

Projection Data Acquisition in Industrial Fan-Beam Computed Tomography Using Monte Carlo Modeling in Gas and Oil Pipelines Non-destructive Testing

Mostafa Kabir^{1*}, Amir Movafeghi², Hossein Afarideh³

1- Phd Candidate, Amirkabir University of Technology; m.kabir@aut.ac.ir

2- Associate Professor, Nuclear Science and Technology Research Institute; amovafeghi@aeoi.org.ir

3- Professor, Amirkabir University of Technology; hafarideh@aut.ac.ir

*m.kabir@aut.ac.ir

Abstract

Computed tomography using gamma- and X-rays has been using as one of the most reliable imaging modalities for non-destructive testing purposes in different fields of industry. These devices can provide a three-dimensional image of the sections inside the object under inspection. Based on the shape of the beam, the output beams from the beam source are placed in front of the source in the tomographic devices, detectors are placed in front of the source and rotated 360 degrees around the object to obtain projections and finally, the image is reconstructed. In this paper, a portable industrial CT system with the shape of a fan beam is simulated using the MCNPX2.7e Monte Carlo code. The number of detectors was selected as 19 due to its portability, and an industrial standard phantoms and an innovative phantom were used to acquire projections for verification of simulation operation. Cobalt-60 gamma rays are recorded on the detectors after being transported from the object under study and generate important projection data for various angles. The results include a large number of projection functions that can then be used to create a sinogram matrix.

Keywords: Non-destructive testing, Computed tomography, Fan-beam industrial CT, Monte Carlo method, Projection function.

استحصال داده‌های پروجکشن‌ها در دمانگاری محاسباتی صنعتی باریکه بادبزی با استفاده از مدل‌سازی مونت کارلویی در آزمون‌های غیرمخرب خطوط لوله نفت و گاز

مصطفی کبیر^{۱*}، امیر موافقی^۲، حسین آفریده^۳

۱- دانشجوی دکتری، مهندسی هسته‌ای-کاربردپرتوها، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

۲- دانشیار، دکتری، مهندسی هسته‌ای-پرتویزشکی، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای

۳- استاد تمام، مهندسی هسته‌ای-کاربردپرتوها، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

*m.kabir@aut.ac.ir

چکیده

دمانگاری محاسباتی با استفاده از پرتوهای گاما و ایکس امروزه بعنوان یکی از قابل اعتمادترین مدالیته‌های تصویربرداری از اجسام برای مقاصد آزمون‌های غیرمخرب در صنایع گوناگون استفاده می‌شود. این دستگاه‌ها می‌توانند تصویری سه‌بعدی از مقطع‌های داخلی جسم مورد بازرسی ارائه دهند. بر اساس شکل باریکه پرتوهای خروجی از منبع پرتو در دستگاه‌های دمانگاری آشکارسازها در مقابل چشمه قرار گرفته و با چرخش ۳۶۰ درجه حول شیء برای تشکیل پروجکشن‌ها داده‌برداری انجام شده و در نهایت بازسازی تصویر صورت می‌پذیرد. در این مقاله با استفاده از کد مونت کارلویی MCNPX2.7e یک سامانه سی تی صنعتی پرتابل با شکل باریکه بادبزی شبیه‌سازی شد. تعداد آشکارسازها بعلت پرتابل بودن آن ۱۹ عدد انتخاب شد و از دو فانتوم استاندارد صنعتی و یک فانتوم ابتکاری به منظور ثبت پروجکشن‌ها و صحت عملکرد آن بهره برده شد. پرتوهای گامای کبالت-۶۰ پس از ترابرد از شیء مورد بررسی روی آشکارسازها ثبت شده و داده‌های مهم پروجکشن‌ها را برای زاویه‌های گوناگون می‌سازند. نتایج به دست آمده از کد مونت کارلویی MCNP سپس با کد Fluka اعتبارسنجی شد و مقادیر به دست آمده توافق بسیار خوب و نزدیکی داشتند. نتایج شامل تعداد زیادی تابع پروجکشن است که سپس می‌تواند برای ایجاد ماتریس سینوگرام استفاده شوند.

واژگان کلیدی: آزمون‌های غیرمخرب، دمانگاری محاسباتی، باریکه بادبزی، روش مونت کارلو، تابع پروجکشن.

۱- مقدمه

۱۹۸۵ ساخت یک دستگاه دمانگاری برای اسکن مقطعی از درختان به منظور بررسی کیفیت چوب تنه درخت و ستون‌ها توسط اونو و همکارانش گزارش داده شد [۵]. سوکورد و همکارانش در سال ۲۰۱۵ با ارائه مقاله‌ای روش‌های دمانگاری پرتابل با استفاده از پرتوهای گاما در کاربردهای صنعت نفت و اندازه‌گیری‌های محیطی برای درختان را بهبود بخشیدند [۲]. از جمله کارهایی که آنان انجام دادند بهینه‌سازی نوع رادیو ایزوتوپ مورد استفاده (انرژی پرتوی گاما) در موارد مورد مطالعه بود. در همین سال سونگ و همکارانش از مؤسسه پژوهش هسته‌ای کره جنوبی اختراعی (پتنتی) را با عنوان سیستم اسکن دمانگاری پرتوی گامای صنعتی با زاویه محدود را ثبت نمودند [۶]. در سال ۲۰۱۷ بایو و همکاران از دستگاه سی تی پرتابل نسل سوم در مقطع‌نگاری از لوله‌های خارج شده از زمین در نیروگاه‌های ژئوترمال استفاده نمودند [۷]. شیملک و همکارانش مشخصه‌های درختان و کیفیت چوب را با

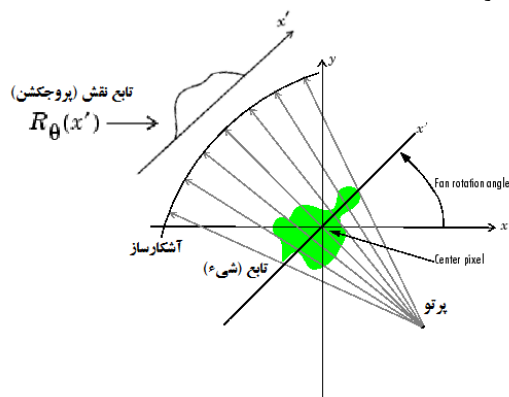
روش‌های نوین آزمون‌های غیرمخرب مانند دمانگاری صنعتی روز به روز در جهان اقبال بیشتری می‌یابند. ویژگی منحصر بفرد این روش تصویربرداری، در امکان استحصال تصاویر مقطعی از یک جسم سه بعدی است. ویژگی‌ای که در روش‌های دوبعدی معمول مانند پرتونگاری پرتوهای ایکس و گاما با نگاشت دوبعدی از یک جسم سه بعدی به طور کامل غیرقابل استحصال است [۱]. امروزه دستگاه‌های سی تی پرتابل در پزشکی و صنعت در موارد متعددی مورد استفاده قرار می‌گیرند. از این دستگاه‌ها عمدتاً در تصویربرداری کلینیکی برای تصویربرداری از مغز استفاده می‌شود [۲]. در صنعت تاکنون از این دستگاه‌ها برای مقاصد گوناگونی بهره برده شده است [۳]. کوگوره و همکارانش در سال ۱۹۸۳ در مقاله‌ای از یک چشمه نقطه‌ای گاما و یک آشکارساز برای دمانگاری از مقاطع تیرهای چوبی برق به منظور بازرسی غیرمخرب آن استفاده کردند [۴]. در سال

در همه کاربردهای مربوط به پرتوها در صنعت و پزشکی، اصل اولیه شبیه‌سازی مونت کارلویی پیش از پیاده‌سازی تجربی است. با استفاده از شبیه‌سازی دقیق مونت کارلویی می‌توان با در نظر گرفتن همه اثرات ترابرد پرتوها در ماده، معیار قابل قبولی از میزان پرتوهای رسیده به آشکارساز و توزیع انرژی، زاویه، مکان و غیره را به دست آورد [۱۳]. در زمینه شبیه‌سازی مونت کارلویی سیستم‌های سی‌تی تا کنون چندین کار پژوهشی با توجه به اهداف مورد نظر نویسندگان انجام شده است. از آنجمله می‌توان به پژوهش آی و زایدی در سال ۲۰۰۵ در شبیه‌سازی پروجکشن‌های دستگاه سی‌تی باریکه مخروطی و بادبزی کلینیکی با استفاده از کد مونت کارلویی MCNP4C اشاره نمود [۱۴]. پیرامون شبیه‌سازی مونت کارلویی دستگاه‌های دمانگاری صنعتی، عسکری و همکاران در سال ۲۰۱۹ با استفاده از کد GEANT4 به شبیه‌سازی سی‌تی صنعتی با هدف مورد نظر خود پرداختند [۱۵]. در سال ۲۰۱۷ نیز ولو و همکارانش یک نمونه دستگاه پرتابل دمانگاری صنعتی با ۵ چشمه سزیم-۱۳۷ را طراحی و با کد MCNPX شبیه‌سازی نمودند [۱۶]. کیم و همکارانش نیز در سال ۲۰۱۲ امکان-سنجی ساخت دستگاه پرتابل مقطع‌نگاری صنعتی را با استفاده از کد مونت کارلویی MCNPX انجام دادند [۱۷]. همچنین در سال ۲۰۱۹ ولو پژوهش دیگری نیز در باب شبیه‌سازی مونت کارلویی سی‌تی پرتابل با ۱۵ آشکارساز انجام داده است [۱۸]. هدف از این مقاله شبیه‌سازی سیستم دمانگاری صنعتی پرتابل نسل سوم با چینش آشکارسازهای نوع منحنی^۱ و به دست آوردن داده‌های پروجکشن‌ها است. در این مقاله تلاش شده با استفاده از روش مونت کارلو پروجکشن‌ها در زاویه‌های مختلف به دست آمده و سپس صحت آن ارزیابی شود.

۲- شبیه‌سازی مونت کارلویی

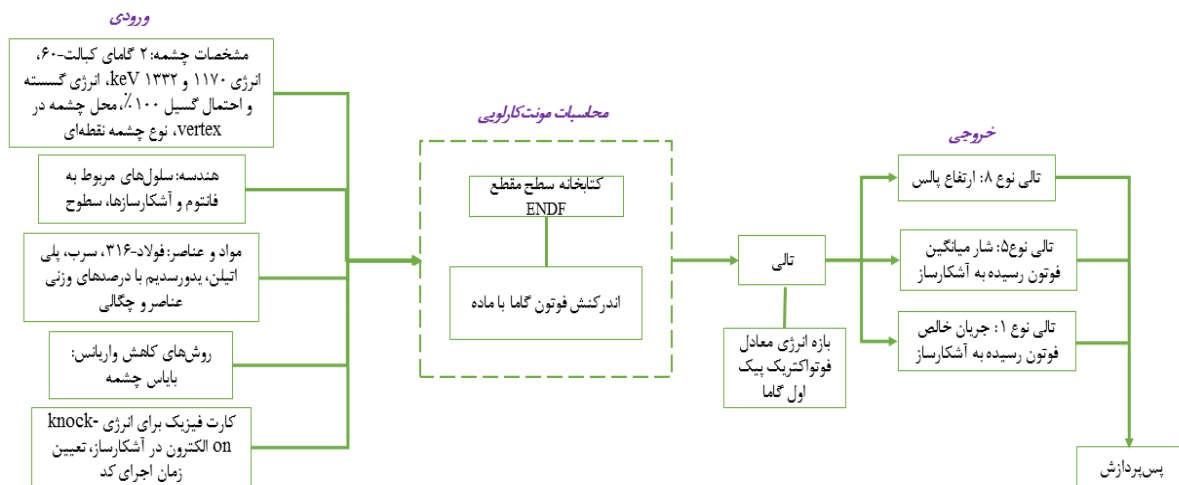
شبیه‌سازی مونت کارلویی سیستم دمانگاری پرتابل در این مقاله با استفاده از کد MCNPX2.7e انجام شد. این کد می‌تواند انواع و اقسام ذرات نظیر فوتون‌ها، الکترون‌ها، نوترون‌ها را ترابرد کند [۱۹]. الگوریتم محاسباتی کد مونت کارلو در شکل ۲ نشان داده شده است.

استفاده از یک دستگاه سی‌تی پرتابل نسل اول مورد مطالعه قرار دادند [۸]. التائب و همکارانش در سال ۲۰۱۵ دستگاه توموگرافی نسل اول با الکترونیک بسیار ساده‌ای را طراحی و ساختند [۹]. دستگاه‌های مقطع‌نگاری محاسباتی پرتابل برای تصویربرداری از خطوط لوله نفت و گاز امروزه مورد استفاده قرار می‌گیرند [۱۰]. در سال ۲۰۱۷ مرکز کاربردهای روش‌های هسته‌ای در صنعت در کشور ویتنام دستگاه‌های نسل اول و سوم دمانگاری گاما را برای کاربردهای اسکن در ادوات انتقال مواد در پتروشیمی و خطوط لوله به صورت تجاری عرضه نمود [۱۰]. با این روش می‌توان میزان گرفتگی خطوط لوله و برخی از انواع خوردگی‌هایی که در آن به وجود آمده است را اندازه‌گیری نمود. در صنعت به علت سنگین بودن مواد مورد بازرسی مانند فلز فولاد و مشابه آن، استفاده از چشمه‌های پرتوی گاما مانند کبالت-۶۰، سزیم-۱۳۷ و ایریدیوم-۱۹۲ متداول‌تر است. نسل سوم دستگاه‌های دمانگاری از نوع دوران-دوران هستند، و شکل‌دهی باریکه پرتوها به صورت باریکه بادبزی می‌باشد [۱۱]. این بدان معناست که با چرخش چشمه و متناظر با آن در سمت مقابل آرایه آشکارسازها داده‌برداری صورت می‌پذیرد. این باریکه باید به نحوی قرار بگیرد تا کل شیء مورد بازرسی را پوشش دهد و در نهایت در آشکارسازها ثبت شوند. مقادیر ثبت شده در آشکارساز تابع پروجکشن هستند که باید برای تمام زوایای دور تا دور شیء این پروجکشن‌ها استحصال شود [۱۲]. در نهایت با استفاده از این پروجکشن‌ها ماتریس سینوگرام ایجاد شده و پس از آن بازسازی تصویر با استفاده از الگوریتم‌های مربوطه اجرا می‌شود.



شکل ۱- تابع پروجکشن از یک شیء با استفاده از انتگرال‌های خطی عبور کننده از آن.

^۱ Arc configuration



شکل ۲- ساختار محاسبات مونت کارلویی در شبیه‌سازی سی تی پرتابل پرتوی گام

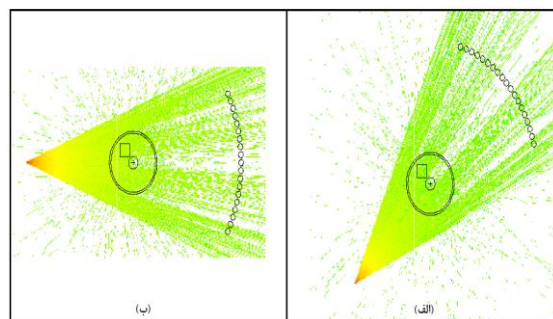
۳- فانتوم‌ها

فانتوم‌ها نمونک‌ها یا آزمونه‌هایی از جنس‌های مختلف هستند و مشخصه‌های هندسی خاصی دارند که به وسیله‌ی آن‌ها می‌توان کیفیت تصاویر به دست آمده را مورد بررسی کمی و کیفی قرار داد. در این پژوهش از دو فانتوم استفاده شد. هندسه فانتوم اول مورد بررسی شامل فانتوم استاندارد پلی‌پروپیلن [۲۰] و دومی یک فانتوم ابتکاری می‌باشد که پرتوها پس از عبور از این فانتوم‌ها به آشکارساز رسیده و در نهایت سیگنال الکتریکی تولید می‌کنند.

۳-۱- فانتوم استاندارد

تاکنون فانتوم‌های صنعتی استاندارد زیادی در دمانگاری محاسباتی معرفی شده است. کشورهای مختلف این فانتوم‌ها را در ابعاد گوناگون می‌سازند و از آن در کنترل کیفیت تصاویر CT صنعتی بهره می‌برند. در شکل ۴ ب، شماتیک ابعادی این فانتوم و شکل ۴ الف، شماتیک پیاده‌سازی شده که عیناً منطبق بر نمونه استاندارد است نشان داده شده‌اند. این فانتوم شامل یک استوانه از جنس پلی‌پروپیلن با چگالی ۰٫۹ کیلوگرم بر متر مکعب و ارتفاع ۴۰ سانتی‌متر بوده که در فواصل مشخصی استوانه‌هایی از آن جدا شده‌اند. در این فانتوم‌ها هوا وجود دارد. ابعاد در نظر گرفته شده برای این فانتوم‌ها در کشورهای مختلف متفاوت است. در این پژوهش از فانتوم استاندارد کشور ایالات متحده آمریکا استفاده شد است که در آن قطر $D=16\text{inch}$ (40.64cm) است. قطر حفره‌ها برابر است با $D/16=1\text{inch}$ (2.54cm).

چشمه پیاده‌سازی شده برای این مسئله، چشمه کبالت-۶۰ با انرژی‌های گسسته 1.117MeV و 1.332MeV بوده است و با استفاده از کارت‌های بیاباس زاویه‌ای، چشمه تنها در جهت باریکه بادبزی پرتو دهی می‌کند. آشکارسازها در این پژوهش ایده‌آل هستند. این به دلیل آن است که در واقعیت تنها پرتوهای اولیه عبوری برای ما اهمیت دارد. از آنجایی که در دمانگاری برای ما پرتوهای پراکنده شده نیز محسوب شده و عملاً نمی‌بایست در بازسازی تصویر و پرچکشن‌ها نقشی داشته باشند، تنها از پیک انرژی اول گامای کبالت-۶۰ استفاده می‌شود. علت این امر بالاتر بودن بازدهی آشکارسازهای یدور سدیم برای این پیک است که در عمل از آن استفاده می‌شود و در شبیه‌سازی نیز در نظر گرفته شده است. تصویری از پرتوهای فوتون‌های پرتوی گاما ترابرد شده در شکل زیر نمایش داده شده‌اند.



شکل ۳- ترابرد فوتون‌های پرتوی گاما از چشمه تا آشکارساز با عبور از فانتوم. الف) زاویه ۴۵ درجه، ب) زاویه ۰ درجه

ذره می‌توان یک انرژی قطع^۱ یا طول قطع^۲ در نظر گرفت. اندازه‌گیری^۳ مقادیر مورد نظر نظیر جریان، شار سطحی، شار حجمی، ارتفاع پالس و غیره توسط خروجی‌های تالی انجام می‌شود. در این مقاله در ابتدا به منظور صرفه جویی در زمان و به منظور رسیدن به خطای مورد دلخواه زیر ۱۰٪ از سه روش استفاده شد. تالی نوع ۱ (F1) که بیانگر جریان سطحی است، کل فوتون‌های عبوری از ناحیه آشکارساز را شمارش می‌کند. با استفاده از کارت کمکی E1 برای یک بازه کوچک انرژی که پیک تمام انرژی اول گامای کبالت-۶۰ در آن است این کار انجام شد. نحوه محاسبات مونت کارلویی برای این تالی در رابطه ۴-۱ آمده است [۱۹]. ذکر این نکته ضروری است که به منظور دقت بیشتر در اندازه‌گیری جریان رسیده به آشکارساز تنها از زاویه پروجکشن مدنظر، سلول محاسبه جریان در این روش بسیار کوچک در نظر گرفته شد.

$$F1 = \iiint_{A \mu t E} \vec{J}(\vec{r}, E, t, \mu) dE dt d\mu dA \quad 4-1$$

که در آن J جریان فوتون‌های عبوری از مساحت A در زمان t با انرژی E تحت زاویه μ که $\mu = \cos\theta$ است. تالی نوع ۵ (F5) که به تالی آشکارساز معروف است، برای محاسبه شار عبوری ذرات از آشکارساز نقطه‌ای^۴ یا یک ناحیه با شکل هندسی کروی تعریف می‌شود. برای محاسبه این تالی از روش زیر استفاده می‌شود.

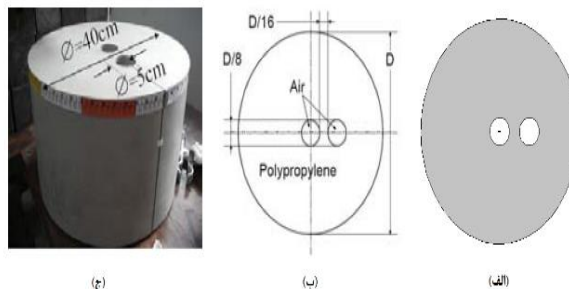
$$F5 = \iint_t \varphi(\vec{r}, E, t) dE dt \quad 4-2$$

که در آن φ شار عبوری از ناحیه آشکارساز با انرژی E و در زمان t است. تالی نوع ۸ (F8) که به منظور اندازه‌گیری ارتفاع پالس خروجی در تحلیل‌گر چند کاناله (MCA^۵) است. تمام اندازه‌گیری‌ها روی پنجره (کانال) انرژی فوتون عبوری پیک تمام انرژی ۱۱۷۰ کیلوکلوکرون ولت گاما انجام می‌شود. در این تالی هر فوتون برحسب میزان انرژی‌ای که در ناحیه آشکارساز برجای می‌گذارد، در یک کانال انرژی تعیین شده ثبت می‌شود.

$$T = \sum_{i=1}^K E_i - \sum_{i=1}^L D_j \quad 4-3$$

⁴ Point Detector

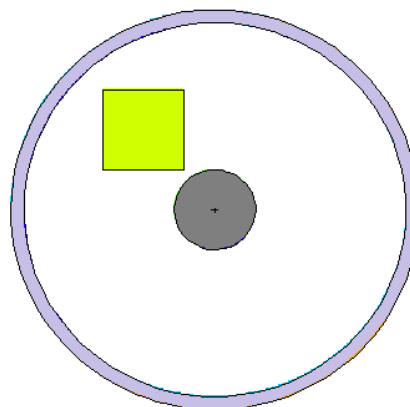
⁵ Multi-channel Analyzer



شکل ۴- فانتوم استاندارد، الف) تصویر مقطعی از فانتوم استاندارد دمانگاری محاسباتی صنعتی پیاده سازی شده در کد MCNPX2.7e، ب) ابعاد فانتوم استاندارد [۲۰]، ج) یک نمونه فانتوم واقعی

۳-۲ فانتوم خطلوله فولادی

این فانتوم شامل یک لوله فلزی به قطر ۱۰ سانتی‌متر و ضخامت ۰٫۶۵ سانتی‌متر از فولاد زنگ‌نزن نوع فولاد-۳۱۶ بوده و در داخل آن یک استوانه سربی به شعاع ۲ سانتی‌متر و یک منشور مربعی به ضلع ۴ سانتی‌متر از جنس پلی اتیلن تعبیه شده که از ابتدا تا انتهای لوله کشیده شده است. شکل ۵ مقطعی از این فانتوم را نمایش می‌دهد.



شکل ۵- تصویر مقطعی فانتوم آزمون به منظور ارزیابی شبیه‌سازی.

۴- بهینه‌سازی زمانی روش محاسباتی مونت کارلو

روش مونت کارلو به طور کلی بعنوان یک روش محاسباتی عددی کند محسوب می‌شود [۱۳]. در این روش هر ذره پس از جدا شدن از چشمه با توزیع انرژی، زاویه، مکان و زمان حرکت کرده و تاریخچه آن پس از عبور از ماده و اندرکنش‌های آن با مواد مختلف تا زمانی که به نقطه انتهایی مسیر خود برسد، دنبال می‌شود. برای پایان محاسبات یک

¹ Cut-off energy

² Cut-off distance

³ Scoring

۵- نتایج

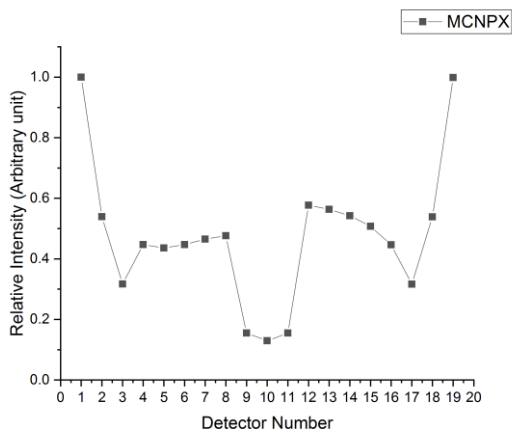
همانطور که در رابطه ۴-۳ دیده می‌شود، ارتفاع پالس مجموع تبدیل انرژی E کل فوتون i-ام منهای تالی انرژی D فوتون j-ام که سلول آشکارساز را ترک می‌کند. به ذره‌ای که در آشکارساز انرژی انباشته کرده است به علت رابطه تقریباً مستقیمی که بین میزان انرژی برجای گذاشته شده با ارتفاع پالس خروجی وجود دارد وزن دهی می‌شود و در نهایت در کانال‌های انرژی قرار می‌گیرد. در جدول ۱ مقایسه زمان کل اجرای کد مونت کارلو برای رسیدن به مقدار مجاز خطای نسبی نشان داده شده است.

جدول ۱- مقایسه زمان اجرای کد در روش‌های مختلف

| روش اندازه گیری | درصد خطای نسبی | زمان اجرا (دقیقه) |
|-----------------|----------------|-------------------|
| تالی نوع ۱ (F1) | کمتر از ۱۰٪ | ۳۵۷٫۶۱ |
| تالی نوع ۵ (F5) | کمتر از ۵٪ | ۵۶٫۰۱ |
| تالی نوع ۸ (F8) | کمتر از ۱۰٪ | ۵۸۳٫۳۷ |

۲-۴ شبیه‌سازی ست آپ در کد MCNPX2.7e و نتایج

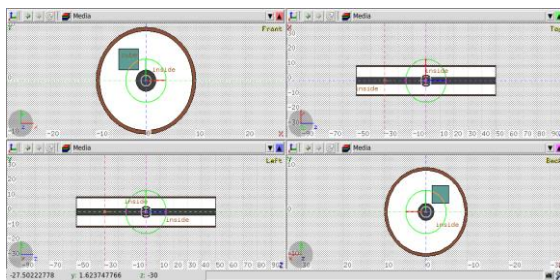
هندسه فانتوم‌های استاندارد و آزمون به صورت جداگانه در دو کد ورودی پیاده‌سازی شد. مشخصه‌های چشمه همانگونه که در بخش ابتدایی مقاله به آن اشاره شد، در کد تعیین شد و اجرای کد تا رسیدن به کمترین مقدار قابل قبول برای خطای نسبی آماری در روش مونت کارلو ادامه یافت. تعداد آشکارسازها ۱۹ عدد بوده و با استفاده از کارت‌های تالی نوع ۵ و بازه انرژی روی انرژی فوتون‌های اولیه رسیده به آشکارساز نتایج داده‌های پروجکشن‌ها برای یک زاویه دلخواه (صفر-درجه) در اشکال ۶ و ۷ نشان داده شده است.



شکل ۷- پروجکشن روی زاویه صفر درجه برای فانتوم آزمون طراحی شده برای این پژوهش

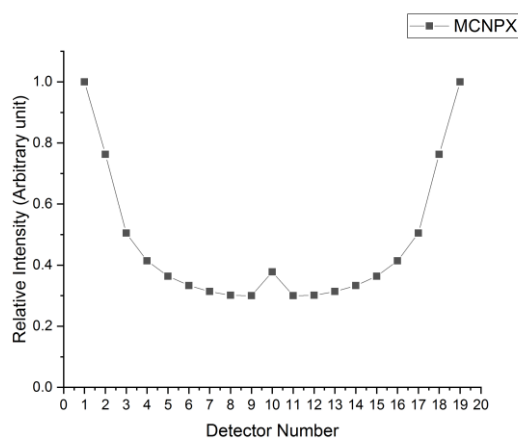
۶- اعتبارسنجی نتایج

با استفاده از کد مونت کارلویی FLUKA که برای ترابرد ذرات یونیزان و غیر یونیزان استفاده می‌شود، هندسه‌های فانتوم‌ها دوباره عیناً تعریف شدند و داده‌های خروجی به صورت توابع USRBDX در محل آشکارسازها اندازه‌گیری شد [۲۱]. شکل هندسه‌های پیاده‌سازی شده در کد FLUKA در زیر نمایش داده شده است.



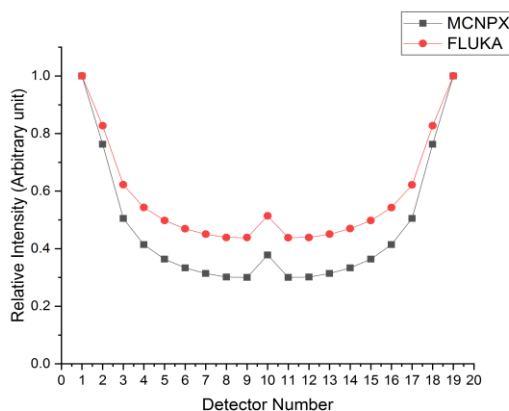
شکل ۸- هندسه فانتوم آزمون برای اعتبارسنجی کد مونت کارلو استحصال داده‌های پروجکشن

مقادیر جریان فوتون‌های اندازه‌گیری شده روی آشکارسازها ثبت شده‌اند در نمودارهای اشکال ۹ و ۱۰ به نمایش درآمده‌اند. این نمودارها همان داده‌های پروجکشن‌ها در زوایای مختلف هستند که در نهایت ماتریس سینوگرام را ساخته و با روش‌های بازسازی تصویر مانند بک پروجکشن تصویر نهایی ساخته می‌شود. در این مقاله تنها استحصال داده‌های پروجکشن‌ها مد نظر بوده و بازسازی تصویر جزء اهداف این مقاله نیست.

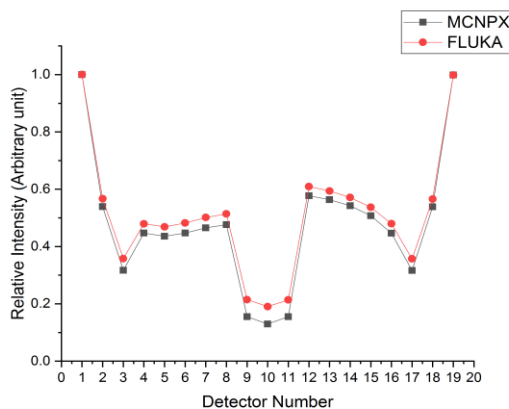


شکل ۶- پروجکشن روی زاویه صفر درجه برای فانتوم استاندارد صنعتی

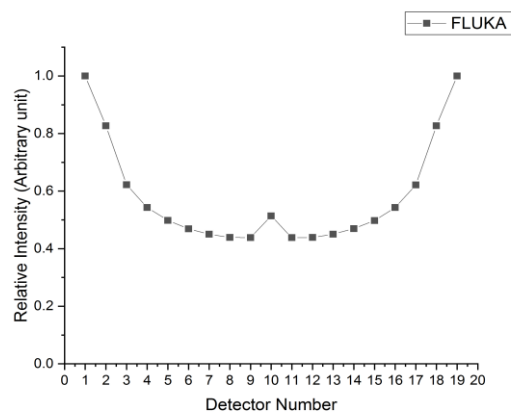
روش محاسباتی مونت کارلو با کد MCNPX2.7e و با در نظر گرفتن تمام ویژگی‌ها و مشخصه‌های مورد استفاده در سیستم دمانگاری صنعتی پرتابل، داده‌های مهم پروجکشن‌ها به دست آمد. چینش آشکارسازها به صورت منحنی بوده که دقیقاً در مقابل باریکه بادبزی قرار گرفته است و با تعداد محدود (۱۹ عدد) آشکارساز با ابعاد ۱ اینچ داده‌های پروجکشن روی زاویه‌های مختلف را جمع‌آوری می‌کند. از روش دمانگاری از دو فانتوم استاندارد و آزمون برای این کار استفاده شد و به منظور اعتبارسنجی نتایج با کد مونت کارلویی FLUKA نتایج ارزیابی شد که توافق حدود ۹۰٪ را نشان می‌دهد. بنابراین با استفاده از روش و ساختار شبیه‌سازی معرفی شده در این مقاله می‌توان برای تمام زاویه‌های حول هر جسم داده‌های پروجکشن‌ها برای باریکه پرتوی گاما یا ایکس بادبزی مورد استفاده قرار داد و پس از آن با استفاده از الگوریتم‌های بازسازی تصویر، به تصویر نهایی مقطع مورد نظر دست پیدا کرد.



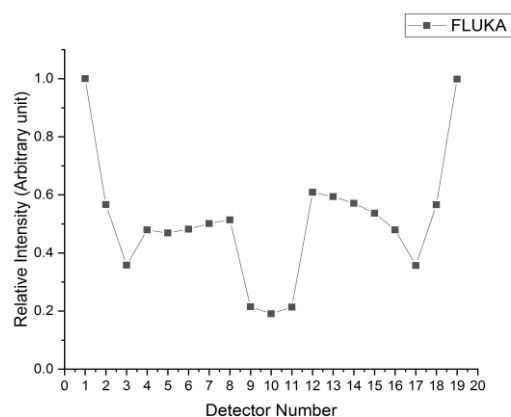
شکل ۱۱- مقایسه داده‌های پروجکشن برای فانتوم استاندارد استحصال شده از کد MCNPX با کد FLUKA در زاویه صفر



شکل ۱۲- مقایسه داده‌های پروجکشن برای فانتوم آزمون طراحی شده استحصال شده از کد MCNPX با کد FLUKA در زاویه صفر



شکل ۹- پروجکشن روی زاویه صفر درجه برای فانتوم استاندارد صنعتی مستخرج از کد MCNPX2.7e.



شکل ۱۰- پروجکشن روی زاویه صفر درجه برای فانتوم آزمون طراحی شده مستخرج از کد FLUKA

۷- بحث روی نتایج

نتایج به دست آمده از مقایسه بین داده‌های به دست آمده از کدهای مونت کارلویی نشان دهنده صحت و دقت کد پیاده‌سازی شده برای شبیه‌سازی مونت کارلویی پروجکشن‌های مربوط به دمانگاری صنعتی است. به علت کم بودن داده‌های مربوط به آشکارسازها و پرکردن فضای بین هر آشکارساز لازم است در بین نقاط درون‌یابی نیز صورت بگیرد. در نمودارهای اشکال ۱۱ و ۱۲ مقایسه‌ای بین دو پروجکشن از فانتوم استاندارد و فانتوم آزمون طراحی شده برای این پژوهش انجام شده است.

۸- نتیجه‌گیری

در تصویربرداری دمانگاری صنعتی اهداف گوناگونی نظیر بررسی مقطعی ستون‌ها و پایه‌ها، درختان و گیاهان، خطوط لوله نفت و گاز و غیره مورد بازرسی قرار می‌گیرند. در این مقاله با استفاده از

- [11] Ehsan Samei, Norbert J. Pelc, *Computed Tomography: Approaches, Applications, and Operations*, Springer International Publishing, 2020 /doi.org/10.1007/978-3-030-26957-9
- [12] Jerry L. Prince, Jonathan Links, *Medical Imaging Signals and Systems*, 2nd Edition, PRENTICE HALL, 2015
- [13] Alireza Haghghat, *Monte Carlo Methods for Particle Transport*, CRC Press, 1st ed., 2014
- [14] Mohammad Reza Ay, Habib Zaidi, Development and validation of MCNP4C-based Monte Carlo simulator for fan- and cone-beam x-ray CT, *Phys Med Biol* 2005 Oct 21;50(20):4863-85. doi: 10.1088/0031-9155/50/20/009
- [15] Mojtaba Askari, Ali Taheri, Majid Mojtahedzadeh Iarijani, Amir Movafeghi, Industrial gamma computed tomography using high aspect ratio scintillator detectors (A Geant4 simulation) *Nuclear Inst. and Methods in Physics Research*, A 923 (2019) 109–117
- [16] A.F. Velo, M.M. Hamada, D.V.S. Carvalho, J.F.T. Martins, C.H. Mesquita, A portable tomography system with seventy detectors and five gamma-ray sources in fan beam geometry simulated by Monte Carlo method, *Flow Measurement and Instrumentation* 53 (2017) 89–94
- [17] Jongbum Kim, Sunghye Jung, Jinho Moon, Gyuseong Cho, A feasibility study on gamma-ray tomography by Monte Carlo simulation for development of portable tomographic system, *Applied Radiation and Isotopes* 70(2012)404–414
- [18] A.F. Velo, A.G. Alvarez, D.V.S. Carvalho, V. Fernandez, S. Somessari, F.F. Sprenger, M.M. Hamada, C.H. Mesquita, A Third Generation Tomography System with Fifteen Detectors Simulated by Monte Carlo Method, *BRAZILIAN JOURNAL OF RADIATION SCIENCES*, 07-02A (2019) 01-13
- [19] Hughes H G 1997 Status of electron transport in MCNP Los Alamos National Laboratory LA-UR-97-1368 (Los Alamos, NM)
- [20] INDUSTRIAL PROCESS GAMMA TOMOGRAPHY, IAEA, VIENNA, IAEA-TECDOC-1589, 2008
- [21] A. Ferrari, P.R. Sala, A. Fasso', and J. Ranft, "FLUKA: a multi-particle transport code" CERN-2005-10 (2005), INFN/TC_05/11, SLAC-R-773.
- [1] David C. Copley, Jeffrey W. Eberhard, Gregory A. Mohr, *Computed Tomography Part I: Introduction and Industrial Application*, The Journal of The Minerals, Metals & Materials Society (JOM), 46, pages14–26(1994)
- [2] Z. Rumboldt, W. Huda, J.W. All, Review of Portable CT with Assessment of a Dedicated Head CT Scanner, *AJNR*, Am J Neuroradiol, 2009 Oct;30(9):1630-6. doi: 10.3174/ajnr. A1603.
- [3] M.S. Rapaport and A. Gayer, Application of gamma ray computed tomography to nondestructive testing, *NDT&E International* Volume 24 Number 3 June 1991
- [4] Kogure Jin, Kawamura Hiromi, Onoe Morio, Tsao J.W., Yamada Hiroaki, Rot detection of wood poles by means of a portable x-ray computed tomographic scanner, Reference Number, International Nuclear Information System, No. 15059107, INIS Volume 15, INIS Issue 19, 1983
- [5] Onoe, M.; Tsao, J.W.; Yamada, H.; Nakamura, H.; Kogure, J.; Kawamura, H.; Isono, E.; Maeda, Y.; Matsumoto, Portable CT scanners for use on live trees and standing columns, p. 680-687, 11th world conference on nondestructive testing; Las Vegas, NV (USA), 1985
- [6] Sung-Hee Jung, Jong-bum Kim Jinho Moon, PORTABLE INDUSTRIAL LIMITED ANGLE GAMMA-RAY TOMOGRAPHY SCANNING SYSTEM, USPATENT, US 9,057,680 B2 2015
- [7] Bayu Azmi, Wibisono, Adhi Harmoko Saputro, Portable Gamma Ray Tomography System for Investigation of Geothermal Power Plant Pipe Scaling, 2017 15th Intl. Conf. QiR: Intl. Symp. Elec. and Com. Eng, 978-602-50431-1-6/17/\$31.00 ©2017 IEEE
- [8] Laurence Schimleck, Joseph Dahlen, Luis A. Apiolaza, Geo Downes, Grant Emms, Robert Evans, John Moore, Luc Pâques, Jan Van den Bulcke and Xiping Wang, Non-Destructive Evaluation Techniques and What They Tell Us about Wood Property Variation, *Forests* 2019, 10, 728; doi:10.3390/f10090728
- [9] Moez Eltayeb, Sayed M. kbashi, Amar Osman, Suliman Abdalla, Mustafa. A. W. The Design of Portable Gamma Computed Tomography Scanner System, International Conference on Computing, Control, Networking, Electronics and Embedded Systems Engineering, IEEE, 2015
- [10] <http://www.canti.vn/en>, Centre For Applications of Nuclear Technique in Industry.