

## مدلسازی دستگاه تصویربرداری پس پراکنشی ایکس با استفاده از کد MCNPX

مجتبی عسکری<sup>۱\*</sup>، امیرمحمد بیگزاده<sup>۲</sup>، علی طاهری<sup>۳</sup>

چکیده	اطلاعات مقاله
<p>پرتوهای ایکس کاربردهای گسترده‌ای در زمینه‌های پزشکی، صنعت، تحقیقات علمی، مسائل امنیتی و غیره دارند. استفاده از پرتوهای ایکس و گاما به منظور بازرسی محموله‌های گمرکی، خودروها و همچنین اشخاص قدمتی حدوداً ۵۰ ساله دارد و امروزه بطور چشمگیری در سراسر دنیا به منظور جلوگیری از حمل سلاح و مواد مخدر مورد استفاده قرار می‌گیرند. بطور کلی، تا به امروز سیستم‌های تصویربرداری عبوری در مقایسه با تصویربرداری پس‌پراکنشی بیشتر توسعه یافته‌اند. این در حالیست که سیستم‌های تصویربرداری پس‌پراکنشی به دلیل مزایای ذاتی خود دارای کاربردهای خاص و منحصر به فردی می‌باشند. همچنین به دلیل اینکه کل سیستم تصویربرداری در یک سوی جسم قرار دارد، امکان تصویربرداری سیار برای این نوع مدالیت‌ها امکانپذیرتر است. در این تحقیق، با بهره‌گیری از روش مونت کارلو با کد MCNPX یک دستگاه تصویربرداری پس پراکنشی ایکس مدلسازی شد. در ابتدا یک لامپ مولد ایکس با ولتاژ ۱۶۰ کیلوولت مدلسازی و در ادامه خروجی لامپ با خروجی لامپهای تجاری موجود مورد بررسی قرار گرفت. در گام بعدی هندسه دستگاه، سیستم آشکارسازی و جسم تحت اسکن طراحی و مدل شد. نتایج نشان داد امکان تشخیص حبابهایی با قطر ۵، ۱۰ و ۲۰ میلی‌متر برای یک جسم در فاصله ۵ سانتیمتری میسر است.</p>	<p>نوع مقاله: پژوهشی دریافت مقاله: ۱۴۰۰/۱۱/۲۰ بازنگری مقاله: ۱۴۰۱/۰۳/۰۸ پذیرش مقاله: ۱۴۰۱/۰۵/۲۹</p> <p><b>واژگان کلیدی:</b> دستگاه تصویربرداری پس پراکنشی ایکس، کد MCNPX، تصویربرداری صنعتی، آزمون غیرمخرب.</p>

### ۱-مقدمه

می‌شوند. محدوده متوسط با انرژی فوتون چند کیلوالکترون ولت، اغلب به عنوان اشعه ایکس نرم<sup>۲</sup> شناخته می‌شود. با توجه به قابلیت نفوذ، اشعه ایکس سخت به طور گسترده‌ای برای تصویربرداری از داخل اشیاء و تصویربرداری صنعتی در پرتونگاری<sup>۳</sup> پزشکی و سیستم‌های بازرسی-امنیتی فرودگاه استفاده می‌شود[۳].

استفاده از پرتوهای ایکس و گاما در قالب سیستم‌های اسکن چمدانی و ماشینی به منظور بازرسی محموله‌های گمرکی، خودروها و همچنین اشخاص قدمتی حدوداً ۵۰ ساله دارد[۴]. امروزه بطور چشمگیری در سراسر دنیا به منظور

اشعه ایکس شکل نافذ تابش الکترومغناطیسی پراکنشی است. طول موج اشعه ایکس کوتاه تر از اشعه ماوراء بنفش و معمولاً بلندتر از اشعه گاما است. در بسیاری از زبان‌ها، تابش ایکس به عنوان تابش رونتگن، به نام دانشمند آلمانی ویلهلم کنراد رونتگن، که آن را در ۸ نوامبر ۱۸۹۵ کشف کرد، نامیده می‌شود[۲و۱]. پرتوهای ایکس با انرژی فوتون‌های زیاد یعنی بالای ۵ تا ۱۰ کیلو الکترون ولت پرتوهای ایکس سخت نامیده می‌شوند، و آن دسته از پرتوهایی که انرژی کمتر دارند، اشعه ایکس نرم نامیده

۳. دانشیار، پژوهشکده کاربرد پرتوها، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی

\* پست الکترونیک نویسنده مسئول: moasgari@aeoi.org.ir

۱. استادیار، پژوهشکده کاربرد پرتوها، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان

انرژی اتمی

۲. استادیار، پژوهشکده کاربرد پرتوها، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان

انرژی اتمی

<sup>2</sup> tender

<sup>3</sup> radiography

در سیستم‌های تصویربرداری پس پراکنشی عموماً از لامپ پرتو ایکس به عنوان چشمه استفاده می‌شود که به همراه سیستم آشکارسازی در یک سوی خودرو، کامیون و یا انسان قرار می‌گیرد. لامپ پرتو ایکس مورد استفاده معمولاً از نوع صنعتی بوده تا امکان تولید شار فوتونی بالا را فراهم آورد. کیفیت تصویر در سیستم‌های تصویربرداری پس پراکنشی به چندین عامل مهم وابسته است که عبارتند از: (۱) اندازه نقطه کانونی<sup>۳</sup> لامپ، (۲) شار لامپ پرتو ایکس، (۳) نوع آشکارساز، (۴) ساختار هندسی مرتبط با تولید پرتوسوزنی<sup>۴</sup> برای اسکن سطح جسم که اصطلاحاً چرخ برشگر<sup>۵</sup> نامیده می‌شود و (۵) نحوه جمع‌آوری و پردازش داده‌ها. همچنین برای اسکن سریع جسم، نیاز است تا مجموعه (تولید پرتو سوزنی و آشکارسازها) از سرعت نسبتاً بالایی برخوردار باشند. به دلیل اینکه احتمال وقوع پدیده پراکنشی کامپتون در مواد با عدد اتمی ( $Z$ ) پایین بیشتر است، اینگونه اسکنرها برای مقاصد کشف قاچاق مواد ارگانیک، داروها، سلاح‌ها و انسان‌ها بسیار مناسب هستند.

سیستم‌های تصویربرداری پس پراکنشی دارای انواع مختلف چه در نحوه تولید میدان پرتویی و چه در نحوه آشکارسازی می‌باشند. میدان پرتویی را می‌توان به صورت پرتو سوزنی و همچنین پرتو مخروطی<sup>۶</sup> طراحی کرد [۷]. همچنین آشکارساز سیستم می‌تواند بسته به نوع طراحی اسکنر، از نوع یکپارچه و یا پیکسل‌بندی شده انتخاب گردند که هر کدام دارای مزایا و معایب مربوط به خود می‌باشد. اما استفاده از پرتوسوزنی و آشکارساز یکپارچه به دلیل سادگی در پیاده سازی در صنعت بیشتر مورد استقبال قرار گرفته است.

اجزای اصلی این سیستم به ترتیب عبارتند از:

#### ۱. لامپ پرتو ایکس

لامپ، تولید میدان پرتویی را برعهده دارد. اساس عملکرد آن به این صورت است که الکترون‌ها که به واسطه اختلاف ولتاژ دو سر لامپ شتابدار شده‌اند از کاتد (فیلامان) به سمت آند (معمولاً تنگستن) حرکت می‌کنند. به واسطه برخورد این الکترون‌ها با اتم‌های ماده آند، پرتوهایی تابش ترمزی (برمزاشرالانگ) و همچنین پرتوهای ایکس مشخصه<sup>۷</sup> تولید می‌شوند.

جلوگیری از حمل سلاح و قاچاق مورد استفاده قرار گرفته‌اند [۵]. بطور کلی، تا به امروز سیستم‌های تصویربرداری عبوری<sup>۱</sup> در مقایسه با تصویربرداری پس پراکنشی<sup>۲</sup> بیشتر توسعه یافته‌اند. این در حالیست که سیستم‌های تصویربرداری پس پراکنشی به دلیل مزایای ذاتی خود دارای کاربردهای خاص و منحصر به فردی می‌باشند [۶]. همچنین به دلیل اینکه کل سیستم تصویربرداری در یکسوی جسم قرار دارد، امکان تصویربرداری سیار با آن امکانپذیرتر است.

در جدول ۱ مقایسه ای بین دو حالت تصویربرداری عبوری و تصویربرداری پس پراکنشی انجام شده است.

جدول ۱: مقایسه تصویربرداری پس پراکنشی و عبوری

روش تصویربرداری	پس پراکنشی	عبوری
دسترسی	یک طرف	دو طرف
محدوده انرژی	$< 300 \text{ keV}$	3-9 MeV
نوع آشکارساز	آرایه ای و حجمی	آرایه ای
نوع تصویر دریافتی	سطحی	عمقی
قابلیت توموگرافی	خیر	بله
عمق نفوذ	چند سانتی متر	چند متر
کاربردها	امنیتی، صنعتی	امنیتی، صنعتی
قیمت	گران	بسیار گران
نوع چشمه	$X, \gamma$	$X, \gamma$
توانایی اسکن اجسام متحرک	بله	بله

مزایای اصلی سیستم‌های تصویربرداری پس پراکنشی جهت بازرسی خودروها و کامیون‌ها عبارتند از:

- ۱- قیمت به مراتب کمتر در مقایسه با سیستم‌های تصویربرداری عبوری (به دلیل جایگزینی شتاب‌دهنده خطی با لامپ پرتو ایکس)
- ۲- توانایی تصویربرداری یک طرفه و در حال حرکت (سیار) از خودروها و کامیون‌ها

<sup>5</sup> Chopper wheel

<sup>6</sup> Fan-Beam

<sup>7</sup> Characteristics X-Rays

<sup>1</sup> Transmission Imaging

<sup>2</sup> Backscatter Imaging

<sup>3</sup> Focal Spot

<sup>4</sup> Pencil-Beam

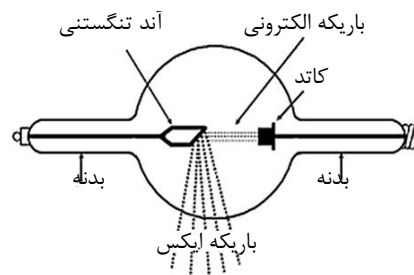
### ۳. آشکارساز سوسوزن

هنگام فرود پرتو ایکس به یک جسم، سه پدیده امکان وقوع دارند: (۱) جذب فوتوالکتریک، (۲) پراکندگی کامپتون و (۳) تولید زوج. لازم به ذکر است که در انرژی‌های کاری اسکنرهای پس‌پراکندگی، امکان وقوع تولید زوج وجود ندارد. اینگونه اسکنرها تنها اقدام به آشکارسازی فوتون‌های ایکس پس‌پراکنده‌ای را دارند که از جسم عبور کرده و توسط آشکارساز ثبت می‌شوند. تعداد فوتون‌های پس‌پراکنده، به عدد اتمی جسم، چگالی جسم و همچنین انرژی پرتو سوزنی فرودی وابسته است و با کاهش عدد اتمی و چگالی جسم، این تعداد افزایش می‌یابد. سوسوزن‌ها نوعی از آشکارسازها هستند که با جذب فوتون ایکس، تحریک شده و در آن‌ها الکترون‌ها به ترازهای انرژی بالاتر می‌روند. بازگشت الکترون‌ها به تراز قبلی (کم انرژی‌تر) همراه با تولید نور مرئی خواهد بود. تعداد فوتون‌های نور مرئی با انرژی فوتون آشکار شده و راندمان آشکارساز مرتبط است. در ادامه، با جمع‌آوری نور مرئی تولیدی و سپس تبدیل آن به سیگنال تقویت شده الکتریکی توسط یک لامپ تکثیرکننده فوتونی (PMT)، سیگنال نهایی آشکارساز شکل می‌گیرد. با توجه به اینکه در اسکنر پیشنهادی نیاز است تا تصویربرداری با سرعت بالا انجام شود، بایستی از سوسوزن‌ها و PMT‌های سریع استفاده نمود. همچنین، امروزه استفاده از سوسوزن‌های پلاستیکی برای تصویربرداری‌های صنعتی رواج بیشتری یافته است [۱۰].

### ۴. سیستم جمع‌آوری داده و پردازش تصویر

برای داده برداری 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 نرم افزار پردازشی، تصویر نهایی را تولید می‌نماید. شدت پیکسل‌های این تصویر با تعداد فوتون‌های پس‌پراکنده‌ی آشکار شده در هر تابش پرتو سوزنی مرتبط خواهد بود.

برای مدلسازی سیستمی مرکب از لامپ مولد ایکس و نیز سامانه آشکارسازی باید از کدی استفاده نمود که قابلیت تعریف هر دوی این موارد در آن میسر باشد. برای شبیه سازی از کد مونت کارلو MCNPX استفاده شده است. روش مونت کارلو یک الگوریتم محاسباتی که از نمونه گیری



شکل ۱: طرح کلی یک لامپ مولد پرتوی ایکس

شکل (۱)، طرح کلی از یک لامپ پرتو ایکس به همراه متعلقات آن را به تصویر کشیده است. خروجی لامپ، طیفی از فوتون‌ها با انرژی بیشینه برابر با اختلاف ولتاژ دو سر لامپ هستند. از جمله ویژگی‌های مهم لامپ‌ها، شار فوتونی لامپ و همچنین اندازه نقطه کانونی آن می‌باشد. لامپ‌های مورد استفاده در این نوع سیستم‌های تصویربرداری در محدوده ۱۰۰ kVp تا ۳۰۰ kVp استفاده می‌شوند. همچنین جریان لامپ در مرتبه ۳ mA تا ۱۰ mA می‌باشد [۸].

### ۲. چرخ برشگر

همانطور که اشاره شد در سیستم تصویربرداری پیشنهادی از پرتو ایکس سوزنی استفاده می‌شود. میدان فوتونی خروجی لامپ معمولاً مخروطی شکل است و بنابراین نیاز است تا به طریقی از این میدان به پرتو سوزنی رسید. همچنین نیاز است تا این پرتو سوزنی بطور عمودی کل ارتفاع جسم را اسکن نماید.



شکل ۲: طرح کلی یک چرخ برشگر و اثر آن بر پرتوی

برای رسیدن به این مقصود باید از چرخ برشگر از جنس استیل یا سرب استفاده کرد. وظیفه چرخ برشگر همسوسازی میدان تابشی خروجی لامپ به منظور پرتو سوزنی جهت اسکن جسم است. همچنین به منظور اسکن عمودی جسم، نیاز است تا چرخ برشگر حول محور مرکزی خود بچرخد تا پرتو سوزنی را به نقاط مختلف جسم بتابداند. سرعت نوعی چرخ برشگر در محدوده ۵۰ rpm تا چند هزار rpm می‌باشد [۹].

در ۳۰ شکل مدل شد. در گام بعدی اسکن یک هدف مفروض دارای نقص، دستیابی پروفایل تغییرات شمارش ثبت شده بر روی آشکارسازها برای یک هدف بلند دارای نقصهای متعدد مورد بررسی قرار گرفت. برای اجرای برنامه ها از کامپیوتری با ۱۶ هسته به طور موازی بهره برده شد.

## ۲-۱- مدلسازی بدنه سیستم پس پراکنشی ایکس

ابتدا طرح اولیه با نرم افزار کشیده شد و در گام بعدی با استفاده از کد مونت کارلوی MCNPX شبیه سازی انجام شد. دستگاه تصویربرداری پس پراکنشی متشکل از بخش های چشمه پرتوزا، چرخ برشگر با مسیرهای عبور پرتو برای ایجاد باریکه یکسو جهت اسکن نمونه، بخش های مربوط به حفاظ پرتوی از جنس استیل و در نهایت دو عدد آشکارساز سوسوزن پلاستیکی با نام تجاری پلی وینیل تولوئن است. آشکارسازها در دو طرف چرخ برشگر مستقر می شوند و به طور همزمان پرتوهای پس پراکنشی که پس از برخورد باریکه یکسو از جسم تحت اسکن به سمت آشکارسازها پراکنده می شود را ثبت می کنند. در حالت کلی می توان بیان نمود که کد دارای چهار بخش اصلی است (۱) بدنه اصلی دستگاه از جنس استیل و سرب (ب) چشمه مولد پرتوی ایکس (ج) آشکارسازها (د) هدف تحت اسکن. از آنجا که در کد MCNPX مسائل را به صورت استاتیک حل می کند لذا برای اسکن هدف نیاز است که برای هر زاویه یک کد مجزا نوشته و اجرا شود. طرز کار کلی دستگاه به این صورت است که ابتدا باریکه از تیوب ایکس با زاویه تنظیم شده خارج می گردد. برای این منظور در مدلسازی ابتدا یک چشمه مخروطی تعریف شد و در ادامه با استفاده از دو قطعه استیل، مقطع باریکه خروجی به صورت شکل تقریباً بیضی مدل شد. پس از تنظیم چشمه، ذرات خروجی با برخورد به چرخ برشگر و عبور از مسیرهای تعبیه شده بر روی آن به صورت باریکه در می آیند. قطر مسیرهای مستقر بر روی چرخ برشگر ۲ میلی متر در نظر گرفته شد.

## ۲-۲- مدلسازی لامپ مولد ایکس

همانگونه که در شکل (۳) نشان داده شده است، تیوب ایکس از محفظه خلأ، آند تنگستنی و کاتد گسیلنده باریکه الکترونی تشکیل شده است. برای تعریف باریکه الکترونی یک چشمه الکترونی یکسو تعریف شد. باریکه های الکترونی پس از عبور از خلأ با فشار  $10^{-6}$  تور به سطح آند یا ماده هدف که از جنس تنگستن مستقر بر روی قطعه مسی است

تصادفی برای محاسبه نتایج استفاده می کند. روش های مونت کارلو معمولاً برای شبیه سازی سیستم های فیزیکی، ریاضیاتی و اقتصادی نظیر شبیه سازی و بررسی آماری پاسخ دینامیکی پل بر اثر عبور خودرو با خصوصیات و کلاس بندی اتفاقی در شرایط مختلف سطح جاده [۱۱]، تحلیل تأثیر نیروگاه های بادی بر قابلیت تبادل شبکه های انتقال در سیستم قدرت [۱۲] و ارزیابی امنیت استاتیک سیستم قدرت در حضور عدم قطعیت با استفاده از روش تخمین نقطه ای [۱۳] استفاده می شوند.

کد MCNPX می تواند برای محاسبات مونت کارلویی ترابرد پرتوهای یونساز مورد استفاده قرار می گیرد. 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 آلودگی زدایی نام برد [۱۴]. در این مطالعه قدم به قدم امکان سنجی طراحی اجزای یک دستگاه تصویربرداری پس پراکنشی ایکس با استفاده از این کد مورد بررسی قرار گرفته است و نتایج آن برای بررسی عیوب ایجاد شده در داخل یک هدف فلزی ارائه شده است.

## ۲-۲- مدلسازی سیستم پس پراکنشی ایکس

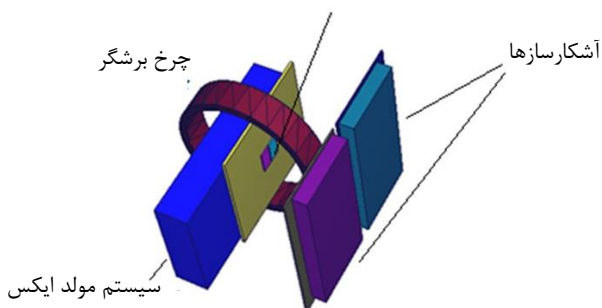
بخش مدلسازی از چندین قسمت تشکیل شده است. ابتدا بدنه اصلی دستگاه با نرم افزار سالید ورک طراحی و طرح نهایی با کد مونت کارلوی MCNPX شبیه سازی شد. اجزای اصلی دستگاه بخش بدنه فلزی، چرخ برشگر، آشکارسازها هستند.

در ادامه لامپ اشعه ایکس مشابه با نمونه های تجاری موجود طراحی و در ادامه با کد مونت کارلوی MCNPX شبیه سازی گردید و طیف خروجی آن محاسبه شد. طیف خروجی با طیف خروجی لامپ های واقعی مقایسه و پس از اطمینان از صحت محاسبات، طیف حاصل برای استفاده در بخش چشمه تابش دستگاه تصویربرداری پس پراکنشی ذخیره شد. این طیف در طراحی بخش چشمه دستگاه استفاده گردید. در ادامه طراحی چشمه مولد از قبیل اثر اندازه قطر روزنه خروج باریکه یا همان مسیر ایجاد شده بر روی چرخ برشگر، بر روی واگرایی باریکه در فواصل مختلف پس از خروج از روزنه، کاهش شار باریکه در فواصل مختلف مورد بررسی قرار گرفت. در ادامه در طراحی چشمه دستگاه سیستم پس پراکنشی ایکس، چشمه به صورت مخروطی با سطح مقطع بیضی برای ایجاد هندسه فن بیم با زاویه ۸۰

شکل ایجاد شود در کد از دستور چشمه مخروطی برای ایجاد هندسه فن بیم با زاویه ۸۰ در ۳۰ استفاده شد.

## ۲-۴- بررسی واگرایی باریکه مولد ایکس در فواصل مختلف از خروجی حفره

برای بررسی میزان واگرایی باریکه از یک هدف با ابعاد ۲×۲ سانتیمتر مکعبی استفاده شد. سطح هدف به ۱۰۰ قسمت مساوی با گام ۰/۲ میلیمتر تقسیم شد. در این قسمت از دستورات کارت مش تالی استفاده شد. برای رسم شکلها از الگوریتم نوشته شده در نرم افزار MATLAB استفاده شد. نحوه قرارگیری آشکارسازها، چرخ برشگر و سیستم مواد ایکس در شکل (۴) نشان داده شده است



شکل ۴: نحوه قرارگیری آشکارسازها، چرخ برشگر و چشمه

## ۲-۵- بررسی اثر ارتفاع جسم تحت اسکن و نقصهای موجود طول جسم بر شار ثبت شده توسط آشکارسازها

در این مرحله پروفایل ثبت شده بر روی آشکارسازها از یک هدف با حفره‌های متعدد در میدان دید دستگاه به دست آمد. برای این منظور از یک جسم ۵×۶ سانتیمتری با ارتفاع ۲۵ سانتیمتر از جنس استیل استفاده شد که در داخل آن کره‌های توخالی به قطر ۱۰ میلیمتر و به فاصله مرکز به مرکز ۲۰ میلیمتر از یکدیگر قرار داشتند. فاصله مرکز کره‌های توخالی با سطح خارجی جسم ۶ میلیمتر در نظر گرفته شد. در فاصله ۵۰ میلیمتری سطح هدف تا سطح آشکارساز زاویه پوشش‌دهی حدود ۲۹/۵ درجه بود. در داخل هدف ۱۲ حباب جای داده شد. داخل حبابها هوا در نظر گرفته شد. جسم با گام زاویه ای ۰,۵ درجه اسکن شد.

## ۲-۶- طراحی هدف برای اسکن

برای تعریف جسم از یک مکعب مستطیل از جنس استیل استفاده شد. ابعاد استیل مورد استفاده به عنوان هدف ۵×۶×۷ سانتیمتر مکعب است.

برخورد نمودند. ضخامت ماده هدف تنگستنی ۱ میلیمتر و زاویه قرارگیری آن نسبت به باریکه الکترونی فرودی بر سطح آن ۱۵ درجه در نظر گرفته شد [۱۵]. لازم به ذکر است که در نمونه تیوب‌های واقعی باریکه از فیلترهای آلومینیومی، روغنی و نیز شیشه به ترتیب به ضخامت ۲، ۲۰ و ۱,۸ میلیمتر عبور می‌کند که در مدلسازی این مسیر را برای باریکه تابش فوتونی در نظر گرفته شده است. حضور ماده روغن در سیستمهای مولد پرتوی ایکس به منظور خنک‌سازی لامپ ایکس است. همچنین حضور فیلتر آلومینیومی برای حذف بخش نرم طیف ایکس بکار می‌رود. آندهای مورد استفاده در تیوب‌های ایکس می‌تواند آندهای جامد ثابت و چرخان و آند سیال باشد [۱۶ و ۱۷]. در این کار تیوب ایکس شبیه سازی شده آند ثابت جامد است [۱۸]. انرژی الکترونهای گسیل شده از کاتد ۱۶۰ keV با امکان نفوذ بالاتر در مواد و با هدف تصویربرداری صنعتی در نظر گرفته شد [۱۹]. لازم به ذکر است که تیوب در دستگاه در داخل یک باکس قرار دارد که اطراف آن با روغن به ضخامت ۲۰ میلیمتر پر شده است. مشخصات و تصویر مولد اشعه ایکس شبیه‌سازی شده در جدول ۲ و شکل (۳) نشان داده شده است.

جدول ۲: مشخصات مولد ایکس شبیه‌سازی شده

نوع مولد ایکس	آند ثابت شیشه ای
جنس بدنه	پیرکس
ولتاژ بالا	۱۶۰ کیلو ولت
جنس آند	تنگستن
زاویه آند	۱۵ درجه
فیلتر	Al(2mm)+Oil(20 mm)+Glass(1.8 mm)
فشار خلأ	$10^{-6}$ تور

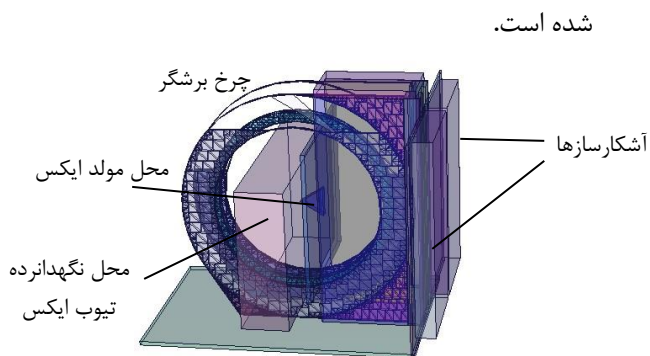
برای آشکارسازی فوتونهای گسیل شده از آند آشکارساز سوسوزن یدور سدیم شبیه‌سازی شد و طیف خروجی لامپ ایکس محاسبه شد.



شکل ۳: نمایی از نمونه واقعی تیوب ایکس

## ۲-۳- مدلسازی چشمه مخروطی

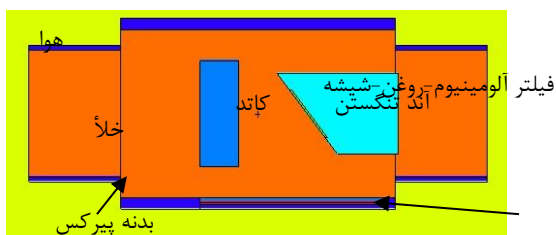
برای اینکه چشمه به صورت مخروطی با سطح مقطع بیضی



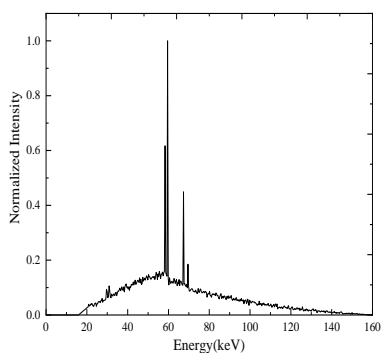
شکل ۷: نمایی از دستگاه مدل سازی شده

### ۳-۲- لامپ مولد اشعه ایکس

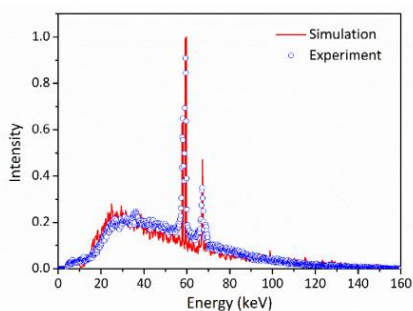
نمایی از مولد ایکس شبیه سازی شده در شکل (۸) نشان داده شده است. خروجی طیف لامپ ایکس مدلسازی شده در شکل (۹-الف) نشان داده شد و با نتایج تجربی طیف لامپ ایکس واقعی مقایسه که در شکل (۹-ب) نشان داده شده است مقایسه شده است.



شکل ۸: نمایی از تیوب شبیه سازی شده

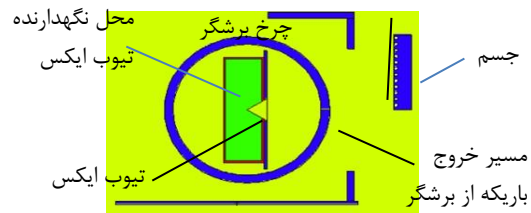


الف

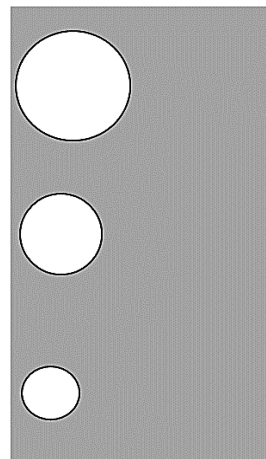


ب

شکل ۹: الف) طیف محاسبه شده، ب) طیف تجربی



شکل ۵: نمایی مقطعی از هدف طراحی شده طولی حاوی حبابهای توخالی



شکل ۶: طراحی از هدف اصلی جهت اسکن

در داخل این هدف سه حباب به عنوان نقص در نظر گرفته شد. قطر حبابها به ترتیب ۵، ۱۰، ۲۰ میلیمتر است. در داخل حبابها خلأ در نظر گرفته شد.

نمای مقطعی از سیستم و هدف طراحی شده و همچنین هدف اصلی جهت اسکن به ترتیب در شکل (۵) و (۶) نشان داده شده است

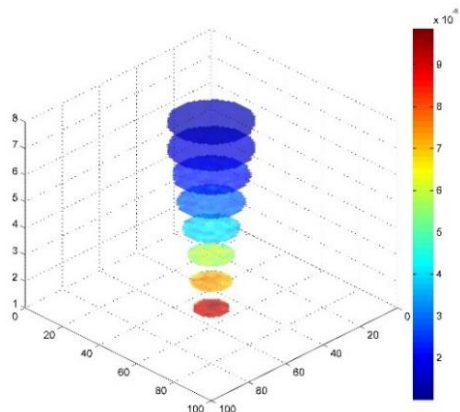
### ۳-نتایج

نتایج مدلسازی بدنه اصلی دستگاه تصویربرداری مبتنی بر سیستم پس پراکنشی ایکس، لامپ مولد اشعه ایکس و طیف خروجی آن بر اساس نمونه واقعی، هندسه مخروطی پرتو دهی تیوب مستقر در دستگاه، بررسی واگرایی باریکه گسیل شده از دستگاه در فواصل مختلف از خروجی حفره مستقر بر چرخ برشگر به صورت یک پروفایل دوبعدی، بررسی اثر ارتفاع جسم و حضور حبابها در ارتفاعهای مختلف در شار ثبت شده در آشکارسازها، بررسی تغییر شار ثبت شده توسط آشکارسازها به ازای تغییر فاصله جسم تحت اسکن از سطح آشکارسازها، طراحی هدف و در نهایت بازسازی داده های ثبت شده از اسکن جسم و بازسازی دریافت تصویر در ادامه مورد بحث قرار گرفته است.

### ۳-۱-مدلسازی بدنه سیستم پس پراکنشی ایکس

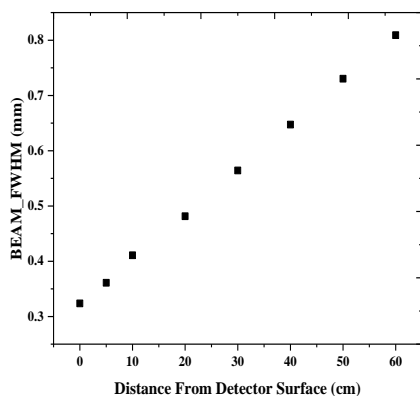
نمایی از دستگاه مدلسازی شده در شکل (۷) نشان داده

افزایش فاصله طبق یک رابطه خطی نشان داده شده در شکل (۱۱) قطر باریکه افزایش می یابد. واگرایی باریکه منجر به کاهش قدرت تفکیک در تصویر ثبت شده از جسم تحت اسکن خواهد شد و در پی آن تشخیص فضاهای خالی و یا نقصهای ریز در جسم تحت اسکن را تحت تأثیر قرار خواهد داد به همین منظور یک فاصله ۵ سانتیمتری برای هدف در نظر گرفته شد تا قدرت تفکیک مناسب در تشخیص حباب در داخل جسم تحت اسکن داشته باشد.



شکل ۱۱: پروفایل تغییرات سطح مقطع (قطر) باریکه بر روی هدف برای بررسی واگرایی باریکه در فواصل مختلف ۰، ۵، ۱۰، ۲۰، ۳۰، ۴۰، ۵۰ و ۶۰ سانتیمتر به ترتیب از پایین به بالا

شکل (۱۱) نشان می دهد که با افزایش فاصله شدت باریکه خروجی فوتونهای پرتو ایکس کاهش می یابد و میزان واگرایی باریکه افزایش می یابد. افزایش قطر باریکه با افزایش فاصله یک رابطه نمایی نشان می دهد [۲۰]. واگرایی باریکه در فواصل مختلف و بیشینه شدت باریکه به ازای تغییر فاصله از محل خروج باریکه به ترتیب در شکل (۱۲) و (۱۳) نشان داده شده است.

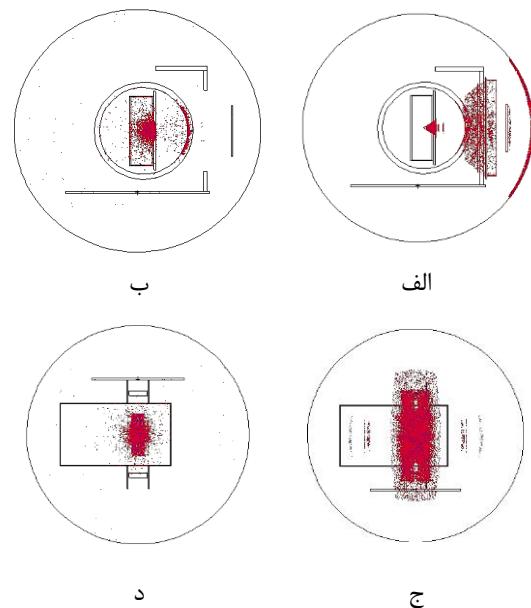


شکل ۱۲: معیاری از واگرایی باریکه در سطح هدف در فواصل مختلف بر حسب پهناى نیم بیشینه

همانگونه که نتایج مدلسازی در شکل (۹) نشان می دهد دو قله  $K\alpha 1$  و  $K\beta 1$  به ترتیب در انرژی های  $۵۹/۳$  و  $۶۷/۲$  keV ایجاد شده است که با نتایج کارهای تجربی و تیوب ایکسهای واقعی مطابقت دارد.

### ۳-۳- مدلسازی چشمه مخروطی

نحوه تابش و زاویه تابش چشمه زمانیکه هیچ نوع ماده بر سر راه چشمه قرار نگرفته باشد و زمانیکه مواد در سر راه چشمه باشد در شکل (۱۰) نشان داده شده است. از آنجا که باریکه خروجی از محفظه نگهداری مولد ایکس واقعی هندسه مخروطی دارد در این مرحله کد مربوط به مدلسازی چشمه مخروطی به برنامه اضافه گردید. در شکل (۱۰-د) میتوان نمای سطح مقطع و جلو از نحوه خروج ذرات از چشمه را مشاهده نمود که به صورت یک مخروط با سطح مقطع بیضی است.



شکل ۱۰: سطح مقطع نشان دهنده نحوه تابش چشمه

مخروطی الف)، بدون حضور ماده در مسیر ذرات (از کنار) ب) با حضور ماده در مسیر ذرات (از کنار) ج) بدون حضور ماده در مسیر ذرات (از روبرو) د) با حضور ماده در مسیر ذرات (از روبرو)

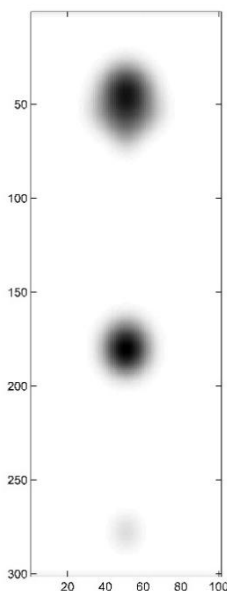
### ۳-۴- بررسی واگرایی باریکه گسیل شده از دستگاه در فواصل مختلف از خروجی حفره مستقر بر چرخ برشگر

قطر اولیه باریکه در دهانه روزنه موجود بر روی چرخ برشگر ۲ میلیمتر است و از آنجا که باریکه تا محل خروج از دستگاه فاصله ای حدود ۱۰ سانتیمتر را طی می کند در این فاصله قطر باریکه حدود  $۳/۲$  میلیمتر می گردد و پس از آن با

حباب دهم تا دوازدهم افت یکباره در شمارش ثبت شده در آشکارسازها ایجاد می‌شود.

### ۳-۶- تصویر جسم

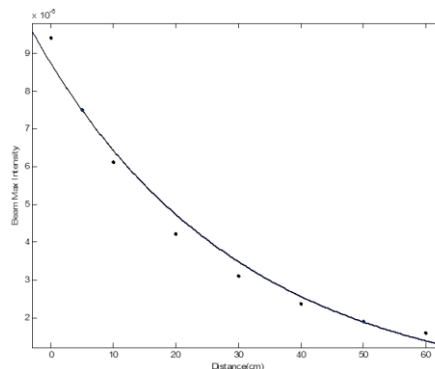
تصویر بازسازی شده از روی مقادیر شمارشهای ثبت شده توسط آشکارسازها برای جسم مذکور در بخش ۲-۶ در شکل (۱۵) نشان داده شده است. برای منظور تصویربرداری هدف با گام های ۰/۵ درجه تحت اسکن قرار گرفت. همانطور که در شکل (۱۵) نشان داده شده است، با استفاده از باریکه با قطر دو میل امکان تشخیص حفره‌های با قطر ۱۰ و ۲۰ میلی‌متر و تا حدی برای حفره با قطر ۵ میلی‌متر برای هدف مذکور میسر است.



شکل ۱۵: تصویر بازسازی شده نشان‌دهنده حضور حفرات

### ۴- نتیجه‌گیری

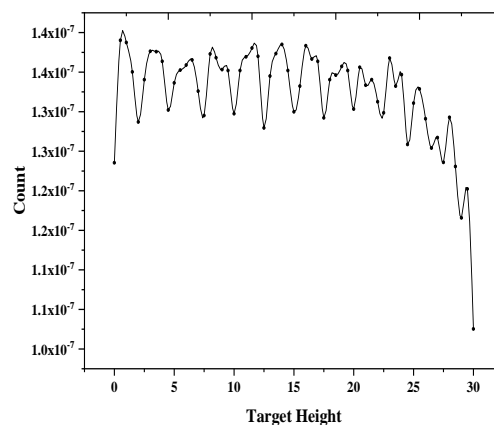
در این کار، با بهره‌گیری از کد مونت کارلوی MCNPX دستگاه تصویر برداری پس پراکنشی مبتنی بر ایکس مورد مدلسازی شد. نتایجی که حاصل شد: جهت اسکن نمودن اجسام کوچک‌تر می‌توان جسم را در فاصله کمتر از سطح آشکارسازها در نظر گرفت که مزیت این موضوع در این است که واگرایی باریکه خروجی از چرخ برشگر کمتر می‌شود و قدرت تفکیک برای رصد نقصهای ریزتر در نمونه مورد بررسی بهتر می‌گردد، اما برای اسکن هدفهایی با ارتفاع بلندتر نیاز است که جسم برای پوشش زاویه فضایی مناسب در فاصله دورتر قرار بگیرد و این منجر به کاهش قدرت تفکیک و واگرایی بیشتر باریکه تمام می‌شود. محاسبات برای قطر روزنه ۱ میلی‌متر و ۲ میلی‌متر روزنه



شکل ۱۳: بیشینه شدت باریکه به ازای تغییر فاصله از محل خروج باریکه

### ۳-۵- بررسی اثر ارتفاع جسم و حضور حبابها در ارتفاعهای مختلف در شار ثبت شده در آشکارسازها

نتایج اسکن با گام زاویه ۰,۵ درجه برای جسم تعریف شده در نمودار شکل (۱۴) نشان داده است. همانگونه که مشخص است به ازای حضور فضای تهی کاهشهای متوالی در شار ثبت شده در دو آشکارساز مشاهده می‌گردد و در قسمت بالای جسم که باریکه تنها نیمی از باریکه با جسم برخورد داشته است به طور ناگهانی افت زیادی در شار ثبت مشاهده می‌گردد که در نتیجه کاهش تعداد پرتوهای پس پراکنش شده به سمت دو آشکارساز از سمت جسم و فضای خالی بالای آن است.



شکل ۱۴: شار ثبت شده بر روی آشکارساز برای هدف طراحی شده طولی حاوی ۱۲ حباب توخالی

نمودار نقاط کمینه برای شکل (۱۴) که در آن مرکز حفره‌ها قرار دارد. نتیجه دیگری که از این شکل حاصل می‌شود این است که زاویه تابش باریکه به سطح هدف جهت اسکن ارتفاع هدف، اثر ناچیزی بر روی شار ثبت شده در آشکارسازها دارد تا زمانیکه ارتفاع جسم افزایش یابد که از



شده در این کار و قطر روزنه ۲ میلیمتر امکان تشخیص حبابهایی با قطر ۵، ۱۰ و ۲۰ میلیمتر در داخل جسمی که در فاصله ۵ سانتیمتری قرار از دستگاه قرار گرفته است میسر خواهد شد. نتایج نشان داد که می توان از این کد در طراحی نمونه های آزمایشگاهی چنین سیستمهای تصویربرداری بهره برد. مسائلی را که برای حل مسئله با این کد باید در نظر گرفت مواردی همچون طولانی شدن دریافت پاسخ به سبب اسکن جسم است که به صورت دینامیک انجام شود.

روی چرخ برشگر انجام شد اما برای قطر روزنه ۱ میلیمتر با توجه به اصول حل مسئله دقت محاسبات مطلوب نبود. همانطور که قبل از این بیان شد قطر کوچکتر روزنه بر روی چرخ برشگر منجر به کاهش واگرایی باریکه و در نتیجه افزایش قدرت تفکیک اسکن می گردد، از اینرو قطر روزنه ۲ میلیمتر در نظر گرفته شد. یکی از مواردی که اسکن به روش پس پراکنشی باید در نظر گرفت این است که باریکه یک با در مسیر رفت به سوی جسم واگرا می شود و دوباره در مسیر برگشت دستخوش پراکندگی و واگرایی قرار می گیرد. نتایج نشان داد که با استفاده از هندسه تعریف

## مراجع

- [1] J. Moore, "Environmental chemistry". Elsevier, 2012.
- [2] A. Assmus, "Early history of X rays." Beam Line, 1995.
- [3] A.K. Singh, "Advanced x-ray techniques in research and industry", IOS press, 2005.
- [4] N. Jaccard, T.W. Rogers, E.J. Morton, L. D. Griffin. "Detection of concealed cars in complex cargo X-ray imagery using deep learning. ", Journal of X-ray Science and Technology, Vol. 25, NO. 3, June 2017, pp. 323 – 339
- [5] G. Zentai, "X-ray imaging for homeland security." International Journal of Signal and Imaging Systems Engineering, Vol. 3, NO. 1, 2010, pp. 13 – 20.
- [6] B.C. Towe, M.J. Alan, "X-ray backscatter imaging." IEEE Transactions on Biomedical Engineering, Vol. 9, 1981, pp. 646-654.
- [7] M. Krumrey, L. Cibik, P. Müller, M. Bavdaz, E. Wille, M. Ackermann, M. J. Collon. "X-ray pencil beam facility for optics characterization. ", Space Telescopes and Instrumentation 2010: Ultraviolet to Gamma Ray, Vol. 7732, 2010
- [8] E. Mainegra-Hing, I. Kawrakow, "Efficient x-ray tube simulations", Medical physics, Vol. 33, NO. 8, 2006, pp. 2683-2690.
- [9] A. McPherson, J. Wang, P. L. Lee, D. M. Mills. "A new high-speed beam chopper for time-resolved X-ray studies. ", Journal of synchrotron radiation, Vol. 7, NO. 1, 2000, pp. 1 – 4.
- [10] G.F. Knoll, Radiation detection and measurement. John Wiley & Sons, 2010.
- [۱۱] میرمحمد اتفاق و دانیال بهکام کیا، " شبیه سازی و بررسی آماری پاسخ دینامیکی پل بر اثر عبور خودرو با خصوصیات و کلاس بندی اتفاقی در شرایط مختلف سطح جاده"، نشریه مدل سازی در مهندسی، دوره ۱۴، شماره ۴۷، زمستان ۱۳۹۵، صفحه ۷۷-۹۳.
- [۱۲] حمید فلقی، مریم رضانی و محمودرضا حقی فام، " تحلیل تأثیر نیروگاه های بادی بر قابلیت تبادل شبکه های انتقال در سیستم قدرت"، نشریه مدل سازی در مهندسی، دوره ۱۰، شماره ۳۰، پاییز ۱۳۹۱، صفحه ۶۱-۷۵.
- [۱۳] حسین شریف زاده، نیما امجدی و میلاد غلامی فرد، " ارزیابی امنیت استاتیک سیستم قدرت در حضور عدم قطعیت با استفاده از روش تخمین نقطه ای"، نشریه مدل سازی در مهندسی، دوره ۱۵، شماره ۵۱، زمستان ۱۳۹۶، صفحه ۳۵۹-۳۷۰.
- [11] L.S. Waters, "MCNPX user's manual.", Los Alamos National Laboratory, 2002
- [12] S.J. Wilderman, S.M. Hames, M.J. Flynn, W.R. Martin, 1994. "Monte Carlo calculation of x-ray spectra emitted by various anode materials at low voltages. ", Proceedings of 1994 IEEE Nuclear Science Symposium-NSS'94, Vol. 4, 1994, pp. 1537 – 1541.

- [16] S. Kim, H. Song, B. Movsas, I. J. Chetty., "Characteristics of x-ray beams in two commercial multidetector computed tomography simulators: Monte Carlo simulations." *Medical physics*, Vol. 39, NO. 1, 2012, pp. 320 – 329.
- [17] A. Arectout, , I. Zidouh, , Y. Sadeq , M.Azougagh, , B. Maroufi, E. Chakir, H.Boukhal,. "Calculation of X-ray spectra characteristics and kerma to personal dose equivalent Hp (10) conversion coefficients: Experimental approach and Monte Carlo modeling." *Nuclear Engineering and Technology*, Vol. 54, NO. 1, 2022, pp.301-309.
- [18] M. Arslan, T. Yadigaroglu, M. Muhsuroglu, I. Kacar, "Design and production of a fixed anode x-ray tube." *International Advanced Researches and Engineering Journal*. , Vol. 2, NO. 2, August 2018, pp. 153 – 158.
- [19] J. Tu.,, P.C. Brennan, , S. Lewis, S.Tavakoli Taba, " A bibliometric and social network analysis perspective of X-ray phase-contrast imaging in medical imaging." *Journal of medical radiation sciences*, NO. 1, 2022, pp. 37-46.
- [20] Carpentieri, C., C. Schwarz, J. Ludwig, A. Ashfaq, and M. Fiederle. "Absolute dose calibration of an X-ray system and dead time investigations of photon-counting techniques." *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, Vol. 187, NO. 1, 2002, pp. 71 – 77.