

## طراحی و شبیه سازی حفاظ کامپوزیتی پلی اتیلن-اکسید تنگستن با قابلیت بکارگیری در مراکز ماموگرافی

امیرحسین قزوینی<sup>۱</sup>، شهریار ملکی<sup>۲\*</sup>

۱. دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات، تهران - ایران
۲. پژوهشکده کاربرد پرتوها، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، صندوق پستی ۴۹۸-۳۱۴۸۵، کرج - ایران

### چکیده:

با توجه به افزایش تقاضا برای بکارگیری حفاظ‌های پرتویی عاری از سرب در سال‌های اخیر، در این پژوهش، ویژگی‌های حفاظ‌سازی ماده کامپوزیتی پلی اتیلن/اکسید تنگستن ( $PE-WO_3$ ) در مقابل پرتوهای ایکس و گاما در ناحیه انرژی مورد استفاده در مراکز ماموگرافی یعنی 15-25 keV شبیه‌سازی شد. بدین منظور، محاسبات مربوط به ضریب تضعیف جرمی کامپوزیت  $PE-WO_3$  در کسرهای وزنی مختلف ماده پُرکننده  $WO_3$  در بستر پلی اتیلن یعنی 0 wt%، 5 wt%، 8 wt%، 10 wt%، 20 wt% و 30 wt% تحت انرژی‌های مختلف فوتون در ناحیه ماموگرافی یعنی 15 keV، 20 keV و 25 keV با استفاده از کد MCNP4C شبیه‌سازی شد و نتایج آن با نرم‌افزار XMudat مقایسه گردید. نتایج شبیه‌سازی کمیت‌های ضریب تضعیف جرمی، ضخامت نیم لایه (HVL) و ضخامت یک دهم لایه (TVL) برای ماده‌ی کامپوزیتی  $PE-WO_3$  با داده‌های نرم‌افزار XMudat در کسرهای وزنی مختلف از اکسید تنگستن و در انرژی‌های متفاوت همخوانی خوبی نشان داد.

کلید واژه‌ها: کامپوزیت، پلی اتیلن، ماموگرافی، شبیه‌سازی، حفاظ‌سازی.

## Design and Simulation of Polyethylene-Tungsten Oxide Composite Shielding with Potential Application in Mammography Centers

Qazvini, Amir Hossein<sup>1</sup>; Malekie, Shahryar<sup>2\*</sup>

1. Department of Nuclear Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran
2. Nuclear Science and Technology Research Institute, Radiation Application Research School, P.O.BOX: 31485-498, Karaj, Iran

**Abstract:** Due to increasing demand for lead-free radiation shields in the recent years, in this research, shielding properties of Polyethylene/Tungsten Oxide ( $PE-WO_3$ ) composite material, against the X-ray and gamma rays at the energies ranging from 15-25 keV, applying in the Mammography centers was simulated. Thus, calculations of mass attenuation coefficient of  $PE-WO_3$  for different weight fractions of  $WO_3$  filler material in the Polyethylene matrix namely 0 wt%, 5 wt%, 8 wt%, 10 wt%, 20 wt%, and 30 wt% were carried out under the different photon energies of 15 keV, 20 keV and 25 keV in mammography region using the MCNP4C code. Results were compared with XMudat software. Simulation results of mass attenuation coefficient, Half-Value Layer (HVL) and Tenth-Value Layer (TVL) for  $PE-WO_3$  composite material with XMudat software in various weight fractions of tungsten oxide and different energies exhibited a good correlation.

**Keywords:** Composite, Polyethylene, Mammography, Simulation, Shielding.

Email: smaleki@aeoi.org.ir

## ۱. مقدمه

افزایش تقاضا برای رادیولوژی تشخیصی نظیر ماموگرافی و پزشکی هسته‌ای در سال‌های اخیر و توجه به مخاطرات احتمالی پرتوهای یون‌ساز برای سلامت بیمار و کادر بیمارستانی، ضرورت طراحی و ساخت حفاظ‌هایی مناسب و سبک را مسجل می‌سازد. طبق اصل حفاظتی <sup>1</sup>ALARA، می‌توان پرتوگیری افراد مرتبط با پرتو را از طریق روش‌های مختلفی از جمله کاهش زمان پرتوگیری، افزایش فاصله از چشمه پرتویی، استفاده از حفاظ مناسب و کنترل آلودگی به حداقل رساند [۱]. به طور معمول برای کاهش پرتوگیری بیماران، کارکنان و عموم از حفاظ‌های پرتویی استفاده می‌شود. شرایط استفاده از حفاظ پرتویی، نوع آن، ضخامت و مکان آن برای یک کاربرد خاص، تابعی از پارامترهای مختلف نظیر انرژی فوتون، شدت پرتو و هندسه‌ی چشمه پرتویی، نرخ پرتوگیری در مکان‌های مختلف و سایر عوامل است [۱]؛ بنابراین به منظور طراحی و ساخت حفاظی مناسب در انرژی خاص، بایستی محاسباتی دقیق با در نظر گرفتن احتمال اندرکنش فوتون با ماده از طریق مکانیسم‌های مختلف شامل: اثر فوتوالکتریک، پراکندگی کامپتون و تولید جفت انجام داد. در فلوروسکوپ، رادیوگرافی و ماموگرافی، معمولاً برای حفاظت پرتویی افراد از روپوش‌های سربی (اپرون) استفاده می‌شود. استفاده از اپرون سربی بعلت عدد اتمی بالا، گزینه مناسبی برای تضعیف پرتوهای ایکس و گاما در این گونه مراکز به شمار رفته و به طور مرسوم بکارگیری می‌شود؛ اما بعلت سمی بودن سرب و عوارض جذب آن در بدن انسان شامل: کم خونی، اختلالات عصبی و آسیب‌های مغزی، غیر قابل بازیافت بودن و اثرات مخرب زیستی آن بر محیط زیست، همچنین بروز عوارضی نظیر کمردرد و آرتروز در پرتوکاران، باعث شده تا اخیراً پژوهشگران بر روی طراحی و ساخت حفاظ‌هایی عاری از سرب<sup>۲</sup> و جایگزینی آنها با فلزاتی مانند تنگستن و بیسموت متمرکز شوند [۲-۱۰]. مطالعه نخست در زمینه کاهش سرب در اپرون‌ها به مطالعه Hubbert و همکاران در سال ۱۹۹۳ از طریق نصف کردن مقدار سرب بکار رفته در اپرون‌ها انجام شد که البته به دنبال آن اثر حفاظتی اپرون‌ها تا حدی کاهش یافت [۱۱]. در ادامه Martinez و Cournoye در سال ۲۰۰۱، لزوم جایگزینی سرب با فلزات دیگر را بررسی نمودند و با مد نظر قرار دادن سمیت و عوارض سرب برای محیط زیست، مطالعاتی بر مواد جایگزین از جمله پلی اتیلن، تنگستن و بیسموت انجام دادند [۱۱]. در مطالعه‌ای دیگر در سال ۲۰۰۶ توسط Dromi و همکاران با استفاده از ترکیبی سبک وزن ساخته شده از ورقه‌های تک-لایه و دو-لایه از جنس تنگستن و آنتیموان بر روی فانتوم در حین انجام آزمایشات رادیولوژی مداخله‌ای، مشاهده گردید که این ترکیبات علاوه بر اینکه ارگونومیک هستند، تضعیف مناسبی در پرتوگیری شغلی را نیز فراهم می‌آورند [۶]. بررسی ویژگی‌های نانو و میکرو کامپوزیت اپوکسی-اکسید تنگستن در میزان تضعیف پرتوهای ایکس در محدوده انرژی 10-40 keV در کسرهای وزنی مختلف از پرکننده‌ها<sup>۳</sup> توسط نور ازمان و همکاران بررسی شد [۱۲]. در تحقیقی دیگر ملکی و همکاران در سال ۲۰۱۷ با استفاده از کد MCNPX، ضریب تضعیف جرمی کامپوزیت اپوکسی E44/اکسید تنگستن را برای انرژی‌های مختلف گاما در محدوده انرژی 80-1250 keV محاسبه نمودند که با کار تجربی دیگران همخوانی خوبی نشان داد [۱۳]. در مطالعه‌ای در سال ۲۰۱۱ که توسط مرتضوی و همکاران انجام شد، طراحی و ساخت حفاظ‌های مورد استفاده در تضعیف ایکس و گاما با استفاده از کامپوزیت پلیمر/تنگستن/قلع انجام گرفت. محققان ضمن محاسبه چگالی کامپوزیت ساخته شده در کسرهای وزنی مختلف، مقدار HVL را با دو روش محاسبه و اعلام نمودند که علاوه بر خواص تضعیف مطلوب آن در کاربردهای تشخیصی، به استحکام مکانیکی بالای آن نیز اشاره نمودند [۱۴]. باقری و همکاران در سال ۲۰۱۷ در پژوهشی بر روی بررسی حفاظ تابش گاما از شیشه حاوی باریوم-بیسموت-بور و سیلیکات برای چشمه‌های سزیم ۱۳۷ و کبالت ۶۰ استفاده کردند و با استفاده از کد شبیه سازی MCNP-4C و برنامه XCOM، ضرایب تضعیف را محاسبه و نتایج را با داده‌های تجربی مقایسه کردند. نتایج نشان دهنده انطباق مناسبی برای هر سه روش بود و همچنین نمونه شیشه‌ای با چگالی ۴.۲۱ g/cm<sup>3</sup> از سایر نمونه‌های ساخته شده سپر مناسب‌تری برای

<sup>1</sup> As Low As Reasonably Achievable

<sup>2</sup> Lead-free

<sup>3</sup> Fillers

تابشهای گاما معرفی گردید [۱۵]. در تحقیقی دیگر که توسط عادل و همکاران انجام شده، مطالعات مربوط به تضعیف گامای پرنرژری ثانویه‌ی میدان نوترونی با بهره‌گیری از یک حفاظ کامپوزیتی تقویت شده‌ی عاری از سرب انجام شد [۱۶]. به طور ویژه ناحیه انرژی دستگاه‌های ماموگرافی معمولاً در بازه‌ی 20-30 keV بوده که در آن انرژی میانگین فوتونهای تولیدی برابر 20 keV می‌باشد [۱۷]. در حفاظ سازی، محاسبه ضریب تضعیف جرمی<sup>۴</sup> یک ماده در مقابل فوتون‌هایی با انرژی مشخص از اهمیت بالایی برخوردار است. اگر اندازه‌گیری ضریب تضعیف فوتون‌های پرنرژری در شرایط هندسی خوب<sup>۵</sup>، یعنی با استفاده از یک باریکه تابشی باریک و کاملاً موازی انجام شود و اطلاعات حاصل به صورت نیمه لگاریتمی بر حسب ضخامت ماده جاذب رسم شود، در صورت تک انرژی بودن فوتون، یک خط مستقیم حاصل خواهد شد که در واقع شیب این خط بیانگر مقدار ضریب تضعیف ماده است [۱۸]. منحنی تضعیف باریکه پرتو عبارتست از:

$$\frac{I}{I_0} = B \exp(-\mu x) \quad (1)$$

که در آن  $I_0$  شدت پرتوهای فرودی در غیاب ماده جاذب،  $x$  ضخامت ماده جاذب،  $I$  شدت پرتوهای عبوری از ماده جاذب،  $B$  مقدار ضریب انباشت<sup>۶</sup> ماده که برای هندسه خوب و حذف پرتوهای پراکنده شده مقدار آن برابر یک در نظر گرفته می‌شود ( $B=1$ ) و  $\mu$  ضریب تضعیف ماده بر حسب  $\text{cm}^{-1}$  است [۱۸]:

$$\mu(\text{cm}^{-1}) = \frac{\text{Ln}(I_0/I)}{x(\text{cm})} \quad (2)$$

هدف از انجام این پژوهش، طراحی یک حفاظ عاری از سرب در ناحیه ماموگرافی است که محاسبه ضریب تضعیف جرمی و کمیات HVL و TVL مربوط به کامپوزیت  $\text{PE-WO}_3$  در کسرهای وزنی مختلف تحت پرتوهای فوتون‌هایی در محدوده انرژی مورد استفاده در مراکز ماموگرافی یعنی 15 keV، 20 keV و 25 keV با استفاده از کد MCNP4C بوده که نتایج آن با داده‌های نرم‌افزار XMudat مقایسه گردید.

## ۲. مواد و روشها

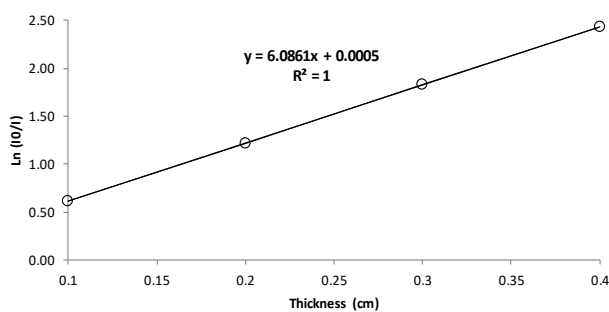
در این پژوهش، از کد MCNP4C به منظور شبیه سازی ویژگی‌های حفاظ سازی کامپوزیت  $\text{PE-WO}_3$  در کسرهای وزنی متفاوت از پُرکننده اکسید تنگستن یعنی 0 wt%، 5 wt%، 8 wt%، 10 wt%، 20 wt% و 30 wt% در انرژی‌های متفاوت فوتون قابل استفاده در ماموگرافی یعنی 15 keV، 20 keV و 25 keV بهره‌گیری شد. بدین منظور، یک محیط یکنواخت به ضخامت‌های مختلف با چگالی مؤثر برای کامپوزیت مذکور در کسرهای وزنی مختلف در نظر گرفته شد. ابتدا در غیاب ماده کامپوزیتی، با استفاده از تالی F4، مقدار شار اولیه ذرات  $I_0$  در سلول مربوط به آشکارساز CsI قرائت شد و سپس در حضور ماده کامپوزیتی، مقدار  $I$  قرائت گردید. در ادامه ضریب تضعیف خطی کامپوزیت مذکور ( $\mu/\rho$ ) در ضخامت‌های 1 mm، 2 mm، 3 mm و 4 mm در انرژی‌های 15 keV و 20 keV و 25 keV طبق رابطه (۲) محاسبه گردید. در محاسبه ضریب تضعیف فوتون‌ها از شرایط هندسی خوب بهره‌گیری شد و با در نظر گرفتن تالی F4-E4 در واقع از پراکندگی فوتونها صرف‌نظر گردید؛ به عبارتی مقدار ضرایب انباشت در رابطه (۱) برابر یک در نظر گرفته شده است ( $B=1$ ). در این شبیه‌سازی، چشمه پرتویی به صورت نقطه‌ای و تک انرژی در نظر گرفته شد و فاصله چشمه تا آشکار 2 cm منظور گردید. همچنین از یک کولیماتور (موازی ساز) سربی به قطر داخلی 3 cm و قطر خارجی 10 cm با ارتفاع 15 cm بهره‌گیری شد. در شکل ۱-الف) نمایی از هندسه مسأله در این شبیه سازی به تصویر کشیده شده است. در پژوهش حاضر از پلی اتیلن با فرمول شیمیایی  $(\text{C}_2\text{H}_4)_n$  دارای چگالی  $0.93 \text{ g/cm}^3$  به عنوان ماده اصلی زمینه و از

<sup>4</sup> Mass Attenuation Coefficient

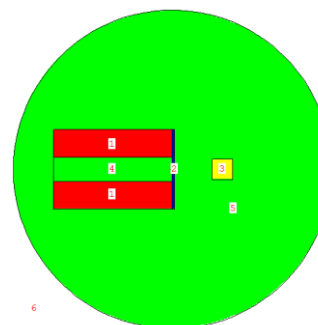
<sup>5</sup> Good geometry

<sup>6</sup> Build up

اکسید تنگستن  $WO_3$  با چگالی  $7.16 \text{ g/cm}^3$  به عنوان پُرکننده یا فاز تقویتی<sup>۷</sup> استفاده گردید. همچنین نتایج شبیه سازی با کد MCNP4C از طریق نرم افزار XMuDat اعتبارسنجی گردید. شایان ذکر است که نرم افزار XMuDat برای محاسبه ضریب تضعیف جرمی یک عنصر یا کامپوزیت در انرژی‌های مختلف فوتون قابلیت بکارگیری دارد. در جدول ۱ جزئیات مربوط به عناصر تشکیل دهنده کامپوزت PE- $WO_3$  در کسرهای وزنی مختلف به همراه چگالی آنها نمایش داده شده است. به منظور اعتبارسنجی کد شبیه سازی در این پژوهش، از ماده استاندارد مس با چگالی  $8.96 \text{ g/cm}^3$  برای فوتونهایی با انرژی  $1.25 \text{ MeV}$  و ضریب تضعیف جرمی  $0.05261 \text{ cm}^2/\text{g}$  استفاده شد [۱۹]. مقدار ضریب تضعیف جرمی شبیه سازی شده برای ماده مس و در انرژی فوق برابر  $0.05175 \text{ cm}^2/\text{g}$  گزارش شد که با مقدار واقعی آن ۱.۶٪ اختلاف دارد.



(ب)



(الف)

شکل ۱- الف) نمایش هندسه در این مسأله، ناحیه (۱): کولیماتور سربی، (۲): حفاظ کامپوزیتی، (۳): آشکارساز CsI، (۴) و (۵): هوا و (ب) نحوه محاسبه  $(\mu/\rho)$  ماده کامپوزیتی با استفاده از شیب خط  $\text{Ln}(I_0/I)$  بر حسب ضخامت ماده.

جدول ۱ جزئیات مربوط به عناصر تشکیل دهنده کامپوزت PE- $WO_3$  در کسرهای وزنی مختلف به همراه چگالی کامپوزیت

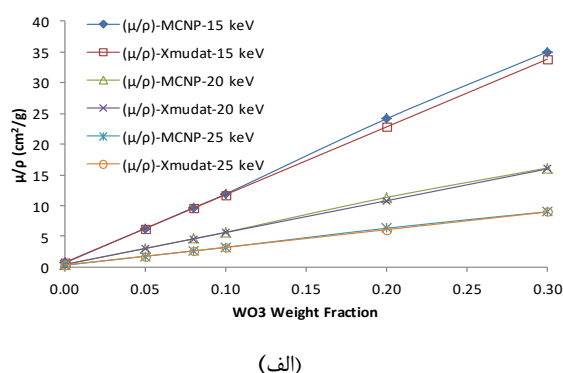
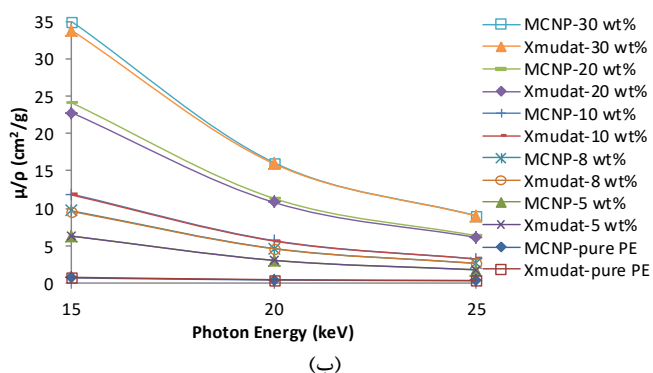
$WO_3$ wt fraction	w(H)	w(C)	w(O)	w(W)	$\rho_{\text{Composite}} (\text{g/cm}^3)$
0.00	0.14372	0.85628	0.00000	0.00000	0.93
0.05	0.13653	0.81347	0.01035	0.03965	0.97
0.08	0.13222	0.78778	0.01656	0.06344	1.00
0.10	0.12934	0.77066	0.02070	0.07930	1.02
0.20	0.11497	0.68503	0.04141	0.15859	1.13
0.30	0.10060	0.59940	0.06211	0.23789	1.27

## ۳. نتایج و بحث

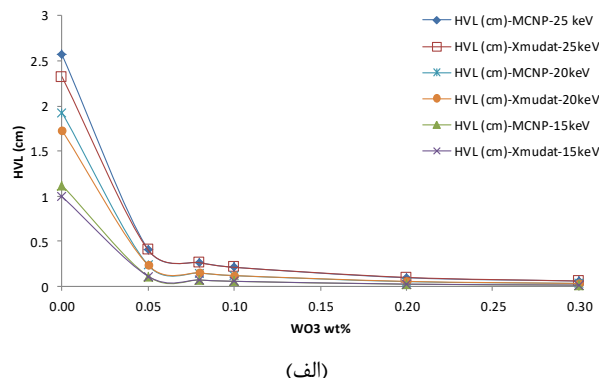
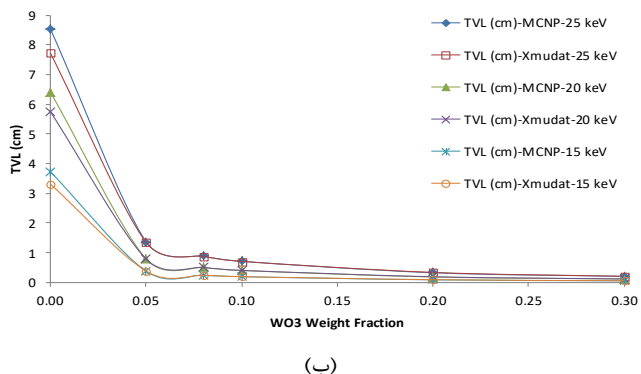
مطابق شکل ۱-ب) ضریب تضعیف نمونه کامپوزیت 5wt% در انرژی 15 keV با ترسیم نمودار  $\text{Ln}(I_0/I)/d$  بر حسب ضخامت کامپوزیت از طریق برازش خطی محاسبه شده است. همانطور که از شکل ۱-ب) پیداست، مقدار  $R^2=1$  (ضریب همبستگی) بیانگر خطی بودن کامل نمودار است. در شکل ۲-الف) مقایسه ضریب تضعیف خطی  $(\mu/\rho)$  ماده کامپوزیتی PE/ $WO_3$  در کسرهای وزنی متفاوت و انرژی‌های مختلف با استفاده از کد MCNP4C و نرم افزار XMuDat نمایش داده شده است. شایان ذکر است که بیشترین درصد اختلاف ناشی از این دو روش

<sup>7</sup> Reinforcement phase

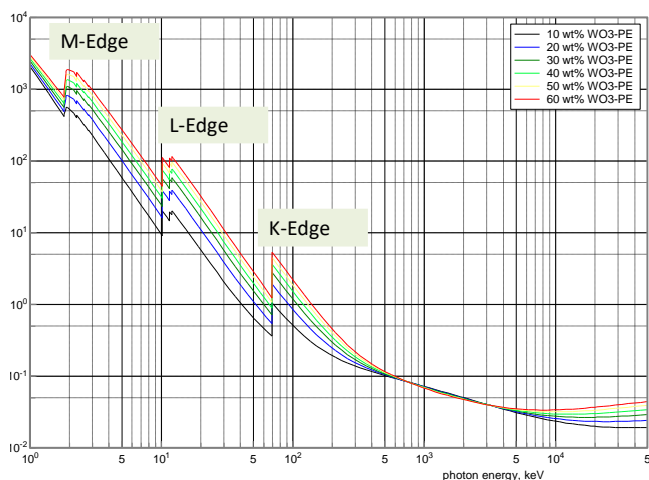
محاسباتی در انرژی 15 keV و برای نمونه 20 wt% بوده که مقدار آن برابر 5.8% گزارش شد. نتیجه اول اینکه با افزایش درصد وزنی اکسید تنگستن در بستر پلیمر، مقدار ضریب تضعیف خطی افزایش می‌یابد. همچنین در یک کسر وزنی ثابت، با افزایش انرژی فوتونها مقدار ضریب تضعیف خطی کاهش می‌یابد. مقایسه نتایج شبیه سازی با کد MCNP4C با نرم افزار XMudat نشان می‌دهد که هر چه انرژی افزایش یابد، همخوانی نتایج این دو روش بیشتر می‌شود. مطابق شکل ۲-ب)، ضریب تضعیف جرمی ماده کامپوزیتی WO<sub>3</sub>/PE در انرژی‌ها و کسرهای وزنی متفاوت با استفاده از کد MCNP4C شبیه سازی شد که با مقایسه آنها با داده های نرم افزار XMudat، همخوانی بسیار خوبی بین این دو روش مشهود است. در ادامه کمیات HVL و TVL مطابق شکل ۳ در کسرهای وزنی و انرژی‌های مختلف فوتون با استفاده از کد MCNP4C شبیه سازی شد و با داده‌های نرم افزار XMudat نیز مقایسه گردید که همخوانی بسیار خوبی بین این دو روش گزارش شد. در ادامه با استفاده از نرم‌افزار XMudat، مطابق شکل ۴، ضریب تضعیف خطی کامپوزیت WO<sub>3</sub>-PE برای کسرهای وزنی مختلف در گستره وسیعی از انرژی فوتون‌ها یعنی 1 keV-10 MeV به تصویر کشیده شد.



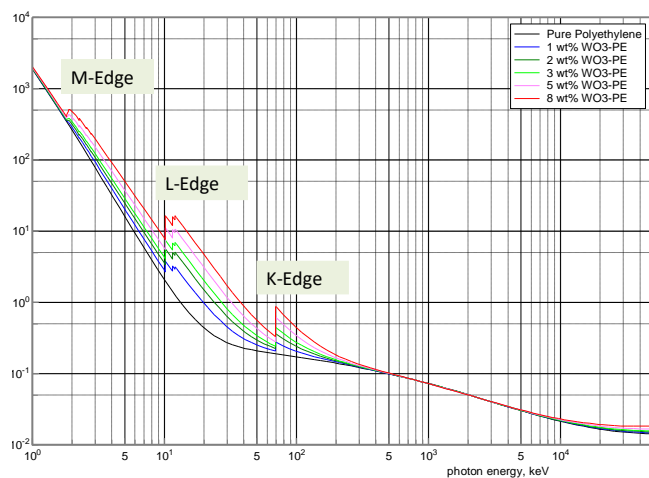
شکل ۲- مقدار  $\mu/\rho$  کامپوزیت WO<sub>3</sub>/PE در الف) کسرهای وزنی و انرژی‌های مختلف و ب) در انرژی‌ها و کسرهای وزنی متفاوت با استفاده از MCNP4C و XMudat.



شکل ۳- محاسبه الف) HVL و ب) TVL کامپوزیت WO<sub>3</sub>/PE در کسرهای وزنی و انرژی‌های مختلف فوتون با استفاده از MCNP4C و XMudat.



(ب)



(ف)

شکل ۳- محاسبه  $\mu/p$  کامپوزیت  $WO_3$ -PE در گستره وسیعی از انرژی فوتونها و در کسرهای وزنی (الف) پایین (از صفر تا 8 wt%) و (ب) بالا از 10 wt% تا 60wt% با استفاده از نرم افزار XMudat.

با بررسی و محاسبات انجام گرفته برای انرژی‌های 15, 20, 25 keV نشان داده شد که مقادیر نهایی کمیت‌های HVL و TVL کامپوزیت در درصد‌های وزنی متفاوت، ساخت عملی حفاظی سبک و در عین حال مقرون بصره را امکان پذیر می‌سازد. دلیل اصلی این مساله را می‌توان با توجه به نمودارهای محاسبه شده در شکل‌های ۲ تا ۴ یافت. همانطوری که در این نمودارها نشان داده شده است، در محدوده انرژی‌های بالا، ضرایب تضعیف جرمی بشدت کاهش یافته و احتمال وقوع اثر فوتوالکتریک کامپوزیت نیز به تبع آن کاهش یافته است؛ برعکس در انرژی‌های کمتر از 50 keV و مناسب برای ناحیه ماموگرافی، بیشترین ضریب تضعیف به واسطه افزایش احتمال رخداد پدیده فوتوالکتریک قابل پیش بینی است.

جدول ۲ لبه‌های جذب مربوط به عنصر تنگستن و انرژی‌های مربوط به آن

انرژی (keV)	لبه جذب
69.5250	K-Edge
12.0998	L <sub>1</sub> -Edge
11.5440	L <sub>2</sub> -Edge
10.2068	L <sub>3</sub> -Edge
2.8196	M <sub>1</sub> -Edge
2.5749	M <sub>2</sub> -Edge
2.2810	M <sub>3</sub> -Edge
1.8716	M <sub>4</sub> -Edge
1.8092	M <sub>5</sub> -Edge

با توجه به شکل ۴- (الف)، پلی اتیلن خالص هیچ لبه‌ی جذبی ندارد، اما با افزودن تنگستن به پلیمر، لبه‌های جذب ظاهر می‌شوند. با افزایش انرژی فوتون‌های فرودی، میزان تضعیف فوتونها توسط ماده کاهش می‌یابد؛ البته در این قانون استثنائاتی در لبه‌های جذب لایه‌های اتمی K، L، M، و N وجود دارد که در آن ضریب تضعیف به صورت جهشی افزایش می‌یابد. در لبه‌های جذب، سطح مقطع جذب فوتوالکتریک افزایش یافته و فوتون‌ها در این انرژی‌ها به طور کامل جذب ماده شده و فوتوالکترون‌ها را از اتم خارج می‌سازند. در جدول ۲ لبه‌های جذب مختلف مربوط به عنصر تنگستن با عدد اتمی  $Z=74$  و چگالی  $19.3 \text{ g/cm}^3$  در انرژی‌های مختلف ارائه شده است [۱۱].

از مزایای حفاظ‌های غیر سمی کامپوزیت پلیمری می‌توان به سبک تر بودن آنها در مقایسه با حفاظ‌های سربی سنگین و سمی اشاره نمود و اینکه با افزودن درصد وزنی دلخواه از پرکننده‌های اکسید فلزی سنگین نظیر اکسید تنگستن به ماده پلیمری می‌توان در هر ناحیه انرژی، محاسبات دقیق مقادیر HVL و TVL را انجام داد.

#### ۴. نتیجه گیری

با توجه به اهمیت و رویکرد به حفاظ‌های تابشی غیر سربی که در سالیان اخیر مورد توجه قرار گرفته است، در این پژوهش، ویژگی‌های حفاظ سازی کامپوزیت پلی اتیلن-اکسید تنگستن (PE-WO<sub>3</sub>) در کسرهای وزنی مختلف WO<sub>3</sub> در بستر PE تحت انرژی‌های مختلف فوتون در ناحیه ماموگرافی با استفاده از کد MCNP4C شبیه سازی شد و نتایج آن با نرم افزار XMudat مقایسه گردید. نتایج شبیه سازی کمیت‌های ضریب تضعیف جرمی، HVL و TVL مادهی کامپوزیتی PE-WO<sub>3</sub> با داده‌های نرم افزار XMudat در کسرهای وزنی و انرژی‌های متفاوت همخوانی خوبی نشان داد. در این شبیه سازی مقدار TVL برای این کامپوزیت WO<sub>3</sub>-PE 30 wt% به ترتیب در انرژی‌های 15 keV، 20 keV و 25 keV برابر 0.52 mm، 1.13 mm و 2.0 mm گزارش گردید. نتایج این پژوهش نشان داد که با افزایش درصد وزنی پرکننده WO<sub>3</sub>، بدلیل افزایش چگالی کامپوزیت، ضریب تضعیف ماده افزایش یافته و مقادیر HVL و TVL نیز به طرز محسوسی کاهش می‌یابند. بنابراین کامپوزیت عاری از سرب PE-WO<sub>3</sub> می‌تواند به عنوان حفاظی مناسب و عاری از سرب برای تضعیف فوتون‌های در محدوده انرژی ناحیه ماموگرافی یعنی حدود 20 keV به کار گرفته شود.

#### ۵. تشکر و قدرانی

از همکاران پژوهشگاه علوم و فنون هسته ای و دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات تهران به خاطر فراهم نمودن امکانات پژوهشی تشکر و قدرانی می‌شود.

#### ۶. مراجع

- [1] J.T. Bushberg, J.M. Boone, The essential physics of medical imaging, Lippincott Williams & Wilkins, 2011.
- [2] A. Abiz, S. Malekie, M.A. Hosseini, Investigating radiation shielding properties of the nanocomposites including high density polyethylene and nano-oxide tungsten, in: E. Tel, I.H. Sarpun, H. Ozdogan, M. Sekerci (Eds.) 5th International Conference on Theoretical and Experimental Studies in Nuclear Applications and Technology (TESNAT), Amasya University, Amasya, Turkey, 2019, pp. 32.
- [3] M.J.R. AL-Dhuhaibat, Study of the shielding properties for some composite materials manufactured from polymer epoxy supported by cement, aluminum, iron and lead against gamma rays of the cobalt radioactive source (Co-60), Int. J. of Appl. and Eng. & Management, 4 (2015).
- [4] K. Dubey, C. Chaudhari, S. Suman, N. Raje, R. Mondal, V. Grover, S. Murali, Y. Bhardwaj, L. Varshney, Synthesis of flexible polymeric shielding materials for soft gamma rays: Physicomechanical and attenuation characteristics of radiation crosslinked polydimethylsiloxane/Bi<sub>2</sub>O<sub>3</sub> composites, Polym. Compos., 37 (2016) 756-762.
- [5] T. Kawano, H. Ebihara, Shielding Ability of Lead Loaded Radiation Resistant Gloves, Radioisotopes, 39 (1990) 49-52.
- [6] F. Kazemi, S. Malekie, M.A. Hosseini, A Monte Carlo Study on the Shielding Properties of a Novel Polyvinyl Alcohol (PVA)/WO<sub>3</sub> Composite, Against Gamma Rays, Using the MCNPX Code, Journal of Biomedical Physics Engineering, 9 (2019) 465.

- [7] R. Li, Y. Gu, G. Zhang, Z. Yang, M. Li, Z. Zhang, Radiation shielding property of structural polymer composite: Continuous basalt fiber reinforced epoxy matrix composite containing erbium oxide, *Compos. Sci. Technol.*, 143 (2017) 67-74.
- [8] K.S. Mann, A. Rani, M.S. Heer, Shielding behaviors of some polymer and plastic materials for gamma-rays, *Radiat. Phys. Chem.*, 106 (2015) 247-254.
- [9] S. Nambiar, E.K. Osei, J.T. Yeow, Polymer nanocomposite-based shielding against diagnostic X-rays, *J. Appl. Polym. Sci.*, 127 (2013) 4939-4946.
- [10] H.O. Tekin, V.P. Singh, U. Kara, T. Manıçı, E.E. Altunsoy, Investigation of Nanoparticle Effect on Radiation Shielding Property Using Monte Carlo Method, *CBU J. of Sci*, 12 (2016) 195-199.
- [11] F. Kazemi, Study and design of Polyvinyl Alcohol-Tungsten oxide (PVA/WO<sub>3</sub>) as gamma radiation shielding, Department of Nuclear Engineering, Islamic Azad University, Arsanjan Branch, 2017.
- [12] روژین مهرآرا، شهریار ملکی، سید محسن صالح کوتاهی، صدیقه کاشیان، " مطالعه‌ی ویژگیهای حفاظ سازی نانوکامپوزیت پلی-کربنات اکسید بیسموت برای پرتوهای گامای <sup>99m</sup>Tc در حوزه پزشکی"، کنفرانس فیزیک ایران، تبریز، دانشگاه تبریز، شهریور ۱۳۹۸.
- [13] S. Malekie, N. Hajiloo, Comparative Study of Micro and Nano Size WO<sub>3</sub>/E44 Epoxy Composite as Gamma Radiation Shielding Using MCNP and Experiment, *ChPhL*, 34 (2017) 108102.
- [14] M. Aghamiri, S. Mortazavi, M. Tayebi, M. Mosleh-Shirazi, H. Baharvand, A. Tavakkoli-Golpayegani, B. Zeinali-Rafsanjani, A novel design for production of efficient flexible lead-free shields against X-ray photons in diagnostic energy range, *Journal of Biomedical Physics and Engineering* 1(2011).
- [15] R. Bagheri, A.K. Moghaddam, H. Yousefnia, Gamma ray shielding study of barium-bismuth-borosilicate glasses as transparent shielding materials using MCNP-4C code, XCOM program, and available experimental data, *Nuclear Engineering and Technology*, 49 (2017) 216-223.
- [16] روح اله عادل، سیدپژمان شیرمردی، سیدجواد احمدی، سعیده مزینانی، " تضعیف گامای پرانرژی ثانویه‌ی میدان نوترونی با بهره‌گیری از یک حفاظ کامپوزیتی تقویت شده ی بدون سرب"، *مجله علوم و فنون هسته ای*، دوره ۳۷، شماره ۷۵، ۲۹-۲۲، ۱۳۹۵.
- [17] I.-M. Low, N.Z.N. Azman, *Polymer Composites and Nanocomposites for X-Rays Shielding*, Springer2020.
- [18] H. Cember, *Introduction to health physics*, Pergamon Press1983.
- [19] <https://physics.nist.gov/PhysRefData/XrayMassCoef/ElemTab/z29.html>.