



بررسی امکان استفاده از ترکیب عناصر سرب، تنگستن و باریوم به منظور افزایش بازدهی روپوش‌های محافظ در تضعیف پرتوهای ایکس محدوددهی تشخیصی به وسیله‌ی کد MCNP

محمودرضا اکبری^۱، سمیرا سرشوق^۱، حسن یوسف‌نیا^{۲*}، سیمین مهدیزاده^۳، سمانه ذوالقدری^۲، محمد قنادی مراغه^۲
۱. بخش مهندسی هسته‌ای، دانشکده‌ی مهندسی مکانیک، دانشگاه شیراز، صندوق پستی: ۱۶۵۴۸-۷۱۹۳۶، شیراز - ایران
۲. پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی ایران، صندوق پستی: ۱۳۳۹-۱۴۱۵۵، تهران - ایران
۳. مرکز تحقیقات تابش، دانشگاه شیراز، صندوق پستی: ۱۶۵۴۸-۷۱۹۳۶، شیراز - ایران

چکیده: در این پژوهش، به منظور کاهش وزن و افزایش بازدهی روپوش‌های محافظتی در تضعیف پرتوهای ایکس محدوددهی تشخیصی، استفاده از عناصر تنگستن و باریوم در ترکیب با سرب، مورد بررسی قرار گرفت. ابتدا دستگاه پرتو ایکس مستقر در مرکز تحقیقات تابش دانشگاه شیراز با استفاده از کد MCNP4C شبیه‌سازی شد و طیف خروجی پرتوهای ایکس ترمزی و مشخصه‌ی دستگاه به دست آمد. به منظور بررسی صحت شبیه‌سازی انجام شده با کد مونت کارلو، خروجی به دست آمده از این کد با خروجی حاصل از نرم‌افزار شبیه‌ساز طیف، پردازش‌گر طیف (SP)، مقایسه گردید. با استفاده از کد MCNP4C، نمونه‌های با ابعاد ۱۰cm×۱۰cm از روپوش حفاظتی به جرم‌های ۸۶.۵، ۸۱.۵ و ۷۰g، حاوی درصد‌های مختلف از عناصر سرب، تنگستن و باریوم، در مسیر طیف شبیه‌سازی شده قرار داده و ضریب تضعیف پرتو آن‌ها محاسبه شدند. نتایج نشان دادند که ترکیبات با درصد ۲۳، ۴۲ و ۳۵ و هم‌چنین ۱۷، ۴۸ و ۳۵ به ترتیب برای مواد سرب، باریوم و وینیل، بهبود تضعیف ۴۶٪ را نسبت به حالت استفاده از سرب خالص در پی خواهد داشت.

کلیدواژه‌ها: روپوش محافظ، پرتو ایکس، محدوددهی تشخیصی، کد MCNP4C، نرم‌افزار پردازش‌گر طیف

Feasibility Study of Using Pb, W and Ba Composition to Increase Attenuation Efficiency of Protective Aprons Against the Diagnostic X-Ray Range Using MCNP Code

M.R. Akbari¹, S. Sarshogh¹, H. Yousefnia^{2*}, S. Mehdizadeh³, S. Zolghadri², M. Ghannadi Maragheh²
1. Department of Nuclear Engineering, Faculty of Mechanical Engineering, Shiraz University, P.O.Box: 71936-16548, Shiraz - Iran
2. Nuclear Science and Technology Research Institute, AEOI, P.O.Box: 14155-1339, Tehran - Iran
3. Radiation Research Center, Shiraz University, P.O.Box: 71936-16548, Shiraz - Iran

Abstract: In this research, the use of tungsten (W) and barium (Ba) in composition with lead (Pb) was investigated to decrease weight and to increase the efficiency of the protective aprons in attenuating of the diagnostic X-rays. First, the X-ray tube of the Radiation Research Center (RCC) of the Shiraz University was simulated by MCNP4C code to obtain the bremsstrahlung and characteristic X-ray spectrum. In order to confirm the simulation, the obtained output of this code was compared with the resultant output of the spectrum simulator software, viz., the spectrum processor (SP). The simulated protective apron samples with the dimension of 10cm×10cm and weight of 86.5, 81.5 and 70 g, containing various percentages of Pb, W and Ba, were placed in the path of the simulated spectra, and the attenuation coefficient of radiation was calculated using MCNP4C. The results showed that the composition of Pb, Ba and vinyl, with the percentages of 23, 42 and 35 and also 17, 48 and 35, respectively, improved the attenuation about 46% in comparison with the use of pure Pb.

Keywords: Protective apron, X-ray, Diagnostic range, MCNP4C code, Spectrum processor software

*email: hyousefnia@aeoi.org.ir

۱. مقدمه

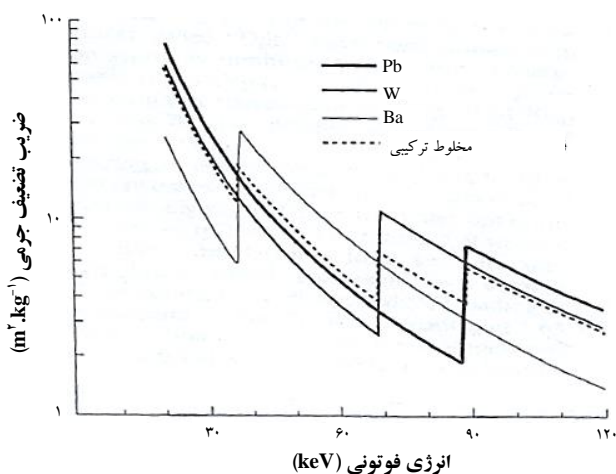
استفاده از روپوش‌های محافظ توسط کارکنان بخش‌های فلوروسکوپی و رادیولوژی، دز تابشی دریافتی آن‌ها را به میزان قابل توجهی کاهش می‌دهد [۱-۴]. در بسیاری از اتاق‌های رادیولوژی، روپوش‌های محافظ در مقابل پرتو ایکس، باید توسط این کارکنان برای زمان‌های طولانی پوشیده شود. حضور سرب با چگالی زیاد (11340 kg/m^3) در روپوش‌های محافظ موجب افزایش وزن آن‌ها می‌شود. به منظور افزایش بازدهی روپوش‌های محافظ، تلاش‌هایی برای ساخت روپوش‌های محافظ سبک‌تر، با ترکیبی از عناصر مختلف همراه با (و یا به جای) سرب، که پرتوهای ایکس تولید شده در گستره‌ی ۶۰ تا ۱۰۰ kVp را با بازدهی بیش‌تری جذب کنند، انجام گرفته است [۵، ۶]. منظور از افزایش بازده، افزایش میزان تضعیف پرتویی روپوش با همان وزن، و یا کاهش وزن آن با همان میزان تضعیف پرتویی است. برای کاستن از خستگی و آسیب‌های گردن و کمر، مطلوب است که روپوش تا حد امکان سبک باشد و در عین حال میزان حفاظت پرتویی لازم را فراهم آورد. به این منظور در مطالعات انجام شده از مواد جدیدی برای کاهش وزن روپوش‌ها استفاده شده است [۶، ۷].

در سال ۲۰۰۳، Christodoulou و همکاران در آمریکا، میزان تضعیف پرتو را برای لباس‌های حفاظتی مورد استفاده در گستره‌ی تشخیصی که حاوی سرب خالص یا موادی با ضخامت معادل ۰/۲۵ یا ۰/۵ mm سرب بودند، برای طیف پرتو ایکس ۷۰ و ۸۰ kVp ارزیابی نمودند [۸]. در سال ۲۰۰۶، Scuderi و همکاران در آمریکا، بازدهی حفاظتی سه لباس حفاظتی بدون سرب مورد استفاده‌ی تجاری را برای طیف پرتو ایکس در بازه‌ی ۶۰ تا ۱۲۰ kVp با حفاظ‌های استاندارد حاوی سرب خالص مقایسه و ارزیابی نمودند [۹]. در سال ۲۰۰۷، McCaffrey و همکاران در کانادا، ویژگی‌های تضعیفی برخی از انواع مواد حفاظ حاوی سرب و بدون سرب را مطالعه کردند [۱۰]. در پژوهش دیگری در سال ۲۰۰۷، Schlattl و همکاران در آلمان، خواص حفاظتی قلع و ترکیبی از قلع و بیسموت را به منظور استفاده در روپوش‌های حفاظتی برای تضعیف طیف‌های پرتو ایکس مختلف با روپوش‌های معمول سربی مقایسه کردند [۱۱].

در این پژوهش، پس از شبیه‌سازی طیف دستگاه پرتو ایکس مرکز تحقیقات تابش دانشگاه شیراز به وسیله‌ی کد MCNP4C و نرم‌افزار SP^(۱)، سعی شد تا ترکیب بهینه‌ای از عناصر سرب، تنگستن و باریم به منظور افزایش بازدهی در تضعیف پرتوهای ایکس ترمزی و ایکس مشخصه در محدوده‌ی تشخیصی به دست آید.

۲. روش‌ها

توانایی سرب برای جذب تابش در بازه‌ی انرژی بین ۵۰ تا ۸۸ keV کاهش می‌یابد، زیرا لایه‌ی K سرب در انرژی ۸۸ keV قرار گرفته است. در این پنجره‌ی انرژی درصد بالایی از انرژی پرتو ایکس از میان سرب عبور می‌کند [۶]. بنابراین برای کاهش وزن روپوش‌های محافظ می‌توان از مواد مرکب، شامل عناصری با لبه‌های K متفاوت و اعداد اتمی بالا، استفاده نمود [۴، ۶]. نمودار ضریب تضعیف جرمی برحسب انرژی برای عناصر باریم (Ba)، تنگستن (W)، سرب (Pb) که لبه‌ی K آن‌ها به ترتیب در ۳۷/۴، ۶۹/۵ و ۸۸ keV قرار دارند و حالت ترکیبی آن‌ها در شکل ۱ نشان داده شده است. به علت تفاوت در انرژی‌های لبه‌ی K این عناصر، خواص تضعیفی آن‌ها در این گستره‌ی انرژی به نوعی مکمل یک‌دیگر هستند. امکان دسترسی آسان، داشتن قیمت مناسب، میزان سمیت ناچیز و محل قرارگیری لبه‌ی K در آن‌ها ویژگی‌های برجسته‌ی این عناصر هستند [۶].



شکل ۱. نمودار ضریب تضعیف جرمی برحسب انرژی برای عناصر باریم، تنگستن، سرب و ترکیب آن‌ها [۶].



طیف فوتون‌های پرتو ایکس ترمزی و مشخصه، با استفاده از تالی^(۲) F5 (آشکارساز نقطه‌ای) در خارج از لوله به دست آمد. به منظور ایجاد طیفی دقیق‌تر، فرایندهای تولید الکترون و فوتون، تولید تابش مشخصه، هم‌چنین توزیع زاویه‌ای کامل تابش ترمزی برای برهم‌کنش‌های الکترون با ماده، تولید الکترون و وقوع پراکندگی هم‌دوس برای برهم‌کنش‌های فوتون با ماده در نظر گرفته شد. برای رسیدن به خطای قابل قبول در محاسبات (کم‌تر از ۰.۵٪)، تاریخچه‌ی 2.5×10^7 ذره دنبال شد.

به منظور اطمینان از نتایج به دست آمده از کد MCNP4C، طیف خروجی دستگاه پرتو ایکس مذکور با استفاده از نرم‌افزار طیف SP نیز شبیه‌سازی شد. در این نرم‌افزار با دادن اطلاعات ورودی مانند کیلوولت بیشینه (kVp)، جنس هدف و جنس فیلترها، می‌توان پرتوهای ایکس ترمزی و ایکس مشخصه را رسم نمود. این نرم‌افزار، خروجی طیف را از پایگاه داده‌ی خود فراخوانی می‌کند. این نرم‌افزار متعلق به مؤسسه‌ی کاربرد فیزیک و مهندسی در پزشکی است و سازگاری بسیار خوبی بین پیش‌بینی‌های نرم‌افزار شبیه‌ساز طیف SP و داده‌های تجربی وجود دارد [۱۳، ۱۴].

۲.۲ یافتن ترکیب بهینه برای روپوش‌های محافظ

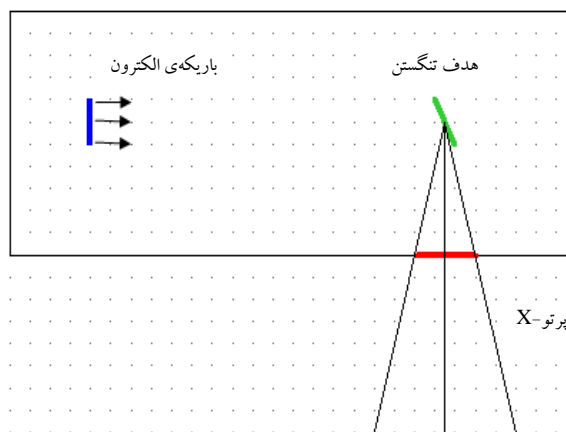
در طراحی روپوش‌های محافظ سربی، پودر سرب با یک الیاف انعطاف‌پذیر (مثل پلاستیک یا وینیل) ترکیب می‌شود [۶]. در اکثر روپوش‌های محافظ معمول، این الیاف پوششی جرمی در حدود 2.5 تا 3 kg/m^2 و تضعیفی معادل یک قطعه‌ی سربی به ضخامت 0.25 تا 0.5 mm را به روپوش اضافه می‌کنند [۶].

در طراحی روپوش‌های محافظ، معمولاً جرم‌های واحد سطح برابر با 5.65 و 4.5 kg/m^2 در نظر گرفته می‌شوند و ضخامت به گونه‌ای است که به ترتیب تضعیفی معادل 0.5 و 0.25 mm سرب ایجاد کند [۶]. بنابراین در طراحی انجام شده در این مطالعه، جرم‌های واحد سطح ترکیب سرب، تنگستن و باریم نیز

در این پژوهش برای شبیه‌سازی طیف خروجی دستگاه پرتو ایکس تشخیصی و به دست آوردن مقادیر بهینه‌ی ترکیبات حفاظتی در روپوش‌ها، از کد MCNP استفاده شد. MCNP4C یک کد محاسباتی مونت کارلو است که توانایی ترابرد فوتون، الکترون و یا ترکیبی از این دو را دارد. این کد دارای فایل ورودی برای تعریف هندسه، مواد تشکیل‌دهنده، چشمه و خروجی موردنظر است [۱۲].

۱.۲ شبیه‌سازی دستگاه پرتو ایکس

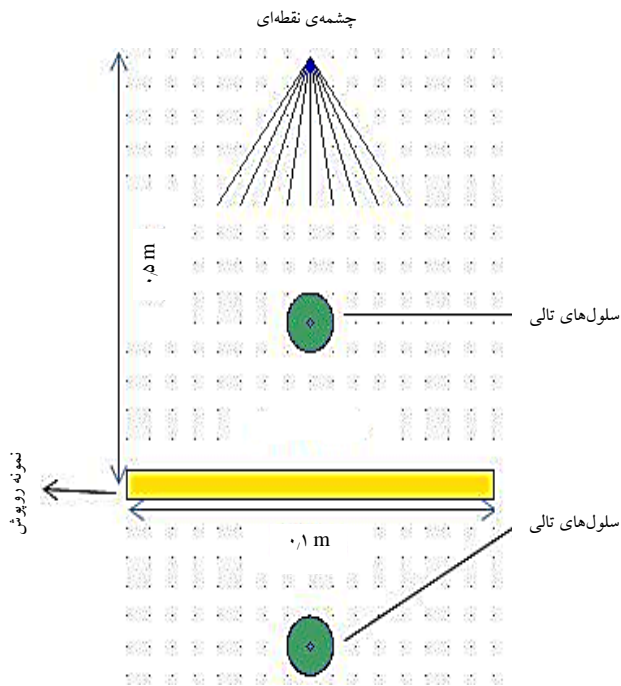
هندسه‌ی دستگاه پرتو ایکس مرکز تحقیقات تابش دانشگاه شیراز با مشخصات ارائه شده در جدول ۱، به وسیله‌ی برنامه‌ی MCNP4C شبیه‌سازی شد. هدف تنگستنی به صورت یک مکعب مستطیل به ابعاد $0.068 \text{ cm} \times 0.585 \text{ cm} \times 0.585 \text{ cm}$ است که با راستای باریکه الکترونی، زاویه‌ی 70 درجه می‌سازد. محفظه‌ی لامپ به صورت یک مکعب مستطیل در نظر گرفته شد که اطراف آن را حفاظ و موازی‌سازهای سربی پوشانده‌اند. فیلترهای ذاتی و اضافی نیز مطابق با مشخصات جدول ۱ در نظر گرفته شدند. چشمه‌ی تولیدکننده‌ی الکترون به صورت صفحه‌ای دایروی به قطر 0.199 cm تعریف شد که الکترون‌ها با انرژی 70 keV را در یک جهت به سمت هدف شلیک می‌کند. (شکل ۲).



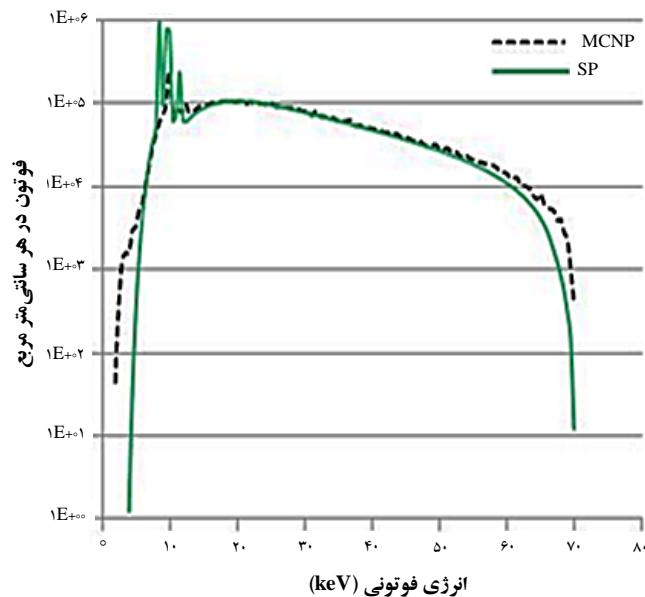
شکل ۲. طرح‌واره‌ای از هندسه‌ی لامپ پرتو ایکس شبیه‌سازی شده به وسیله‌ی کد MCNP4C.

جدول ۱. مشخصات دستگاه پرتو ایکس مرکز تحقیقات تابش دانشگاه شیراز (مدل RS و شرکت سازنده، Gilardoni ایتالیا)

اندازه‌ی نقطه‌ی کانونی ^(۳) (mm)	برلیم به عنوان فیلتراسیون ذاتی (mm)	آلومینیم به عنوان فیلتراسیون اضافی (mm)	جنس ماده‌ی هدف	زاویه‌ی آند (برحسب درجه)	زاویه‌ی تابش خروجی از پنجره‌ی خروجی (برحسب درجه)
۱.۸	۰.۸	۰.۱	تنگستن	۲۰	۴۰



شکل ۳. طرح‌واره‌ای از نحوه‌ی شبیه‌سازی هندسه‌ی مسأله برای محاسبه ضریب تضعیف پرتودهی.



شکل ۴. مقایسه‌ی طیف پرتو ایکس شبیه‌سازی شده با کد MCNP4C و نرم‌افزار SP در مقیاس نیمه‌لگاریتمی.

درصد‌های مختلف فلزات در ترکیب به گونه‌ای انتخاب گردید که مقدار جرم واحد سطح کل فلزات در ترکیب، ثابت باقی بماند. جدول ۲ درصد‌های تضعیف پرتودهی از نمونه‌ای به جرم ۸۶٫۵ g (جرم نمونه‌ای با ابعاد ۱۰cm×۱۰cm برای روپوش با جرم واحد سطح $۸٫۶۵ \text{ kg/m}^2$) و جرم‌های واحد سطح متفاوت

برابر با مقادیر اشاره شده در نظر گرفته شد. با توجه به جرم‌های واحد سطح ذکر شده برای این فلزات و الیاف پوششی، نمونه‌هایی با جرم‌های متفاوت قابل طراحی خواهند بود. چنان‌چه برای ترکیبات مختلف از فلزات اشاره شده، جرم واحد سطح برابر با $۵٫۶۵ \text{ kg/m}^2$ و جرم الیاف پوششی برابر با $۲٫۵$ و ۳ kg/m^2 در نظر گرفته شود، جرم واحد سطح کل روپوش به ترتیب برابر با $۸٫۱۵$ و $۸٫۶۵ \text{ kg/m}^2$ خواهد بود. برای ترکیب این فلزات با جرم سطحی $۴٫۵ \text{ kg/m}^2$ و جرم الیاف پوششی برابر با $۲٫۵ \text{ kg/m}^2$ ، این مقدار برابر با ۷ kg/m^2 است. ضخامت نمونه‌های طراحی شده با استفاده از معادله‌ی (۱) محاسبه گردید

$$L = \frac{m}{\rho_{av} A} \quad (1)$$

که در آن L ، m ، ρ_{av} و A به ترتیب ضخامت، جرم، چگالی متوسط ترکیب و مساحت سطح نمونه هستند.

برای سهولت در اجرای برنامه، یک چشمه‌ی نقطه‌ای با طیفی معادل با طیف دستگاه پرتو ایکس، در فاصله‌ی ۵۰ cm از مرکز نمونه‌هایی با ابعاد $۱۰\text{cm} \times ۱۰\text{cm}$ در نظر گرفته شد (شکل ۳). برای محاسبه‌ی مقدار پرتودهی^(۴) از تالی F4 در دو سلول^(۵) کُروی به شعاع ۱ cm قبل و بعد از عبور پرتوها و در فاصله‌ی ۵ cm از مرکز نمونه‌ها، استفاده شد. سرانجام میزان تضعیف پس از عبور پرتوها از نمونه برای ترکیب‌های مختلف محاسبه شد.

۳. نتایج و بحث

در شکل ۴ نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی طیف پرتوهای ایکس به وسیله‌ی کد MCNP با طیف حاصل از نرم‌افزار شبیه‌ساز طیف SP در مقیاس نیمه‌لگاریتمی با هم مقایسه شده‌اند که سازگاری خوبی بین نتایج حاصل از دو نرم‌افزار مشاهده می‌شود.

به منظور به دست آوردن ترکیب بهینه‌ای که در آن ضریب تضعیف پرتو بیشینه شود، میزان تضعیف پرتوهای ایکس از نمونه‌هایی با ابعاد $۱۰\text{cm} \times ۱۰\text{cm}$ و دربردارنده‌ی ترکیب‌های مختلف از عناصر سرب، باریم و تنگستن، محاسبه شد.



مقایسه‌ی نتایج ارائه شده در جدول‌های ۲ و ۳ نشان می‌دهد که با وجود حذف سرب در ترکیبات جدول ۲ و کاهش حدود ۶ درصدی جرم نمونه‌ها، ضریب تضعیف پرتو قابل مقایسه و در مواردی بیش‌تر از ترکیبات حاوی سرب شده است. این موضوع بیان‌کننده‌ی این حقیقت است که امکان طراحی روپوش‌های فاقد سرب نیز وجود دارد.

ضریب تضعیف پرتو برای نمونه‌ی با ابعاد $10\text{cm} \times 10\text{cm}$ با جرم 70 g (جرم نمونه‌ی $10\text{cm} \times 10\text{cm}$ برای روپوش با جرم واحد سطح 7 kg/m^2) شامل عناصر تنگستن، سرب و باریم در جدول ۴ ارائه شده است. بیش‌ترین مقدار ضریب تضعیف پرتو برای این ترکیب برابر 99.76% است (ردیف ۶ جدول ۴). در این ترکیب مقدار جرم واحد سطح سرب و تنگستن برابر 1 kg/m^2 و جرم واحد سطح باریم برابر با 2.5 kg/m^2 است. همان‌طور که در جدول ۴ نیز مشاهده می‌شود از ردیف ششم به بعد با کاهش مقادیر سرب و تنگستن و افزایش مقدار باریم، ضریب تضعیف پرتو کاهش می‌یابد. علت این امر کاهش عدد اتمی مؤثر ترکیب به علت کاهش مقادیر سرب و تنگستن می‌باشد که عدد اتمی بزرگ‌تری نسبت به باریم دارند. زیرا برهم‌کنش غالب در انرژی‌های کم‌تر از 70 keV فوتوالکتریک بوده که به عدد اتمی وابستگی شدیدی دارد.

از سرب و باریم را نشان می‌دهد. بیش‌ترین مقدار درصد تضعیف پرتو برای این ترکیب برابر 99.68% است. (ردیف ۸ و ۹ جدول ۲). این مقدار تضعیف معادل با 46% بهبود تضعیف پرتو نسبت به حالت سرب خالص است.

ضریب تضعیف پرتو برای نمونه‌ای با ابعاد $10\text{cm} \times 10\text{cm}$ با جرم 81.5 g (جرم نمونه‌ی $10\text{cm} \times 10\text{cm}$ برای روپوش با جرم واحد سطح 8.15 kg/m^2) شامل عناصر تنگستن و باریم در جدول ۳ ارائه شده است. بیش‌ترین مقدار ضریب تضعیف پرتو برای این ترکیب برابر 99.60% است (ردیف‌های ۴ تا ۷ در جدول ۳).

همان‌طور که در شکل ۱ نیز مشاهده می‌شود، ضریب تضعیف جرمی باریم بین انرژی‌های 37.4 تا 69.5 keV از تنگستن بیش‌تر است و از طرفی فوتون‌هایی با این انرژی تقریباً یک سوم طیف را تشکیل می‌دهند (شکل ۴). بنابراین کاهش قابل توجه در مقدار باریم در ترکیب، باعث کاهش ضریب تضعیف پرتو خواهد شد. از طرف دیگر، تنگستن در بازه‌ی انرژی کم‌تر از 37.4 keV که تقریباً دو سوم طیف را تشکیل می‌دهند (شکل ۴)، ضریب تضعیف جرمی بالاتری دارد (شکل ۱). بنابراین حین افزایش مقدار تنگستن در ترکیب و کاهش مقدار باریم در آن، ابتدا ضریب تضعیف پرتو افزایش و سپس کاهش خواهد یافت.

جدول ۲. درصد تضعیف پرتو برای نمونه‌ی $10\text{cm} \times 10\text{cm}$ به جرم 8.65 kg/m^2 شامل عناصر سرب و باریم

ردیف	سرب (kg/m^2)	باریم (kg/m^2)	وینیل (kg/m^2)	چگالی مؤثر ترکیب (g/cm^2)	ضخامت نمونه (cm)	درصد تضعیف پرتو	بهبود تضعیف نسبت به سرب خالص (%)
۱	۵.۶۵	۰	۳	۷.۷۵۹	۰.۱۱۱۵	۹۹.۴۱	-
۲	۵	۰.۶۵	۳	۷.۱۷۱	۰.۱۲۰۶	۹۹.۵۱	۱۷
۳	۴.۵	۱.۱۵	۳	۶.۷۱۶	۰.۱۲۸۸	۹۹.۵۵	۲۴
۴	۴	۱.۶۵	۳	۶.۲۱۶	۰.۱۳۸۲	۹۹.۵۹	۳۱
۵	۳.۵	۲.۱۵	۳	۵.۵۱۸	۰.۱۴۸۷	۹۹.۶۳	۳۶
۶	۳	۲.۶۵	۳	۵.۳۶۰	۰.۱۶۱۴	۹۹.۶۵	۴۱
۷	۲.۵	۳.۱۵	۳	۴.۹۰۵	۰.۱۷۶۴	۹۹.۶۷	۴۴
۸	۲	۳.۶۵	۳	۴.۴۵۰	۰.۱۹۴۴	۹۹.۶۸	۴۶
۹	۱.۵	۴.۱۵	۳	۳.۹۹۵	۰.۲۱۶۵	۹۹.۶۸	۴۶
۱۰	۱	۴.۶۵	۳	۳.۵۵۲	۰.۲۴۳۵	۹۹.۶۴	۳۸
۱۱	۰.۵	۵.۱۵	۳	۳.۰۹۴	۰.۲۷۹۵	۹۹.۵۶	۲۵
۱۲	۰	۵.۶۵	۳	۲.۶۳۹	۰.۳۲۷۸	۹۹.۳۹	-

**جدول ۳.** درصد تضعیف پرتو برای نمونه‌ی $10\text{cm} \times 10\text{cm}$ به جرم $8,15\text{ kg/m}^3$ شامل عناصر تنگستن و باریم

ردیف	تنگستن (kg/m^3)	باریم (kg/m^3)	وینیل (kg/m^3)	چگالی مؤثر ترکیب (g/cm^3)	ضخامت نمونه (cm)	درصد تضعیف پرتو	بهبود تضعیف نسبت به سرب خالص (%)
۱	۰	۵,۶۵	۲,۵	۲,۷۳۹	۰,۲۶۷۶	۹۹,۳۸	۱
۲	۰,۵	۵,۱۵	۲,۵	۳,۷۰۶	۰,۲۱۹۹	۹۹,۴۸	۱۷
۳	۱	۴,۶۵	۲,۵	۴,۶۹۱	۰,۱۷۳۷	۹۹,۵۵	۲۸
۴	۱,۵	۴,۱۵	۲,۵	۵,۶۳۸	۰,۱۴۴۶	۹۹,۶۰	۳۵
۵	۲	۳,۶۵	۲,۵	۶,۶۲	۰,۱۲۳۱	۹۹,۶۰	۳۵
۶	۲,۵	۳,۱۵	۲,۵	۷,۶	۰,۱۰۷۲	۹۹,۶۰	۳۳
۷	۳	۲,۶۵	۲,۵	۸,۵۶۸	۰,۰۹۵۱	۹۹,۶۰	۲۹
۸	۳,۵	۲,۱۵	۲,۵	۹,۵۳۵	۰,۰۸۵۵	۹۹,۵۱	۲۲
۹	۴	۱,۶۵	۲,۵	۱۰,۵۰۱	۰,۰۷۷۶	۹۹,۴۵	۱۱
۱۰	۴,۵	۱,۱۵	۲,۵	۱۱,۴۸۳	۰,۰۷۱۰	۹۹,۳۵	-
۱۱	۵	۰,۶۵	۲,۵	۱۲,۴۴۹	۰,۰۶۵۵	۹۹,۲۱	-
۱۲	۵,۶۵	۰	۲,۵	۱۳,۷۱۶	۰,۰۵۹۴	۹۸,۸۹	-

جدول ۴. ضریب تضعیف پرتو برای نمونه‌ی $10\text{cm} \times 10\text{cm}$ به جرم 7 kg/m^3 شامل عناصر سرب، تنگستن و باریم

ردیف	سرب (kg/m^3)	تنگستن (kg/m^3)	باریم (kg/m^3)	وینیل (kg/m^3)	چگالی مؤثر ترکیب (g/cm^3)	ضخامت نمونه (cm)	درصد تضعیف پرتو	بهبود تضعیف نسبت به سرب خالص (%)
۱	۲,۲۵	۲,۲۵	۰	۲,۵	۱,۰۱۹۶	۰,۰۶۸۷	۹۸,۷۶	-
۲	۲,۵	۲,۵	۰,۵	۲,۵	۹,۳۷۲	۰,۰۷۴۷	۹۹,۰۰	-
۳	۱,۷۵	۱,۷۵	۱	۲,۵	۸,۵۲۱	۰,۰۸۲۲	۹۹,۲۰	-
۴	۱,۵	۱,۵	۱,۵	۲,۵	۷,۱۳	۰,۰۹۸۲	۹۹,۳۳	۸
۵	۱,۲۵	۱,۲۵	۲	۲,۵	۶,۸۴۷	۰,۱۰۲۲	۹۹,۳۹	۲
۶	۱	۱	۲,۵	۲,۵	۵,۹۹۳	۰,۱۱۶۸	۹۹,۴۳	۲۱
۷	۰,۷۵	۰,۷۵	۳	۲,۵	۵,۱۴۲	۰,۱۳۶۱	۹۹,۴۱	۱۹
۸	۰,۵	۰,۵	۳,۵	۲,۵	۴,۲۸۸	۰,۱۶۳۲	۹۹,۳۶	۱۲
۹	۰,۲۵	۰,۲۵	۴	۲,۵	۳,۴۶۵	۰,۲۰۲۰	۹۹,۲۰	-
۱۰	۰	۰	۴,۵	۲,۵	۲,۶۱۴	۰,۲۶۷۸	۹۸,۹۲	-

سرب به منظور افزایش بازدهی روپوش‌های محافظ در مقابل پرتوهای ایکس در محدوده‌ی تشخیصی، وجود دارد. مقادیر بهینه از ترکیب این عناصر می‌تواند کاهش جرم تقریبی ۲۰٪ را در روپوش‌های محافظ پرتوهای ایکس محدوده‌ی تشخیصی ایجاد کند و امکان طراحی روپوش‌هایی که فاقد سرب باشند را نیز فراهم کند.

مقایسه‌ی درصد‌های تضعیف پرتو برای ترکیب‌های ارائه شده در ردیف ۱ جدول ۲ (استفاده از سرب خالص) و ردیف ۶ جدول ۴، مقادیر تقریباً یکسانی را نشان می‌دهد. از آن‌جا که جرم نمونه‌ها برای این دو ترکیب به ترتیب $86/5\text{ g}$ و 70 g می‌باشند، بنابراین می‌توان کاهش جرم تقریبی ۲۰٪ را نسبت به حالت استفاده از سرب خالص نتیجه‌گیری کرد.

پی‌نوشت‌ها

1. Spectrum processor
2. Tally
3. Focal spot size
4. Exposure
5. Cell

۴. نتیجه‌گیری

مقایسه‌ی طیف دستگاہ پرتو ایکس به دست آمده از کد مونت کارلوی MCNP و نرم‌افزار شبیه‌ساز طیف SP، نشان می‌دهد که محاسبات MCNP در برآورد طیف خروجی دستگاہ پرتو ایکس از دقت کافی برخوردار است. نتایج شبیه‌سازی با کد مونت کارلوی MCNP نیز بیان‌کننده‌ی آن است که امکان استفاده از ترکیب عناصر تنگستن و باریم، همراه با (یا به جای)



مرجع ها

- [1] E.L. McGuire, M.L. Baker, J.F. Vandergrift, Evaluation of radiation exposures to personnel in fluoroscopic x-ray facilities, *Health Phys*, 45 (1983) 975-980.
- [2] J.M. Boon, D.C. Levin, Radiation exposure to angiographers under different fluoroscopic imaging conditions, *Radiology*, 180 (1991) 861-865.
- [3] M.V. Marx, L. Niklason, E.A. Mauger, Occupational radiation exposure to interventional radiologist: a prospective study, *J. Vasc. Interv. Radiol*, 3 (1992) 597-606.
- [4] T.E. Hubbert, J.J. Vucich, M.R. Armstrong, Lightweight aprons for protection against scattered radiation during fluoroscopy, *AJR*, 161 (1993) 1079-1081.
- [5] P.H. Murphy, Y. Wu, S.A. Glaze, Attenuation properties of lead composite aprons, *Radiology*, 186 (1993) 269-272.
- [6] M.J. Yaffe, J. Martin, G.E. Mawdsley, M. Lilley, R. Servant, G. Reh, Composite materials for x-ray protection, *Health Phys*, 60 (1991) 661-664.
- [7] B. Moore, E. VanSonnenberg, G. Casola, R.A. Novelline, The relationship between back pain and lead apron use in radiologist, *AJR*, 158 (1992) 191-193.
- [8] E.G. Christodoulou, M.M. Goodsitt, S.C. Larson, K.L. Darner, J. Satti, H.P. Chan, Evaluation of the transmitted exposure through lead equivalent aprons used in a radiology department, including the contribution from backscatter, *Med. Phys*, 30 (2003) 1033-1038.
- [9] G.J. Scuderi, G.V. Brusovanik, D.R. Campbell, R.P. Henry, B. Kwon, A.R. Vaccaro, Evaluation of non-lead-based protective radiological material in spinal surgery, *Spine J*, 6 (2006) 577-582.
- [10] J.P. McCaffrey, H. Shen, B. Downton, E. Mainegra-Hing, Radiation attenuation by lead and nonlead materials used in radiation shielding garments, *Med. Phys*, 34 (2007) 530-537.
- [11] H. Schlattl, M. Zankl, H. Eder, C. Hoeschen, Shielding properties of lead-free protective clothing and their impact on radiation doses, *Med Phys*, 34 (2007) 4270-4280.
- [12] MCNP4C: Monte Carlo N-Particle Transport Code System, Los Alamos National Laboratory, Los Alamos, New Mexico, (2000).
- [13] K. Cranley, B.J. Gilmore, G.W.A. Fogarty, L. Desponds, Report No. 78: Catalogue of diagnostic x-ray spectra and other data, The Institute of Physics and Engineering in Medicine, (1997).
- [14] R. Birch, M. Marshall, Computat'ion of bremsstrahlung x-ray spectra and comparison with spectra measured with a Ge(Li.) detector, *Phys. Med. BioI.* 24 (1979) 505-517.

