

## ارزیابی قابلیت‌های حفاظتی برخی از شیشه‌های اکسید فلزی در برابر تابش چشمه‌های رادیوایزوتوپی گاما

فائزه محمدرفعی و رحیم خباز

گروه فیزیک، دانشکده علوم، دانشگاه گلستان، گرگان

پست الکترونیکی: r.khabaz@gu.ac.ir

(دریافت مقاله: ۱۳۹۸/۱۰/۲۳؛ دریافت نسخه نهایی: ۱۳۹۹/۰۴/۲۳)

### چکیده

در این پژوهش، مشخصه‌های حفاظتی شیشه‌های اکسید فلزی تلوریت مانند TPZ، TNS، TBN، TSW، TBB و نوعی از بتن (SSC) در برابر تابش ۱۰ چشمه رادیوایزوتوپی گاما مورد بررسی قرار گرفتند. بدین منظور، از کد MCNPX در شبیه‌سازی ترابرد فوتون در نمونه‌ها و از پایگاه داده سطح مقطع XCOM برای محاسبه ضریب تضعیف جرمی استفاده شد. برای حفاظ‌های ذکر شده عدد اتمی مؤثر، ضریب تضعیف خطی و ضریب انباشت شار در برابر تابش چشمه‌های رادیوایزوتوپی گاما محاسبه شدند. نتایج نشان می‌دهند که در نظر گرفتن انرژی میانگین در محاسبات حفاظت در برابر پرتوها برای یک چشمه گسیلنده چند انرژی گاما نمی‌تواند ملاکی مناسب برای آن چشمه باشد و در محاسبات بایستی تمام طیف انرژی چشمه لحاظ شود. شیشه TBB بهترین تضعیف‌کننده فوتون نسبت به سایر شیشه‌های اکسید فلزی تلوریت بود، زیرا برای تمام چشمه‌های رادیوایزوتوپی گاما، بیشترین عدد اتمی مؤثر، ضریب تضعیف خطی و کمترین ضرایب انباشت شار را داشت.

واژه‌های کلیدی: شیشه‌های اکسید فلزی، عدد اتمی مؤثر، ضریب تضعیف خطی، ضریب انباشت شار، شبیه‌سازی مونت کارلو

### ۱. مقدمه

سادگی در ساخت و شفافیت عالی، می‌توانند گزینه‌های مناسبی باشند؛ با افزودن اکسید در فرمول شیشه، می‌توان از ویژگی حفاظت در برابر تابش آنها استفاده کرد. از جمله این شیشه‌ها، شیشه‌های اکسید فلزی تلوریت (TPZ، TNS، TBN، TSW و TBB) هستند که خواص فیزیکی برتری همانند دمای ذوب پایین، آهنگ انتقال حرارت کم، ضریب شکست خطی بالا، پنجره شفاف نوری وسیع، مقاومت حرارتی و شیمیایی و ... دارند [۵ و ۶]. روش مونت کارلو یک پیشنهاد مناسب برای

امروزه تابش گاما در بسیاری از کاربردها مانند پرتودهی مواد غذایی، پزشکی (تشخیص و درمان)، استریلیزه کردن، صنعت، تجزیه و تحلیل عناصر و ... مورد استفاده قرار می‌گیرند از این رو حفاظ‌گذاری مناسب چشمه‌های گاما امری ضروری است [۱-۴]. تهیه مخلوطی از موادی که می‌توانند به عنوان حفاظ در برابر فوتون‌ها استفاده شوند بسیار مهم و مفید است. در این میان شیشه‌ها به دلیل همگن بودن، دامنه ترکیب وسیع،

در مطالعه حاضر از کد مونت کارلوی MCNPX در شبیه‌سازی شیشه‌های اکسید فلزی تلوریت: - (۵۲/۵TeO<sub>۲</sub>-۲۲/۵PbO) TPZ (۷۸/۵TeO<sub>۲</sub>-۲۰Na<sub>۲</sub>O-۱/۵Sm<sub>۲</sub>O<sub>۳</sub>) TNS، ۲۵ZnO) TBN، (۷۵TeO<sub>۲</sub>-۲۰Sb<sub>۲</sub>O<sub>۳</sub>-(۹۰TeO<sub>۲</sub>-9BaO-۱Nd<sub>۲</sub>O<sub>۳</sub>) TSW (۵۵TeO<sub>۲</sub>-۲۵B<sub>۲</sub>O<sub>۳</sub>-۲۰Bi<sub>۲</sub>O<sub>۳</sub>)، ۵WO<sub>۳</sub>)، TBB همچنین نوعی از بتن ((Steel-Scrap Concrete (SSC))، سرب و اورانیوم در معرض تابش ۱۰ چشمه رادیوایزوتوپی گاما (<sup>۲۴</sup>Na، <sup>۲۲</sup>Na، <sup>۵۶</sup>Co، <sup>۶۰</sup>Co، <sup>۷۵</sup>Se، <sup>۸۸</sup>Y، <sup>۱۳۷</sup>Cs، <sup>۱۶۹</sup>Yb، <sup>۱۹۲</sup>Ir، <sup>۲۲۸</sup>Th) استفاده شد [۱۳]. درصد مولی نمونه‌های حاضر همراه با چگالی هر یک از آنها در جدول ۱ فهرست شده‌اند.

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 ضخامت ۱ cm و شعاع ۲۵ cm از جنس ماده مورد نظر 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:

$$\mu = -\frac{\ln\left(\frac{I}{I_0}\right)}{x}, \quad (2)$$

در این پژوهش ضریب تضعیف خطی را برای هر چشمه در دو حالت به دست آوردیم؛ در حالت نخست تنها انرژی میانگین هر چشمه رادیوایزوتوپی را در شبیه‌سازی لحاظ کردیم و در مرحله بعد طیف کامل انرژی هر چشمه را در نظر گرفتیم و نتایج را با یکدیگر مقایسه کردیم. در اینجا منظور از انرژی میانگین چشمه، میانگین وزنی فوتون‌های گسیل شده با توجه به نسبت شاخه‌ای هر پرتو گاما است؛ همچنین در طیف کامل انرژی چشمه، آن دسته از انرژی‌های گسسته که درصد شدت فراوانی آنها مقدار قابل توجهی ( $I_{\gamma}(\%) \geq 0.001$ ) بود، لحاظ شدند.

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 زیاد (۳ m) در نظر گرفتیم.

محاسبه خواص حفاظتی این نوع از شیشه‌ها است. عدد اتمی مؤثر، ضریب تضعیف خطی، مسافت آزاد میانگین و ضریب انباشت شار برای توصیف نفوذ و انتشار پرتو گاما در هر ماده کمیت‌هایی مهم هستند. در اغلب پژوهش‌های انجام شده، برخی از مشخصات حفاظتی مواد را براساس چشمه‌های تک انرژی فوتون به دست آورده‌اند [۷-۹]. در این پژوهش یکی از پارامترهای اساسی حفاظت یعنی عدد اتمی مؤثر در انرژی‌های مختلف، برای نمونه‌های ذکر شده محاسبه شد. همچنین به کمک محاسبات مونت کارلو، خصوصیات حفاظتی دیگر از جمله ضریب تضعیف خطی و ضریب انباشت شار فوتون برای شیشه‌های اکسید فلزی تلوریت، بتن، سرب و اورانیوم در برابر تابش ۱۰ چشمه رادیوایزوتوپی گاما، محاسبه و مورد ارزیابی قرار گرفتند.

## ۲. روش کار

یکی از پارامترهای حفاظتی مهم در مواد مخلوط و مرکب، عدد اتمی مؤثر ( $Z_{eff}$ ) است؛ چرا که ضریب تضعیف جرمی مواد و به عبارتی احتمال برهم‌کنش فوتون با ماده به عدد اتمی مؤثر آنها بستگی دارد. عدد اتمی مؤثر برای هر یک از مواد را می‌توان با استفاده از رابطه زیر محاسبه کرد [۱۰]:

$$Z_{eff} = \frac{\sum_i f_i A_i \left(\frac{\mu}{\rho}\right)_i}{\sum_i f_i \frac{A_i}{Z_i} \left(\frac{\mu}{\rho}\right)_i}, \quad (1)$$

که در آن،  $\left(\frac{\mu}{\rho}\right)_i$  ضریب تضعیف جرمی ( $m^2/kg$ )،  $A_i$  جرم اتمی،  $f_i$  کسر مولی و  $Z_i$  عدد اتمی عنصر  $i$  ام است. ضریب تضعیف جرمی مورد نظر را می‌توان از پایگاه داده سطح مقطع XCOM به دست آورد.

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 و شبیه‌سازی طیف کامل انرژی چشمه پرتوزا است [۱۱ و ۱۲].

جدول ۱. درصد مولی ترکیب اتمی و چگالی نمونه‌های شیشه‌ای و بتن.

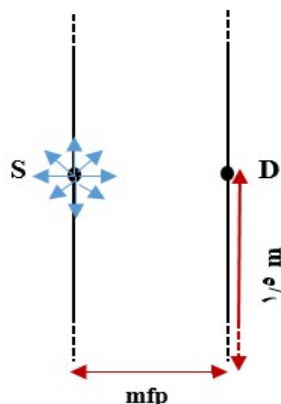
SSC	TBB	TSW	TBN	TNS	TPZ	ماده ترکیب اتمی
-	۵۵	۷۵	۹۰	۷۸/۵	۵۲/۵	TeO <sub>۲</sub>
-	-	-	-	۲۰	-	Na <sub>۲</sub> O
-	-	-	-	۱/۵	-	Sm <sub>۲</sub> O <sub>۳</sub>
-	-	-	۹	-	-	BaO
-	-	-	۱	-	-	Nd <sub>۲</sub> O <sub>۳</sub>
-	-	۲۰	-	-	-	Sb <sub>۲</sub> O <sub>۳</sub>
-	-	۵	-	-	-	WO <sub>۳</sub>
-	۲۵	-	-	-	-	B <sub>۲</sub> O <sub>۳</sub>
-	۲۰	-	-	-	-	Bi <sub>۲</sub> O <sub>۳</sub>
-	-	-	-	-	۲۲/۵	PbO
-	-	-	-	-	۲۵	ZnO
۰/۷	-	-	-	-	-	H
۰/۰۹	-	-	-	-	-	C
۲۱/۰۹	-	-	-	-	-	O
۰/۴۵	-	-	-	-	-	Na
۰/۰۹	-	-	-	-	-	Mg
۱/۲	-	-	-	-	-	Al
۱۰/۴۹	-	-	-	-	-	Si
۰/۰۶	-	-	-	-	-	S
۰/۳	-	-	-	-	-	K
۴/۲۸	-	-	-	-	-	Ca
۶۱/۲۵	-	-	-	-	-	Fe
۴/۰۰	۵/۹۵	۵/۷۱	۵/۶۵	۴/۹۴	۶/۰۸	چگالی (g/cm <sup>۳</sup> )

شده از چشمه بهنجار می‌شود، با استفاده از رابطه (۳) می‌توان ضریب انباشت شار را محاسبه کرد [۱۴]:

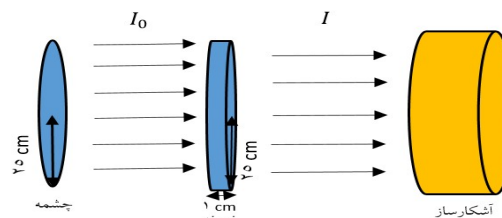
$$FBF = \frac{4\pi r^2 \phi}{e^{-\mu r}} \quad (۳)$$

که در این رابطه،  $r$  ضخامت نمونه،  $\phi$  شار فوتون‌های رسیده به آشکارساز و  $\mu$  ضریب تضعیف خطی است. لازم به ذکر است،

چشمه‌های رادیوایزوتوپی گاما (S) (به صورت نقطه‌ای و همسانگرد) و آشکارساز (D) را در دو سطح قاعده تیغه استوانه‌ای نمونه قرار دادیم (شکل ۲). به ازای مسافت‌های آزاد میانگین (mfp) متفاوت (از ۰/۵ تا ۱۰ mfp) برای هر نمونه شیشه‌ای، به کمک تالی F5 شار را در نقطه D به دست آوردیم. از آنجایی که خروجی کد MCNPX براساس یک ذره گسیل



شکل ۲. هندسه شبیه‌سازی شده چشمه (S)، آشکارساز (D) و نمونه استوانه‌ای شکل به شعاع ۱/۵ m در تعیین ضریب انباشت شار.



شکل ۱. سامانه شبیه‌سازی شده برای تعیین ضریب تضعیف خطی.

مقادیر عدد اتمی موثر را دارند. در مورد شیشه‌ها  $Z_{eff}$  در محدوده انرژی ۰.۱-۰.۰۲ MeV تغییرات قابل توجهی دارد که آن را می‌توان به فرایندهای برهم‌کنش فوتون با ماده هدف نسبت داد. برای شیشه‌های TBB، TPZ در انرژی‌های ۰.۰۲ MeV و ۰.۱ MeV پرش‌های ناگهانی اتفاق می‌افتد که این پرش را می‌توان مربوط به جذب لایه K عناصر تشکیل دهنده نمونه‌های شیشه‌ای دانست. شیشه‌های TNS، TBN و TSW در همه انرژی‌ها تقریباً عدد اتمی مؤثر نزدیک به یکدیگر دارند. برای عدد اتمی مؤثر میانگین نمونه‌های شیشه‌ای و نوعی از بتن، رابطه زیر را خواهیم داشت:

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

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

با استفاده از محاسبات شبیه‌سازی مونت کارلو و به کمک رابطه (۲)، ضریب تضعیف خطی نمونه‌ها را به دو صورت با طیف کامل انرژی و با میانگین انرژی چشمه‌های رادیوایزوتوپی گاما به دست آوردیم؛ که نتایج در جداول ۲ و ۳ 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 کردن انرژی میانگین چشمه‌ها در تعیین

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 نهایت ضرایب انباشت شار به دست آمده براساس رابطه برگر برازش داده شد [۱۵]:

$$B(E, \mu r) = 1 + a(E) \mu r [exp b(E) \mu r], \quad (4)$$

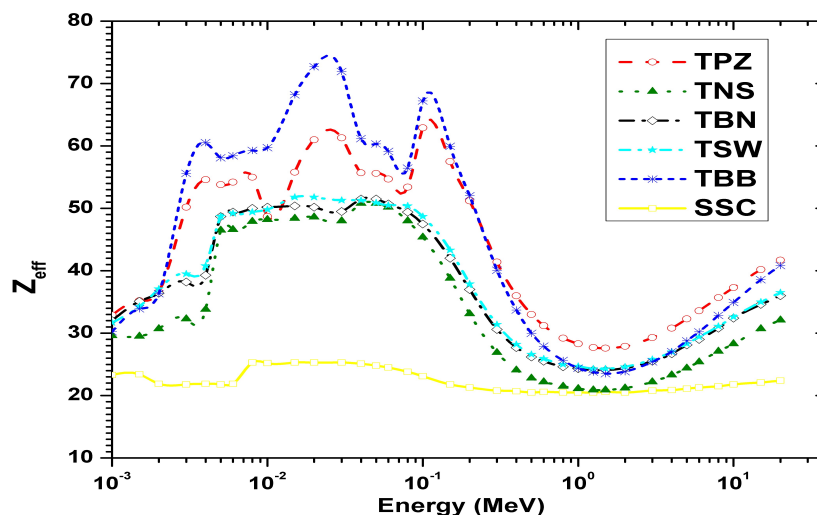
که  $a$  و  $b$  ثابت‌هایی هستند که به انرژی فوتون و جنس حفاظ بستگی دارند.

### ۳. نتایج و بحث

بر اساس ضرایب تضعیف جرمی به دست آمده از پایگاه داده سطح مقطع XCOM [۱۶] عدد اتمی مؤثر ( $Z_{eff}$ ) برای نمونه‌های گوناگون به ازای انرژی فوتون در گستره ۱-۲۰ MeV به کمک رابطه (۱) محاسبه و در شکل ۳ رسم شد. مشاهده می‌شود عدد اتمی مؤثر برای بتن 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.

با توجه به شکل ۳، نوعی از بتن (SSC) کمترین عدد اتمی مؤثر را دارد زیرا عدد اتمی عناصر تشکیل دهنده آن نسبتاً پایین است؛ در صورتی که نمونه‌های شیشه‌ای به علت بالابودن عدد اتمی عناصر تشکیل دهنده آنها، عدد اتمی مؤثر بیشتری دارند. در میان شیشه‌ها نیز TBB و TNS به ترتیب بیشترین و کمترین





شکل ۳. عدد اتمی مؤثر برحسب انرژی فوتون برای نمونه‌های شیشه‌ای و نوعی از بتن (SSC).

کامل گامای هر چشمه - حفاظ، مسافت آزاد میانگین مربوطه محاسبه شد. براساس خروجی‌های محاسبات مونت کارلو و به کمک رابطه (۳)، ضرایب انباشت شار تیغه‌هایی با ضخامت‌هایی برابر با مسافت آزاد میانگین متفاوت از مواد مورد مطالعه در معرض تابش چشمه‌های رادیوایزوتوپی گاما محاسبه و در شکل ۴ رسم شدند.

همان گونه که در شکل ۴ 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. ضریب انباشت شار با مسافت آزاد میانگین، انرژی فوتون فرودی و چگالی جرمی نمونه‌ها رابطه دارد. دیده شد که در حالت کلی با افزایش چگالی نمونه‌های ذکر شده، ضریب انباشت شار کاهش یافت.

با توجه به شکل ۴، برای تمامی چشمه‌ها (به جز در محدوده انرژی میانگین ۰/۲۱۸-۰/۱۴۵ MeV)، در هر مسافت آزاد میانگین معین، مقدار ضریب انباشت برای تمام نمونه‌های شیشه‌ای با افزایش انرژی میانگین چشمه گاما، به علت کاهش فرایند پراکندگی کامپتون در ماده، کاهش می‌یابد. همچنین غالباً در عمق حدود ۵-۰/۲ mfp، برای نمونه SSC، با افزایش انرژی میانگین چشمه مقدار ضریب انباشت شار نیز افزایش می‌یافت؛

مشخصه‌ها همراه با خطا است و در محاسبات حفاظت در برابر پرتوها باید تمام طیف چشمه گاما لحاظ شود. ضریب تضعیف خطی با انرژی فوتون تغییر می‌کند. مشاهده شد که در فوتون‌های کم انرژی، تمام نمونه‌های ذکر شده ضریب تضعیف خطی بالایی دارند زیرا در انرژی‌های پایین، جذب فوتوالکتریک برهم‌کنش غالب است. تا انرژی حدود ۰/۴ MeV، با افزایش انرژی میانگین چشمه‌ها ضریب تضعیف خطی به شدت کاهش می‌یابد. برای چشمه‌هایی با انرژی میانگین بالاتر از ۰/۴ MeV، کاهش ضریب تضعیف به آرامی صورت می‌گیرد؛ در این گستره انرژی پراکندگی کامپتون برهم‌کنش غالب است. همچنین برای چشمه‌هایی با انرژی میانگین بالاتر از ۱/۲ MeV تغییرات کمتری را شاهد هستیم؛ در این محدوده انرژی تولید زوج فرایند غالب است.

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

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

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

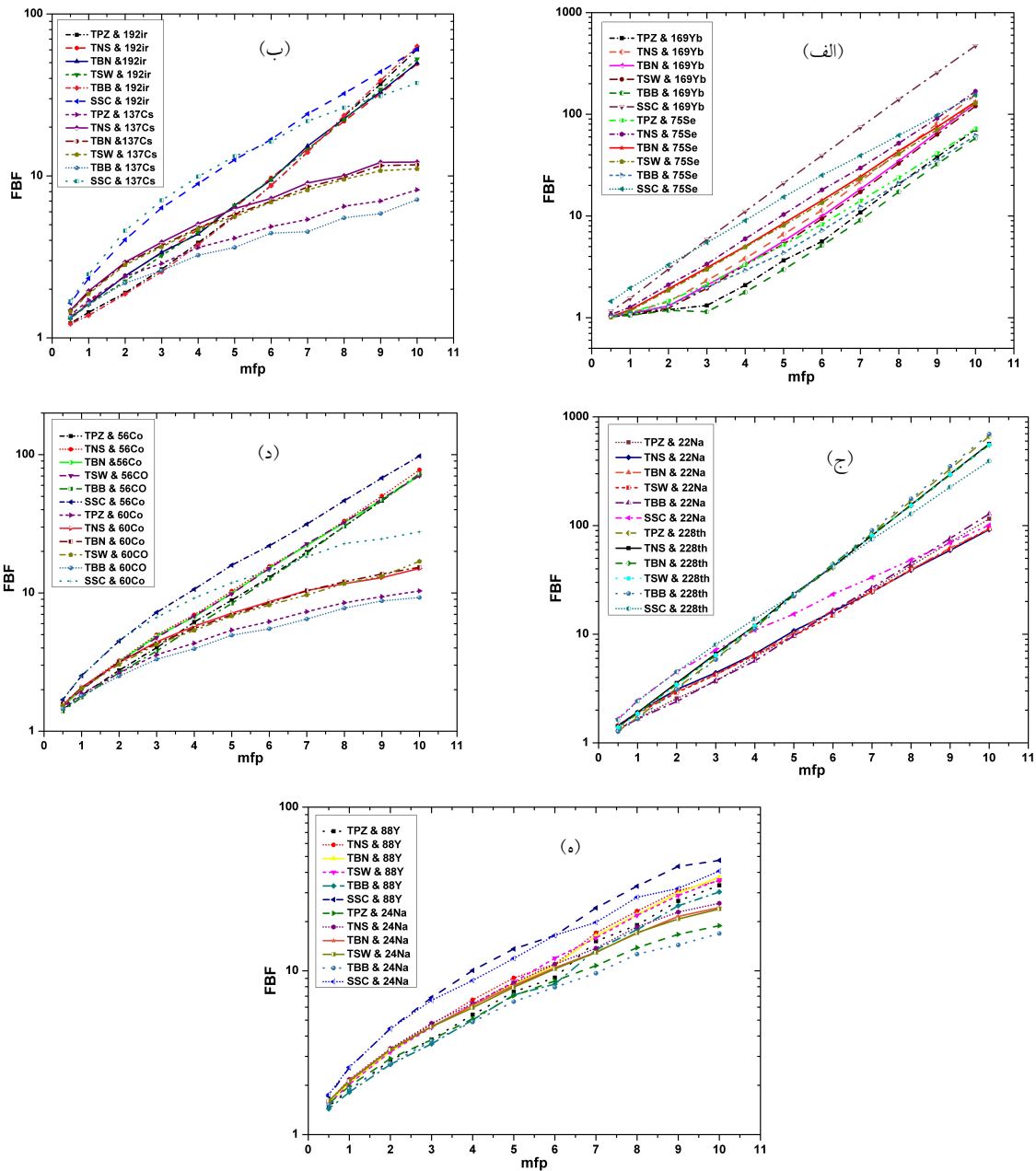
در ادامه با توجه به ضریب تضعیف خطی حاصل از طیف

جدول ۲. ضریب تضعیف خطی (1/cm) با طیف انرژی و میانگین انرژی (ME) چشمه‌های رادیوایزوتوپی گاما برای نمونه‌های شیشه‌ای TPZ، و TNS، TBN و TSW.

TSW		TBN		TNS		TPZ		ماده چشمه (ME(MeV))
با طیف انرژی	با میانگین انرژی	با طیف انرژی	با میانگین انرژی	با طیف انرژی	با میانگین انرژی	با طیف انرژی	با میانگین انرژی	
۳/۶۴۲۵	۲/۴۴۵۶	۳/۴۳۹۹	۲/۳۶۴۱	۲/۷۷۷۰	۲/۰۷۹۰	۶/۱۲۶۷	۳/۲۹۸۲	<sup>۱۶۹</sup> Yb(۰/۱۴۵)
۱/۵۵۴۷	۱/۵۸۴۱	۱/۴۷۷۵	۱/۵۳۴۲	۱/۲۲۱۵	۱/۳۵۰۷	۲/۴۵۹۳	۲/۰۸۸۹	<sup>۷۵</sup> Se(۰/۲۱۸)
۰/۷۰۹۰	۰/۷۶۲۲	۰/۶۸۳۸	۰/۷۳۴۳	۰/۵۸۵۳	۰/۶۲۷۶	۰/۹۶۲۸	۱/۰۴۱۴	<sup>۱۹۲</sup> Ir(۰/۳۷۵)
۰/۴۳۵۴	۰/۴۳۵۴	۰/۴۲۴۴	۰/۴۲۴۴	۰/۳۷۱۲	۰/۳۷۱۲	۰/۵۱۷۷	۰/۵۱۷۷	<sup>۱۳۷</sup> Cs(۰/۶۶۲)
۰/۳۸۸۷	۰/۴۳۷۲	۰/۳۷۹۷	۰/۴۲۵۸	۰/۳۳۳۲	۰/۳۷۱۹	۰/۴۵۰۴	۰/۵۲۶۹	<sup>۲۲</sup> Na(۰/۷۸۶)
۰/۲۹۹۳	۰/۴۸۴۶	۰/۲۹۳۳	۰/۴۷۱۶	۰/۲۵۸۵	۰/۴۱۲۹	۰/۳۳۳۰	۰/۵۸۷۱	<sup>۲۲۸</sup> Th(۱/۲۱)
۰/۲۹۵۰	۰/۳۳۵۸	۰/۲۸۹۰	۰/۳۲۸۳	۰/۲۵۴۸	۰/۲۸۸۴	۰/۳۲۷۶	۰/۳۸۴۸	<sup>۵۶</sup> Co(۱/۲۴۳)
۰/۲۹۳۸	۰/۲۹۴۸	۰/۲۸۷۹	۰/۲۸۸۸	۰/۲۵۳۸	۰/۲۵۴۷	۰/۳۲۶۲	۰/۳۲۷۴	<sup>۶۰</sup> Co(۱/۲۵۲)
۰/۲۷۸۴	۰/۲۹۷۹	۰/۲۷۲۸	۰/۲۹۱۶	۰/۲۴۰۶	۰/۲۵۶۸	۰/۳۰۷۸	۰/۳۳۴۳	<sup>۸۸</sup> Y(۱/۳۸۳)
۰/۲۳۲۷	۰/۲۴۵۹	۰/۲۲۸۲	۰/۲۴۱۰	۰/۲۰۰۶	۰/۲۱۱۹	۰/۲۵۶۵	۰/۲۷۱۸	<sup>۲۴</sup> Na(۲/۰۶۲)

جدول ۳. ضریب تضعیف خطی (1/cm) با طیف انرژی و میانگین انرژی (ME) چشمه‌های رادیوایزوتوپی گاما برای نمونه شیشه‌ای TBB و نوعی از بتن (SSC) و سرب (Pb) و اورانیوم (<sup>۹۲</sup>U).

U		Pb		SSC		TBB		ماده چشمه (ME(MeV))
با طیف انرژی	با میانگین انرژی	با طیف انرژی	با میانگین انرژی	با طیف انرژی	با میانگین انرژی	با طیف انرژی	با میانگین انرژی	
۵۳/۴۰۹۳	۱۱/۹۷۵۰	۲۵/۳۲۵۰	۶/۹۳۱۲	۰/۷۷۱۷	۱/۰۲۹۹	۷/۲۹۸۹	۳/۶۱۸۱	<sup>۱۶۹</sup> Yb(۰/۱۴۵)
۲۰/۴۶۷۴	۸/۲۱۱۲	۹/۲۱۷۴	۵/۰۲۰۸	۰/۵۳۳۰	۰/۶۱۵۱	۲/۸۶۹۳	۲/۲۹۰۷	<sup>۷۵</sup> Se(۰/۲۱۸)
۶/۲۶۷۲	۴/۶۷۱۸	۲/۹۴۰۸	۲/۷۴۶۱	۰/۳۸۹۴	۰/۳۹۹۱	۱/۰۶۲۱	۱/۱۴۷۲	<sup>۱۹۲</sup> Ir(۰/۳۷۵)
۲/۴۵۵۲	۲/۴۵۵۲	۱/۲۴۰۵	۱/۲۴۰۵	۰/۲۹۶۴	۰/۲۹۶۴	۰/۵۳۸۶	۰/۵۳۸۶	<sup>۱۳۷</sup> Cs(۰/۶۶۲)
۱/۹۶۶۸	۲/۰۶۷۰	۱/۰۱۸۳	۱/۲۱۳۸	۰/۲۷۲۹	۰/۲۹۰۵	۰/۴۶۲۸	۰/۵۵۱۵	<sup>۲۲</sup> Na(۰/۷۸۶)
۱/۲۴۱۲	۱/۷۴۹۶	۰/۶۷۸۹	۱/۱۳۰۷	۰/۲۱۹۵	۰/۲۸۹۹	۰/۳۳۴۹	۰/۶۱۳۳	<sup>۲۲۸</sup> Th(۱/۲۱)
۱/۲۱۳۰	۱/۴۴۷۸	۰/۶۶۵۳	۰/۸۱۸۲	۰/۲۱۶۶	۰/۲۳۷۱	۰/۳۲۹۲	۰/۳۹۲۹	<sup>۵۶</sup> Co(۱/۲۴۳)
۱/۲۰۵۷	۱/۲۱۱۹	۰/۶۶۱۷	۰/۶۶۵۰	۰/۲۱۵۸	۰/۲۱۶۸	۰/۳۲۷۸	۰/۳۲۹۰	<sup>۶۰</sup> Co(۱/۲۵۲)
۱/۱۱۶۶	۱/۲۴۶۴	۰/۶۱۷۷	۰/۶۹۲۳	۰/۲۰۵۰	۰/۲۱۵۷	۰/۳۰۸۵	۰/۳۳۷۸	<sup>۸۸</sup> Y(۱/۳۸۳)
۰/۹۱۷۳	۰/۹۸۲۲	۰/۵۱۵۰	۰/۵۵۰۴	۰/۱۶۹۳	۰/۱۷۸۱	۰/۲۵۶۳	۰/۲۷۲۱	<sup>۲۴</sup> Na(۲/۰۶۲)



شکل ۴. ضریب انباشت شار بر حسب مسافت آزاد میانگین، برای پنج نمونه شیشه‌ای و بتن در معرض چشمه‌های رادیوایزوتوپی (الف)  $^{169}\text{Yb}$  و (ب)  $^{192}\text{Ir}$  و  $^{137}\text{Cs}$ ، (ج)  $^{22}\text{Na}$  و  $^{228}\text{Th}$ ، (د)  $^{56}\text{Co}$  و  $^{60}\text{Co}$  و (ه)  $^{88}\text{Y}$  و  $^{24}\text{Na}$ .

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 بتن (SSC) بیشترین ضریب انباشت شار را

در حالی که در عمق نفوذهای بالاتر از ۲ mfp به صورت عکس بود. ضرایب انباشت شار به دست آمده با مقدار مسافت آزاد میانگین (mfp) افزایش می‌یابد. برای عمق نفوذهای یکسان و هریک از چشمه‌ها، غالباً رابطه زیر را برای ضریب انباشت شار

جدول ۴. ثابت‌های به دست آمده از برازش ضریب انباشت شار بر اساس رابطه (۴)

$^{22}\text{Na}$		$^{137}\text{Cs}$		$^{192}\text{Ir}$		$^{75}\text{Se}$		$^{169}\text{Yb}$		چشمه ماده
<i>b</i>	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>a</i>	
۰/۳۸۸	۰/۲۳۷	۰/۰۱۹	۰/۵۸۰	۰/۳۸۰	۰/۱۳۲	۰/۴۵۲	۰/۰۷۸	۰/۵۳۱	۰/۰۳۵	TPZ
۰/۳۲۳	۰/۳۵۷	۰/۰۲۱	۰/۹۵۸	۰/۳۰۰	۰/۲۳۹	۰/۴۷۵	۰/۱۴۴	۰/۵۴۸	۰/۰۶۴	TNS
۰/۳۲۳	۰/۳۶۵	۰/۰۲۵	۰/۸۸۱	۰/۲۹۶	۰/۲۵۲	۰/۴۵۵	۰/۱۴۰	۰/۵۴۵	۰/۰۵۵	TBN
۰/۳۳۳	۰/۳۳۱	۰/۰۱۷	۰/۸۸۹	۰/۳۲۱	۰/۲۰۸	۰/۴۶۹	۰/۱۱۷	۰/۵۴۴	۰/۰۵۲	TSW
۰/۴۱۰	۰/۲۰۹	۰/۰۱۶	۰/۴۹۴	۰/۳۹۳	۰/۱۲۲	۰/۴۴۹	۰/۰۶۸	۰/۵۲۰	۰/۰۳۲	TBB
۰/۲۵۰	۰/۸۱۲	۰/۰۸۲	۱/۶۱۸	۰/۱۹۴	۰/۸۴۳	۰/۳۴۶	۰/۴۸۵	۰/۴۹۹	۰/۳۱۹	SSC
$^{22}\text{Na}$		$^{60}\text{Co}$		$^{57}\text{Co}$		$^{228}\text{Th}$		چشمه ماده		
<i>b</i>	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>a</i>	<i>B</i>	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>a</i>			
۰/۰۸۵	۰/۷۸۲	۰/۱۸۳	۰/۵۲۸	۰/۰۱۶	۰/۸۰۷	۰/۳۱۷	۰/۲۹۶	۰/۵۷۵	۰/۲۰۹	TPZ
۰/۱۰۲	۰/۹۲۷	۰/۱۵۲	۰/۷۸۷	۰/۰۲۵	۱/۰۹۱	۰/۳۰۰	۰/۳۷۶	۰/۵۳۲	۰/۲۷۴	TNS
۰/۱۰۰	۰/۸۸۳	۰/۱۷۶	۰/۶۳۲	۰/۰۳۶	۱/۰۱۲	۰/۲۷۶	۰/۴۳۸	۰/۵۲۳	۰/۲۹۴	TBN
۰/۰۹۸	۰/۸۸۲	۰/۱۶۲	۰/۷۰۲	۰/۰۶۱	۰/۸۲۸	۰/۲۷۲	۰/۴۵۶	۰/۵۲۴	۰/۲۹۲	TSW
۰/۰۷۸	۰/۷۳۹	۰/۱۸۲	۰/۴۸۸	۰/۰۱۸	۰/۷۰۹	۰/۳۲۸	۰/۲۶۹	۰/۵۷۳	۰/۲۲۶	TBB
۰/۱۱۲	۱/۲۸۶	۰/۱۲۶	۱/۳۸۸	۰/۰۴۴	۱/۷۷۷	۰/۲۵۲	۰/۷۷۱	۰/۴۴۳	۰/۴۶۷	SSC

متعلق به TBB و SSC است.

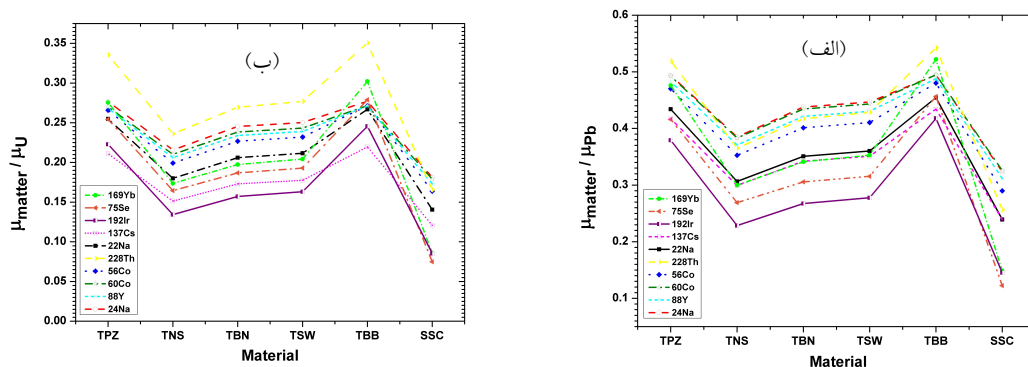
#### ۴. نتیجه‌گیری

در این پژوهش به این نتیجه کلی رسیدیم که استفاده از شیشه‌ها برای حفاظ‌گذاری بهتر از نوعی از بتن است؛ زیرا نمونه‌ها نسبت به بتن 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 تضعیف‌کننده فوتون است. ضریب تضعیف فوتون در شیشه‌ها از بتن 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 این که شیشه شفاف است و امکان رؤیت پشت آن وجود دارد، در برخی از آزمایشگاه‌ها، کارگاه‌ها

برای چشمه‌های رادیوایزوتوپی گاما داشتند. به طور تقریبی ضریب انباشت شار با افزایش انرژی میانگین چشمه نیز در هر نمونه کاهش می‌یافت؛ که به دلیل کاهش سطح مقطع پراکندگی کامپتون با افزایش انرژی است.

ضرایب انباشت شار براساس رابطه (۴) برازش داده شدند که ثابت‌های این برازش برای هر شیشه و حفاظ در جدول ۴ فهرست شده‌اند.

با استفاده از رابطه (۴) و لحاظ کردن ثابت‌های *a* و *b* می‌توان برای هر چشمه رادیوایزوتوپی گاما ضریب انباشت مربوط به ضخامت‌های مختلف حفاظ مورد نظر را محاسبه کرد. برای ارزیابی قابلیت حفاظتی شیشه‌های اکسید فلزی تلوریت، نسبت ضریب تضعیف خطی نمونه‌های شیشه‌ای و بتن به سرب و اورانیوم را برای ۱۰ چشمه رادیوایزوتوپی گاما به دست آورده و در شکل ۵ رسم کردیم. همان‌طور که در شکل ۵ مشاهده می‌شود، بیشترین و کمترین این نسبت‌ها به ترتیب



شکل ۵. نسبت ضریب تضعیف خطی نمونه‌های شیشه‌ای و بتن به ضریب تضعیف خطی (الف) سرب و (ب) اورانیوم برای  $10^\circ$  چشمه رادیوایزوتوپی گاما.

اورانیوم و سرب باشد.

و یا در مراکز ساخت چشمه‌های رادیوایزوتوپی استفاده از چنین شیشه‌هایی به عنوان حفاظ می‌تواند بسیار مناسب‌تر از

## مراجع

9. D Sardari, et al., *Applied Radiation and Isotopes* **67**, 7-8 (2009) 1438.
10. S R Manohara, et al., *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms* **266**, 18 (2008) 3906.
11. D B Pelowitz, "MCNPX-A general Monte-Carlo N-particle transport code", Version 2.6, LANL Report, LA-CP-07-1473, Los Alamos; (2008).
12. R Khabaz and H R Vega-Carrillo, *Radiation Physics and Chemistry* **173** (2020) 108875.
13. R L Heath, "Sintilation spectrometry gamma-ray spectrum Catalogue"; 2<sup>nd</sup> edn. Idaho National Laboratory, Idaho (1997).
14. R Khabaz, *Radiation Physics and Chemistry* **151** (2018) 53.
15. N Tsoulfanidis, "Measurement and detection of radiation", CRC press (2010) 150.
16. 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)..
1. R Khabaz and F Yaghobi, *Radiation Physics and Chemistry* **108** (2015) 18.
2. R Khabaz, *Applied Radiation and Isotopes* **139** (2018) 40.
3. م. رئیسی و اشهریاری، مجله پژوهش فیزیک ایران ۱۴، ۴ (۱۳۹۳) ۲۶۱.
3. M Raeisi and E Shahriari, *Iran. J. Phys. Res.* **14**, 4 (2015) 261.
4. س. محمدی، مجله پژوهش فیزیک ایران ۹، ۲ (۱۳۸۸) ۲۱۵.
4. S Mohammadi, *Iran. J. Phys. Res.* **9**, 2 (2009) 215.
5. A M A Mostafa, A M Issa Shams, and M I Sayyed. *Journal of Alloys and Compounds* **708** (2017) 294.
6. M Ersundu Çelikbilek, et al., *Journal of Alloys and Compounds* **714** (2017) 278.
7. م. ح. علامت‌ساز و اشیرانی، مجله پژوهش فیزیک ایران ۳، ۱ (۱۳۸۰) ۲۷.
7. M H Alamatsaz and A Shirini, *Iran. J. Phys. Res.* **3**, 1 (2002) 27.
8. H R Vega-Carrillo, et al., *Annals of Nuclear Energy* **112** (2018) 411.