

شبیه‌سازی حفاظ جهت استفاده ایمن از شتاب‌دهنده پرده‌ای الکترون با MCNP4C

شهرزاد قنبری^۱، امیدرضا کاکویی^{۲*} و محمدصادق آخوندی خضرآباد^۱

^۱ دانشکده فیزیک، دانشگاه پیام نور مرکز تحصیلات تکمیلی، تهران، ایران.

^۲ پژوهشکده فیزیک و شتابگرها، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی، تهران، ایران.

*تهران، سازمان انرژی اتمی، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، پژوهشکده فیزیک و شتابگرها، کدپستی: ۸۳۶-۱۴۳۹۵

پست الکترونیکی: okakuee@aeoi.org.ir

چکیده

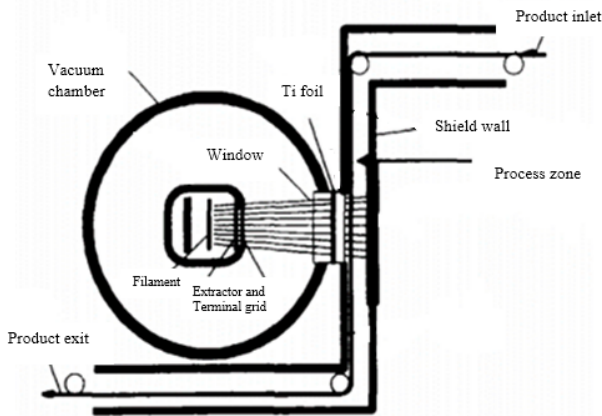
در یک شتاب‌دهنده الکترونی پرده‌ای هنگام عبور باریکه الکترونی از پنجره خروجی تیتانیومی محافظ خلاء، فوتون‌های پرتو ایکس به‌علت کند شدن الکترون‌های شتابدار تولید می‌شوند. یکی از مسائل مهم در استفاده از شتاب‌دهنده‌های الکترونی توانایی کنترل پرتو ایکس تولید شده یا در واقع حفاظ‌سازی شتاب‌دهنده به‌منظور جلوگیری از آثار مخاطره آمیز ناشی از آن است. در کار حاضر بر اساس هندسه پیشنهادی شتاب‌دهنده الکترونی پرده‌ای، با استفاده از کد MCNP4C، دز پرتو ایکس حاصل از تابش ترمزی شبیه‌سازی شد که خود ناشی از برخورد باریکه الکترونی با جریان ثابت ۵۰ mA و انرژی‌های مختلف ۱۰۰-۳۰۰ keV بر روی فویل تیتانیومی با ضخامت ۱۳ μm است. نتایج حاکی از کاهش دز پرتو ایکس ناشی از تابش ترمزی از ۶۸۵ Gy به ۱۷۶ Gy به ازای افزایش انرژی از ۱۰۰ keV به ۳۰۰ keV در واحد زمان است. همچنین مقادیر توان توقف تابشی شبیه‌سازی شده با کد MCNP4C برای این تغییر انرژی در پنجره تیتانیومی، روندی افزایشی از ۰/۰۱۲ MeV.cm²/g به ۰/۰۲۱ MeV.cm²/g را نشان می‌دهد. بیشینه و کمینه درصد انحراف مقادیر شبیه‌سازی و نظری توان توقف تابشی به ترتیب برابر با ۳۳٪ و ۳٪ به‌دست آمده است. نتایج حاصل از محاسبه میزان اتلاف انرژی ناشی از تابش ترمزی برای عبور الکترون از فویل تیتانیومی با ضخامت ۱۳ μm به ازای انرژی‌های ۱۰۰-۳۰۰ keV، از ۱۰^{-۲} keV × ۱۲/۴۴ تا ۷/۱۹ × ۱۰^{-۲} keV تعیین شد. علاوه بر این بر مبنای نتایج حاصل از کد MCNP4C، حفاظ شتاب‌دهنده شبیه‌سازی و برای بیشینه انرژی ۳۰۰ keV ضخامت بهینه حفاظ سربی ۲/۵ cm محاسبه گردید.

کلیدواژگان: شتاب‌دهنده الکترونی پرده‌ای، باریکه الکترونی (EB)، پرتو ایکس ترمزی، توان توقف تابشی، حفاظ، MCNP4C، ESTAR.

۱. مقدمه

فیزیکی و شیمیایی مواد (مانند سخت‌کاری پوشش‌ها، اتصال عرضی در پلیمرها)، کاهش آلاینده‌های نامطلوب، پاکسازی فاضلاب، استریل نمودن تجهیزات پزشکی و بسیاری از

امروزه استفاده از شتاب‌دهنده ذرات نیازمند اعمال سخت-گیرانه استانداردهای ایمنی در برابر پرتو است. در حال حاضر شتاب‌دهنده‌های باریکه الکترونی (EB) به‌منظور بهبود خواص



شکل (۱): نمای شمائی از شتاب‌دهنده الکترونی پرده‌ای [۵].

در این کار با استفاده از روش مونت کارلو، مقدار دز پرتو ایکس بر روی پنجره خروجی شتاب‌دهنده الکترون پرده‌ای [۹ و ۱۰]، با هندسه مشخص به دست آمد. سپس آهنگ خطی افت انرژی ناشی از تابش ترمزی بر روی فویل تیتانیومی بررسی و با مقادیر حاصل از روابط نظری مورد مقایسه قرار گرفت. درصد انحراف مقادیر حاصل از شبیه‌سازی و نظری محاسبه شد. بر اساس مقادیر توان توقف تابشی شبیه‌سازی شده، اتلاف انرژی بر روی فویل تیتانیومی تعیین شد. همچنین شبیه‌سازی حفاظ شتاب‌دهنده انجام شد و ضخامت مناسب حفاظ به ازای بیشینه انرژی باریکه الکترون فرودی به دست آمد.

۲. مواد و روش‌ها

از آنجایی که کد MCNP4C، بر اساس روش مونت کارلو به منظور ترابرد ذرات مختلف از جمله الکترون مورد استفاده قرار می‌گیرد [۱۱]، در کار حاضر با استفاده از این کد، شبیه‌سازی دز پرتو ایکس ترمزی، توان توقف تابشی و حفاظ شتاب‌دهنده الکترونی پرده‌ای انجام شده است. اصولاً هدف از به‌کارگیری شتاب‌دهنده‌های الکترونی پرده‌ای دستیابی به باریکه پهن الکترونی یکنواخت در بازه انرژی ۱۰۰-۳۰۰ keV است

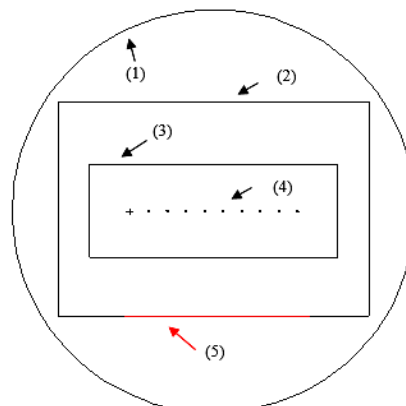
کاربردهای دیگر در صنایع مختلف به‌کار گرفته می‌شوند [۱-۳]. از این رو بحث بومی‌سازی فناوری ساخت چنین سیستم‌هایی از دغدغه‌های هر کشوری است و بالتبع فرآیند شبیه‌سازی سیستم و بررسی پارامترهای تأثیرگذار در گام نخست امری اجتناب‌ناپذیر است. مسأله ساخت شتاب‌دهنده الکترونی پرده‌ای که یکی از انواع شتاب‌دهنده‌های الکترونی کم انرژی (۱۰۰-۳۰۰ keV) است، یکی از موضوع‌های مورد توجه پژوهشگران داخلی می‌باشد که طی چند سال اخیر بدان پرداخته شده است [۴]. اصولاً شتاب‌دهنده الکترونی پرده‌ای شامل چهار بخش کلی محفظه شتاب‌دهی، سیستم خلاء، منبع تغذیه ولتاژ بالا و حفاظ می‌باشند [۴-۵]. این نوع از شتاب‌دهنده‌های الکترونی دارای ویژگی‌های مشترکی همچون گسیل الکترون‌ها از کاتدهای گرمایونی، تمرکز باریکه الکترونی توسط الکتروود استخراج و شتاب‌دار شدن آن‌ها در فضای خلاء توسط میدان الکتریکی قوی است. در این شتاب‌دهنده‌ها، الکترون‌های شتاب‌دار در نهایت از طریق پنجره خروجی (فویل تیتانیومی) وارد اتمسفر هوا می‌شوند و به هدف در حال حرکت برخورد می‌کنند. شکل شمائی از شتاب‌دهنده الکترونی پرده‌ای در شکل ۱ آورده شده است [۶-۷]. باریکه الکترونی با عبور از فویل تیتانیومی، بر اساس تابش ترمزی یا بر اساس یونش و برانگیزش اتمی با تولید الکترون‌های برگشتی، الکترون‌های ثانویه و گسیل پرتو ایکس، انرژی خود را از دست می‌دهند. اصولاً پراکندگی پرتو ایکس در همه جهات انجام می‌شود و برد بلندی در هوا دارد. بدین ترتیب نیاز به حفاظ تابشی در سیستم‌های باریکه الکترونی در ناحیه پنجره تیتانیومی به بعد که شامل هدف نیز می‌باشد، امری اجتناب‌ناپذیر است [۵]. جهت برآورده نمودن الزامات استانداردهای ایمنی پرتوی، بسته به نوع شتاب‌دهنده الکترونی و انرژی باریکه الکترونی جنس و ضخامت حفاظ مورد نظر قابل تغییر است [۸].

راستای انتشار باریکه (محور Z) مورد بررسی قرار گرفت. از تالی $F8^*$ میزان انرژی جذب شده فوتون‌ها در داخل سلول تعریف شده بر حسب MeV به دست آمد و با تقسیم این مقادیر بر جرم سلول، دز تابش ترمزی بر حسب Gy(J/kg) محاسبه شد.

همچنین آهنگ خطی افت انرژی ناشی از تابش ترمزی در پنجره خروجی توسط کد MCNP4C مورد بررسی قرار گرفت. با استفاده از نتایج حاصل از تقسیم دو تالی F6 به F4 آهنگ خطی افت انرژی بر حسب $\text{MeV}\cdot\text{cm}^2/\text{g}$ تعیین شد. مقادیر توان توقف تابشی حاصل از شبیه‌سازی با مقادیر به دست آمده از روابط توان توقف تابشی نظری مورد مقایسه قرار گرفت و درصد انحراف مقادیر شبیه‌سازی و نظری محاسبه شد. میزان اتلاف انرژی ناشی از تابش ترمزی در فویل تیتانیومی بر اساس مقادیر حاصل از توان توقف تابشی شبیه‌سازی تعیین شد. در نهایت به علت اهمیت بحث محافظت در برابر پرتو ایکس برای بیشینه انرژی باریکه الکترونی فرودی 300 keV ، حفاظ شتاب‌دهنده با کد MCNP4C شبیه‌سازی شد و ضخامت مناسب حفاظ به دست آمده است.

اساساً در کدهایی مانند MCNP4C که بر اساس روش مونت کارلو به بررسی ترابرد ذرات مانند الکترون می‌پردازند، به منظور تعیین خطاهای ناشی از اینگونه محاسبات شیوه‌های متفاوتی در مراجع ارائه شده است [۱۳]. ساده‌ترین روش برای کاهش خطا، افزایش nps^1 می‌باشد. در کار حاضر این مقدار 10^9 در نظر گرفته شده است و این بدان معناست که، کد سرگذشت ذره (الکترون) را به تعداد nps بررسی و نتیجه میانگین پس از اجرای برنامه گزارش می‌شود [۱۴]. خطای ناشی از هر محاسبه با کد MCNP4C در این کار کم‌تر از ۵ درصد می‌باشد.

[۴ و ۱۰]. بنابراین در این پژوهش برای استخراج باریکه پهن الکترونی از پنجره خروجی شتاب‌دهنده که بصورت فویل تیتانیومی با ابعاد تقریبی $10 \times 50 \text{ cm}^2$ در نظر گرفته شده است، از ۱۰ عدد فیلمان تنگستنی بعنوان کاتد تفنگ الکترونی گرما یونی به قطر 0.5 cm و طول 10 cm استفاده شده است. به منظور حصول توزیع یکنواخت باریکه، فیلمان‌ها به صورت موازی در فاصله تقریبی 6 cm از یکدیگر و پنجره خروجی به صورت موازی با صفحه در برگیرنده فیلمان‌ها که در فاصله 35 cm از آن قرار داده شده است، شبیه‌سازی شد. محفظه اصلی شتاب‌دهنده از جنس استیل به طول 120 cm و قطر 70 cm در نظر گرفته شده است. هندسه پیشنهادی در شکل ۲ قابل مشاهده است [۴، ۹ و ۱۰].



شکل (۲): نمای شمائی از برش طولی هندسه شبیه‌سازی شده با کد MCNP4C (راستای انتشار باریکه محور Z می‌باشد). ۱: مرز هندسه کد، ۲: محفظه شتاب‌دهی، ۳: محفظه تفنگ الکترونی، ۴: عدد فیلمان تنگستنی، ۵: فویل تیتانیومی.

الکترون‌ها با آهنگی متناسب با مربع شتاب خود تحت تأثیر نیروی کولنی هسته عناصر مواد تشکیل‌دهنده محیط، تابش ترمزی می‌کنند [۱۲]. با استفاده از کد MCNP4C، دز پرتو ایکس ترمزی ناشی از عبور باریکه الکترونی با جریان ثابت 50 mA و انرژی‌های متغیر $100, 150, 200, 250$ و 300 کیلوالکترون‌ولت در فویل تیتانیومی با ضخامت $13 \mu\text{m}$ در

¹ Number of particle source

۳. بحث و نتایج

۱.۳. دزیمتری پرتو ایکس ترمزی بر روی فویل

تیتانیومی

با استفاده از کد MCNP4C برای الکترون با انرژی متغیر ۱۰۰ keV تا ۳۰۰ keV، دز پرتو ایکس ترمزی درون فویل تیتانیومی با ضخامت ۱۳ μm بر حسب گری (Gy) تعیین شد سپس مقادیر برای باریکه الکترونی با جریان ثابت ۵۰ mA معادل سازی شد [۹]. با استفاده از رابطه $I = \frac{ne}{t}$ ، تعداد الکترون های عبوری در هر ثانیه به ازای جریان ۵۰ mA برابر $10^{17} \times 3/125$ می باشد که در محاسبات انجام شده در کار حاضر معادل 3×10^{17} در نظر گرفته شده است. با ضرب این عدد در مقادیر دز تابش ترمزی شبیه سازی شده برای الکترون، دز پرتو ایکس ترمزی برای باریکه الکترونی با جریان ثابت ۵۰ mA محاسبه می شود. این مقادیر بر حسب گری در جدول ۱ آورده شده است.

جدول (۱): مقادیر دز تابش ترمزی در فویل تیتانیومی ۱۳ μm به ازای

انرژی باریکه فرودی الکترونی ۳۰۰-۱۰۰ keV.

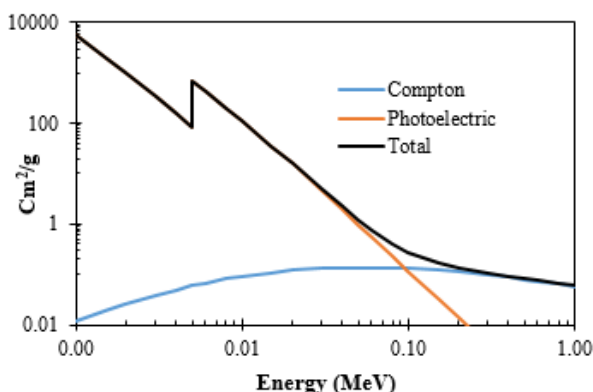
انرژی باریکه فرودی الکترونی (keV)	دز تابش ترمزی در فویل تیتانیومی (Gy)
۱۰۰	۶۸۴/۴۸
۱۵۰	۶۶۲/۷۸
۲۰۰	۳۶۰/۶۸
۲۵۰	۱۹۷/۱۲
۳۰۰	۱۷۵/۴۰

بر اساس نتایج جدول ۱، با افزایش انرژی، دز پرتو ایکس کاهش می یابد. این روند را می توان این گونه توجیه نمود که در پی برهمکنش پرتو ایکس ترمزی با فویل تیتانیومی با ضخامت ۱۳ μm و عدد اتمی ۲۲، محدوده ای از فوتون هایی با انرژی محدود الکترون ولت تا مقداری برابر با بیشینه انرژی الکترون های فرودی قابل تولید است و همان گونه که در نمودار شکل

۳ مشهود است در این بازه انرژی دو پدیده جذب فوتوالکتریک و پراکندگی کامپتون قابل وقوع می باشد. از طرفی در انرژی های زیر ۱۰۰ keV پدیده غالب، جذب فوتوالکتریک می باشد که علت زیاد بودن دز فوتون های ایکس با انرژی کم می باشد. این در حالی است که در انرژی های بالای ۱۰۰ keV، پراکندگی کامپتون غالب می شود و به دنبال آن احتمال فرار فوتون های پراکنده شده از فویل نازک تیتانیومی افزایش می یابد. بدین ترتیب دز فوتون های ایکس در انرژی های زیادتر روند کاهشی را دنبال می کند. این مطلب را بر اساس قانون بیر-لامبرت^۱ نیز می توان بیان کرد:

$$\frac{I}{I_0} = e^{-\mu x} \quad (1)$$

که I_0 و I به ترتیب شدت فوتون فرودی و عبوری، μ ضریب تضعیف خطی کل^۲ و x ضخامت نمونه هدف است [۱۲]. به طوری که با توجه به شکل ۳، با افزایش انرژی از ۱۰۰ keV تا ۳۰۰ keV، ضریب تضعیف خطی کل به طور قابل ملاحظه ای کاهش می یابد و این بدان معناست که طبق رابطه ۱ در انرژی های زیادتر نسبت $\frac{I}{I_0}$ افزایش می یابد و در واقع تعداد فوتون های عبوری افزایش می یابد. بدین ترتیب دز فوتون در تیتانیوم در انرژی های زیادتر کاهش می یابد.



شکل (۳): نمودار ضرایب تضعیف جرمی فوتون (کامپتون، فوتوالکتریک و کل) در پی برهمکنش با تیتانیوم [۱۵].

^۱ Beer-Lambert law

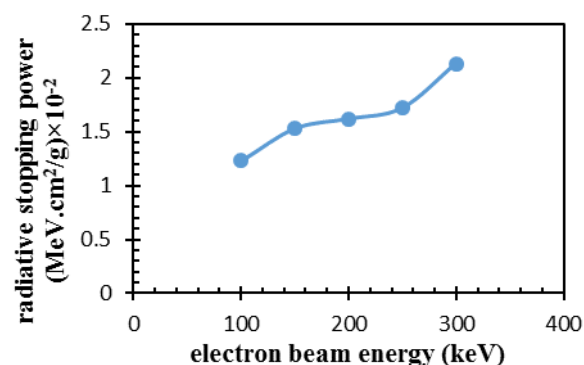
^۲ linear attenuation coefficient

۲.۳. تعیین آهنگ خطی افت انرژی ناشی از تابش

ترمزی بر روی پنجره خروجی

توان توقف (اتلاف انرژی در واحد طول ناشی از برخورد ذرات باردار با ماده) بر مبنای تئوری بته^۱ تعریف می‌شود. فیزیکدانان بسیاری با افزودن تصحیحاتی بر این تئوری راه را برای انجام محاسبات دقیق‌تر این کمیت هموار ساخته‌اند [۱۷-۱۹]. با توجه به اینکه جرم پروتون بیشتر از جرم الکترون است، بنابراین سهم تابش ترمزی برای الکترون‌ها چندین مرتبه مقداری بیش‌تر از ذرات باردار سنگین می‌باشد بدین ترتیب اهمیت بررسی توان توقف تابشی برای الکترون‌ها مشهود می‌شود [۱۹].

در این کار با استفاده از کد MCNP4C، کمیت آهنگ خطی افت انرژی ناشی از تابش ترمزی در فویل تیتانیومی به ازای تغییر انرژی الکترون فرودی از ۱۰۰ keV تا ۳۰۰ keV برای هندسه پیشنهادی شتاب‌دهنده الکترونی پرده‌ای تعیین شد. نتایج حاصل از این شبیه‌سازی به صورت نمودار در شکل ۴ آورده شده است. با توجه به این نمودار، مشاهده می‌شود که با افزایش انرژی، توان توقف تابشی افزایش می‌یابد.



شکل (۴): نمودار مقادیر شبیه‌سازی شده توان توقف تابشی (MeV.cm²/g) بر حسب انرژی الکترون فرودی (keV) در فویل تیتانیومی.

کسری از انرژی الکترون‌ها در محدوده چند صد کیلو الکترون‌ولت که به صورت فوتون تابش ترمزی ظاهر می‌شود، از رابطه زیر تبعیت می‌کند:

$$f = 3.5 \times 10^{-4} ZT \quad (2)$$

که Z عدد اتمی محیط، T انرژی جنبشی بیشینه الکترون بر حسب MeV است [۱۲].

بنابراین طبق رابطه ۲، انتظار می‌رود با افزایش انرژی، تابش ترمزی افزایش یابد و بدین ترتیب رشد توان توقف تابشی در شبیه‌سازی حاضر به ازای افزایش انرژی قابل توجه می‌باشد. به منظور مقایسه نتایج حاصل از شبیه‌سازی آهنگ اتلاف انرژی الکترون در تیتانیوم با استفاده از کد MCNP4C با داده‌های نظری، از مقادیر محاسبه شده در گزارشات پیشین استفاده شده است. مقادیر توان توقف تابشی الکترون در تیتانیوم که توسط پیجز^۲ و همکارانش ارائه شده، به ازای انرژی ۱۰۰ keV تا ۳۰۰ keV، در جدول ۲ آورده شده است [۲۰].

جدول (۲): مقادیر توان توقف تابشی حاصل از شبیه‌سازی با کد MCNP4C، مقادیر نظری گزارش شده توسط پیجز [۲۰] و برنامه ESTAR [۲۱] بر حسب انرژی الکترون.

توان توقف تابشی $\times 10^{-2}$ (MeV.cm ² /g)			
ESTAR	Pages et. al	MCNP4C	انرژی (keV)
۱/۲۷	۱/۶۰	۱/۲۳	۱۰۰
۱/۳۴	۱/۷۷	۱/۵۳	۱۵۰
۱/۴۱	۱/۹۳	۱/۶۲	۲۰۰
۱/۵۰	۲/۱۱	۱/۷۲	۲۵۰
۱/۶۰	۲/۳۰	۲/۱۳	۳۰۰

جدول (۳): درصد انحراف نتایج توان توقف تابشی شبیه‌سازی شده با کد MCNP4C نسبت به نتایج نظری پیچز و برنامه ESTAR.

درصد انحراف نتایج شبیه‌سازی شده نسبت به نتایج نظری (%)		
انرژی (keV)	Pages et. al	ESTAR
۱۰۰	۲۳/۱۲	۳/۱۴
۱۵۰	۱۳/۵۵	۱۴/۱۷
۲۰۰	۱۶/۰۶	۱۴/۸۹
۲۵۰	۱۸/۴۸	۱۴/۶۶
۳۰۰	۷/۳۹	۳۳/۱۲

با توجه به جدول ۳، همانگونه که مشاهده می‌شود درصد انحراف نتایج حاصل از شبیه‌سازی، و داده‌های ESTAR با افزایش انرژی، افزایش یافته است در صورتی‌که این روند برای داده‌های ارائه شده توسط پیچز به صورت تصادفی است. با توجه به اعتبار داده‌های مورد استفاده در ESTAR (که مورد تایید ICRU [۲۲] نیز می‌باشد)، اختلاف مشاهده شده دارای روند صحیح است. دلیل اصلی این اختلاف را می‌توان ناشی از عدم تصحیح مناسب افت انرژی در نمونه هدف دانست [۱۷]. بدین معنا که در هندسه شبیه‌سازی با استفاده از کد MCNP4C، ضخامت پنجره تیتانیومی 0.013 cm در نظر گرفته شده است در حالی‌که در جدول داده‌ها، توان توقف برای انرژی‌های ذکر شده با هدف نازک گزارش شده است. به علاوه تقریب‌ها و ضرایب تصحیح اعمال شده بر روی نظریه بته به منظور دستیابی به روابط نظری که قادر به تخمین دقیق‌تر توان توقف باشد [۲۲] و همچنین ردیابی ذره فرودی و بررسی رویدادهای ممکن در کد MCNP4C تا پایان مرز هندسی تعریف‌شده توسط کاربر [۱۳] و محدودیت اعمال این شرایط با استفاده از روابط نظری و کتابخانه داده مورد استفاده در کد را از عمده دلایل دیگر اختلاف دانست.

همچنین در این پژوهش میزان اتلاف انرژی ناشی از تابش ترمزی محاسبه گردید. به طوری‌که مقادیر به دست آمده از توان

در گزارش مذکور، برای محاسبه توان توقف تابشی از رابطه زیر استفاده شده است:

$$\left(\frac{dE}{dx}\right)_r = \frac{N}{A} \frac{E}{m_0 c^2} \frac{1}{E} \int_0^T E_\gamma d\sigma(E_\gamma) \quad (۳)$$

که در آن N عدد آواگادرو، A وزن اتمی محیط، $m_0 c^2$ جرم سکون الکترون، T انرژی جنبشی الکترون و E انرژی کل الکترون اولیه، $d\sigma(E_\gamma)$ احتمال تولید فوتون با انرژی E_γ از الکترونی با انرژی E است [۲۰].

علاوه بر این مقادیر توان توقف تابشی الکترون با انرژی متفاوت از 100 keV تا 300 keV در تیتانیوم با استفاده از برنامه ESTAR، که برنامه‌ای بر اساس پایگاه داده‌ها است، استخراج و در جدول ۲ آورده شده است [۲۱].

با مقایسه مقادیر توان توقف تابشی الکترون حاصل از شبیه‌سازی و نظری در تیتانیوم برای بازه انرژی 100 keV - 300 keV ، در جدول ۲، مشاهده می‌شود که هر سه مجموعه داده‌ها دارای روند مشابه می‌باشد به گونه‌ای که با افزایش انرژی، توان توقف تابشی افزایش می‌یابد. درصد انحراف داده‌ها شبیه‌سازی شده در این کار با داده محاسباتی پیچز [۲۰] و ESTAR [۲۱] با استفاده از رابطه ۴ محاسبه و در جدول ۳ آورده شده است.

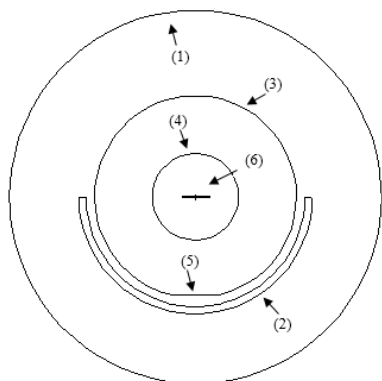
$$\text{percent deviation} = \frac{|\text{calculated data} - \text{simulated data}|}{\text{calculated data}} \times 100\% \quad (۴)$$

بیشترین و کمترین درصد انحراف مقادیر شبیه‌سازی و نظری، 3.3% و 3% می‌باشد که این درصد انحراف در محدوده ارائه شده گزارش‌های مشابه که توسط برگر^۱ و همکارانش در خصوص مقایسه مقادیر توان توقف برای انرژی متفاوت الکترون در مواد مختلف بیان شده است، می‌باشد [۲۲].

¹ Berger

$$H=W_R \times D$$

(۵)



شکل (۵): نمای شمائی از برش عرضی هندسه شبیه‌سازی شده با کد MCNP4C (راستای انتشار باریکه محور Z می‌باشد). ۱: مرز هندسه کد، ۲: حفاظ سربی، ۳: محفظه شتاب‌دهی، ۴: محفظه تفنگ الکترونی، ۵: فویل تیتانیومی، ۶: فیلمان.

بدین ترتیب با به‌کارگیری تالی *F8 در کد MCNP4C، انرژی جذب شده فوتون‌های ایجاد شده ناشی از عبور الکترونی با انرژی ۳۰۰ keV درون سلول معادل بافت (دیسکی به شعاع و ضخامت ۱ cm، با چگالی ۱ g/cm³) بلافاصله بعد از حفاظ شبیه‌سازی شده که در شکل ۵ قابل مشاهده می‌باشد، به ازای ضخامت‌های مختلف حفاظ (۲/۵-۵/۵ cm) محاسبه و نتایج در جدول ۵ آورده شده است.

با تقسیم مقادیر انرژی جذب شده در سلول بر جرم آن، دز جذبی بر حسب J/Kg تعیین شد. از آن‌جای‌که ضریب توزین پرتو برای فوتون‌ها با هر انرژی‌ای برابر با یک می‌باشد [۱۲]، با جایگذاری مقدار دز جذبی تعیین شده بر حسب گری و ضریب توزین فوتونی در رابطه ۵ دز معادل برای عبور الکترون بر حسب میکروسیورت محاسبه شد. به‌منظور تعیین ضخامت بهینه حفاظ برای عبور باریکه الکترونی با جریان ثابت ۵۰ mA، کافی است مقدار دز معادل محاسبه شده الکترون را در تعداد الکترون‌های عبوری در واحد زمان معادل با این جریان باریکه یعنی $10^{17} \times 3$ ضرب نمود.

توقف تابشی شبیه‌سازی شده با کد MCNP4C که در جدول ۳ ارائه شده است در ضخامت چگالشی پنجره خروجی ضرب شده است. لازم به ذکر است ضخامت چگالشی فویل تیتانیومی از ضرب چگالی پنجره تیتانیومی ($4/5 \text{ g/cm}^3$) در ضخامت پنجره ($0/0013 \text{ cm}$) به‌دست آمده است. نتایج این محاسبات در جدول ۴ قابل مشاهده است.

جدول (۴): اتلاف انرژی ناشی از تابش ترمزی بر حسب انرژی الکترون فرودی.

انرژی الکترون فرودی (keV)	اتلاف انرژی الکترون فرودی (keV)
۱۰۰	$7/19 \times 10^{-2}$
۱۵۰	$8/97 \times 10^{-2}$
۲۰۰	$9/52 \times 10^{-2}$
۲۵۰	$10/06 \times 10^{-2}$
۳۰۰	$12/46 \times 10^{-2}$

۳.۳. حفاظ‌سازی شتاب‌دهنده الکترون پرده‌ای و تعیین

ضخامت حفاظ برای انرژی بیشینه ۳۰۰ keV

اساساً جهت حفاظ‌گذاری در برابر پرتو ایکس بهتر است از موادی با عدد اتمی زیاد مانند تنگستن و سرب استفاده شود [۱۶]. در کار حاضر از سرب با عدد اتمی ۸۲ استفاده شده است. برش عرضی هندسه شبیه‌سازی شده با کد MCNP4C به‌منظور حفاظ‌سازی شتاب‌دهنده الکترونی پرده‌ای (راستای انتشار باریکه محور Z می‌باشد) در شکل ۵ قابل مشاهده است. بر اساس نظر کمیسیون ICRP، پرتوگیری شغلی کارکنان در هر سال (دز دریافتی) نباید از ۲۰ میلی‌سیورت (mSv) تجاوز کند [۲۳]. پس به‌طور متوسط، حداکثر دز معادل مجاز دریافتی $10 \mu\text{Sv/h}$ است. دز معادل از طریق رابطه ۵ قابل محاسبه می‌باشد، به گونه‌ای که D دز جذبی و W_R ضریب توزین پرتو است [۱۲].

۴. نتیجه گیری

در این کار برای شتاب‌دهنده الکترونی پرده‌ای با استفاده از کد MCNP4C، دز پرتو ایکس تابش ترمزی ناشی از برخورد باریکه الکترونی با جریان ثابت ۵۰ mA و انرژی‌های مختلف ۳۰۰-۱۰۰ keV بر روی پنجره خروجی تیتانیومی با ضخامت ۱۳ μm شبیه‌سازی شد. نتایج حاکی از کاهش دز پرتو ایکس ترمزی به ازای افزایش انرژی باریکه الکترونی است. همچنین مقادیر شبیه‌سازی شده‌ی توان توقف تابشی الکترونی با تغییر انرژی از ۱۰۰ keV تا ۳۰۰ keV با استفاده از کد MCNP4C، نشان‌دهنده روند افزایشی از $0.12 \text{ MeV}\cdot\text{cm}^2/\text{g}$ به $0.21 \text{ MeV}\cdot\text{cm}^2/\text{g}$ است. درصد انحراف حاصل از مقایسه مقادیر شبیه‌سازی شده با مقادیر نظری ارائه‌شده در گزارشات پیشین و برنامه ESTAR برای توان توقف تابشی از ۳۳٪ و ۳٪ به دست آمد. اتلاف انرژی الکترون فرودی در بازه انرژی ۳۰۰-۱۰۰ keV هنگام عبور از فویل تیتانیومی با ضخامت μm ۱۳ در محدوده $12/44 \times 10^{-2}$ - $7/19 \times 10^{-2}$ keV تعیین شد. همچنین حفاظ‌سازی شتاب‌دهنده الکترونی پرده‌ای با کد MCNP4C انجام و ضخامت بهینه حفاظ سربی برای انرژی بیشینه ۳۰۰ keV، برابر با ۲/۵ cm محاسبه شد که با گزارشات پیشین توافق دارد.

بدین ترتیب آهنگ دز معادل در سلول معادل بافت برحسب $\mu\text{Sv/h}$ تعیین می‌گردد. نتایج حاصل از این بررسی در جدول ۵ آورده شده است.

جدول (۵): مقادیر حاصل از اندازه‌گیری انرژی جذب شده برای الکترون فرودی و آهنگ دز معادل برای جریان الکترونی ثابت ۵۰ mA در سلول معادل بافت (دیسکی به شعاع و ضخامت ۱ cm با چگالی 1 g/cm^3) بلافاصله بعد از حفاظ سربی با ضخامت‌های متفاوت ۲/۵ - ۰/۵ cm.

ضخامت حفاظ (cm)	انرژی جذب شده در سلول معادل بافت برای الکترون (MeV)	آهنگ دز معادل در سلول معادل بافت برای باریکه الکترونی با جریان ثابت ۵۰ mA ($\mu\text{Sv/h}$)
۰/۵	$9/1 \times 10^{-8}$	۵۲۰۰
۱	$2/5 \times 10^{-9}$	۱۴۰۰
۱/۵	$5/6 \times 10^{-10}$	۳۱۹
۲	$3/4 \times 10^{-16}$	۷۸
۲/۵	$5/3 \times 10^{-18}$	۷

با مقایسه مقادیر شبیه‌سازی شده آهنگ دز معادل با استانداردهای کمیسیون ICRP ($10 \mu\text{Sv/h}$)، ضخامت ۲/۵ cm برای بیشینه انرژی باریکه الکترونی ۳۰۰ keV، تعیین شد. به طوری که ضخامت تعیین شده با مقادیر عنوان شده در گزارشات دیگر [۲۴] در توافق است.

۵. مراجع

- [1] K.W. Leo, R.M. Chulan, S.A. Hashim, A.H. Baijan, R.M.S. Sabri, M. Mohtar, H. Glam, L. Lojius, M. Zahidee, A. Azman and M. Zaid. Study on parameters of scanning system for the 300 keV electron accelerator, AIP Conference Proceedings 1704, 020010 (2016).
- [2] S. Machi. Trends for electron beam accelerator application in industry. *J. Rev. Accel. Sci. Tech.* 41 (2011) 1–10.
- [3] E. A. Abramyan. *Industrial Electron Accelerators and Application*. Springer-Verlag Berlin, (1988).
- [۴] یداله زاده، بهزاد. کاکویی، امیدرضا. تفنگ الکترونی با باریکه پهن: رویکردی تجربی. *سنجش و ایمنی در برابر پرتو*. ۳۰۷–۳۱۱ (۱۳۹۶)، (۲)۱۷
- [5] JAERI-Conf. Low Voltage electron beam Accelerators Masafumi OCHII Iwasaki Electric Co., Ltd, (2002).
- [6] IAEA International Atomic Energy Agency, *Industrial Radiation Processing with Electron Beams and X-rays*, (2011).
- [7] S. Machi. *Electron Accelerators for Industrial Applications in Japan*. Presentation to IAEA Consultants Meeting, Vienna, (2008).
- [8] A.J. Berejka. *Advances in self-shielded accelerators*. IAEA-TECDOC-1386, Emerging applications of radiation processing, (2004).
- [9] Sh. Ghanbari, O. Kakuee and A. akhond. The effect of energy on the physical parameters of the electron beam in curtain accelerator: A Simulation Study. *Phys. Chem*, 156 (2019) 1–5.
- [10] J. Ren, X.Zhu, Y. Zhang, D. Li and N. Zhu. Beam nonuniformity of multi-filament electron curtain accelerator. *At. Energ. Sci& tech* 44(2010) 1013-1018.
- [11] J.K. Shultis and R.E. Faw. *An MCNP4C primer*. Dept of Mechanical and Nuclear Engineering. Kansas State University, Manhattan, (2011).
- [12] H. Cember. *Introduction to health physics*, pergamon press, (1983).
- [13] J.K. Shultis and R.E. Faw. *An MCNP primer*, (2006).
- [14] E. Koehler, E. Brown and S.J. Haneuse. On the Assessment of Monte Carlo Error in Simulation-Based Statistical Analyses. *Am. Stat.*, 63(2) (2009) 155–162.
- [15] M.J. Berger, J.H. Hubbell, S.M. Seltzer, J. Chang, J.S. Coursey, R. Sukumar, D.S. Zucker, and K. Olsen. XCOM: Photon Cross Sections Database NIST Standard Reference Database 8 (XGAM) (2010).
- [۱۶] غیاثی نژاد، مهدی. کاتوزی، مهرا. *دروس عمومی حفاظت در برابر پرتو*. تهران، درپید، (۱۳۸۲).
- [17] A. K. S. Amable, B. K. Godsway, R. A. Nyaaba and M. N. Earic. A Theoretical Study of Stopping Power and Range For Low Energy (<3.0mev) Protons In Aluminium, Germanium, Lead, Gold and Copper Solid Materials. *Open Sci. J.*, 2(2017) 1-17.
- [18] H. Bethe and J. Ashkin. *Experimental NuclearPhysics*, ed. E. Segré, J. Wiley, New York, (1953).
- [19] M.O. El-Ghossain. Calculations of stopping power, and range of electrons interaction with different material and human body parts, *Int. j. sci& tech. res.* 6 (2017) 114-118.
- [20] L. Pages, E. Bertel, H. Joffre and L. Sklavenitis. Energy loss, range, and bremsstrahlung yield for 10-keV to 100-Mev electrons in various elements and chemical compounds, *Atomic data.* 4 (1972) 1-127.
- [21] M.J. Berger, J.S. Coursey, M.A. Zucker, and J. Chang. ESTAR, PSTAR, and ASTAR: Computer Programs for Calculating Stopping-Power and Range Tables for Electrons, Protons, and Helium Ions (version 1.2.3), (2005).
- [22] M.J. Berger and S.M. Seltzer. Stopping powers and ranges of electron and positrons. NBSIR 82-2550 (1982).
- [23] IAEA, international basic safety standard for protection against ionizing radiation and for safety radiation source, S.S No.115, (1996).
- [24] F. Vara, W. Brann, T. Berejka, B. Hanrahan, D. Cowell, L. Carlblom and K. Schaper. *UV/EB curing primer: inks, coating and adhesives*. Radtech International North America, (1995).