

بررسی خواص حفاظت تابشی و مکانیکی شیشه‌های $\text{CaO-B}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ در انرژی‌های

درمانی

INC29-1361

ماریا احمدی^{۱*}، وحید زنگانه^۲، آزاده احمدیان^۳

۱. گروه علوم پایه، دانشکده علوم پایه، دانشگاه فنی و حرفه‌ای، تهران، ایران.

۲. گروه فیزیک، دانشکده علوم، دانشگاه گلستان، گرگان، ایران.

۳. گروه علوم پایه، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تنکابن

چکیده:

سیستم شیشه‌ای $\text{CaO-B}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ از نظر، ضریب تضعیف جرمی (MAC) و تغییرات عدد اتمی مؤثر شیشه-سرامیک (Z_{eff}) با استفاده از پرتو گاما در محدوده انرژی فوتون 15 MeV-15 KeV مورد بررسی قرار گرفته است. ضرایب تضعیف اشعه گاما نمونه‌ها با استفاده از کد Phy-X PSD به دست آمده است. خواص مکانیکی مانند مدول‌های الاستیک، سختی، نسبت پواسون و ... این شیشه به صورت تحلیلی به دست آمده است. نتایج نشان می‌دهد مقادیر مدول‌های الاستیک مانند مدول‌های یانگ، حجمی، برشی، طولی و ... کاهش جزئی را تجربه می‌کنند. همچنین افزایش میزان CaO در نمونه‌های شیشه‌ای منجر به دستیابی به موادی با محافظ تابشی با کارایی بالا می‌شود. در نهایت، از این تحقیق می‌توان از اطلاعات ارزشمندی در مورد ساختار نمونه‌های شیشه بهره‌برداری کرد. **کلیدواژه‌ها:** خواص حفاظتی، خواص مکانیکی، کد Phy-X PSD، پرتو گاما.

Investigating the radiation and mechanical properties of $\text{CaO-B}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ glasses in therapeutical energy

Maria Ahmadi^{1*}, Vahid Zanganeh², Azadeh Ahmadian³

1. Department of Sciences, Faculty of Sciences, Technical and Vocational University, Tehran, Iran.

2. Department of Physics, Faculty of Sciences, Golestan University, Gorgan, 49138-15739, Iran.

3. Department of Sciences, Islamic Azad University, Tonekabon, Mazandaran, Iran

Abstract:

The mass attenuation coefficient (MAC) and effective atomic number changes of glass-ceramic (Z_{eff}) were investigated in the photon energy range of 15KeV to 15 MeV. These values of glass samples were obtained using the Phy-X PSD code. Mechanical properties such as elastic modulus, hardness, Poisson's ratio, etc. and physical properties of this glass were obtained. The results show that the elastic moduli values such as Young's moduli, volume, shear, length, etc. experience a slight decrease. Also, increasing the amount of CaO in glass samples leads to obtaining materials with high efficiency radiation protection. Finally, valuable information about the structure of glass samples can be used from this research.

Keywords: Radiation shielding, Mechanical properties, Phy-X PSD code.

۱. مقدمه

اثرات زیان‌بار پرتوهای یونیزان از دیر باز شناخته شده است. عمده اثرات آن، به دلیل یونیزه شدن مولکول‌های مختلف موجود در سلول‌های بدن می‌باشد. واکنش سلول‌های بدن نسبت به دزهای دریافتی، علاوه بر عوامل بیولوژیکی مانند نژاد، سن، جنس، اندام تحت تابش و فرایندهای بازسازی صدمات ناشی از پرتوها، به اثرات دیگری از جمله شدت، قدرت و نوع پرتوها بستگی دارد. مردم عادی به‌واسطه‌ی وجود هسته‌های پرتوزای ساطع‌کننده پرتوهای یون‌ساز در پوسته‌ی زمین و متعاقب آن در ترکیبات مصالح ساختمانی و سایر منابع نظیر فروریزه‌های ناشی از آزمایشات اتمی و همچنین پرتوهای کیهانی به‌طور مستمر در معرض مقادیر مختلفی از پرتوهای یون‌ساز قرار می‌گیرند. این نوع پرتوگیری را پرتوگیری حاصل از منابع طبیعی می‌نامند؛ که با توجه به برآورد شورای ملی حفاظت در برابر پرتوها، حداقل ۸۰ درصد دز جذب شده توسط افراد از این نوع منابع است. پرتوهای گاما چون دارای قدرت نفوذ و برد زیادی در هوا هستند، باعث بیشترین پرتوگیری انسان از محیط خارج می‌گردد [۱]. بعد از کشف پرتوها محققان متوجه اهمیت آن‌ها و کاربرد آن‌ها در زمینه‌های مختلف از جمله: طب و صنعت شدند بنابراین درصدد استفاده از این منابع مهم برآمدند. شواهد تجربی حاکی از وجود رابطه بین پرتوگیری و افزایش بروز بدخیمی‌هایی از قبیل سرطان، آسیب‌های ژنتیکی و لوسمی است. همچنین مطالعات سیتوژنیک نشان داده‌اند که قرار گرفتن در معرض سطح پایین تشعشعات یونیزان به مدت طولانی، فراوانی ناهنجاری‌های کروموزومی را افزایش می‌دهد [۲]. بر طبق اصل (ALARA)، رابطه بین دز و مخاطره به‌شدت خطی و بدون آستانه است. لذا هیچ دوز اشعه‌ای که بتوان آن را مطلقاً بی‌خطر نامید، وجود ندارد که حاکی از اهمیت حفاظت در برابر پرتوهای یونیزان است. به‌طور کلی هدف حفاظت در برابر اشعه، استفاده از مزایای کاربرد پرتوها در زمینه‌های گوناگون و کاهش هرچه بیشتر خطرات ناشی از اثرات آن توسط کارکنان، مردم، محیط زیست و نسل‌های آینده می‌باشد بر همین اساس استفاده از محافظ‌ها امری ضروری است. احمدی و همکاران (۲۰۲۳) به دلیل چگالی و عدد اتمی بالا اکسید فلزات سنگین به بررسی خواص حفاظتی شیشه‌های ترکیبی با $B_2O_3-Bi_2O_3-BaO$ پرداختند. خواص اکوستیکی، مکانیکی و فیزیکی این نوع شیشه‌ها مورد بررسی قرار گرفته‌اند [۴]. Wang و همکاران (۲۰۲۱) به بررسی خواص دی‌الکتریک و ساختاری شیشه‌هایی با ساختار $CaO-B_2O_3-SiO_2$ پرداخته‌اند. ساخت این نوع شیشه‌ها و رسانایی حرارتی آن‌ها مورد بررسی قرار گرفتند [۵]. در این مطالعه قصد داریم با استفاده از کد Phy-X PSD به بررسی خواص حفاظتی و مکانیکی شیشه‌های $CaO-B_2O_3-SiO_2$ (CBS) بپردازیم، همچنین خواص مکانیکی مانند مدول‌های الاستیک و نسبت پواسون و ... این شیشه را به‌صورت تحلیلی به دست آوریم.

۲. روش کار

۱- مواد و روش‌ها

روش آماده‌سازی و اندازه‌گیری چگالی شیشه‌ها در مرجع [۵] ارائه شده است. ترکیبات شیمیایی و چگالی سری شیشه‌های که در این مقاله از نظر خواص مکانیکی، فیزیکی و محافظ فوتون مورد بررسی قرار گرفته، در جدول ۱ نشان داده شده است.

جدول ۱: چگالی و ترکیبات شیمیایی شیشه CBS (mol%)

Glass Code	CaO	B ₂ O ₃	SiO ₂	Density (g/cm ³)
CBS1	10.5	22.2	67.3	3.34

CBS2	40.3	15.5	44.2	2.46
CBS3	50.1	7.3	42.6	2.65

۲- خواص مکانیکی

با استفاده از مدل مکشیمیا و مکنزی [۶] به محاسبه خواص مکانیکی و فیزیکی نمونه‌ها پرداخته شده است. خواص مکانیکی شامل مدول‌های الاستیک اطلاعات جامعی در مورد ساختار نمونه‌های شیشه‌ای انتخاب شده، ارائه می‌دهند. برای محاسبه خواص مکانیکی از جمله مدول ینگ، برشی، حجمی، طولی، نسبت پواسون و سختی نمونه‌ها با استفاده از فرمول‌های زیر، داریم:

$$V_t := \frac{1}{V_m} \sum_{i=1}^3 V_i x_i \quad (1)$$

$$G_t := \sum_{i=1}^3 G_i x_i \quad (2)$$

$$Y := (8.36) G_t V_t \quad (3)$$

$$K := 10(V_t)^2 G_t \quad (4)$$

$$G = \frac{30(V_t)^2 G_t}{(10.2V_t) - 1} \quad (5)$$

$$L = K + \left(\frac{4}{3}\right) G \quad (6)$$

$$\sigma = 0.5 - \left(\frac{1}{7.2V_t}\right) \quad (7)$$

$$H = \left(\frac{1 - 2\sigma}{6(1 + \sigma)}\right) Y \quad (8)$$

که V_t چگالی فشردگی و G_t انرژی تفکیکی شیشه‌ها می‌باشد. Y, K, G, L, σ به ترتیب نسبت پواسون، مدول طولی، مدول برشی، مدول حجمی، مدول ینگ می‌باشد.

۳- خواص حفاظ‌های تابشی

برای شیشه‌های CBS، تضعیف یک پرتو موازی از پرتوهای گاما در ضخامت متوسط، از قانون لامبرت-بیر پیروی می‌کند $I = I_0(e^{-\mu t})$ ، که به ترتیب، I_0 و I شدت نهایی و اولیه هستند و μ (cm^{-1}) برابر ضریب تضعیف خطی است. با استفاده از رابطه $\text{MAC} = \left(\frac{\mu}{\rho}\right)$ می‌توان ضریب تضعیف جرمی را محاسبه کرد که ρ (g/cm^3) چگالی شیشه‌های جذاب است. در نهایت، فرمول $\text{HVL} = \left(\frac{\ln(2)}{\mu}\right)$ به‌عنوان ضخامت یک ماده برای کاهش شدت پرتو اولیه به نصف تعریف می‌شود [۷].

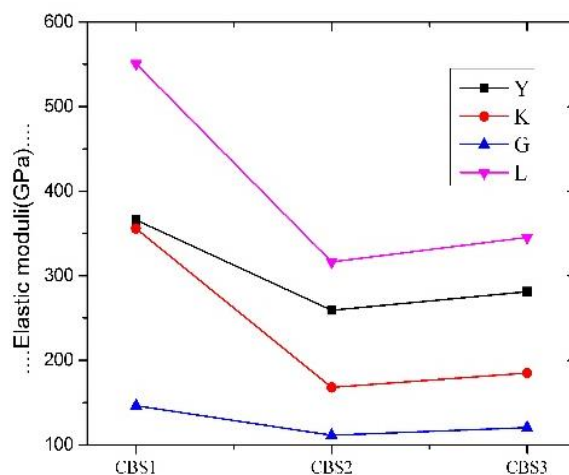
۴. نتایج

با استفاده از مواد بکار برده شده در کاربردهای مختلف تابشی، باید پارامترهای حفاظتی مواد مورد مطالعه قرار گیرد. از میان این پارامترها، ضریب تضعیف خطی و تغییرات عدد اتمی مؤثر با استفاده از Phy-X PSD

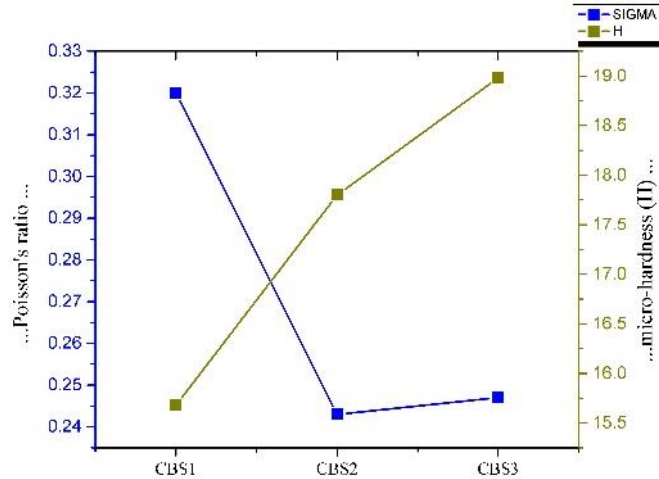
محاسبه شده‌اند. ترکیبات شیمیایی و چگالی نمونه‌های شیشه CBS1، CBS2 و CBS3 در جدول ۱ آورده شده است. پارامترهای مکانیکی نمونه‌ها محاسبه شده و مقادیر در جدول ۲ نشان داده شده است. نتایج به دست آمده برای مدول‌های الاستیک با توجه به روند چگالی ابتدا افزایشی و سپس کاهش می‌باشند. مقادیر ضریب تضعیف خطی در شکل ۳ برای انرژی‌های فوتون فرودی از (0/01 MeV) تا (10 MeV) نشان داده شده است. در مجموع سه برهمکنش اصلی بین فوتون‌های فرودی و مواد مورد مطالعه صورت گرفت: اثر فوتوالکتریک (PE)، پراکندگی کامپتون (CS)، و تولید جفت (PP). ابتدا، در فوتون‌های فرودی با مقدار انرژی کم، برهمکنش فوتوالکتریک قالب است و مواد شیشه‌ی مورد مطالعه CBS می‌تواند فوتون را جذب کنند. به این ترتیب، ضریب تضعیف خطی به حداکثر مقدار خود در 0/015 مگا الکترون ولت رسید. در انرژی 0/015 MeV، حداکثر ضریب تضعیف خطی برای شیشه‌های CBS3 در $38/77 \text{ cm}^{-1}$ شناسایی شد. با افزایش انرژی فوتون‌های ورودی، برهمکنش پراکندگی کامپتون در بازه 0/1 تا 1 مگا الکترون ولت آشکار شد، که در آن مقدارهای ضریب تضعیف خطی به خاطر جذب شدن بخشی از فوتون‌ها به تدریج کاهش می‌یابد و برهمکنش‌های اضافی درون مواد شیشه پراکنده شدند، از این رو، سطح پراکندگی کامپتون متناسب با انرژی فوتون ورودی می‌باشد در نتیجه توانایی این شیشه برای جذب فوتون فرودی کاهش می‌یابد. همچنین تصویر نشان می‌دهد که در انرژی فوتون‌های بالا، کاهش مقادیر ضریب تضعیف خطی به‌طور مداوم به دلیل برهمکنش تولید زوج است. پارامترهای مطالعه شده نشان دادند که شیشه‌های CBS توانایی خوبی برای جذب تابش‌های گاما و دارای قابلیت تضعیف بالایی در بازه‌های انرژی پایین دارند.

جدول ۲: خواص مکانیکی، سختی و نسبت پواسون شیشه‌های CBS

Sample code	Density (g/cm ³)	Y	K	G	L	H	σ
CBS1	3.34	365.86	355.58	146.38	550.76	15.68	0.32
CBS2	2.46	259.08	167.89	111.28	316.27	17.8	0.243
CBS3	2.65	281.22	184.93	120.41	345.47	18.98	0.247

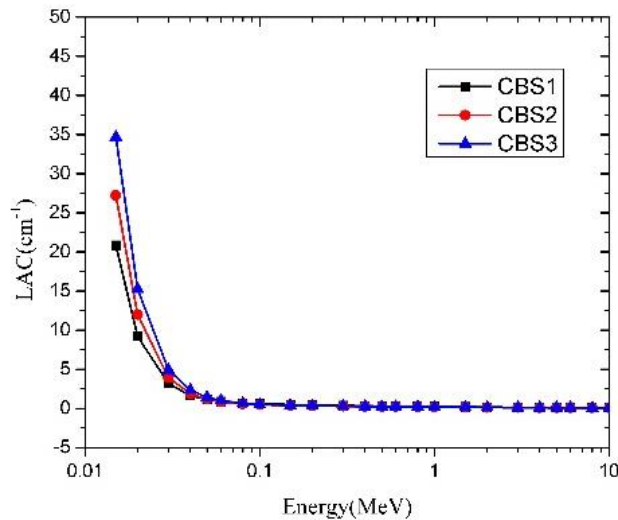


شکل ۱: مدول‌های الاستیک شیشه‌های سری CBS

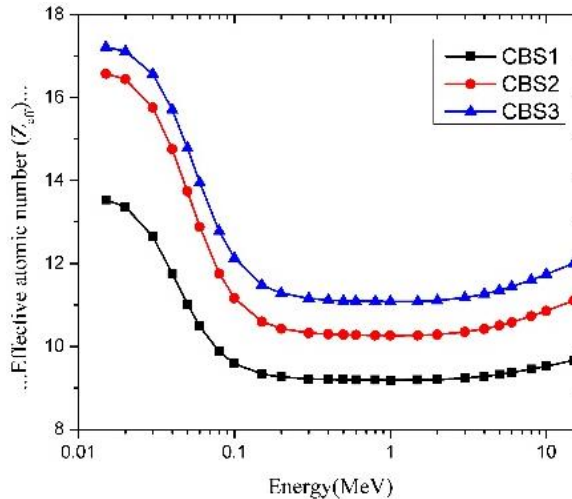


شکل ۲: نسبت پواسون و سختی شیشه‌های سری CBS

مقادیر ضریب تضعیف خطی در شکل ۳ برای انرژی‌های فوتون فرودی از (۰/۰۱ MeV) تا (۱۰ MeV) نشان داده شده است. در مجموع سه برهمکنش اصلی بین فوتون‌های فرودی و مواد مورد مطالعه صورت گرفت: اثر فوتوالکتریک (PE)، پراکندگی کامپتون (CS)، و تولید جفت (PP). ابتدا، در فوتون‌های فرودی با مقدار انرژی کم، برهمکنش فوتوالکتریک قالب است و مواد شیشه‌ی مورد مطالعه CBS می‌تواند فوتون را جذب کنند. به این ترتیب، ضریب تضعیف خطی به حداکثر مقدار خود در ۰/۰۱۵ مگا‌الکترون ولت رسید. در انرژی ۰/۰۱۵ MeV، حداکثر ضریب تضعیف خطی برای شیشه‌های CBS3 در $38/77 \text{ cm}^{-1}$ شناسایی شد. با افزایش انرژی فوتون‌های ورودی، برهمکنش پراکندگی کامپتون در بازه ۰/۱ تا ۱ مگا‌الکترون ولت آشکار شد، که در آن مقدارهای ضریب تضعیف خطی به خاطر جذب شدن بخشی از فوتون‌ها به تدریج کاهش می‌یابد و برهمکنش‌های اضافی درون مواد شیشه‌ی پراکنده شدند، از این رو، سطح پراکندگی کامپتون متناسب با انرژی فوتون ورودی می‌باشد در نتیجه توانایی این شیشه برای جذب فوتون فرودی کاهش می‌یابد. همچنین تصویر نشان می‌دهد که در انرژی فوتون‌های بالا، کاهش مقادیر ضریب تضعیف خطی به‌طور مداوم به دلیل برهمکنش تولید زوج است. پارامترهای مطالعه شده نشان دادند که شیشه‌های CBS توانایی خوبی برای جذب تابش‌های گاما و دارای قابلیت تضعیف بالایی در بازه‌های انرژی پایین دارند.



شکل ۳: مقادیر ضریب تضعیف خطی برای سری شیشه‌های CBS



شکل ۴: تغییرات عدد اتمی مؤثر شیشه-سرامیک (Z_{eff}) براساس انرژی فوتون گامای ورودی.

برای تمام شیشه‌های مورد بررسی، نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که شیشه‌های که با غلظت بالایی از CaO دپ شده باشد برای محافظت در برابر تشعشع مناسب‌تر هستند. مقادیر تغییرات عدد اتمی مؤثر (Z_{eff}) مستقیماً بر اساس سطح مقطع الکترون و اتمی در انرژی‌های مختلف تابش گاما برای شیشه‌های CBS محاسبه می‌شود. همان‌طور که در شکل ۴ نشان داده شده است، تغییر انرژی فوتون گاما و افزایش غلظت CaO در شیشه-سرامیک‌های CBS بر روی تغییرات عدد اتمی مؤثر (Z_{eff}) تأثیر گذاشت.

۵. نتیجه‌گیری و جمع‌بندی

به دلیلی استفاده در کاربردهای مختلف تابشی، پارامترهای محافظ تابشی مواد باید مورد بررسی قرار بگیرد. در انرژی ۰/۰۱۵ MeV، حداکثر ضریب تضعیف خطی برای شیشه‌های CBS3 در $38/77 \text{ cm}^{-1}$ شناسایی شد که نشان می‌دهد شیشه‌های CBS دارای قابلیت تضعیف بالایی هستند. علاوه بر این، نسبت پواسون از ۰/۳۲ به ۰/۲۷ کاهش می‌یابد. علاوه بر این، میکروسختی (H) از $15/68$ به $188/98 \text{ GPa}$ با افزایش غلظت CaO افزایش می‌یابد. همچنین نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که افزایش میزان CaO در نمونه‌های شیشه‌ای ذکر شده، به دلیل افزایش ضریب تضعیف خطی، منجر به دستیابی به مواد محافظ تابشی با کارایی بالا می‌شود. در نهایت، از این تحقیق می‌توان از اطلاعات ارزشمندی در مورد ساختار نمونه‌های شیشه بهره‌برداری کرد.

۶. مراجع

- [1] Bektasoglu, M., & Mohammad, M. A. (2020). Investigation of radiation shielding properties of $\text{TeO}_2\text{-ZnO-Nb}_2\text{O}_5\text{-Gd}_2\text{O}_3$ glasses at medical diagnostic energies. *Ceramics International*, 46(10), 16217-16223.
- [2] Kaky, K. M., Sayyed, M. I., Mhareb, M. H. A., Abdalsalam, A. H., Mahmoud, K. A., Baki, S. O., & Mahdi, M. A. (2020). Physical, structural, optical and gamma radiation attenuation properties of germanate-tellurite glasses for shielding applications. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 545, 120250.
- [3] Sayyed, M. I., Rashad, M., & Rammah, Y. S. (2020). Impact of Ag_2O on linear, nonlinear optical and gamma-ray shielding features of ternary silver vanadio-tellurite glasses: $\text{TeO}_2\text{-V}_2\text{O}_5\text{-Ag}_2\text{O}$. *Ceramics International*, 46(14), 22964-22972.
- [4] Ahmadi, M., Zanganeh, V., Malidarre, R. B., & Akkurt, I. (2022). Radiation shielding, physical, and elastic properties of $\text{BaO-B}_2\text{O}_3\text{-Bi}_2\text{O}_3$ glass system. *Physica Scripta*, 97(10), 105309.



- [5] Wang, S. F., Lai, B. C., Hsu, Y. F., & Lu, C. A. (2021). Dielectric properties of CaO–B₂O₃–SiO₂ glass-ceramic systems in the millimeter-wave frequency range of 20–60 GHz. *Ceramics International*, 47(16), 22627-22635.
- [6] Singh, N., Singh, K. J., Singh, K., & Singh, H. (2006). Gamma-ray attenuation studies of PbO–BaO–B₂O₃ glass system. *Radiation measurements*, 41(1), 84-88.
- [7] Makishima, A., & Mackenzie, J. D. (1975). Calculation of bulk modulus, shear modulus and Poisson's ratio of glass. *Journal of Non-crystalline solids*, 17(2), 147-157.
- [8] Akkurt, I., & Malidarre, R. B. (2022). Physical, structural, and mechanical properties of the concrete by FLUKA code and phy-X/PSD software. *Radiation Physics and Chemistry*, 109958.