



## تعیین پارامترهای حفاظتی برخی از شیشه‌های تلوریت در برابر تابش چشمه‌های رادیوایزوتوپی گاما

خباز، رحیم\* - محمدرفعی، فائزه

دانشگاه گلستان، دانشکده علوم، گروه فیزیک

### چکیده:

در این پژوهش، مشخصه‌های حفاظتی شیشه‌های تلوریت مانند *TPZ, TNS, TBN, TSW, TBB* و نوعی از بتون (*SSC*) در برابر تابش چشمه‌های رادیوایزوتوپی گاما مورد بررسی قرار گرفتند. برای این هدف، از کد *MCNPX* برای شبیه‌سازی ترابرد فوتون در نمونه‌ها استفاده شد. بدین منظور ضریب تضعیف خطی، ضریب انباشت شار و عدداتمی مؤثر برای چشمه‌های رادیوایزوتوپی گاما محاسبه شدند. نتایج نشان می‌دهد که در نظر گرفتن انرژی میانگین برای حفاظت از یک چشمه گسیلنده چندانرژی گاما نمی‌تواند ملاکی مناسب برای آن چشمه باشد و در محاسبات حفاظت در برابر پرتوها بایستی تمام طیف انرژی چشمه لحاظ گردد.

**کلمات کلیدی:** شیشه‌های تلوریت، ضریب تضعیف خطی، ضریب انباشت شار، عدداتمی مؤثر، شبیه‌سازی مونت کارلو

### مقدمه:

امروزه تابش گاما در بسیاری از کاربردها مانند پرتودهی مواد غذایی، پزشکی (تشخیص و درمان)، استریلیزه کردن، صنعت، تجزیه و تحلیل عناصر مورد استفاده قرار می‌گیرند از اینرو حفاظت گذاری مناسب چشمه‌های گاما امری ضروری است [۱]. در گذشته شیشه‌های دارای سرب به طور وسیع، برای محافظت از تابش پرتوهای گاما و حفاظت از تابش‌های مضر یونیزه کننده بدن انسان استفاده می‌شد اما امروزه استفاده از شیشه‌های سرب‌دار در کاربردهای حفاظتی به علت سمی بودن محدود شده است؛ بنابراین مواد یا شیشه‌های بدون سرب را جایگزین آن‌ها می‌کنند. از جمله این شیشه‌ها، شیشه‌های تلوریت (*TPZ, TNS, TBN, TSW, TBB*) هستند که دارای خواص فیزیکی برتری همانند دمای ذوب پایین، آهنگ انتقال حرارت کم، ضریب شکست خطی بالا، پنجره شفاف نوری وسیع، مقاومت حرارتی و شیمیایی و ... هستند [۲]. روش مونت کارلو یک پیشنهاد مناسب برای محاسبه خواص حفاظتی این نوع از شیشه‌ها است. ضریب تضعیف خطی، مسافت آزاد میانگین، ضریب انباشت شار و عدداتمی مؤثر برای توصیف نفوذ و انتشار پرتو گاما در هر ماده کمیت‌هایی مهم هستند. در پژوهش‌های قبلی، برخی مشخصات حفاظتی را براساس چشمه‌های تک انرژی فوتون بدست آورده‌اند [۱-۳]. در این پژوهش به کمک محاسبات مونت کارلو، خصوصیات حفاظتی از جمله ضریب تضعیف



خطی و ضریب انباشت شار فوتون برای شیشه‌های تلوریت، بتون، سرب و اورانیوم در برابر تابش ۱۰ چشمه رادیویزوتوپی گاما، محاسبه و مقایسه گردیدند. همچنین عدداتی مؤثر، برای نمونه‌های ذکر شده محاسبه شد.

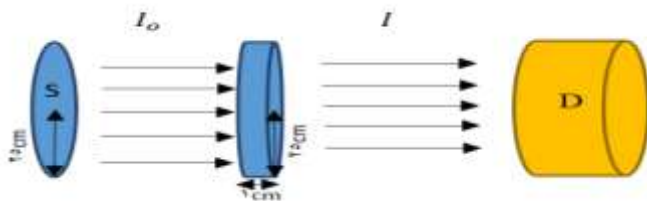
### روش کار:

کد MCNPX یکی از ابزارهای شبیه‌سازی به روش مونت کارلو است که کاربرد فراوانی در زمینه ترابرد فوتون؛ نوترون، الکترون و... در محیط‌های مختلف دارد، از قابلیت‌های کد، امکان به کارگیری مواد مختلف به صورت ترکیب یا آلیاژ می‌باشد [۴]. در مطالعه حاضر از کد مونت کارلوی MCNPX در شبیه‌سازی شیشه‌های تلوریت:

TPZ (52.5TeO<sub>2</sub>-22.5PbO -25ZnO)، TNS (78.5TeO<sub>2</sub>-20Na<sub>2</sub>O-1.5Sm<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)، TBN (90TeO<sub>2</sub> -9BaO-1Nd<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)، TSW (75TeO<sub>2</sub>-20Sb<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-5WO<sub>3</sub>)، TBB (55TeO<sub>2</sub>-25B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-20Bi<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)،

همچنین نوعی از بتون (Steel-Scrap Concrete (SSC))، سرب و اورانیوم در معرض تابش چشمه‌های رادیویزوتوپی گاما (Na<sup>24</sup>، Na<sup>22</sup>، Co<sup>60</sup>، Co<sup>56</sup>، Se<sup>75</sup>، Y<sup>88</sup>، Cs<sup>137</sup>، Yb<sup>169</sup>، Ir<sup>192</sup> و Th<sup>228</sup>) استفاده گردید [۵]. برای تعیین ضریب تضعیف خطی، چشمه فوتون (S) به صورت یک قرص که پرتوهای موازی گسیل می‌کند، در نظر گرفته شد. پرتوها به تیغه استوانه‌ای با ارتفاع ۱cm و شعاع ۲۵cm از جنس ماده موردنظر می‌تابید (شکل ۱). با استفاده از تالی F1، در شمارش پرتوهای گامایی که به طور موازی و عمود بر تیغه عبور کرده‌اند، و به کمک قانون لامبرت-بیر، می‌توان ضریب تضعیف خطی را تعیین کرد:

$$\mu = -\frac{\ln(I/I_0)}{x} \quad (1)$$



شکل ۱: سامانه شبیه‌سازی شده برای تعیین ضریب

### تضعیف خطی

در این پژوهش ضریب تضعیف خطی را برای هر چشمه در ۲ حالت بدست آوردیم؛ در حالت نخست تنها انرژی میانگین چشمه‌های رادیویزوتوپی را در شبیه‌سازی لحاظ نمودیم و در مرحله بعد همه انرژی‌های چشمه‌ها را در نظر گرفتیم و نتایج را با یکدیگر مقایسه کردیم.

در مرحله بعد برای تعیین ضریب انباشت شار (FBF)، نمونه‌های شیشه‌ای را به صورت یک تیغه استوانه‌ای با ضخامت‌هایی متفاوت برحسب مسافت آزاد میانگین (mfp) و هر یک به قطر ۳m در نظر گرفتیم. چشمه‌های رادیوایزوتوپی گاما (S) و آشکارساز (D) را به صورت نقطه‌ای در دو سطح قاعده تیغه استوانه‌ای نمونه قرار دادیم (شکل ۲). به ازای مسافت آزاد میانگین‌های (mfp) متفاوت برای هر نمونه شیشه‌ای، به کمک تالی F5 شار را در نقطه D به دست آوردیم.



شکل ۲: هندسه شیب ساز شده چشمه (S)، آشکارساز (D) و نمونه استوانه‌ای شکل به شعاع ۳m در تعیین ضریب انباشت شار.

با توجه به اینکه در خروجی کد MCNPX براساس یک ذره گسیل شده از چشمه نرمالیزه می‌شود، با استفاده از رابطه (۲) می‌توان ضریب انباشت شار را محاسبه نمود [۶]:

$$FBF = \frac{4\pi r^2 F}{e^{-\mu r}} \quad (2)$$

که در این رابطه،  $r$  ضخامت نمونه،  $F$  شار حاصل از تالی F5 و  $\mu$  ضریب تضعیف خطی است. لازم به ذکر است، خطای نسبی تالی F1 برای محاسبه ضریب تضعیف خطی کمتر از ۰٫۰۷ و خطای نسبی تالی F5 برای محاسبه ضریب انباشت شار کمتر از ۰٫۰۵ بوده است.

در ادامه یکی دیگر از پارامترهای حفاظتی مهم، یعنی عدداتمی مؤثر ( $Z_{eff}$ ) هر یک از مواد را با استفاده از رابطه (۳) محاسبه کردیم [۳]:

$$Z_{eff} = \frac{\sum_i f_i A_i \left(\frac{\mu}{\rho}\right)_i}{\sum_i f_i \frac{A_i}{Z_i} \left(\frac{\mu}{\rho}\right)_i} \quad (3)$$

که در آن،  $\left(\frac{\mu}{\rho}\right)_i$  ضریب تضعیف جرمی ( $m^2/kg$ ) عنصر  $i$  ام،  $A_i$  جرم اتمی عنصر  $i$  ام،  $f_i$  کسر مولی عنصر  $i$  ام و  $Z_i$  عدد اتمی عنصر  $i$  ام، است.

## نتایج:

ضریب تضعیف خطی نمونه‌ها را به دو صورت با طیف کامل انرژی و با میانگین انرژی چشمه‌های رادیوایزوتوپی گاما بدست آوردیم؛ که نتایج در جداول ۱ و ۲ فهرست شده‌اند.



از مقایسه نتایج دو حالت می‌توان به این نتیجه رسید که داده‌های ضریب تضعیف خطی حاصل از طیف کامل با نتایج میانگین انرژی چشمه‌های رادیوایزوتوپی گاما در توافق نیستند. از این رو لحاظ نمودن انرژی میانگین چشمه‌ها در تعیین مشخصه‌ها همراه با خطا می‌باشد و در محاسبات حفاظتی باید تمام طیف چشمه گاما لحاظ گردد.

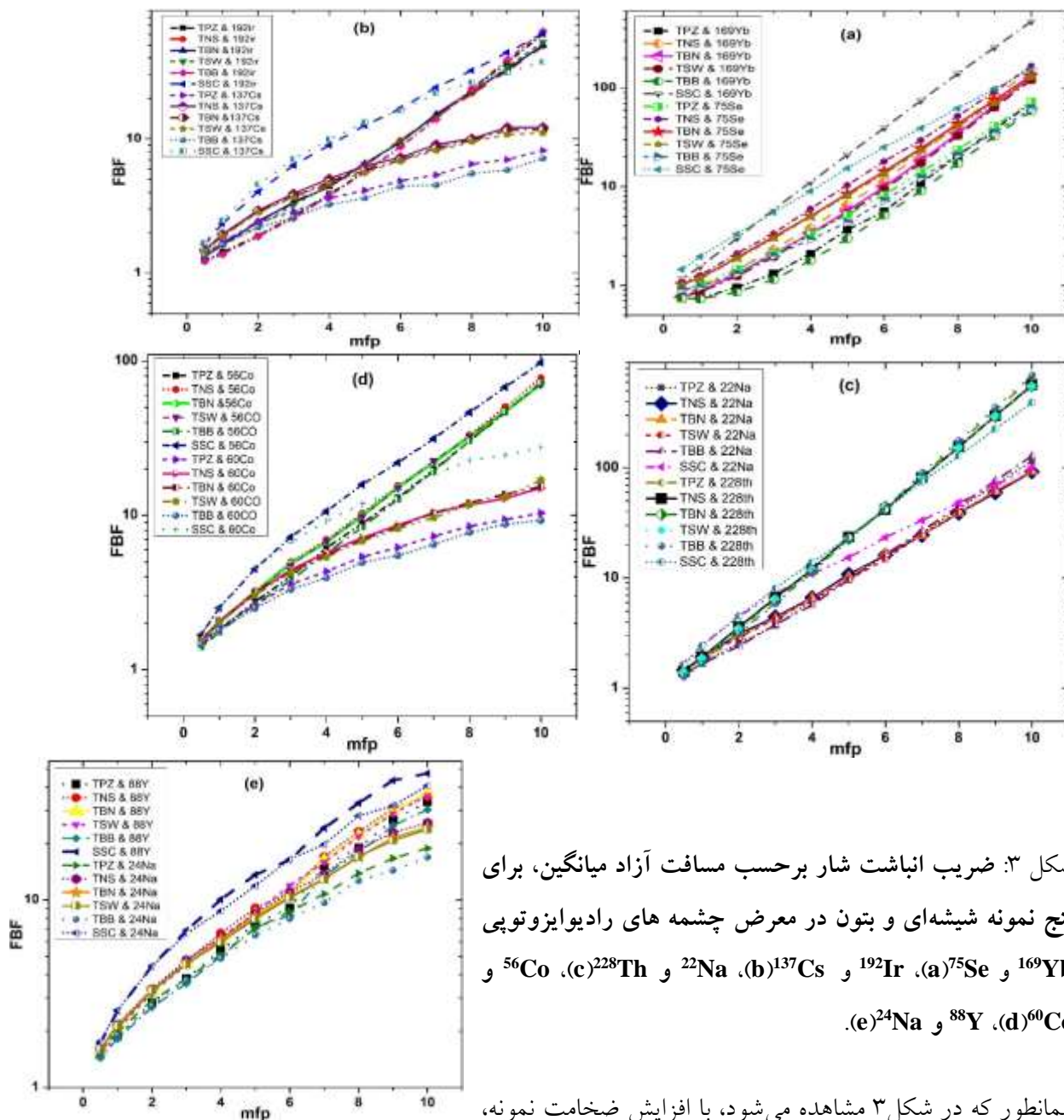
جدول شماره (۱): ضریب تضعیف خطی (1/cm) با طیف انرژی و میانگین انرژی (ME) چشمه‌های رادیوایزوتوپی گاما برای نمونه‌های شیشه‌ای TPZ و TNS و TBN و TSW.

| TSW              |              | TBN              |              | TNS              |              | TPZ              |              | شیشه<br>چشمه<br>(ME(MeV)) |
|------------------|--------------|------------------|--------------|------------------|--------------|------------------|--------------|---------------------------|
| با میانگین انرژی | با طیف انرژی | با میانگین انرژی | با طیف انرژی | با میانگین انرژی | با طیف انرژی | با میانگین انرژی | با طیف انرژی |                           |
| 3.6425           | 2.4456       | 3.4399           | 2.3641       | 2.7770           | 2.0790       | 6.1267           | 3.2982       | <sup>169</sup> Yb(0.145)  |
| 1.5547           | 1.5841       | 1.4775           | 1.5342       | 1.2215           | 1.3507       | 2.4593           | 2.0889       | <sup>75</sup> Se(0.218)   |
| 0.7090           | 0.7622       | 0.6838           | 0.7343       | 0.5853           | 0.6276       | 0.9628           | 1.0414       | <sup>192</sup> Ir(0.375)  |
| 0.4354           | 0.4354       | 0.4244           | 0.4244       | 0.3712           | 0.3712       | 0.5177           | 0.5177       | <sup>137</sup> Cs(0.662)  |
| 0.3887           | 0.4372       | 0.3797           | 0.4258       | 0.3332           | 0.3719       | 0.4504           | 0.5269       | <sup>22</sup> Na(0.786)   |
| 0.2993           | 0.4846       | 0.2933           | 0.4716       | 0.2585           | 0.4129       | 0.3330           | 0.5871       | <sup>228</sup> Th(1.21)   |
| 0.2950           | 0.3358       | 0.2890           | 0.3283       | 0.2548           | 0.2884       | 0.3276           | 0.3848       | <sup>56</sup> Co(1.243)   |
| 0.2938           | 0.2948       | 0.2879           | 0.2888       | 0.2538           | 0.2547       | 0.3262           | 0.3274       | <sup>60</sup> Co(1.252)   |
| 0.2784           | 0.2979       | 0.2728           | 0.2916       | 0.2406           | 0.2568       | 0.3078           | 0.3343       | <sup>88</sup> Y(1.383)    |
| 0.2327           | 0.2459       | 0.2282           | 0.2410       | 0.2006           | 0.2119       | 0.2565           | 0.2718       | <sup>24</sup> Na(2.062)   |

جدول شماره (۲): ضریب تضعیف خطی (1/cm) با طیف انرژی و میانگین انرژی (ME) چشمه‌های رادیوایزوتوپی گاما برای نمونه شیشه‌ای TBB و نوعی از بتون (SSC) و سرب (Pb) و اورانیوم (<sup>22</sup>U).

| U                |              | Pb               |              | SSC              |              | TBB              |              | شیشه<br>چشمه<br>(ME(MeV)) |
|------------------|--------------|------------------|--------------|------------------|--------------|------------------|--------------|---------------------------|
| با میانگین انرژی | با طیف انرژی | با میانگین انرژی | با طیف انرژی | با میانگین انرژی | با طیف انرژی | با میانگین انرژی | با طیف انرژی |                           |
| 53.4093          | 11.9750      | 25.3250          | 6.9312       | 0.7717           | 1.0299       | 7.2989           | 3.6181       | <sup>169</sup> Yb(0.145)  |
| 20.4674          | 8.2112       | 9.2174           | 5.0208       | 0.5330           | 0.6151       | 2.8693           | 2.2907       | <sup>75</sup> Se(0.218)   |
| 6.2672           | 4.6718       | 2.9408           | 2.7461       | 0.3894           | 0.3991       | 1.0621           | 1.1472       | <sup>192</sup> Ir(0.375)  |
| 2.4552           | 2.4564       | 1.2405           | 1.2421       | 0.2964           | 0.2964       | 0.5386           | 0.5386       | <sup>137</sup> Cs(0.662)  |
| 1.9668           | 2.0670       | 1.0183           | 1.2138       | 0.2729           | 0.2905       | 0.4628           | 0.5515       | <sup>22</sup> Na(0.786)   |
| 1.2412           | 1.7496       | 0.6789           | 1.1307       | 0.2195           | 0.2899       | 0.3349           | 0.6133       | <sup>228</sup> Th(1.21)   |
| 1.2130           | 1.4478       | 0.6653           | 0.8182       | 0.2166           | 0.2371       | 0.3292           | 0.3929       | <sup>56</sup> Co(1.243)   |
| 1.2057           | 1.2119       | 0.6617           | 0.6650       | 0.2158           | 0.2168       | 0.3278           | 0.3290       | <sup>60</sup> Co(1.252)   |
| 1.1166           | 1.2464       | 0.6177           | 0.6923       | 0.2050           | 0.2157       | 0.3085           | 0.3378       | <sup>88</sup> Y(1.383)    |
| 0.9173           | 0.9822       | 0.5150           | 0.5504       | 0.1693           | 0.1781       | 0.2563           | 0.2721       | <sup>24</sup> Na(2.062)   |

ضرایب انباشت شار به ازای مسافت آزاد میانگین‌های متفاوت نمونه‌های گوناگون برای چشمه‌های رادیوایزوتوپی گاما براساس رابطه (۲) محاسبه و در شکل ۳ رسم شدند.

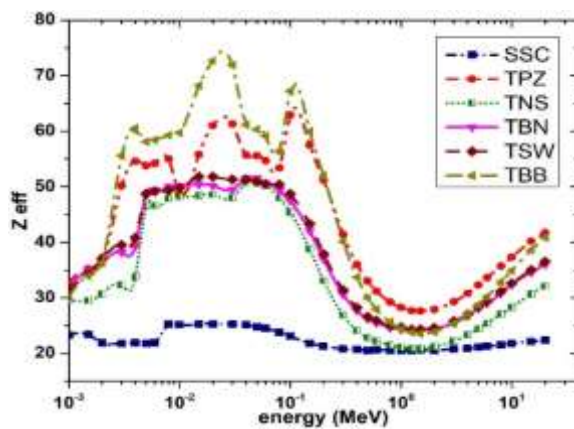


شکل ۳: ضریب انباشت شار برحسب مسافت آزاد میانگین، برای پنج نمونه شیشه‌ای و بتون در معرض چشمه‌های رادیوایزوتوپی  $^{169}\text{Yb}$  و  $^{75}\text{Se}$  (a)،  $^{137}\text{Cs}$  و  $^{192}\text{Ir}$  (b)،  $^{22}\text{Na}$  و  $^{228}\text{Th}$  (c)،  $^{60}\text{Co}$  (d) و  $^{24}\text{Na}$  و  $^{88}\text{Y}$  (e).

همانطور که در شکل ۳ مشاهده می‌شود، با افزایش ضخامت نمونه، ضریب انباشت شار افزایش می‌یابد. از میان شیشه‌ها، شیشه TBB و سپس TPZ پایین‌ترین مقدار ضریب انباشت شار را دارند.

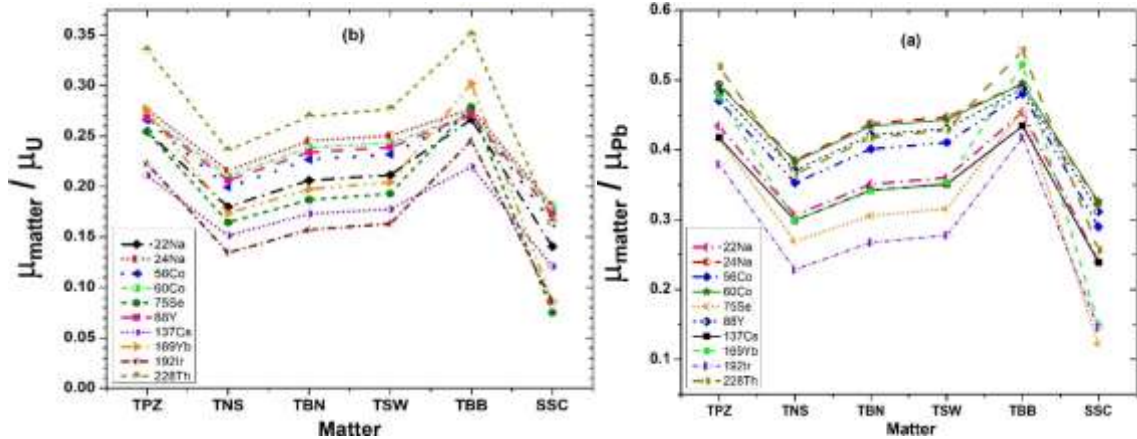


در ادامه بر اساس ضرایب تضعیف جرمی بدست آمده از XCOM [۷] عدد اتمی مؤثر ( $Z_{eff}$ ) به ازای انرژی فوتون در گستره  $10^{-3}$ – $20$  MeV براساس رابطه (۳) برای نمونه‌های گوناگون محاسبه و در شکل ۴ رسم گردید. مشاهده می‌گردد عدد اتمی مؤثر برای بتون تقریباً مستقل از انرژی فوتون اما برای شیشه‌ها به شدت وابسته به انرژی فوتون است و بسته به انرژی به طور تقریبی مقادیری بین ۲۵ تا ۷۰ را دارند.



شکل ۴: عدد اتمی مؤثر برحسب انرژی فوتون برای نمونه‌های شیشه‌ای تلوریت و نوعی از بتون (SSC)

با توجه به شکل ۴، نوعی از بتون (SSC) کمترین عدد اتمی مؤثر را دارد زیرا عدد اتمی عناصر تشکیل دهنده آن نسبتاً پایین است در صورتی که نمونه‌های شیشه‌ای به‌علت بالابودن عدد اتمی عناصر، عدد اتمی مؤثر بیشتری دارند. برای مقایسه قابلیت حفاظتی شیشه‌های تلوریت، نسبت ضریب تضعیف خطی نمونه‌های شیشه‌ای و بتون به سرب و اورانیوم را برای ۱۰ چشمه رادیوایزوتوپی گاما در شکل ۵ رسم کردیم. همانطور که در شکل ۵ مشاهده می‌شود، بیشترین و کمترین این نسبت‌ها به ترتیب متعلق به TBB و SSC است



شکل ۵: نسبت ضریب تضعیف خطی نمونه‌های شیشه‌ای و بتون به ضریب تضعیف خطی سرب (a) و اورانیوم (b) برای ۱۰ چشمه رادیوایزوتوپی گاما.

### بحث و نتیجه‌گیری:

با مقایسه‌ای که بین ضریب تضعیف خطی بتون و شیشه‌ها انجام شد، برای هر یک از چشمه‌های رادیوایزوتوپی، رابطه زیر را برای ضریب تضعیف خطی ( $\mu$ ) نمونه‌ها داریم:

$$\mu(\text{TBB}) > \mu(\text{TPZ}) > \mu(\text{TSW}) > \mu(\text{TBN}) > \mu(\text{TNS}) > \mu(\text{SSC})$$

همچنین با افزایش انرژی میانگین چشمه، ضریب تضعیف خطی کاهش می‌یابد.

ضرایب انباشت شار بدست آمده با مقدار مسافت آزاد میانگین (mfp) افزایش می‌یابد. برای عمق نفوذهای یکسان و هر یک از چشمه‌ها به جز در محدوده انرژی ۰٫۷۸۶-۱٫۲۱ MeV، رابطه زیر را برای ضریب انباشت شار نمونه‌ها داریم:

$$\text{FBF}(\text{SSC}) > \text{FBF}(\text{TNS}) > \text{FBF}(\text{TBN}) > \text{FBF}(\text{TSW}) > \text{FBF}(\text{TPZ}) > \text{FBF}(\text{TBB})$$

با توجه به رابطه بالا، از بین نمونه‌های حاضر، شیشه TBB کمترین و نوعی از بتون (SSC) بیشترین ضریب انباشت شار را برای همه‌ی چشمه‌های رادیوایزوتوپی گاما، داشت. به طور تقریبی ضریب انباشت شار با افزایش انرژی میانگین چشمه نیز در هر نمونه افزایش می‌یافت؛ که بدلیل کاهش سطح مقطع پراکندگی کامپتون با افزایش انرژی است.

عدد اتمی موثر نمونه‌ها وابسته به انرژی فوتون فرودی است؛ با این وجود رابطه زیر را برای عدد اتمی مؤثر میانگین نمونه‌های شیشه‌ای و نوعی از بتون خواهیم داشت:

$$\langle Z_{\text{eff}}(\text{TBB}) \rangle > \langle Z_{\text{eff}}(\text{TPZ}) \rangle > \langle Z_{\text{eff}}(\text{TSW}) \rangle > \langle Z_{\text{eff}}(\text{TBN}) \rangle > \langle Z_{\text{eff}}(\text{TNS}) \rangle > \langle Z_{\text{eff}}(\text{SSC}) \rangle$$

علاوه بر این عدد اتمی مؤثر میانگین شیشه TBB و در پی آن TPZ از نمونه‌های ذکر شده دیگر بیشتر است.

در گستره انرژی  $10^{-2} \times 10^{-3} - 15 \times 10^{-3}$  با افزایش انرژی فوتون فرودی، عدد اتمی مؤثر افزایش و در گستره انرژی MeV  $10^{-1} - 2$ ، این عدد کاهش می‌یابد.



در این پژوهش به این نتیجه کلی رسیدیم که استفاده از شیشه‌ها برای حفاظ گذاری بهتر از نوعی از بتون است زیرا نمونه‌ها نسبت به بتون با افزایش انرژی فوتون فرودی، ضریب تضعیف خطی و عدد اتمی مؤثر بیشتری دارند همچنین ضرایب انباشت شار کمتری دارند. از بین شیشه‌ها، TBB بهترین تضعیف کننده فوتون است. ضریب تضعیف فوتون در شیشه‌ها از بتون بیشتر و از سرب و اورانیوم کمتر است (به‌طور میانگین به ترتیب حدود  $\frac{1}{3}$  و  $\frac{1}{5}$ ). یعنی برای داشتن تضعیف معادل، ضخامت شیشه‌ها باید حدوداً ۳ برابر ضخامت سرب و ۵ برابر ضخامت اورانیوم باشد. با این وجود گاهی استفاده از چنین شیشه‌هایی بسیار مفیدتر است؛ با توجه به اینکه شیشه شفاف است و امکان رؤیت پشت آن وجود دارد، در برخی از آزمایشگاهها، کارگاهها و یا در مراکز ساخت چشمه‌های رادیوایزوتوپی استفاده از چنین شیشه‌هایی به عنوان حفاظ می‌تواند بسیار مناسب‌تر از اورانیوم و سرب باشد.

#### مراجع:

- [1] A.M.A. Mostafa, Shams A.M. Issa, M.I.S; "Gamma ray shielding properties of PbO-B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> doped with WO<sub>3</sub>"; J. Alloys Compd. **708**, 294–300 (2017).
- [2] M.I. Sayyed, Shams A.M. Issa, Mehmet Büyükyıldız, Mengge Dong; "Determination of nuclear radiation shielding properties of some tellurite glasses using MCNP5 code"; Radiation Physics and Chemistry. **150**, 1-8 (2018).
- [3] Ç. Ersundu, M., Ersundu, A.E., Sayyed, M.I., Lakshminarayana, G., Aydin, S.; "Evaluation of physical, structural properties and shielding parameters for K<sub>2</sub>O–WO<sub>3</sub>–TeO<sub>2</sub> glasses for gamma ray shielding applications". J. Alloys Compd. **714**, 278–286 (2017).
- [4] D.B. Pelowitz; "MCNPX-A general Monte-Carlo N-particle transport code", Version 2.6, LANL Report, LA-CP-07-1473, Los Alamos; (2008).
- [5] R.L. Heath; "Sintilation spectrometry gamma-ray spectrum Catalogue"; 2nd edn. Idaho National Laboratory, Idaho; (1997).
- [6] Nicholas, Tsoufanidis; "Measurement and detection of radiation"; CRC press; 150-152 (2010).
- [7] M XCOM: Photon Cross Sections Database, version 1.5, [Online]. <<http://physics.nist.gov/pml/data/xcom/data/xcom/index.cfm>>. Gaithersburg, MD, USA (2015).