فصلنامه سرامیک ایران

بررسی خواص محافظتی پرتو گاما ترکیبات شیشه‌ای بورو–تلوریت بیسموت با استفاده از ابزار شبیه‌سازی مونت‌کارلویی Geant4

مجتبی رحمانی ورکی[۱]، مهدی عشقی[۲]

[۱] دانشجوی دکترای فیزیک هسته‌ای، دانشگاه امام حسین (ع)، تهران
[۲] استادیار گروه فیزیک، دانشگاه امام حسین (ع)، تهران

نویسنده اول و مسئول:
دکتر مهدی عشقی
استادیار دانشگاه جامع امام حسین (ع)

نوع مقاله: پژوهشی
صفحه‌های: ۳۱ تا ۴۹
شاپا چاپی: ۳۳۵۱-۱۷۳۵
شاپا الکترونیکی: ۳۰۹۷-۲۷۸۳
زبان نشریه: فارسی
دسترس‌پذیر در نشانی:
www.JICERS.ir
تاریخ دریافت:
۱۴۰۳/۰۴/۱۲
تاریخ پذیرش:
۱۴۰۳/۰۵/۰۷

* eshgi54@gmail.com

DOR: 20.1001.1.17353351.1403.20.2.1.5

چکیده: *در این پژوهش، ویژگی‌های محافظتی در برابر پرتو گاما ترکیبات شیشه‌ای بورو–تلوریت بیسموت $[(TeO_2)_{0.7}–(B_2O_3)_{0.3}]_{(1-x)}–(Bi_2O_3)_x$ (که در اینجا x برابر است با؛ ۰/۰۵، ۰/۱۰، ۰/۱۵، ۰/۲۰، ۰/۲۵ و ۰/۳ کسر مولی) با استفاده از ابزار شبیه‌سازی مونت‌کارلویی جینت۴ در محدوده ۰/۰۱۵ تا ۱۵ مگاالکترون‌ولت بررسی می‌شود. در این بررسی، کمیت‌های مربوط به تضعیف فوتون مانند: ضریب تضعیف خطی (μ_L)، ضریب تضعیف جرمی (μ_m)، لایه یک‌دهم مقدار (TVL)، لایه نیم‌مقدار (HVL)، عدد اتمی مؤثر (Z_{eff})، چگالی الکترونی مؤثر (N_{eff})، سطح مقطع اتمی کل (σ_a)، سطح مقطع الکترونیکی کل (σ_e) و مسیر آزاد میانگین (MFP) و همچنین طیف ذرات ثانویه ایجادشده در این ترکیبات به تفکیک نوع و انرژی آن‌ها برای سطوح مختلف انرژی گامای فرودی نشان داده می‌شود. برای اعتبارسنجی نتایج شبیه‌سازی، مقادیر ضریب تضعیف جرمی محاسبه شده از جینت-۴ با نتایج Phy-x مقایسه شده که نشان می‌دهد توافق خوبی با یکدیگر دارند. توافق بین داده‌ها، نشان می‌دهد که ابزار جینت-۴ یک روش خوب جهت بررسی ویژگی‌های حفاظ پرتوی گاما می‌باشد. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد، با افزایش عنصر بیسموت در ترکیبات شیشه، خاصیت حفاظی آن نیز افزایش می‌یابد و مقادیر کمیت‌ها در حد مطلوبی قرار دارند که می‌وان از این شیشه‌ها به‌عنوان جایگزین شیشه‌های سربی (به دلیل سمیت سرب) در انرژی‌های پایین‌تر استفاده نمود.*

کلمات کلیدی: پرتو گاما، حفاظ تابش‌های یونیزان، ترکیبات شیشه‌ای بورو–تلوریت بیسموت، جینت-۴.

۱– مقدمه

در فناوری هسته‌ای، تابش‌های یونیزان غیرمستقیم، مانند فوتون‌ها و تابش‌های یونیزان مستقیم، مانند پروتون‌ها، نوترون‌ها، ذرات آلفا و الکترون‌ها، کاربرد گسترده‌ای در فناوری تابش، تشخیص و درمان پزشکی، کشاورزی، صنعت نفت، فناوری فضایی و فیزیک تشعشع پیدا کرده‌اند. بنابراین، حفاظت محققان و ابزارهای اطراف آن‌ها، از تشعشعات هسته‌ای، تا حد مناسب، یک مشکل مداوم بوده است [۱]. تولید تابش‌های یونیزان از دو طریق طبیعی و مصنوعی می‌تواند اتفاق بیفتد. منابع طبیعی تولید تابش‌های یونیزان ایزوتوپ‌های رادیواکتیو موجود در طبیعت می‌باشند. درحالی‌که منابع مصنوعی، دستگاه‌هایی از قبیل؛ راکتورهای هسته‌ای رادیوایزوتوپ، شتاب‌دهنده‌های ذرات، دستگاه‌های رادیوتراپی و پزشکی هسته‌ای و ... می‌باشند که با توجه به نوع کاربرد، توسط بشر ساخته شده است [۲]. مطالعه برهم‌کنش‌های تابش‌های یونیزان با ماده، یک موضوع تحقیقاتی مهم در زمینه فیزیک هسته‌ای است. چنین دانشی چگونگی استفاده از مواد گوناگون جهت جلوگیری از آسیب رساندن این تابش‌های پرانرژی به تجهیزات یا ابزارها را تبیین می‌کند. همچنین به محافظت از موجودات زنده در برابر قرارگرفتن در معرض تابش‌های یونیزان خطرناک، فراتر از

[Downloaded from jicers.ir on 2025-12-11]

[DOR: 20.1001.1.17353351.1403.20.2.1.5]

سطوح دوز قابل قبول کمک می‌کند. یکی از چالش‌های مهم در فناوری هسته‌ای، توسعه مواد محافظ مناسب برای کاهش اثرات مخرب این پرتوها می‌باشد. انتخاب ماده محافظ به نوع و انرژی تابش و همچنین نوع کاربرد آن بستگی دارد. مواد شیشه‌ای برای استفاده به‌عنوان حفاظ تشعشعی برای ناظران یا آزمایش‌کنندگان مطلوب هستند، زیرا چنین موادی توانایی تضعیف پرتوهای گاما، نوترون‌ها و همچنین انتقال نور مرئی را دارند [۳]. در کاربردهایی مانند پردازش سوخت هسته‌ای و رادیوگرافی پزشکی که در آن نیاز به مشاهده فرایند کار توسط کاربر است استفاده از حفاظ‌های شیشه‌ای ضرورت پیدا می‌کند [۴]. بنابراین، موادی که دارای شفافیت نوری و پارامترهای کاهش تابش‌های یونیزان، فراتر از حد لازم باشند، نامزد مناسبی برای استفاده در این کاربردها هستند. شیشه‌های اپتیکی دارای این خاصیت دوگانه هستند. این شیشه‌ها می‌توانند جایگزین خوبی برای حفاظ‌های بتنی هم باشند، چرا که بتن‌ها سنگین و کدر هستند و هم استفاده طولانی مدت از آن‌ها در مقابل تابش‌های یونیزان باعث ایجاد ترک در ساختار بتن می‌شود [۵]. اگرچه شیشه‌های اپتیکی سنتی حاوی اکسید سرب، برای چنین کاربردی موجود هستند، اما محتوای بالای سرب می‌تواند منجر به کاهش نقطه ذوب و مشکلات زیست‌محیطی مرتبط با استفاده از سرب شود. بنابراین، انواع دیگری از شیشه‌های محافظ تشعشع، مانند اکسیدبور، تلوریم و سیلیکون اصلاح‌شده با اکسیدهای سنگین مختلف مورد بررسی قرار گرفته‌اند. این شیشه‌ها به دلیل سمیت سرب می‌توانند به جای شیشه‌های سربی به‌عنوان مواد محافظ اشعه گاما انتخاب دیگری باشند [۶]. شیشه بدون سرب معمولاً با استفاده از اکسیدهای فلزات سنگین مانند اکسید بیسموت، اکسید باریم و غیره تهیه می‌شود که جایگزین اکسید سرب در شیشه‌های مبتنی‌بر سرب معمولی برای محافظت از تشعشع گاما می‌شود [۷]. از شیشه‌های اپتیکی می‌توان حفاظ‌های شیشه‌ای ساخت همچنین تولید آن‌ها مقرون‌به‌صرفه است، به‌راحتی قالب‌گیری می‌شوند، قابلیت بازیافت ۱۰۰٪ دارند، همگنی بالایی از خود نشان می‌دهند، بسته به ترکیبات از نظر ساختاری، حرارتی و مکانیکی پایدار هستند [۸]. شیشه‌های محافظ بدون سرب، سازگار با محیط زیست و غیرسمی، برای کاربردهای عملی آن‌ها در زمینه‌های پزشکی و صنعتی مورد نیاز است. علاوه‌بر این، برای توانایی محافظتی خوب از تابش گاما و جذب پرتو نوترون سریع و حرارتی، شیشه‌ها باید دارای چگالی بالا، عدد اتمی بزرگ، سطح مقطع جذب بالا و عناصر سبک در ترکیب (مانند بور و لیتیم) باشند تا یک پراکندگی الاستیک کارآمد داشته باشند. شیشه‌های بورات علاوه‌بر سهولت آماده‌سازی و شکل‌دهی، میزبان بسیار خوبی برای یون‌های فلزی قلیایی، خاکی و واسطه هستند. بنابراین، آن‌ها را می‌توان در بسیاری از کاربردهای دیگر از جمله سوئیچینگ حافظه و نوری، زیست پزشکی، آستانه الکتریکی، آشکارسازهای سوسوزن، دستگاه‌های الکترونیک نوری و اخیراً در کاربرد حفاظ تابش‌های هسته‌ای و دزیمتر استفاده کرد [۹]. اکسید فلزات سنگین از قبیل اکسید بیسموت (چگالی= $8/9\ g/cm^3$) و اکسید باریم (چگالی= $5/72\ g/cm^3$) که پایه و اساس ساخت شیشه‌های محافظ هستند، به خاطر عدد اتمی مؤثر بزرگ و چگالی بالای خود و همچنین غیرسمی بودنشان مواد بسیار مطلوبی هستند [۱۰]. در اینجا اکسید بیسموت به دلیل چگالی بالا و جذب قوی اشعه گاما رقیب خوبی برای اکسید سرب می‌تواند باشد. به دلیل قدرت ضعیف میدان، یون بیسموت را نمی‌توان به‌عنوان حالت‌دهنده شیشه در نظر گرفت. با این حال، ترکیبات شیشه‌ها نقش اصلی را در کاربرد آن‌ها به‌عنوان حفاظ بازی می‌کنند. هرچه کسر وزنی عناصر با چگالی بالا و عدد اتمی بالا در ترکیبات بیش‌تر باشد، فوتون‌ها بیش‌تر تضعیف می‌شوند. برای مطالعه ویژگی‌های تضعیف گامای هر ماده، کمیت ضریب تضعیف جرمی یک ویژگی فیزیکی مهم است. علاوه‌بر این، لایه نیم‌مقدار، لایه یک‌دهم مقدار، چگالی الکترونی مؤثر، عدداتمی مؤثر، مسیر آزاد میانگین کمیت‌هایی هستند که برای درک اندرکنش تابش گاما با مواد حفاظ از طریق جذب فوتوالکتریک، پراکندگی کامپتون، پراکندگی رایلی و سازوکارهای تولید زوج، حیاتی هستند [۱۱].

در سال‌های اخیر تحقیقات نظری و تجربی بسیاری در زمینه اندرکنش تابش گاما با ترکیبات شیشه‌ای مختلف گزارش شده است. یکی از این تحقیقات توسط ابوحسین و همکارانش انجام شده است. آن‌ها، پارامترهای حفاظی ترکیبات شیشه‌ای حاوی بور در مقابل پرتو گاما را برای سه نوع ترکیب $(65B_2O_3 + 30\ Na_2O + 5x\ wt\%)$ که در آن $x = Al_2O_3,\ MgO,\ Li_2O$ می‌باشد، با استفاده از کد مونت‌کارلویی (MCNP-5) در محدوده انرژی ۰/۰۱۵ تا ۱۵ مگاالکترون‌ولت محاسبه و با نتایج برنامه Phy-X/PSD مقایسه کرده و نشان دادند که ضریب تضعیف جرمی ترکیبات حاوی اکسید آلومینیوم و اکسید لیتیوم به ترتیب دارای بیش‌ترین مقدار و کم‌ترین مقدار می‌باشد [۱۲].

[Downloaded from jicers.ir on 2025-12-11]

[DOR: 20.1001.1.17353351.1403.20.2.1.5]

با این توصیف، در میان ترکیبات شیشه‌ای، شیشه‌های تلوریت و بورو–تلوریت ترکیب‌شده با اکسیدبیسموت نیز موضوع تحقیقات بسیاری قرار گرفته است. این شیشه‌ها از زوایای مختلف، از جمله میزان تضعیف اشعه گاما و همچنین میزان تأثیر دوز جذب‌شده گاما بر خواص ساختاری، مکانیکی و نوری بررسی شده‌اند. در مقاله‌ای که توسط عواطف الشمری و همکارانش نوشته‌شده، نشان می‌دهند که افزودن بیسموت به شیشه‌های تلوریت و بورو–تلوریت باعث بالارفتن خواص مکانیکی و پایداری حرارتی آن‌ها شده است. همچنین، افزایش دوز گامای جذبی در نمونه‌های بدون بیسموت بر مقادیر ضریب تضعیف جرمی آن‌ها اثر گذاشته در صورتی که در نمونه‌های حاوی بیسموت بدون تأثیر است. با افزایش دوز گامای جذبی در همه نمونه‌ها رنگ نمونه تغییر کرده و تیره‌تر می‌شود [۱۳]. حلیمه محمدکمری و همکارانش نیز تأثیر اکسید بیسموت بر خواص حفاظی شیشه‌های بورو–تلوریت در مقابل پرتو گاما را به صورت تجربی بررسی نموده‌اند که در نتیجه با اندازه‌گیری تجربی و محاسبه ضریب تضعیف جرمی، لایه نیم‌مقدار و همچنین مسیر آزاد میانگین نمونه در نظر گرفته‌شده، نشان داده‌اند افزودن اکسید بیسموت خواص حفاظی شیشه‌های بورو–تلوریت را در مقابل پرتو گاما افزایش می‌دهد [۱۴]. پژوهش دیگری که توسط لاکشمی نارایانا و همکارانش انجام شده است، محاسبه کمیت‌های مربوط به تضعیف فوتون با استفاده از ابزار شبیه‌سازی مونت‌کارلویی MCNP5 برای شش نوع ترکیب شیشه‌ای بورو–تلوریت بیسموت و اعتبارسنجی آن با نتایج داده‌های مستخرج از WinXCom می‌باشد [۱۵]. با توجه به موارد مذکور اهمیت پرداختن به ترکیبات شیشه‌ای بورو–تلوریت بیسموت معلوم می‌گردد. کاری که توسط مقاله لاکشمی نارایانا انجام شده است، انرژی‌های لبه‌های L1 و L2 و K عنصر بیسموت و لبه K عنصر تلوریم را در محاسبات مشخص ننموده و تأثیرات آن لبه‌ها بر کمیت‌های فیزیکی را بررسی نکرده‌اند. بررسی چنین جزئیاتی در بحث برهم‌کنش تابش با ماده از اهمیت بالایی برخوردار می‌باشند. در اینجا، علاوه‌بر بررسی جامع ویژگی‌های حفاظ پرتوی، به این مورد هم خواهیم پرداخت. همچنین، قصد داریم کمیت‌های مربوط به تضعیف فوتون و همچنین بررسی ذرات ثانویه ایجادشده ناشی از تابش فوتون بر این شش نوع ترکیب شیشه‌ای بورو–تلوریت بیسموت را با استفاده از ابزار شبیه‌سازی مونت‌کارلویی جینت–۴ محاسبه نماییم. در نهایت، برای اعتبارسنجی نتایج شبیه‌سازی، آن‌ها را با نتایج Phy-x مقایسه خواهیم کرد تا نشان دهیم نتایج به دست آمده تا چه اندازه معتبر خواهند بود.

۲– مواد و روش‌ها

۲–۱– مواد مورد استفاده

شش ترکیب شیشه‌ای بورو–تلوریت بیسموت $[(TeO_2)_{0.7}–(B_2O_3)_{0.3}](1-x)–(Bi_2O_3)x$ (که در اینجا x برابر است با؛ ۰/۰۵، ۰/۱۰، ۰/۱۵، ۰/۲۰، ۰/۲۵ و ۰/۳ کسر مولی) انتخاب شده‌اند. ترکیبات با اکسید بیسموت ۵ تا ۳۰ درصد به ترتیب با برچسب P1 تا P6 مشخص شده‌اند که چگالی به همراه درصد وزنی و مولی آن‌ها در جدول ۱ پیوست آورده شده است. در بررسی خاصیت حفاظی یک ماده در مقابل پرتو گاما، نوع و میزان عناصر موجود در آن ترکیب تعیین‌کننده اثرات آن ماده بر پرتو گاما می‌باشد. هرچه عناصر سنگین موجود در یک ترکیب بیش‌تر باشد خاصیت حفاظی آن ماده در مقابل پرتو گاما بهتر می‌شود که در ادامه به صورت کمی تأثیر افزایش اکسید بیسموت بر خاصیت حفاظی ماده را مورد بررسی قرار می‌دهیم. این شش ترکیب شیشه‌ای، متشکل از سه ماده پایه اکسید بیسموت، تلوریم دی‌اکسید و اکسید بور می‌باشند که تفاوت آن‌ها در درصد ترکیب آن‌ها می‌باشد. مبنای تغییرات، اکسید بیسموت در نظر گرفته شده است که از ۵ درصد مولی در شیشه P1 تا ۳۰ درصد مولی در شیشه P6 تغییر می‌کند. افزایش مولی اکسید بیسموت بالتبع سبب کاهش عناصر دیگر می‌شود که در نتیجه باعث تغییر ترکیب شیمیایی و ساختار ماده می‌شود. با توجه به مرجع [۱۴]، در می‌یابیم این افزایش مجاز بوده و خاصیت شیشه‌ای ماده را حفظ می‌کند و ویژگی‌های ساختاری این ترکیبات نیز در این مرجع بررسی شده است.

با توجه به مرجع [۱۴]، روش آماده‌سازی چنین شیشه‌ها بدین صورت می‌باشد: مواد شیمیایی مانند اکسید بیسموت، تلوریم دی‌اکسید و اکسید بور با هم مخلوط کرده و به‌صورت دستی (حدود ۲۰ دقیقه) با استفاده از ملات عقیق آسیاب می‌شوند. سپس مخلوط از قبل در دمای ۳۵۰ درجه سانتی‌گراد گرم شده و با استفاده از یک کوره الکتریکی در دمای ۹۰۰ درجه سانتی‌گراد ذوب می‌گردد. شیشه مذاب در هوا در دمای اتاق با ریختن آن در یک قالب استوانه‌ای شکل فولاد ضدزنگ از قبل گرم‌شده و در دمای ۴۰۰ درجه

[Downloaded from jicers.ir on 2025-12-11]

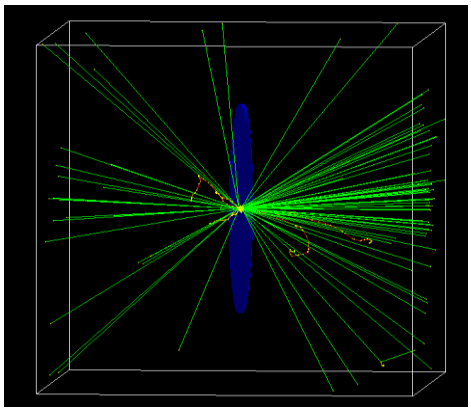
[DOR: 20.1001.1.17353351.1403.20.2.1.5]

سانتی‌گراد آنیل می‌شود. پس از ۱ ساعت، کوره خاموش شده و نمونه‌های شیشه به دمای اتاق خنک می‌شوند. ماهیت آموروف شیشه‌ها هم با استفاده از تجزیه و تحلیل پراش پرتو ایکس در 2θ محدوده ۲۰ تا ۸۰ درجه در همین مرجع بررسی شده است.

هندسه مسئله مطابق شکل ۱ می‌باشد. نمونه حفاظ مورد محاسبه به‌صورت یک قرص به شعاع۳۰ سانتی‌متر و ضخامت یک سانتی‌متر در نظر گرفته شده است که مرکز این قرص در مرکز دستگاه مختصات قرار دارد و فضای اطراف آن را هوا احاطه کرده است. چشمه مسئله یک چشمه نقطه‌ای گاما می‌باشد که در سمت چپ قرص و چسبیده به آن بر روی محور z قرار گرفته است و در جهت مثبت z تابش می‌نماید.

جدول ۱: ترکیبات و درصد عناصر شیشه‌های منتخب

کد شیشه‌ها	ترکیبات شیشه‌ها (درصدمولی)			ترکیبات عناصر (درصد وزنی)				چگالی
	TeO_2	B_2O_3	Bi_2O_3	Te	B	Bi	O	($g.cm^{-3}$)
P1	۶۶/۵	۲۸/۵	۵/۰	۵۶/۸۴۴۸	۴/۱۲۸۱	۱۳/۹۹۹۸	۲۵/۰۲۷۰	۴/۲۹
P2	۶۳/۰	۲۷/۰	۱۰/۰	۴۸/۴۴۳۸	۳/۵۱۸۱	۲۵/۱۸۷۳	۲۲/۸۵۰۷	۴/۸۱
P3	۵۹/۵	۲۵/۵	۱۵/۰	۴۱/۵۷۶۴	۳/۰۱۹۳	۳۴/۳۳۲۵	۲۱/۰۷۱۶	۵/۲۰
P4	۵۶/۰	۲۴/۰	۲۰/۰	۳۵/۸۵۷۸	۲/۶۰۴۰	۴۱/۹۴۷۹	۱۹/۵۹۰۲	۵/۵۶
P5	۵۲/۵	۲۲/۵	۲۵/۰	۳۱/۰۲۱۹	۲/۲۵۲۸	۴۸/۳۸۷۷	۱۸/۳۳۷۴	۵/۸۵
P6	۴۹/۰	۲۱/۰	۳۰/۰	۲۶/۸۷۹۲	۱/۹۵۲۰	۵۳/۹۰۴۶	۱۷/۲۶۴۲	۶/۲۴



شکل ۱: شکل هندسی مسئله، قرصی به ضخامت یک سانتی‌متر و شعاع ۳۰ سانتی‌متر

۲-۲-ابزار شبیه‌سازی جینت-۴

ابزار شبیه‌سازی جینت-۴ ابزاری است که به روش مونت‌کارلویی اندرکنش‌های مواد و تابش‌های یونیزان هسته‌ای را شبیه‌سازی می‌کند. این ابزار به‌طور گسترده در فیزیک پزشکی و فیزیک هسته‌ای برای طیف گسترده‌ای از کاربردها مانند دزیمتری، میکرو و نانودزیمتری، تصویربرداری، حفاظت در برابر اشعه و پزشکی هسته‌ای استفاده می‌شود. جینت-۴ به‌طور مداوم در حال به‌روزرسانی است. استفاده از این ابزار از چند جهت حایز اهمیت است؛

۱. استفاده از این ابزار برای کل جهان رایگان بوده و اصل برنامه به همراه داده‌های جانبی آن در وبگاه جینت-۴ به‌راحتی در دسترس است [۱۷].
۲. این ابزار توسط مرکز تحقیقاتی بین‌المللی cern پشتیبانی می‌شود.
۳. مثال‌های کاربردی آماده که به‌همراه این ابزار ارائه شده است کارکردن با این ابزار در هر زمینه فناوری هسته‌ای، از قبیل پزشکی هسته‌ای، فضایی، راکتورهای هسته‌ای و غیره را آسان کرده است.
۴. این ابزار به گونه‌ای طراحی شده است که کاربر می‌تواند تمامی دستگاه‌های پیچیده را تا حد قابل قبولی در این برنامه شبیه‌سازی نماید و قبل از اجرای اصلی تصویر سه‌بعدی آن را مشاهده نماید و حتی یک پیش‌اجرا نیز داشته باشد.

[Downloaded from jicers.ir on 2025-12-11]

[DOR: 20.1001.1.17353351.1403.20.2.1.5]

۲-۳- برنامه Phy-x

برنامه Phy-x برنامه‌ای است که با استفاده از داده‌های سطح مقطع عناصر که در کتابخانه خود دارد کمیت‌های فیزیکی مورد استفاده در فیزیک هسته‌ای را محاسبه نموده و در اختیار می‌گذارد. هر ماده ترکیبی با هر درصد ترکیب که باشد به روشی که خود برنامه مشخص نموده است به برنامه معرفی شده و در پایان کمیت‌های فیزیکی مربوط به آن ماده از این برنامه استخراج می‌شود. این برنامه محدوده انرژی گسترده‌ای را پوشش داده و حتی انرژی تابش‌های هسته‌ای عناصر رادیواکتیو را در خود دارد [۱۸].

۳- پارامترهای تضعیف اشعه گاما

در بررسی کمی خواص حفاظی یک ماده در مقابل اشعه گاما، بهترین روش، محاسبه پارامترهایی است که اثر تضعیف پرتو گاما بر مقادیر آن‌ها، مشهود باشد. در این خصوص چندین پارامتر وجود دارد که مقالات مختلف از آن استفاده نموده‌اند که در این مقاله نیز مورد استفاده قرار می‌گیرند. در این قسمت، کمیت‌های مربوط به تضعیف گاما به‌طور خلاصه توضیح داده می‌شوند:

ضریب تضعیف خطی ($\mu(cm^{-1})$)

وقتی تابش فرودی در حالت ایده‌آل به‌صورت تک‌انرژی و در یک باریکه نازک در جهت عمود بر صفحه حفاظ وارد لایه حفاظ شود، شدت آن به‌صورت نمایی طبق رابطه (۲) کاهش می‌یابد:

$$I = I_0 e^{-\mu t} \quad (۲)$$

که در این رابطه t ضخامت حفاظ بر حسب (cm)، μ ضریب تضعیف خطی برحسب (cm^{-1})، I_0 شدت تابش فرودی و I شدت تابش خروجی می‌باشد. ضریب تضعیف خطی از آنجایی ناشی می‌شود که ما اگر حجمی از یک ماده را در نظر بگیریم، هر یک از اتم‌های موجود در این ماده به‌ازای هر انرژی پرتوگاما دارای سطح مقطع کل ($\Sigma_{اتم}$) مشخصی می‌باشد که از مجموع سطح مقطع‌های جذب فوتوالکتریک ($\sigma_{فوتوالکتریک}$)، پراکندگی کامپتون ($\sigma_{کامپتون}$)، پراکندگی رایلی ($\sigma_{رایلی}$) و تولید زوج ($\sigma_{تولیدزوج}$) آن اتم حاصل می‌شود.

$$\Sigma_{اتم} = \sigma_{فوتوالکتریک} + \sigma_{کامپتون} + \sigma_{رایلی} + \sigma_{تولیدزوج} \quad (۳)$$

از ضرب این سطح مقطع اتم در تعداد اتم‌های موجود در حجم و جمع بر روی انواع اتم‌های موجود در حجم سطح‌مقطع کل $\sum_{کل}$ به دست می‌آید.

$$\Sigma_{کل} = \Sigma_{i=1}^{i=n}\left(\Sigma_{اتم i} \times \text{تعدادهای اتم موجود در حجم}\right) \quad (۴)$$

که در این رابطه n تعداد انواع اتم می‌باشد. در شیشه بورو-تلوریت بیسموت n برابر ۴ می‌باشد (O ،Bi ،B ،Te). تعداد اتم‌های موجود در حجم را با توجه به چگالی شیشه و درصد مولی اتم‌ها در شیشه می‌توان محاسبه کرد. $\Sigma_{کل}$ برحسب (cm^2) به دست می‌آید که اگر تقسیم بر حجم ماده شود، μ ضریب تضعیف خطی برحسب (cm^{-1}) به دست می‌آید.

ضریب تضعیف جرمی ($\frac{\mu}{\rho}(\frac{cm^2}{g})$)

این کمیت، با تقسیم ضریب تضعیف خطی بر چگالی ماده حفاظ، به دست می‌آید. با در نظرگرفتن ضریب تضعیف خطی برحس (cm^{-1}) و چگالی ماده بر حسب $(\frac{g}{cm^3})$ ضریب تضعیف جرمی برحسب $(\frac{cm^2}{g})$ به دست می‌آید. ضریب تضعیف جرمی را از طریق دیگری نیز می‌توان محاسبه کرد. طبق رابطه (۳) خواهیم داشت:

$$\left(\frac{\mu}{\rho}\right)_{شیشه} = \Sigma_{i=1}^{i=n} w_i \left(\frac{\mu}{\rho}\right)_i \quad (۵)$$

در این رابطه $\left(\frac{\mu}{\rho}\right)_i$ و w_i به‌ترتیب ضریب تضعیف جرمی و کسروزنی عنصر iام در ترکیب شیشه می‌باشند که $\Sigma_{i=1}^{i=n} w_i = 1$. در طرف چپ رابطه (۵)، ρ همان چگالی شیشه است.

عدد اتمی مؤثر (Z_{eff})

این کمیت طبق رابطه (۶) محاسبه می‌گردد:

[Downloaded from jicers.ir on 2025-12-11]

[DOR: 20.1001.1.17353351.1403.20.2.1.5]

$$Z_{eff} = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} f_i A_i \left(\frac{\mu}{\rho}\right)_i}{\sum_{j=1}^{j=n} f_j \frac{A_j}{Z_j} \left(\frac{\mu}{\rho}\right)_j} \quad (۶)$$

که در این رابطه A_j، Z_j، f_j و $\left(\frac{\mu}{\rho}\right)_j$ به ترتیب وزن اتمی، عدد اتمی، کسر مولی و ضریب تضعیف جرمی عنصر jام می‌باشد.

چگالی الکترونی مؤثر (N_{eff})

این متغیر طبق رابطه (۷) محاسبه می‌گردد:

$$N_{eff} = N_A \frac{Z_{eff}}{\sum_{i=1}^{i=n} f_i A_i} \quad (۷)$$

که تنها مجهول این رابطه، N_A می‌باشد که برابر است با عدد آووگادرو ($\frac{6.022\times10^{23}}{mol}$) است.

لایه نیم‌مقدار (cm) و لایه یک‌دهم مقدار(cm)

این دو کمیت، مقدار ضخامتی از ماده هستند که شدت پرتو گاما، پس از عبور از این ضخامت از ماده، به ۰/۵ و ۰/۱ مقدار اولیه تقلیل می‌یابد. اگر در رابطه (۲) به جای $\frac{I}{I_0}$ مقدار ۰/۵ را قرار دهیم و معادله را حل نماییم در این صورت t که همان ضخامت لایه است برابر است با:

$$HVL = t_{\frac{1}{2}} = \frac{Ln2}{\mu} = \frac{0.693}{\mu} (cm) \quad (۸)$$

و اگر در رابطه (۲) به جای $\frac{I}{I_0}$ مقدار ۰/۱ را قرار دهیم و معادله را حل نماییم در این صورت t که همان ضخامت لایه است برابر است با:

$$TVL = t_{\frac{1}{10}} = \frac{Ln10}{\mu} = \frac{2.303}{\mu} (cm) \quad (۹)$$

مسیر آزاد میانگین (cm)

مسیر آزاد میانگین، مسافتی است که پرتو گاما به‌صورت میانگین در داخل ماده طی می‌کند تا اولین برخورد را انجام دهد. که می‌توان آن را با استفاده از رابطه (۱۰) محاسبه نمود:

$$MFP = \frac{1}{\mu} (cm) \quad (۱۰)$$

که در آن μ همان ضریب تضعیف خطی ماده می‌باشد.

سطح مقطع اتمی کل ($\frac{cm^2}{atom}$) و سطح مقطع الکترونیکی کل ($\frac{cm^2}{electron}$)

سطح مقطع اتمی کل (σ_a) و سطح مقطع الکترونیکی کل (σ_e) به‌ترتیب طبق روابط (۱۱) و (۱۲) به دست می‌آیند:

$$\sigma_a = \frac{\frac{\mu}{\rho}}{N_A \sum_{i=1}^{i=n} \frac{w_i}{A_i}} (\frac{cm^2}{atom}) \quad (۱۱)$$

$$\sigma_e = \frac{1}{N_A} \sum_{i=1}^{i=n} \frac{f_i A_i}{Z_i} \left(\frac{\mu}{\rho}\right)_i (\frac{cm^2}{electron}) \quad (۱۲)$$

در رابطه (۱۱)، A_i، w_i، N_A و $\frac{\mu}{\rho}$ به‌ترتیب وزن اتمی و کسر وزنی عنصر iام، عدد آووگادرو و ضریب تضعیف جرمی شیشه می‌باشند. درصد وزنی عناصر در جدول ۱ پیوست آورده شده است که با تقسیم آن بر ۱۰۰ کسر وزنی عناصر به دست می‌آید.

در رابطه (۱۲) Z_i، f_i و $\left(\frac{\mu}{\rho}\right)_i$ به‌ترتیب عدد اتمی، کسر مولی و ضریب تضعیف جرمی عنصر iام می‌باشند.

۴- نتایج و بحث

در جدول ۲ ضریب تضعیف جرمی محاسبه‌شده توسط ابزار مونت‌کارلویی جینت-۴ و برنامه Phy-x برای ترکیبات شیشه‌ای P1 تا P6 در محدوده انرژی ۰/۰۱۵ تا ۱۵ مگاالکترون‌ولت آورده شده است. مقایسه کمی نتایج این دو برنامه با نماد RD% که نماد درصد انحراف از معیار می‌باشد، که در این جدول نشان داده می‌شود. لازم به توضیح است که رابطه درصد انحراف از معیار به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

$$RD\% = \left|\frac{X_{Phy-x} - X_{Geant}}{X_{Phy-x}}\right| \times 100 \quad (۱)$$

مقادیر RD% برای ترکیبات شیشه‌ای P1 تا P6 به‌ترتیب در محدوده‌های، (۰/۰۱۹۵۲۸۱۳۴ تا ۰/۸۸۷۳۰۹۳۱۵)، (۰/۰۱۳۶۱۵۱۹۶ تا ۰/۹۹۲۹۵۲۸۰۵)، (۰/۰۴۳۷۱۵۰۹ تا ۱/۰۸۰۳۳۵۸۹۴)، (۰/۴۷۹۴۲۶۳۴ تا ۱/۱۴۰۴۳۴۱۵)، (۰/۰۰۷۳۶۱۳۹۹ تا ۱/۱۸۴۴۷۹۷۳۱)

[Downloaded from jicers.ir on 2025-12-11]

[DOR: 20.1001.1.17353351.1403.20.2.1.5]

و (۰/۰۰۱۷۴۶۷۴۵ تا ۱/۲۱۷۸۴۹۲۴۳)، قرار دارند که حتی از ۱/۲۲ هم فراتر نمی‌رود. مقایسه نتایج خود با داده‌های محاسبه‌شده در مرجع [۱۵]، نشان می‌دهد که داده‌های حاصل از شبیه‌سازی جینت-۴، مطابقت خوبی با نتایج معیار دارد. با توجه به شکل ۳ که به مقایسه ضریب تضعیف جرمی P1 تا P6 در محدوده انرژی ۰,۰۱۵ تا ۱۵ مگاالکترون‌ولت پرداخته است، مشاهده می‌شود که با افزایش انرژی گاما، ضریب تضعیف جرمی کاهش می‌یابد. همچنین، با افزایش اکسید بیسموت در داخل نمونه‌ها از ۵ درصد مولی تا ۳۰ درصد مولی، ضریب تضعیف جرمی در این محدوده از انرژی‌ها افزایش یافته است. در انرژی ۰/۰۱۵ مگاالکترون‌ولت، ضریب تضعیف جرمی از مقدار $\left(\frac{cm^2}{g}\right)$ ۴۵/۵۶۶۴ در P1 تا مقدار $\left(\frac{cm^2}{g}\right)$ ۷۶/۴۴۰۵ در P6 افزایش می‌یابد که نشان می‌دهد با افزودن مواد با عدد اتمی بالاتر در یک ترکیب، قدرت جذب گاما ترکیب افزایش‌یافته و ضریب تضعیف جرمی آن بیش‌تر می‌شود.

جدول ۲: مقادیر ضرایب تضعیف جرمی محاسبه‌شده با دو روش در انرژی‌های مختلف فوتون برای شیشه‌های منتخب

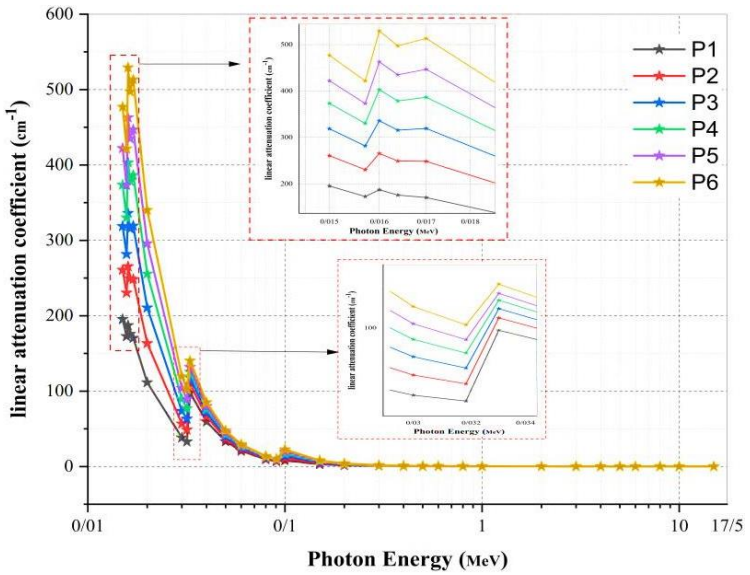
Energy (MeV)	P1			P2			P3		
	Our Work (Geant4)	Phy-X	RD٪	Our Work (Geant4)	Phy-X	RD٪	Our Work (Geant4)	Phy-X	RD٪
۰/۰۱۵	۴۵/۵۶۶۴	۴۵/۵۷۷۴	۰/۰۲۴۰۶۹۹۲	۵۴/۲۲۲	۵۴/۲۴۱۸	۰/۰۳۶۴۸۴۱	۶۱/۲۹۷۷	۶۱/۳۲۴۵	۰/۰۴۳۷۱۵۱
۰/۰۱۵۷۱۱	۴۰/۷۰۲	–	–	۴۷/۹۲۴	–	–	۵۴/۱۸۰۶	–	–
۰/۰۱۶	۴۳/۶۶۲	–	–	۵۵/۲۰۵۸	–	–	۶۴/۶۴۲۴	–	–
۰/۰۱۶۳۸۸	۴۰/۹۷۲۹	–	–	۵۱/۸۲۷۴	–	–	۶۰/۷۰۰۵	–	–
۰/۰۱۷	۳۹/۷۴۵۸	–	–	۵۱/۶۶۸۳	–	–	۶۱/۴۱۴۵	–	–
۰/۰۲	۲۵/۹۹۴۳	۲۶/۰۶۸۶	۰/۲۸۵۱۲۵۶۵	۳۳/۹۹۱۹	۳۴/۰۹۵۴	۰/۳۰۳۶۴۸۴	۴۰/۵۲۹۵	۴۰/۶۵۶۹	۰/۳۱۳۴۲۵۵
۰/۰۳	۸/۹۳۷۳۸	۸/۹۹۳۸۱	۰/۶۲۷۴۳۸۵۶	۱۱/۸۰۷۶	۱۱/۸۴۸۳	۰/۳۴۳۱۰۱	۱۴/۱۵۳۸	۱۴/۱۸۱۶	۰/۱۹۶۱۰۲۵
۰/۰۳۱۸۱۴	۷/۶۸۲۶۵	–	–	۱۰/۱۵۱۵	–	–	۱۲/۱۶۹۷	–	–
۰/۰۳۳	۲۲/۸۲۱۵	–	–	۲۲/۷۲۷۶	–	–	۲۲/۶۵۰۹	–	–
۰/۰۴	۱۳/۸۸۳۴	۱۳/۹۰۱۷	۰/۱۳۱۴۸۶۷۲	۱۳/۸۱۷	۱۳/۸۳۳۲	۰/۱۱۷۴۲۵۴	۱۳/۷۶۲۸	۱۳/۷۷۷۳	۰/۱۰۵۲۵۶۸
۰/۰۵	۷/۷۵۰۸۵	۷/۷۴۱۷۶	۰/۱۱۷۴۲۸۳۴	۷/۷۱۹۹۹	۷/۷۱۱۵۲	۰/۱۰۹۷۹۵۹	۷/۶۹۴۷۹	۷/۶۸۶۸۱	۰/۱۰۳۸۵۶۵
۰/۰۶	۴/۸۰۲۶۵	۴/۷۸۸۹۴	۰/۲۸۶۳۱۹۳۵	۴/۷۸۶۹۲	۴/۷۷۷۷۹	۰/۱۹۱۰۹۸۲	۴/۷۷۴۰۸	۴/۷۶۸۶۸	۰/۱۱۳۳۱۶۳
۰/۰۸	۲/۲۵۰۶۴	۲/۲۵۱۳۶	۰/۰۳۱۸۶۱۸۱	۲/۲۴۸۶۴	۲/۲۵۵۴۸	۰/۳۰۳۲۶۸۷	۲/۲۴۷	۲/۲۵۸۸۵	۰/۵۲۴۶۱۹۸
۰/۰۹۰۵۲۴	۱/۶۴۱۰۶	–	–	۱/۶۴۴۰۱	–	–	۱/۶۴۶۴۳	–	–
۰/۱	۱/۸۷۲۵۷	۱/۸۷۱۵۲	۰/۰۵۶۱۱۰۱۵	۲/۳۵۷۵۶	۲/۳۵۷۸۸	۰/۰۱۳۶۱۵۲	۲/۷۵۴۰۲	۲/۷۵۵۴۶	۰/۰۵۲۱۲۶۷
۰/۱۵	۰/۷۰۰۰۲	۰/۶۹۹۸۸	۰/۰۱۹۵۲۸۱۳	۰/۸۷۴۲۸	۰/۸۷۴۵۷	۰/۰۳۲۸۶۴۶	۱/۰۱۶۷۴	۱/۰۱۷۳۷	۰/۰۶۱۷۰۸۶
۰/۲	۰/۳۷۵۷۳	۰/۳۷۵۲۱	۰/۱۳۸۸۷۴۳۸	۰/۴۵۹۳۱	۰/۴۵۸۶۲	۰/۱۴۸۹۴۹۸	۰/۵۲۷۶۲۵	۰/۵۲۶۸۱	۰/۱۵۵۱۰۸۲
۰/۳	۰/۱۸۶۱۵	۰/۱۸۴۵۷	۰/۸۵۵۷۱۳۱۹	۰/۲۱۶۲۵	۰/۲۱۴۱۳	۰/۹۹۲۹۵۲۸	۰/۲۴۰۸۶	۰/۲۳۸۲۹	۱/۰۸۰۳۳۵۹
۰/۴	۰/۱۲۷۳۹	۰/۱۲۷۲	۰/۱۵۳۷۰۴۴۳	۰/۱۴۱۸۱	۰/۱۴۱۵۵	۰/۱۸۲۶۶۸۹	۰/۱۵۳۶۰۲	۰/۱۵۳۲۹	۰/۲۰۲۱۵۴۹
۰/۶	۰/۱۰۱۷۷	۰/۱۰۱۳۸	۰/۳۸۵۱۹۴۵۳	۰/۱۱۰۰۸	۰/۱۰۹۶۸	۰/۳۶۵۹۱۱۵	۰/۱۱۶۸۶۸	۰/۱۱۶۴۶	۰/۳۵۳۲۸۰۵
۰/۸	۰/۰۸۷۲۳	۰/۰۸۶۷۵	۰/۵۵۱۴۵۸۵۷	۰/۰۹۲۵۶	۰/۰۹۲۰۸	۰/۵۱۵۸۰۵۷	۰/۰۹۶۹۱۶	۰/۰۹۶۴۴	۰/۴۸۹۵۲۱۶
۱	۰/۰۷۰۸۸	۰/۰۷۰۲۶	۰/۸۸۷۳۰۹۳۱	۰/۰۷۳۵۷	۰/۰۷۲۹۳	۰/۸۷۸۲۶۷۷	۰/۰۷۵۷۷۳	۰/۰۷۵۱۲	۰/۸۷۱۳۳۲۱
۲	۰/۰۶۱۲۱	۰/۰۶۰۷	۰/۸۳۲۸۷۹۹۷	۰/۰۶۲۷۸	۰/۰۶۲۲۷	۰/۸۳۱۳۸۲۸	۰/۰۶۴۰۷	۰/۰۶۳۵۴	۰/۸۳۰۱۱۲۴
۳	۰/۰۴۲۲۷	۰/۰۴۲۱۷	۰/۲۵۰۵۷۹۲۲	۰/۰۴۲۸۷	۰/۰۴۲۷۹	۰/۱۹۷۳۵۷۵	۰/۰۴۳۳۶۶	۰/۰۴۳۳	۰/۱۵۴۹۷۹۹
۴	۰/۰۳۶۷۸	۰/۰۳۶۸۵	۰/۱۸۲۵۲۶۳۴	۰/۰۳۷۵۴	۰/۰۳۷۶۲	۰/۲۱۵۸۸۴۸	۰/۰۳۸۱۶۲	۰/۰۳۸۲۵	۰/۲۴۱۹۰۲
۵	۰/۰۳۴۶۵	۰/۰۳۴۷۲	۰/۲۰۱۴۸۲۴۴	۰/۰۳۵۶۳	۰/۰۳۵۶۸	۰/۱۴۶۲۵۲۹	۰/۰۳۶۴۳۱	۰/۰۳۶۴۷	۰/۱۰۳۳۲۰۲
۶	۰/۰۳۳۸۳	۰/۰۳۳۸۶	۰/۱۰۶۵۴۲۲۶	۰/۰۳۵۰۲	۰/۰۳۵۰۱	۰/۰۲۹۶۷۹۳	۰/۰۳۵۹۸۷	۰/۰۳۵۹۴	۰/۱۳۴۸۲۹۶
۸	۰/۰۳۳۶۳	۰/۰۳۳۶۲	۰/۰۵۱۶۷۶۳۹	۰/۰۳۵	۰/۰۳۴۹۲	۰/۲۴۱۱۹۴۹	۰/۰۳۶۱۲۴	۰/۰۳۵۹۸	۰/۳۸۶۱۳۴۷
۱۰	۰/۰۳۴۰۷	۰/۰۳۴۰۲	۰/۱۶۲۹۹۱۰۵	۰/۰۳۵۷۵	۰/۰۳۵۶	۰/۴۱۷۱۱۵۲	۰/۰۳۷۱۱۶	۰/۰۳۶۸۹	۰/۶۰۸۶۱۵۴
۱۵	۰/۰۳۴۹۴	۰/۰۳۴۹۳	۰/۰۳۶۴۱۶۹۲	۰/۰۳۶۸۶	۰/۰۳۶۷۵	۰/۳۱۰۸۷۲۲	۰/۰۳۸۴۳۲	۰/۰۳۸۲۴	۰/۵۱۵۸۳۸

Energy (MeV)	P4			P5			P6		
	Our Work (Geant4)	Phy-X	RD٪	Our Work (Geant4)	Phy-X	RD٪	Our Work (Geant4)	Phy-X	RD٪
۰/۰۱۵	۶۷/۱۸۹۷	۶۷/۲۲۲۴	۰/۰۴۸۶۶۲۲۶	۷۲/۱۷۲۲	۷۲/۲۰۹۸۵۲۳	۰/۰۵۲۱۴۲۸۲	۷۶/۴۴۰۵	۷۶/۴۸۲۵	۰/۰۵۴۹۷۴۴۶۱

[Downloaded from jicers.ir on 2025-12-11]

[DOR: 20.1001.1.17353351.1403.20.2.1.5]

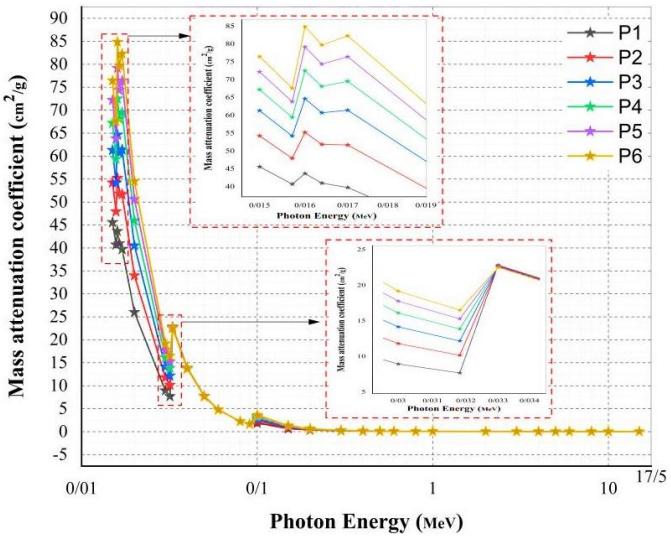
۰/۰۱۵۷۱۱	۵۹/۳۹۰۶	–	–	۶۳/۷۹۶۴	–	–	۶۷/۵۷۰۶	–	–
۰/۰۱۶	۷۲/۵۰۰۳	–	–	۷۹/۱۴۵۳	–	–	۸۴/۸۳۷۸	–	–
۰/۰۱۶۳۸۸	۶۸/۰۸۹۳	–	–	۷۴/۳۳۷۵	–	–	۷۹/۶۹۰۱	–	–
۰/۰۱۷	۶۹/۵۳۰۲	–	–	۷۶/۳۹۳۲	–	–	۸۲/۲۷۲۵	–	–
۰/۰۲	۴۵/۹۷۳۴	۴۶/۱۲۰۸	۰/۳۱۹۶۰۵۲۲	۵۰/۵۷۷۱	۵۰/۷۴۱۲۱۷۵	۰/۳۲۳۴۴۰۲۵	۵۴/۵۲۰۸	۵۴/۶۹۹۵	۰/۳۲۶۶۶۱۷۳۶
۰/۰۳	۱۶/۱۰۷۵	۱۶/۱۲۴۶	۰/۱۰۶۲۹۳۷	۱۷/۷۵۹۷	۱۷/۷۶۷۷۲۱۷	۰/۰۴۵۱۴۷۶۷	۱۹/۱۷۵	۱۹/۱۷۵۳	۰/۰۰۱۷۴۶۷۴۵
۰/۰۳۱۸۱۴	۱۳/۸۵۰۳	–	–	۱۵/۲۷۱۵	–	–	۱۶/۴۸۸۹	–	–
۰/۰۳۳	۲۲/۵۸۷	–	–	۲۲/۵۳۲۹	–	–	۲۲/۴۸۶۶	–	–
۰/۰۴	۱۳/۷۱۷۶	۱۳/۷۳۰۷	۰/۰۹۵۵۳۳۹۸	۱۳/۶۷۹۴	۱۳/۶۹۱۳۲۴۷	۰/۰۸۷۰۹۶۵	۱۳/۶۴۶۷	۱۳/۶۵۷۶	۰/۰۷۹۶۴۲۱۵۷
۰/۰۵	۷/۶۷۳۷۹	۷/۶۶۶۲۳	۰/۰۹۸۶۷۸۹۹	۷/۶۵۶۰۳	۷/۶۴۸۸۲۰۵۵	۰/۰۹۴۲۵۵۶۷	۷/۶۴۰۸۲	۷/۶۳۳۹۱	۰/۰۹۰۵۱۳۴۴۱
۰/۰۶	۴/۷۶۳۳۷	۴/۷۶۱۰۹	۰/۰۴۷۹۴۲۶۳	۴/۷۵۴۳۲	۴/۷۵۴۶۷۰۰۱	۰/۰۰۷۳۶۱۴	۴/۷۴۶۵۷	۴/۷۴۹۱۷	۰/۰۵۴۷۹۴۴۸
۰/۰۸	۲/۲۴۵۶۴	۲/۲۶۱۶۶	۰/۷۰۸۱۸۹۲۸	۲/۲۴۴۴۹	۲/۲۶۴۰۳۰۰۱	۰/۸۶۳۰۶۳۴	۲/۲۴۳۵۱	۲/۲۶۶۰۶	۰/۹۹۵۲۵۵۳۹۳
۰/۰۹۰۵۲۴	۱/۶۴۸۴۵	–	–	۱/۶۵۰۱۵	–	–	۱/۶۵۱۶۱	–	–
۰/۱	۳/۰۸۴۱۶	۳/۰۸۶۵۲	۰/۰۷۶۵۹۹۱۵	۳/۳۶۳۳۳	۳/۳۶۶۴۸۴۹۹	۰/۰۹۳۷۱۷۵۴	۳/۶۰۲۴۹	۳/۶۰۶۳۲	۰/۱۰۶۳۳۳۷۰۷
۰/۱۵	۱/۱۳۵۳۶	۱/۱۳۶۲۸	۰/۰۸۰۹۰۹	۱/۲۳۵۶۷	۱/۲۳۶۸۳۴۴۴	۰/۰۹۴۱۴۶۹۱	۱/۳۲۱۶۱	۱/۳۲۲۹۸	۰/۱۰۳۴۸۲۲۷۲
۰/۲	۰/۵۸۴۵۱	۰/۵۸۳۵۹	۰/۱۵۸۸۹۳۲۹	۰/۶۳۲۶۲۲	۰/۶۳۱۶۰۰۵۷	۰/۱۶۱۷۲۰۵۶	۰/۶۷۳۸۳۴	۰/۶۷۲۷۳	۰/۱۶۳۵۷۲۷
۰/۳	۰/۲۶۱۳۵	۰/۲۵۸۴	۱/۱۴۰۴۳۴۱۵	۰/۲۷۸۶۷۹	۰/۲۷۵۴۱۶۷۴	۱/۱۸۴۴۷۹۷۳	۰/۲۹۳۵۲۳	۰/۲۸۹۹۹	۱/۲۱۷۸۴۹۲۴۳
۰/۴	۰/۱۶۳۴۲	۰/۱۶۳۰۷	۰/۲۱۶۲۹۷۵۸	۰/۱۷۱۷۲	۰/۱۷۱۳۳۱۶۲	۰/۲۲۶۶۸۱۰۴	۰/۱۷۸۸۳۲	۰/۱۷۸۴۱	۰/۲۳۵۱۵۳۶۰۷
۰/۶	۰/۱۲۲۵۲	۰/۱۲۲۱	۰/۳۴۳۰۲۶۴۳	۰/۱۲۷۳۰۴	۰/۱۲۶۸۷۸۰۶	۰/۳۳۵۷۰۷۴۶	۰/۱۳۱۴	۰/۱۳۰۹۷	۰/۳۲۹۳۳۱۲۷۴
۰/۸	۰/۱۰۰۵۴	۰/۱۰۰۰۷	۰/۴۶۹۲۹۷۵۲	۰/۱۰۳۶۱۱	۰/۱۰۳۱۴۲۸۸	۰/۴۵۳۸۵۳۳۷	۰/۱۰۶۲۳۹	۰/۱۰۵۷۷	۰/۴۴۱۰۲۶۲۶۷
۱	۰/۰۷۷۶۱	۰/۰۷۶۹۴	۰/۸۶۵۷۹۹۳۵	۰/۰۷۹۱۵۶	۰/۰۷۸۴۷۹۵۴	۰/۸۶۱۴۴۸۱۸	۰/۰۸۰۴۸۳	۰/۰۷۹۸	۰/۸۵۷۷۲۹۷۹۶
۲	۰/۰۶۵۱۴	۰/۰۶۴۶۱	۰/۸۲۹۱۳۲۵۲	۰/۰۶۶۰۴۷	۰/۰۶۵۵۰۴۵۱	۰/۸۲۸۴۷۰۳۳	۰/۰۶۶۸۲۳	۰/۰۶۶۲۷	۰/۸۲۷۶۹۴۸۸۷
۳	۰/۰۴۳۷۸	۰/۰۴۳۷۲	۰/۱۲۰۴۸۹۹۹	۰/۰۴۴۱۲۳	۰/۰۴۴۰۸۲۲۵	۰/۰۹۱۷۵۴۱	۰/۰۴۴۴۲	۰/۰۴۴۳۹	۰/۰۶۷۶۳۳۴۱۲
۴	۰/۰۳۸۶۸	۰/۰۳۸۷۸	۰/۲۶۳۰۸۹۹۸	۰/۰۳۹۱۱۹	۰/۰۳۹۲۲۸۹۵	۰/۲۸۰۵۳۵۹	۰/۰۳۹۴۹۴	۰/۰۳۹۶۱	۰/۲۹۵۱۳۷۴۹۳
۵	۰/۰۳۷۱	۰/۰۳۷۱۳	۰/۰۶۹۲۴۵۱۷	۰/۰۳۷۶۶۵	۰/۰۳۷۶۸۰۵	۰/۰۴۱۱۴۰۸۴	۰/۰۳۸۱۴۹	۰/۰۳۸۱۶	۰/۰۱۷۶۸۱۰۱۵
۶	۰/۰۳۶۸	۰/۰۳۶۷۱	۰/۲۱۸۳۰۷۲۱	۰/۰۳۷۴۷۹	۰/۰۳۷۳۷۱۶۵	۰/۲۸۵۹۰۵۰۵	۰/۰۳۸۰۶۴	۰/۰۳۷۹۳	۰/۳۴۲۳۵۴۳۲
۸	۰/۰۳۷۰۶	۰/۰۳۶۸۷	۰/۵۰۰۲۷۴۸۵	۰/۰۳۷۸۴۵	۰/۰۳۷۶۲۱۷	۰/۵۹۲۷۲۹۸۵	۰/۰۳۸۵۲	۰/۰۳۸۲۶	۰/۶۶۸۸۲۷۰۲۹
۱۰	۰/۰۳۸۲۶	۰/۰۳۷۹۷	۰/۷۵۸۰۶۷۳۳	۰/۰۳۹۲۱۹	۰/۰۳۸۸۷۷۸۱	۰/۸۷۷۸۶۵۴۵	۰/۰۴۰۰۴۵	۰/۰۳۹۶۶	۰/۹۷۶۱۷۵۶۳۴
۱۵	۰/۰۳۹۷۴	۰/۰۳۹۴۷	۰/۶۷۴۷۴۱۷۳	۰/۰۴۰۸۴۳	۰/۰۴۰۵۱۸۲۹	۰/۸۰۱۶۳۹۶۶	۰/۰۴۱۷۸۹	۰/۰۴۱۴۱	۰/۹۰۵۲۵۲۰۹۹



شکل ۲: تغییرات مقادیر ضریب تضعیف خطی کل برای شیشه‌های منتخب برحسب انرژی فوتون‌های فرودی

[Downloaded from jicers.ir on 2025-12-11]

[DOR: 20.1001.1.17353351.1403.20.2.1.5]

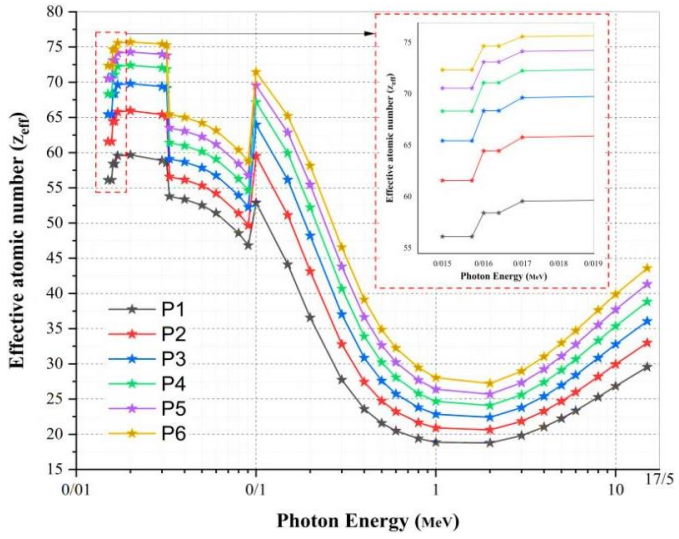


شکل ۳: تغییرات مقادیر ضریب تضعیف جرمی کل برای شیشه‌های منتخب برحسب انرژی فوتون‌های فرودی

در میان نمونه‌های P1 تا P6، نمونه P1، به دلیل داشتن کم‌ترین چگالی، قدرت تضعیف فوتون کم‌تری دارد. بیش‌ترین ضریب تضعیف جرمی مربوط به بازه انرژی ۰/۰۱۵ تا ۰/۰۴ مگاالکترون‌ولت است که به دلیل برجسته‌بودن جذب فوتوالکتریک در این ناحیه انرژی می‌باشد. این بدان معناست که با افزایش انرژی فوتون فرودی، کاهش در تضعیف رخ می‌دهد که منجر به نفوذ بیش‌تر پرتوهای گاما در شیشه‌ها می‌شود. به‌علاوه، مقادیر ضریب تضعیف جرمی برای همه نمونه‌ها با افزایش انرژی فوتون تا ۰/۸ مگاالکترون‌ولت (تأثیر اثر فوتوالکتریک) به سرعت کاهش می‌یابد. سپس، آن‌ها در محدوده انرژی ۱ تا ۴ مگاالکترون‌ولت، تقریباً ثابت هستند (مستقل از انرژی فوتون) که در آن فرآیند پراکندگی کامپتون غالب است. پس از آن، مقادیر این کمیت کمی افزایش می‌یابد که می‌تواند به دلیل فرآیند تولید زوج (هسته‌ای و الکتریکی) باشد. با کمی دقت در شکل ۳ متوجه خواهیم شد که مقادیر ضریب تضعیف جرمی در چهار قسمت دارای یک جهش کوچکی هستند. این چهار نقطه در محدوده‌های انرژی (۰/۰۱۵۷۱۱)، (۰/۰۱۶۳۸۸)، (۰/۰۳۱۸۱۴) و (۰/۰۹۰۵۲۴) مگاالکترون‌ولت قرار دارند که به‌ترتیب مربوط به جذب لبه L1 عنصر بیسموت، جذب لبه L2 عنصر بیسموت، جذب لبه K عنصر تلوریم، و جذب لبه K عنصر بیسموت می‌باشند. در تغییر انرژی از ۰/۰۱۵۷۱۱ تا ۰/۰۱۶ مگاالکترون‌ولت برای تمام نمونه‌ها روند کاهشی مقادیر ضریب تضعیف جرمی افزایشی می‌شود و در تغییر انرژی از ۰/۰۱۶۳۸۸ تا ۰/۰۱۷ مگاالکترون‌ولت برای نمونه‌های P1 و P2 شیب نمودار کاهش می‌یابد و برای نمونه‌هایP3 تا P6 روند کاهشی افزایشی می‌شود. این رفتار نشان می‌دهد، در نمونه‌های P1 و P2 به دلیل مقدار کم عنصر بیسموت در ترکیب شیشه جذب لبه L2 عنصر بیسموت مشهود نیست. در تغییر انرژی از ۰/۰۳۱۸۱۴ تا ۰/۰۳۳ مگاالکترون‌ولت، برای تمام نمونه‌ها روند کاهشی مقادیر ضریب تضعیف جرمی افزایشی می‌شود که به دلیل غلبه جذب لبه K عنصر تلوریم می‌باشد. در تغییر انرژی از ۰/۰۹۰۵۲۴ تا ۰/۱ مگاالکترون‌ولت، جذب لبه K عنصر بیسموت در تمام نمونه‌ها باعث تغییر روند کاهشی مقادیر ضریب تضعیف جرمی به افزایشی می‌شود. شکل ۴ تغییرات عدد اتمی مؤثر در محدوده انرژی ۰/۰۱۵ تا ۱۵ مگاالکترون‌ولت برای شیشه‌های P1 تا P6 را نشان می‌دهد. در این شکل مشاهده می‌شود که مقادیر عدد اتمی مؤثر، با انرژی فوتون و هم با افزایش محتوای اکسید بیسموت در ترکیب شیشه تغییر می‌کند. روند تغییرات عدد اتمی مؤثر در شکل ۴ بدین صورت است که برای همه نمونه‌ها، در محدوده‌های انرژی (۰/۰۲)، (۰/۰۴) و (۰/۱) مگاالکترون‌ولت، به‌ترتیب افزایش، کاهش و افزایش ناگهانی مشاهده می‌شود و در نهایت یک روند پیوسته کاهشی افزایشی با شیب ملایم در عدداتمی مؤثر را شاهد خواهیم بود. نکته‌ای که در اینجا قابل ذکر است این است که مقادیر ضریب تضعیف جرمی هر عنصری در ترکیبات شیشه در هر انرژی نقش برجسته داشته باشد، Z آن عنصر نیز در محاسبه عدد اتمی مؤثر در آن انرژی، مؤثرتر خواهد بود. با توجه به این مطالب، در محدوده انرژی ۰/۰۱۵ تا ۰/۰۳ مگاالکترون‌ولت به دلیل افزایش درصد مشارکت مقادیر ضریب تضعیف جرمی عنصر بیسموت، که حدود ۲ برابر عنصر تلوریم و همچنین ۱۰۰۰ تا ۱۰۰۰۰ برابر عناصر اکسیژن و بور می‌باشد، Z عنصر بیسموت بیش‌ترین تأثیر را در محاسبه عدد اتمی مؤثر از خود نشان می‌دهد. در محدوده

[DOR: 20.1001.1.17353351.1403.20.2.1.5]
[Downloaded from jicers.ir on 2025-12-11]

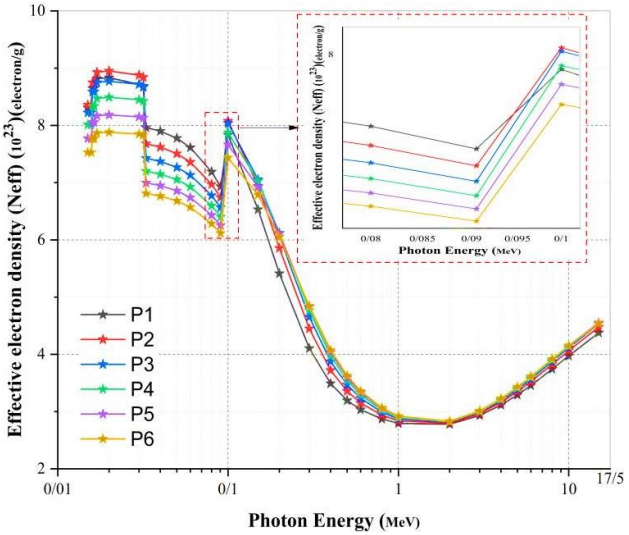
انرژی ۱ مگاالکترون‌ولت تناسب مقادیر ضریب تضعیف جرمی عناصر ترکیبات به هم می‌خورد. در این انرژی درصد مشارکت مقادیر ضریب تضعیف جرمی عنصر بیسموت که تقریباً ۲ برابر عنصر تلوریم و ۳ برابر عنصر اکسیژن است کاهش می‌یابد. با واردشدن تأثیر Z عناصر تلوریم و اکسیژن در محاسبه عدد اتمی مؤثر، میزان آن به‌طور چشمگیری کاهش می‌یابد. همان‌طور که در بالاتر اشاره گردید، سه جهش در شکل ۴ مشاهده می‌شود. یکی در انرژی حدود ۰/۰۲ مگاالکترون‌ولت، یکی در انرژی حدود ۰/۰۴ مگاالکترون‌ولت و دیگری در انرژی حدود ۰/۱ مگاالکترون‌ولت که به تفسیر آن می‌پردازیم. دو لبه جذب L برای عنصر بیسموت وجود دارد یکی L1 در ۱۵,۷۱۱ کیلوالکترون‌ولت و دیگری L2 در ۱۶,۳۸۸ کیلوالکترون‌ولت که اثرات جذب این لبه‌ها باعث افزایش مقادیر عدد اتمی مؤثر در حرکت از انرژی ۰/۰۱۵ مگاالکترون‌ولت به سمت انرژی ۰/۰۲ مگاالکترون‌ولت می‌شود. با توجه به اینکه جذب لبه K عنصر تلوریم در انرژی حدود ۰/۰۴ مگاالکترون‌ولت رخ می‌دهد، در حرکت از انرژی۰/۰۳ مگاالکترون‌ولت به سمت انرژی ۰/۰۴ مگاالکترون‌ولت، تأثیر عنصر تلوریم افزایش می‌یابد. در نتیجه با افزایش اثر Z تلوریم در محاسبه عدد اتمی مؤثر، مقدار این متغیر کاهش می‌یابد در نهایت، با توجه به اینکه جذب لبه K عنصر بیسموت در انرژی حدود ۰/۱ مگاالکترون‌ولت رخ می‌دهد، در حرکت از انرژی ۰/۰۸ مگاالکترون‌ولت به سمت انرژی ۰/۱ مگاالکترون‌ولت، تأثیر عنصر بیسموت افزایش می‌یابد. در نتیجه، با افزایش اثر Z بیسموت در محاسبه عدد اتمی مؤثر، مقدار این متغیر افزایش می‌یابد. برای همه نمونه‌ها حداکثر مقدار عدد اتمی مؤثر در بازه انرژی ۰/۰۱۵ تا ۰/۰۳ مگاالکترون‌ولت رخ می‌دهد که به‌دلیل اثر جذب فوتوالکتریک است. همچنین در بازه انرژی ۰/۱ تا ۰/۸ مگاالکترون‌ولت، مقادیر عدد اتمی مؤثر به سرعت کاهش می‌یابد که به دلیل کاهش اثر جذب فوتوالکتریک با افزایش انرژی می‌باشد. در بازه انرژی ۰/۸ تا ۲ مگاالکترون‌ولت، به دلیل برجسته‌شدن اثر پراکندگی کامپتون، مقادیر عدد اتمی مؤثر تقریباً ثابت باقی می‌ماند و تغییرات آن قابل چشم‌پوشی است که این مقادیر در انرژی ۱/۵ مگاالکترون‌ولت به حداقل مقدار خود می‌رسد. از انرژی ۲ مگاالکترون‌ولت به بالا، افزایش مقادیر عدد اتمی مؤثر با شیب ملایم رخ می‌دهد. که به‌دلیل اضافه‌شدن اثر تولید زوج در انرژی‌های بالا است. تغییرات سطح مقطع‌های جذب فوتوالکتریک، پراکندگی کامپتون و تولید زوج برحسب انرژی به‌ترتیب متناسب است با روابط $E^{-3.5}$ ، E^{-1} و Log E. و همچنین تغییرات این سطح مقطع‌ها برحسب عدد اتمی به‌ترتیب متناسب است با روابط، Z^{4-5}، Z و Z^2. بیش‌ترین مقدار عدد اتمی مؤثر مربوط به نمونه P6 با مقدار ۷۵/۷۱۲۶ در انرژی ۰/۰۲ مگاالکترون‌ولت می‌باشد. معمولاً برای اینکه یک شیشه به‌عنوان حفاظ پرتو گاما در نظر گرفته شود باید مقدار عدد اتمی مؤثر بزرگی داشته باشد. زمانی که فوتون‌ها با تعداد الکترون‌های بیش‌تری مواجه شوند احتمال اندرکنش آن‌ها با الکترون‌ها و در نتیجه جذب فوتوالکتریک آن‌ها افزایش می‌یابد، به‌طوری که نمونه P6 یک جاذب خیلی خوب در مقایسه با سایر نمونه‌ها می‌باشد. شکل ۵ تغییرات چگالی الکترونی مؤثر برحسب انرژی در محدوده انرژی ۰/۰۱۵ تا ۱۵ مگاالکترون‌ولت را نشان می‌دهد.



شکل ۴: تغییرات مقادیر عدد اتمی مؤثر برای شیشه‌های منتخب برحسب انرژی فوتون‌های فرودی

[Downloaded from jicers.ir on 2025-12-11]

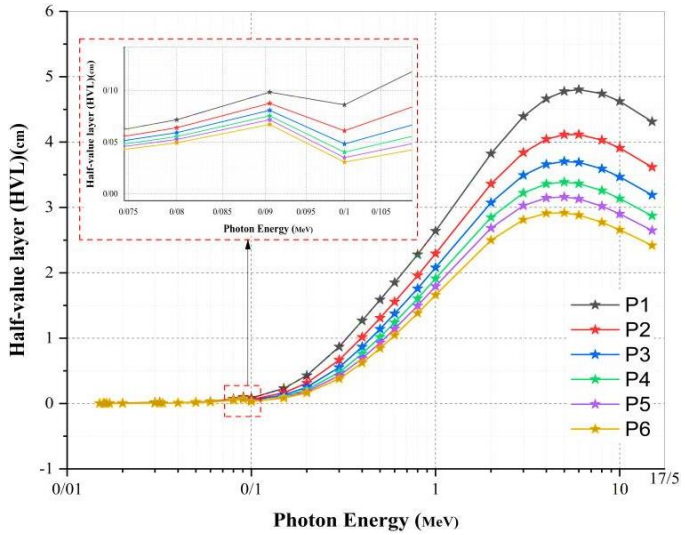
[DOR: 20.1001.1.17353351.1403.20.2.1.5]



شکل ۵: تغییرات مقادیر چگالی الکترونی مؤثر برای شیشه‌های منتخب برحسب انرژی فوتون‌های فرودی

چگالی الکترونی مؤثر از ضرب عدد اتمی مؤثر در عدد آووگادرو و تقسیم آن بر وزن اتمی میانگین ترکیب به دست می‌آید. از آنجایی که عدد آووگادرو و وزن اتمی میانگین برای یک ترکیب ثابت هستند و به انرژی فوتون فرودی بستگی ندارند نتیجه می‌گیریم که شکل نمودار چگالی الکترونی مؤثر همان شکل نمودار عدد اتمی مؤثر است که در عدد ثابتی ضرب شده است.

مقدار وزن‌اتمی میانگین از یک ترکیب به ترکیب دیگر تغییر می‌کند و ترکیبی که مقدار بیسموت بیش‌تری دارد وزن اتمی میانگین آن بیش‌تر است. یعنی، نمودار مربوط به نمونه P6 بر عدد بزرگ‌تری تقسیم شده و نمودار مربوط به نمونهP1 بر عدد کوچک‌تری تقسیم شده است. همین امر، باعث به‌هم‌ریختگی نمودارهای چگالی اتمی مؤثر شده و نظمی که در نمودارهای عدد اتمی مؤثر وجود داشته، دیگر در اینجا مشاهده نمی‌شود و از روی آن نمی‌توان وضعیت نمونه‌های P1 تا P6 را با یک نگاه با هم مقایسه کرد. روند تغییرات چگالی الکترونی مؤثر برحسب انرژی فوتون، همان روند تغییرات عدد اتمی مؤثر برحسب انرژی فوتون می‌باشد که تحلیل‌های نمودارهای عدد اتمی مؤثر را برای نمودارهای چگالی الکترونی مؤثر نیز می‌توان در نظر گرفت. درشکل‌های ۶ و ۷، لایه نیم‌مقدار و یک‌دهم مقدار برای شیشه‌های P1 تا P6 در محدوده انرژی ۰/۰۱۵ تا ۱۵ مگاالکترون‌ولت نشان می‌شود.



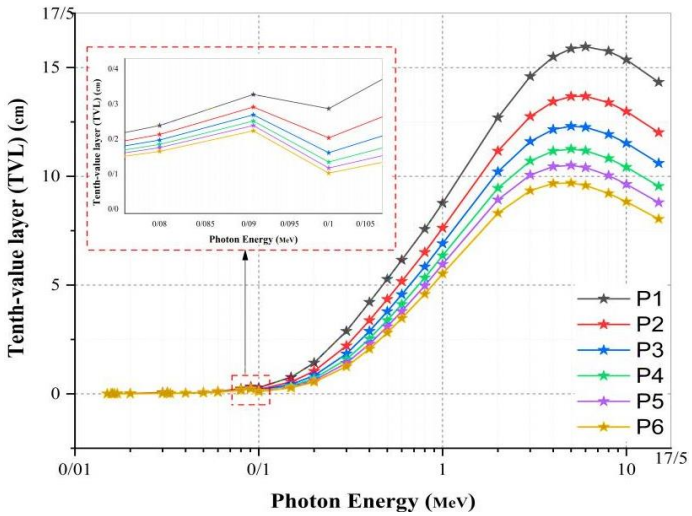
شکل ۶: تغییرات مقادیر لایه نیم‌مقدار برای شیشه‌های منتخب برحسب انرژی فوتون‌های فرودی

از شکل‌های ۶ و ۷ مشاهده می‌شود لایه نیم‌مقدار و یک‌دهم مقدار تا ۰/۱۵ بسیارکوچک (کم‌تر از ۲ و ۷ میلی‌متر) و تقریباً ثابت است. سپس، با افزایش انرژی فوتون، افزایش سریعی در مقادیر لایه نیم‌مقدار و لایه یک‌دهم مقدار رخ می‌دهد که به بالاترین

[Downloaded from jicers.ir on 2025-12-11]

[DOR: 20.1001.1.17353351.1403.20.2.1.5]

مقدار در ۶ مگاالکترون‌ولت برای شیشه‌های P1 و P2 و در ۵ مگاالکترون‌ولت برای شیشه‌های P3 تا P6 می‌رسند. از انرژی فوتون ۵ و ۶ مگاالکترون‌ولت به بعد، می‌توان متوجه شد که هر دو کمیت (لایه نیم‌مقدار و لایه یک‌دهم مقدار) با افزایش انرژی تا ۱۵ مگاالکترون‌ولت کاهش جزئی نشان می‌دهند. در بین نمونه‌ها بیش‌ترین مقادیر لایه نیم‌مقدار و لایه یک‌دهم مقدار شناسایی‌شده مربوط به نمونه P1 در۶ مگاالکترون‌ولت، با مقادیر ۴/۸ سانتی‌متر و ۱۵/۹۶سانتی‌متر می‌باشد. با افزایش بیسموت در ترکیبات شیشه‌ها این مقادیر حداکثری (قله نمودار) نمونه به نمونه کاهش می‌یابد و اندکی جابه‌جا می‌شود و در نمونه P6 به حداقل مقدار قله در انرژی ۵ مگاالکترون‌ولت با مقادیر ۲/۹۲ و ۹/۶۹ سانتی‌متر می‌رسد.



شکل ۷: تغییرات مقادیر لایه یک‌دهم مقدار برای شیشه‌های منتخب برحسب انرژی فوتون‌های فرودی

حداکثر مقادیر لایه نیم‌مقدار و لایه یک‌دهم مقدار مشاهده‌شده برای شیشه‌های P2، P3، P4 و P5 به ترتیب ۴/۱۱۶ و ۱۳/۶۷۵ سانتی‌متر، ۳/۷۰۴ و ۱۳/۳۰۴ سانتی‌متر، ۳/۳۸۸ و ۱۱/۲۵۵ سانتی‌متر و ۳/۱۶۱ و ۱۰/۵۰۲ سانتی‌متر است. تغییرات در لایه نیم‌مقدار و لایه یک‌دهم مقدار در رابطه با انرژی فوتون را می‌توان به‌عنوان یک نتیجه از فرآیندهای جذب فوتوالکتریک، پراکندگی کامپتون و تولید زوج در مناطق مختلف انرژی، مشابه مباحث قبلی مربوط به ضریب تضعیف جرمی و عدداتمی مؤثر تفسیر کرد. علاوه‌بر این، مقادیر لایه نیم‌مقدار و لایه یک‌دهم مقدار با افزایش محتوای اکسید بیسموت در تمام شیشه‌های مورد مطالعه کاهش می‌یابد (کاهش ضخامت). تغییر مقادیر مسیر آزاد میانگین در محدوده انرژی فوتون ۰/۰۱۵ تا ۱۵ مگاالکترون‌ولت برای همه نمونه‌های P1 تا P6 در شکل ۸ ارائه شده است.

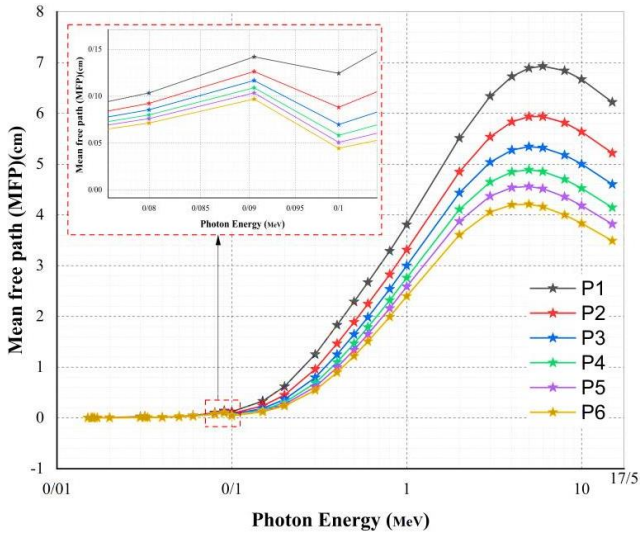
در اینجا تا محدوده انرژی ۰/۲ مگاالکترون‌ولت، می‌توان مشاهده کرد که مقادیر مسیر آزاد میانگین از روندی مشابه با مقادیر لایه نیم‌مقدار و لایه یک‌دهم مقدار برای همه شیشه‌های انتخاب‌شده پیروی می‌کند. تا انرژی ۰/۱ مگاالکترون‌ولت، همه نمونه‌ها مقادیر بسیارکوچک مسیر آزاد میانگین را نشان می‌دهند. سپس، با افزایش انرژی، به حداکثر مقدار خود در انرژی۶ مگاالکترون‌ولت برای نمونه‌هایP1 و P2 و در انرژی ۵ مگاالکترون‌ولت برای همه نمونه‌های P3 تا P6 می‌رسد. پس از آن، مقادیر مسافت آزاد میانگین یک روند کاهشی تا ۱۵ مگاالکترون‌ولت برای همه نمونه‌ها نشان می‌دهد. همان‌طور که برای روند مقادیر ضریب تضعیف جرمی، عدد اتمی مؤثر، لایه نیم‌مقدار و لایه یک‌دهم مقدار در مطالب قبل توضیح داده شد، در اینجا، برای مقادیر مسافت آزاد میانگین نیز، فرآیندهای فوتوالکتریک، پراکندگی‌کامپتون و تولید زوج نقش مهمی در مناطق مختلف انرژی (یعنی کم، متوسط و زیاد) بازی می‌کنند. حداکثر مقادیر مسافت آزاد میانگین شناسایی‌شده برای نمونه‌های P1 و P2، در انرژی فوتون ۶ مگاالکترون‌ولت، ۶/۹۳۱ سانتی‌متر و ۵/۹۳۹ سانتی‌متر هستند، درحالی‌که حداکثر مقادیر مسافت آزاد میانگین برای نمونه‌های P3 تا P6، در انرژی فوتون ۵ مگاالکترون‌ولت، با مقادیر ۵/۳۴۳ سانتی‌متر، ۴/۸۸۸ سانتی‌متر، ۴/۵۶۱ سانتی‌متر و ۴/۲۱۰ سانتی‌متر مشاهده می‌شود. از شکل ۸، مشاهده می شود که در محدوده انرژی فوتون در نظر گرفته شده، مقادیر مسافت آزاد میانگین برای نمونه P6 کم‌ترین و برای نمونه P1 بیش‌ترین است. در محدوده انرژی ۰/۰۱۵ تا ۱۵ مگاالکترون‌ولت این روند نشان می‌دهد که نمونه P6 با داشتن

[Downloaded from jicers.ir on 2025-12-11]

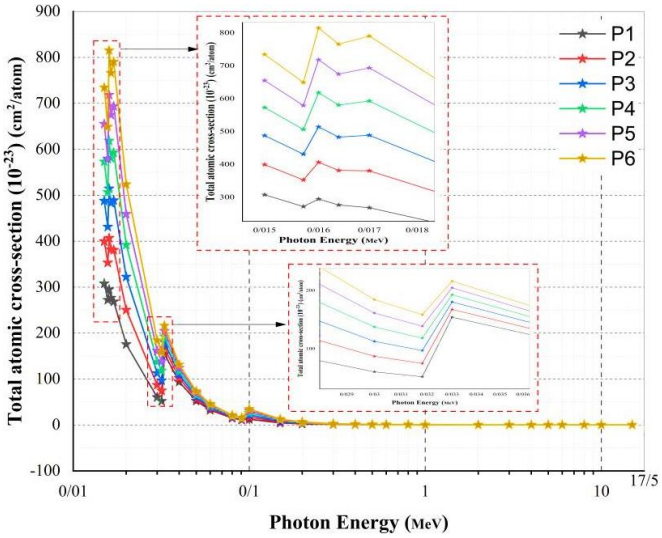
[DOR: 20.1001.1.17353351.1403.20.2.1.5]

بالاترین عدد اتمی مؤثر، بهترین شیشه محافظ در بین تمام نمونه‌های انتخاب شده است. زیرا به خوبی می‌دانیم که هرچه مقدار مسافت آزاد میانگین کم‌تر باشد، تضعیف اشعه گاما بهتر است (احتمال بیش‌تر برای برهم‌کنش‌های فوتون). برای همه نمونه‌های P1 تا P6، تغییرات در مقادیر سطح مقطع اتمی و سطح مقطع الکترونیکی در محدوده انرژی فوتون ۰/۰۱۵ تا ۱۵ مگاالکترون‌ولت به‌ترتیب در شکل‌های ۹ و ۱۰ نشان داده می‌شود.

بزرگ‌نمایی مربوط به مناطق انرژی فوتون ۰/۰۱۵ تا ۰/۰۲ مگاالکترون‌ولت و ۰/۰۳ تا ۰/۰۴ مگاالکترون‌ولت به‌عنوان نمودارهای درونی برای شکل‌ها نشان داده شده‌اند. برای همه نمونه‌های انتخاب‌شده، می‌توان متوجه شد که هر دو مقادیر سطح مقطع اتمی و سطح مقطع الکترونیکی با افزایش عنصر بیسموت در انرژی‌های فوتون پایین‌تر افزایش می‌یابد، درحالی‌که تغییرات در این مقادیر در انرژی‌های بالاتر حداقل است. روند تغییرات مقادیر سطح مقطع اتمی و سطح مقطع الکترونیکی با تغییر انرژی فوتون گاما همانند روند تغییرات ضریب تضعیف جرمی می‌باشد. و تأثیرات لبه‌های عناصر بیسموت و تلوریم نیز در اینجا به همان شکل مشاهده می‌شود. از آنجایی که بحث در مورد خاصیت حفاظی یک ترکیب بدون پرداختن به ذرات ثانویه ناشی از اندرکنش‌های پرتوهای یونیزان با این ترکیب ناقص می‌باشد، در نتیجه در ادامه به بحث در مورد ذرات ثانویه خواهیم پرداخت. اندرکنش پرتو گاما با ماده از چهار طریق اتفاق می‌افتد؛ ۱- اثر فوتوالکتریک ۲- پراکندگی رایلی ۳- پراکندگی کامپتون ۴- تولیدزوج [۱۹].



شکل ۸: تغییرات مقادیر مسافت آزاد میانگین برای شیشه‌های منتخب برحسب انرژی فوتون‌های فرودی

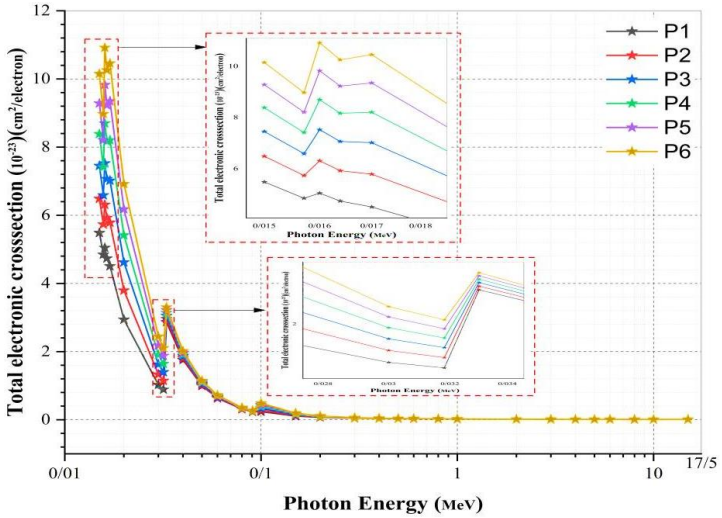


شکل ۹: تغییرات مقادیر سطح مقطع اتمی برای شیشه‌های منتخب برحسب انرژی فوتون‌های فرودی

فصلنامه سرامیک ایران دوره ۲۰ شماره ۲ تابستان ۱۴۰۳

[Downloaded from jicers.ir on 2025-12-11]

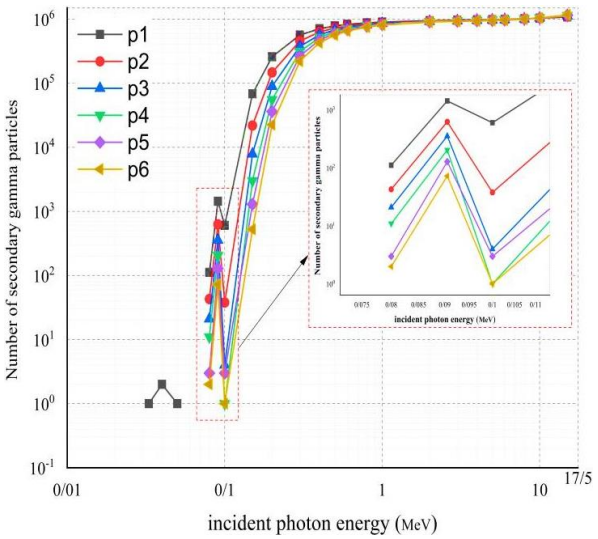
[DOR: 20.1001.1.17353351.1403.20.2.1.5]



شکل ۱۰: تغییرات مقادیر سطح مقطع الکترونیکی برای شیشه‌های منتخب برحسب انرژی فوتون‌های فرودی

در پدیده فوتوالکتریک پرتو گاما جذب می‌شود و الکترون ساطع می‌شود. در پراکندگی رایلی فقط جهت پرتو گاما تغییر می‌کند. در پراکندگی کامپتون انرژی و جهت پرتو گامای فرودی تغییر می‌کند و همچنین الکترون‌های ثانویه تولید می‌شود. در تولید زوج پرتو گاما از بین می‌رود و به جای آن الکترون و پوزیترون ساطع می‌شود. با توجه به این مقدمات، در تابش پرتو گاما به یک ترکیب، ذرات ثانویه خروجی از آن، چیزی جز گاما، الکترون و پوزیترون نخواهد بود. شکل های ۱۱، ۱۲ و ۱۳ به‌ترتیب نمودار ذرات ثانویه گاما، الکترون و پوزیترون خروجی از یک حفاظ به ضخامت یک سانتی‌متر و شعاع ۳۰ سانتی‌متر برای ترکیبات P1 تا P6، را برحسب انرژی گامای فرودی به ازای ۱۰۶ ذره فرودی، به تصویر می‌کشند.

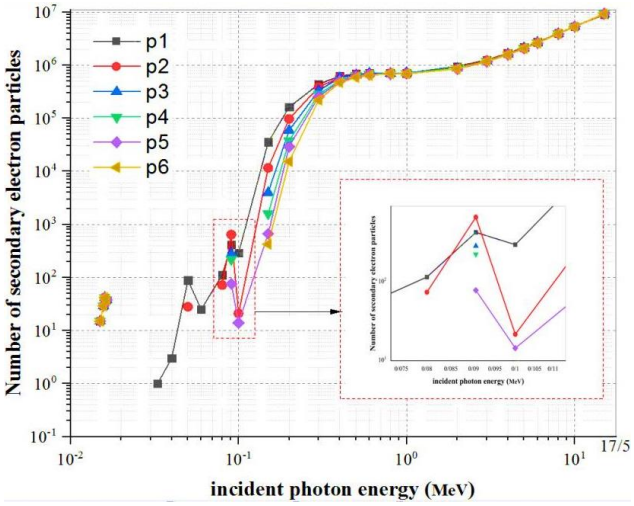
با توجه به شکل‌ها مشاهده می‌شود با تغییر ترکیب از P1 تا P6، نه تنها ضریب تضعیف جرمی آن افزایش یافته و بهبود می‌یابد بلکه ذرات ثانویه خروجی از حفاظ نیز کاهش می‌یابد. در انرژی ۰/۰۹۰۵۲۴ مگاالکترون‌ولت به دلیل اثر لبه K عنصر بیسموت، هم ضریب تضعیف جرمی کاهش می‌یابد و هم شاهد افزایش ذرات ثانویه خواهیم بود. در شکل ۱۲ مشاهده می‌شود که در انرژی‌های ۱۵ تا ۱۷ کیلوالکترون‌ولت با اینکه ضریب تضعیف جرمی به دلیل افزایش اثر فوتوالکتریک افزایش می‌یابد، اما تولید ذرات الکترون ثانویه نیز افزایش‌یافته که در خروجی حفاظ نمایان می‌شوند. انرژی این الکترون‌ها از ۱ تا ۱۴ کیلوالکترون‌ولت متغیر است و کم‌تر از نیمی از آن‌ها دارای انرژی زیر یک کیلوالکترون‌ولت می‌باشند. پس، افزایش اثر فوتوالکتریک لزوماً مطلوب نیست، بلکه منجر به افزایش الکترون‌های ثانویه نیز خواهد شد.



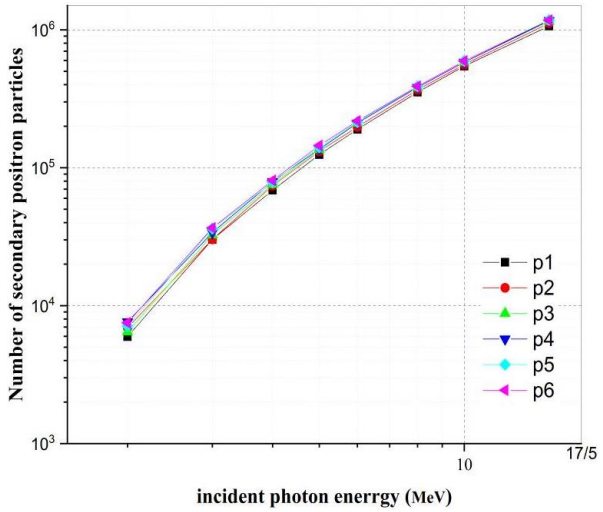
شکل ۱۱: تغییرات تعداد ذرات گامای ثانویه خروجی از حفاظ به ازای ۱۰۶ ذره فرودی

[Downloaded from jicers.ir on 2025-12-11]

[DOR: 20.1001.1.17353351.1403.20.2.1.5]

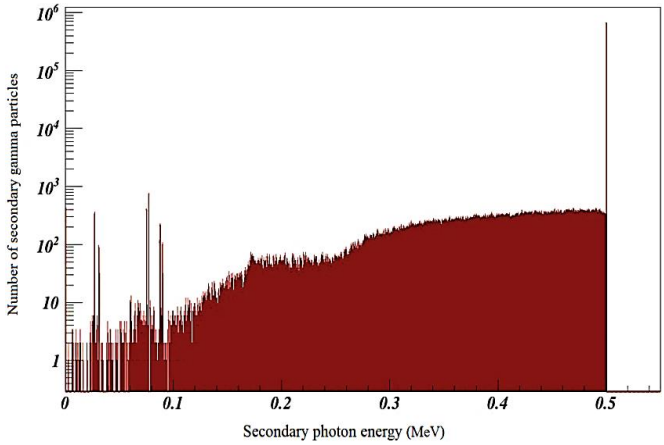


شکل ۱۲: تغییرات تعداد ذرات الکترون ثانویه خروجی از حفاظ به ازای ۱۰۶ ذره فرودی



شکل ۱۳: تغییرات تعداد ذرات پوزیترون ثانویه خروجی از حفاظ به ازای ۱۰۶ ذره فرودی

ذرات پوزیترون ثانویه در انرژی‌های نزدیک ۲ مگاالکترون‌ولت به بالا در خروجی حفاظ مشاهده می‌شوند و مقدار آن‌ها برای هر شش ترکیب تقریباً یکسان است. شکل‌های ۱۴ تا ۱۸ به بررسی طیف انرژی ذرات ثانویه می‌پردازد. شکل‌های ۱۴ و ۱۵ به‌ترتیب طیف انرژی ذرات گامای ثانویه برای ترکیبات P1 و P6، به ازای ذرات گامای فرودی با انرژی ۵۰۰ کیلوالکترون‌ولت را نشان می‌دهند.

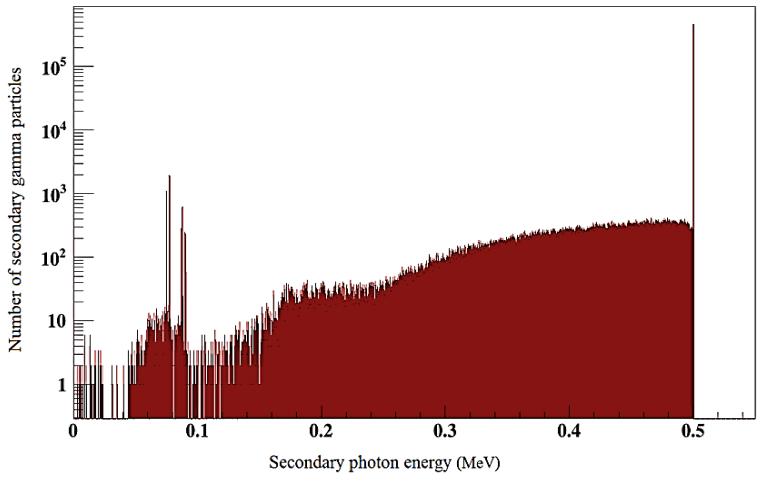


شکل ۱۴: نمایش طیف انرژی گامای ثانویه خروجی از حفاظ P1 به ازای ۱۰۶ ذره فرودی با انرژی ۰/۵ مگاالکترون‌ولت

فصلنامه سرامیک ایران دوره ۲۰ شماره ۲ تابستان ۱۴۰۳

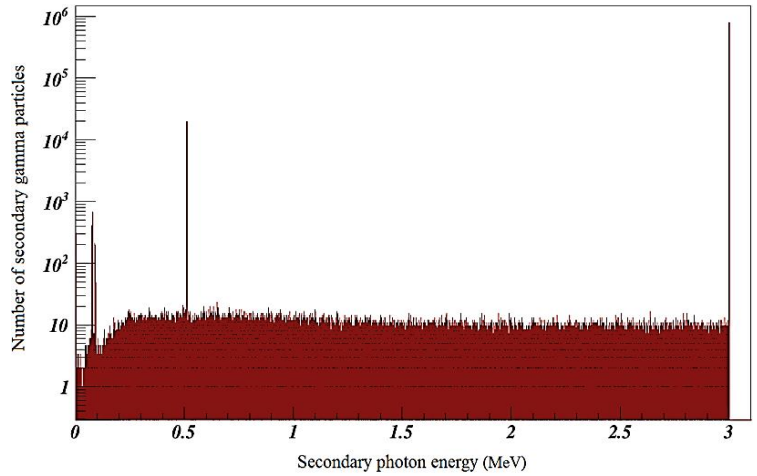
[Downloaded from jicers.ir on 2025-12-11]

[DOR: 20.1001.1.17353351.1403.20.2.1.5]



شکل ۱۵: نمایش طیف انرژی گامای ثانویه خروجی از حفاظ P6 به ازای 10^6 ذره فرودی با انرژی ۰/۵ مگاالکترون‌ولت

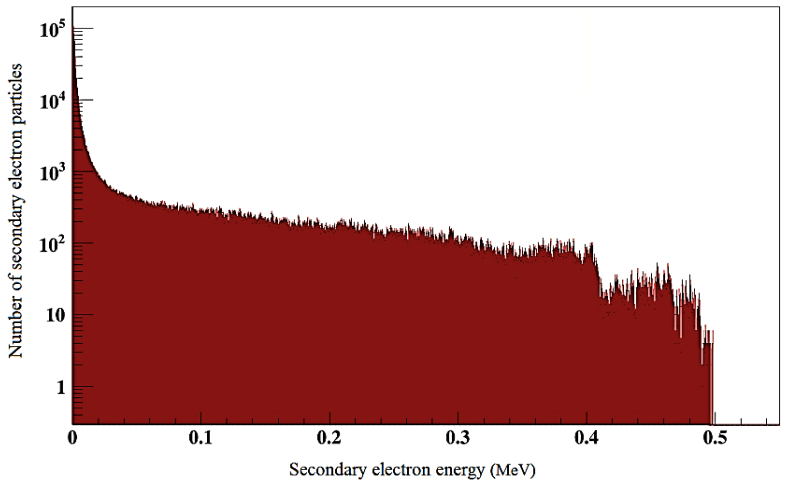
با دقت در این دو شکل به چند نکته پی خواهیم برد. اکثر گاماهای خروجی همان گامای ورودی می‌باشند که بدون برخورد از حفاظ خارج می‌شوند. برای هر دو شکل در بازه انرژی ۷۵ تا ۹۱ کیلوالکترون‌ولت تعدادی قله مشاهده می‌شود که مربوط به مدارهای انرژی عنصر بیسموت می‌باشند. در اثر جذب فوتوالکتریک در لبه K عنصر بیسموت محل الکترون در این لایه خالی می‌شود و با جایگزینی الکترون‌های لایه‌های بالاتر یا الکترون‌های ثانویه در این لایه، گاماهای با انرژی متناظر این قله‌ها ساطع خواهد شد. به دلیل بالابودن احتمال رخداد این پدیده، تعداد گاماهای خروجی با انرژی قله‌ها افزایش می‌یابد. در شکل ۱۴ شاهد قله‌های دیگری در بازه انرژی ۲۵ تا ۳۲ کیلوالکترون‌ولت هستیم، که مربوط به لبه K عنصر تلوریم می‌باشد. شکل ۱۶ طیف انرژی گاماهای خروجی از حفاظ P6 به ازای ذرات گامای فرودی با انرژی ۳ مگاالکترون‌ولت را نشان می‌دهد. در این شکل، علاوه‌بر قله‌های شکل ۱۴ قله دیگری در انرژی ۵۱۱ کیلوالکترون‌ولت مشاهده می‌شود که مربوط به نابودی پوزیترون است. شکل ۱۷ طیف انرژی الکترون‌های ثانویه خروجی از حفاظ P6 به ازای ذرات گامای فرودی با انرژی ۵۰۰ کیلوالکترون‌ولت را نشان می‌دهد. که تعداد این الکترون‌ها در انرژی‌های پایین‌تر افزایش می‌یابد. از آنجا که شکل طیف انرژی الکترون‌های ثانویه با تغییر ترکیبات حفاظ از P1 تا P6، و همچنین با تغییر انرژی گاماهای فرودی، مشابه شکل ۱۷ است، به همین شکل بسنده نمودیم. شکل ۱۸ طیف انرژی پوزیترون‌های ثانویه خروجی از حفاظ P6 به ازای ذرات گامای فرودی با انرژی ۳ مگاالکترون‌ولت را نشان می‌دهد. با کمی دقت در این شکل متوجه خواهیم شد که انرژی این ذرات در محدوده کم‌تر از ۲ مگاالکترون‌ولت است که نشان می‌دهد ۱/۰۲۲ مگاالکترون‌ولت از انرژی ذرات فرودی صرف تولید زوج شده است. همچنین مشاهده می‌کنیم طیف انرژی پوزیترون‌های ثانویه خروجی در همه انرژی‌ها تقریباً یکنواخت است.



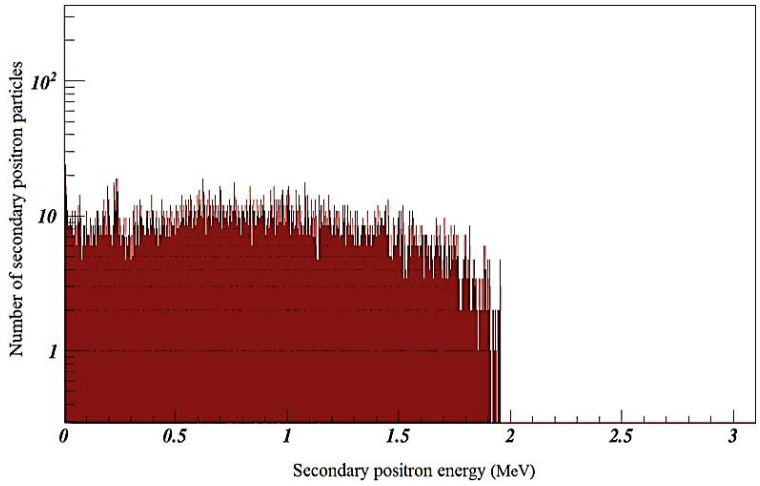
شکل ۱۶: نمایش طیف انرژی گامای ثانویه خروجی از حفاظ P6 به ازای 10^6 ذره فرودی با انرژی ۳ مگاالکترون‌ولت

[Downloaded from jicers.ir on 2025-12-11]

[DOR: 20.1001.1.17353351.1403.20.2.1.5]



شکل ۱۷: نمایش طیف انرژی الکترون ثانویه خروجی از حفاظ P6 به ازای $۱۰^{۶}$ ذره فرودی با انرژی ۰/۵ مگاالکترون‌ولت



شکل ۱۸: نمایش طیف انرژی پوزیترون ثانویه خروجی از حفاظ P6 به ازای $۱۰^{۶}$ ذره فرودی با انرژی ۳ مگاالکترون‌ولت

۵- نتیجه‌گیری

با استفاده از ابزار شبیه‌سازی جینت-۴، شیشه‌های بوروتلوریت بیسموت شبیه‌سازی شد و تاثیر افزایش اکسید بیسموت در ترکیب شیشه بر عملکرد حفاظ در قالب ۶ نوع شیشه بررسی شد. نتایج نشان داد که اختلاف بین داده‌های شبیه‌سازی جینت-۴ و پایگاه داده Phy-x از مرتبه ۰/۱ درصد بود که نشان‌دهنده دقت و صحت شبیه‌سازی‌های انجام شده با ابزار شبیه‌سازی جینت-۴ می‌باشد. نتایج به‌گونه‌ای است که با افزایش بیسموت و در نتیجه چگالی ترکیب، ضریب تضعیف خطی و ضریب تضعیف جرمی و همچنین عدد اتمی مؤثر، در هر نقطه از انرژی گاما افزایش می‌یابد و لایه نیم‌مقدار، لایه یک‌دهم مقدار و مسیر آزاد میانگین روند کاهشی را نشان می‌دهد. با توجه به نمودار نتایج ضریب تضعیف جرمی معلوم می‌شود که اگر ما یک گرم از هر شش ترکیب را در نظر بگیریم، ترکیب با بیش‌ترین بیسموت سطح مقطع تضعیف بزرگ‌تری دارد که در نتیجه در یک وزن مشخص می‌توان شیشه‌های نازک‌تر با کارایی تضعیف فوتون بهتری تولید کرد. چگالی بالا (۶/۲۴ گرم بر سانتی‌مترمکعب)، مقادیر بالای ضریب تضعیف جرمی و عدد اتمی مؤثر، مقادیر کم لایه نیم‌مقدار، لایه یک‌دهم مقدار و مسیر آزاد میانگین که برای نمونه P6 استنتاج شده است، آن را به‌عنوان یک تضعیف‌کننده پرتوی عالی پیشنهاد می‌کند که می‌تواند جایگزین خوبی برای شیشه‌های حاوی سرب (سرب، عنصری با سمیت بالا) در تاسیساتی مانند راکتورهای هسته‌ای و رادیوتراپی پزشکی شود. با بررسی ذرات ثانویه و انرژی آن‌ها، مسیرهای کنترل این ذرات هموارتر شده است که نباید در بررسی حفاظ نادیده گرفته شود. همچنین با بررسی طیف گاماهای خروجی از حفاظ و تحلیل قله‌های انرژی آن می‌توان برخی از عناصر موجود در حفاظ را شناسایی کرد.

[DOR: 20.1001.1.17353351.1403.20.2.1.5]
[Downloaded from jicers.ir on 2025-12-11]

تعارض منافع

هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسندگان بیان نشده است.

مراجع

[1]. S. A.M. Issa, M. Ahmad, H.O. Tekin, Y. B. Saddeek and M.I. Sayyed, “Effect of Bi_2O_3 content on mechanical and nuclear radiation shielding properties of Bi_2O_3-MoO_3-B_2O_3-SiO_2-Na_2O-Fe_2O_3 glass system”, Res. Phys., 13 (2019) 102165.

[2]. El-Sharkawy, R.M., Shaaban, Kh.S., Elsaman, R., Allam, E.A., El-Taher, A., Mahmoud, M.E. “Investigation of mechanical and radiation shielding characteristics of novel glass systems with the composition xNiO-20ZnO-60B_2O_3-(20-x) CdO based on nanometal oxides”, J. Non-Cryst. Solids, 528(2020) 119754.

[3]. N. Chanthima, J. Kaewkhao, C. Kedkaew, W. Chewpraditkul, A. Pokaipist, P. Limsuwan, “Study on interaction of Bi_2O_3, PbO and BaO in silicate glass system at 662 keV for development of gamma-rays shielding materials”, Prog. Nucl. Sci. Technol., 1 (2011) 106-109.

[4]. M. Zubair, M. Aamir, Eslam Ahmed, E. Ahmed, A. A. Alyemni, “Operator Protection from Gamma Rays Using Ordinary Glass and Glass Doped with Nanoparticles”, Sustainability, 15 (2023) 1375.

[5]. C.M. Lee, Y.H. Lee, K.J. Lee, “Cracking effect on gamma-ray shielding performance in concrete structure”, Prog. Nucl. Energy, 49 (2007) 303–312.

[6]. A. Alshamari, M.H.A. Mhareb, N. Alonizan, M.I. Sayyed, N. Dwaikat, I. Alrammah, M. Kh. Hamad and Q.A. Drmosh, “Gamma-ray-induced changes in the radiation shielding, structural, mechanical, and optical properties of borate, tellurite, and borotellurite glass systems modified with barium and bismuth oxide”, Optik, 281 (2023) 170829.

[7]. S. Mandal, S. Manna, K. Biswas, S. Nag and B. Ambade, “Effect of gamma ray irradiation on optical and luminescence properties of CeO_2 doped bismuth glass”, Ceram. Int., 49 (2023) 23878-23886.

[8]. H.O. Tekin, L.R.P. Kassab, S.A.M. Issa, C.D.S. Bordon, E.E.A. Guclu, G.R.S. Mattos, O. Kilicoglu, “Synthesis and nuclear radiation shielding characterization of newly developed germanium oxide and bismuth oxide glasses”. Ceram. Int., 45(Part A) (2019) 24664–24674.

[9]. R.Kurtulus, G.A.Alharshan, T.Kavas, E.Kavaz, I.Kebaili, I.O. Olarinoye, M.S.Al Buriahi, “Recycling potential of mobile phone waste glasses for radiation shielding applications” Radiat. Phys. Chem., 202 (2023) 110565.

[10]. M. I. Sayyed, Aljawhara H. Almuqrin, “Impact of BaO Content on Gamma Radiation Shielding Attributes of Borosilicate Glasses at Low Energy Range”, Silicon, 144 (2024) 356–360.

[11]. A.E Ersundu, M. Bu¨yu¨kyıldız, M.C Ersundu, E. Sakar, M. Kurudirek, “The heavy metal oxide glasses within the WO_3–MoO_3–TeO_2 system to investigate the shielding properties of radiation applications”, Prog. Nucl. Energy., 104 (2018) 280–287.

[12]. E. M. Abou Hussein, Y. S. Rammah, “Optical UV–visible, Raman spectroscopy, and gamma radiation shielding properties of borate glass systems; B_2O_3 + Na_2O + Al_2O_3/MgO/Li_2O”, Opt. and. Quant. Elec., 56 (2024) 387.

[13]. A. Alshamari, M.H.A. Mhareb, “Influence of various gamma-ray doses on radiation shielding, thermal, mechanical, structural, and optical properties of tellurite, borate, and boro-tellurite glasses modified with molybdenum and strontium oxide”, Opt. Mat., 142 (2023) 114159.

[14]. M.K. Halimah, A. Azuraida, M. Ishak and L. Hasnimulyati, “Influence of bismuth oxide on gamma radiation shielding properties of borotellurite glass”, Jour.of. Non-Crys. Sol., 512 (2019) 140–147.

[15]. G. Lakshminarayana, I. Kebaili, M. G. Dong. M. S. Al-Buriahi, A. Dahshan, I. V. Kityk, D. E. Lee, J. Yoon, and T. Park, “Estimation of gamma-rays, and fast and the thermal neutrons attenuation characteristics for bismuth tellurite and bismuth boro-tellurite glass systems”, J. Mater. Sci., 55 (2020) 5750–5771.

[16]. A. Azuraida, M.K. Halimah, C.A.C. Azurahanim, M. Ishak, “Gamma irradiation effect on structural and optical properties of bismuth-boro-tellurite glasses”, Int. J. Environ. Ecol Eng., 9 (2015) 594–598.

[17]. https://geant4.web.cern.ch

[18]. Erdem Şakar, Özgür Fırat Özpolat, Bünyamin Alım, M.I. Sayyed, Murat Kurudirek, “Phy-X/PSD: Development of a user friendly online software for calculation of parameters relevant to radiation shielding and dosimetry”, Rad. Phys. Chem. 166 (2020) 108496.

[19]. N.J. Carron, “An Introduction to the Passage of Energetic Particles through Matter”, Taylor & Francis Group, New York London, Vol. 1, 2007, pp. 25–164.

[Downloaded from jicers.ir on 2025-12-11]

[DOR: 20.1001.1.17353351.1403.20.2.1.5]

Investigating the Gamma Ray Protective Properties of Bismuth Boro-Tellurite Glass Compounds Using Geant4 Monte Carlo Simulation Tool

Rahmani Vareki M.[1], Eshghi M.[2,*]

[1] PhD Candidate Student of Physics, Imam Hossein University, Tehran, Iran
[2] Assistant Professor, Department of Physics, Imam Hossein University, Tehran

* eshgi54@gmail.com, meshghi@ihu.ac.ir

Abstract: In this research, the protective properties against gamma rays of bismuth boro-tellurite glass compounds $[(TeO_2)0.7–(B_2O_3)0.3](1-x)–(Bi_2O_3)x$ (where x equals (0.05, 0.10, 0.15, 0.25, and 0.3 mole fraction) is investigated using the Monte Carlo simulation tool Geant4 in the range of 0.015 to 15 MeV. In this study, the quantities related to photon attenuation such as: linear attenuation coefficient (μ_L), mass attenuation coefficient (μ_m), one-tenth-value layer (TVL), half-value layer (HVL), effective atomic number (Z_{eff}), effective electron density (N_{eff})), the total atomic cross section (σ_a), the total electronic cross section (σ_e) and the mean free path (MFP) Also, the spectrum of secondary particles created in these compounds is shown according to their type and energy for different levels of incident gamma energy. To validate the simulation results, the mass attenuation coefficient values calculated from Geant4 were compared with the Phy-X results, which show that they are in good agreement with each other. The agreement between the data shows that the Geant4 tool is a good method to check the properties of gamma ray shielding. The obtained results show that with the increase of the bismuth element in the composition of the glass, its protective property also increases and the quantity values are at the optimal level that these glasses can be used as a substitute for lead glasses (due to the toxicity of lead) used in lower energies.

Keywords: Gamma-ray, Shielding, Bismuth boro-tellurite glass, Monte Carlo simulation Geant4.

[Downloaded from jicers.ir on 2025-12-11]

[DOR: 20.1001.1.17353351.1403.20.2.1.5]