیص و تفکیک مواد با چگالی‌های متفاوت مورد ارزیابی قرار گیرد. بازسازی تصاویر سطح مقطع با استفاده از الگوریتم MLEM انجام شد، روشی که کیفیت آن در مطالعات پیشین تأیید شده بود.

فرآیند تصویربرداری با جریان‌های ۱ و ۲ میلی‌آمپر و ولتاژهای ۱۰۰، ۱۲۵ و ۱۵۰ کیلوولت انجام شد. نتایج نشان داد که سامانه مقطع‌نگاری تمامی شش حفره فانتوم اول را به‌طور دقیق شناسایی کرد و حتی کوچک‌ترین حفره با قطر

- [7] Hayashi, T., Kobayashi, T., & Takahashi, J. (2017). QUANTIFICATION OF THE VOID CONTENT OF COMPOSITE MATERIALS USING SOFT X-RAY TRANSMITTANCE. *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, 30(11), 1522–1527.
- [8] Zeng, G. L. (2010). *MEDICAL IMAGE RECONSTRUCTION: A CONCEPTUAL TUTORIAL*. Springer.
- [9] Wong, P. A. (1981). COMPUTED TOMOGRAPHY IN PALEOPATHOLOGY: TECHNIQUE AND CASE STUDY. *American Journal of Physical Anthropology*, 55(1), 101–110.
- [10] Hopkins, F. F., Morgan, I. L., Ellinger, H. D., Klinksiek, R. V., Meyer, G. A., & Thompson, J. N. (1981). INDUSTRIAL TOMOGRAPHY APPLICATIONS. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 28(2), 1717–1720.
- [11] Hildebrand, B., & Harrington, T. (1980). MAPPING OF MATERIALS STRESS WITH ULTRASONIC TOMOGRAPHY.
- [12] Beigzadeh, A. M., & Askari, M. (2021). FEASIBILITY OF CROSS-SECTIONAL IMAGING USING A CARGO SCANNER SYSTEM USING MODELING AND EXPERIMENTAL METHODS. *Journal of Non-Destructive Testing Technology*, 9(2), 77–87. (In Persian)
- [13] Beigzadeh, A. M., & Askari, M. (2021). QUALITY ASSESSMENT OF GYPSUM STRUCTURES USING CROSS-SECTIONAL METHODS (MODELING AND EXPERIMENTAL). *Journal of Non-Destructive Testing Technology*, 3(1), 72–83. (In Persian)