

Quality Assessment of Gypsum Structure Using Tomography Method (Modeling and Experimental)

AmirMohammad Beigzadeh ¹  | Mojtaba Askari ² 

1. Radiation Application Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute, Tehran, Iran.
E-mail: abeigzadeh@aeoi.org.ir
2. Radiation Application Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute, Tehran, Iran.

Article Information:

Research Article

Received 29 Nov. 2022

Revised 25 Dec. 2022

Accepted 4 January 2023

Keywords:

Computed Tomography,
Gamma Radiography,
MCNPX,
Building Structure,
Structural Defects.

ABSTRACT

In this study, the quality measurement of a plaster structure armed with steel rods and an internal air cavity was carried out. The scanner system is equipped with a cesium-137 gamma radioactive source with 661.7 keV photopeak energy and a linear array CdWO₄ scintillating crystal of detector with 8 x 8 mm² pixel size. The analysis of the internal structure of the sample was performed in two simulation and experimental phases. MCNPX Monte Carlo code was used to perform the simulation phase. MLEM and Back Projection methods were used to reconstruct the images. The simulation results were compared with the experimental outputs, their performance in the 3D display inside this phantom was investigated. The results showed that the MLEM reconstruction method is more efficient than the back projection reconstruction method both in the simulation phase and in the experimental phase in providing internal images. The results showed that with modeling, it is possible to evaluate the tomographical pictures of the manufactured samples, and before setting the experimental, it can be used for different materials and geometries.

Cite this article: Beigzadeh, A., Askari, M. (2023). Quality Assessment of Gypsum Structure using Tomography Method (Modeling and Experimental). *Journal of Nondestructive Testing Technology*, 3 (11), 72-83. <http://doi.org/10.30494/JNDT.2022.374812.1108>

کیفیت‌سنجی ساختار سازه گچی با بهره‌گیری از روش مقطع‌نگاری (مدل‌سازی و تجربی)

امیرمحمد بیگزاده^۱ | مجتبی‌عسکری^۲

۱. پژوهشکده کاربرد پرتوها، سازمان انرژی اتمی، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، تهران، ایران. رایانامه: abeigzadeh@aeoi.org.ir
۲. پژوهشکده کاربرد پرتوها، سازمان انرژی اتمی، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، تهران، ایران.

چکیده:

در این مطالعه کیفیت‌سنجی یک سازه گچی مسلح با چهار عدد میلگرد فولادی به قطرهای ۱۰، ۱۵، ۱۵ و ۲۰ سانتیمتر و نیز یک حفره پر از هوا به قطر ۸ سانتیمتر در داخل سازه، با بهره‌گیری از سیستم اسکنر حالت عبوری، مجهز به چشمه رادیواکتیو گاماژای سزیم-۱۳۷ با انرژی ۶۶۱/۷ کیلو الکترون‌ولت و آشکارساز خطی آرایه‌ای با ابعاد پیکسل ۸×۸ میلی‌متر مربع از نوع کریستال سوسوزن CdWO₄ به روش مدل‌سازی و تجربی مورد بررسی قرار گرفت. برای انجام فاز شبیه‌سازی از کد مونت‌کارلوی MCNPX بهره برده شد. برای بازسازی تصاویر از روش‌های MLEM و Back Projection استفاده شد. نتایج شبیه‌سازی با نتایج تجربی مقایسه شدند و نحوه عملکرد آنها در نمایش سه‌بعدی داخل این فانتوم مورد بررسی قرار گرفت، نتایج نشان دادند که روش بازسازی MLEM نسبت به روش بازسازی back projection هم در فاز شبیه‌سازی و هم در فاز تجربی در ارائه تصاویر داخلی از نمونه کارآمدتر است. نتایج نشان داد که با مدل‌سازی امکان بررسی تصاویر مقطع نگاره‌های نمونه ساخته شده را دارد و پیش از انجام آزمون‌های تجربی می‌توان از آن برای مواد و هندسه‌های مختلف بهره برد.

اطلاعات مقاله:

مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت:

۱۴۰۱/۰۹/۰۸

تاریخ بازنگری:

۱۴۰۱/۱۰/۰۴

تاریخ پذیرش:

۱۴۰۱/۱۰/۱۱

کلیدواژگان:

مقطع‌نگاری کامپیوتری،

تصویربرداری گاما،

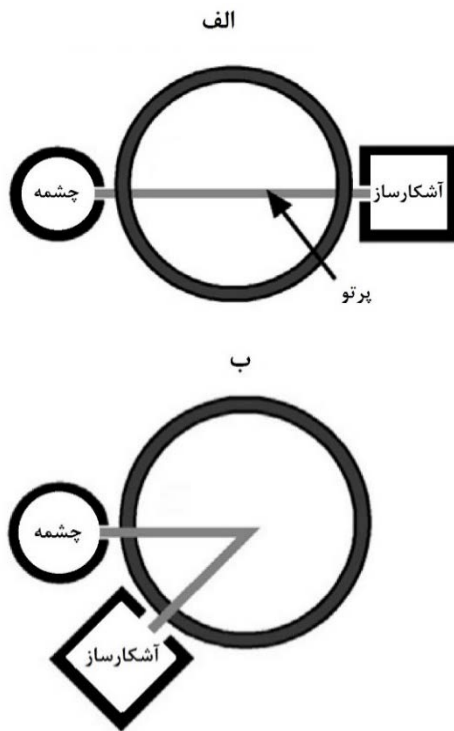
کد MCNPX،

سازه ساختمانی،

عیوب ساختاری،

شبیه‌سازی.

استناد: بیگزاده، امیرمحمد؛ عسکری، مجتبی (۱۴۰۱). کیفیت‌سنجی ساختار سازه گچی با بهره‌گیری از روش مقطع‌نگاری (مدل‌سازی و تجربی). *مجله فناوری آزمون‌های غیرمخرب*، ۳ (۱۱)، ۸۳-۷۲. <http://doi.org/10.30494/JNDT.2022.374812.1108>



شکل ۱- انواع روش‌های اندازه‌گیری مورد استفاده در دستگاه‌های مقطع‌نگاری صنعتی. (الف) روش عبوری (ب) روش پس‌پراکنندگی [۴].

تحلیلی دارای یک فرآیند فیلتر کردن و بک‌پروجکشن می‌باشند درحالی‌که روش‌های تکرارشونده فرآیند بک‌پروجکشن و بک‌پروجکشن را تکرار می‌کنند [۴-۶]. در طول دو دهه گذشته، فعالیت‌های تحقیقاتی بسیاری در سطح جهانی منجر به گسترش فناوری سی‌تی‌اسکن در حوزه‌های مختلف مهندسی شده است. پیشرفته‌ترین تحقیقات به مطالعات درون ساختاری مواد کاربردی در زمینه‌های مختلف مهندسی، با تأکید ویژه بر فناوری بتن و سازه‌های ساختمانی می‌پردازد [۱]. این تکنیک مبتنی بر جذب پرتوهای پرنفوذ گاما و ایکس، یک نمایش بصری از ساختار داخلی مواد با قدرت تفکیک مکانی در حدود میکرومتر و یا مقادیر دیگر بسته به قدرت تفکیک سامانه‌های مورد استفاده برای ثبت تصاویر ایجاد می‌کند. مقطع‌نگاری در حال حاضر یک ابزار ضروری در دیرینه‌شناسی^۱ است که می‌تواند ساختار داخلی آثار باستانی را بدون آسیب‌رساندن (در بسیاری موارد) به نمونه‌های منحصر به فرد آشکار کند [۳ و ۴]. در مهندسی

۱- مقدمه

فناوری مقطع‌نگاری، مبتنی بر ویژگی‌های پرتوهای پرنفوذ گاما و ایکس و اندرکنش آنها با ماده است. زمانی که این پرتوها از ماده عبور می‌کنند انرژی آنها بر اساس معادله لامبرت-بیرز کاهش می‌یابد [۱] (معادله ۱).

$$I = I_0 \exp \left[- \int \mu(S) ds \right] \quad (1)$$

که در آن I_0 شدت اولیه پرتوی ایکس، I شدت نهایی و $\mu(S)$ ضریب تضعیف خطی آن در طول مسیر آن است. آخرین پارامتر بیشتر به چگالی ρ ماده در هر نقطه‌ای که پرتو اشعه ایکس از آن عبور می‌کند بستگی دارد. نسبت μ/ρ تقریباً متناسب با Z^3 است که در آن Z عدد اتمی عنصر است [۲]. رابطه مستقیم بین اتلاف انرژی پرتوی ایکس و چگالی ماده، مبنای فناوری مقطع‌نگاری است. دستگاه‌های سی‌تی‌اسکن یک مولد گسیلنده پرتوهای ایکس یا گاما با شدت کنترل شده و یک آشکارساز دارند که شدت کاهش یافته این پرتوها را اندازه‌گیری می‌کند.

اساس کار همه‌ی دستگاه‌های مقطع‌نگاری گاما و ایکس در شکل ۱ نشان داده شده است. در روش عبوری چشمه و آشکارساز در دو طرف شی مورد مطالعه قرار می‌گیرند. در روش پس‌پراکنندگی، 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 به طور پیوسته توسط آشکارساز مورد اندازه‌گیری قرار می‌گیرد [۳ و ۴]. مقطع‌نگاری شامل چندین اندازه‌گیری در جهت‌های مختلف در اطراف شی مورد مطالعه می‌باشد. در مقطع‌نگاری عبوری معمولاً یک یا چند چشمه و آرایه‌ای از آشکارسازها در جهت دیگر برای به دست آوردن بک‌پروجکشن استفاده می‌شود. بر اساس هندسه سیستم و بک‌پروجکشن‌های به دست آمده می‌توان سطح مقطع شی مورد مطالعه را بازسازی نمود.

برای بازسازی تصویر دو شاخه وجود دارد: (۱) روش‌های تحلیلی و (۲) الگوریتم‌های تکرارشونده. اساس کار روش‌های تحلیلی استفاده از تبدیل معکوس رادون است که روش فیلتر بک بک‌پروجکشن از این نوع می‌باشد. الگوریتم‌های

¹ Paleontology

کامپیوتری توسط گیورگی و همکارانش جهت بررسی توزیع همگن الیاف در بتن انجام شد [۱۷]. به موارد دیگر میتوان به ارزیابی مکانیسم‌های آسیب بین ساختاری بتن تحت بارهای هیدرواستاتیکی و سه محوری، مشخصه یابی سیر شکست در بتن، کنترل هیدراتاسیون گچ، بررسی ناهمگنی حرارتی و ترکیب اصلی اکسید در گچبا استفاده از فناوری مقطع نگاری با ایکس نام برد [۱۸-۲۱]. کارهای معرفی شده مقطع نگاری مواد به روشهای تجربی با استفاده مولدهای ایکس و آشکارسازهای صفحه‌ای پرداخته شده است و مدلسازی سیستم‌های مقطع نگاری چندان پرداخته نشده است. در مطالعه حاضر بررسی ساختار داخلی یک سازه گچی به روش مقطع‌نگاری پرتوی با استفاده از امکانات موجود و با استفاده از یک چشمه رادیواکتیو گاما با دو روش مدلسازی و تجربی و سیستم آشکارسازی آرایه خطی بررسی شده است. هندسه مورد استفاده در اینجا روش عبوری است.

در این مطالعه با بهره‌گیری از آشکارساز آرایه‌ای و نیز یک منبع گسیل پرتوی گاما که یک چشمه سزیم ۱۳۷ بود به بررسی کیفیت یک سازه گچی پرداخته شد. درون این سازه گچی میلگردهای آهنی با قطرهای ۱۰، ۱۵، ۲۰ و ۲۰ سانتیمتر قرار گرفتند و یک توپ پر از هوای به قطر ۸ سانتیمتری نیز در نقش عیب ساختاری در آن جای داده شد. قبل از انجام آزمون تجربی، هندسه آزمایش با بهره‌گیری از کد ترابرد هسته‌ای مونته‌کارلوی MCNPX مدل‌سازی گردید و تصاویر خروجی آن با استفاده از الگوریتم توسعه داده شده در نرم‌افزار متلب بازسازی شد. در گام بعدی آزمایش تجربی با نمونه واقعی انجام شد. تصاویر به دست آمده بازسازی شدند.

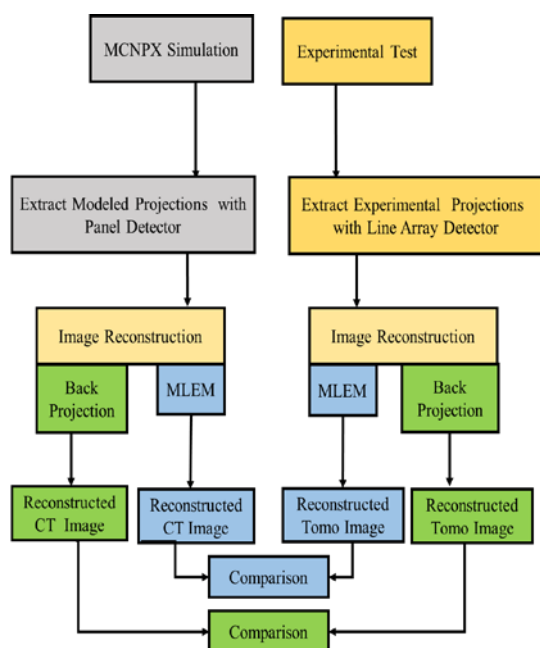
۲- مدل‌سازی

۲-۱ مدل‌سازی سازه گچی

برای این منظور یک سازه گچی مطابق با طرح تجربی مدل شد. ابعاد این سازه به ابعاد $18 \times 20 \times 20$ سانتیمتر مکعب است که در داخل آن چهار عدد میلگرد آهنی به طول ۲۰ سانتیمتر و به قطرهای ۱۰، ۱۵، ۱۵ و ۲۰ میلی‌متر قرار دارد و یک حباب هوا به قطر ۸ سانتیمتر نیز در میان این میله‌ها و در مرکز سازه گچی قرار گرفت. برای ایجاد

مواد، هنگام آنالیز ریزساختار داخلی مواد جدید و یا بهبود یافته، بسیار مفید است، زیرا از تصاویری که تولید می‌کند می‌توان جهت اصلاح ماده و بهبود رفتار ماکروسکوپی آن بهره برد [۱]. مهندسان مکانیک از آن، هم در آنالیز عیوب داخلی فلزات و هم در مطالعه مواد کامپوزیتی استفاده می‌کنند [۱]. مهندسان عمران با این روش به مطالعه ساختاری سنگ و کانی‌ها و عیوب ریزساختاری بتن می‌پردازند [۱]. یکی از اولین مطالعات در استفاده از فناوری مقطع‌نگاری در زمینه میراث فرهنگی و آثار باستانی این در سال ۱۹۸۶ توسط نوتمن و همکارانش منتشر شده است [۹]. از دیگر کاربردهای آن می‌توان به آنالیز ساختار فلزات، کامپوزیتها، در بازرسی مواد مورد استفاده در روسازی‌ها مانند بتن آسفالتی، در شناسایی سنگها اشاره نمود [۱۰-۵]. گچ و بتن پرمصرفترین مصالح ساختمانی در جهان هستند [۱۱]. از مزایای آنها میتوان هزینه کم، فناوری تولید در دسترس جهانی و دوام آنها نام برد. با این حال، دارای معایب مختلفی است که به همان اندازه شناخته شده است، از جمله پراکندگی بالای خواص مکانیکی آن، زیرا در واقع یک ماده مرکب ساخته شده از سنگدانه درشت، سنگدانه ریز، سیمان و آب است. مقطع‌نگاری اطلاعات مفیدی در مورد ریزساختار داخلی بتن ارائه می‌دهد در این مواد، مطالعه تخلخل داخلی آن بسیار مورد توجه است، زیرا مستقیماً بر بسیاری از پاسخ‌های ماکروسکوپی تأثیر می‌گذارد. اولین کار تحقیقاتی منتشر شده توسط مورگان و همکارانش در سال ۱۹۸۰ آغاز شد و اکنون بسیار گسترده شده است و تحقیقات فراوانی در این حوزه منتشر شده است [۱۲]. پلیس و همکارانش در کار خود به بررسی سریع و ساده تخلخل بتن با استفاده از روش مقطع‌نگاری با باریکه ایکس پرداخته اند [۱۳]. لو و همکارانش به اندازه‌گیری پارامترهای حباب هوا در داخل بتن سیمانی پرتلند با استفاده از میکرو-توموگرافی با اشعه ایکس پرداختند [۱۴]. اندازه‌گیری فضاهای خالی در بتن سبک با استفاده از توموگرافی کامپیوتری اشعه ایکس توسط همین گروه تحقیقاتی انجام شد [۱۵]. در کار دیگر مطالعه تطبیقی آسیب ریزساختاری ناشی از ضربه در بتن با استفاده از میکروتوموگرافی کامپیوتری اشعه ایکس انجام شد [۱۶]. مشاهده الیاف فولادی در بتن مسلح با توموگرافی

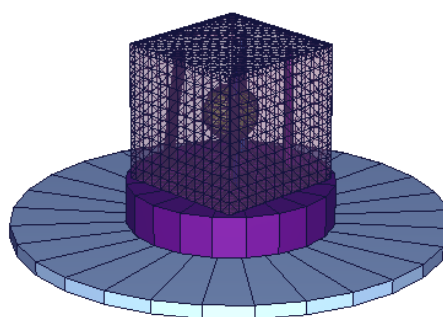
مبتنی بر رادیوایزوتوپ از نوع عبوری و بخش آشکارسازی و ترابرد ذرات.



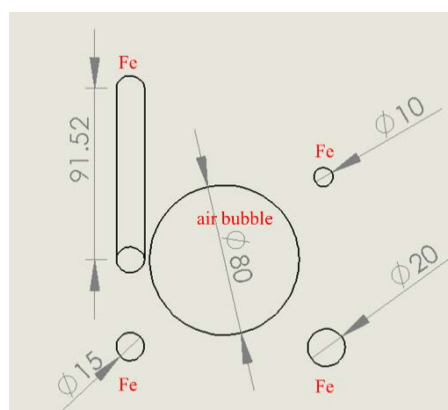
شکل ۳- الگوریتم استخراج پروجکشن‌ها

یکی از کدهایی است که می‌توان از آن در ترابرد ذرات یون‌ساز استفاده نمود. این 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 [۲۲]. فلوجارت الگوریتم مورد استفاده برای بازسازی تصاویر حاصل از آزمون تجربی و نیز بخش شبیه‌سازی در شکل ۳ نشان داده شده است، در این فلوجارت گام دریافت تصاویر، بازسازی به دو روش در هر دو فاز مدل‌سازی و آزمایش تجربی و مقایسه نظیر به نظیر آنها نشان داده شده است. در شکل ۴ 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 $CdWO_4$ مدل‌سازی شد. در کار تجربی از یک آشکارساز ستونی استفاده گردیده است و در کار شبیه‌سازی برای دستیابی

حباب از یک توپ کوچک پلاستیکی با قطر ۸ سانتیمتر استفاده شد. یکی از میله‌ها نیز که قطر آن ۱۵ میلی‌متر بود به صورت کج و با زاویه حدود ۳۰ درجه از راستای محور عمودی قرار داده شد تا در تصویر مقطع‌نگاری نهایی آن را به عنوان یکی نقص در سازه گچی بتوان مورد بررسی قرار داد. طرحی از این نمونه گچی در شکل ۲ نشان داده شده است.



الف



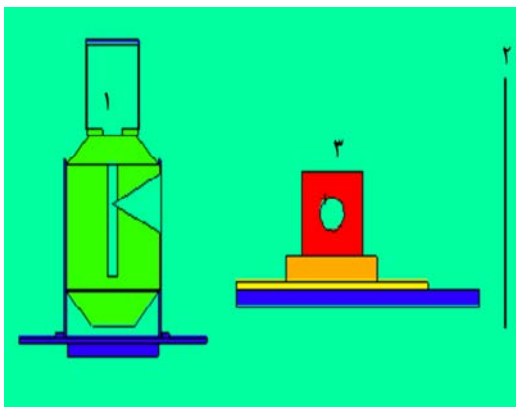
ب

شکل ۲- طرحی از نمونه مدل‌سازی شده (الف) نمایی شفاف شده از داخل فانتوم گچی در فضای مدل‌سازی (ب) جایگاه میله‌ها و ابعاد آن‌ها در فانتوم

فاصله مرکز به مرکز هر کدام از میله از یکدیگر ۹۰ میلی‌متر در نظر گرفته شد.

برای مدل‌سازی سیستمی متشکل از مولد پرتوی گاما و نیز سامانه آشکارسازی باید از کدی استفاده نمود که قابلیت تعریف هر بخش آشکارسازی و بخش مولد پرتوی در آن ممکن باشد به عبارت دیگر قابلیت مدل‌سازی یکسوساز چشمه رادیواکتیو با جزئیات و نیز بخش آشکارساز آرایه‌ای و در ادامه استفاده از آن در قالب یک دستگاه تصویربرداری

جایگذاری شدند.



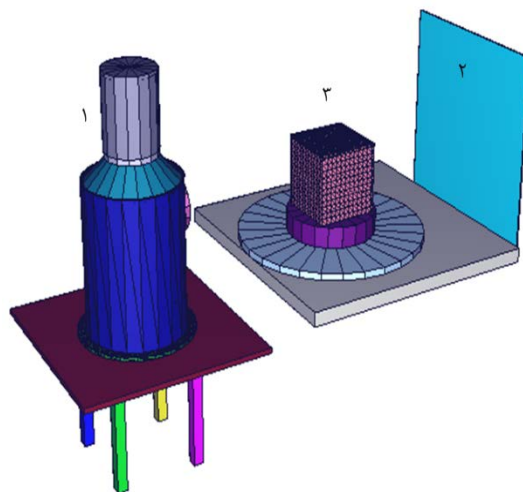
شکل ۵- نمای مقطعی از هندسه مدل‌سازی شده (۱) نگاه‌دارنده چشمه (۲) آشکارساز صفحه‌ای (۳) فانتوم گچی

نمایی از فانتوم طراحی شده در شکل ۶ نشان داده شده است. در گام بعدی پس از نصب میله‌ها در داخل ظرف بالک گچی یک توپ پلاستیکی به قطر ۸ سانتیمتر در میان میله‌ها با هدف ایجاد یک نقص ساختاری در داخل سازه گچی قرار داده شد و در آن محل ثابت گردید. پس از ثابت کردن اولیه این المان‌ها، به‌مرور مخلوط گچی به داخل چارچوب ساخته شده اضافه گردید و پس از خشک شدن گچ، به‌مرور لایه به لایه مخلوط گچی اضافه گردید تا سازه گچی نهایی به شکل نشان داده در شکل ۶ ب درآید. همچنین یکی از میله‌ها تعبیه شده در داخل ساختار گچی نیز به صورت کج و با حدود زاویه ۳۰ درجه از راستای محور عمودی قرار داده شد که در شکل ۶ الف قابل مشاهده 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 داده شد که کار تنظیم نمونه در زوایای مختلف آسان‌تر شود.

سریع‌تر به تصاویر از یک سیستم آشکارسازی پنل که ابعاد هر کدام از پیکسل‌های آن برابر با ابعاد آشکارساز دستگاه اصلی بود مدل‌سازی شد.

۲-۲ مدل‌سازی دستگاه تصویربرداری

مدل دستگاه تصویربرداری از بخش‌های اصلی چشمه پرتوزا، محل استقرار نمونه تحت اسکن و سامانه آشکارسازی تشکیل شده است؛ که در شکل ۴ نمایی از هندسه مدل شده نمایش داده شده است. تصویر از سطح مقطع هندسه مدل‌سازی شده نیز در شکل ۵ که اجزای تشکیل‌دهنده سیستم را نشان می‌دهد، آورده شده است.



شکل ۴- نمایی از دستگاه مدل‌سازی شده (۱) نگاه‌دارنده چشمه (۲) آشکارساز صفحه‌ای با قدرت تفکیک 4.6×4.6 میلی‌متر مربع (۳) فانتوم گچی

برای اجرای برنامه‌ها از کامپیوتری با ۱۶ هسته به طور موازی بهره برده شد. در این قسمت از دستورات کارت مش تالی استفاده شد. برای رسم شکل‌ها از الگوریتم نوشته‌شده در نرم‌افزار MATLAB استفاده شد.

۳- تجربی (ابزار تشکیل دهنده سیستم)

۳-۱ طراحی فانتوم

طرح فانتوم یک مکعب از جنس گچ در نظر گرفته شد. میله‌هایی به قطر ۱۰، ۱۵ و ۱۵ و ۲۰ میلی‌متر به ارتفاع یکسان ۲۲.۵ سانتیمتر از جنس آهن، برش داده شدند و به فاصله مرکزی ۹ سانتیمتر از یکدیگر در داخل سازه گچی

اندازه‌گیری کرد [۲۳]. در این کار از یک آشکارساز کریستال سوسوزن آرایه‌های خطی از جنس $CdWO_4$ کوپل با دیودهای سیلیکونی بهره برده شد. این آرایه متشکل از ۱۲۸ عدد آشکارساز با ابعاد پیکسل ۸ میلی‌متر بود. این نوع از کریستال‌های سوسوزنی دارای چگالی بالا $7/9$ گرم بر سانتیمتر مکعب، عدد اتمی بالا و نیز بهره نوری نسبتاً بالا هستند و عددی در حدود ۲۸ الکترون به ازای یک کیلو الکترون‌ولت انرژی است که پرتوی فرودی در آن سپارش می‌کند. گسیل بیشینه این کریستال در طول‌موج ۴۷۵ نانومتر است. خروجی نور بالا و پستابی^۲ کمی که دارد آن را برای استفاده با فوتودیودهای سیلیکونی در آشکارسازهای اسکنرهای مقطع‌نگارهای کامپیوتری (CT) پزشکی و صنعتی ایدئال می‌کند [۲۴]. مقاومت پرتوی بسیار خوبی دارد و وابستگی دمایی آن در محدوده ۰ تا ۶۰ درجه سلسیوس کم است. چگالی بالای آن، آن را به گزینه مناسبی برای تصویربرداری انرژی‌های بیشتر از ۳۰۰ keV برای مباحث امنیتی در بازرسی چمدان، کانتینر و اسکن خودرو تبدیل کرده است [۲۵]. یک فوتودیود سیلیکونی از اثر فوتوالکتریک داخلی استفاده می‌کند، پدیده‌ای که در آن خواص الکتریکی آشکارساز با برخورد نور به آن تغییر می‌کند. همان‌طور که از نام آن پیداست، فوتودیود سیلیکونی یک نیمه‌هادی است. هنگامی که نور به این نیمه‌هادی برخورد می‌کند، اگر انرژی نور بیشتر از شکاف نواری باشد، الکترون‌های باند ظرفیت به نوار رسانایی برانگیخته می‌شوند و حفره‌هایی در نوار ظرفیت اصلی باقی می‌مانند. این جفت‌های الکترون-حفره در سراسر نیمه‌هادی ایجاد می‌شوند، اما در ناحیه تخلیه، میدان الکتریکی باعث می‌شود که الکترون‌ها به سمت ناحیه N- و حفره‌ها به سمت ناحیه P شتاب بگیرند. در نتیجه، الکترون‌ها در ناحیه N و حفره‌ها در ناحیه P تجمع می‌یابند و این دو ناحیه به ترتیب دارای بار منفی و مثبت می‌شوند. اگر این به یک مدار متصل شود، جریان می‌یابد. شکاف نواری سیلیکون تقریباً ۱.۱۲ eV است، بنابراین جریان فقط برای طول‌موج‌هایی جریان می‌یابد که انرژی نوری بیشتر از این دارند [۲۶]. فوتودیودهای سیلیکونی دارای مزایایی نسبت به لوله‌های فوتومولتی‌پلایر از قبیل قیمت کمتر، عدم نیاز به منبع تغذیه اختصاصی هستند.

² After glow



شکل ۶- فانتوم ساخته شده برای آزمایش تجربی الف) میله آهنی و حباب هوا ب) گچی کامل شده

۲-۳ راه‌اندازی سیستم تصویربرداری

شماتیک سه‌بعدی از هندسه تجربی و مدل‌سازی شکل ۷ نشان داده شده است.

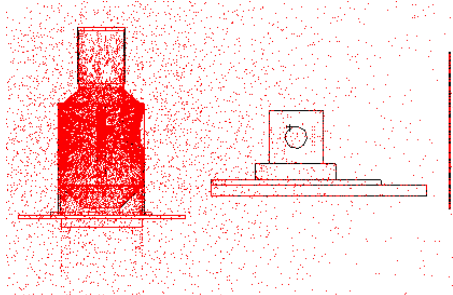
اجزای اصلی این سیستم به ترتیب عبارت‌اند از:

۱- آشکارساز سوسوزن

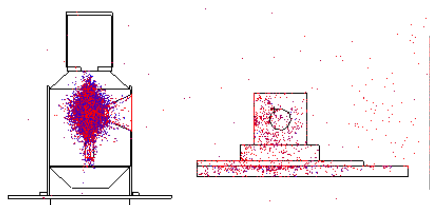
آشکارسازهای سوسوزن ابزاری برای تشخیص و اندازه‌گیری پرتوهای یون‌ساز با استفاده از اثر برانگیختگی پرتوی فرودی بر روی یک ماده سوسوزن و آشکارسازی پالس‌های نور حاصله است. این بخش شامل یک سوسوزن است که در پاسخ به تابش‌های فرودی، فوتون تولید می‌کند، یک آشکارساز نوری حساس معمولاً یک تقویت‌کننده نوری^۱، یک دوربین دستگاه همراه با حسگر CCD یا یک دیود نوری) که نور را به سیگنال الکتریکی تبدیل می‌کند و الکترونیک برای پردازش این سیگنال. آشکارسازهای سوسوزن به طور گسترده در حفاظت در برابر تابش، سنجش مواد رادیواکتیو و تحقیقات فیزیک استفاده می‌شوند، زیرا می‌توان آن‌ها را با قیمت مناسب و در عین حال با راندمان کوانتومی خوب که برای یک سوسوزن نوعی ۱۵ الی ۲۰ درصد است ساخت و هم شدت و هم انرژی تابش تابشی را

¹ Photo Multiplier Tube

می‌شوند و پس از برخورد به آن 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 زمانیکه هیچ نوع ماده بر سر راه چشمه قرار نگرفته باشد و زمانیکه مواد در سر راه چشمه باشد در شکل ۸ ب نشان داده شده است.



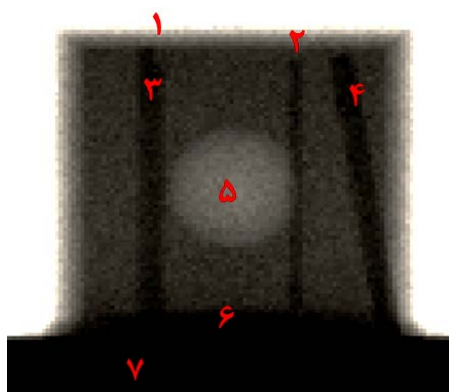
الف



ب

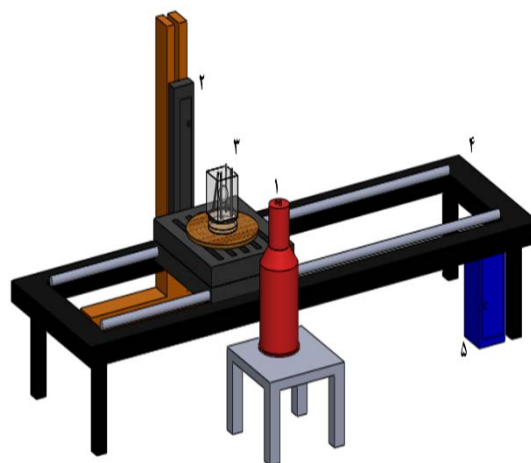
شکل ۸- سطح مقطع نشان‌دهنده نحوه تابش چشمه الف)، بدون حضور ماده در مسیر ذرات (از کنار) ب) با حضور ماده در مسیر ذرات (از کنار)

۵-۲ تصویر فانتوم خروجی سیستم مدل‌سازی شده تصویر ثبت شده از فانتوم نتیجه مدل‌سازی شکل ۹ نشان داده شده است.



شکل ۹- تصویر شبیه‌سازی شده از فانتوم در زاویه ۰ درجه ۱ تا ۴ میلیه‌های آهنی، ۵ حباب هوا، ۶ فانتوم گچی و ۷ نگه‌دارنده

۲- سیستم جمع‌آوری داده و پردازش تصویر برای داده‌برداری از کارت‌های جمع‌آوری داده استفاده شده است. این کارت، سیگنال‌های خروجی آشکارساز سوسوزن را جمع‌آوری کرده، از نظر زمانی پردازش کرده و نویزهای احتمالی را حذف می‌نماید. در نهایت با اسکن کل جسم، اطلاعات لازم از کلیه نقاط آن جسم تهیه شده و نرم‌افزار پردازشی که در این کار از بسته نرم‌افزاری نوشته شده در MALAB بود، تصویر نهایی تولید، پردازش می‌شود. شدت پیکسل‌های این تصویر با تعداد فوتون‌های پس پراکنده‌ی آشکارسازی شده در هر تابش پرتو سوزنی مرتبط خواهد بود.



شکل ۷- 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

۴- 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.

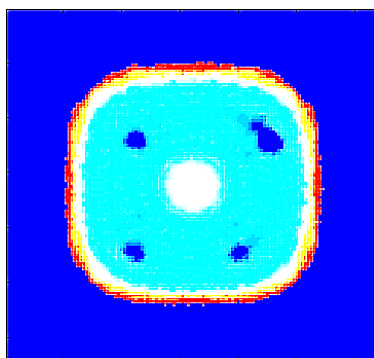
۵- نتایج تصویربرداری

۵-۱ طراحی حفاظ

در شکل ۸ می‌توان نمای سطح مقطع از نحوه خروج ذرات از چشمه را مشاهده نمود. ذرات از چشمه خارج

۵-۵ مدل‌سازی به روش MLEM

در شکل ۱۲ تصویری از سطح مقطع بازسازی شده از جسم مدل‌سازی شده به روش MLEM نشان داده شده است. در این شکل تصویر مقطع سازه گچی و میله‌های بکار گرفته شده در آن مشخص است و در شکل ۱۲ ب نیز به وضوح وجود حفره در داخل سازه مشهود است.



الف



ب

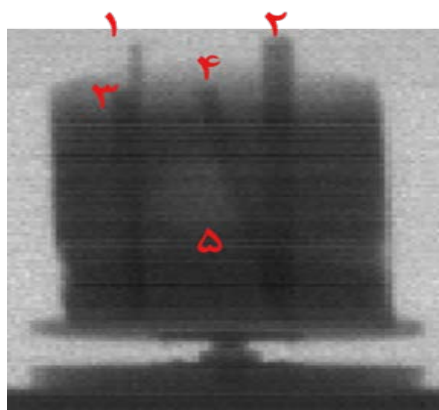
شکل ۱۲- تصویر از سطح مقطع فانتوم نتیجه مدل‌سازی و بازسازی MLEM

۵-۶ تجربی به روش BackProjection

در شکل ۱۳ تصویری از سطح مقطع بازسازی شده از جسم تجربی به روش BackProjection نشان داده شده است. در این شکل تصویر مقطع سازه گچی و میله‌های بکار گرفته شده در آن با وضوح پایین مشخص است (شکل ۱۳ الف) و نیز در شکل ۱۳ ب پس از اعمال فیلتر موقعیت حفره در داخل سازه گچی مشخص است.

۵-۳ تصویر فانتوم از خروجی سیستم تجربی

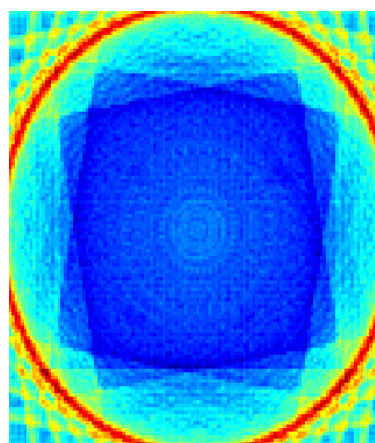
تصویر ثبت شده از فانتوم نتیجه تجربی که از طریق جایجا نمودن جسم بر روی ریل در یک زاویه مشخص ثبت شده است در شکل ۱۰ نشان داده شده است.



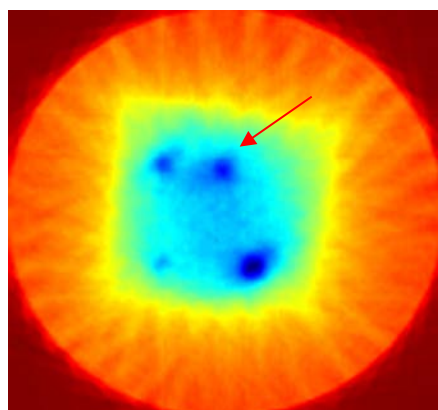
شکل ۱۰- تصویر واقعی از فانتوم در زاویه ۰ درجه، ۱ تا ۴ میله‌های آهنی، ۵ حباب هوا

۵-۴ مدل‌سازی به روش BackProjection

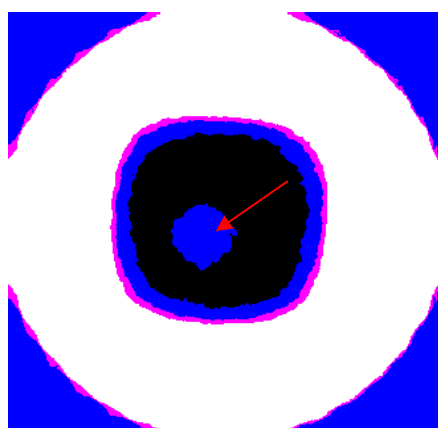
در شکل ۱۱ تصویری از سطح مقطع بازسازی شده از جسم مدل‌سازی شده به روش BackProjection نشان داده شده است. در این شکل مقطع سازه مشخص است اما قطعات بکار گرفته شده در داخل آن و تهی‌جایی ایجاد شده در آن مشاهده نمی‌گردد.



شکل ۱۱- تصویر از سطح مقطع فانتوم نتیجه مدل‌سازی و بازسازی BackProjection



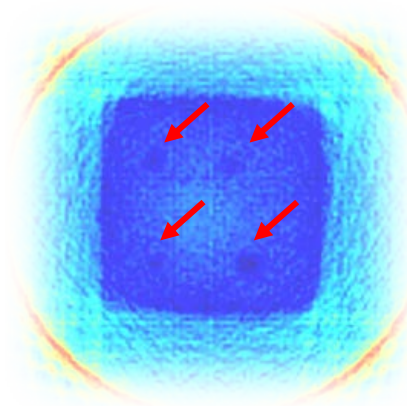
الف



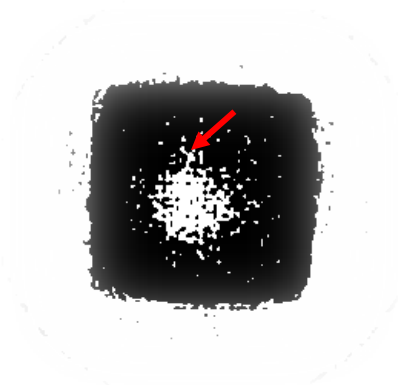
ب

شکل ۱۴- تصویر از سطح مقطع فانتوم نتیجه تجربی و بازسازی MLEM-الف) نحوه فراگیری میلگردها در داخل فانتوم گچی، ب) اعمال فیلتر بر روی تصویر الف و نمایش موقعیت حباب موجود در داخل سازه گچی

فناوری مقطع‌نگاری یک ابزار تحقیقاتی قدرتمند برای محققان بسیاری از زمینه‌های مهندسی بوده و حجم عظیمی از تحقیقات در طول دو دهه گذشته انجام شده است که این فناوری نقش اصلی در کار را ایفا می‌کند. در این مطالعه کیفیت‌سنجی ساختار یک سازه گچی با بهره‌گیری از یک دستگاه کارگو اسکنر متشکل از یک چشمه رادیوایزوتوپی گامازا و آشکارساز آرایه‌ای خطی به در دو فاز مدل‌سازی و تجربی مورد بررسی قرار گرفت و نتایج آنها با یکدیگر مقایسه گردید و همچنین عملکرد سیستم اسکنر در ارائه تصویر از ساختار درونی نمونه مورد بررسی قرار گرفت. با توجه به جایگاه مهم این فناوری در آنالیز مواد و نیز تجهیزات گران قیمت بکار گرفته شده در آن لذا بهتر است قبل از انجام تستهای تجربی، مدلی از سیستم‌های مقطع‌نگاری مبتنی بر پرتوهای ایکس و گاما ایجاد نمود تا بتوان



الف



ب

شکل ۱۳- تصویر از سطح مقطع فانتوم نتیجه تجربی و بازسازی BackProjection، الف) موقعیت میله‌ها که در تصویر مشخص شده است، ب) اعمال فیلتر بر روی تصویر الف و نمایش موقعیت حفره

۵-۷ تجربی به روش MLEM

در شکل ۱۴ تصویری از سطح مقطع بازسازی شده از جسم تجربی به روش MLEM نشان داده شده است. در شکل ۱۴ الف تصویر مقطع سازه به همراه میله‌های بکار گرفته شده و نیز نحوه قرارگیری آنها در ساختار داخلی آن به وضوح مشخص است و در شکل ۱۴ ب نیز نتیجه بازسازی تصاویر داخلی سازه طراحی شده با سیستم آشکارساز مجهز به آشکارساز آرایه‌ای با قدرت تفکیک مکانی ۸ میلی‌متر و مولد پرتوی یون‌ساز حاوی چشمه گسیلنده گامای سزیم ۱۳۷ با انرژی ۶۶۱/۷ کیلو الکترون‌ولت نشان داده شده است. برای بازسازی و پردازش تصاویر از الگوریتم‌های نوشته شده با نرم‌افزار متلب نسخه ۲۰۱۴ بهره برده شد. به وضوح وجود حفره در داخل سازه گچی را نشان می‌دهد.

نمونه‌های مختلف مورد استفاده قرار داد.

۶- تعارض منافع

هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسندگان وجود ندارد.

۷- منابع

- [1] Vicente, M.A., González, D.C. and Mínguez, J., 2019. Recent advances in the use of computed tomography in concrete technology and other engineering fields. *Micron*, 118, pp.22-34
- [2] Cooke, K., 1998. X-ray interactions with matter. *Practical Radiotherapy: Physics and Equipment*, 39.
- [3] More, N., Basse-Cathalinat, B., Baquey, C., Lacroix, F. and 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), pp.531-536.
- [4] J. Lambert, A. R. Chambers, I. Sinclair, S.M. Spearing., 2012. 3D damage characterisation and the role of voids in the fatigue of wind turbine blade materials, *Composites Science and Technology*. 72(2), pp.337-343.
- [5] Hayashi, T., Kobayashi, T. and Takahashi, J., 2017. Quantification of the void content of composite materials using soft X-ray transmittance. *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, 30(11), pp.1522- 1527.
- [6] G. L. Zeng, *Medical image reconstruction: a conceptual tutorial*, Springer, New York, 2010.
- [7] Wong, P.A., 1981. Computed tomography in paleopathology: technique and case study. *American Journal of Physical Anthropology*, 55(1), pp.101-110.
- [8] F.F. Hopkins, I.L. Morgan, H.D. Ellinger, R.V. Klinksiek, G.A. Meyer and J.N., 1981. Thompson, *Industrial tomography applications*, *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 28(2), pp.1717-1720.
- [9] Notman, D.N., Tashjian, J., Aufderheide, A.C., Cass, O.W., Shane 3rd, O.C., Berquist, T.H., Gray, J.E. and Gedgudas, E., 1986. Modern imaging and endoscopic biopsy techniques in Egyptian mummies. *American journal of roentgenology*, 146(1), pp.93-96.
- [10] Hildebrand, B. and Harrington, T., 1980. Mapping of materials stress with ultrasonic tomography.
- [11] Giama, E. and Papadopoulos, A.M., 2015. Assessment tools for the environmental evaluation of concrete, plaster and brick

سیستم را قبل از راه اندازی تجربی برای نمونه های مختلف و آشکارسازهای مختلف ارزیابی نمود. در فاز مدل‌سازی از کد مونت‌کارلوی MCNPX برای مدل‌سازی سیستم واقعی کارگو اسکنر استفاده شد و برای دریافت تصویر از جسم یک آشکارساز صفحه‌ای که ابعاد پیکسل‌های آن مشابه به نمونه آشکارساز آرایه‌ای خطی واقعی بود مدل‌سازی شد. در ادامه به منظور تهیه تصاویر مقطع‌نگاری ابتدا یک سازه گچی با بهره‌گیری از میلگردهای آهنی با قطرهای ۱۰، ۱۵، ۱۵ و ۲۰ سانتیمتر، یک توپ پر از هوای به قطر ۸ سانتیمتری در نقش عیب ساختاری، ساخته شد و همین سازه در محیط کد MCNPX پیاده‌سازی شد. در فاز تجربی نمونه ساخته شده بر روی یک صفحه مدرج گردان قرار داده شد. با هدف تهیه تصاویر ۳۶ تصویر از جسم با چرخاندن آن از ۰ تا ۳۶۰ درجه با گام زاویه‌ای ۱۰ درجه گرفته شد و تصاویر آن ثبت شدند، در فاز مدل‌سازی جسم در زوایای مذکور شبیه‌سازی شد و تصاویر نتایج شبیه‌سازی ثبت شدند. برای دستیابی به تصاویر سطح مقطع جسم از دو روش بازسازی BackProjection و MLEM استفاده شد. نتایج مدل‌سازی و تجربی هر دو روش بازسازی با یکدیگر مقایسه شدند. در تصاویر تجربی امکان تشخیص میله مقطع میله‌ها و حباب هوای بکار گرفته شده در داخل ساختار داخلی نمونه وجود دارد. در مورد کیفیت تصاویر بازسازی شده می‌توان بیان نمود که با کوچک‌تر نمودن گام چرخش جسم می‌توان تصاویر سطح مقطع با کیفیت بالاتر به دست آورد. در نهایت نیز تصویر از سطح مقطع فانتوم نتیجه تجربی و بازسازی MLEM نسبت به سایر تصاویر بازسازی شده مدل‌سازی و تجربی از نظر کیفیت و تفکیک المان‌های موجود در نمونه بهتر بود. نتایج نشان داد که در بخش تجربی بازسازی تصاویر به دست آمده با روش MLEM نسبت به Back Projection دارای کارایی بیشتری است و در آن تصاویر میلگردهای به کار گرفته شده و نیز حباب هوای داخل با وضوح بیشتری قابل مشاهده است و همچنین موقعیت میلگردهای که در داخل این سازه به صورت کج قرار داده شده است به وضوح مشخص می‌باشد. نتایج تطابق خوب بین خروجی مقطع نگاره حاصل از مدل‌سازی با تجربی را نشان می‌دهد و نشان داد که مدل شبیه‌سازی شده را می‌توان برای آنالیز مقطع‌نگاری برای هندسه‌های مختلف و

- AGU Fall Meeting Abstracts, pp. DI31A-0391.
- [22] S.L. Waters, MCNPX user's manual, Los Alamos National Laboratory, 2002.
- [23] Knoll, G.F., 2010. Radiation detection and measurement. John Wiley & Sons.
- [24] Ignatov, S.M., Potapov, V.N., Fedin, A.V., Chirkin, V.M., Urutskoev, L.I., Gostilo, V.V., Kondrashov, V.V. and Sokolov, A.D., 1997. Scintillator-photodiode linear arrays for X-ray inspection system. MRS Online Proceedings Library, 487(1), pp.545-551.
- [25] Bendahan, J., 2017. Vehicle and cargo scanning for contraband. Physics Procedia, 90, pp.242-255.
- [26] Reiff, G., Squillante, M.R., Serreze, H.B., Entine, G. and Huth, G.C., 1982. Large area silicon avalanche photodiodes: Photomultiplier tube alternate. MRS Online Proceedings Library (OPL), 16 and Future Directions. *Journal of International Marketing*, 25 (4), 1-24.
- [4] Smith J. & White, B. (2000). Novel Food Processing Technologies, *Longman*, 12-34.
- [5] Mettam, G.B. & Adams L. B. (2009). How to Prepare an Electronic Version of Your Article, *Introduction to the Electronic Age*, E-Publishing Inc., 281-304.
- elements production. *Journal of Cleaner Production*, 99, pp.75-85.
- [12] Morgan, I.L., Ellinger, H., Klinksiek, R. and Thompson, J.N., 1980, January. Examination of concrete by computerized tomography. In *Journal Proceedings*. 77(1) 1, pp. 23-27. 1540.
- [13] Du Plessis, A., Olawuyi, B.J., Boshoff, W.P. and Le Roux, S.G., 2016. Simple and fast porosity analysis of concrete using X-ray computed tomography. *Materials and structures*, 49(1), pp.553-562.
- [14] Lu, H., Peterson, K. and Chernoloz, O., 2018. Measurement of entrained air-void parameters in Portland cement concrete using micro X-ray computed tomography. *International Journal of Pavement Engineering*, 19(2), pp.109-121.
- [15] Lu, H., Alymov, E., Shah, S. and Peterson, K., 2017. Measurement of air void system in lightweight concrete by X-ray computed tomography. *Construction and Building Materials*, 152, pp.467-483.
- [16] Sun, Q., Martin, B., Williams, B., Heard, W., Frew, D. and Nie, X., 2022. Comparative study on the impact-induced microstructural damage in concrete using X-ray computed micro-tomography. *Mechanics of Materials*, 168, p.104277.
- [17] Balázs, G.L., Czoboly, O., Lublőy, É., Kapitány, K. and Barsi, Á., 2017. Observation of steel fibres in concrete with Computed Tomography. *Construction and Building Materials*, 140, pp.534-541.
- [18] Poinard, C., Piotrowska, E., Malecot, Y., Daudeville, L. and Landis, E.N., 2012. Compression triaxial behavior of concrete: the role of the mesostructure by analysis of X-ray tomographic images. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 16(sup1), pp. s115-s136.
- [19] Yang, Z., Ren, W., Mostafavi, M., Mcdonald, S.A. and Marrow, T.J., 2013. Characterisation of 3D fracture evolution in concrete using in-situ X-ray computed tomography testing and digital volume correlation., 2013. In *8th International Conference on Fracture Mechanics of Concrete and Concrete Structures, FraMCoS*, pp. 236-242.
- [20] Adrien, J., Meille, S., Tadier, S., Maire, E. and Sasaki, L., 2016. In-situ X-ray tomographic monitoring of gypsum plaster setting. *Cement and Concrete Research*, 82, pp.107-116.
- [21] Bremner, P.M., Forte, A.M., Simmons, N.A. and Grand, S., 2017. Interpreting the GyPSuM Tomography Model in Terms of Thermal Heterogeneity and Major Oxide Composition. In