مجله سنجش و ایمنی پرتو، جلد ۲، شمارهٔ ۱، زمستان ۱۳۹۲

بررسی ایمنی و دز دریافتی کارکنان آزمایشگاه نوترون دانشگاه صنعتی امیرکبیر با استفاده از کد MCNP

صفرعلی صفری*، مجتبی شمسایی ظفرقندی و رضا اسدنژاد

دانشکده مهندسی انرژی و فیزیک، دانشگاه صنعتی امیر کبیر، تهران، ایران.

*تهران، پل حافظ، دانشگاه صنعتی امیر کبیر، دانشکده مهندسی انرژی و فیزیک، کد پستی: ۱۵۹۱۶-۳۴۳۱۱

پست الکترونیکی: safari20@aut.ac.ir

چکیده

یکی از اصولی‌ترین و اساسی‌ترین ویژگی آزمایشگاه‌های هسته‌ای که باید مورد توجه قرار بگیرد، ایمنی پرتوها و ملاحظات مربوط به فیزیک بهداشت است. در این مقاله، با بررسی موردی یک آزمایشگاه تحقیقاتی فعال در حوزهٔ مطالعات هسته‌ای واقع در دانشگاه صنعتی امیرکبیر، بر آن شدیم تا با تعیین میزان نرخ دز جذبی در نواحی مختلف آزمایشگاه، نواحی پرخطر یا امن آن را شناسایی کنیم و طبق معیارهای استاندارد فیزیک بهداشت و حفاظت در برابر پرتوها مورد بررسی قرار دهیم. بدین منظور، محیط آزمایشگاه نمونه در سه مرحله، با استفاده از کد MCNP4C شبیه‌سازی شد؛ به‌طوری‌که در مرحلهٔ اول، به سهم هریک از پرتوها از نوع گاما و نوترون در دز جذبی پرداخته شد و سپس، طی مرحلهٔ دوم و سوم، دز جذبی کل ناشی از تمامی پرتوها در نواحی مختلف آزمایشگاه محاسبه و بررس گردید. با نتایج حاصل از این سه مرحله، امن‌ترین و ناامن‌ترین نواحی آزمایشگاه تعیین شدند. در پایان، روش استفاده‌شده در این مقاله، برای تعیین نواحی امن آزمایشگاه، به‌منظور ارتقا و حفظ سلامت پرسنل آزمایشگاه‌های هسته‌ای مشابه نیز پیشنهاد شد.

کلیدواژگان: دز جذبی، پرتوگیری کارکنان آزمایشگاه، شبیه‌سازی عددی، کد مونت کارلو MCNP، ایمنی آزمایشگاه نوترون.

۱. مقدمه

یکی از اصولی‌ترین و اساسی‌ترین ویژگی آزمایشگاه‌های هسته‌ای که باید مورد توجه قرار بگیرد، ایمنی پرتوها و ملاحظات مربوط به فیزیک بهداشت است [۱]. عدم حفاظت در برابر پرتوها و عدم آگاهی از کمیت دز دریافتی پرسنل در حین فعالیت در آزمایشگاه با پرتوهای مختلف، می‌تواند آسیب‌های جبران‌ناپذیری بر آزمایشگر وارد کند و خطرآفرین باشد [۲]. فعالیت پرسنل مختلف در آزمایشگاه‌های هسته‌ای، به‌منظور تحقیقات و مطالعات بر روی مواد رادیواکتیو و بررسی پدیده‌های ناشی از این مواد، از ارکان اصلی پژوهش‌های علوم هسته‌ای هستند. به‌دلیل محدودیت‌هایی که از نظر زیست‌شناختی در کار با این مواد مطرح می‌شود، بایستی ملاحظات ایمنی مناسبی اتخاذ گردد؛ از این رو، در این مقاله سعی شده علاوه بر تعیین میزان دز جذبی در نواحی مختلف آزمایشگاه توسط افراد آزمایشگر، قسمت‌های امن یا پر خطر یک آزمایشگاه هسته‌ای نمونه، شناسایی و معرفی شود. به‌دلیل محدودیت در انجام مستقیم اندازه‌گیری دز جذبی در محیط واقعی آزمایشگاه، تصمیم بر آن شد که از کد هسته‌ای MCNP4C مبتنی بر روش مونت کارلو، جهت شبیه‌سازی و اندازه‌گیری دزهای مربوط استفاده شود. در واقع هدف نویسنده در این مقاله، ارائهٔ یک روش با استفاده از شبیه‌سازی برای اندازه‌گیری میزان دز دریافتی کارکنان آزمایشگاه در نواحی مختلف یک آزمایشگاه نمونه و معرفی نقاط امن و نقاط ناامن آزمایشگاه، جهت آگاهی پرسنل از دز جذبی و سلامت بالای پرسنل است. به همین منظور، برای محاسبهٔ دز جذبی در نقاط

مختلف، محیط آزمایشگاه به چندین ناحیه تقسیم‌بندی شده و برای شبیه‌سازی پرسنل آزمایشگاه نیز از فانتوم‌های متشابه با عناصر سازندهٔ بدن انسان واقعی استفاده شده است.

۲. معرفی آزمایشگاه مورد بررسی

آزمایشگاه نوترون شهید دکتر مجید شهریاری، یکی از آزمایشگاه‌های هسته‌ای واقع در دانشکدهٔ مهندسی انرژی و فیزیک دانشگاه صنعتی امیرکبیر تهران است که مجهز به یک چشمه نوترون و دیگر تجهیزات آزمایشگاهی است. یک تانک استوانه‌ای به شعاع ۸۰ cm و ارتفاع ۱۵۰ cm جهت نگهداری چشمهٔ نوترون در داخل آن، در قسمت شمال غربی این آزمایشگاه تعبیه شده است. این تانک استیلی، پر از آب معمولی و متشکل از یک کانال مرکزی و ۱۰ کانال کوچک دیگر در شعاع‌ها و فاصله‌های مختلف، جهت پرتودهی در شارهای مختلف نوترون و همچنین کولیماتور جهت پرتودهی خاص می‌باشد. در شکل (۱)، موقعیت تانک چشمهٔ نوترون در آزمایشگاه و در شکل (۲)، موقعیت کانال‌ها و کولیماتور نشان داده شده است. در ادامه، به معرفی چشمهٔ نوترون و موقعیت کولیماتور خواهیم پرداخت.

شکل ۱: تصویر آزمایشگاه نوترون شهید دکتر مجید شهریاری و موقعیت تانک چشمهٔ موجود در آن

نوع چشمه: چشمهٔ نوترون Am-Be موجود در آزمایشگاه مورد نظر، به‌صورت پودر ^{241}Am و ^{9}Be در داخل یک ظرف از جنس استینلس استیل[1] استوانه‌ای به قطر ۳ cm و ارتفاع ۱۰ cm قرار دارد. اکتیویتهٔ این چشمه ۱۵ کوری و آهنگ گسیل نوترونی حدوداً $3/3\times10^{7}$ n/s است که در کانال مرکزی تانک استوانه‌ای قرار دارد. یک دستگاه بالابر که به سقف آزمایشگاه بسته شده است، حرکت در راستای عمودی را برای این چشمه امکان‌پذیر می‌کند. در صورت نیاز و انجام آزمایش، چشمه در ۷۸ سانتی‌متری از کف آزمایشگاه قرار می‌گیرد. در غیر این صورت، برای کاهش خطرات ایمنی و حفاظت در برابر پرتوها، این چشمه به مکانی حدود دو تا سه متر به زیر زمین انتقال می‌یابد.

کولیماتور:[2] کولیماتور از اجزای جانبی و قسمتی از چیدمان آزمایش است که طی آن، نوترون‌ها از یک سمت کانال وارد شده و پس از عبور از طول آن، از سمت دیگر خارج شده و در جهت مشخصی، نمونه را در وضعیت پرتودهی قرار می‌دهد. در واقع، استفاده از کولیماتور در آزمایشگاه، این امکان را فراهم می‌کند که نمونه در فاصلهٔ مشخص، در معرض حداکثر شار نوترونی باشد بدون آنکه تجهیزات آزمایشگاهی در شار و دز نوترونی بالا قرار گیرند [۲]. کولیماتور آزمایشگاه شهید شهریاری به‌صورت کانال استوانه‌ای به شعاع ۵ cm و طول حدوداً ۸۰ cm، از جنس استیل و به ضخامت ۳ mm است. این کولیماتور در ارتفاع ۷۸ cm از سطح کف آزمایشگاه و به‌صورت افقی قرار دارد که از یک طرف به کانال مرکزی- جایی که چشمهٔ نوترون قرار می‌گیرد- و از طرف دیگر که به بیرون تانک- محل قرار گرفتن نمونه- منتهی می‌شود (شکل ۲).

شکل ۲: تصویر تانک چشمهٔ آزمایشگاه و موقعیت کولیماتور کانال‌های داخل آن

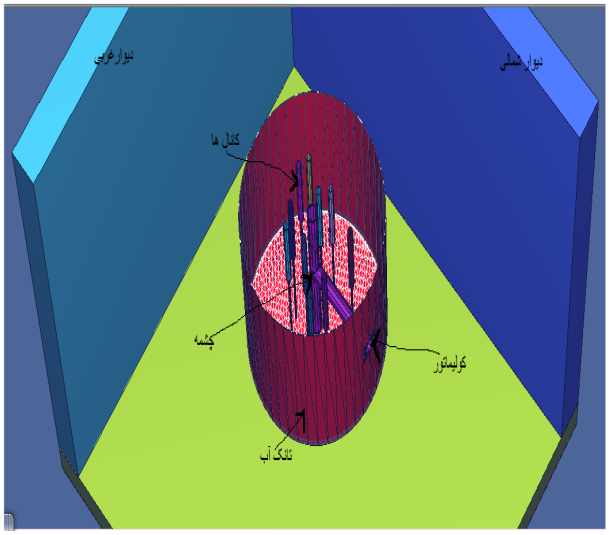
1. استیل زنگ نزن یا Stainless

2. Collimator

۳. شبیه‌سازی با کد MCNP

MCNP یک کد چندمنظوره است که با روش مونت کارلو و با تکیه بر احتمالات، به حل معادلات ترابرد نوترون، گاما و الکترون به‌صورت گسسته‌سازی در انرژی و مکان می‌پردازد [۳ و ٤]. در این مطالعه، از ورژن[1] MCNP4C و کامپیوتر ٦٤ بیتی core(TM)i5 دارای ٤ هسته‌ای استفاده شده است.

در مدل‌سازی کد MCNP، علاوه بر اندازه‌ها و فاصله‌های مربوط به تانک، کانال‌ها، کولیماتور و...، دیوارهای اصلی و اطراف آن نیز مطابق مدل واقعی آزمایشگاه، مدل‌سازی شدند. این قسمت‌ها با دقت خاص در کارت‌های سلول و سطوح MCNP تعریف شده‌اند. هندسهٔ سه‌بعدی این شبیه‌سازی در شکل (۳) نشان داده شده است. چون این مطالعه به بررسی میزان دز دریافتی کارکنانی پرداخته است که حین آزمایش به‌ناچار مجبورند در آزمایشگاه فعالیت کنند، در تمامی مراحل شبیه‌سازی‌ها چشمه در ۷۸ سانتی‌متری از کف آزمایشگاه داخل تانک در نظر گرفته شده است (اصطلاحاً چشمه روشن است).

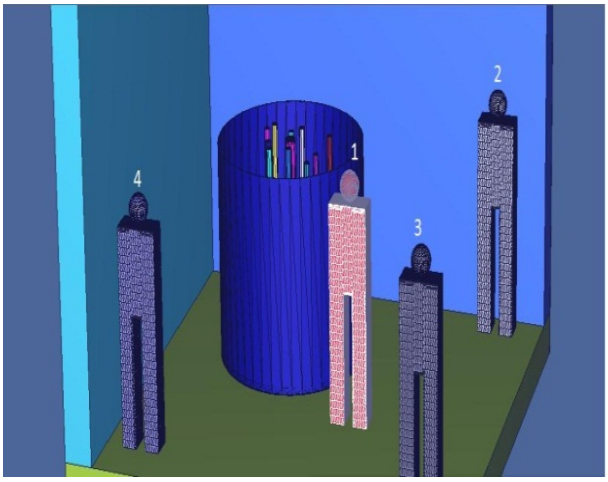


شکل ۳: هندسهٔ سه‌بعدی آزمایشگاه در شبیه‌سازی کد MCNP

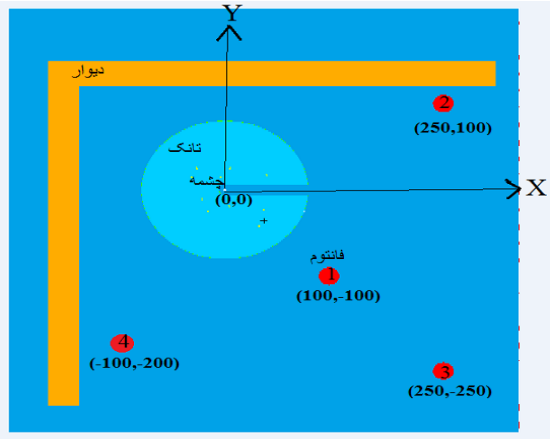
٤. نتایج شبیه‌سازی و تحلیل داده‌ها

به‌طور کلی، شبیه‌سازی و محاسبات در سه مرحله انجام شده است که در ادامه، به بیان آن‌ها و نتایج به‌دست‌آمده پرداخته می‌شود:

مرحلهٔ اول: در مرحلهٔ اول از چهار فانتوم که شکل هندسی مشابه انسان دارند، استفاده شد؛ این فانتوم‌ها تشکیل‌شده از عناصر اصلی بدن انسان که شامل اکسیژن (۷۰٪)، کربن (۲۰٪) و هیدروژن (۱۰٪) هستند، در چهار نقطهٔ انتخابی آزمایشگاه شبیه‌سازی شدند؛ البته وابسته به وسعت آزمایشگاه‌ها می‌توان از تعداد بیشتر یا کمتری استفاده کرد تا به نتایج مطلوب دست یافت. در شکل (٤) و شکل (٥) شمارهٔ فانتوم‌ها و همچنین موقعیت مکانی آن‌ها را مشاهده می‌کنید.



شکل ۴: فانتوم‌های شبیه‌سازی‌شده و شمارهٔ آن‌ها

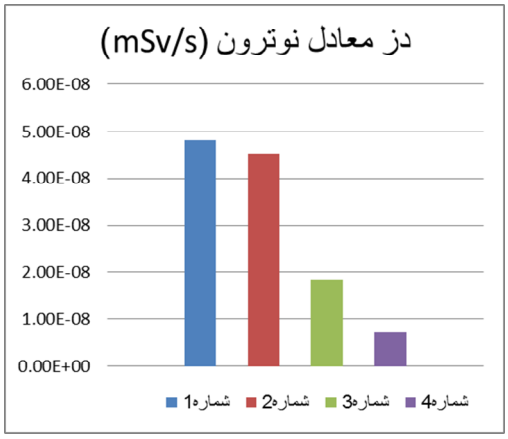


شکل ۵: شمارهٔ فانتوم‌های شبیه‌سازی‌شده به همراه مختصات (x,y) آن‌ها در آزمایشگاه

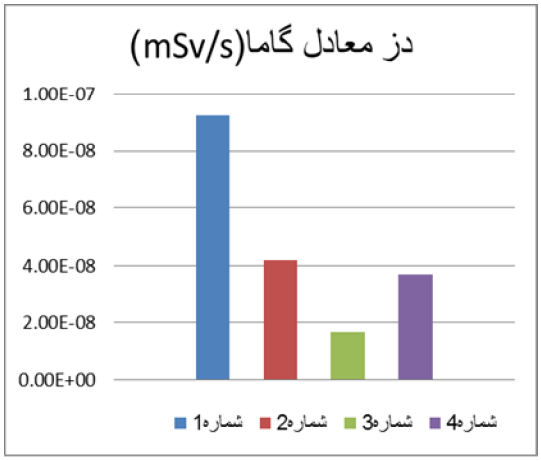
در این مرحله، بررسی میزان دز جذبی نوترون و گاما برای هریک از فانتوم‌های شبیه‌سازی، با دستور تالی F6 کد انجام گرفت (تالی F6 مقدار انرژی جذب‌شده در واحد جرم را که همان معادل دز است، حساب می‌کند). این کار پس از گرفتن خروجی‌های کد (در واقع با در دست داشتن معادل دز از خروجی کد که برای یک ذره نرمالیزه شده است) و محاسبات مربوط به قدرت چشمهٔ نوترون آزمایشگاه (آهنگ گسیل

1. Version

نوترونی حدوداً $3/3\times10^{7}$ n/s و ضریب کیفیت ذره[1] انجام گرفت و سپس، آهنگ دز معادل بر حسب میلی سیورت بر ثانیه، برای چهار نقطهٔ آزمایشگاه، هم برای فوتون و هم برای نوترون و همچنین دز معادل کل برای هریک از فانتوم‌ها ثبت و رسم شدند. نتایج این محاسبات در شکل (٦) (الف و ب) و شکل (٧) نشان داده شده است.



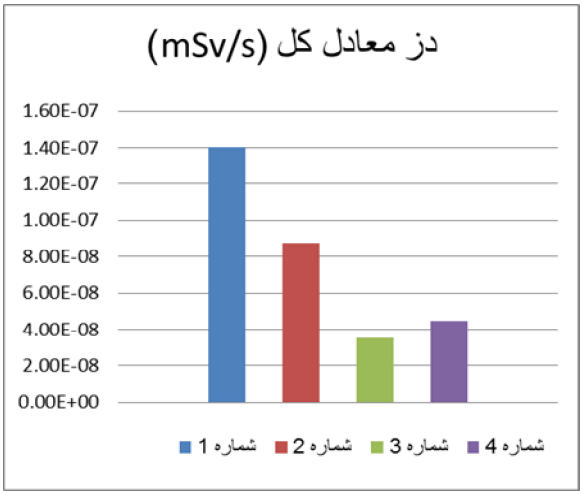
شکل ۶ الف: آهنگ دز معادل نوترون برای فانتوم‌های نشان‌داده‌شده در شکل ۴ و ۵ با کد MCNP



شکل ۶ ب: آهنگ دز معادل گاما برای فانتوم‌های نشان‌داده‌شده در شکل۴ و ۵ با کد MCNP

همان‌طور که در شکل (٦) الف دیده می‌شود، آهنگ دز نوترون فانتوم شمارهٔ ۱ و ۲ اختلاف کمتری دارند. همچنین، نشان می‌دهد که به‌طور کل، در ناحیهٔ مقابل کولیماتور، آزمایشگر دز نوترونی زیادی می‌گیرد (در حدود 2×10^{-4} میلی سیورت بر ساعت) و بستگی کمتری به فاصله از تانک چشمه دارد. جالب این است که فانتوم شمارهٔ ۳ با وجود فاصلهٔ بیشتر از تانک نسبت به فانتوم شمارهٔ ٤، دز نوترونی بیشتری جذب می‌کند. این مسئله نشان‌دهندهٔ آن است که دز دریافتی نوترون بیشتر وابسته به زاویهٔ بین محور کولیماتور (همان محور X) و محل قرار گرفتن فانتوم است. در شکل (٦) ب نشان می‌دهد که دز دریافتی گاما از فانتوم شمارهٔ ۱ به فانتوم شمارهٔ ۲ سریع افت می‌کند. همچنین، بین فانتوم شمارهٔ ۳ و شمارهٔ ٤ رفتار مربوط به آهنگ دز نوترون دیده نمی‌شود؛ بنابراین، برای دز حاصل از پرتوهای گاما، می‌توان وابستگی را بیشتر نسبت به فاصله دانست تا زاویهٔ بین محور کولیماتور و نقطهٔ مورد نظر.

در نهایت، شکل ۷ آهنگ دز معادل کل ناشی از ترکیب دو اثر مربوط به دز فوتون و نوترون را نشان می‌دهد.

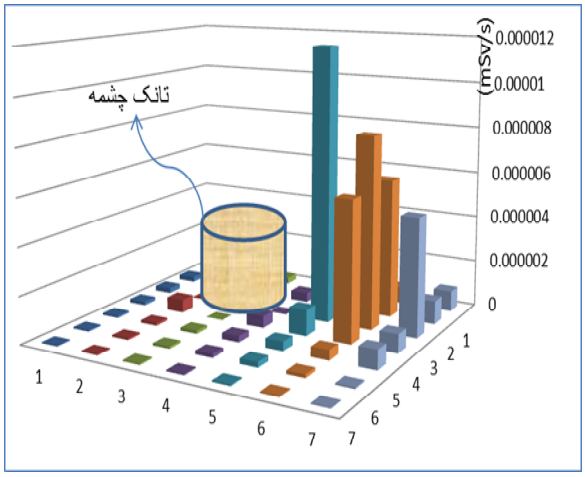


شکل ۷: آهنگ دز معادل مجموع فوتون و نوترون برای فانتوم‌های نشان‌داده‌شده در شکل ۴ و ۵ با کد MCNP

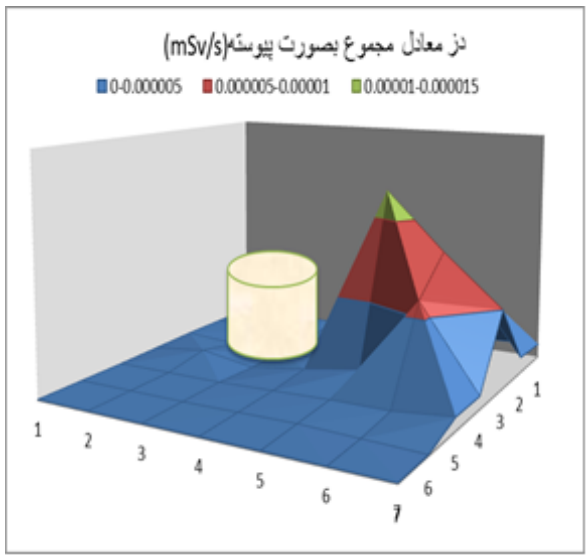
مرحلهٔ دوم: در این مرحله، کل آزمایشگاه به ٤٩ قسمت تقسیم‌بندی شده و در هر قسمت، یک فانتوم انسان قرار داده شده تا دز معادل کل برای نقاط آزمایشگاه تعیین شود. نتایج حاصل از آن، در دو نمودار شکل‌های ۸ و ۹ به‌صورت گسسته و پیوسته به همراه تصویر نمادین تانک چشمهٔ آزمایشگاه رسم شده‌اند. همان‌طور که انتظار می‌رفت، دزهای دریافتی برای فانتوم‌های روبه‌روی کولیماتور بیشترین مقدار را خواهند داشت و سپس، دزهای کمتر از آن مربوط به روبه‌روی کولیماتور و در فاصله‌ها و زاویه‌های بیشتر هستند. نباید

1. Particle Quality Factor

فراموش شود که دز دریافتی در کناره‌های تانک به دور از کولیماتور نیز دز قابل توجهی دارد.

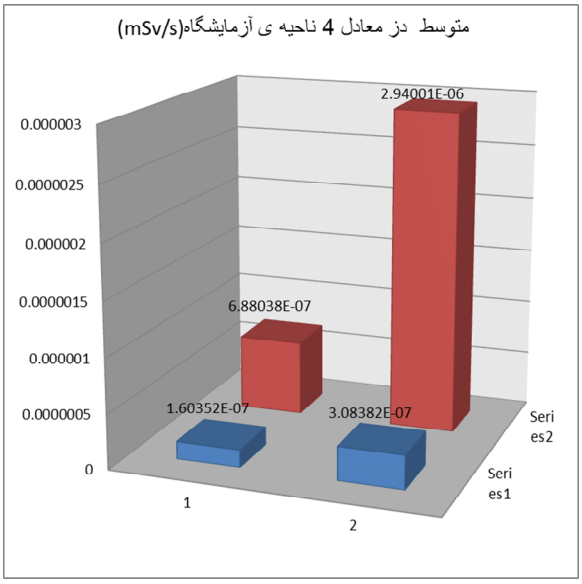


شکل ۸: آهنگ دز معادل مجموع برای ۴۹ ناحیهٔ تقسیم‌بندی‌شده آزمایشگاه با شبیه‌سازی کد MCNP



شکل ۹: آهنگ دز معادل مجموع برای کل آزمایشگاه به‌صورت پیوسته

مرحلهٔ سوم: دز معادل محاسبه‌شده در مرحلهٔ قبل، گرچه برای سطح‌های کوچک تقسیم‌بندی‌شدهٔ آزمایشگاه، دقیق‌تر مشخص شده‌اند، اشکال آن این است که در آن، فرض شده است آزمایشگر (یا فانتوم) همیشه در یک نقطه می‌ماند که معمولاً خلاف واقعیت است. معمولاً در یک آزمایشگاه، آزمایشگر در محدودهٔ بزرگ‌تری فعالیت می‌کند؛ بنابراین، پیدا کردن یک منطقهٔ بزرگ‌تر امن از لحاظ فیزیک بهداشت برای آزمایشگاه در مواقعی که آزمایشگر مجبور است، در آنجا فعالیت کند، لازم است و موجب می‌شود تا مرحلهٔ سوم محاسبات برای محدودهٔ بزرگ‌تر نیز انجام شود. لذا در مرحلهٔ سوم، کل آزمایشگاه فقط به ٤ ناحیهٔ مساوی تقسیم‌بندی شده و با استفاده از مقادیر مرحلهٔ دوم، متوسط آهنگ دز معادل برای ٤ ناحیهٔ آزمایشگاه محاسبه شده‌اند. نمودار و مقادیر نشان‌داده‌شده در شکل (۱۰)، دز معادل بر حسب mSv/s برای این ٤ ناحیه‌اند.



شکل ۱۰: متوسط آهنگ دز معادل مجموع برای ۴ ناحیهٔ کل آزمایشگاه

اگر این مقادیر را در یک ساعت (۳٦۰۰s) ضرب کنیم، مقادیر به‌دست‌آمده بر حسب mSv/h خواهند بود. این مقادیر به‌ترتیب صعودی برابر با $(10^{-2})\times\{$۰/۰٦ و ۰/۱۱ و ۰/۲٤ و ۱/۰۵$\}$ خواهند بود.

میزان آستانهٔ دز دریافتی شاغلان پرتوکار که توسط استانداردهای بین‌المللی تأیید شده، باید کمتر از ۰/۰۱ میلی سیورت بر ساعت باشد [۱ و ۵].

نمودار و مقادیر شکل (۱۰) نشان می‌دهد که میزان دز دریافتی ناحیهٔ روبه‌روی کولیماتور (قسمت شمال شرقی آزمایشگاه) اندکی بیشتر از مقدار استاندارد است. لذا توصیه می‌شود از فعالیت در این منطقه، جداً خودداری شود. در واقع، در این ناحیه، بالاترین آهنگ دز از لحاظ پرتوگیری برای آزمایشگر است.

در سه ناحیهٔ دیگر، دز دریافتی کمتر از دز آستانهٔ استاندارد بوده و قسمت جنوب غربی آزمایشگاه برای مواقعی که آزمایشگر ناچار است در حین انجام آزمایش (یعنی وقتی که

چشمه فعال است) در آزمایشگاه فعالیت کند، ایمن‌ترین مکان به‌لحاظ پرتوگیری و فیزیک بهداشت است.

در پایان، شایان ذکر است که در تمامی موارد شبیه‌سازی، تعداد ذرات برای اجرای شبیه‌سازی MCNP4C بین 10^{7} تا 2×10^{8} بوده و زمان اجرای برنامه برای این تعداد ذره، بین ۵ تا ۲۰ ساعت به طول انجامیده است. خطای مربوط به این شبیه‌سازی‌ها معمولاً کمتر از ٤ درصد بوده است. این مقدار خطا، خطای تخمینی است که در خروجی برنامه‌نویسی با کد MCNP بعد از هر تالی ثبت شده است. کامپیوتری که در این مطالعه استفاده شده، یک سیستم ٦٤ بیتی چهار هسته‌ای بوده که CPU آن Core(TM)i5 است و قدرت پردازش 2.4Hz دارد.

۵. جمع‌بندی نتایج و پیشنهادات

در این مقاله، با بررسی ملاحظات ایمنی یک آزمایشگاه نمونهٔ نوترون، مشخص شد که ممکن است نواحی‌ای در آزمایشگاه وجود داشته باشد که میزان دز جذبی افراد در آن‌ها بیشتر از حد مجاز استاندارد باشد؛ بنابراین، به‌دلیل پرخطر بودن این نواحی از لحاظ پرتوگیری و فیزیک بهداشت پیشنهاد می‌شود علاوه بر مدیریت زمان کاری پرسنل آزمایشگاه، نواحی امن‌تر آزمایشگاه به روش مشابه این مقاله شناسایی شود تا افراد آزمایشگر برای انجام فعالیت‌های آزمایشگاهی، از این نواحی استفاده کنند. همچنین، پیشنهاد می‌شود برای اطلاع‌رسانی بیشتر کارکنان آزمایشگاه‌های هسته‌ای و محققان مهمان، از میزان دز دریافتی از قسمت‌های مختلف آزمایشگاه و آگاهی از امن‌ترین و ناامن‌ترین نواحی آن، شکل‌های مشابه شکل (۸) و شکل (۱۰) در برد اعلانات آزمایشگاه نصب شود. این کار می‌تواند در افزایش سلامت کارکنان آزمایشگاه و دانش‌پژوهان مراجعه‌کننده به آزمایشگاه و به حداقل رساندن دز دریافتی از پرتوهای آزمایشگاه، در آزمایش‌های مختلف با چشمهٔ نوترون کمک شایانی بکند.

٦. مراجع

[1] G.Hine, G.Brounell, "Radiation dosimetry", New York, Academic press, U.S.A (1961).

[۲] بازول جی، مترجم قنادی مراغه محمد، *روش‌های آزمایشگاهی رادیوایزوتوپ‌ها*، انتشارات سازمان انرژی اتمی ایران، چاپ سوم، ۱۳۸۸.

[۳] وفابخش مهدی، ریاضی یاشار، *راهنمای استفاده از کد شبیه‌سازی MCNP4C (روش مونت کارلویی برای محاسبات هسته ای)*، انتشارات اندیشه‌سرا، چاپ اول، ۱۳۹۰.

[٤] شیرمردی سید پژمان، طاهری علی، امیر جمال، *کاربرد کد شبیه‌سازی MCNP در محاسبات هسته‌ای*، انتشارات سنوبرک کرج، چاپ اول، ۱۳۸۹.

[۵] سمبو هرمان، مترجمان ابوکاظمی محمد ابراهیم، سپهری هوشنگ، بینش علیرضا، *آشنایی با فیزیک بهداشت از دیدگاه پرتوشناسی*، مرکز نشر دانشگاهی، چاپ پنجم، ۱۳۹۲.