

مطالعه خواص حفاظی شیشه‌های سیلیسیومی حاوی اکسید بیسموت در غلظت‌های مختلف

رضا باقری^{۱*}

^۱پژوهشکده کاربرد پرتوها، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، تهران، ایران.

*تهران، خیابان کارگر شمالی، سازمان انرژی اتمی ایران، کد پستی: ۱۴۳۹۹۵۱۱۱۳.

پست الکترونیکی: rzbagheri@aeoi.org.ir

چکیده

با کاربرد گسترده چشمه‌های تابش و مواد رادیواکتیو در پزشکی، صنعت و کشاورزی، مطالعه تضعیف و جذب پرتوهای ایکس و گاما و حفاظ‌گذاری در برابر آن‌ها به یک شاخه ضروری و مهم در زمینه حفاظت در برابر پرتوها تبدیل شده است. بتن‌ها به‌عنوان معمول‌ترین مواد برای حفاظ‌گذاری به‌کار می‌روند. با این حال یکی از بزرگ‌ترین معایب آن‌ها عدم عبور نور مرئی از آن‌هاست. همچنین سرب به‌عنوان یک حفاظ پرکاربرد به‌خاطر مشکلات زیست‌محیطی و سمیت برای انسان در حال جایگزینی با سایر اکسیدهای فلزی سنگین است. در این کار تحقیقاتی ضرایب تضعیف خطی و جرمی، اعداد اتمی مؤثر و چگالی الکترونی مؤثر شیشه‌های سیلیسیومی حاوی اکسید بیسموت (Bi_2O_3) در غلظت‌های مختلف در انرژی‌های ۱۱۷۳، ۶۶۲ و ۱۳۳۲ کیلو الکترون‌ولت با استفاده از کد محاسباتی MCNPX و برنامه XCOM محاسبه شده و داده‌های به‌دست‌آمده با نتایج تجربی موجود مقایسه می‌شوند. شیشه‌های بیسموت-سیلیکاتی، خواص حفاظی خیلی خوبی از خود در برابر پرتوهای گاما نشان دادند.

کلیدواژگان: ضرایب تضعیف خطی و جرمی، شیشه بیسموت-سیلیکاتی، MCNPX، XCOM.

۱. مقدمه

یکی از اکسیدهای فلزی پرکاربرد به همراه شیشه‌های مختلف، اکسید سرب (PbO) است که این اکسید فلزی به خاطر مشکلات زیست‌محیطی و سمیت برای انسان در حال جایگزینی با سایر اکسیدهای فلزی سنگین است [۴].

در این کار تحقیقاتی شیشه‌های سیلیسیومی حاوی اکسید بیسموت (Bi_2O_3) در غلظت‌های مختلف در نظر گرفته شدند. بیسموت با عدد اتمی ۸۳، باعث بهبود خواص حفاظی شیشه می‌شود [۵]. بیسموت، برخلاف سرب آلوده‌کننده محیط زیست نبوده و سمی نیست. بیسموت باعث افزایش پایداری ساختار

امروزه کاربرد چشمه‌های تابش و مواد رادیواکتیو در زمینه‌های مختلف از قبیل نیروگاه‌های هسته‌ای، پزشکی هسته‌ای و صنعت و کشاورزی، مطالعه پارامترهای مختلف مرتبط با حفاظ‌گذاری در برابر تابش‌های یونیزان را ضروری کرده است [۱، ۲]. بتن‌ها به عنوان معمول‌ترین مواد برای حفاظ‌گذاری به‌کار می‌روند. با این حال یکی از بزرگ‌ترین معایب آن‌ها عدم عبور نور مرئی از آن‌هاست [۳]. برای حل مشکلاتی از این قبیل، شیشه‌های مختلفی همراه با غلظت‌های مختلف اکسیدهای فلزی عناصر سنگین برای کاربردهای مختلف صنعت هسته‌ای معرفی شده‌اند.

شیشه شده و دوام شیمیایی آن را افزایش می‌دهد. این نوع شیشه‌ها دارای ضریب انبساط حرارتی پایین، مقاوم در برابر شوک‌های حرارتی و توانایی عبور بالای نور مرئی هستند [۵، ۶]. همچنین شیشه سیلیسومی به‌خاطر تهیه و ساخت راحت و خواص عالی در عبور نور مرئی از خود به‌عنوان پرکاربردترین شیشه در زمینه حفاظ گذاری تابش به‌کار می‌رود [۷، ۸].

کارهای تحقیقاتی فراوانی در رابطه با خواص حفاظی شیشه‌های حاوی اکسیدهای فلزی در برابر پرتوهای گاما به‌صورت تجربی و تئوری انجام گرفته است.

سینگ و همکاران [۴]، ضرایب تضعیف پرتو گامای چشمه‌های کبالت-۶۰ و سزیم-۱۳۷ را به‌صورت تجربی برای ترکیب $x\text{PbO}(1-x)\text{SiO}_2$ در غلظت‌های مختلف اکسید سرب ($x=0/45-0/70$) بررسی کردند. مقادیر ضرایب تضعیف جرمی و اعداد اتمی مؤثر شیشه‌های فسفاتی و سیلیسیومی حاوی مقادیر مختلف اکسید بیسموت، اکسید سرب و اکسید باریوم در انرژی ۶۶۲ keV توسط کاوخوا و همکاران [۹] و کیردسیری و همکاران [۶] به‌صورت تجربی اندازه‌گیری گردید. بوتجماجی و همکاران [۱۰] ضرایب تضعیف شیشه‌های باریوم-بیسموت-بروسیلیکاتی را برای چشمه‌های کبالت-۶۰ و سزیم-۱۳۷ اندازه‌گیری کردند. خواص حفاظی شیشه‌های حاوی اکسیدهای فلزی سنگین با استفاده از روش مونت کارلو و کد MCNP توسط الخياط و همکارانش [۱۱، ۱۲] محاسبه شد.

۲. مواد و روش‌ها

در این مقاله، ضرایب تضعیف خطی و جرمی، اعداد اتمی مؤثر و چگالی الکترونی مؤثر شیشه‌های سیلیسیومی حاوی اکسید بیسموت (Bi_2O_3) در غلظت‌های ۳۰، ۴۰، ۵۰، ۶۰ و ۷۰ درصد وزنی (%Wt.) در انرژی‌های ۱۱۷۳، ۶۶۲ و ۱۳۳۲ کیلو الکترون ولت با استفاده از کد محاسباتی MCNPX [۱۳] و

برنامه XCOM [۱۴] محاسبه شده و داده‌های به‌دست آمده با نتایج تجربی موجود مقایسه می‌شوند [۶].

کد محاسباتی MCNPX که بر پایه تکنیک مونت کارلو استوار است قادر به ترابرد فوتون‌های گاما در داخل نمونه‌های شیشه و برای انرژی مدنظر است [۱۳]. همچنین مقادیر تئوری ضرایب تضعیف جرمی عناصر، ترکیبات و مخلوط‌های مختلف توسط هابل و سلنزر [۱۵] ارائه شده و در قالب برنامه XCOM در انرژی‌های ۱ کیلو الکترون ولت تا ۱۰۰ گیگا الکترون ولت توسط گروارد و همکاران [۱۴] ارائه شده است.

برای شبیه‌سازی، مکعب‌هایی به ابعاد $1 \times 1 \times 0/6$ سانتی‌متر مکعب برای شبیه‌سازی نمونه‌های شیشه استفاده شد. حدود ۴ مکعب از ضخامت ۰/۶ تا ۲/۴ سانتی‌متر در مقابل هر چشمه انرژی قرار داده شد. چشمه به‌صورت دیسکی با قطر ۳ میلی‌متر در نظر گرفته شد که به‌صورت یکنواخت و همسوسازی شده پرتو گاما گسیل می‌کند. ترکیب وزنی و چگالی نمونه شیشه‌های بیسموت-سیلیکاتی با غلظت‌های مختلف بیسموت در جدول ۱ نشان داده شده است.

جدول (۱): چگالی و درصد وزنی نمونه‌ها [۶].

Glass Samples	Density (g cm ⁻³)	Composition (%Wt.)	
		SiO ₂	Bi ₂ O ₃
S ₁	۴/۸۸۷	۷۰	۳۰
S ₂	۵/۰۵۴	۶۰	۴۰
S ₃	۵/۱۲۷	۵۰	۵۰
S ₄	۵/۴۸۷	۴۰	۶۰
S ₅	۵/۷۰۱	۳۰	۷۰

آشکارساز نیز به‌صورت استوانه‌ای به ارتفاع و ضخامت ۲ اینچ (معادل کریستال یدور سدیم) ملاحظه گردید که داخل حفاظ سربی به ضخامت ۱۲ سانتی‌متر قرار گرفته است. چیدمان شبیه‌سازی شده در شکل ۱ نشان داده شده است.

در جدول ۲ ضرایب تضعیف گرمی شیشه‌های مورد مطالعه آورده شده است. همچنین برای مقایسه و اعتبارسنجی داده‌های محاسباتی، از نتایج تجربی کیردسیری و همکاران [۶] استفاده شد. برای محاسبه این ضرایب در روش شبیه‌سازی با کد MCNPX و برنامه XCOM به ترتیب از معادله‌های شماره ۱ و ۲ استفاده شده است [۵]. در این روابط μ_m ، t_d و w_i به ترتیب ضریب تضعیف گرمی، ضخامت گرمی و کسر وزنی عنصر i ام در نمونه شیشه است.

$$I = I_0 \exp(-\mu_m t_d) \quad (۱)$$

$$\mu_m = \sum w_i \times \mu_{m,i} \quad (۲)$$

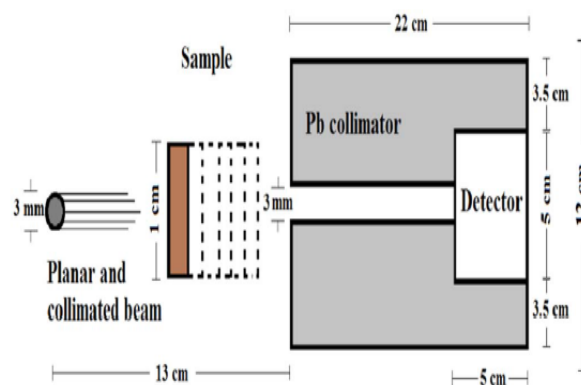
در جدول‌های ۳ و ۴ اعداد اتمی مؤثر و چگالی الکترونی مؤثر نمونه شیشه‌های مورد مطالعه نشان داده شده است. برای محاسبه این کمیت‌ها ابتدا باید سطح مقطع‌های اتمی و الکترونی کلی را از روابط ۳ و ۴ محاسبه کرده و سپس از روابط ۵ و ۶ برای محاسبه اعداد اتمی مؤثر و چگالی الکترونی مؤثر استفاده کرد [۵]. در این روابط f_i ، A_i و Z_i به ترتیب کسر اتمی، جرم اتمی و عدد اتمی عنصر i ام در نمونه شیشه است.

$$\sigma_a = (1/N_A) \sum f_i N_i \mu_{m,i} \quad (۳)$$

$$\sigma_e = (1/N_A) \sum (f_i N_i \mu_{m,i})/Z_i \quad (۴)$$

$$Z_{eff} = \sigma_a/\sigma_e \quad (۵)$$

$$N_{eff} = \mu_m/\sigma_e \quad (۶)$$

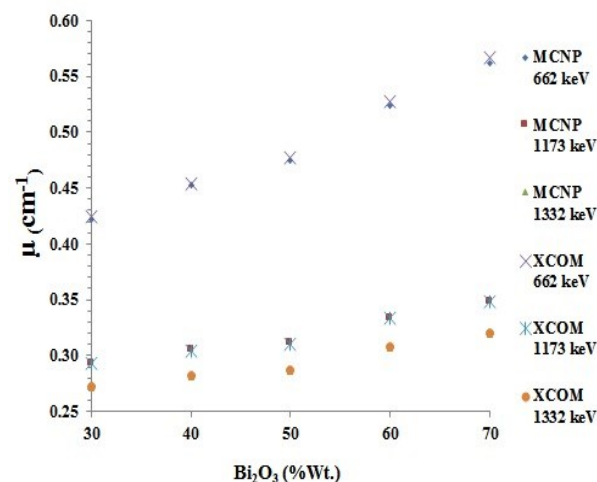


شکل (۱): چیدمان شبیه‌سازی شده.

به منظور محاسبه میزان ضرایب تضعیف خطی و گرمی از تالی F۴ استفاده گردید. این تالی شار متوسط عبوری از سطح سلول (این جا آشکارساز) را برحسب تعداد ذرات در واحد سطح محاسبه می‌کند [۱۳]. همچنین از کارت انرژی (En) برای محاسبه سطح زیر پیک هر انرژی استفاده شد. شبیه‌سازی با حدود ۱ میلیون تاریخچه انجام گردید و تمام شبیه‌سازی‌ها با خطای کمتر از ۰/۵٪ گزارش شدند.

۳. نتایج

شکل ۲ مقادیر ضرایب تضعیف خطی نمونه‌ها را از طریق روش محاسباتی (کد MCNPX و برنامه XCOM) نشان می‌دهد.



شکل (۲): وابستگی ضرایب تضعیف خطی نمونه‌ها به درصد مولی اکسید بیسموت.

جدول (۲): ضرایب تضعیف جرمی ($\mu_m \times 10^{-2} \text{ cm}^2 \text{ g}^{-1}$) شیشه‌های بیسموت-سیلیکاتی.

Glass Sample	۶۶۲ keV			۱۱۷۳ keV		۱۳۳۲ keV	
	MCNP	XCOM	Exp. [۶]	MCNP	XCOM	MCNP	XCOM
S _۱	۸/۶۳	۸/۶۸	۸/۰۳	۵/۹۹	۵/۹۹	۵/۵۵	۵/۵۶
S _۲	۸/۹۵	۸/۹۹	۵/۵۸	۶/۰۴	۶/۰۱	۵/۵۷	۵/۵۷
S _۳	۹/۲۵	۹/۳۱	۹/۲۰	۶/۰۶	۶/۰۵	۵/۵۷	۵/۵۹
S _۴	۹/۵۵	۹/۶۲	۹/۶۸	۶/۰۸	۶/۰۹	۵/۵۸	۵/۶۱
S _۵	۹/۸۶	۹/۹۴	۹/۵۱	۶/۱۱	۶/۱۲	۵/۵۸	۵/۶۲

جدول (۳): اعداد اتمی مؤثر شیشه‌های بیسموت-سیلیکاتی.

Glass Sample	۶۶۲ keV		۱۱۷۳ keV		۱۳۳۲ keV	
	MCNP	XCOM	MCNP	XCOM	MCNP	XCOM
S _۱	۱۴/۵۸	۱۴/۶۶	۱۳/۳۳	۱۳/۳۰	۱۳/۱۷	۱۳/۱۹
S _۲	۱۶/۸۲	۱۶/۹۰	۱۴/۹۵	۱۴/۹۰	۱۴/۷۱	۱۴/۷۳
S _۳	۱۹/۵۶	۱۹/۶۹	۱۶/۹۵	۱۶/۹۱	۱۶/۶۱	۱۶/۶۷
S _۴	۲۳/۰۷	۲۳/۲۵	۱۹/۴۹	۱۹/۵۱	۱۹/۰۹	۱۹/۱۸
S _۵	۲۷/۶۸	۲۷/۹۰	۲۲/۹۶	۲۲/۹۸	۲۲/۳۸	۲۲/۵۴

جدول (۴): چگالی الکترونی مؤثر ($N_{\text{eff}} \times 10^{23} \text{ electron g}^{-1}$) شیشه‌های بیسموت-سیلیکاتی.

Glass Sample	۶۶۲ keV		۱۱۷۳ keV		۱۳۳۲ keV	
	MCNP	XCOM	MCNP	XCOM	MCNP	XCOM
S _۱	۳/۳۵	۳/۳۷	۳/۰۶	۳/۰۶	۳/۰۳	۳/۰۳
S _۲	۳/۴۷	۳/۴۹	۳/۰۸	۳/۰۷	۳/۰۳	۳/۰۴
S _۳	۳/۵۷	۳/۶۰	۳/۱۰	۳/۰۹	۳/۰۳	۳/۰۴
S _۴	۳/۶۷	۳/۷۰	۳/۱۰	۳/۱۰	۳/۰۴	۳/۰۵
S _۵	۳/۷۵	۳/۷۸	۳/۱۱	۳/۱۱	۳/۰۳	۳/۰۵

۴. نتیجه‌گیری

پرتو گاما و در نتیجه کاهش احتمال برهمکنش از طریق پدیده فوتوالکتریک، ضرایب تضعیف خطی و جرمی هر کدام از شیشه‌های بررسی شده با افزایش انرژی کاهش می‌یابند. اختلاف مشاهده شده بین مقادیر کد MCNPX و برنامه XCOM به تفاوت در نوع تکنیک‌های به‌کاررفته و پایگاه داده مورد استفاده مربوط می‌شود. اختلاف مشاهده شده برای ضریب تضعیف جرمی نمونه‌ها در محاسبات شبیه‌سازی با کد

همان‌طور که در شکل ۲ و جدول ۲ نشان داده شده است، برای ضرایب تضعیف خطی و جرمی توافق خوبی بین خود نتایج تئوری (کد MCNPX و برنامه XCOM) و تجربی مشاهده می‌شود. همچنین نتایج نشان می‌دهند که با افزایش غلظت اکسید بیسموت در نمونه و در نتیجه افزایش چگالی آن، ضرایب تضعیف خطی و جرمی نمونه‌ها نیز در هر سه انرژی مورد مطالعه افزایش می‌یابند. از طرف دیگر با افزایش انرژی

همچنین نتایج جدول ۴ نشان می‌دهند که مقادیر چگالی الکترونی مؤثر شیشه‌های بیسموت-سیلیکاتی در محدوده $10^{23} \times (3/78 - 3/03)$ الکترون بر گرم تغییر می‌کند. چگالی الکترونی مؤثر شیشه‌ها با افزایش انرژی پرتوهای گاما به آهستگی کاهش می‌یابند.

اختلاف مشاهده شده در نتایج می‌تواند ناشی از اختلاف در مقادیر متغیرهای به کار رفته در محاسبات از جمله چگالی و ترکیب عنصری متفاوت نمونه‌ها، انرژی و شدت چشمه، استفاده از پایگاه‌های داده مختلف و غیره باشد. نتایج نشان می‌دهند که کد MCNPX و مدل پیشنهاد داده شده می‌تواند مشخصات حفاظی شیشه‌های بیسموت-سیلیکاتی را با دقت بالایی برآورد کند.

MCNPX و برنامه XCOM با نتایج تجربی حدوداً کمتر از ۸ درصد گزارش می‌شود. محاسبات شبیه‌سازی با کد MCNPX در مقایسه با برنامه XCOM توافق بهتری با نتایج تجربی از خود نشان می‌دهند.

از نتایج جدول ۳ مشاهده می‌شود که برای هر سه گروه از داده‌ها، مقادیر اعداد اتمی مؤثر با افزایش غلظت اکسید بیسموت افزایش یافته و با افزایش انرژی پرتوهای گاما این کمیت کاهش می‌یابد. این موضوع به خاطر کسر بالای عناصر با اعداد اتمی بالا (بیسموت) در نمونه شیشه مورد نظر اتفاق می‌افتد و دلالت بر این موضوع دارد که نمونه شیشه با عدد اتمی مؤثر بالا با شدت بیشتری فوتون‌های فرودی را جذب خواهند کرد.

۵. مراجع

1. S. Sharifi, R. Bagheri, S. P. Shirmardi. Comparison of shielding properties for ordinary, barite, serpentine and steel-magnetite concretes using MCNP-4C code and available experimental results. *Ann. Nucl. Energy* 53 (2013) 529–534.
2. I. Akkurt, H. Akyıldırım, F. Karipein, B. Mavi. Chemical corrosion on gamma ray attenuation properties of barite concrete. *J. Saud. Chem. Soc.* 16 (2012) 199–202.
3. M. Kurudirek, Y. Özdemir, Ö. Şimşek, R. Durak. Comparison of some lead and non-lead based glass systems, standard shielding concretes and commercial window glasses in terms of shielding parameters in the energy region of 1 keV–100 GeV: a comparative study. *J. Nucl. Mater.* 407 (2010) 110–115.
4. K. J. Singh, N. Singh, R. S. Kaundal, K. Singh. Gamma-ray shielding and structural properties of PbO–SiO₂ glasses. *Nucl. Instrum. Methods B* 207 (2008) 944–948.
5. R. Bagheri, A. K. Moghaddam, S. P. Shirmardi, B. Azadbakht, M. Salehi. Determination of Gamma-Ray Shielding Properties for Silicate Glasses Containing Bi₂O₃, PbO, and BaO. *J. Non-Cryst. Solids* 479 (2018) 62–71.
6. K. Kirdsiri, J. Kaewkhao, N. Chanthima, P. Limsuwan, PbO and BaO: radiation shielding and optical properties. *Ann. Nucl. Energy* 38 (2011) 1438–1441.
7. B. Kerur, V. Manjula, M. Lagare, S. Kumar. Mass attenuation coefficient of saccharides for X-rays in the energy range from 8 keV to 32 keV. *Radiat. Meas.* 44 (2009) 63–67.
8. M. Maqbool. Determination of transfer functions of MCP-200 alloy using 6 MV photon beam for beam intensity modulation. *J. Mech. Med. Biol.* 4 (2004) 305–310.
9. J. Kaewkhao, P. Limsuwan, Mass attenuation coefficients and effective atomic numbers in phosphate glass containing Bi₂O₃, PbO and BaO at 662 keV. *Nucl. Instrum. Methods A* 619 (2010) 295–297.
10. C. Bootjomchai, J. Laopaiboon, C. Yenchai, R. Laopaiboon, Gamma-ray shielding and structural properties of barium-bismuth-borosilicate glasses. *Radiat. Phys. Chem.* 81 (2012) 785–790.
11. A. M. El-Khayatt, A. M. Ali, V. P. Singh. Photon attenuation coefficients of heavy-metal oxide glasses by MCNP code, XCOM program and experimental data: A comparison study. *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A* 735 (2014) 207–212.

12. A. M. Ali, A. M. El-Khayatt, I. Akkurt. Determination of effective atomic number and electron density of heavymetal oxide glasses. *Radiat. Eff. Defects Solids*. 171 (2016) 202–213.
13. J. K. Shultis, R. E. Faw. *An MCNP Primer*. Department of Mechanical and Nuclear Engineering, Kansas State University, 2010.
14. L. Gerward, N. Guilbert, K. B. Jensen, H. Levring. X-ray absorption in matter. Reengineering XCOM. *Radiat. Phys. Chem.* 60 (2001) 23–24.
15. J. H. Hubbell, S. M. Seltzer. Tables of X-ray mass attenuation coefficients and mass energy-absorption coefficients 1 keV-20 MeV for elements $1 < Z < 92$ and 48 additional substances of dosimetric interest, National Institute of Standards and Physics Laboratory, NISTIR, 1995, p. 5632.