Semnan University

Journal of Modeling in Engineering

Journal homepage: https://modelling.semnan.ac.ir/

ISSN: 2783-2538



Type of Article (e.g. Research Article)

Design, Modeling, and Construction of a Shielding Chamber for the X-Ray Generator in an Industrial Tomography System

AmirMohammad Beigzadeh[a,*], Mojtaba Askari [b], Mohsen Sharifzadeh [c]

[a] *Department Name of Organization, Name of Faculty, University, City, Country (first author's affiliation)*
[b] *Department Name of Organization, Name of Faculty, University, City, Country (second author's affiliation)*

UNCORRECTED PROOF

PAPER INFO

Paper history:

Received:
Revised:
Accepted:

Keywords:
X ray shielding;
MCNP simulation;
industrial CT;
radiation protection;
dosimetry;
controlled area.

ABSTRACT

Industrial X-ray computed tomography (CT) systems have become indispensable in non-destructive testing, quality control, and material characterization. The high-energy ionizing radiation emitted by their X ray generators require robust shielding solutions to protect operators and the surrounding environment while complying with international safety standards, such as NCRP guidelines. This study presents the design, Monte Carlo modeling, construction, and performance evaluation of a custom shielding chamber developed for an industrial CT X ray generator. Using the MCNPX 2.7.0 simulation code, the radiation field around the generator was modeled under realistic operating conditions to optimize the shielding geometry and material configuration. The designed chamber, fabricated from 4 mm thick stainless steel with an additional 5 cm lead block positioned in the beam's forward direction, was constructed in the laboratory and experimentally validated. Comparisons between simulated and measured dose rates at multiple locations around the chamber (measured using a calibrated GRAETZ DoseDG dosimeter) showed excellent agreement, with all measurements remaining below the regulatory limit of 10 µSv/h in controlled areas. The validated model can serve as a predictive tool for designing shielding enclosures for a wide range of photon energies and generator configurations, reducing prototyping time and ensuring compliance with occupational radiation protection standards.
DOI: https://doi.org/

© 2024 Published by Semnan University Press.
This is an open access article under the CC-BY 4.0 license.(https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

*** Corresponding author.**
E-mail address: email of correponding author

How to cite this article:

نوع مقاله (به عنوان مثال مقاله پژوهشی)

طراحی، مدل‌سازی و ساخت اتاقک حفاظ برای مولد اشعه ایکس در یک سامانه مقطع‌نگاری صنعتی

امیرمحمد بیگ‌زاده[۱،*]، مجتبی عسکری[۲]، محسن شریف‌زاده[۳]

اطلاعات مقاله

دریافت مقاله: ...
بازنگری مقاله: ...
پذیرش مقاله: ...

واژگان کلیدی:
حفاظ پرتوی ایکس،
شبیه سازی MCNP،
مقطع‌نگاری صنعتی،
حفاظت پرتوی،
دزیمتری،
ناحیه تحت کنترل.

چکیده

سیستم‌های مقطع‌نگاری رایانه‌ای مبتنی بر اشعه ایکس صنعتی در آزمایش‌های غیرمخرب، کنترل‌کیفیت و بررسی مواد ضروری شده‌اند. تابش یون‌ساز پرانرژی گسیلی شده توسط مولدهای اشعه ایکس آنها، نیازمند راهکارهای حفاظتی قوی برای محافظت از کاربرها و محیط اطراف در عین رعایت استانداردهای ایمنی بین‌المللی، مانند دستورالعمل‌های NCRP، است. این مطالعه، طراحی، مدل‌سازی مونت کارلو، ساخت و ارزیابی عملکرد یک اتاقک حفاظ توسعه یافته برای یک مولد اشعه ایکس صنعتی را ارائه می‌دهد. با استفاده از کد شبیه‌سازی MCNPX ، میدان تابشی اطراف مولد تحت شرایط عملیاتی واقع بینانه مدل‌سازی شد تا هندسه حفاظ و پیکربندی مواد بهینه شود. اتاقک طراحی شده، که از فولاد ضد زنگ با ضخامت ۴ میلی‌متر و یک بلوک سربی ۵ سانتی‌متری اضافی که در جهت رو به جلوی پرتو قرار گرفته است، ساخته شد و در آزمایشگاه به صورت تجربی اعتبارسنجی شد. مقایسه بین نرخ دز محاسبه شده توسط شبیه‌سازی و اندازه‌گیری شده در چندین مکان در اطراف اتاقک حفاظ (اندازه‌گیری شده با استفاده از یک دزیمتر کالیبره شده GRAETZ DoseDG) تطابق بسیار خوبی را نشان داد، به طوری که تمام اندازه‌گیری‌ها در مناطق کنترل شده زیر حد مجاز ۱۰ میکروسیورت بر ساعت باقی ماندند. نتایج نشان داد مدل اعتبارسنجی شده می‌تواند به عنوان ابزاری پیش‌بینی‌کننده برای طراحی اتاقک‌های حفاظ برای طیف وسیعی از انرژی‌های فوتون و پیکربندی‌های مولد، کاهش زمان نمونه‌سازی و اطمینان از رعایت استانداردهای حفاظت در برابر اشعه شغلی عمل کند.

DOI: https://doi.org/

© 2024 Published by Semnan University Press.
This is an open access article under the CC-BY 4.0 license.(https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

UNCORRECTED PROOF

۱-مقدمه[۱]

پیشرفت فناوری تصویربرداری صنعتی منجر به استفاده گسترده از سیستم‌های مقطع‌نگاری مبتنی بر اشعه ایکس برای آزمایش‌های غیرمخرب، کنترل کیفیت و تعیین مشخصات مواد شده است. این سیستم‌ها برای نفوذ به مواد و تولید تصاویر داخلی دقیق به اشعه ایکس با انرژی بالا

* پست الکترونیک نویسنده مسئول: ...@..
۱. استادیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان
۲. استادیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان
۳. استادیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان

استناد به این مقاله: نحوه استناد فارسی در اینجا درج گردد.

متکی هستند که برای شناسایی عیوب، تضمین کیفیت محصول و پیشرفت تحقیقات علمی بسیار مهم است. بااین‌حال، تشعشعات یون‌ساز قوی گسیل شده توسط مولدهای اشعه ایکس، اجرای راه‌حل‌های حفاظ قوی را برای محافظت از کاربرها و محیط‌زیست ضروری می‌کند. سنگ بنای هر سیستم اندازه‌گیری مبتنی بر تشعشع در قابلیت‌های حفاظ پرتوی آن نهفته است. حفاظ مؤثر برای اطمینان از اینکه فوتون‌های پرانرژی و با شار بالای تولید شده در طول تصویربرداری اشعه ایکس در منطقه تعیین شده قرار می‌گیرند، بسیار مهم است، در نتیجه پرتوگیری را برای پرسنل به حداقل می‌رساند و با استانداردهای ایمنی سخت‌گیرانه مطابقت دارد. شورای ملی حفاظت در برابر تشعشع و اندازه‌گیری (NCRP) دستورالعمل‌هایی را برای طراحی حفاظ پرتوی برای اطمینان از ایمنی و انطباق ارائه می‌دهد[۱]. طراحی، مدل‌سازی و ساخت اتاقک حفاظ برای مولد اشعه ایکس در سامانه مقطع‌نگاری صنعتی از اهمیت بالایی برخوردار است، زیرا این فرایندها مستقیماً بر ایمنی، کارایی و دقت عملکرد سیستم تأثیر می‌گذارند. طراحی اصولی اتاقک با درنظرگرفتن استانداردهای تابشی و الزامات فنی، نخستین گام در تأمین حفاظت کامل از پرتوهای یونساز و بهینه‌سازی مصرف مواد است. مدل‌سازی دقیق با بهره‌گیری از نرم‌افزارهای ترابرد پرتوی، امکان تحلیل توزیع دز و تعیین ضخامت بهینه مواد حفاظتی را پیش از ساخت فراهم می‌سازد و از بروز خطاهای پرهزینه جلوگیری می‌کند. در نهایت، ساخت دقیق و استاندارد این اتاقک تضمین‌کننده ایمنی اپراتورها، پایداری سازه، و افزایش اعتماد به عملکرد سامانه مقطع‌نگاری در محیط‌های صنعتی است. از طرفی در طراحی، مدل‌سازی و ساخت حفاظ برای مولدهای اشعه ایکس در سامانه‌های مقطع‌نگاری صنعتی، رعایت دستورالعمل‌ها و اصول ارائه‌شده در گزارش ICRP 103(کمیسیون بین‌المللی حفاظت در برابر پرتوها) از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. این سند به‌عنوان مرجع بین‌المللی حفاظت پرتوی، بر سه اصل بنیادین توجیه، بهینه‌سازی و محدودسازی دز تأکید دارد. بر اساس این اصول، استفاده از منابع تابش باید دارای توجیه علمی و صنعتی باشد، میزان پرتودهی تا حد ممکن کاهش یابد (اصل ALARA: As Low As Reasonably Achievable)، و دز دریافتی افراد در محدوده‌های مجاز تعیین‌شده قرار گیرد. در این پژوهش، طراحی اتاقک حفاظ با هدف تحقق همین الزامات انجام شده است؛ به‌گونه‌ای که با انتخاب مناسب مواد جاذب تابش، تعیین ضخامت بهینه دیواره‌ها و رعایت فاصله ایمن اپراتور، میزان نشت اشعه در حد مجاز توصیه‌شده توسط ICRP 103 حفظ گردد. بدین ترتیب، ساختار حفاظتی پیشنهادی نه‌تنها کارایی سیستم مقطع‌نگاری را تضمین می‌کند، بلکه از ایمنی کاربران و محیط اطراف نیز به‌طور کامل اطمینان حاصل می‌نماید.

این مقاله به فرایند طراحی، مدل‌سازی و ساخت یک اتاقک حفاظ که به طور خاص برای مولد اشعه ایکس یک سیستم تصویربرداری مقطعی صنعتی طراحی شده است، می‌پردازد. رویکرد این مطالعه با تجزیه‌وتحلیل عمیق ویژگی‌های تابش و الزامات عملیاتی ژنراتور اشعه ایکس آغاز می‌شود. با استفاده از کد MCNPX مونت‌کارلو، یک ابزار به طور گسترده شناخته شده برای شبیه‌سازی انتقال و اندرکنش پرتوی، پرتوگیری را برای بهینه سازی پیکربندی هندسی اتاقک حفاظ شبیه‌سازی شد[۲].

مرحله ساخت شامل انتخاب دقیق مواد و تکنیک‌های ساخت برای دستیابی به سطح مورد نظر از کاهش پرتو و درعین‌حال حفظ یکپارچگی ساختاری محفظه است. موادی مانند سرب، بتن و آهن با چگالی بالا معمولاً به دلیل تعداد اتمی و چگالی بالای آنها استفاده می‌شود که به طور مؤثری فوتون‌های اشعه ایکس را تضعیف می‌کند[۳].

این مطالعه بر نقش حیاتی محافظ در تضمین ایمنی و کارایی سیستم‌های اندازه‌گیری مبتنی بر پرتوهای یونساز تأکید می‌کند. با ارائه راه‌حلی جامع برای حفاظت در برابر تشعشع، این مطالعه به حوزه گسترده‌تر فناوری تصویربرداری صنعتی کمک می‌کند و بینش‌ها و روش‌هایی را ارائه می‌دهد که می‌توانند برای کاربردهای آینده سازگار شوند. طراحی و ساخت مؤثر اتاقک‌های حفاظ نه‌تنها کارایی عملیاتی سیستم‌های تصویربرداری را افزایش می‌دهد، بلکه انطباق با استانداردها و مقررات صنعتی را نیز تضمین می‌کند[۴]. یک مطالعه توسط کیم و همکاران (۲۰۲۴) خواص حفاظتی مواد کامپوزیتی مختلف از جمله اکسید تنگستن، اکسید بیسموت و سولفات باریم را بررسی کرد. این تحقیق نشان داد که آرایش و ترکیب این مواد به طور قابل توجهی بر خاصیت حفاظ آنها تأثیر می گذارد. با بهینه سازی طراحی سازه، محققان به بیش از ۵ درصد افزایش در عملکرد حفاظ پرتوی دست یافتند[۵].

مطالعه دیگری توسط یو و همکاران (۲۰۲۳) استفاده از مواد

UNCORRECTED PROOF

لایه‌ای دوبعدی (۲ بعدی) مانند MoS2 و MXene را برای محافظت در برابر اشعه ایکس بررسی کرد. نتایج نشان داد که فیلم‌های چندلایه و ساختارهای ناهموار این مواد تا ۶۰ درصد قدرت تضعیف پرتوی بهتری نسبت به همتایان حجیم خود ارائه می‌دهند. این رویکرد جایگزین امیدوارکننده‌ای برای مواد حفاظ پرتوی سنتی مبتنی بر سرب که سنگین و برای محیط‌زیست خطرناک هستند، ارائه می‌دهد[۶].

Bibbo در مطالعه خود یک روش ساده برای طراحی حافظ اشعه ایکس بر اساس اصل محافظ مورد استفاده برای محفظه لوله اشعه ایکس پیشنهاد کرد. این روش بر محدودکردن پرتوهای نشتی از لوله اشعه ایکس تمرکز دارد و از سال ۱۹۸۵ با موفقیت در استرالیای جنوبی اجرا شده است[۷]. این رویکرد فرایند طراحی حفاظ پرتوی را با درنظرگرفتن تنها حداکثر خروجی تابش تجهیزات اشعه ایکس، بدون توجه به حجم کار یا اشغال مناطق مجاور، ساده می‌کند. این مطالعات تلاش‌های مداوم برای بهبود طراحی محافظ اشعه ایکس از طریق مواد و روش‌های نوآورانه را برجسته می کند. هدف محققان با پرداختن به محدودیت‌های مواد حفاظ سنتی و بررسی جایگزین‌های جدید، افزایش ایمنی و انطباق با استانداردهای صنعتی است.

داگلاس در مطالعه خود به توضیح محاسبات مونت‌کارلو می‌پردازد که برای تعیین عبور پرتوهای اشعه ایکس با پتانسیل ثابت از میان مواد مختلفی مانند سرب، بتن، دیوارپوش گچی، فولاد و شیشه انجام شده است. برای تولید منحنی‌های عبور پرتو برای طیف‌های اشعه ایکس با ولتاژهای ۷۰، ۱۰۰، ۱۲۰ و ۱۴۰ کیلوولت از سیستم کد EGS4 استفاده شده است. سپس این داده‌ها با نتایج اندازه‌گیری شده در سایر مقالات مقایسه شدند. در نهایت، داده‌های محاسبه شده برای ایجاد جداول اثر حفاظ پرتوی برای سرب و بتن و همچنین سایر مواد که در گزارش شماره ۴۹ NCRP ذکر نشده بودند، به کار رفتند[۸]. ادریسی و همکاران توسعه یک برنامه مونت‌کارلو مبتنی بر Geant4 به نام G4XRTube را برای شبیه‌سازی تولید پرتو ایکس از طریق تیوب‌های اشعه ایکس شرح می‌دهند. این برنامه می‌تواند طیف‌های اشعه ایکس را بر اساس پارامترهایی مانند زاویه آند، ولتاژ لامپ، فیلتر و ماده آند تولید کند. همچنین می‌توان از آن برای پیش‌بینی لایه نیم‌کننده (HVL) و بررسی اثر پاشنه آند استفاده کرد. نتایج به‌دست‌آمده با G4XRTube با داده‌های موجود در مقالات اعتبارسنجی شدند و تطابق خوبی با داده‌های تجربی و سایر کدهای شبیه‌سازی مانند TASMICS، SpekCalc و SpekPy نشان دادند[۹]. مایلز و همکاران در کار تحقیقاتی خود، توصیف دزیمتری یک تیوب اشعه ایکس آند چرخان را برای استفاده بالقوه در تحقیقات رادیوتراپی FLASH شرح می‌دهد. آنها از یک لوله اشعه ایکس فلوروسکوپی با ظرفیت بالا و توان ورودی ۷۵ کیلووات به عنوان یک تابش‌گر بالقوه FLASH استفاده کردند. آنها اثرات فاصله منبع تا سطح (SSD) و اندازه میدان را بر روی آهنگ دز و ویژگی‌های دز عمقی با استفاده از فیلم رادیوکرومیک EBT3 و دوزیمترهای ترمولومینسانس(TLD) در فانتوم‌های آب جامد سازگار با کیلوولت بررسی کردند. نتایج کار آنها نشان داد که با وجود انرژی اشعه ایکس پایین‌تر و SSD کوتاه مورد استفاده، آهنگ دز FLASH بالای ۴۰ گری بر ثانیه برای اهداف تا عمق ۱۰ میلی‌متر در آب جامد به دست آمد، با حداکثر آهنگ دوز سطحی ۹۶ گری بر ثانیه که در میدان باز در SSD 47 میلی‌متر اندازه‌گیری شد. این مطالعه نشان می‌دهد که فناوری لوله اشعه ایکس آند چرخان قادر به تولید پرتوهای تابشی در پشتیبانی از تحقیقات رادیوبیولوژی FLASH پیش‌بالینی است[۱۰]. کار عزیز و همکاران مطالعه‌ای را شرح می‌دهد که در آن از سیستم کد ترابرد ذرات و یون‌های سنگین (PHITS) برای شبیه‌سازی توزیع پراکندگی در یک اتاق اشعه ایکس برای پرتونگاری تشخیصی استفاده شده است. محققان اتاق اشعه ایکس، شامل اتاق تصویربرداری، اتاق کنسول کنترل و سایر ابعاد مربوطه را شبیه‌سازی کردند و از یک منبع نقطه‌ای با انرژی ۱۰۰ کیلوالکترون‌ولت برای ارزیابی توزیع پراکندگی استفاده کردند. نتایج نشان داد که شبیه‌سازی PHITS و اندازه‌گیری‌های تجربی، مقادیر قابل مقایسه‌ای دارند و اتاق کنسول کنترل بر اساس سطوح دز شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده، مکانی امن برای اپراتور در نظر گرفته می‌شود. دوز به‌دست‌آمده از شبیه‌سازی و اندازه‌گیری در محدوده دوز توصیه‌شده توسط ICRP-60 بود[۱۱]. مختاری و همکاران از یک شبکه عصبی مصنوعی (ANN) برای بهینه‌سازی طراحی حفاظ پرتوهای گاما استفاده کرده‌اند. آن‌ها ابتدا با به‌کارگیری کد شبیه‌سازی مونت‌کارلو و با استفاده از یک ماده حافظ پیشنهادی، داده‌های

UNCORRECTED PROOF

گسترده‌ای تولید کردند و دقت شبیه‌سازی را اعتبارسنجی نمودند. سپس این داده‌ها را به عنوان ورودی و هدف برای آموزش مدل شبکه عصبی به کار گرفتند. نتایج نشان داد که پیش‌بینی‌های شبکه عصبی با انحراف کمتر از ۱٪ با نتایج شبیه‌سازی مونت‌کارلو مطابقت دارد و شبکه قادر است ترکیبات وزنی ناشناخته را نیز با دقت مطلوب پیش‌بینی کند. در نهایت، از یک فانتوم آبی برای ارزیابی دوز و بهینه‌سازی نهایی ماده حفاظ انتخاب‌شده استفاده شد[۱۲]. پیفیفر و همکاران یک مدل محاسباتی برای بازرسی با پرتو ایکس را با استفاده از دزسنجی فیزیکی اعتبارسنجی کردند. آن‌ها ابتدا یک برد مدار چاپی غیرفعال را با نرم‌افزار ULTIboard طراحی کرده و یک مدل ساده انتقال برای شبیه‌سازی مونت‌کارلو با MCNP ایجاد کردند. برای اعتبارسنجی اولیه، نتایج شبیه‌سازی با تصاویر پرتونگاری فیلم EBT3 مقایسه شد[۱۳]. در مطالعه حاضر با توجه به ابعاد سامانه مقطع‌نگاری و همچنین نیاز به دسترسی مکرر به میز چرخان سامانه و مراجعه مکرر به آن لازم بود که حفاظ پرتوی مورد انتخاب از نظر ابعاد، استحکام و قیمت بهینه باشد؛ لذا جنس حفاظ مورد نظر برای سامانه مذبور ورقه‌های استیل در نظر گرفته شد. پیش از طراحی تجربی و ساخت اتاقک برای این سامانه، ابتدا مشخصات سامانه و اتاقک مورد استفاده برای آن به همراه وزن بهینه مورد نظر برای آن توسط کد ترابرد پرتوی MCNPX مدل‌سازی گردید[۱۴] و پس از محاسبات دز در حالت بدون و با حفاظ اقدام به ساخت اتاقک اصلی گردید تا بتوان در طراحی‌های آتی برای سایر مولدهای پرتوی مبتنی بر پرتوهای ایکس و گاما از این مدل پیش از ساخت نمونه اتاقک‌های واقعی استفاده نمود.

۲-روش‌ها

۲-۱-طراحی اتاقک

شماتیک سه‌بعدی از هندسه تجربی در شکل ۲ نشان داده شده است. اجزای اصلی این سیستم به ترتیب عبارت‌اند از:

۱. آشکارساز

۲. سیستم جمع‌آوری داده و پردازش تصویر

۳. مولدایکس

لوله اشعه ایکس، اصلی‌ترین جزء سیستم مقطع‌نگاری است که الکترون‌ها را شتاب داده و به سمت یک هدف فلزی پرتاب می‌کند. این فرایند باعث تولید اشعه ایکس می‌شود. لامپ از یک کاتد و یک آند تشکیل شده است. الکترون‌ها از کاتد که توسط یک منبع ولتاژ بالا تغذیه می‌شود، آزاد شده و به سمت آند که معمولاً از جنس تنگستن است، شتاب می‌گیرند. برخورد الکترون‌ها به آند باعث تولید اشعه ایکس می‌شود. زمانی که الکترون‌ها به آند برخورد می‌کنند، انرژی جنبشی آن‌ها به دو صورت آزاد می‌شود: بخشی به‌صورت گرما و بخشی به‌صورت اشعه ایکس. مولد پرتوی ایکس مورد استفاده در این پروژه، یک مولد با مدار تنظیم آنالوگ است که امکان کنترل دقیق ولتاژ و جریان تولید اشعه را فراهم می‌کند. این مولد ساخت کشور مجارستان بوده و به‌دلیل قابلیت اطمینان بالا و کیفیت مناسب، در پروژه‌های مختلف صنعتی و تحقیقاتی مورد استفاده قرار می‌گیرد. برای خنک‌سازی این مولد، از سیستم خنک‌کننده آب‌گرد استفاده شده است. این سیستم با به‌کارگیری آب به‌عنوان ماده خنک‌کننده، باعث حفظ دمای مولد در شرایط ایمن و پایدار می‌شود که برای عملکرد مداوم و بدون وقفه آن بسیار ضروری است. این لامپ مولد دارای تنظیم مقدار ولتاژ بالا از ۰ تا ۳۰۰ کیلو ولت را دارد و همچنین میزان جریان این مواد از میزان ۰ تا ۳ میلی‌آمپر قابل تنظیم است.

۴. اتاقک حفاظ

با توجه به اینکه مولد پرتو ایکس می‌تواند سطح بالایی از اشعه را تولید کند، وجود اتاقک حفاظ که توانایی جذب اشعه را دارند، بسیار حیاتی است. این اتاقک نه‌تنها به جلوگیری از تابش‌های ناخواسته به محیط و افراد کمک می‌کند، بلکه شرایط کنترل‌شده‌ای را برای عملکرد بهینه مولد پرتو ایکس فراهم می‌آورد. پس از طراحی دقیق اتاقک حفاظ، پس از ساخت و نصب آن اطمینان حاصل شد که تجهیزات و کاربران در ایمنی کامل قرار دارند و درعین‌حال کارایی سیستم مولد پرتو ایکس به بهترین شکل حفظ می‌شود. به همین دلیل، اتاقک حفاظ بخش جدایی‌ناپذیر از سیستم مولد پرتو ایکس است که به‌منظور فراهم‌آوری محیطی ایمن و کارآمد برای انجام مقطع‌نگاری به کار می‌رود. این اتاقک‌ها به طور معمول در نواحی تحت کنترل

UNCORRECTED PROOF

از نقطه نظر فیزیک بهداشت پرتوی مورد استفاده قرار می گیرند. در حوزه کار با تشعشعات یون‌ساز، منطقه کنترل ناحیه‌ای است که در آن پروتکل‌های ایمنی خاصی برای محافظت از کارگران و محیط‌زیست در برابر پرتوگیری بیش از حد اجرا می‌گردد. این مناطق در اطراف منابع پرتوهای یون‌ساز، مانند نیروگاه‌های هسته‌ای، تأسیسات تحقیقاتی و محیط‌های پزشکی و صنعتی که از تشعشعات برای اهداف تشخیصی یا درمانی استفاده می‌کنند، ایجاد می‌شوند. در این مناطق، دسترسی محدود است و فقط پرسنل مجاز که آموزش کافی در مورد ایمنی در برابر تشعشعات را دیده‌اند، مجاز به ورود هستند. مناطق کنترل در مدیریت پرتوگیری تابشی بسیار مهم هستند، زیرا در کمینه نمودن پرتوگیری اثرات مضر سلامتی مرتبط با پرتوهای یون‌ساز کمک می‌کنند. در ناحیه کنترل سطوح تشعشع نظارت و کنترل می‌شود، نرخ دوز ۱۰ µSv/h نشان‌دهنده سطح تشعشع مجازی است که افراد ممکن است در آن ناحیه در معرض آن قرار گیرند[۱۵]. این مقدار آهنگ دز بر اساس تحقیقات گسترده و دستورالعمل‌های ارائه شده توسط سازمان‌هایی مانند کمیسیون بین‌المللی حفاظت رادیولوژیکی (ICRP) و سازمان بهداشت جهانی (WHO) ایجاد شده است. هدف از این محدودیت این است که اطمینان حاصل شود که کارگران پرتو در معرض سطوحی قرار نگیرند که می‌تواند منجر به اثرات حاد یا مزمن سلامتی شود، درحالی‌که همچنان به آنها اجازه می‌دهد تا وظایف لازم را در محیط‌هایی که تشعشع وجود دارد انجام دهند. نظارت و کنترل میزان دوز در مناطق کنترل به حفظ این استانداردهای ایمنی کمک می‌کند. واحد اندازه‌گیری micro-Sievert (µSv) برای دوز معادل است که اثرات بیولوژیکی پرتوهای یون‌ساز بر بافت انسان را نشان می‌دهد. در یک منطقه کنترل، اگر سطح تشعشع به طور مداوم در ۱۰ µSv/h اندازه‌گیری شود، وجود پروتکل‌های ایمنی، از جمله نظارت، محدود کردن دسترسی، و اطمینان از اقدامات حفاظتی برای پرسنلی که ممکن است برای مدت‌های طولانی در آن منطقه باشند، مهم است. طرح و ابعاد اتاقک حفاظ در شکل ۱ نشان داده شده است. اتاقک حفاظ دارای بدنه استیل و یک محفظه مکعب مستطیلی به ابعاد ۱۵۰×۱۵۰×۳۰۰ میلیمترمربع است. ۵ عدد دزیمتر در خارج از ۵ وجه اتاقک و در فاصله ۵۰ سانتیمتری از آن تعریف شد. در قسمت روبروی مولد که بیشترین تابش را دارد. یک بالک سربی به ابعاد ۷۵×۷۵×۵ سانتیمتر مکعب (طبق ابعاد بالک سربی موجود) قرار داده شد. لایه نیمه‌ساز (HVL)یکی از شاخص‌های کلیدی برای ارزیابی توان تضعیف مواد در برابر پرتوهای ایکس است. HVL به ضخامت ماده‌ای گفته می‌شود که شدت پرتو را به نصف مقدار اولیه کاهش می‌دهد. برای استیل، به دلیل چگالی بالا و وجود عناصر با عدد اتمی متوسط مانند آهن، نیکل و کروم، مقدار HVL نسبت به مواد سبک‌تر مانند آلومینیوم کمتر است، زیرا پرتو ایکس در آن سریع‌تر جذب می‌شود. رابطه‌ی بین شدت پرتو و ضخامت ماده طبق قانون تضعیف نمایی بیان می‌شود:

$$I = I_0 e^{-\mu x} \quad (۱)$$

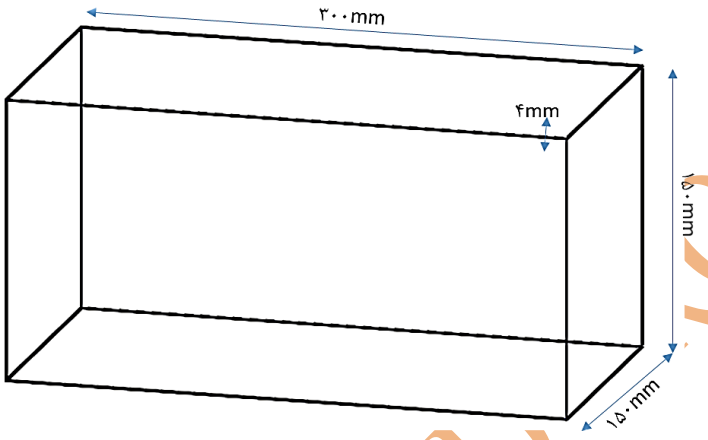
که در آن I_0 شدت اولیه، I شدت پس از عبور از ضخامت x، و μ ضریب تضعیف خطی ماده است. ضریب تضعیف خطی (μ) خود به شدت به انرژی پرتو (E) و ماده جاذب بستگی دارد. از این رابطه، لایه نیمه‌ساز به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

$$HVL = \frac{ln2}{\mu} \quad (۲)$$

بنابراین با اندازه‌گیری ضریب تضعیف استیل در انرژی‌های مختلف پرتو ایکس، می‌توان HVL را تعیین و از آن برای طراحی حفاظ‌های مناسب در سیستم‌های رادیولوژی و صنعتی استفاده کرد. سرب به دلیل چگالی بالا (۱۱/۳۴ گرم بر سانتیمتر مکعب) و عدد اتمی بالا (۸۲) یک حفاظ عالی در برابر پرتو ایکس است. در نتیجه، HVL آن بسیار کوچک‌تر از بسیاری از مواد دیگر است. برای پرتو ایکس با انرژی ۱۰۰ کیلوالکترون ولت، HVL سرب حدود ۰/۲۷ میلی‌متر است و برای پرتو ۱۵۰ کیلوولت به حدود ۰.۵ میلی‌متر می‌رسد. این یعنی تنها یک لایه نازک از سرب می‌تواند شدت پرتو را نصف کند. فولاد نیز یک حفاظ مؤثر است، اما چگالی و عدد اتمی آن (متوسط ۷.۸~ g/cm^3 برای فولاد معمولی) از سرب کمتر است. بنابراین، HVL

CORRECTED PROOF

فولاد به طور قابل توجهی بزرگ‌تر از سرب است. برای همان پرتو ایکس ۱۰۰ کیلوالکترون ولت، HVL فولاد حدود ۱/۵ تا ۲ میلی‌متر است. این بدان معناست که برای رسیدن به همان میزان خاصیت حفاظ پرتوی، به ضخامت بیشتری از فولاد در مقایسه با سرب نیاز داریم.



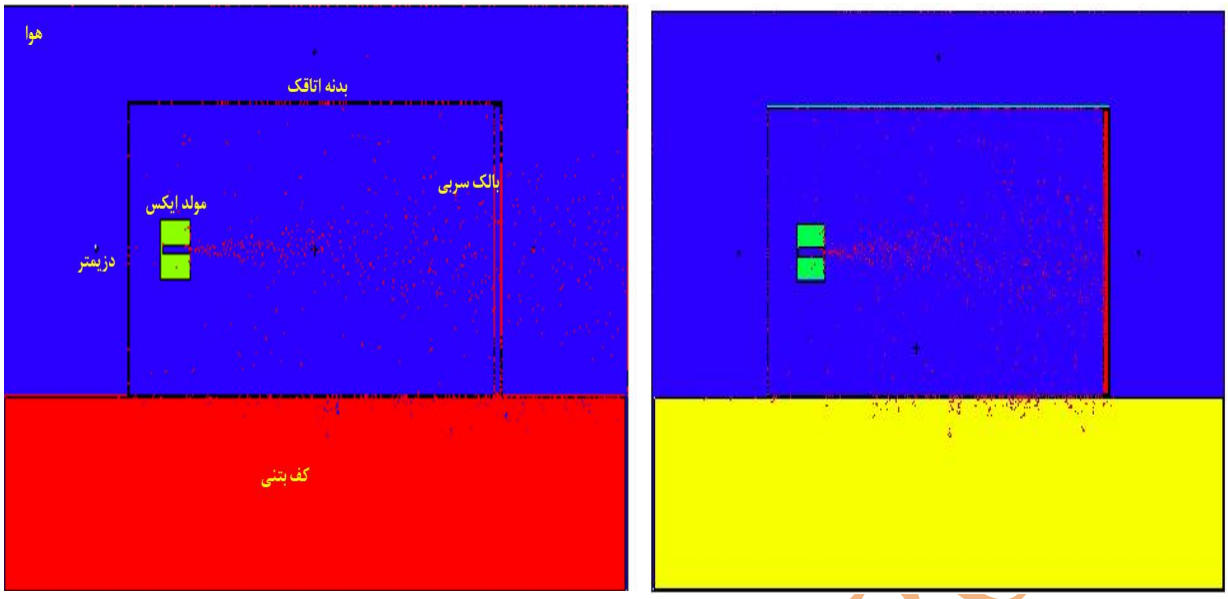
شکل ۱- طرح سه بعدی از اتاقک حفاظ



شکل ۲- طرح مدل‌سازی از جانمایی نهایی تجهیزات در هندسه نهایی، ۱) مولد ایکس، ۲) پنجره خروجی باریکه ایکس، ۳) باکس مدارهای الکترونیکی-کنترلی، ۴) سازه، ۵) محل استقرار نمونه-دیسک گردان، ۶) استپ موتور، ۷) آشکارساز صفحه تخت، ۸) اتاقک حفاظ پرتوی، ۹) چراغ هشدار سامانه و ۱۰) جعبه تنظیم پارامترهای مولد ایکس

۲-۲-مدل‌سازی اتاقک حفاظ در فضای مونت‌کارلو

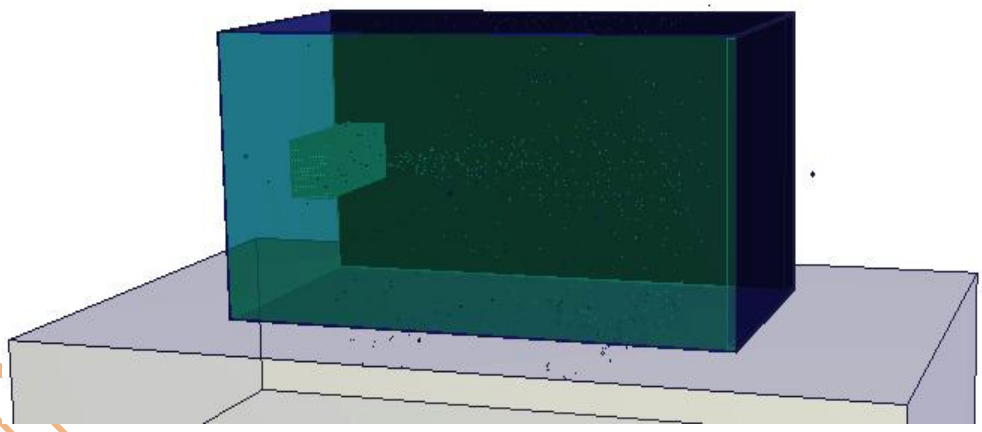
طرح دوبعدی و سه‌بعدی از اتاقک حفاظ در شکل‌های ۲ و ۳ نشان داده شده است.



ب الف

شکل ۳- طرح دوبعدی از مدل‌سازی پراکندگی پرتوهای خارج شده از مولد ایکس الف) بدون قرارگیری حفاظ‌ها ب) با قراگیری حفاظ

تصاویر شکل ۳ طرح دوبعدی از سیستم را نمایش می‌دهد که یک ساختار فیزیک یا مهندسی را به تصویر می‌کشد. یک بدنه اتاقک در بالای یک کف بتنی قرار دارد و با هوا احاطه شده است، یک مولد ایکس در داخل اتاق در کنار یک دزیمتر قرار گرفته است. این ترتیب یک محیط کنترل شده را برای مطالعه تشعشع یا انتشار ذرات و آشکارسازی پیشنهاد می کند.



شکل ۴- توزیع سه بعدی پرتوهای ایکس خارج شده از مولد در فضای اتاقک

در شکل ۴ یک تصویر سه بعدی از یک محیط شبیه‌سازی شده است که شامل یک محفظه استیل است که روی پایه بتنی خاکستری روشن مستقر شده است. در داخل محفظه، نقاط کوچک متعددی ذرات یا نقاط داده را نشان می‌دهند، و یک بلوک مات به یکی از دیواره‌ها متصل است که نمایانگر یک مولد پرتوی درون فضای شبیه‌سازی است. در شکل ۴ رفتار ذرات را در یک فضای کنترل شده درون اتاقک حفاظ مستقر بر روی پایه بتنی نشان می دهد. در ۵ وجه دیگر دزیمترهایی برای اندازه‌گیری میزان دز در خارج از اتاقک قرار گرفته اند تا برآوردی از میزان دز ناشی از مولد ایکس بدهند. محاسبه نرخ دوز با تالی F8* و برای ۲ میلیارد ذره و با خطای محاسباتی ۳ درصد انجام شده است.

۳-۲- ساخت اتاقک

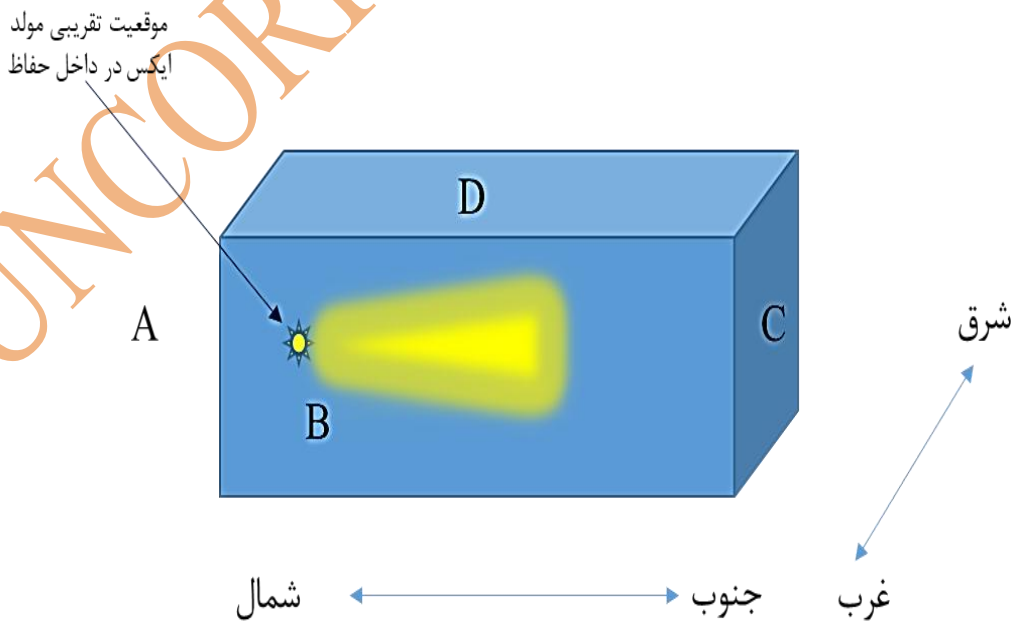
پس از مرحله طراحی و مدل‌سازی اتاقک در محیط شبیه‌سازی و بررسی دز در خارج از اتاقک حفاظ در ولتاژ و جریان کاربردی سامانه و مولد پرتوی، اتاقک حفاظ واقعی در آزمایشگاه ساخته شد و پس از ساخت و نصب اتاقک حفاظ، قابلیت آن در تضعیف دز پرتو سنجیده شد تا اطمینان حاصل شود که اتاقک به‌خوبی از اپراتور و محیط اطراف در برابر اشعه ایکس محافظت می‌کند. نقاط مورد ارزیابی اتاقک حفاظ در شکل ۵ نشان شده است. در شکل ۶ موقعیت‌هایی که دزیمتری انجام شد نشان داده شده است.

جدول ۱- موقعیت دزیمترهای نشان داده شده در شکل ۵

شماره دزیمتر	موقعیت دزیمتر
B	وجه کناری ۱
E	وجه کناری ۲
A	پشت مولد - خارج اتاقک
C	روبروی مولد چشمه - خارج اتاقک
D	بالای اتاقک



شکل ۵- نماهای از اتاقک حفاظ مورد استفاده.



شکل ۶- وجه‌های اتاقک برای دزیمتری.

UNCORRECTED PROOF

۴-۲- دزیمتری تجربی

پس از برآورد میزان دز محاسبه شده در مدل‌سازی در ولتاژ ۱۰۰ کیلوالکترون ولت و جریان ۱ میلی آمپر و دستیابی به حد دز مجاز در خارج از اتاقک مدل‌سازی شده از جنس استیل و ضخامت ۴ میلیمتر، نمونه اتاقک واقعی با همین ابعاد طراحی شدو پس از جایگذاری واحدهای سامانه درون اتاقک(مطابق شکل ۲) سیستم روشن شد. پس از راه اندازی سیستم واقعی برای اندازه‌گیری میزان دز در خارج از بدنه از دزیمتر DoseDG مدل GPD150G استفاده گردید. GRAETZ یک شرکت شناخته شده برای تولید طیف وسیعی از دزیمترها و دستگاه های اندازه‌گیری پرتو است. این دزیمترهای برای اندازه‌گیری و نظارت بر پرتوگیری، اغلب در صنایع ایمنی شغلی، مراقبت های فیزیک بهداشت و هسته ای استفاده می شود. این دستگاه ها برای حفاظت در برابر اشعه و رعایت مقررات ایمنی بسیار کارامد هستند.

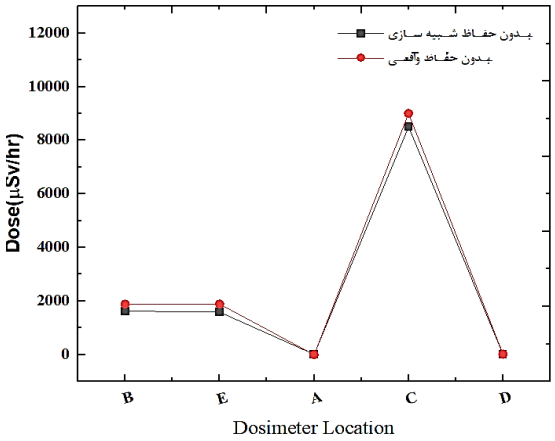


شکل ۷- نمایی از دزیمتر DoseDG

۴-نتایج

نتایج مربوط به شبیه‌سازی و اعتبارسنجی آن با داده‌های تجربی برای ولتاژ کاری ۱۰۰ کیلوولت و جریان ۱ میلی‌آمپر در شکل ۸ و شکل ۹ برای حالتهایی با حضور و عدم حضور حفاظ نشان داده شده است.

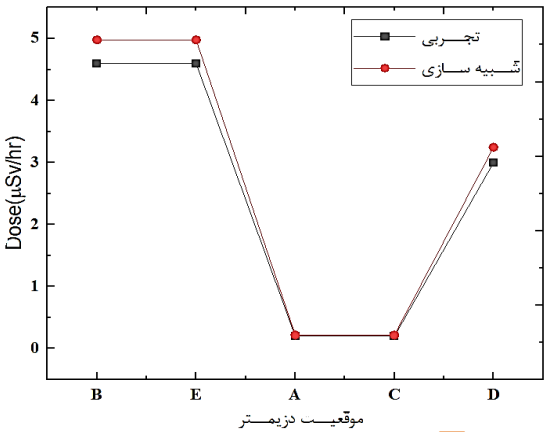
۴-۱-شبیه‌سازی و اعتبارسنجی



شکل ۸- مقایسه نتایج شبیه‌سازی و تجربی برای ولتاژ ۱۰۰ کیلو ولت و جریان ۱ میلی آمپر(حالت بدون حضور حفاظ)

نمودار شکل ۸ میزان دز ثبت شده در دزیمترهای موقعیتهای مختلف را نشان می‌دهد که در حالت بدون حضور حفاظ(در دو حالت شبیه سازی و تجربی) محاسبه و اندازه‌گیری شده است. در موقعیت‌های B و E مقدار دوز تقریباً مشابه و پایین (حدود ۲۰۰۰ nSv/hr) است که نتایج تجربی و شبیه سازی با دقت خوبی موید این موضوع است. در موقعیت A کمترین دوز ثبت شده (نزدیک به صفر) دیده می‌شود. در موقعیت C بیشترین دوز مشاهده می‌شود (بیش از ۱۰۰۰۰ nSv/hr)، که نشان‌دهنده بیشترین نفوذ پرتو است. در موقعیت D مجدداً دوز کاهش می‌یابد. در حالت بدون حضور حفاظ، بیشترین دز تابشی در نقطه A، یعنی روبروی مولد، مشاهده می‌شود که به دلیل جهت مستقیم خروج باریکه به این سمت است. نقاط جانبی B و E که در شرق و غرب مولد قرار دارند، دز یکسانی دریافت می‌کنند که ناشی از پراکندگی ذرات تابشی به اطراف است و طبیعتاً کمتر از دز نقطه A است. نقطه D که در پشت مولد قرار دارد، دزی نزدیک به نقاط جانبی اما اندکی کمتر دریافت می‌کند که نشان‌دهنده خروج باریکه با سطح مقطع بیضی‌شکل از مولد است و تأییدی بر تمرکز بیشتر تابش در جهت روبرو می‌باشد.

UNCORRECTED PROOF

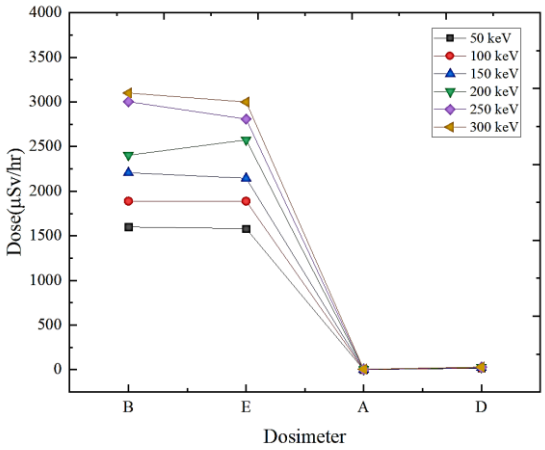


شکل ۹-مقایسه نتایج شبیه‌سازی و تجربی برای ولتاژ ۱۰۰ کیلوولت و جریان ۱ میلی‌آمپر(حالت با حضور حفاظ)

در حالت وجود حفاظ، بیشترین دز تابشی در نقاط جانبی B و E که در سمت شرق و غرب مولد قرار دارند، مشاهده شد. در مقابل، کمترین دزهای ثبت شده در نقاط A و C که به ترتیب در بخش پشتی و جلویی مولد واقع شده‌اند، به چشم می‌خورد. در نهایت، دز در بالاتر از حد میانگین و حداکثر در نقطه D که نمای بالایی اتاقک است، ثبت گردید. دلیل کاهش دز در نقاط A و C به این موضوع برمی‌گردد که نقطه A در جهت مخالف خروج پرتو قرار دارد، بنابراین دز کمتری ثبت می‌شود. همچنین، دز مشابه در نقطه C به دلیل وجود یک دیواره سربی درون اتاقک و مماس بودن آن با این نقطه، به‌شدت کاهش یافته است. دو دسته داده تجربی و شبیه‌سازی از نظر روند کلی با هم همگرا هستند: در نقاط B، E و D مقدارها مشابه‌اند و اختلاف نسبی ناچیز دارد. در مراحل میانی A و C هر دو مجموعه به مقدار پهلو به پهلو به مقار نزدیک به صفر می‌رسند و دوباره با افزایش به D هم‌گرایی ظاهر می‌شود؛ این نشان می‌دهد مدل شبیه‌سازی توانسته رفتار دو فاز کم و پُر شدت سیستم را به خوبی بازنمایی کند. تفاوت‌های کوچکی در نقاط میانی (A و C) ممکن است ناشی از نویز داده یا خطای محاسباتی مدل باشد.

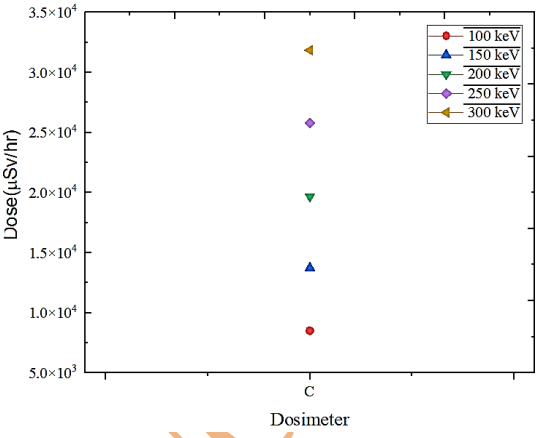
۲-۴-شبیه‌سازی برای سایر حالت‌ها

پس از اعتبارسنجی نتایج و بررسی عملکرد صحیح مدل‌سازی، نتایج دزیمتری و تعیین مناطق ممنوعه و نواحی کنترل، تعیین انرژی و جریان‌های مجاز برای کار با سامانه پرتودهی مقطع‌نگاری به دست آمد.



شکل ۱۰- دز مولد در چهار موقعیت بدون حضور حفاظ

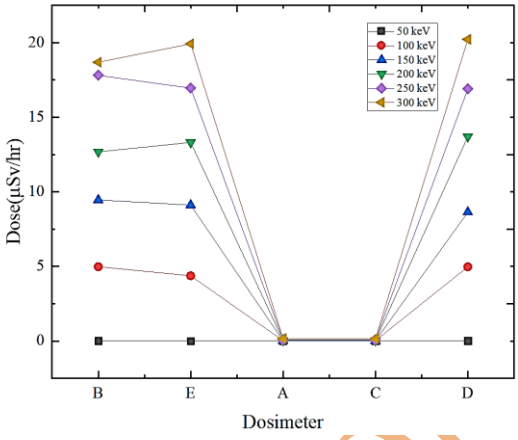
نمودار شکل ۱۰ میزان دز ثبت شده در دزیمترهای موقعیتهای مختلف را نشان می دهد که در حالت بدون حضور حفاظ محاسبه شده است. نمودار ۱۰ نشان می دهد که تنها ناحیه مجاز ناحیه کنترل در این حالت بدون حضور حفاظ برای تمامی ولتاژها موقعیت A (پشت مولد پرتو) است که مقدار آن زیر آهنگ دز مجاز ۱۰ میکروسیورت بر ساعت است.



شکل ۱۱- دز در موقعیت روبروی مولد بدون حضور حفاظ

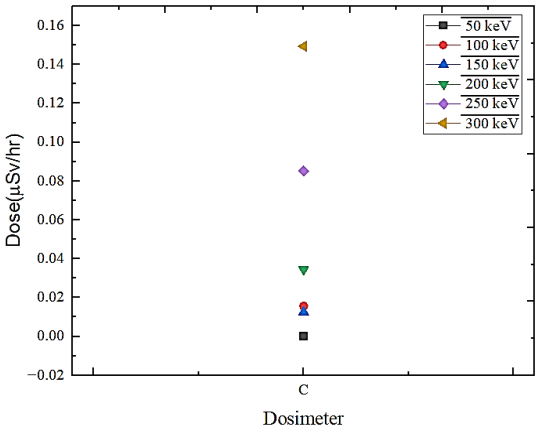
نمودار شکل ۱۱ میزان دز ثبت شده در دزیمتر مستقر در روبروی مولد ایکس را نشان می دهد که در حالت بدون حضور حفاظ محاسبه شده است. نمودار شکل ۱۱ نشان می دهد که بدون حضور حفاظ برای تمامی ولتاژها موقعیت C (پشت مولد پرتو) است که مقدار آن زیر آهنگ دز بسیار بالا و حدود ۱۰۰۰ برابر بیشتر از دز مجاز ناحیه کنترل را دارد.

UNCORRECTED PROOF



شکل ۱۲- دز مولد در چهار موقعیت با حضور حفاظ

نمودار شکل ۱۲ میزان دز ثبت شده در دزیمترهای موقعیت‌های مختلف را نشان می دهد که در حالت با حضور حفاظ محاسبه شده است. نمودار شکل ۱۲ نشان می‌دهد که با حضور حفاظ برای تمامی ولتاژها موقعیت‌های که در آن آهنگ دز مجاز وجود دارد مختلف است.



شکل ۱۳- دز در موقعیت روبروی مولد با حضور حفاظ

نمودار شکل ۱۳ میزان دز ثبت شده در دزیمتر موقعیت C را در ولتاژهای مختلف نشان می دهد که در حالت با حضور حفاظ محاسبه شده است. نمودار شکل ۱۳ نشان می‌دهد که با حضور حفاظ برای تمامی ولتاژها این موقعیت آهنگ دز مجاز را دارد و حدود ۱۰۰ برابر کمتر از نواحی دیگر است که دلیل این مورد به سبب حضور یک دیواره سربی به ضخامت ۵ سانتیمتر که در داخل اتاقک و در کنار وجه C اتاقک می‌باشد.

۴-بحث و نتیجه‌گیری

بر اساس شبیه‌سازی‌های انجام شده توزیع دز در نواحی اطراف اتاقک در خارج آن برای ولتاژ ۱۰۰ کیلوولت و جریان ۱ میلی‌آمپر با دقت ۰/۰۱ محاسبه گردید و هیچ نقطه‌ای با مقدار دز فراتر از حدود مجاز شناسایی نشده است؛ بنابراین نتایج اتاقک واقعی طبق ابعاد طراحی و مدل‌سازی شده ساخته شد و نتایج دزیمتری برای این مقادیر در اطراف اتاقک اندازه‌گیری شد و نتایج اندازه‌گیری نشان داد که آهنگ معادل دز محیطی در مجاورت حفاظ با معیارهای مورد پذیرش قانونی تطابق دارد و همچنین نتایج مدل‌سازی با نتایج تجربی تطابق خوبی را نشان داد. ازاین‌رو پس از تأیید مدل‌سازی و اعتبارسنجی آن، مقادیر آهنگ دز برای پارامترهای ولتاژ دیگر با حضور و بدون حضور اتاقک حفاظ پرتوی محاسبه شد تا بتوان معیاری از آهنگ دز در سایر تنظیمات مولد واقعی به دست آید. میزان آهنگ دز زمینه با ضریب کالیبراسیون ۰.۰۱ ± ۱.۰۵ اندازه‌گیری شد. نتایج نشان داد که برای مدل‌سازی پیش از ساخت اتاقک‌های حفاظ برای مولدهای پرتوی مبتنی بر ایکس و گاما می‌توان از خروجی این مدل استفاده نمود.

مراجع

[1] National Committee on Radiation Protection and Measurements (US), 2001. NCRP Report. National Council on Radiation Protection and Measurements.

[2] Pelowitz, D.B., Durkee, J.W., Elson, J.S., Fensin, M.L., Hendricks, J.S., James, M.R., Johns, R.C., McKinney, G.W., Mashnik, S.G., Verbeke, J.M. and Waters, L.S., 2011. MCNPX 2.7. 0 Extensions. *Los Alamos National Laboratory, Los Alamos, NM, LA-UR-11-02295*, *4*.

[3] Attix, F.H., 2008. *Introduction to radiological physics and radiation dosimetry*. John Wiley & Sons.

[4] Vañó, E., Miller, D.L., Martin, C.J., Rehani, M.M., Kang, K., Rosenstein, M., Ortiz-López, P., Mattsson, S., Padovani, R. and Rogers, A., 2017. ICRP publication 135: diagnostic reference levels in medical imaging. *Annals of the ICRP*, *46*(1), pp.1-144.

UNCORRECTED PROOF

[5] Kim, S.C., Yun, J.H., Byun, H.S. and Hou, J., 2024. "Verification of Optimal X-Ray Shielding Properties Based on Material Composition and Coating Design of Shielding Materials". *Coatings*, *14*(11), p.1450.
[6] Yu, L., Nine, M.J., Tung, T.T., Pereira, A.L.C., Hassan, K., Tran, D., Santos, A., & Losic, D. (2023). Revealing enhanced X-Ray radiation shielding of 2D layered materials and their laminar heterostructures. Graphene and 2D Materials, 8, 151-159. https://doi.org/10.1007/s41127-023-00064-4.
[7] Bibbo, G. (2017). "Shielding of medical imaging X-ray facilities: a simple and practical method." *Physical and Engineering Sciences in Medicine*, 40(5), 925-930. https://doi.org/10.1007/s13246-017-0586-7.
[8] Park, B., Lee, S., Lee, E., Kim, M., and Seo, H., 2025. "Method for determining primary radiation shielding thickness of industrial X-ray-generating devices". *Applied Radiation and Isotopes*, p.111862. https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2025.111862
[9] Idrissi, A., Dourki, I., El Bardouni, T., El Hajjaji, O., Drissi El-Bouzaidi, M. and Mira, M., 2023. G4XRTube: A Geant4-based Monte Carlo application for X-ray tube simulation. *Radiation Physics and Chemistry*, 207, p.110864.
[10] Miles, D., Sforza, D., Wong, J. and Rezaee, M., 2024. Dosimetric characterization of a rotating anode x-ray tube for FLASH radiotherapy research. *Medical Physics*, 51(2), pp.1474-1483.
[11] Aziz, M.Z.A., Yani, S., Haryanto, F., Kamarullah Ya Ali, N., Tajudin, S.M., Iwase, H. and Musarudin, M., 2020. Monte Carlo simulation of X-ray room shielding in diagnostic radiology using PHITS code. *Journal of Radiation Research and Applied Sciences*, 13(1), pp.704-713.
[12] Mokhtari Dorostkar, M. and Rasouli, F.S., 2024. Artificial Neural Network for Optimizing Gamma Radiation Shielding. *Journal of Biomedical Physics and Engineering*. [Online] Available at: https://doi.org/10.31661/jbpe.v0i0.2312-1694
[13] Pfeifer, M.P., Simerl, N., Porter, J., McNeil, W.J. and Bahadori, A.A., 2023. X-ray Inspection Model Validation with Physical Dosimetry. *Journal of Nondestructive Evaluation*, 42(3), p.66.
[14] Waters, L.S., McKinney, G.W., Durkee, J.W., Fensin, M.L., Hendricks, J.S., James, M.R., Johns, R.C. and Pelowitz, D.B., 2007. The MCNPX Monte Carlo radiation transport code. In: *AIP Conference Proceedings*. [online] American Institute of Physics, pp.81-90.
[15] Cember, H. and Johnson, T.E., 2009. *Introduction to Health Physics*. McGraw-Hill Medical.

UNCORRECTED PROOF