

## Feasibility Study of Tomography using Cargo Scanner System by Modeling and Experimental Methods

AmirMohammad Beigzadeh\*, Mojtaba Askari, Ali Taheri

Radiation Application Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute, Tehran, Iran

\*abeigzadeh@aeoi.org.ir

### Abstract

Today, computed tomography has vast applications in medical and industrial imaging systems. In CT, an image is obtained from the objects by scanning them at different angles and reconstructing the image. Industrial CT is used in many industrial applications for inspection of the parts. Some of the key applications of CT in industry are fault detection, nondestructive inspection, failure analysis, metrology, assembly analysis and reverse engineering. In this paper, the feasibility of CT of a standard phantom specimen is performed by using a cargo scanner system. The phantom contains 5.0 mm, 10.0 mm, and 20.0 mm diameter rods made from iron, aluminium, and polyethylene. The total number of phantom rods is 9. The Imaging system geometry consists of a linear array detector and a gamma ray source. Two mathematical methods, MLEM and BackProjection were used for reconstructing the projections obtained from the samples. the proposed CT system was first simulated by MCNPX Monte Carlo code. The CT images of phantom were then compared in terms of the reconstruction methods and the experimental and simulated geometry.

**Keywords:** Computed Tomography, Gamma Radiography, MCNPX, Contrast Test, Resolution Test

## امکان سنجی مقطع‌نگاری با بهره‌گیری از سیستم کارگو اسکنر به روش مدل‌سازی و تجربی

امیرمحمد بیگزاده\*، مجتبی عسکری، علی طاهری

استادیار، پژوهشکده کاربرد پرتوها، سازمان انرژی اتمی، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، تهران، ایران  
\*abeigzadeh@aeoi.org.ir

### چکیده

امروزه مقطع‌نگاری کامپیوتری کاربردهای گسترده‌ای در سیستم‌های تصویربرداری پزشکی و صنعتی دارند. در مقطع‌نگاری تصویر درون اجسام با استفاده از اسکن در زوایای مختلف و بازسازی تصویر به دست می‌آید. مقطع‌نگاری صنعتی در بسیاری از حوزه‌های صنعتی برای بازرسی داخلی قطعات مورد استفاده قرار می‌گیرد. برخی از کاربردهای کلیدی آن در صنعت، تشخیص عیوب، بازرسی غیرمخرب، تحلیل شکست، اندازه‌سناسی، تحلیل مونتاژ و کاربردهای مهندسی معکوس است. در این مقاله، امکان سنجی مقطع‌نگاری یک نمونه فانتوم استاندارد با بهره‌گیری از سیستم کارگو اسکنر خودرویی انجام شد. فانتوم متشکل از ۹ میله با قطر ۵، ۱۰ و ۲۰ میلی‌متر از جنس آهن، آلومینیوم و پلی‌اتیلن بود. هندسه اصلی این سیستم از یک آشکارساز خطی آرایه‌ای و چشمه پرتوهای گاما تشکیل شده است. برای بازسازی تصاویر جسم از دو روش ریاضی MLEM و BackProjection استفاده شد. در ابتدا سیستم مقطع‌نگاری پیشنهادی با استفاده از کد مونت کارلوی MCNPX شبیه‌سازی شد. خروجی سطح مقطع جسم از نقطه‌نظر روش بازسازی به کار گرفته شده و هندسه تجربی و شبیه‌سازی شده با یکدیگر مقایسه شدند.

واژگان کلیدی: مقطع‌نگاری رایانه‌ای، تصویربرداری گاما، کد MCNPX، آزمون قدرت تفکیک، آزمون تباین

### ۱- مقدمه

و عیب‌یابی فرآیندهای صنعتی دارند. علی‌رغم اینکه سیستم‌های سی‌تی‌اسکن کاربرد زیادی در حوزه پزشکی پیدا کرده‌اند اما استفاده از آن‌ها در حوزه‌های صنعتی به دلیل پیچیدگی و تنوع سیستم‌های مورد استفاده در این حوزه‌ها در ابتدای مسیر تکامل و پیشرفت قرار دارد تا به امروز، نسل‌های مختلفی از سی‌تی‌اسکن بعد از نسل اولیه اسکنر اشعه ایکس از سال ۱۹۷۲ معرفی شده است. نسل سی‌تی به تعداد آشکارساز و چشمه، چیدمان هندسی و روش‌های جمع‌آوری داده‌ها بستگی دارد [۲]. مقطع‌نگاری صنعتی در بسیاری از زمینه‌های صنعت برای بازرسی داخلی قطعات مورد استفاده قرار گرفته است که در ادامه به برخی از کاربردهای آن اشاره شده است [۳].

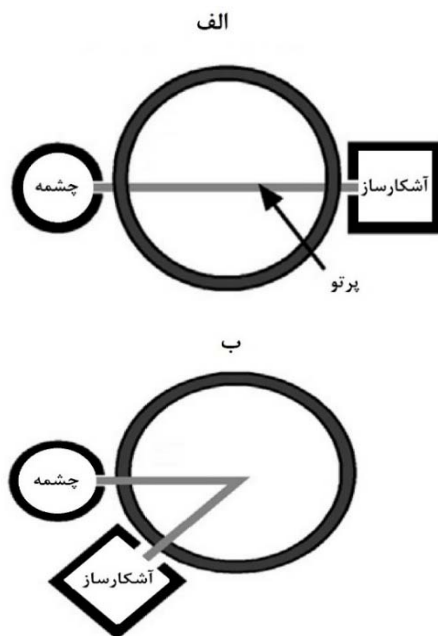
مونتاژ: یکی از شناخته‌شده‌ترین شکل‌های آنالیز با استفاده از CT برای مونتاژ یا آنالیز چشمی است. سی‌تی‌اسکن ن ماهایی مقطعی از داخل اجزا را در موقعیت عملکردی خود،

فناوری مبتنی بر پرتوی گاما و اشعه ایکس بینش کاملاً نوینی را در مورد ساختارهای ناپیدا ارائه می‌دهد. با بهره‌گیری از این پرتوها می‌توان ساختارهای داخلی را به سرعت و به صورت غیرمخرب، ضبط، آنالیز، اندازه‌گیری و بازرسی کنید. بدیهی است که فناوری اشعه ایکس موارد پنهان را قابل مشاهده می‌کند. پرتوی گاما شکل نافذ تابش الکترومغناطیسی پرنانرژی هستند. با توجه به قابلیت نفوذ بالای آن‌ها، اشعه ایکس سخت و گاما به طور گسترده برای تصویربرداری از داخل اشیاء و تصویربرداری صنعتی در پرتونگاری<sup>۱</sup> پزشکی و دستگاه‌های بازرسی - امنیتی فرودگاه استفاده می‌شود [۱]. یکی از این روش‌های تصویربرداری مقطع‌نگاری کامپیوتری<sup>۲</sup> است. امروزه طیف گسترده‌ای از صنایع به‌ویژه صنایع شیمیایی و پتروشیمی علاقه زیادی به استفاده از سیستم‌های مقطع‌نگاری هسته‌ای علی‌الخصوص سی‌تی‌اسکن به منظور بهبود طراحی، عملیات، بهینه‌سازی

<sup>1</sup> radiography

<sup>2</sup> Computed Tomography (CT)

کامپیوتری صنعتی به‌طور کلی در طول پنج مرحله مختلف تولید از قبیل پیش‌تولید - طراحی و آنالیز، تولید - ارزیابی استحکام، بررسی شکست - کشف عیوب و نواقص، بازرسی قطعه - تست تکرارپذیری، مهندسی معکوس - تنظیم طراحی یا تحقیق و توسعه نیاز است. از انواع روش‌های مقطع‌نگاری می‌توان مقطع‌نگاری امپدانس الکتریکی، تصویربرداری رزونانس، مغناطیسی، مقطع‌نگاری پرتوی را نام برد؛ که در مطالعه حاضر مقطع‌نگاری پرتوی مورد بحث قرار گرفته شده است: اساس کار همه‌ی دستگاه‌های مقطع‌نگاری گاما و ایکس در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل ۱- انواع روش‌های اندازه‌گیری مورد استفاده در دستگاه‌های مقطع‌نگاری صنعتی. (الف) روش عبوری (ب) روش پس‌پراکندگی [۷].

در روش عبوری چشمه و آشکارساز در دو طرف شی مورد مطالعه قرار می‌گیرند. در روش پس‌پراکندگی، آشکارساز در جایی غیر از مسیر مستقیم قرار می‌گیرد تا پرتوهای پراکنده شده را اندازه‌گیری نماید. شدت باریکه (تعداد فوتون در ثانیه) به تعداد اندرکنش‌هایی که درون شی مورد مطالعه اتفاق می‌افتد بستگی دارد و به‌طور پیوسته توسط آشکارساز مورد اندازه‌گیری قرار می‌گیرد [۷]. مقطع‌نگاری شامل چندین اندازه‌گیری در جهت‌های مختلف در اطراف

بدون جداسازی قطعات یک جسم، فراهم می‌کند. از جمله کاربردهای عملی این کاربرد می‌توان بررسی مونتاژ قطعات داخل موتور خودرو اشاره نمود.

**تشخیص حفره‌ها، ترک‌ها و عیوب:** تعیین عیوب، حفره‌ها و شکاف‌ها در یک شی نیاز به آزمایش مخرب دارد. سی‌تی‌اسکن می‌تواند ویژگی‌های داخلی و عیوب نمایش این اطلاعات را به‌صورت سه‌بعدی بدون صدمه قطعه شناسایی کند. سی‌تی‌اسکن صنعتی (اشعه ایکس ۳ بعدی) برای تشخیص عیوب داخل یک قطعه مانند خلل و فرج داخل آن [۴]، گنجایش، یا ترک در آن استفاده می‌شود [۵]. ریخته‌گری فلزات و قطعات پلاستیکی قالب‌گیری شده معمولاً به دلیل فرآیندهای خنک‌سازی، انتقال بین دیواره‌های ضخیم و نازک و خواص مواد، مستعد تخلخل هستند. آنالیز فضای تهی را می‌توان برای مکان‌یابی، اندازه‌گیری و آنالیز فضاهای خالی در قطعات پلاستیکی یا فلزی استفاده کرد.

**آنالیز ابعاد هندسی و تلورانس:** بدون آزمایش مخرب، اندازه‌شناسی کامل فقط بر روی ابعاد بیرونی اجزا، مانند دستگاه اندازه‌گیری مختصات<sup>۳</sup> با یک سیستم بینایی برای نقشه‌برداری از سطوح خارجی انجام می‌شود. روش‌های بازرسی داخلی مستلزم استفاده از پرتوهای یون‌ساز پرنفوذ یا استفاده از آزمایش مخرب است. سی‌تی‌اسکن صنعتی امکان اندازه‌گیری کاملاً غیرمخرب را فراهم می‌کند. با پیچیدگی هندسی نامحدود، پرینت سه‌بعدی اجازه می‌دهد تا ویژگی‌های داخلی پیچیده یک جسم با هزینه مناسب در دسترس قرار گیرد که چنین ویژگی‌هایی با استفاده از دستگاه اندازه‌گیری مختصات سنتی قابل دسترسی نیستند.

**روش‌های المان محدود مبتنی بر تصویر:** روش المان محدود مبتنی بر تصویر، داده‌های تصویر سه‌بعدی را از توموگرافی کامپیوتری اشعه ایکس به‌طور مستقیم برای آنالیز اجزای محدود یک جسم را به‌مش تبدیل می‌کند. مزایای این روش شامل مدل‌سازی هندسه‌های پیچیده (مثلاً مواد کامپوزیتی) یا مدل‌سازی دقیق اجزای «به‌عنوان تولید شده» در مقیاس خرد است [۶].

مقطع‌نگاری کامپیوتری زمانی ضروری است که کاربر به دنبال ارزیابی، آنالیز یا آزمایش ویژگی‌های داخلی و/یا خارجی یک جزء بدون از بین بردن جسم باشد. مقطع‌نگاری

<sup>3</sup> coordinate-measuring machine

$$I(x) = I_0 \exp(-\mu x) \quad (2)$$

$I_d$  یا شدت محاسبه شده در آشکارساز از رابطه زیر به دست می‌آید.

$$I_d = I(a) = I_0 \exp(-\mu a) \quad (3)$$

زمانی که تیغه از چند لایه تشکیل شده باشد و هر لایه دارای ضریب تضعیف متفاوت باشد، شدت ثبت شده در آشکارساز از رابطه زیر به دست می‌آید.

$$I_d = I_0 \exp\left(-\sum_n \mu_n a_n\right) \quad (4)$$

که در آن  $\mu_n$  و  $a_n$  به ترتیب، ضریب تضعیف جرمی و ضخامت لایه  $n$  ام می‌باشند.

برای یک شکل دوبعدی دلخواه معادلات بالا به صورت زیر عمومیت پیدا می‌کنند:

$$I_d(t; \theta) = I_0 \exp\left(-\int_{L(t; \theta)} \mu(x, y) ds\right) \quad (5)$$

که در آن  $L(t; \theta)$  خطی می‌باشد که چشمه و آشکارساز را به هم متصل می‌کند.  $(s, t)$  مختصات چرخش به وسیله  $\theta \in (0, \pi)$  از  $(x, y)$  برای موازی کردن محور  $s$  و پرتو،  $I_d(t; \theta)$  شدت اندازه‌گیری شده توسط آشکارساز می‌باشد. اگر  $I_d(t; \theta)$  ز نظر عدم قطعیت اندازه‌گیری قابل اندازه‌گیری و تشخیص باشد، انتظار می‌رود که بتوان برای بازسازی تصویر یک مقطع به کار رود زیرا توزیع ضریب تضعیف متناسب با توزیع مواد است.

در ادامه دو روش بکار برده شده در بازسازی تصاویر در این تحقیق به صورت دقیق‌تر توضیح داده خواهد شد.

### ۱-۲-۱- بک پروجکشن مستقیم

در هر زاویه، شدت تضعیف شده که اندازه‌گیری می‌شود را می‌توان به آسانی به مجموع ضرایب تضعیف پیکسل‌های مسیر آن پرتو نسبت داد، اگر چه سهم هر پیکسل مشخص نیست. ساده‌ترین فرض این است که هر پیکسل در طول مسیر سهم یکسانی دارد. از این رو ساده‌ترین شکل بک پروجکشن در پیکسل با مختصات  $(x, y)$  جمع تمام پروجکشن‌هایی است که از آن عبور می‌کند و به صورت زیر بیان می‌شود [۷].

شی مورد مطالعه می‌باشد. در مقطع‌نگاری عبوری معمولاً یک یا چند چشمه و آرایه‌ای از آشکارسازها در جهت دیگر برای به دست آوردن پروجکشن استفاده می‌شود. بر اساس هندسه سیستم و پروجکشن‌های به دست آمده می‌توان سطح مقطع شی مورد مطالعه را بازسازی نمود.

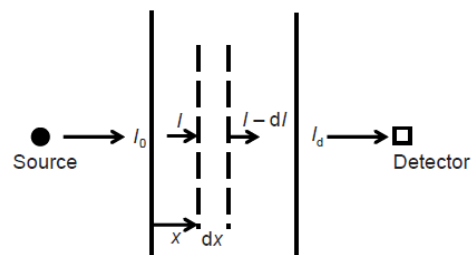
## ۲- روش کار

برای بازسازی تصویر دو شاخه وجود دارد: (۱) روش‌های تحلیلی و (۲) الگوریتم‌های تکرارشونده. اساس کار روش‌های تحلیلی استفاده از نظریه عکس رادون است که روش فیلتر بک پروجکشن از این نوع می‌باشد. الگوریتم‌های تحلیلی دارای یک فرآیند فیلتر کردن و بک پروجکشن می‌باشند در حالی که روش‌های تکرارشونده فرآیند پروجکشن و بک پروجکشن را تکرار می‌کنند [۵، ۷، ۸].

### ۱-۲-۲- روش تحلیلی

روش تحلیلی برای به دست آوردن یک رابطه ریاضی بین شدت پرتو عبوری از ماده و خواص ماده است، فرض کنید یک تیغه بی‌نهایت با ضخامت  $a$  بین یک باریکه تک جهته و تک انرژی با شدت  $I_0$  و آشکارساز قرار گرفته است که در شکل ۲ نشان داده شده است.  $I(x)$  شدت در مکان  $x$  برابر با تعداد پرتوهایی است که از سطح در واحد زمان عبور می‌کنند. اگر پراکندگی وجود نداشته باشد رابطه زیر برقرار است که در آن  $\mu$  ضریب تضعیف خطی می‌باشد [۷].

$$dI(x) = -\mu I(x) dx \quad (1)$$



شکل ۲- تغییرات شدت باریکه عبوری از یک تیغه به صورت شماتیک.

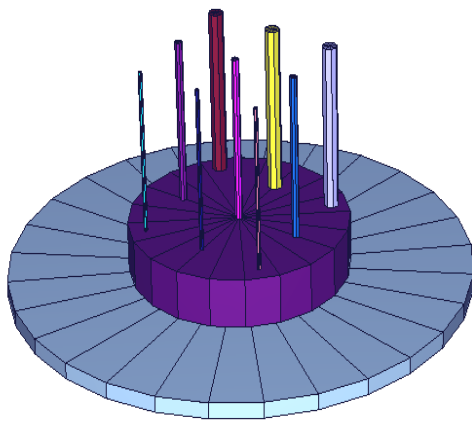
ضریب تضعیف یک خاصیت فیزیکی ماده است که به انرژی پرتو بستگی دارد، اما در عمل وابسته بودن به انرژی معمولاً نادیده گرفته می‌شود. با انتگرال‌گیری از معادله ۱ بر حسب  $x$  خواهیم داشت:

$$\mu_{DBP}(x, y) = \int_0^{\pi} p[t(x, y; \theta; \theta)] d\theta \quad (6)$$

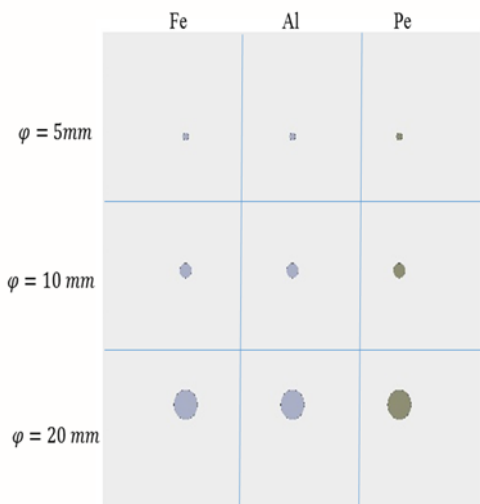
### ۳-مدل‌سازی

#### ۳-۱-مدل‌سازی فانتوم

برای این منظور از فانتومی استاندارد جهت آزمون‌های قدرت تباین و قدرت تفکیک سامانه کارگو استفاده شد.



الف



ب

شکل ۳- طرحی از نمونه مدل‌سازی شده (الف) نمایی از فانتوم در فضای مدل‌سازی (ب) جایگاه میله‌ها و ابعاد آن‌ها در فانتوم

در شرایط مختلف از تعاریف مختلفی برای تباین استفاده می‌شود. به طور مثال تباین درخشندگی مثال استفاده می‌شود، اما فرمول‌ها را می‌توان در سایر کمیت‌های فیزیکی نیز به کار برد. در بسیاری از موارد، تعاریف تباین یک نسبی از نوع را نشان می‌دهد:

(اختلاف درخشندگی)/(درخشندگی میانگین)

در زیر تعریف تباین آورده شده است:

#### ۲-۱-۲- روش تکرارشونده الگوریتم MLEM

امروزه با توجه به پیشرفت رایانه‌ها، بازسازی تصویر با استفاده از روش‌های تکرارشونده بیشتر مورد استفاده قرار می‌گیرد. در روش‌های تکرارشونده از حل معادلات خطی و کمینه کردن یک تابع هدف استفاده می‌شود. الگوریتم‌های زیادی برای کمینه کردن تابع هدف و حل معادلات خطی وجود دارد که محبوب‌ترین آن‌ها MLEM<sup>۴</sup> می‌باشد. هدف از این الگوریتم‌ها کاهش نویز تصویر بدون از دست دادن قدرت تفکیک مکانی سیستم می‌باشد.

روش‌های متفاوتی برای تولید یک تابع هدف وجود دارد. اگر از مدل نویز پواسون استفاده شود، یک تابع هدف خاص به دست می‌آید. با حداقل کردن تابع هدف به یک الگوریتم تکرارشونده به نام MLEM می‌رسیم که به صورت زیر تعریف خواهد شد [۳].

$$x_{\text{next}} = x_{\text{current}} \frac{\text{Backproject}\left\{\frac{\text{Measurement}}{\text{Project}(x_{\text{current}})}\right\}}{\text{Backproject}\{1\}} \quad (7)$$

که در آن {1} یک بردار با آرایه‌های یک می‌باشد. اندازه بردار برابر با اندازه بردار پروجکشن می‌باشد. در این الگوریتم از نسبت داده‌ها به جای اختلاف داده‌ها استفاده می‌شود. ویژگی مشخصه این الگوریتم غیر منفی بودن آن است. اگر تصویر اولیه  $x_0$  دارای پیکسل منفی نباشد، مقادیر تصویر هرگز منفی نخواهند شد. الگوریتم MLEM همچنین به اسم الگوریتم لوسی-ریچاردسون<sup>۵</sup> نیز نامیده می‌شود، زیرا ریچاردسون و لوسی این الگوریتم را در سال‌های ۱۹۷۲ تا ۱۹۷۴ برای بهبود کیفیت تصویر گسترش دادند.

بیان ریاضی الگوریتم MLEM به صورت زیر می‌باشد:

$$x_j^{\text{next}} = \frac{x_j^{\text{current}} \sum_i a_{ij} p_i}{\sum_i a_{ij} \sum_j a_{ij} x_j^{\text{current}}} \quad (8)$$

که در آن  $\sum_i a_{ij} \frac{p_i}{\sum_j a_{ij} x_j^{\text{current}}}$  یک پروجکشن اندازه‌گیری‌ها نسبت به پروجکشن داده‌های فعلی می‌باشد این الگوریتم نسبت پروجکشن‌های اندازه‌گیری شده به پروجکشن تصویر حدس زده شده را اندازه‌گیری می‌کند.  $\sum_i a_{ij}$  یک پروجکشن {1} می‌باشد.

<sup>4</sup> Maximum Likelihood Expectation Maximization

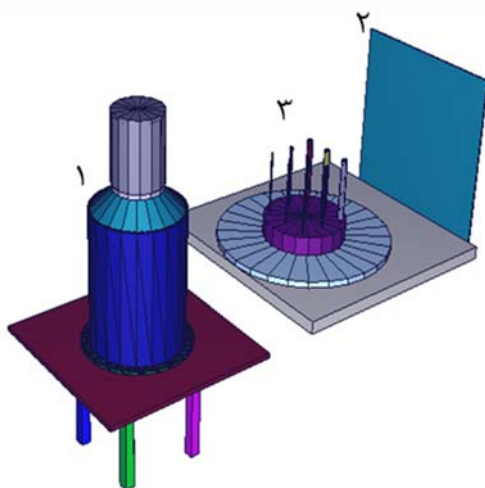
<sup>5</sup> Lucy-Richardson

طراحی راکتورهای شکافت، گداخت و همجوشی و آلودگی‌زدایی هستند [۳].

در شکل ۵ تصویری از مدل‌سازی بخش چشمه و محفظه نگهداری آن و همچنین بخش استقرار نمونه برای چرخش و ثبت پروجکشن‌های آن در سامانه آشکارسازی خطی نشان داده شده است. برای دستیابی به تصاویر از آرایه آشکارسازی کریستال CdWO<sub>4</sub> مدل‌سازی شد. در کار تجربی از یک آشکارساز ستونی استفاده گردیده است و در کار شبیه‌سازی برای دستیابی سریع‌تر به تصاویر از یک سیستم آشکارسازی پنل که ابعاد هر کدام از پیکسل‌های آن برابر با ابعاد آشکارساز دستگاه اصلی بود مدل‌سازی شد.

### ۳-۲- مدل‌سازی دستگاه تصویربرداری

مدل دستگاه تصویربرداری از بخش‌های اصلی چشمه پرتوزا، محل استقرار نمونه تحت اسکن و سامانه آشکارسازی تشکیل شده است.



شکل ۵- نمایی از دستگاه مدل‌سازی شده (۱) نگاه‌دارنده چشمه (۲) آشکارساز صفحه‌ای با قدرت تفکیک ۴,۶×۴,۶ میلی‌متر مربع (۳) فانتوم استاندارد

برای اجرای برنامه‌ها از کامپیوتری با ۱۶ هسته به‌طور موازی بهره‌برده شد. از آنجا که در کد MCNPX مسائل را به‌صورت استاتیک حل می‌کند لذا برای اسکن هدف نیاز است که برای هر زاویه یک کد مجزا نوشته و اجرا شود. در این قسمت از دستورات کارت مش تالی استفاده شد. برای رسم شکل‌ها از الگوریتم نوشته‌شده در نرم‌افزار MATLAB استفاده شد.

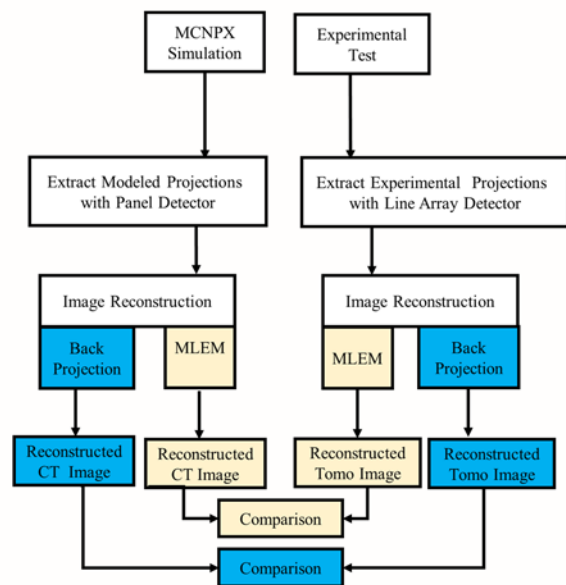
$$\frac{I - I_b}{I_b} \quad (9)$$

$I_b$  و  $I$  به ترتیب نمایانگر درخشندگی شکل و پس‌زمینه است. از این معیار به‌عنوان کسر و بر نیز یاد می‌شود، زیرا جمله‌ای است که در قانون و بر ثابت است.

یکی پارامتر مهم دیگر برای ارزیابی عملکرد اسکنرهای کارگو، اندازه‌گیری قدرت تفکیک مکانی تصویر است.

نمونه یکی نمونه استاندارد متشکل از میله‌هایی از جنس آهن، آلومینیوم و پلی‌اتیلن است که در شکل ۳ نشان داده شده است.

فاصله مرکز به مرکز هر کدام از میله در راستای افقی و عمودی از یکدیگر ۹۰ میلی‌متر در نظر گرفته شد و نیز قطر آن‌ها به ترتیب ۵، ۱۰ و ۲۰ میلی‌متر در نظر گرفته شد.

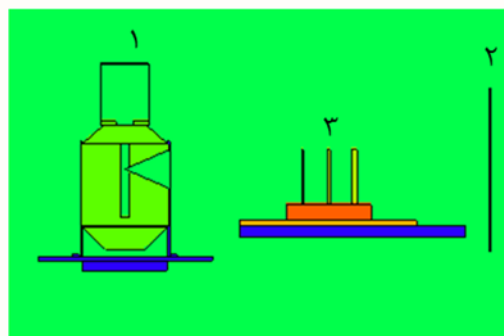
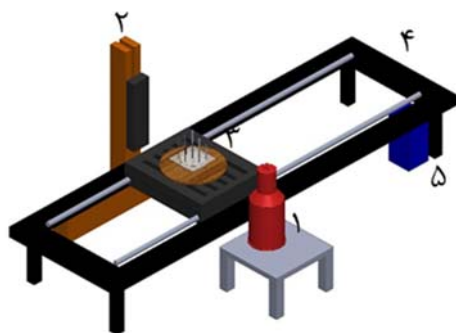


شکل ۴- الگوریتم استخراج پروجکشنها

یکی از کدهایی است که می‌توان از آن در ترابرد ذرات یون‌ساز استفاده نمود کد MCNPX است. این کد می‌تواند برای محاسبات مونت‌کارلویی ترابرد پرتوهای یون‌ساز مورد استفاده قرار گیرد. در این تحقیق با استفاده از این کد شبیه‌سازی مربوط سیستم آشکارسازی، کولیماتور و چشمه پرتوزا انجام شده است. از جمله موارد دیگر کاربرد این کد اکتشافات نفت، حفاظت در برابر اشعه و دزیمتری، رادیوگرافی، فیزیک پزشکی، طراحی و تحلیل آشکارسازها،



## ۴-۲- راه‌اندازی سیستم تصویربرداری



شکل ۶- نمای مقطعی از هندسه مدل‌سازی شده (۱) نگاه‌دارنده چشمه (۲) آشکارساز صفحه‌ای (۳) فانتوم استاندارد

## ۴- تجربی (ابزار تشکیل‌دهنده سیستم)

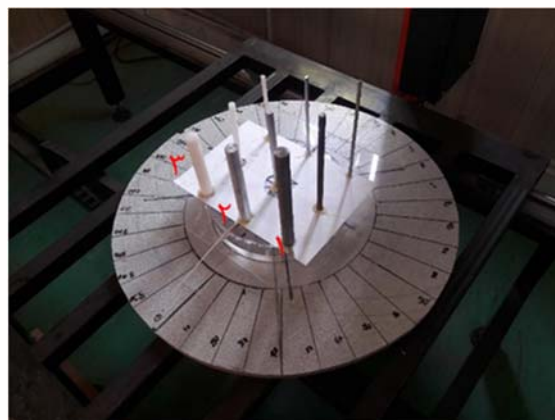
### ۴-۱- طراحی فانتوم

شکل ۸: شماتیک و تصویر از چیدمان تجربی هندسه آزمایش (۱) نگاه‌دارنده چشمه (۲) آشکارساز خطی (۳) نمونه (۴) ریل جهت اسکن خط به خط (نمونه ۵) کنترلر موتور

اجزای اصلی این سیستم به ترتیب عبارت‌اند از:

۱. آشکارساز سوسوزن  
سامانه آشکارسازی مورد استفاده کریستال سوسوزن  $CdWO_4$  و یک فوتودیود نوری متصل به آن تشکیل شده است. پس از تنظیمات اولیه و مستقر نمودن محموله با استفاده از بخش الکترومکانیکی بر روی ریل در راستای مورد نظر حرکت می‌کند و پس از عبور از فضای میان منبع تابش و بخش آشکارسازی از آن اطلاعات آن به صورت یک آرایه ماتریس در سیستم با استفاده از نرم‌افزار X-View ثبت و در ادامه برای انجام پردازش تصویر بر روی ماتریس‌های ثبت شده از برنامه MATLAB استفاده شد. نرم‌افزار X-View برای مدل‌های مختلف از آشکارسازهای شرکت DT قابل تنظیم است: تنظیمات خاص و پارامترهای راه‌اندازی اولیه سیستم ممکن است وابسته به مدل باشد. یکی از قابلیت‌های X-View، قابلیت توسعه نرم‌افزاری آن بسته به نیاز کاربر است. بدین معنی که کاربر پس از دریافت اطلاعات از واحد آشکارسازی می‌تواند با توجه به نوع کاربرد سیستم تصویر دلخواه را بدست آورد.

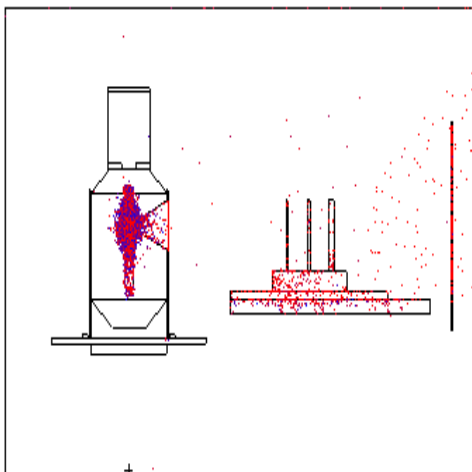
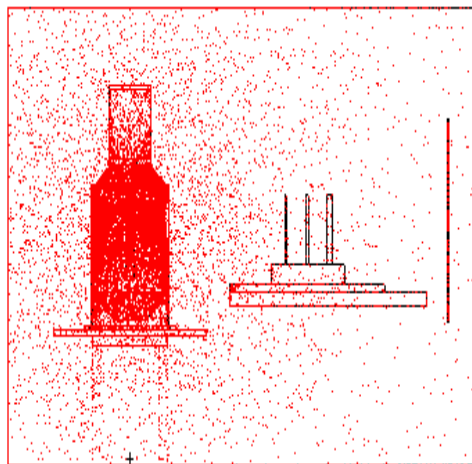
۲. سیستم جمع‌آوری داده و پردازش تصویر



شکل ۷- فانتوم ساخته شده برای آزمایش تجربی (۱) میله آهنی (۲) میله آلومینیومی (۳) میله پلی‌اتیلنی

جهت طراحی فانتوم از یک صفحه پلی‌اتیلنی به عنوان بستر استفاده شد. میله‌هایی به قطر ۵، ۱۰ و ۲۰ میلی‌متر به ارتفاع یکسان ۲۰ سانتیمتر از جنس آهن، آلومینیوم و پلی‌اتیلن برش داده شدند و به فاصله مرکزی ۹ سانتیمتر از یکدیگر بر روی صفحه پلی‌اتیلنی ثابت شدند. نمایی از فانتوم طراحی شده در شکل ۷ نشان داده شده است. برای چرخاندن نمونه در زوایای مختلف از یک صفحه دایره‌ای مدرج استفاده شد. به منظور چرخاندن فانتوم بر روی موقعیت تصویربرداری یک دیسک چرخان با استفاده از دو صفحه و بلبرینگ طراحی و ساخته شد و نمونه بر روی آن مستقر گردید. یک شاخص برای تنظیم نمونه در زوایای مورد نظر بر روی صفحه فانتوم قرار داد شد که کار تنظیم نمونه در زوایای مختلف آسان‌تر شود.

از چشمه را مشاهده نمود. چشمه و آشکارساز در فاصله ۱۱۰ سانتی‌متری از یکدیگر قرار گرفته‌اند و صفحه گردان در مرکز این فاصله قرار داده شده است. برای به دست آوردن تصویرهای پروجکشن، فانتوم با گام زاویه ۱۰ درجه چرخانده شد. ذرات از چشمه خارج می‌شوند و پس از برخورد به فانتوم تعدادی از آن‌ها پراکنده می‌شود و تعدادی از ذرات پس از عبور از جسم به آشکارساز می‌رسند و در آنجا ثبت می‌شوند. نحوه تابش و زاویه تابش چشمه زمانی که هیچ نوع ماده بر سر راه چشمه قرار نگرفته باشد و زمانی که مواد در سر راه چشمه باشد در شکل ۹ نشان داده شده است.



شکل ۹- سطح مقطع نشان‌دهنده نحوه تابش چشمه الف)، بدون حضور ماده در مسیر ذرات (از کنار ب) با حضور ماده در مسیر ذرات (از کنار)

برای داده‌برداری از کارت‌های جمع‌آوری داده استفاده خواهد شد. این کارت، سیگنال‌های خروجی سوسوزن را جمع‌آوری کرده، از نظر زمانی پردازش می‌کند و نویزهای احتمالی را حذف می‌نماید. در نهایت با اسکن کل جسم، اطلاعات لازم از کلیه نقاط آن جسم تهیه شده و نرم‌افزار پردازشی، تصویر نهایی را تولید می‌نماید. شدت پیکسل‌های این تصویر با تعداد فوتون‌های پس‌پراکنده‌ی آشکارشده در هر تابش پرتو سوزنی مرتبط خواهد بود.

برای مدل‌سازی سیستمی مرکب از چشمه رادیواکتیو گاماها و نیز سامانه آشکارسازی باید از کدی استفاده نمود که قابلیت تعریف هر دوی این موارد در آن میسر باشد به عبارت دیگر قابلیت مدل‌سازی سیستم با جزئیات و در ادامه استفاده از آن در قابل یک دستگاه تصویربرداری مبتنی بر پرتوی گامای عبوری و بخش آشکارسازی و ترابرد ذرات. یکی از کدهایی است که می‌توان از آن در ترابرد ذرات یون‌ساز استفاده نمود کد MCNPX است. این کد می‌تواند برای محاسبات مونت کارلویی ترابرد پرتوهای یون‌ساز مورد استفاده قرار می‌گیرد. از جمله موارد دیگر کاربرد این کد در اکتشافات نفت، حفاظت در برابر اشعه و دزیمتری، رادیوگرافی، فیزیک پزشکی، طراحی و تحلیل آشکارسازها، طراحی راکتورهای شکافت، گداخت و همجوشی و آلودگی‌زدایی نام برد [۹].

## ۵- نتایج

نتایج مدل‌سازی هندسه اصلی دستگاه تصویربرداری کارگو مبتنی بر پرتوی گامای عبوری، طراحی حفاظ گاما، طراحی فانتوم استاندارد و در نهایت بازسازی داده‌های ثبت شده از اسکن فانتوم و بازسازی و دریافت تصویر سطح مقطع جسم به روش مدل‌سازی و روش تجربی در ادامه مورد بحث قرار گرفته است.

### ۵-۱- نتایج تصویربرداری

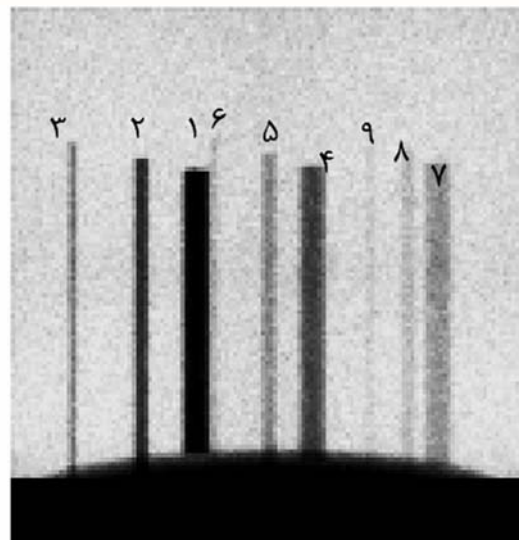
#### ۵-۱-۱- طراحی حفاظ

در شکل ۹ می‌توان نمای سطح مقطع از نحوه خروج ذرات

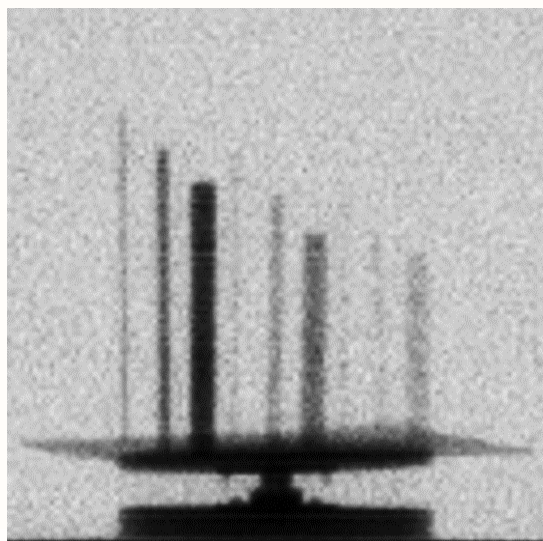


### ۲-۱-۵- تصویر فانتوم خروجی سیستم مدل‌سازی شده

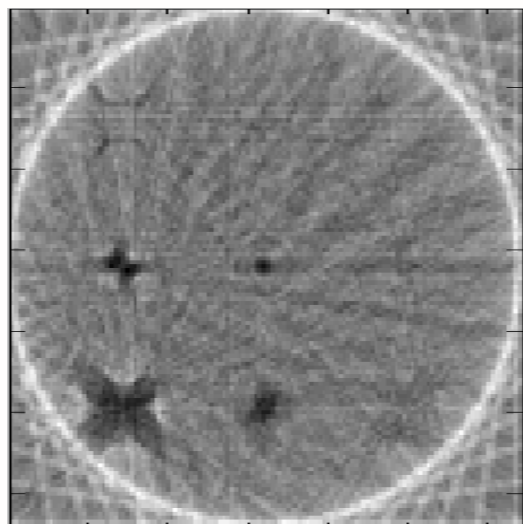
تصویر ثبت شده از فانتوم نتیجه مدل‌سازی شکل ۱۰ نشان داده شده است.



شکل ۱۰- تصویر شبیه‌سازی شده از فانتوم در زاویه ۳۰ درجه، ۱ تا ۳ میله‌های آهنی، ۴-۶ میله آلومینیومی، ۷-۹ میله پلی‌اتیلنی



شکل ۱۱- تصویر واقعی از فانتوم در زاویه ۳۰ درجه



شکل ۱۲- تصویر از سطح مقطع فانتوم نتیجه مدل‌سازی و بازسازی BackProjection

### ۵-۱-۵- مدل‌سازی سیستم و بازسازی تصویر به روش MLEM

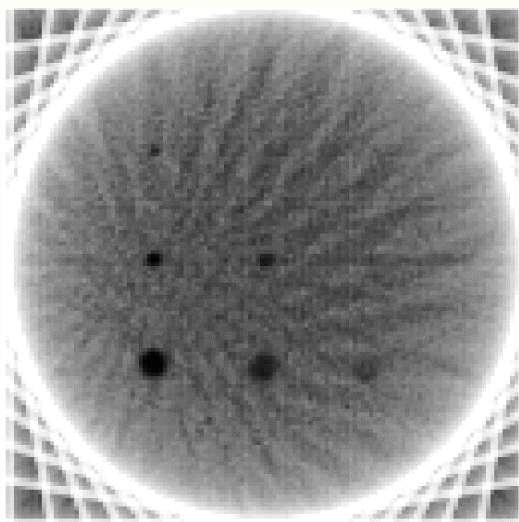
در شکل ۱۳ تصویری از سطح مقطع بازسازی شده از جسم مدل‌سازی شده به روش MLEM نشان داده شده است. در این شکل تصویر مقطع میله‌های آهنی و آلومینیومی با قطرهای ۱۰ و ۲۰ میلی‌متر قابل رؤیت است اما ۵ میله دیگر مشاهده نمی‌شوند. جایگاه میله‌های متناظر در فانتوم در شکل ۳ ب قابل مشاهده است.

### ۳-۱-۵- تصویر فانتوم خروجی سیستم تجربی

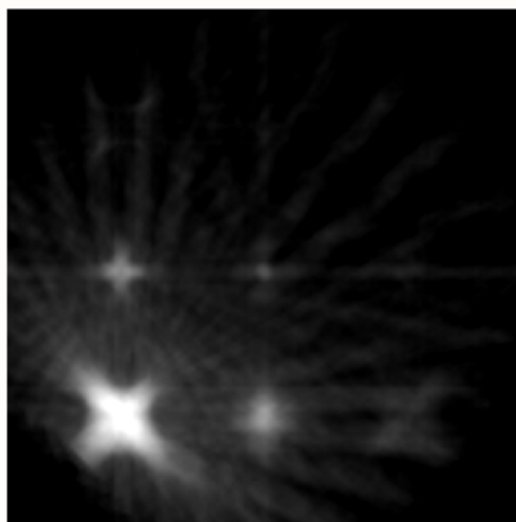
برای به دست آوردن تصویر در هر زاویه، از آشکارسازهای آرایه خطی با تعداد پیکسل ۱۲۸ در ۱ استفاده شده است. فانتوم با استفاده از حرکت خطی توسط ریل از روبه‌رو آشکارساز عبور داده شد و تصویر نهایی از کنار هم قرار گرفتن این خطوط تشکیل می‌شود و ابعاد تصویر نهایی ۱۲۸ در ۱۲۸ پیکسل ثبت می‌گردد. تصویر ثبت شده از فانتوم نتیجه تجربی که از طریق جایجا نمودن جسم بر روی ریل در یک زاویه مشخص ثبت شده است در شکل ۱۱ نشان داده شده است.

### ۴-۱-۵- مدل‌سازی سیستم و بازسازی تصویر به روش BackProjection

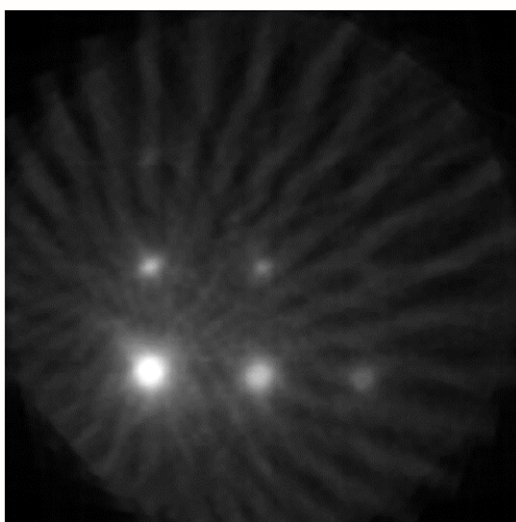
در شکل ۱۲ تصویری از سطح مقطع بازسازی شده از جسم مدل‌سازی شده به روش BackProjection نشان داده شده است. در این شکل تصویر مقطع میله‌های آهنی و آلومینیومی با قطرهای ۱۰ و ۲۰ میلی‌متر قابل رؤیت است اما ۵ میله دیگر مشاهده نمی‌شوند. جایگاه میله‌های متناظر در فانتوم در شکل ۳ ب قابل مشاهده است.



شکل ۱۴- تصویر از سطح مقطع فانتوم نتیجه تجربی و بازسازی  
BackProjection



شکل ۱۳- تصویر از سطح مقطع فانتوم نتیجه مدل‌سازی و بازسازی  
MLEM



شکل ۱۵- تصویر از سطح مقطع فانتوم نتیجه تجربی و بازسازی  
MLEM

#### ۶- نتیجه‌گیری

مقطع‌نگاری کامپیوتری از پرتوهای یون‌ساز با عمق نفوذ بالا در مواد برای تولید نمایش‌های داخلی و خارجی سه‌بعدی یک جسم اسکن شده استفاده می‌کند. مقطع‌نگاری صنعتی در بسیاری از زمینه‌های صنعت برای بازرسی داخلی قطعات مورد استفاده قرار گرفته است.

در این مطالعه امکان بهره‌گیری از یک دستگاه کارگو اسکنر متشکل از یک چشمه رادیوایزوتوپی گاما و آشکارساز آرایه ای خطی، به روش مدل‌سازی و تجربی مورد بررسی قرار گرفت. در فاز مدل‌سازی از کد MCNPX برای شبیه‌سازی

#### ۶-۱-۵- داده‌برداری تجربی و بازسازی تصویر به

##### روش BackProjection

در شکل ۱۴ تصویری از سطح مقطع بازسازی‌شده از جسم تجربی به روش BackProjection نشان داده شده است. در این شکل تصویر مقطع میله‌های آهنی و آلومینیومی و پلی‌اتیلنی با قطرهای ۵، ۱۰ و ۲۰ میلی‌متر، ۱۰ و ۲۰ میلی‌متر و پلی‌اتیلنی ۲۰ میلی‌متر با تباین مناسب قابل رؤیت است اما ۳ میله دیگر مشاهده نمی‌شوند. جایگاه میله‌های متناظر در فانتوم در شکل ۳ ب قابل مشاهده است.

#### ۶-۱-۷- داده‌برداری تجربی و بازسازی تصویر به

##### روش MLEM

در شکل ۱۵ تصویری از سطح مقطع بازسازی‌شده از جسم تجربی به روش MLEM نشان داده شده است. در این شکل تصویر مقطع میله‌های آهنی و آلومینیومی و پلی‌اتیلنی با قطرهای ۵، ۱۰ و ۲۰ میلی‌متر، ۱۰ و ۲۰ میلی‌متر و پلی‌اتیلنی ۲۰ میلی‌متر قابل رؤیت است اما ۳ میله دیگر به دلیل اندازه ضخامت و چگالی کمتر قابل مشاهده نمی‌باشند. با توجه به نتایج حاصله کمترین قدرت تشخیص برای آهن، آلومینیوم و پلی‌اتیلن به ترتیب ۵، ۱۰ و ۲۰ میلی‌متر می‌باشد. جایگاه میله‌های متناظر در فانتوم در شکل ۳ ب پایین قابل مشاهده است.

تصاویر سطح مقطع مدل‌سازی شده برای میله آهنی با قطر ۲۰ میلی‌متر مشخص است (شکل ۱۳ را ببینید). در نهایت نیز تصویر تجربی از سطح مقطع فانتوم که به روش BackProjection بازسازی شده است نسبت به سایر تصاویر مدل‌سازی و تجربی از نظر قدرت تفکیکی و تباین و تباین سطح مقطع میله‌های موجود در فانتوم بهتر بود.

#### ۵- منابع

- [1] C. Cowling, *Global review of radiography. Radiography*, Radiography, Vol 19, No. 2, pp.90-91, 2013
- [2] S.L. Brooks, *Computed tomography. Dental Clinics of North America*, Vol 37, No. 4, pp.575-590, 1993.
- [3] F.F. Hopkins, I.L. Morgan, H.D. Ellinger, R.V. Klinksiek, G.A. Meyer and J.N. Thompson, *Industrial tomography applications*, IEEE Transactions on Nuclear Science, Vol 28, No. 2, pp.1717-1720, 1981.
- [4] J. Lambert, A. R. Chambers, I. Sinclair, S.M. Spearing, *3D damage characterisation and the role of voids in the fatigue of wind turbine blade materials*, Composites Science and Technology. Vol 72 No. 2, pp.337-343, 2012.
- [5] G. L. Zeng, *Medical image reconstruction: a conceptual tutorial*, Springer, New York, 2010.
- [6] L. M. Evans, L. Margetts, V. Casalegno, L.M. Lever, J. Bushell, T. Lowe, A. Wallwork, P. Young, A. Lindemann. (2015-05-28). *Transient thermal finite element analysis of CFC-Cu ITER monoblock using X-ray tomography data*. Fusion Engineering and Design. Vol 100, PP. 100-111.
- [7] M. Wang, *Industrial tomography: systems and applications*, 1<sup>th</sup> ed. Elsevier, 2015.
- [8] D. J., Bull.; L. Helfen, I. Sinclair, S.M. Spearing, T. Baumbach, *A comparison of multi-scale 3D X-ray tomographic inspection techniques for assessing carbon fibre composite impact damage*, Composites Science and Technology. Vol 75, PP. 55-61, 2013.
- [9] S.L. Waters, *MCNPX user's manual*, Los Alamos National Laboratory, 2002.

سیستم واقعی کارگو اسکنر استفاده شد. برای دریافت تصویر از جسم یک آشکارساز صفحه‌ای<sup>۶</sup> که ابعاد پیکسل‌های آن مشابه به نمونه آشکارساز آرایه‌ای خطی واقعی بود مدل‌سازی شد. در ادامه به منظور تهیه تصاویر مقطع‌نگاری ابتدا یک فانتوم استاندارد با بهره‌گیری از میله‌های آهنی، آلومینیومی و پلی‌اتیلنی با قطرهای ۵، ۱۰ و ۲۰ میلی‌متر ساخته شد. در گام بعدی فانتوم تجربی با کد MCNPX شبیه‌سازی شد. در فاز تجربی نمونه ساخته شده بر روی یک صفحه مدرج گردان قرار داده شد. هدف استفاده از صفحه گردان ثبت تصاویر پروجکشن از جسم در زوایای چرخش متفاوت بود. در فاز مدل‌سازی جسم در زوایای مذکور شبیه‌سازی شد و در ادامه تصاویر نتایج شبیه‌سازی ثبت و ذخیره شد. برای دستیابی به تصاویر سطح مقطع جسم از دو روش بازسازی BackProjection و MLEM استفاده شد. نتایج مدل‌سازی و تجربی با یکدیگر مقایسه شدند که هم در مدل‌سازی و هم در کار تجربی تشخیص فلزهای آهن و آلومینیوم با قطرهای ۱۰ و ۲۰ میلی‌متر میسر بود و علاوه بر این در تصاویر تجربی امکان تشخیص میله پلی‌اتیلنی و آهنی به ترتیب با قطرهای ۲۰ و ۵ میلی‌متر نیز وجود داشت. در مورد کیفیت تصاویر بازسازی شده می‌توان بیان نمود که با کوچکتر نمودن گام چرخش جسم می‌توان تصاویر سطح مقطع جسم را با کیفیت بالاتر به دست آورد. از آنجا که در حالت تجربی از آشکارساز خطی استفاده شده است از این‌رو تصویری که در نهایت با اسکنر جسم و اتصال این خطوط به هم تشکیل می‌شود دارای واگرایی کمتر خواهد شد؛ و چون در سیستم شبیه‌سازی شده از یک آشکارساز صفحه‌ای استفاده شده است، تصویر سطح مقطع مدل در مقایسه با تصویر سطح مقطع تجربی دستخوش واگرایی بیشتری می‌شود، این پدیده به وضوح در

<sup>6</sup> Panel Detector