

## بهبود قابل توجهی در خواص تضعیف پرتو گاما شیشه‌های بورات با استفاده از تقویت‌کننده اکسید بیسموت

محمدرضا علی‌پور\* و مهدی عشقی

<sup>۱</sup> دانشکده علوم پایه، گروه فیزیک، دانشگاه امام حسین (ع)، تهران، ایران.

\*تهران، دانشگاه جامع امام حسین (ع)، گروه فیزیک، کد پستی: ۱۶۹۸۷۱۵۴۶۱.

پست الکترونیکی: mohamadrezhaalipoor1997@gmail.com, M.Alipoor@ihu.ac.ir

### چکیده

این مطالعه به بررسی خواص محافظتی پرتو گاما و نوترون شیشه‌های بورات آلاییده شده با  $\text{Bi}_2\text{O}_3$  (۵-۲۵ مول درصد) با استفاده از شبیه‌سازی‌های Geant4 در محدوده انرژی ۱۵ کیلو الکترون‌ولت تا ۱۰ مگا الکترون‌ولت بررسی شد. ضریب تضعیف جرمی محاسبه شد که امکان تعیین پارامترهای کلیدی محافظتی پرتو گاما را فراهم کرد. نتایج، افزایش قابل توجهی در عملکرد محافظتی پرتو گاما با افزایش محتوای  $\text{Bi}_2\text{O}_3$  را نشان داد. ضریب تضعیف جرمی از ۳۳/۵۸ در انرژی‌های پایین تا ۰/۰۲۷ سانتی‌متر مربع بر گرم در انرژی‌های بالا متغیر بود که در آن ۵-Glaas بالاترین ضریب تضعیف جرمی را نشان داد. همچنین پارامترهای کلیدی دیگری از جمله ضریب تضعیف خطی، میانگین مسیر آزاد، ضخامت لایه دهم و راندمان محافظت از پرتو را استخراج کردیم. نکته مهم این است که ضخامت مورد نیاز برای محافظتی پرتو گاما مؤثر به‌طور قابل توجهی کاهش یافت. لایه مقدار دهم (TVL) برای فوتون‌های ۱ مگا الکترون‌ولت از ۱۰/۵ سانتی‌متر برای شیشه حاوی ۵٪ اکسید بیسموت به تنها ۷/۸ سانتی‌متر برای نمونه حاوی ۲۵٪ اکسید بیسموت کاهش یافت. علاوه بر این، راندمان محافظت در برابر پرتو برای انرژی‌های کمتر از ۱۵۰ کیلو الکترون‌ولت نزدیک به ۱۰۰ درصد بود. سطح مقطع حذف نوترون سریع نیز با افزایش محتوای بیسموت افزایش یافت. ما نتیجه می‌گیریم که حاوی ۵٪ اکسید بیسموت (۵-Glass) خواص محافظتی بهتری برای فوتون‌های گاما و نوترون‌های سریع نشان می‌دهد و آن را به گزینه‌ای امیدوارکننده برای کاربردهای محافظت در برابر تابش تبدیل می‌کند.

کلیدواژگان: پرتوگاما، نوترون سریع، شبیه‌سازی، Geant4، شیشه بورات.

### ۱. مقدمه

بسیار مهم است. مواد محافظ سنتی مانند بتن و سرب، تضعیف بالایی دارند اما بتن حجیم است و به مرور زمان تخریب می‌شود، درحالی‌که سرب سمی، سنگین و با کاربردهایی که نیاز به شفافیت نوری دارند - مانند پنجره‌های محافظ تابش در بیمارستان‌ها سازگار نیست [۵]. با توجه به این محدودیت‌ها،

تابش گاما، شکلی از تابش الکترومغناطیسی با انرژی بسیار بالا که در طول واپاشی رادیواکتیو ساطع می‌شود [۲،۱]، خطرات قابل توجهی را برای سلامت انسان، تجهیزات و محیط زیست ایجاد می‌کند [۴،۳]. بنابراین، محافظت مؤثر هم در محیط‌های پزشکی (مانند اتاق‌های رادیوتراپی، تصویربرداری تشخیصی)

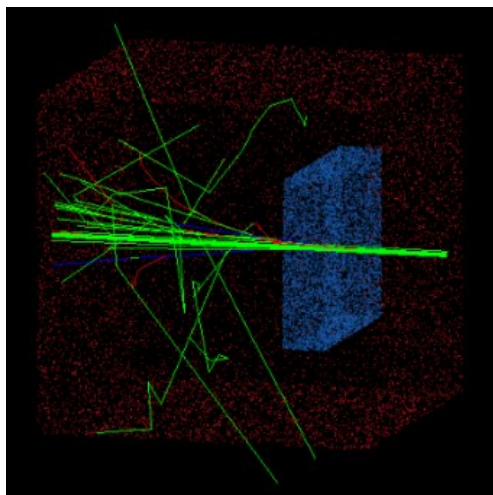
موجب تقویت ساختار شیشه می شود [۲۰]. همچنین، قرارگیری سدیم در کنار روی به پایداری شبکه، حفظ شفافیت نوری و کاهش دمای ذوب در شیشه‌ها کمک می کند [۲۱]. بسیاری از پژوهش‌های موجود تنها بر تأثیر تک عنصری بر خواص شیشه متمرکز بوده‌اند و اثرات ترکیبی چندین عنصر به‌طور هم‌زمان کمتر مورد بررسی قرار گرفته است [۲۲، ۲۳]. اخیراً، تلاش‌های زیادی برای تقویت مواد میزبان مختلف با بیسموت به‌منظور افزایش کارایی تضعیف آن‌ها انجام شده است، تا بتوان از آن‌ها به‌عنوان محافظ در برابر پرتوهای گاما در کاربردهای پرتویی مختلف استفاده کرد. در نهایت، مطالعه گسترده‌ای بر روی تقویت شبکه‌های شیشه‌ای مختلف با افزودن یون‌های منفرد از گروه‌های شیمیایی مختلف مانند  $\text{Na}^+$ ،  $\text{Cd}^{2+}$ ،  $\text{Ni}^{2+}$  انجام شده است [۲۷-۲۴]. این کار با طراحی یک ترکیب شیشه‌ای که به‌طور هم‌زمان محافظت در برابر تابش (از طریق  $\text{Bi}_2\text{O}_3$  و  $\text{CdO}$ )، استحکام ساختاری (از طریق  $\text{ZnO}$ ) و امکان‌سنجی اقتصادی (از طریق  $\text{Na}_2\text{O}$ ) را بهینه می‌کند، به این شکاف می‌پردازد. ماده حاصل، استقرار در دنیای واقعی را در موانع تابشی فشرده، سبک و شفاف برای تشخیص پزشکی، ایمنی هسته‌ای و واکنش اضطراری هدف قرار می‌دهد - و جایگزین مناسبی برای سپرهای معمولی مبتنی بر سرب ارائه می‌دهد.

## ۲. مواد و روش‌ها

ترکیب شیشه‌ای منتخب که از پنج جزء مجزا تشکیل شده است، شامل  $\text{Na}_2\text{O}-\text{Bi}_2\text{O}_3-\text{B}_2\text{O}_3-\text{CdO}-\text{ZnO}$ ، از طریق یک روش دقیق انتخاب شده است که شامل جایگزینی جزئی از ترکیب اکسید بور، با عنوان  $\text{B}_2\text{O}_3$ ، با یک ترکیب جایگزین، یعنی اکسید بیسموت، است. بر اساس تحقیقات قبلی که ماتریس‌های بورات با غلظت‌های ۵ تا ۴۰ درصد وزنی اکسید بیسموت مورد بررسی قرار گرفتند. نتایج آن‌ها نشان داد که حد پایین ۱۰ درصد وزنی

نیاز به مواد محافظ تشعشعی با کارایی بالا، وزن سبک و هزینه بهینه بیش از پیش احساس می‌شود. شیشه‌های بوراته به‌دلیل شفافیت نوری، قابلیت شکل‌پذیری و مقاومت شیمیایی، گزینه‌ای امیدبخش برای جایگزینی سرب سنتی هستند [۶]. اما چگالی پایین و ضریب تضعیف محدود آن‌ها در برابر پرتوهای پرنانرژی (مانند گاما)، استفاده عملی از این شیشه‌ها را با چالش مواجه کرده است. اخیراً، برای غلبه بر این چالش‌ها، ترکیبات شیشه‌ای با چگالی بالا تکامل یافته‌اند [۷-۹]. بررسی مطالعات قبلی نشان می‌دهد که اگرچه افزودن اکسیدهای فلزات سنگین (مثل  $\text{PbO}$  یا  $\text{BaO}$ ) به شیشه‌های بوراته تا حدی خواص محافظتی را بهبود می‌بخشد [۱۰، ۱۱]. این در حالی است که غلظت‌های بالای  $\text{PbO}$  (غلظت‌های بالاتر از ۳۰ درصد وزنی) باعث کدرشدن شیشه و محدودیت در کاربردهای نیازمند عبور نور (مانند پنجره‌های حفاظتی) می‌شود و ترکیب‌های حاوی  $\text{BaO}$  در دمای بالا تمایل به تبلور دارند و ساختار شیشه را تضعیف می‌کنند [۱۲، ۱۳]. در تلاش‌های تحقیقاتی معاصر، پژوهشگران در حال بررسی روش‌های نوآورانه برای حل مشکلات شیشه‌های بوراته از طریق ادغام مواد تقویت‌کننده در ترکیبات شیشه بوده‌اند [۱۴، ۱۵]. اکسید بیسموت ( $\text{Bi}_2\text{O}_3$ ) یک راه‌حل قانع‌کننده ارائه می‌دهد: به دلیل عدد اتمی و چگالی الکترونی بالا، تضعیف گاما بالایی را فراهم می‌کند، نسبت به سرب سمیت کمتری دارد و وضوح نوری را حفظ می‌کند - که آن را برای پنجره‌های محافظ پزشکی و هسته‌ای ایده‌آل می‌کند [۱۶-۱۸]. علاوه بر این، اکسید بیسموت دارای میدان کوچکی است که نمی‌تواند به‌راحتی شیشه را تشکیل دهد، به همین دلیل است که اصلاح‌کننده‌های اضافی نیاز به تشکیل شبکه شیشه دارند. افزودن اکسید روی به ماتریس شیشه مقاومت در برابر تبلور را بهبود می‌بخشد، دوام شیمیایی بهتری می‌بخشد و پایداری حرارتی را افزایش می‌دهد [۱۹]. علاوه بر این، عزالدین و همکارانش نشان دادند  $\text{CdO}$  در محدوده انرژی ۳۰۰ تا ۸۰۰ کیلو الکترون‌ولت کارایی بهتری دارد و

تضعیف جرمی نمونه‌ها، با استفاده از روش انتقال، طبق قانون بیر-لامبرت بر اساس شدت فوتون فرودی و میزان تضعیف به دست می‌آید. تضعیف فوتون‌ها به وسیله شبیه‌سازی تمام برهم‌کنش‌های فیزیکی احتمالی برای فوتون‌ها (مانند برهم‌کنش فوتوالکتریک، پراکندگی کامپتون، پراکندگی ریلی، تولید زوج)، تابش ترمزی، یونیزاسیون و نابودی پوزیترون برای الکترون‌ها و پوزیترون‌ها تعیین می‌شود. این برهم‌کنش‌ها با استفاده از مدل‌های فیزیک الکترومغناطیس شبیه‌سازی می‌شوند. این فرایندها با استفاده از مدل‌های فیزیکی برای فرایندهای الکترومغناطیسی در 4 G4EMSstandardphysics-option شبیه‌سازی شدند. شکل ۱ هندسه شبیه‌سازی Geant4 را نشان می‌دهد.



شکل (۱): هندسه شبیه‌سازی برای تعیین ویژگی‌های محافظ گاما.

محدوده انرژی فوتون گاما در ۰/۱۵ تا ۱۰ مگا الکترون‌ولت تعریف شد. همچنین، نمونه‌های شیشه‌ای با توجه به عدد جرمی، کسر وزن عنصر و چگالی نمونه‌ها مدل‌سازی شدند. یافته‌های حاصل از شبیه‌سازی‌های مونت‌کارلو نشان می‌دهد که با افزایش تعداد تکرارها، وزن‌های نسبی اختصاص داده شده به گزینه‌های نهایی تمایل به تثبیت دارند و در نتیجه قابلیت اطمینان آن‌ها افزایش می‌یابد. برای حفظ یکپارچگی تصادفی بودن در شبیه‌سازی، استفاده از یک مولد اعداد تصادفی باکیفیت بالا که با دوره طولانی و خواص آماری قوی مشخص می‌شود، بسیار مهم

یکپارچگی ساختار شیشه را حفظ می‌کند، درحالی که ۴۰ درصد وزنی آستانه حلالیت اکسید بیسموت را در بورات بدون جداسازی فاز ناخالصی نشان می‌دهد [۳۱، ۳۲].

انتخاب ۵ تا ۲۵ درصد وزنی اکسید بیسموت برای تعادل بین کارایی و هزینه انجام شد. تغییر در ترکیب بر اساس تغییرات درصد مولی ترکیبات نه تنها امکان مقایسه کنترل‌شده اثربخشی محافظ در بین نمونه‌ها را فراهم می‌کند، بلکه نشان می‌دهد که چگونه جایگزینی استراتژیک تشکیل‌دهنده شبکه سبک‌تر  $(B_2O_3)$  با  $Bi_2O_3$  سنگین، هم چگالی فیزیکی و هم قابلیت محافظت در برابر اشعه را افزایش می‌دهد و این سری را برای مطالعات همبستگی ساختار-ویژگی در طراحی پیشرفته شیشه محافظ در برابر اشعه ایده‌آل می‌کند. جزئیات شیشه‌های منتخب، شامل کسر وزنی عناصر تشکیل‌دهنده و چگالی در جدول ۱ قابل مشاهده است. جدول ۱ پنج ترکیب شیشه را به صورت سیستماتیک در درصد‌های وزنی، بر اساس سیستم شیشه‌ای  $Na_2O-Bi_2O_3-B_2O_3-CdO-ZnO$  مشخص شده، ارائه می‌دهد.

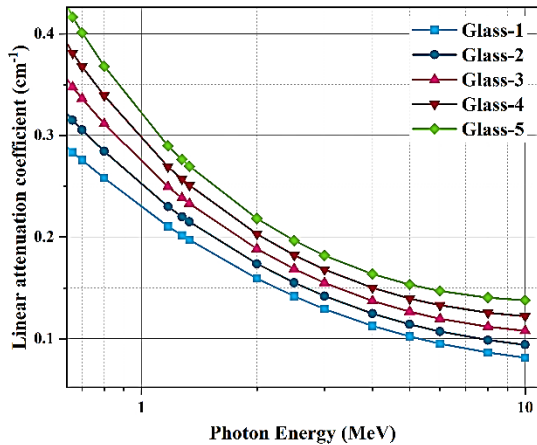
جدول (۱): مشخصات شیشه‌های منتخب.

درصد وزنی عناصر (mole%)					چگالی	نمونه‌ها
$B_2O_3$	$Bi_2O_3$	ZnO	$Na_2O$	CdO	( $g/cm^3$ )	
۷۰	۵	۱۰	۵	۱۰	۳/۳۶	Glass-۱
۶۵	۱۰	۱۰	۵	۱۰	۳/۹۸	Glass-۲
۶۰	۱۵	۱۰	۵	۱۰	۴/۳۰	Glass-۳
۵۵	۲۰	۱۰	۵	۱۰	۴/۶۲	Glass-۴
۵۰	۲۵	۱۰	۵	۱۰	۴/۹۵	Glass-۵

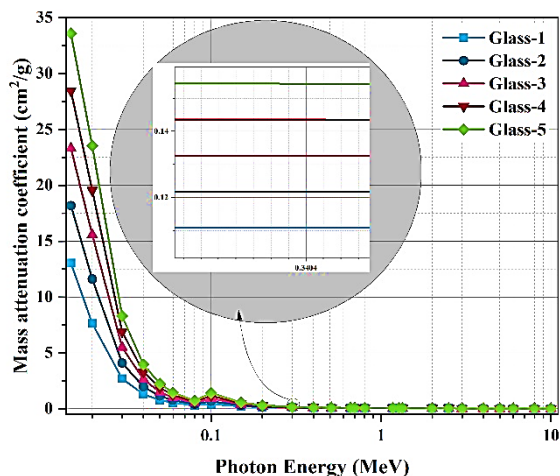
## ۱-۲. ابزار شبیه‌سازی

جعبه‌ابزار Geant4 یک شبیه‌سازی مونت‌کارلو پیشرفته را تشکیل می‌دهد که قابلیت مدل‌سازی دقیق انتشار ذرات باردار و غیرباردار (مانند فوتون‌ها، نوترون‌ها، الکترون‌ها و یون‌های سنگین) را در مواد مختلف دارد و به طور گسترده در طراحی حفاظ‌های تشعشعی، مطالعات دزیمتری و بهینه‌سازی سیستم‌های پرتویی استفاده می‌شود. برای محاسبه ضریب

شکل ۲ مشاهده می‌شود. شکل ۳، برای نشان دادن میزان تغییرات ضریب تضعیف خطی با افزایش احتمال برهم‌کنش تولید زوج است.



شکل (۳): تغییرات ضریب تضعیف خطی در بازه برهم‌کنش تولید زوج. همان‌طور که در شکل ۳ نشان داده شده است، کاهش شیب در منحنی ضریب تضعیف خطی با افزایش درصد وزنی اکسید بیسموت، نشانگر وابستگی قوی برهم‌کنش تولید زوج به  $Z^2$  است. این نتایج نشان می‌دهد افزودن ۲۵ درصد وزنی اکسید بیسموت نه تنها در انرژی‌های پایین (ناحیه برهم‌کنش فوتوالکتریک)، بلکه در ناحیه برهم‌کنش تولید زوج (انرژی‌های بالا) نیز راهبردی مؤثر برای توسعه مواد محافظ تشعشعی نسل جدید است. شکل ۴ تغییرات ضریب تضعیف جرمی را با انرژی فوتون را برای نمونه شیشه‌ای منتخب نشان می‌دهد.

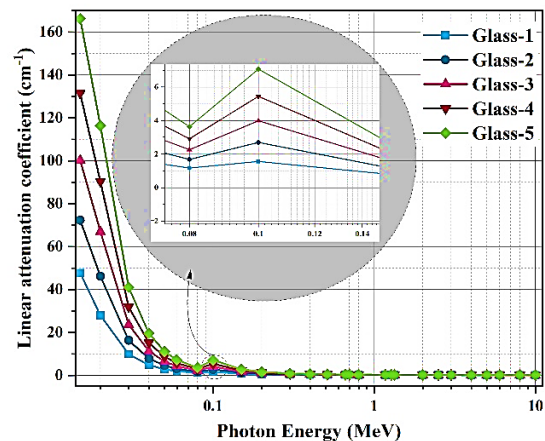


شکل (۴): تغییرات ضریب تضعیف جرمی بر حسب انرژی فوتون.

است. با توجه به منابع موجود، انجام شبیه‌سازی‌های انتقال ذرات با  $10^7$  تکرار یک رویکرد استاندارد و مؤثر برای اطمینان از نتایج قابل اعتماد است. به‌طور خلاصه، افزایش فرکانس تکرار رویدادها با قابلیت اطمینان نتایج همبستگی مثبت دارد [۳۴، ۳۳].

### ۳. نتایج و بحث

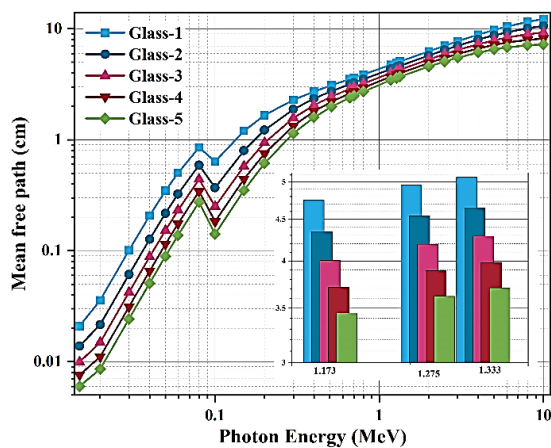
ترکیب شیمیایی (غلظت  $\text{Bi}_2\text{O}_3$  بر حسب مول)، انرژی فوتون، و سایر پارامترها همگی بر خواص محافظ تشعشع گاما نمونه‌های شیشه بورات تأثیر می‌گذارند. شکل ۲ تأثیر انرژی‌های پرتو گاما را بر مقادیر ضریب تضعیف خطی محاسبه شده در  $0.15$  تا  $10$  مگا الکترون‌ولت را نشان می‌دهد.



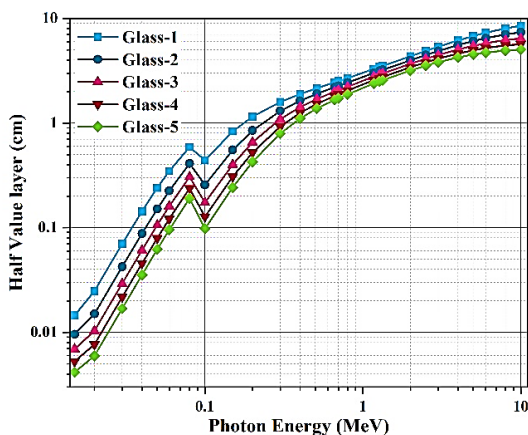
شکل (۲): تغییرات ضریب تضعیف خطی بر حسب انرژی فوتون.

کاهش قابل توجهی که در شکل ۲ بین انرژی  $0.15$  تا  $0.1$  مگا الکترون‌ولت دیده می‌شود. برهم‌کنش فوتوالکتریک، برهم‌کنش اولیه پرتو گاما در انرژی‌های پایین، دلیل اصلی این کاهش شدید است. در نتیجه، تعداد برهم‌کنش بین فوتون‌ها و الکترون‌ها در شیشه انتخاب شده کاهش می‌یابد و متناسب با آن تعداد فوتون جذب شده کاهش یافته و مقادیر ضریب تضعیف خطی را کاهش می‌دهد. در انرژی  $88/1$  کیلو الکترون‌ولت قله‌های غیرمنتظره به دلیل لبه‌ی جذب K عنصر بیسموت مشاهده می‌شود که در انرژی‌های مذکور مقادیر بسیار افزایش می‌یابد. سپس ضریب تضعیف خطی کاهش نمایی ملایمی را در انرژی فوتون  $0.3$  تا  $1$  مگا الکترون‌ولت نشان می‌دهد، همان‌طور که در

شکل ۶ ارائه شده است. پس از ۰/۱ مگا الکترون‌ولت، به دلیل برهم‌کنش پراکندگی کامپتون مقادیر مسافت آزاد میانگین و لایه نیم مقدار برای شیشه‌های منتخب، به هم نزدیک می‌شوند و پس از انرژی ۲ مگا الکترون‌ولت با افزایش احتمال برهم‌کنش تولید زوج تفاوت میان مقادیر افزایش می‌یابد. چگالی شیشه‌ها در محدوده  $3/66 \text{ g/cm}^3$  و  $4/95 \text{ g/cm}^3$  با افزودن  $\text{Bi}_2\text{O}_3$  افزایش می‌یابد. بنابراین، مشاهده می‌شود که با افزایش  $\text{Bi}_2\text{O}_3$ ، مقادیر لایه نیم مقدار کاهش می‌یابد که یک دلیل آن افزایش چگالی شیشه‌ها است. حداکثر مقادیر لایه نیم مقدار در انرژی ۱۰۰ کیلو الکترون‌ولت برای Glass-۱ و Glass-۵ به ترتیب ۰/۷ سانتی‌متر و ۰/۱ سانتی‌متر به دست آمد. این نتایج برای یک ماده محافظ مناسب برای پرتوهای گاما میت‌واند رضایت بخش باشد.



شکل (۵): تغییرات مسافت آزاد میانگین بر حسب انرژی فوتون.

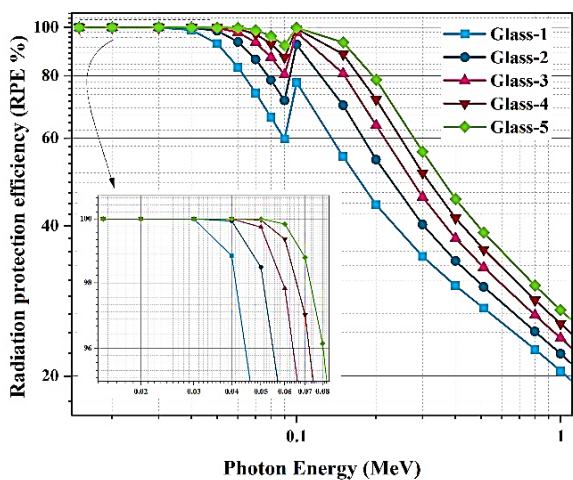


شکل (۶): تغییرات لایه نیم مقدار بر حسب انرژی فوتون.

واضح است که با افزایش انرژی فوتون، ضریب تضعیف جرمی کاهش می‌یابد. با افزایش محتوای  $\text{Bi}_2\text{O}_3$  در نمونه‌های شیشه‌ای منتخب، مقادیر ضریب تضعیف جرمی شیشه‌ها در انرژی‌های پایین، افزایش می‌یابد و با افزایش انرژی فوتون به تدریج کاهش می‌یابد. این رفتار فوتون با ماده را می‌توان بر اساس فرآیندهای برهم‌کنش‌های فوتون توضیح داد. از طرف دیگر، قابلیت تضعیف شیشه به شدت با ترکیب شیمیایی شیشه مرتبط است. به طوری که با افزایش محتوای  $\text{Bi}_2\text{O}_3$  در نمونه شیشه‌ای، فوتون‌های گاما تضعیف بیشتری را تجربه می‌کنند. علاوه بر این، به وضوح مشاهده می‌شود که منحنی شیشه Glass-۱ (با ۵ درصد وزنی محتوای  $\text{Bi}_2\text{O}_3$ ) قله‌ی کوچکی دارد. علاوه بر این، با افزایش محتوای  $\text{Bi}_2\text{O}_3$  در نمونه‌ها، قله‌ها شفاف‌تر و شدیدتر می‌شوند. همچنین، از این واقعیت می‌توان در بهینه‌سازی حفاظ پرتویی استفاده کرد. در نتیجه، می‌توان نتیجه گرفت که شیشه Glass-۵ در بین شیشه‌های پیشنهادی ما، توانایی برتری در کاهش پرتو گاما دارد.

وابستگی مقادیر لایه نیم مقدار و مسافت آزاد میانگین شیشه‌های منتخب به انرژی فوتون در شکل‌های ۵ و ۶ نشان داده شده است. روند تغییرات وابسته به انرژی هر دو پارامتر یکسان است. مقادیر لایه نیم مقدار و مسافت آزاد میانگین نقش زیادی در تعیین ضخامت مورد نظر مواد محافظ دارند. برای نمونه‌های شیشه‌ای منتخب با ۵ تا ۲۵ درصد وزنی اکسید بیسموت، مقادیر لایه نیم مقدار و مسافت آزاد میانگین تقریباً روند یکسانی را دارند، این در حالی است که نمونه Glass-۵ کمترین مقدار را در بین نمونه‌ها دارد. از شکل ۵ مشاهده می‌شود که اختلاف ۱/۵ سانتی‌متری بین مقادیر مسافت آزاد میانگین برای نمونه‌های شیشه‌ای منتخب در انرژی ۱/۱۷۳، ۱/۲۷۵ و ۱/۳۳۳ مگا الکترون‌ولت وجود دارد. لایه نیم مقدار که شدت تابش ورودی را به نصف کاهش می‌دهد، برای شیشه‌های منتخب در انرژی‌های فوتون ۰/۱۵ تا ۱۰ مگا الکترون‌ولت، در

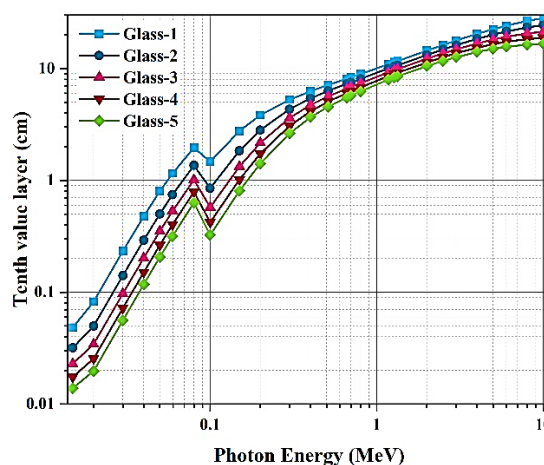
۶۰ تا ۸۷ درصد (در ۰/۱ مگا الکترون ولت) و ۲۰ تا ۳۲ درصد (در ۱ مگا الکترون ولت) همراه با افزایش غلظت اکسید بیسموت است. در انرژی‌های پایین‌تر از ۰/۰۶ مگا الکترون ولت، بازدهی حفاظت در برابر تشعشع برای تمام نمونه‌های شیشه منتخب، تقریباً ۱۰۰٪ است که نشان‌دهنده بازدهی بالای نمونه‌های شیشه‌ای منتخب در این انرژی‌ها است.



شکل (۸): تأثیر انرژی پرتو گاما بر بازدهی حفاظت در برابر تشعشع.

شکل ۹ نتایج بررسی وابستگی غیرخطی بازدهی به ضخامت را نشان می‌دهد. کاهش شدید ۶۴ درصد بازدهی هنگام کاهش ضخامت از ۲ به ۱ سانتی‌متر و افزایش تدریجی ۲۸ درصد بازدهی با افزایش ضخامت از ۱ به ۱/۵ سانتی‌متر از شکل ۹ مشاهده می‌شود. با افزایش ضخامت نمونه‌ها، طول مسیر پرتوهای گاما نیز افزایش می‌یابد که احتمال جذب فوتون‌ها را افزایش می‌دهد. این یک درک روشن از چگونگی تأثیر ضخامت مواد بر ویژگی‌های تضعیف پرتو گاما را فراهم می‌کند. ضخامت یکی از عوامل مهم برای تعیین تأثیر یک محافظ تشعشعی است، به‌ویژه هنگام در نظر گرفتن محدودیت‌های فضا و مکان است. در نتیجه، نمونه‌های شیشه‌ای ضخیم‌تر، توانایی خوبی برای محافظت در برابر پرتوهای گاما با انرژی بالا دارند اما می‌توان با افزودن درصد وزنی مناسب بیسموت، کاهش ضخامت را بهینه کرد به طوری که با ضخامت کم‌تر و صرفه‌جویی در حجم و

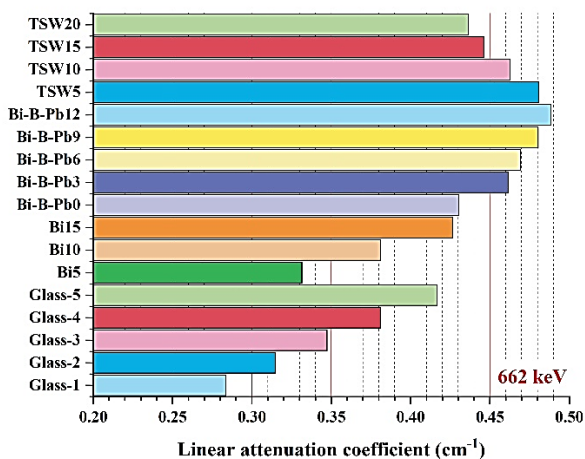
وابستگی مقادیر لایه یک‌دهم مقدار به تغییرات انرژی برای شیشه‌های منتخب، همانند مقادیر لایه نیم مقدار است. لایه یک‌دهم مقدار نقش زیادی در تعیین ضخامت موردنظر مواد محافظ برای کاهش اثرات پرتوهای گاما دارد. همان‌طور که از شکل ۷ مشاهده می‌شود، مقادیر لایه یک‌دهم مقدار نمونه‌های شیشه‌ای با افزایش انرژی پرتو گاما افزایش می‌یابد، درحالی که با افزایش میزان اکسید بیسموت کاهش می‌یابد. مقادیر لایه یک‌دهم مقدار همه نمونه‌ها نسبتاً نزدیک به هم هستند، درحالی که نمونه Glass-۵ کمترین مقدار را در بین نمونه‌ها دارد. در این شکل اثر لبه جذب در کاهش ضخامت به خوبی خودش را نشان می‌دهد.



شکل (۷): لایه یک‌دهم مقدار بر حسب انرژی فوتون.

علاوه بر این، برای بررسی میزان عملکرد شیشه‌های منتخب که بازدهی حفاظت در برابر تشعشع در شکل ۸ نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهد که بازدهی حفاظت در برابر تشعشع را برای نمونه‌های شیشه‌ای منتخب با افزایش انرژی فوتون، کاهش می‌یابد. افزایش غلظت اکسید بیسموت در انرژی ۵ تا ۱۰ مگا الکترون ولت باعث رفتار متفاوت بازدهی حفاظت در برابر تشعشع می‌شود. این تفاوت به دلیل جذب فوتون‌های اولیه با افزایش اتم‌های بیسموت در لایه‌های شیشه‌ای منتخب می‌شود. بنابراین، افزایش بازدهی حفاظت در برابر تشعشع بین

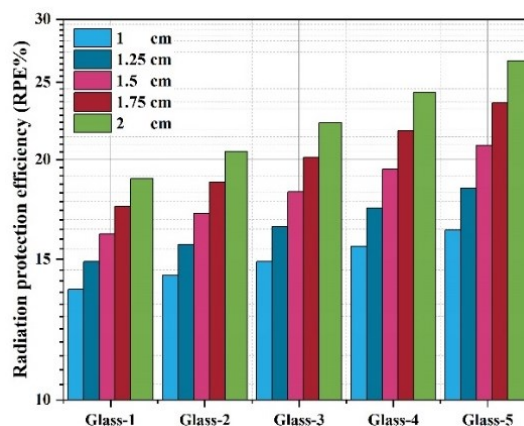
تنگستن، کمی کارایی کمتری دارند. مواد شیشه‌ای مقادیر متوسطی از ضریب تضعیف خطی را نشان می‌دهند که با کاربرد آن‌ها به عنوان سپرهای شفاف که در آن‌ها مقداری کاهش ضخامت قابل قبول است، سازگار است.



شکل (۱۰): مقایسه بین ضریب تضعیف خطی شیشه‌ای منتخب و برخی از شیشه‌های گزارش شده قبلی.

علاوه بر این، لایه نیم مقدار را برای طیف وسیعی از مواد محافظ رایج در ۶۶۲ کیلو الکترون‌ولت، یک سطح انرژی مرتبط با سزیم-۱۳۷ که از نظر بالینی و صنعتی مرتبط است، در ۱۱ نشان داده شده است. این مواد به دسته‌های زیر گروه‌بندی می‌شوند: شیشه سرب‌دار (Glass-۱ تا Glass-۵)، کامپوزیت‌های فقط بیسموت (Bi۵، Bi۱۰، Bi۱۵)، هیبریدهای بیسموت-بور-سرب (Bi-B-Pb۰ تا Bi-B-Pb۱۲) و آلایزهای پایه تنگستن (TSW۵ تا TSW۲۰). مقادیر لایه نیم مقدار پایین‌تر نشان دهنده عملکرد محافظ برتر است. قابل ذکر است که کامپوزیت Bi-B-Pb۱۲ با لایه نیم مقدار تقریباً ۱/۴ سانتی‌متر، بهترین عملکرد را نشان می‌دهد و پس از آن TSW۵ قرار دارد. در مقابل، شیشه استاندارد (Glass-۱) برای دستیابی به همان تضعیف به بیش از ۲/۴ سانتی‌متر نیاز دارد که نشان‌دهنده اثربخشی آرایش عناصر سنگین است. جالب توجه است که افزایش محتوای تنگستن بیش از ۵٪ (مثلاً TSW۲۰) منجر به لایه نیم مقدار بالاتری نسبت به TSW۵

وزن، بازدهی حفاظت در برابر تشعشع کاهش نیابد یا کاهش کمی داشته باشد. در نهایت، اهمیت بهینه‌سازی چندمتغیره برای کاربردهای عملی را نشان می‌دهد.



شکل (۹): تأثیر تغییرات ضخامت بر بازدهی حفاظت در برابر تشعشع در انرژی ۵۱۱ کیلو الکترون‌ولت.

برای ارزیابی کارایی نمونه‌های شیشه‌ای منتخب در تضعیف پرتوهای گاما، ضریب تضعیف خطی نمونه‌های شیشه‌ای منتخب با ضریب تضعیف خطی برخی شیشه‌های گزارش شده در مقالات برای همان هدف [۳۷-۳۵]، مقایسه شد که در شکل ۱۰ ارائه شده است. در انرژی فوتون ۰/۶۶۲ مگا الکترون‌ولت، ضریب تضعیف خطی نمونه‌های شیشه‌ای منتخب به ترتیب ۰/۲۸۳۴، ۰/۳۱۴۹، ۰/۳۴۷۴، ۰/۳۸۱۱ و ۰/۴۱۶۵ برای نمونه‌های شیشه‌ای Glass-۱ الی Glass-۵ است. این موضوع تأیید می‌کند که Bi-B-Pb۱۲ و TSW۵ مؤثرترین مواد در بین مواد رایج هستند.

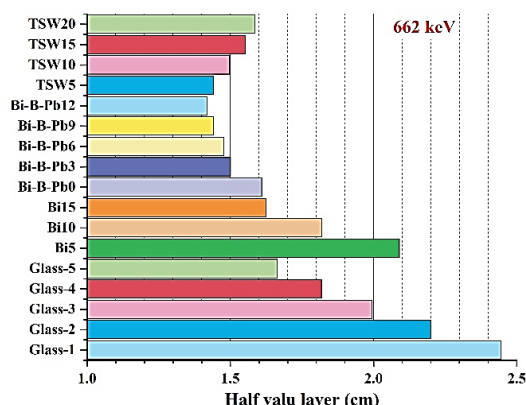
نمودار همچنین نشان می‌دهد که حتی افزودن اندک سرب به ماتریس‌های بیسموت-بور (از Bi-B-Pb۰ تا Bi-B-Pb۱۲) به طور قابل توجهی ضریب تضعیف خطی را افزایش می‌دهد و اثر هم‌افزایی ترکیب عناصر با عدد اتمی بالا را نشان می‌دهد. برعکس، در حالی که مواد بیسموت خالص (Bi۵-Bi۱۵) با محتوای Bi بالاتر بهبود نشان می‌دهند، اما نسبت به کامپوزیت‌های تقویت‌شده با سرب یا کامپوزیت‌های مبتنی بر

در تمام پارامترها و انرژی‌ها تأیید می‌کند که افزایش ترکیب (احتمالاً از طریق افزایش  $\text{Bi}_2\text{O}_3$  یا سایر اکسیدهای سنگین) مستقیماً قابلیت محافظت را بهبود می‌بخشد و Glass-۵ را به کاندیدای بهینه برای کاربردهای عملی که نیاز به موانع تابشی فشرده و کارآمد دارند، تبدیل می‌کند.

جدول (۲): تغییرات لایه نیم‌مقدار (HVL)، لایه یک‌دهم‌مقدار (TVL) و راندمان حفاظت در برابر تشعشع (RPE).

Energy (MeV)	Glass Sample	HVL (cm)	TVL (cm)	RPE (%)
۰/۰۱۵	Glass-۱	۰/۰۱۲	۰/۰۴۰	۹۹/۹۹
	Glass-۲	۰/۰۱۱	۰/۰۳۷	۹۹/۹۹
	Glass-۳	۰/۰۱۰	۰/۰۳۳	۹۹/۹۹
	Glass-۴	۰/۰۰۹	۰/۰۳۰	۹۹/۹۹
	Glass-۵	۰/۰۰۸	۰/۰۲۷	۹۹/۹۹
۰/۰۶۶۲	Glass-۱	۰/۲۵۰	۰/۸۳۰	۹۹/۹۹
	Glass-۲	۰/۲۳۰	۰/۷۷۰	۹۹/۹۹
	Glass-۳	۰/۲۱۰	۰/۷۰۰	۹۹/۹۹
	Glass-۴	۰/۱۹۰	۰/۶۳۰	۹۹/۹۹
	Glass-۵	۰/۱۷۰	۰/۵۷۰	۹۹/۹۹
۰/۱	Glass-۱	۰/۲۶۰	۰/۸۷۰	۹۹/۹۸
	Glass-۲	۰/۲۴۰	۰/۸۰۰	۹۹/۹۸
	Glass-۳	۰/۲۲۰	۰/۷۲۰	۹۹/۹۸
	Glass-۴	۰/۲۰۰	۰/۶۷۰	۹۹/۹۸
	Glass-۵	۰/۱۸۰	۰/۶۰۰	۹۹/۹۸
۰/۵	Glass-۱	۰/۸۶۰	۲/۸۶۰	۹۹/۹۰
	Glass-۲	۰/۸۰۰	۲/۶۷۰	۹۹/۹۱
	Glass-۳	۰/۷۳۰	۲/۴۳۰	۹۹/۹۲
	Glass-۴	۰/۶۷۰	۲/۲۳۰	۹۹/۹۳
	Glass-۵	۰/۶۰۰	۲/۰۰۰	۹۹/۹۴
۱	Glass-۱	۱/۷۳۰	۵/۷۵۰	۹۹/۵۰
	Glass-۲	۱/۵۹۰	۵/۲۹۰	۹۹/۵۵
	Glass-۳	۱/۴۵۰	۴/۸۲۰	۹۹/۶۰
	Glass-۴	۱/۳۳۰	۴/۴۲۰	۹۹/۶۵
	Glass-۵	۱/۲۰۰	۴/۰۰۰	۹۹/۹۷
۱۰	Glass-۱	۳/۴۶۰	۱۱/۵۰۰	۹۸/۰۰
	Glass-۲	۳/۱۸۰	۱۰/۵۷۰	۹۸/۲۰
	Glass-۳	۲/۹۰۰	۹/۶۵۰	۹۸/۴۰
	Glass-۴	۲/۶۶۰	۸/۸۵۰	۹۸/۶۰
	Glass-۵	۲/۴۰۰	۸/۰۰۰	۹۸/۸۰

می‌شود که نشان‌دهنده رفتار غیرخطی یا ترکیب ماتریس غیربهینه در بارگذاری‌های بالاتر است.



شکل (۱۱): مقایسه بین لایه نیم‌مقدار شیشه‌ای منتخب و برخی از شیشه‌های گزارش شده قبلی.

جدول ۲ عملکرد محافظت در برابر پرتو گاما پنج نمونه شیشه منتخب را در شش انرژی فوتون (۰/۰۱۵ تا ۱۰ MeV) مقایسه می‌کند و معیارهای کلیدی لایه نیم‌مقدار (HVL)، لایه یک‌دهم‌مقدار (TVL) و راندمان محافظت در برابر تشعشع (RPE) را گزارش می‌دهد. در انرژی‌های پایین (۰/۰۱۵ تا  $1 \text{ MeV}$ )، همه شیشه‌ها لایه نیم‌مقدارهای بسیار پایین ( $\geq 0.26 \text{ cm}^{-1}$ ) و راندمان محافظت در برابر تشعشع تقریباً کامل ( $\leq 99/98\%$ ) را نشان می‌دهند که نشان‌دهنده تضعیف قوی تحت سلطه جذب فوتوالکتریک است و Glass-۵ به دلیل چگالی بالاتر یا محتوای عدد اتمی به‌طور مداوم از سایرین بهتر عمل می‌کند. با افزایش انرژی به ۰/۵ تا  $10 \text{ MeV}$ ، کمیت‌ها به‌طور قابل توجهی افزایش می‌یابند که نشان‌دهنده غلبه پراکندگی کامپتون و کاهش راندمان تضعیف است. با وجود این، راندمان محافظت در برابر تشعشع همچنان بالا است (بیش از  $98\%$  برای همه نمونه‌ها در  $10 \text{ MeV}$ )، که نشان می‌دهد حتی در انرژی‌های بالا، این شیشه‌ها در صورت استفاده در ضخامت کافی، محافظت قابل توجهی ارائه می‌دهند. روند ثابت

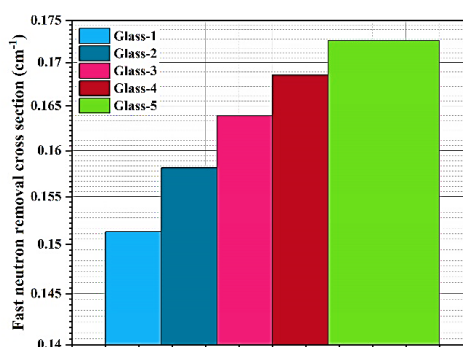
$$- \text{Glass-۵} > \text{Glass-۴} > \text{Glass-۳} > \text{Glass-۲} > \text{Glass-۱} -$$

مزیت‌های وزن کم‌تر و ایمنی زیست‌محیطی بیشتری نیز برخوردارند. با این حال، چند محدودیت وجود دارد، از جمله اینکه افزایش غلظت  $\text{Bi}_2\text{O}_3$  تا ۲۵ درصد وزنی، هرچند ضریب تضعیف را به‌طور چشمگیری بهبود می‌بخشد، اما حلالیت محدود  $\text{Bi}_2\text{O}_3$  در ماتریس شیشه مانع از دستیابی به غلظت‌های بالاتر می‌شود. چالشی که می‌تواند در مطالعات آینده با استفاده از نانوذرات  $\text{Bi}_2\text{O}_3$  یا ترکیب آن با نانوذرات اکسیدهای سنگین دیگر (مانند  $\text{Gd}_2\text{O}_3$  یا  $\text{WO}_3$ ) برطرف شود. از دیدگاه کاربردی، این شیشه‌های نوین به‌ویژه در پزشکی برای ساخت محافظ‌های شفاف بدون سرب در اتاق‌های سی‌تی‌اسکن، فلوروسکوپی و پرتونگاری تشخیصی؛ در نیروگاه‌های هسته‌ای برای پوشش کابل‌های فیبر نوری در برابر تابش گاما و حفظ یکپارچگی سیگنال و همچنین در صنایع مرتبط با بازرسی غیرمخرب (مانند نفت و گاز و هوافضا) به‌عنوان پنجره‌های مشاهده یا محافظ‌های سبک‌وزن برای منابع صنعتی (مانند  $^{192}\text{Ir}$  یا  $^{60}\text{Co}$ ) کاربرد گسترده‌ای خواهند داشت و به‌عنوان راه‌حلی مقیاس‌پذیر، ایمن و پایدار برای نیازهای روزافزون محافظت در برابر تابش در بخش‌های حساس صنعتی و پزشکی مطرح می‌شوند.

### ۳. نتیجه‌گیری

در این مطالعه، خواص محافظ گاما برای نمونه‌های شیشه‌ای منتخب بر پایه بورات با یون‌های روی و سدیم مانند ضریب تضعیف جرمی، ضریب تضعیف خطی، لایه نیم مقدار، لایه یک‌دهم مقدار، مسافت آزاد میانگین و موارد دیگر را در محدوده انرژی فوتون ۰/۱۵ تا ۱۰ مگا الکترون‌ولت بررسی کردیم. نتایج را با استفاده از ابزار شبیه‌سازی مونت‌کارلوی Geant4 به دست آوردیم. نتایج نشان داد که در انرژی‌های کم‌تر از ۱۵۰ کیلو الکترون‌ولت لبه‌های جذب باعث بهتر شدن عملکرد حفاظ می‌شود و در انرژی‌های بالاتر اثر چگالی در تضعیف فوتون‌ها بهتر خودش را نشان می‌دهد. در واقع، لایه نیم مقدار، لایه

در نهایت، شکل ۱۲، سطح مقطع حذف نوترون‌های سریع را برای نمونه‌های شیشه‌ای منتخب نشان می‌دهد. برای نمونه‌های شیشه‌ای منتخب، مقادیر سطح مقطع حذف نوترون‌های سریع با افزایش درصد اکسید بیسموت در کنار بور که جاذب خوبی برای نوترون‌ها حرارتی است، افزایش یافت. کنار هم قرار گرفتن این دو عنصر برای اثر ترکیبی تعدیل نوترون‌های سریع و سپس جذب نوترون‌های تعدیل یافته است. مقادیر سطح مقطع حذف نوترون‌های سریع شیشه‌ها منتخب، به ترتیب از ۰/۱۵ تا ۰/۱۷ افزایش یافت. نمونه شیشه‌ای Glass-5 نسبت به دیگر شیشه‌های منتخب با درصد پایین اکسید بیسموت در جذب نوترون‌های سریع مؤثرتر است. زیرا بیسموت سطح مقطع بالاتری برای نوترون‌های سریع دارد و با افزایش درصد بیسموت احتمال برهم‌کنش نوترون‌های سریع افزایش می‌یابد. واضح است که نمونه‌های شیشه‌ای منتخب در کاهش نوترون‌ها در مقایسه با آب و پارافین با سطح مقطع حذف نوترون‌های سریع ( $\text{cm}^{-1}$ ) ۰/۱۰۱ که تعدیل‌کننده‌های نوترون سنتی هستند، نیز موفق هستند. این نتایج نشان می‌دهد شیشه‌های منتخب نه تنها در جذب پرتو گاما، بلکه در مدیریت نوترون‌های سریع نیز از مواد سنتی پیشی گرفته است.



شکل (۱۲): تغییرات سطح مقطع حذف نوترون‌های سریع.

این مطالعه به طور موفقیت‌آمیزی شیشه‌های بوراتی اصلاح‌شده با  $\text{Bi}_2\text{O}_3$  همراه با یون‌های روی و سدیم را بررسی کرد و نشان داد که خواص محافظت پرتویی این شیشه‌ها قابل مقایسه با مواد سنتی مبتنی بر سرب و سایر عناصر سنگین است، در حالی که از

تضعیف از طریق افزایش سطح و اثرات رابط بررسی کنید. علاوه بر این، اعتبارسنجی تجربی عملی مانند اندازه‌گیری‌های طیف‌سنجی گاما با استفاده از منابع استاندارد باید برای مقایسه نتایج شبیه‌سازی شده با عملکرد دنیای واقعی انجام شود. مطالعات مقایسه‌ای با مواد محافظ مرسوم (به‌عنوان مثال، شیشه سربی، بتن یا فولاد) از نظر وزن، هزینه، دوام و تولید تابش ثانویه نیز بینش‌های ارزشمندی را برای پذیرش صنعتی ارائه داد. نوآوری مداوم در کامپوزیت‌های شیشه‌ای چندمنظوره در نهایت می‌تواند منجر به راه‌حل‌های سبک، شفاف و محافظ دوگانه نوترون-گاما برای سیستم‌های حفاظت در برابر تابش نسل بعدی شود.

#### ۴. تشکر و قدردانی

نویسندگان این مقاله از مرکز علم و فناوری فیزیک به‌منظور پیش‌برد پژوهش حاضر و حمایت معنوی از آن تشکر و قدردانی می‌نمایند.

یک‌دهم مقدار، مسیر آزاد میانگین برای نمونه‌های شیشه‌ای انتخاب‌شده نشان می‌دهد که با افزایش انرژی فوتون، تضعیف کاهش می‌یابد. با توجه به افزودن اکسید بیسموت میزان تضعیف به مقدار قابل‌توجهی افزایش یافت. در انرژی پرتو گاما ۵۱۱ کیلو الکترون‌ولت و ضخامت ۲ سانتی‌متری، بازدهی حفاظت در برابر تشعشع نمونه‌های شیشه‌ای منتخب از ۱۳ به ۲۷ افزایش یافت. سطح مقطع حذف نوترون‌های سریع نیز با افزودن اکسید بیسموت در کنار بورات باعث بهبود عملکرد نمونه‌های شیشه‌ای شد. ترکیب بهینه انتخاب‌شده از اکسید بیسموت ۲۵ درصد وزنی، ۱۲ درصد افزایش در تضعیف پرتو گاما در مقایسه با ۲۰ درصد وزنی اکسید بیسموت نشان داد. این یافته‌ها راه را برای توسعه مواد محافظ تابشی با کارایی بالا، بدون سرب و سازگار با محیط‌زیست که برای کاربردهای پزشکی، هسته‌ای و صنعتی مناسب هستند، هموار می‌کند. برای تحقیقات آینده، توصیه می‌کنیم که ترکیب نانوذرات با عدد اتمی بالا (به‌عنوان مثال، نانوذرات  $\text{WO}_2$ ،  $\text{Bi}_2\text{O}_3$  یا  $\text{Gd}_2\text{O}_3$ ) را برای افزایش بیشتر

#### ۵. مراجع

1. M.S. Al-Buriah, C. Eke, S. Alomairy, C. Mutuwong, N. Sfina. Microhardness and gamma-ray attenuation properties of lead iron phosphate glasses. *J. Mater. Sci. Mater. Elect.* 32 (10) (2021) 13906–13916.
2. Y. Al-Hadeethi, M. Sayyed, Y. Rammah. Fabrication, optical, structural and gamma radiation shielding characterizations of  $\text{GeO}_2\text{-PbO-Al}_2\text{O}_3\text{-CaO}$  glasses. *Ceramics Int.* 46 (2) (2019) 2055–2062.
3. B. Albarzan, A.H. Almuqrin, E.A. Wahab, K. Mahmoud, K. Shaaban, M. Sayyed. Effect of  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  doping on structural, FTIR and radiation shielding characteristics of aluminum-lead-borate glasses. *Prog. Nucl. Energy* 141 (2021) 103931.
4. I. Boukhris, I. Kebaili, A. Al-Buriah, A. Abouhaswa, B. Tonguc. Photon and electron attenuation parameters of phosphate and borate bioactive glasses by using Geant4 simulations. *Ceramics Int.* 46 (15) (2020) 24435–24442.
5. M. Sayyed, H. Tekin, O. Agar. Gamma photon and neutron attenuation properties of  $\text{MgO-BaO-B}_2\text{O}_3\text{-TeO}_2\text{-Cr}_2\text{O}_3$  glasses: The role of  $\text{TeO}_2$ . *Radiat. Phys. Chem.* 163 (2019) 58–66.
6. A. Saeed, R.M.E. Shazly, Y.H. Elbasha, A.M.A. El-Azm, M.M. El-Okri, M.N.H. Comsan, et al. Gamma ray attenuation in a developed borate glass system. *Radiat. Phys. Chem.* 102 (2014) 167–170.
7. P. Limkitjaroenporn, J. Kaewkhao, P. Limsuwan, W. Chewpraditkul. Physical, optical, structural and gamma-ray shielding properties of lead sodium borate glasses. *J. Phys. Chem. Solids* 72(4) (2011) 245–251.
8. S. Kaur, K.J. Singh. Investigation of lead borate glasses doped with aluminum oxide as gamma ray shielding materials. *Ann. Nucl. Energy* 63 (2013) 350–354.
9. G. Lakshminarayana, H.O. Tekin, M.G. Dong, Al-Buriah, D.E. Lee, J. Yoon, T. Park. Comparative assessment of fast and thermal neutrons and gamma radiation protection qualities combined with mechanical factors of different borate-based glass systems. *Res. Phys.* 37 (2022) 105527.

10. Y. Al-Hadeethi, M.I. Sayyed. BaO–Li<sub>2</sub>O–B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> glass systems: Potential utilization in gamma radiation protection. *Prog. Nucl. Energy* 129 (2020) 103511.
11. H. Al-Ghamdi, M.I. Sayyed, A. Kumar, S. Yasmin, B.O. Elbashir, A.H. Almuqrin. Effect of PbO and B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> on the physical, structural, and radiation shielding properties of PbO–TeO<sub>2</sub>–MgO–Na<sub>2</sub>O–B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> glasses. *Sustainability* 14 (15) (2022) 9695.
12. M.H.A. Mhareb, M. Alqahtani, F. Alshahri, Y.S.M. Alajerami, N. Saleh, N. Alonizan, et al. The impact of barium oxide on physical, structural, optical, and shielding features of sodium zinc borate glass. *J. Non-Crystalline Solids* 541 (2020) 120090.
13. M.S. Al-Buriahi, R. Kurtulus, C. Eke, S. Alomairy, I.O. Olarinoye. An insight into advanced glass systems for radiation shielding applications: A review on different modifiers and heavy metal oxides-based glasses. *Heliyon* 10 (22) (2024) e40249.
14. Y.S. Rammah, G. Kilic, R. El-Mallawany, U.G. Issever, F.I. El-Agawany. Investigation of optical, physical, and gamma-ray shielding features of novel vanadyl borophosphate glasses. *J. Non-Crystalline Solids* 533 (2020) 119905.
15. H.O. Tekin, E.E. Altunsoy, E. Kavaz, M.I. Sayyed, O. Agar, M. Kamislioglu. Photon and neutron shielding performance of boron phosphate glasses for diagnostic radiology facilities. *Res. Phys.* 12 (2019) 1457–1464.
16. T. Hasegawa. Optical properties of Bi<sub>2</sub>O<sub>3</sub>–TeO<sub>2</sub>–B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> glasses. *J. Non-Crystalline Solids* 357 (15) (2011) 2857–2862.
17. W. Marlitan, P. Venkateswara Rao, H.O. Tekin, M.I. Sayyed, R. Klement, D. Galusek, G. Lakshminarayana, et al. Analysis of red mud doped Bi<sub>2</sub>O<sub>3</sub>–B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>–BaO glasses for application as glass solder in radiation shield repair using MCNPX simulation. *Ceram. Int.* 45 (2019) 7619–7626.
18. S. Wang, B. Lai, Y. Hsu, C. Lu. Dielectric properties of CaO–B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>–SiO<sub>2</sub> glass-ceramic systems in the millimeter-wave frequency range of 20–60 GHz. *Ceramics Int.* 47(16) (2021b) 22627–22635.
19. G. AlMisned, G. Bilal, D.S. Baykal, F.T. Ali, G. Kilic, H.O. Tekin. Bismuth (III) oxide and boron (III) oxide substitution in bismuth-boro-zinc glasses: A focusing on nuclear radiation shielding properties. *Optik* 272 (2022) 170214.
20. M. Ezzeldin, L.M. Al-Harbi, Sadeq, A.E.R. Mahmoud, M.A. Muhammad, H.A. Ahmed. Impact of CdO on optical, structural, elastic, and radiation shielding parameters of CdO–PbO–ZnO–B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>–SiO<sub>2</sub> glasses. *Ceramics Int.* 49(11) (2023) 19160–19173.
21. H.O. Tekin, E. Kavaz, E.E. Altunsoy, M. Kamislioglu, O. Kilicoglu, O. Agar, M.I. Sayyed, N. Tarhan. Characterization of a broad range gamma-ray and neutron shielding properties of MgO–Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>–SiO<sub>2</sub>–B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and Na<sub>2</sub>O–Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>–SiO<sub>2</sub> glass systems. *J. Non-Crystalline Solids*. 518 (2019) 92–102.
22. L. Zhang, Q. Sun, J. Wang, Z. Zhang, W. Zhang, J. Wang, H. Chen, M. Li. Effect of SrO content on microstructure of Bi<sub>2</sub>O<sub>3</sub>–B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>–ZnO–BaO–SrO low-melting glass frit and joining performance of sodalime glass substrates. *J. Alloys Compd.* 872 (2021) 159707.
23. W. Guo, L. Fu, P. He. Crystallization behavior in Bi<sub>2</sub>O<sub>3</sub>–B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>–ZnO glass braze and its application for joining ferrite ceramics at a relatively low temperature. *Crystals* 11 (8) (2021) 1007.
24. K. Singh, S. Kaur, R. Kaundal. Comparative study of gamma ray shielding and some properties of PbO–SiO<sub>2</sub>–Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and Bi<sub>2</sub>O<sub>3</sub>–SiO<sub>2</sub>–Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> glass systems. *Radiat. Phys. Chem.* 96 (2013) 153–157.
25. A. Kozlovskiy, M. Zdorovets. Effect of doping of Ce<sup>4+/3+</sup> on optical, strength and shielding properties of (0.5-x) TeO<sub>2</sub>–0.25MoO<sub>3</sub>–0.25Bi<sub>2</sub>O<sub>3</sub>–xCeO<sub>2</sub> glasses. *Mater. Chem. Phys.* 263 (2021) 124444.
26. S. Kaewjaeng, N. Chanthima, J. Thongdang, S. Reungsri, S. Kothan, J. Kaewkhao. Synthesis and radiation properties of Li<sub>2</sub>O–BaO–Bi<sub>2</sub>O<sub>3</sub>–P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> glasses. *Mater. Today Proc.* 43 (2021) 2544–2553.
27. M.R. Alipoor, M. Eshghi, Simulation and extraction Protective properties of bismuth-based heterojunction Nanocomposites for shielding against gamma rays. *Nano World* 20(74) (2024) 34–26.
28. W. Cheewasukhanont, P. Limkitjaroenporn, S. Kaewjaeng, W. Chaiphaksa, W. Hongtong, J. Kaewkhao. Development of bismuth sodium borate glasses for radiation shielding material. *Mater. Today Proc.* 43 (2021) 2508–15.
29. D.A. Aloraini, A.H. Almuqrin, A. Saeed. Impact of Bi<sup>3+</sup>, Ba<sup>2+</sup>, and Pb<sup>2+</sup> ions on the structural, thermal, mechanical, optical, and gamma ray shielding performance of borosilicate glass. *Optical Quantum Elect.* 56(1) (2023) 126.
30. D. Möncke, E.I. Kamitsos, D. Palles, R. Limbach, A. Winterstein-Beckmann, T. Honma, et al. Transition and post-transition metal ions in borate glasses: Borate ligand speciation, cluster formation, and their effect on glass transition and mechanical properties. *J. Chem. Phys.* 145 (12) (2016) 124501.
31. K. Maheshvaran, K. Kannan, M. Vijayakumar, C. Selvakumar, S.R. Atithya, A.G. Al-Sehemi, N. Basavegowda. Monte Carlo Simulation and Comprehensive Analysis of Bismuth Borate Glasses: Structural, Elastic, Optical, and Radiation Shielding Properties for Radioactive Waste Management applications. *Ceramics Int.* 51 (13) (2025) 17641–17656.

32. K. Kaur, K.J. Singh, V. Anand. Structural properties of  $\text{Bi}_2\text{O}_3\text{-B}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2\text{-Na}_2\text{O}$  glasses for gamma ray shielding applications. *Radiat. Phys.Chem.* 120 (2015) 63–72.
33. M.S. Al-Buriah, H. Arslan, H. O. Tekin, V. P. Singh, B.T. Tonguc.  $\text{MoO}_3\text{-TeO}_2$  glass system for gamma ray shielding applications. *Mater. Res. Express* 7 (2) (2020) 025202.
34. M.R. Alipoor, M. Eshghi. Nickel/Multiwalled carbon nanotube composites as Gamma-Ray shielding. *Nano* 19 (06) (2024) 2450027.
35. M.I. Sayyed, H.O. Tekin, E.E. Altunsoy, S.S. Obaid, M. Almatari. Radiation shielding study of tellurite tungsten glasses with different antimony oxide as transparent shielding materials using MCNPX code. *J. Non-Crystalline Solids* 498 (2018) 167–172.