

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 شبیه سازی شیشه های اکسید فلزی تلوریت: (TPZ - $52/5\text{TeO}_2-22/5\text{PbO}$) TNS, 25ZnO) $\text{TeO}_2-20\text{Na}_2\text{O}-1/5\text{Sm}_2\text{O}_3$) TBN, $75\text{TeO}_2-20\text{Sb}_2\text{O}_3-(90\text{TeO}_2-9\text{BaO}-1\text{Nd}_2\text{O}_3)$ TSW $55\text{TeO}_2-25\text{B}_2\text{O}_3-20\text{Bi}_2\text{O}_3$) TBB, همچنین نوعی از بتن ((Steel-Scrap Concrete (SSC)), سرب و اورانیوم در معرض تابش ^{10}C چشمه رادیوایزوتوپی گاما (^{24}Na , ^{23}Na , ^{56}Co , ^{60}Co , ^{75}Se , ^{88}Y , ^{137}Cs , ^{169}Yb , ^{192}Ir و ^{228}Th) استفاده شد [۱۳]. درصد مولی نمونه های حاضر همراه با چگالی هر یک از آنها در جدول ۱ فهرست شده اند.

برای تعیین ضریب تضعیف خطی، چشمه فوتون (S) به صورت یک قرص که پرتوهای موازی گسیل می کند، در نظر گرفته شد. پرتوها به تیغه استوانه ای با ضخامت ۱ cm و شعاع ۲۵ cm از جنس ماده مورد نظر می تابید (شکل ۱). با استفاده از تالی F۱، در شمارش پرتوهای گامایی که به طور موازی و عمود بر تیغه عبور کرده اند و به کمک قانون لامبرت-بیر، می توان 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 شبیه سازی 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 فوتون های گسیل شده با توجه به نسبت شاخه ای هر پرتو گاما است؛ همچنین در طیف کامل انرژی چشمه، آن دسته از انرژی های گسته 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)، نمونه های شیشه ای را به صورت یک تیغه استوانه ای با ضخامت هایی متفاوت برحسب مسافت آزاد میانگین (mfp) و هر یک به قطر زیاد (۳ m) در نظر گرفتیم.

محاسبه خواص حفاظتی این نوع از شیشه ها است. عدد اتمی مؤثر، ضریب تضعیف خطی، مسافت آزاد میانگین و ضریب انباشت شار برای توصیف نفوذ و انتشار پرتو گاما در هر ماده کمیت هایی مهم هستند. در اغلب پژوهش های انجام شده، برخی از مشخصات حفاظتی مواد را براساس چشمه های تک انرژی فوتون به دست آورده اند [۷-۹]. در این پژوهش یکی از پارامترهای اساسی حفاظت یعنی عدد اتمی مؤثر در انرژی های مختلف، برای نمونه های ذکر شده محاسبه شد. همچنین به کمک محاسبات مونت کارلو، خصوصیات حفاظتی دیگر از جمله ضریب تضعیف خطی و ضریب انباشت شار فوتون برای شیشه های اکسید فلزی تلوریت، بتن، سرب و اورانیوم در برابر تابش ^{10}C 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 برهم کنش فوتون با ماده به عدد اتمی مؤثر آنها بستگی دارد. عدد اتمی مؤثر برای هر یک از مواد را می توان 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 می توان از پایگاه داده سطح مقطع XCOM به دست آورد.

کد MCNPX یکی از ابزارهای شبیه سازی به روش مونت کارلو است که کاربرد فراوانی در زمینه ترابرد فوتون، نوترون، الکترون و ... در محیط های مختلف دارد. از قابلیت های کد، امکان به کارگیری مواد مختلف به صورت ترکیب یا آلیاژ و شبیه سازی طیف کامل انرژی چشمه پرتوزا است [۱۱ و ۱۲].

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

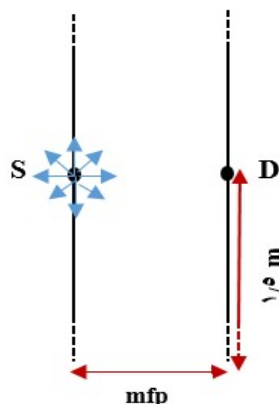
ماده						ترکیب اتمی
SSC	TBB	TSW	TBN	TNS	TPZ	
—	۵۵	۷۵	۹۰	۷۸/۵	۵۲/۵	TeO _۲
—	—	—	—	۲۰	—	Na _۲ O
—	—	—	—	۱/۵	—	Sm _۲ O _۳
—	—	—	۹	—	—	BaO
—	—	—	۱	—	—	Nd _۲ O _۳
—	—	۲۰	—	—	—	Sb _۲ O _۳
—	—	۵	—	—	—	WO _۳
—	۲۵	—	—	—	—	B _۲ O _۳
—	۲۰	—	—	—	—	Bi _۲ O _۳
—	—	—	—	—	۲۲/۵	PbO
—	—	—	—	—	۲۵	ZnO
۰/۷	—	—	—	—	—	H
۰/۰۹	—	—	—	—	—	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 ^۳)

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

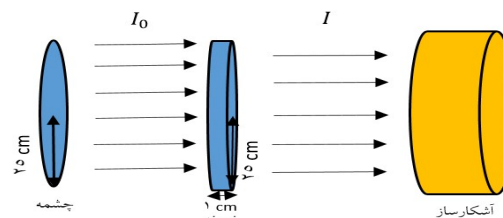
$$FBF = \frac{4\pi r^2 \phi}{e^{-\mu r}} \quad (۳)$$

که در این رابطه، r ضخامت نمونه، ϕ شار فوتون‌های رسیده به آشکارساز و μ 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 موثر نزدیک به یکدیگر دارند. برای عدد اتمی موثر 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 موثر 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 آورده‌ایم؛ 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]:

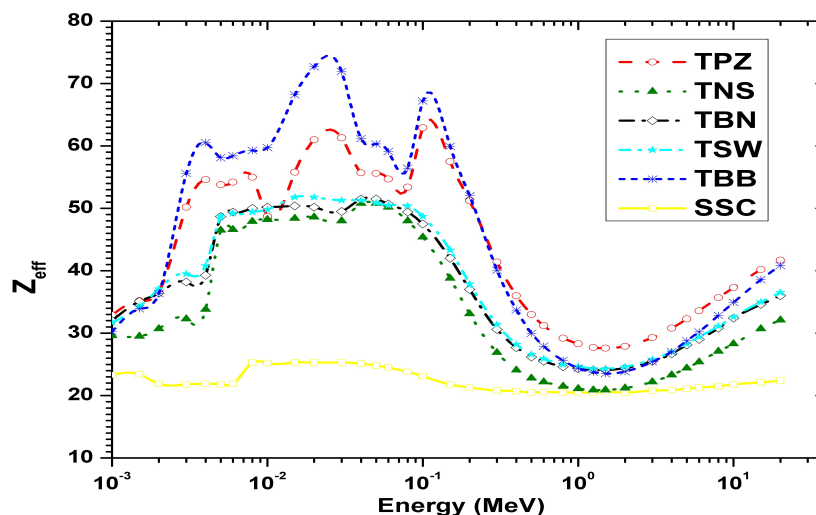
$$B(E, \mu r) = 1 + a(E) \mu r [\exp b(E) \mu r], \quad (4)$$

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 موثر (Z_{eff}) برای نمونه‌های گوناگون به ازای انرژی فوتون در گستره ۰.۰۳-۲۰ MeV به کمک رابطه (۱) محاسبه و در شکل ۳ رسم شد. مشاهده می‌شود عدد اتمی موثر 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 موثر 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 موثر 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 (μ) 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.

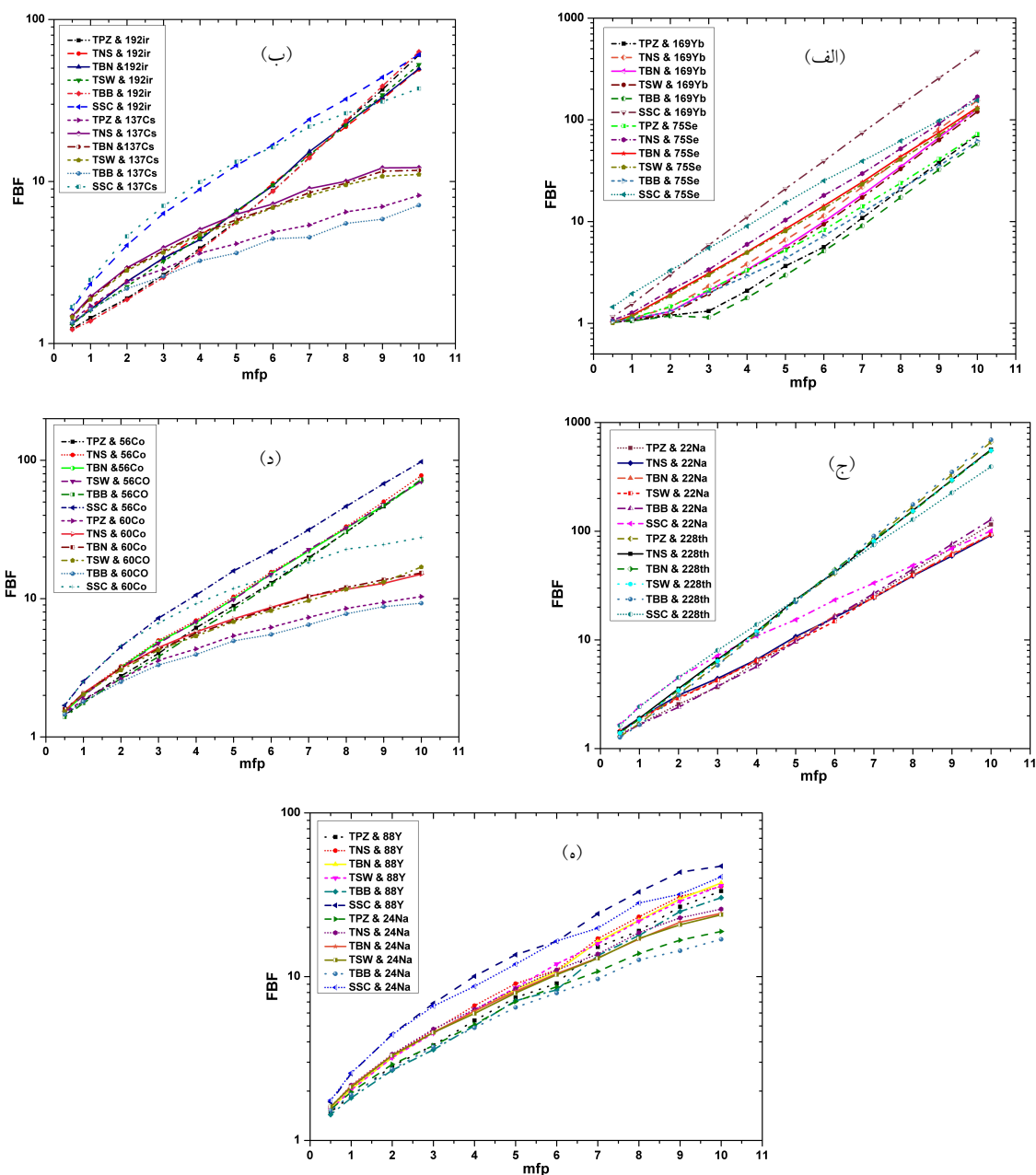
در ادامه با توجه به ضریب تضعیف خطی حاصل از طیف

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.

ماده چشمه (ME(MeV))	TPZ		TNS		TBN		TSW	
	با طیف انرژی	با میانگین انرژی	با طیف انرژی	با میانگین انرژی	با طیف انرژی	با میانگین انرژی	با طیف انرژی	با میانگین انرژی
¹⁶⁹ Yb(۰/۱۴۵)	۳/۲۹۸۲	۶/۱۲۶۷	۲/۰۷۹۰	۲/۷۷۷۰	۲/۳۶۴۱	۳/۴۳۹۹	۲/۴۴۵۶	۳/۶۴۲۵
⁷⁵ Se(۰/۲۱۸)	۲/۰۸۸۹	۲/۴۵۹۳	۱/۳۵۰۷	۱/۲۲۱۵	۱/۵۳۴۲	۱/۴۷۷۵	۱/۵۸۴۱	۱/۵۵۴۷
¹⁹² Ir(۰/۳۷۵)	۱/۰۴۱۴	۰/۹۶۲۸	۰/۶۲۷۶	۰/۵۸۵۳	۰/۷۳۴۳	۰/۶۸۳۸	۰/۷۶۲۲	۰/۷۰۹۰
¹³⁷ Cs(۰/۶۶۲)	۰/۵۱۷۷	۰/۵۱۷۷	۰/۳۷۱۲	۰/۳۷۱۲	۰/۴۲۴۴	۰/۴۲۴۴	۰/۴۳۵۴	۰/۴۳۵۴
²² Na(۰/۷۸۶)	۰/۵۲۶۹	۰/۴۵۰۴	۰/۳۷۱۹	۰/۳۳۳۲	۰/۴۲۵۸	۰/۳۷۹۷	۰/۴۳۷۲	۰/۳۸۸۷
²²⁸ Th(۱/۲۱)	۰/۵۸۷۱	۰/۳۳۳۰	۰/۴۱۲۹	۰/۲۵۸۵	۰/۴۷۱۶	۰/۲۹۳۳	۰/۴۸۴۶	۰/۲۹۹۳
⁵⁶ Co(۱/۲۴۳)	۰/۳۸۴۸	۰/۳۲۷۶	۰/۲۸۸۴	۰/۲۵۴۸	۰/۳۲۸۳	۰/۲۸۹۰	۰/۳۳۵۸	۰/۲۹۵۰
⁶⁰ Co(۱/۲۵۲)	۰/۳۲۷۴	۰/۳۲۶۲	۰/۲۵۴۷	۰/۲۵۳۸	۰/۲۸۸۸	۰/۲۸۷۹	۰/۲۹۴۸	۰/۲۹۳۸
⁸⁸ Y(۱/۳۸۳)	۰/۳۳۴۳	۰/۳۰۷۸	۰/۲۵۶۸	۰/۲۴۰۶	۰/۲۹۱۶	۰/۲۷۲۸	۰/۲۹۷۹	۰/۲۷۸۴
²⁴ Na(۲/۰۶۲)	۰/۲۷۱۸	۰/۲۵۶۵	۰/۲۱۱۹	۰/۲۰۰۶	۰/۲۴۱۰	۰/۲۲۸۲	۰/۲۴۵۹	۰/۲۳۲۷

جدول ۳. ضریب تضعیف خطی (1/cm) با طیف انرژی و میانگین انرژی (ME) چشمه‌های رادیوایزوتوپی گاما برای نمونه شیشه‌ای TBB و ونوعی از بتن (SSC) و سرب (Pb) و اورانیوم (²³⁸U).

ماده چشمه (ME(MeV))	TBB		SSC		Pb		U	
	با طیف انرژی	با میانگین انرژی	با طیف انرژی	با میانگین انرژی	با طیف انرژی	با میانگین انرژی	با طیف انرژی	با میانگین انرژی
¹⁶⁹ Yb(۰/۱۴۵)	۳/۶۱۸۱	۷/۲۹۸۹	۱/۰۲۹۹	۰/۷۷۱۷	۶/۹۳۱۲	۲۵/۳۲۵۰	۱۱/۹۷۵۰	۵۳/۴۰۹۳
⁷⁵ Se(۰/۲۱۸)	۲/۲۹۰۷	۲/۸۶۹۳	۰/۶۱۵۱	۰/۵۳۳۰	۵/۰۲۰۸	۹/۲۱۷۴	۸/۲۱۱۲	۲۰/۴۶۷۴
¹⁹² Ir(۰/۳۷۵)	۱/۱۴۷۲	۱/۰۶۲۱	۰/۳۹۹۱	۰/۳۸۹۴	۲/۷۴۶۱	۲/۹۴۰۸	۴/۶۷۱۸	۶/۲۶۷۲
¹³⁷ Cs(۰/۶۶۲)	۰/۵۳۸۶	۰/۵۳۸۶	۰/۲۹۶۴	۰/۲۹۶۴	۱/۲۴۰۵	۱/۲۴۰۵	۲/۴۵۵۲	۲/۴۵۵۲
²² Na(۰/۷۸۶)	۰/۵۵۱۵	۰/۴۶۲۸	۰/۲۹۰۵	۰/۲۷۲۹	۱/۲۱۳۸	۱/۰۱۸۳	۲/۰۶۷۰	۱/۹۶۶۸
²²⁸ Th(۱/۲۱)	۰/۶۱۳۳	۰/۳۳۴۹	۰/۲۸۹۹	۰/۲۱۹۵	۱/۱۳۰۷	۰/۶۷۸۹	۱/۷۴۹۶	۱/۲۴۱۲
⁵⁶ Co(۱/۲۴۳)	۰/۳۹۲۹	۰/۳۲۹۲	۰/۲۳۷۱	۰/۲۱۶۶	۰/۸۱۸۲	۰/۶۶۵۳	۱/۴۴۷۸	۱/۲۱۳۰
⁶⁰ Co(۱/۲۵۲)	۰/۳۲۹۰	۰/۳۲۷۸	۰/۲۱۶۸	۰/۲۱۵۸	۰/۶۶۵۰	۰/۶۶۱۷	۱/۲۱۱۹	۱/۲۰۵۷
⁸⁸ Y(۱/۳۸۳)	۰/۳۳۷۸	۰/۳۰۸۵	۰/۲۱۵۷	۰/۲۰۵۰	۰/۶۹۲۳	۰/۶۱۷۷	۱/۲۴۶۴	۱/۱۱۶۶
²⁴ Na(۲/۰۶۲)	۰/۲۷۲۱	۰/۲۵۶۳	۰/۱۷۸۱	۰/۱۶۹۳	۰/۵۵۰۴	۰/۵۱۵۰	۰/۹۸۲۲	۰/۹۱۷۳



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

نمونه‌ها داریم:

FBF(SSC)>FBF(TNS)>FBF(TBN)>FBF(TSW)>
FBF(TPZ)>FBF(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)

چشمه ماده		^{۱۶۹} Yb		^{۷۵} Se		^{۱۹۲} Ir		^{۱۳۷} Cs		^{۲۲} Na	
		b	a	b	a	b	a	b	a	b	a
TPZ	چشمه	۰/۰۳۵	۰/۵۳۱	۰/۰۷۸	۰/۴۵۲	۰/۱۳۲	۰/۳۸۰	۰/۵۸۰	۰/۰۱۹	۰/۲۳۷	۰/۳۸۸
TNS	چشمه	۰/۰۶۴	۰/۵۴۸	۰/۱۴۴	۰/۴۷۵	۰/۲۳۹	۰/۳۰۰	۰/۹۵۸	۰/۰۲۱	۰/۳۵۷	۰/۳۲۳
TBN	چشمه	۰/۰۵۵	۰/۵۴۵	۰/۱۴۰	۰/۴۵۵	۰/۲۵۲	۰/۲۹۶	۰/۸۸۱	۰/۰۲۵	۰/۳۶۵	۰/۳۲۳
TSW	چشمه	۰/۰۵۲	۰/۵۴۴	۰/۱۱۷	۰/۴۶۹	۰/۲۰۸	۰/۳۲۱	۰/۸۸۹	۰/۰۱۷	۰/۳۳۱	۰/۳۳۳
TBB	چشمه	۰/۰۳۲	۰/۵۲۰	۰/۰۶۸	۰/۴۴۹	۰/۱۲۲	۰/۳۹۳	۰/۴۹۴	۰/۰۱۶	۰/۲۰۹	۰/۴۱۰
SSC	چشمه	۰/۳۱۹	۰/۴۹۹	۰/۴۸۵	۰/۳۴۶	۰/۸۴۳	۰/۱۹۴	۱/۶۱۸	۰/۰۸۲	۰/۸۱۲	۰/۲۵۰
چشمه ماده		^{۲۲۸} Th		^{۵۶} Co		^{۶۰} Co		^{۸۸} Y		^{۲۲} Na	
		b	a	b	a	B	a	b	a	b	a
TPZ	چشمه	۰/۲۰۹	۰/۵۷۵	۰/۲۹۶	۰/۳۱۷	۰/۸۰۷	۰/۰۱۶	۰/۵۲۸	۰/۱۸۳	۰/۷۸۲	۰/۰۸۵
TNS	چشمه	۰/۲۷۴	۰/۵۳۲	۰/۳۷۶	۰/۳۰۰	۱/۰۹۱	۰/۰۲۵	۰/۷۸۷	۰/۱۵۲	۰/۹۲۷	۰/۱۰۲
TBN	چشمه	۰/۲۹۴	۰/۵۲۳	۰/۴۳۸	۰/۲۷۶	۱/۰۱۲	۰/۰۳۶	۰/۶۳۲	۰/۱۷۶	۰/۸۸۳	۰/۱۰۰
TSW	چشمه	۰/۲۹۲	۰/۵۲۴	۰/۴۵۶	۰/۲۷۲	۰/۸۲۸	۰/۰۶۱	۰/۷۰۲	۰/۱۶۲	۰/۸۸۲	۰/۰۹۸
TBB	چشمه	۰/۲۲۶	۰/۵۷۳	۰/۲۶۹	۰/۳۲۸	۰/۷۰۹	۰/۰۱۸	۰/۴۸۸	۰/۱۸۲	۰/۷۳۹	۰/۰۷۸
SSC	چشمه	۰/۴۶۷	۰/۴۴۳	۰/۷۷۱	۰/۲۵۲	۱/۷۷۷	۰/۰۴۴	۱/۳۸۸	۰/۱۲۶	۱/۲۸۶	۰/۱۱۲

متعلق به TBB و SSC است.

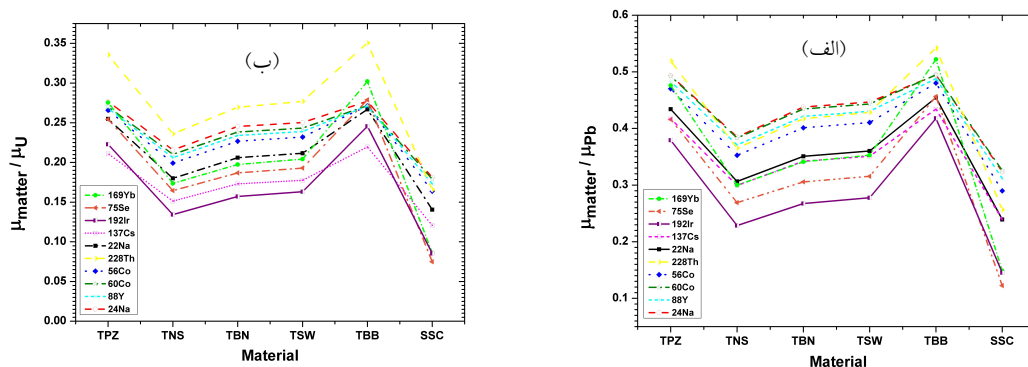
۴. نتیجه‌گیری

در این پژوهش به این نتیجه کلی رسیدیم که استفاده از شیشه‌ها برای حفاظ گذاری 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 تضعیف کننده 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. همان طور 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 ۱۰ 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"; 2nd edn. Idaho National Laboratory, Idaho (1997).
14. R Khabaz, *Radiation Physics and Chemistry* **151** (2018) 53.
15. N Tsoufanidis, "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.
۳. 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.
۴. 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.
۷. 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.