



دانشکده فیزیک و مهندسی هستهای

رساله دکتری فیزیک هستهای

مطالعه اثربخشی ساختارهای فلزات تیتانیم، روی، تنگستن، و سرب در حفاظ گذاری تابش X و گاما

نگارنده

هدى علويان

استاد راهنما

دكتر حسين توكلي عنبران

شهريور ۱۳۹۸

در این صفحه صورت جلسه دفاع را قرار دهید. لازم است پس از صحافی این صفحه مجدداً توسط دانشکده مهر گردد و استاد راهنما با امضای خود اصلاحات پایاننامه را تایید کند.





بأشكراز

حانواده عزیزم

تعهديامه

اینجانب هدی علویان دانشجوی دوره دکتری رشته فیزیک هستهای دانشکده فیزیک و مهندسی هستهای دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایاننامه مطالعه اثربخشی ساختارهای فلزات تیتانیم، روی، تنگستن، و سرب در حفاظ گذاری تابش X و گاما تحت راهنمائی دکتر حسین توکلی عنبران متعهد می شوم.

- تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است .
 - در استفاده از نتایج پژوهشهای محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است .
- مطالب مندرج در پایان نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا
 ارائه نشده است.
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد و مقالات مستخرج با نام « دانشگاه صنعتی شاهرود » و یا « Shahrood University of Technology » به چاپ خواهد رسید .
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایح اصلی پایاننامه تأثیر گذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایاننامه رعایت می گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه ، در مواردی که از موجود زنده (یا بافتهای آنها) استفاده شده است ضوابط و
 اصول اخلاقی رعایت شده است .
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده
 است اصل رازداری ، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است .

تاريخ

امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج ، کتاب ، برنامه های رایانه ای ، نرم افزار ها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود میباشد . این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود .

استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایاننامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی باشد.



سرب و مواد بر پایه یسرب به طور متداول به عنوان حفاظ در برابر پرتوهای X و تابش گاما در محیطهای در معرض تابش مود استفاده قرار می گیرند. سمیت این ماده سبب شده است که در دراز مدت اثرات جبران ناپذیری بر سلامت محیط و افراد داشته باشد. از این رو، در دهه ی گذشته تلاش قابل توجهی برای معرفی جایگزین مناسب برای این ماده صورت گرفته است. با وجود این که فلزاتی مانند تنگستن و بیسموت به دلیل عدد اتمی بالا انتخابهای مناسبی برای جایگزینی سرب به حساب می آیند، مطرح شدن پارامترهای دلیل عدد اتمی بالا انتخابهای مناسبی برای جایگزینی سرب به حساب می آیند، مطرح شدن پارامترهای دیگری از قبیل انعطاف پذیری، کارایی، پایداری شیمیایی، قدرت مکانیکی، پایداری حرارتی، هزینه ی ساخت دیگری از قبیل انعطاف پذیری، کارایی، پایداری شیمیایی، قدرت مکانیکی، پایداری حرارتی، هزینه ی ساخت دیگری از قبیل انعطاف پذیری، کارایی، پایداری شیمیایی، قدرت مکانیکی، پایداری حرارتی، هزینه ی ساخت بایت. با وجود با عنوان کامپوزیتها معطوف داشته است.

کامپوزیتهای فلز- پلیمر گروه جدید از مواد پیشرفته هستند که اثربخشی آنها در زمینهی حفاظ گذاری تابش هم به صورت تجربی و هم به صورت تئوری به اثبات رسیده است. با استفاده از کد مونت کارلوی MCNPX، روشی بهبود یافته برای مدلسازی شبکهی پلیمر تقویت شده با ذرات پرکننده ارائه شد که قادر به بررسی اثر همزمان اندازه و کسر وزنی ذرات در بهبود توانایی این دسته از مواد در تضعیف تابش گاما و پرتوی X با حفظ همگنی ساختار میباشد. در مطالعهی حاضر، به منظور تقویت ساختار پلیمرها از ذرات فلزی و اکسید فلزی استفاده شد که چنین محصولی پتانسیل بالایی در استفاده به عنوان حفاظ فوتونها دارد.

از فلزات سرب (Pb)، تنگستن (W)، روی (Zn)، و تیتانیم (Ti) و اکسیدهای آنها شامل مونوکسید سرب (PbO)، تریاکسید تنگستن (WO3)، مونوکسید روی (ZnO)، و دیاکسید تیتانیم (TiO₂) به صورت ماکروساختارها و همچنین به صورت میکروذرات و نانوذرات در تقویت کامپوزیتهای شبکه پلیمر استفاده شد. در راستای یافتن هندسهی مناسب از روشهای کاهش واریانس استفاده شد. سپس، به منظور اطمینان از روش شبیهسازی، محاسبات ضرایب انباشت برای ماکروساختارهای فلزات و اکسیدهای فلزات فوق مورد مطالعه قرار گرفت و با مطالعات پیشین مقایسه شد. با توجه به این نتایج، برای افزایش دقت شبیهسازی و کاهش زمان اجرای برنامه، آشکارساز نقطهای به عنوان خروجی مورد نظر انتخاب شد.

در گام بعد، مدلسازی صورت گرفته برای ساختار پلیاتیلن سبک (LDPE) تقویت شده با ذرات فلزات Pb، V، J، و Ti در اندازهها (mm-۱۰۰۹) و کسرهای وزنی (wtw)، Ta-۱) انجام شد و پارامترهای حفاظ شامل ضریب تضعیف جرمی (μ/ρ)، مسافت آزاد میانگین (mfp)، ضریب عبور (T)، و ضریب انباشت (B) برای این ساختارها محاسبه شد. با استفاده از اختلاف نسبی میان مقادیر حاصل از استفاده از نانوساختارها در مقابل میکروساختارها، اثر اندازه و اثر کسر وزنی ذرات در تضعیف پرتوها مورد ارزیابی قرار گرفت و مشخص شد که اثر کسر وزنی در اندازه می در اندازه می در اندازه و اثر کسر وزنی ذرات در تضعیف پرتوها مورد ارزیابی قرار گرفت و مشخص شد که اثر کسر وزنی در اندازه می در اندازه می در اندازه می در آن مقادیر حاصل از استفاده از نانوساختارها در مقابل میکروساختارها، اثر اندازه و اثر کسر وزنی ذرات در تضعیف پرتوها مورد ارزیابی قرار گرفت و مشخص شد که اثر کسر وزنی در اندازههای کوچکتر ذرات کم اهمیت تر است و با بزرگتر شدن اندازه ی ذرات اندازه ا

به عنوان آخرین بخش از کار محاسبات، مدلسازی تئوری در یک هندسه یخوب برای ساختارهای LDPE تقویت شده با نانوذرات و میکروذرات اکسیدهای فلزی PbO، WO₃، PbO، و TiO صورت گرفت و بررسی مقایسه ای و جامعی بر روی پارامترهای حفاظ گذاری شامل ضریب تضعیف جرمی (μ/ρ)، مسافت آزاد میانگین (mfp)، ضخامت نیم لایه (HVL)، عدد اتمی موثر (Zeff)، چگالی الکترونی موثر (Ne)، ضریب عبور (T)، و ضریب انباشت (B) انجام گرفت. با تکیه بر اندر کنشهای فوتون – ماده در بازههای انرژی های مختلف معنور (T)، مسافت آزاد میانگین (Ph)، ضریب انباشت (B) انجام گرفت. با تکیه بر اندر کنشهای فوتون – ماده در بازههای انرژیهای مختلف مختلف

در مرحلهی بعد، بررسی تجربی ساختارهای رزین اپوکسی (Epoxy Resin) تقویت شده با نانوذرات Pb، در مرحلهی بعد، بررسی تجربی ساختارهای رزین اپوکسی (Epoxy Resin) تقویت شده با نانوذرات Pb، Ti ،Zn و ZnO، PbO، Ti ،Zn و Co⁰⁰ با تکیه بر اثر کسر وزنی (Notwit, Wt %) و اثر اندازه (تنها برای ذرات Pb) انجام گرفت. ضرایب انباشت و ضرایب عبور این ساختارها با استفاده از تحلیل سطح زیر فوتوپیکها مورد ارزیابی قرار گرفت.

نتایج نشان داد که سرب و اکسید سرب هم به صورت ماکروساختار و هم با عنوان میکروذرات و نانوذرات در تقویت ساختار کامپوزیت بهترین عملکرد را در تضعیف تابش گاما دارند. با این حال، استفاده از نانوذرات سایر مواد بویژه در کسرهای وزنی بالا عملکرد مناسبی را در حفاظ گذاری تابشهای گاما نشان داد. در نهایت، لازم است خاطر نشان شود که این مواد در ضخامتهای بررسی شده (۲۰۰<۳m) تنها در بازهی انرژیهای پایین عملکرد قابل توجهی را نشان دادند.

کلمات کلیدی: کامپوزیتهای فلز- پلیمر، حفاظ گذاری گاما، اثر اندازه، اثر کسر وزنی، شبیهسازی مونت کارلو، اندازه گیری تجربی.

ليت مقالات متخرج ازيايان نامه

1- Hoda Alavian, Hossein Tavakoli-Anbaran, "Study on gamma shielding polymer composites reinforced with different sizes and proportions of tungsten particles using MCNP code", Progress in Nuclear Energy, 115 (2019), pp. 92-98.

۲- هدی علویان، حسین توکلی عنبران، "بررسی اثر نوع آشکارساز بر برآورد ضرایب انباشت پرتوهای گاما با استفاده از شبیه سازی مونت کارلو بر اساس کاهش واریانس"، مجله سنجش و ایمنی پرتو، دانشگاه کاشان، ۱۳۹۶، جلد ۴، شماره ۶، ص ۷۹–۶۵.

۳- هدی علویان، حسین توکلی عنبران، "بررسی اثر آشکارساز بر برآورد ضرایب انباشت حفاظهای چندلایه با استفاده از شبیه سازی مونت کارلو"، بیست و دومین کنفرانس فیزیک ایران، دانشگاه یزد، کد اختصاصی ISC: ۴۱۷۰۱-۴۱۷۰۱، شهریور ۱۳۹۶.

4- Hoda Alavian, Hossein Tavakoli-Anbaran, "Experimental and Theoretical Investigation of Gamma Radiation Shielding Properties of Polymer/Metal Oxide Nanocomposites", 9th National Seminar of Chemistry & Environment, Arak University, ISC code: 30940-98190, September 2019.

. فهرست مطالب

ڹ	فهرست جداول
س	فهرست اشكال
١	فصل ۱ : مقدمه
۲	١-١ بيان مساله
۹	۱–۲ مروری بر مطالعات گذشته
11	۱–۳ ساختار رساله
۱۵	فصل ۲: مبانی نظری
۱۶	۲–۱ مقدمه
١۶	۲-۲ برهمکنشهای تابش با ماده
۱۷	۲-۳ برهم کنشهای فوتون با ماده
۱۸	۲–۳–۱ پراکندگی همدوس
۱۹	۲–۳–۱ پراکندگی تامسون
۲۰	۲-۳-۲ پراکندگی رایلی
۲۱	۲–۲–۲ پراکندگی کامپتون
٢۶	۲–۳–۳ اثر فوتوالکتریک
۲۹	۲–۲–٤ پديدهٔ توليد زوج
۳۱	۲-۶ جذب و تضعیف فوتون
٣٢	۲-۵ پارامترهای حفاظ گذاری فوتون

۳۲	۲-۵-۱ ضریب تضعیف جرمی
۳۴	۲–۵–۲ مسافت آزاد میانگین
٣۴	۲–۵–۳ ضخامت نیم لایه
۳۵	۲–۵–۶ عدد اتمی موثر
۳۷	۲–۵–۵ چگالی الکترونی موثر
۳۷	۲-۵-۱ ضریب انباشت
۴۳	۲-۲ خطای نسبی
۴۳	۲-۷ حفاظت در برابر پرتوگیری خارجی
۴۴	۲–۸ استفاده از نانوکامپوزیتها در حفاظ گذاری
45	ر جامب در میں مارلے میں میں میں مطالعہ میں حاض
	، ، کلپوریفنای طراحی ملکانا در مطالعات مطراحی السان در مطالعات کا طراحی السان در مطالعات کا طراحی السان السان
۵۱	فصل ۳: مدلسازی و محاسبات مونت کارلو
۵۱	فصل ۳: مدلسازی و محاسبات مونت کارلو ۱-۳ مقدمه
۵۱ ۵۲	فصل ۳: مدلسازی و محاسبات مونت کارلو ۱-۳ مقدمه ۲-۳ شبیهسازی مونت کارلو
۵۱ ۵۲ ۵۳	فصل ۳: مدلسازی و محاسبات مونت کارلو ۳-۱ مقدمه ۳-۲ شبیهسازی مونت کارلو ۳-۲-۳ چشمهی پرتوزای فوتون
Δ1 ΔΥ ΔΥ Δ۴	فصل ۳: مدلسازی و محاسبات مونت کارلو ۱-۳ مقدمه ۳-۲ شبیهسازی مونت کارلو ۳-۲-۱ چشمهی پرتوزای فوتون
Δ1 ΔΥ ΔΥ ΔΥ ΔΥ ΔΥ	فصل ۳: مدلسازی و محاسبات مونت کارلو ۱-۳ مقدمه ۳-۲ شبیهسازی مونت کارلو ۳-۲-۱ چشمهی پرتوزای فوتون ۳-۲-۲ تالیها
Δ1 ΔΥ ΔΥ ΔΥ ΔΥ ΔΥ	فصل ۳: مدلسازی و محاسبات مونت کارلو ۱–۳ مقدمه ۳–۲ شبیهسازی مونت کارلو ۳–۲–۱ چشمهی پرتوزای فوتون ۳–۲–۲ تالیها ۳–۲–۳ روشهای کاهش واریانس
Δ1 ΔΥ ΔΥ ΔΥ ΔΥ ΔΥ ΔΥ ΔΥ ΔΥ ΔΥ ΔΥ ΔΥ ΔΥ	فصل ۳: مدلسازی و محاسبات مونت کارلو ۳-۱ مقدمه ۳-۲ شبیهسازی مونت کارلو ۳-۲-۱ چشمهی پرتوزای فوتون ۳-۲-۲ تالیها ۳-۲-۳ روشهای کاهش واریانس ۳-۲-۳ -۱-۳ برش انرژی
Δ1 ΔΥ	فصل ۳: مدلسازی و محاسبات مونت کارلو ۱–۲ مقدمه ۳–۱ مقدمه ۳–۲ شبیهسازی مونت کارلو ۳–۲–۱ چشمهی پرتوزای فوتون ۳–۲–۲ چشمهی پرتوزای فوتون ۳–۲–۳ روشهای کاهش واریانس ۳–۲–۳ روشهای کاهش واریانس

۶۲	۳-۳ پیادەسازى ھندسەى مسالە
۶۲	۳-۳-۱ اعمال پنجرههای وزنی
۶۳	۳-۳-۲ راستیآزمایی هندسه
۶۴	۳-۳-۳ انتخاب آشکارساز نقطهای
٧۴	۳-٤ پارامترهای حفاظ گذاری برای ماکروساختارها
Υ٨	۳-۵ شبیهسازی شبکهی پلیمر تقویت شده با ذرات فلزی
۸۳	۳-٦ اعتبارسنجی مدل شبیهسازی
کروذرات و نانوذرات فلزات۸۴	۳-۷ پارامترهای حفاظ گذاری برای کامپوزیتهای پلیمر تقویت شده با می
میکروذرات و نانوذرات اکسید	۳–۸ پارامترهای حفاظ گذاری برای کامپوزیتهای پلیمر تقویت شده با
٩٢	ڧلزى
١١٣	فصل ۴: اندازه گیری های تجربی
114	۱–٤ مقدمه
114	۲-٤ آمادهسازی نمونهها
119	٤–٣ چیدمان هندسهی آزمایش
171	٤-٤ نرمالسازی طیفهای ثبت شده
١٢٢	٤-٥ محاسبهی ضرایب عبور و ضرایب انباشت
176	٤-٦ نتایج حاصل از افزایش کسر وزنی ذرات پرکننده
۱۳۱	٤-٧ نتایج حاصل از کاهش اندازهی ذرات پرکننده
١٣٣	فصل ۵: نتیجه گیری
۱۳۴	۵–۱ نتیجهگیری
١٣٧	٥–٢ بيشتمادات

مراجع
_اجع

فهرست جداول

۴۷	جدول ۲-۱ .ویژگیهای عمومی فلزات منتخب
۴۷	جدول ۲-۲ .ویژگیهای عمومی اکسیدهای فلزی منتخب
انرژیهای متفاوت	جدول ۳-۱. مقایسه یضرایب انباشت شار میان مطالعه ی حاضر و مطالعات پیشین برای
۶۵	و ضخامتهای مختلف سرب
۷۳	جدول ۳-۲ .نتایج شبیهسازی و خطای محاسبات
۷۵	جدول ۳-۳ .ضرایب تضعیف جرمی ماکروساختارها و مقایسهی آنها با مقادیر XCOM
γγ	جدول ۳-۴ ضرایب انباشت و اثربخشی حفاظ برای ماکروساختارها
LDI برای اندازهی	جدول β-۵ .مقایسهی دادههای MCNP و تجربی برای μ (cm ⁻¹) کامپوزیتهای PE/W
٨۵	ذرات ۳۰۰ nm ۶ [۱۵۱]، و ۲۲ ۲۲
٨۵	جدول ۳-۶ .توضیح مشخصات کامپوزیتهای LDPE/W
۱۰ فلزات۹	جدول ۳-۷ ضرایب عبور و انباشت برای LDPE در کسر وزنی %۲۵ wt و اندازهی ۱m
۹۳	جدول ۳-۸. شرح کامپوزیتهای LDPE پر شده با ذرات اکسید فلزی
۹۳	جدول ۳-۹ .مشخصات شبکهی LDPE و پرکنندههای اکسید فلزی در شبیهسازی MC
۱۱۷	جدول ۴-۱ .مشخصات نمونههای ساخته شده
177	جدول ۴-۲ .مقایسهی انرژی پیکهای انرژی حاصل از اندازه گیری با مقدار مورد انتظار
١٢٨	جدول ۴-۳ .مقایسهی ضرایب انباشت از طریق محاسبات تئوری و اندازه گیریهای تجربی
نانوذرات PbPb	جدول ۴-۴ .مقایسهی پارامترهای حفاظ برای کامپوزیتهای تقویت شده با میکروذرات و

فهرست اشكال

شکل ۲-۱ .پراکندگی تامسون فوتون فرودی بر واحد حجم $\mathrm{d} V$ که در جهت $ heta$ در زاویهی فضایی Ω
شکل ۲-۲ .پراکندگی کامپتون فوتون فرودی از الکترون اتمی
شکل ۲-۳ .وابستگی سطح مقطع کامپتون به (۱) انرژی فوتون و (۲) عدد اتمی ماده
شکل ۲-۴ .اثر فوتوالکتریک
شکل ۲-۵ .رویداد (۱) گسیل پرتو X مشخصه و (۲) گسیل الکترون اوژه
شکل ۲-۶ وابستگی سطح مقطع فوتوالکتریک به (۱) انرژی فوتون و (۲) عدد اتمی ماده۲۹
شکل ۲-۷ .پدیدهی تولید زوج
شکل ۲-۸ وابستگی سطح مقطع تولید زوج به (۱) انرژی فوتون و (۲) عدد اتمی ماده۳۱
شکل ۲–۹ .ضرایب تضعف جرمی برای یک ماده معین
شکل ۲-۱۰. تغییرات ضریب انباشت بر حسب انرژی و ضخامت ماده
شکل ۲-۱۱. ضرایب تضعیف جرمی (الف) پراکندگی کامپتون و (ب) کل به عنوان تابعی از انرژی برای Pb،
۲۸
شکل ۲-۱۲ .ضرایب تضعیف جرمی کل، فوتوالکتریک، پراکندگیهای همدوس و غیرهمدوس، و تولید زوج
به عنوان تابعی از انرژی برای (الف) PbO، (ب) WO ₃ ، (ج) ZnO، و (د) TiO ₂
شکل ۳–۱ .هندسهی شبیهسازی
شکل ۳-۲ .شار ۱۰۰۰ ذرهی گسیل شده از چشمه در (الف) حالت اول و (ب) پس از اعمال پنجرههای
وزنی
شکل ۳-۳ .منحنی FOM شار فوتون بر حسب تاریخچهی فوتونها
شکل ۳–۴ .ضریب انباشت برای مقادیر انرژی گاماهای چشمه 60 Co
شکل ۳–۵ .هندسهی شبیه سازی شده جهت بررسی اثر انواع آشکارساز در برآورد ضرایب انباشت۶۷
شکل ۳-۶ .تغییرات ضریب انباشت شار بر حسب ضخامت ماده بر حسب cm برای عناصر Xn ،Pb ،W، و
Ti برای زمانی که آشکارساز (الف) استوانه بدون ماده، (ب) شمارنده گایگر- مولر، (ج) سوسوزن سدیم یدید،
و (د) آشکارساز نقطهای باشد
شکل ۳-۷ .تغییرات ضریب انباشت شار بر حسب ضخامت ماده بر حسب mfp برای عناصر ۷، Pb، W، و
Ti برای زمانی که آشکارساز (الف) استوانه بدون ماده، (ب) شمارنده گایگر- مولر، (ج) سوسوزن سدیم یدید،
و (د) آشکارساز نقطهای باشد
شکل ۳-۸ .تغییرات ضریب انباشت شار بر حسب ضخامت ماده برای آشکارسازهای استوانه بدون ماده،
شارنده گایگر- مولر، سوسوزن سدیم یدید، و تالی نقطهای زمانی که ماده (الف) سرب، (ب) تنگستن، (ج)
روی، و (د) تیتانیم باشد

شکل ۳-۹ .ضریب تضعیف جرمی کامپتون و کل بر حسب انرژی برای شمارنده گایگر مولر و سوسوزن یدید
سديم۲۷
شکل ۳–۱۰ .هندسهی (الف) کاملا ساده در مقایسه با (ب) ساختار دوبخشی دارای دو فاز شبکه و
پركننده
شکل ۳–۱۱ .طرح شبیهسازی شبکهی همگن پلیمر تقویت شده با ذرات فلزی
شکل ۳-۱۲ .مدل ذرهای وقتی اندازه پرکننده در (a) در مقایسه با (b) بزرگتر است در حالی که کسر وزنی
پرکننده یکسان است
شکل ۳-۱۳ .برخورد فوتونها با دو بخش شبکه و ذرات پرکننده در هندسهس شبیهسازی
شکل ۳-۱۴. تغییرات ضریب تضعیف جرمی (cm ² /g) به عنوان تابعی از انرژی فوتون برای کامپوزیتهای
٨٧LDPE/W
شکل ۳-۱۵ .تغییرات مسافت آزاد میانگین (cm) به عنوان تابعی از انرژی فوتون برای کامپوزیتهای
٨٧LDPE/W
شکل ۳–۱۶. ضرایب عبور فوتون کامپوزیتهای LDPE/W برای ذرات با اندازههای (الف) μm، (ب)
۱۰ μm (ج) ۱μm (د) ۱۰۰ nm محاسبه شده توسط کد MCNP
شکل ۳–۱۷. ضرایب انباشت شار فوتون کامپوزیتهای LDPE/W برای ذرات با اندازههای (الف) μm،
(ب) μm (ج) μm (، (د) nm ده با کد MCNP
شکل ۳–۱۸. ضرایب تضعیف خطی و ضخامت نیم لایه برای کامپوزیتهای LDPE پر شده با %۱۰ wt،
۲۵، و ۵۰ از ذرات PbO با اندازهی (الف) ۱۰۰ µm، (ب) ۱۳ ۱، و (ج) nm به عنوان تابعی از انرژی
فوتون فرودی
شکل ۳-۱۹. ضرایب تضعیف خطی و ضخامت نیم لایه برای کامپوزیتهای LDPE پر شده با %۱۰ wt،
۲۵، و ۵۰ از ذرات WO3 با اندازهی (الف) μm ، ۱۰۰ (ب) μm ، و (ج) nm به عنوان تابعی از انرژی
فوتون فرودی
شکل ۳-۲۰ .ضرایب تضعیف خطی و ضخامت نیم لایه برای کامپوزیتهای LDPE پر شده با %۱۰ wt،
۲۵، و ۵۰ از ذرات ZnO با اندازهی (الف) ۱۰۰ μm، (ب) μm، و (ج) nm به عنوان تابعی از انرژی
فوتون فرودی۹۷
شکل ۳-۲۱. ضرایب تضعیف خطی و ضخامت نیم لایه برای کامپوزیتهای LDPE پر شده با %۱۰ wt،
۲۵، و ۵۰ از ذرات TiO2 با اندازهی (الف) μm ،۱۰۰ (ب) μm ، و (ج) nm به عنوان تابعی از انرژی
فوتون فرودی
شکل ۳–۲۲ .ضرایب تضعیف جرمی برای کامپوزیتهای LDPE پر شده با %wt ۱۰، ۲۵، و ۵۰ از ذرات
PbO با اندازهی (الف) μm ۱۰۰، (ب) μm ۱، و (ج) ۱۰۰ nm به عنوان تابعی از انرژی فوتون فرودی۹۹
شکل ۳–۲۳ .ضرایب تضعیف جرمی برای کامپوزیتهای LDPE پر شده با %۲۰ ،۱۰ ۲۵، و ۵۰ از ذرات
WO3 با اندازهی (الف) μm (ب) ۱۰۰ (ب) μm ، و (ج) ۱۰۰ nm به عنوان تابعی از انرژی فوتون فرودی۱۰۰

شکل ۳-۲۴ .ضرایب تضعیف جرمی برای کامپوزیتهای LDPE پر شده با %۲۱ ۱۰، ۲۵، و ۵۰ از ذرات ZnO با اندازهی (الف) μm (ب) ۱۰۰ (ب) μm ، و (ج) ۱۰۰ nm به عنوان تابعی از انرژی فوتون فرودی...۱۰۰ شکل ۳-۲۵ .ضرایب تضعیف جرمی برای کامپوزیتهای LDPE پر شده با %۲۱ ۱۰، ۲۵، و ۵۰ از ذرات TiO2 با اندازهی (الف) μm (۰۱٫۰۰ (ب) μm، و (ج) ۱۰۰ nm به عنوان تابعی از انرژی فوتون فرودی....۱۰۱ شکل ۳-۲۶ .عدد اتمی موثر برای کامپوزیتهای LDPE پر شده با ۱۰ wt%، و ۵۰ از ذرات PbO با اندازهی (الف) μm (ب) ۱۰۰ (ب) μm، و (ج) nm ۱۰۰ به عنوان تابعی از انرژی فوتون فرودی...... شکل ۳-۲۷ .عدد اتمی موثر برای کامپوزیتهای LDPE پر شده با ۱۰ wt%، ۲۵، و ۵۰ از ذرات WO₃ با اندازهی (الف) μm (ب) ۱۰۰ (ب) μm، و (ج) ۱۰۰ nm به عنوان تابعی از انرژی فوتون فرودی..... شکل ۳-۲۸ .عدد اتمی موثر برای کامپوزیتهای LDPE پر شده با ۱۰ wt%، و ۵۰ از ذرات ZnO با اندازهی (الف) μm (۰٫۰، (ب) μm ، و (ج) ۱۰۰ nm به عنوان تابعی از انرژی فوتون فرودی.......۱۰۴ شکل ۳-۲۹ .عدد اتمی موثر برای کامپوزیتهای LDPE پر شده با ۱۰ wt%، ۲۵، و ۵۰ از ذرات TiO₂ با اندازهی (الف) μm (ب) ۱۰۰ (ب) μm، و (ج) ۱۰۰ nm به عنوان تابعی از انرژی فوتون فرودی......۱۰۵ شکل ۳-۳۰ .چگالی الکترونی موثر برای کامپوزیتهای LDPE پر شده با %۱۰ wt، ۲۵، و ۵۰ از ذرات PbO با اندازمی (الف) μm (ب) ۱۰۰ (ب) μm، و (ج) ۱۰۰ nm به به عنوان تابعی از انرژی فوتون فرودی....۱۰۶ شکل ۳-۳۱ .چگالی الکترونی موثر برای کامپوزیتهای LDPE پر شده با %۱۰ wt، ۲۵، و ۵۰ از ذرات WO3 با اندازهی (الف) μm (ب) ۱۰۰ (ب) μm ، و (ج) ۱۰۰ nm به عنوان تابعی از انرژی فوتون فرودی.....۱۰۷ شکل ۳-۳۲ .چگالی الکترونی موثر برای کامپوزیتهای LDPE پر شده با %۲۱ ۱۰، ۲۵، و ۵۰ از ذرات ZnO با اندازهی (الف) ۱۰۰ μm (ب) ۱۰۰ و (ج) ۱۰۰ nm ، و (ج) ۱۰۰ به عنوان تابعی از انرژی فوتون فرودی..... شکل ۳-۳۳ .چگالی الکترونی موثر برای کامپوزیتهای LDPE پر شده با %۱۰ wt، ۲۵، و ۵۰ از ذرات TiO₂ با اندازهی (الف) μm (ب) ۱۰۰ (ب) μm ، و (ج) ۱۰۰ nm به عنوان تابعی از انرژی فوتون فرودی.....۱۰۸ شکل ۳۴-۳۴. ضرایب عبور برای کامپوزیتهای LDPE پر شده با ۱۰ wt%، و ۵۰ از ذرات PbO با اندازهی (الف) μm (ب) ۱۰۰ (ب) μm، و (ج) ۱۰۰ nm به عنوان تابعی از انرژی فوتون فرودی..... شکل ۳-۳۵. ضرایب عبور برای کامپوزیتهای LDPE پر شده با ۱۰ wt%، و ۵۰ از ذرات WO₃ با اندازهی (الف) μm (ب) ۱۰۰ (ب) μm، و (ج) ۱۰۰ nm به عنوان تابعی از انرژی فوتون فرودی..... شکل ۳-۳۶. ضرایب عبور برای کامپوزیتهای LDPE پر شده با ۱۰ wt%، و ۵۰ از ذرات ZnO با اندازهی (الف) μm (ب) ۱۰۰ (ب) μm، و (ج) ۱۰۰ nm به عنوان تابعی از انرژی فوتون فرودی..... شکل ۳-۳۷. ضرایب عبور برای کامپوزیتهای LDPE پر شده با ۱۰ wt%، و ۵۰ از ذرات TiO₂ با اندازهی (الف) μm (ب) ۱۰۰ (ب) μm، و (ج) ۱۰۰ nm به عنوان تابعی از انرژی فوتون فرودی.......۱۱۲ شکل ۴-۱. تصویر پودرهای فلزات و اکسید فلزات استفاده شده...... شکل ۴-۲ طرح مراحل ساخت نمونه های (الف) رزین و (ب) کامپوزیت...................... شکل ۴-۳ تصاویر نمونههای ساخته شده..... شکل ۴-۴ چیدمان هندسهی آزمایش..... شکل ۴–۵ طیفهای ثبت شده از چشمههای ¹³⁷Cs ،²⁴¹Am و ⁶⁰Co نرمال شده به زمان.....

های چشمه بر حسب شمارهی کانال در طیف ثبت شده ۱۲۲	شکل ۴-۶ درونیابی انرژیه
ی فوتوپیک (الف) ۸۲ ۰/۰۵۹ همهی Am ²⁴¹ Am، (ب) ۶۶۲ MeV، چشمهی	شکل ۴-۷ درونیابی گاوسے
/۱چشمهی ⁶⁰ Co برای نمونهی رزین و محاسبهی سطح زیر کل نمودار (A _t) و	¹³⁷ Cs ، و (ج) ۱۷۳ MeV
۱۲۳	سطح زیر فوتوپیک (Ap)
ثبت شده برای ²⁴¹ Am به تنهایی و در حضور رزین اپوکسی بدون پرکننده، و با	شکل ۴–۸ مقایسهی طیف
۷ ۲۵ (الف) نانوذرات Pb، (ب) نانوذرات PbO، (ج) نانوذرات Zn، (د) نانوذرات	کسر وزنی wt% ۵ و wtv
و نانوذرات TiO ₂	ZnO، (ه) نانوذرات Ti، (و)
، ثبت شده برای ¹³⁷ Cs به تنهایی و در حضور رزین اپوکسی بدون پرکننده، و با	شکل ۴–۹ مقایسهی طیف
۷۵ «الف) نانوذرات Pb، (ب) نانوذرات PbO، (ج) نانوذرات Zn، (د) نانوذرات	کسر وزنی wt% ۵ و wtv
و نانوذرات TiO2	ZnO، (ه) نانوذرات Ti، (و)
ت ثبت شده برای ⁶⁰ Co به تنهایی و در حضور رزین اپوکسی بدون پرکننده، و با	شکل ۴–۱۰ مقایسهی طیف
۷ ۲۵ (الف) نانوذرات Pb، (ب) نانوذرات PbO، (ج) نانوذرات Zn، (د) نانوذرات	کسر وزنی wt% ۵ و wt%
و نانوذرات TiO ₂	ZnO، (ه) نانوذرات Ti، (و)
ایب عبور کامپوزیتهای تقویت شده با wt% ۵ و wt% ذرات مختلف برای	شکل ۴–۱۱ مقایسهی ضر
)) چشمهی ¹³⁷ Cs، و (ج) چشمهی ⁶⁰ Co	(الف) چشمەی ²⁴¹ Am (ب

فس ۱:مقدمه

۱-۱ بیان مساله

همواره خطر قرار گرفتن در معرض حتی مقدار کمی از پرتوهای یوننده در طول زمان در شرایط متعددی مانند نیروگاههای هستهای^۱، شتابدهندهها^۲، دزیمتری صنعتی^۳، کشاورزی، فناوری فضایی^۴، تصویربرداری پزشکی^۵، پزشکی هستهای^۶، و آزمایشگاههای تحقیقاتی^۷ وجود دارد [۴–۱]. حفاظ گذاری تابش گاما و پرتوی X مبحث مهمی در حفاظت در برابر تابش به شمار میرود [۷–۵]. در حقیقت، گسیل تابش گاما و پرتوی X تقریبا همراه با تمام انواع تابشهای یوننده رخ میدهد، چرا که میتواند از طریق فرایندهای مختلف از جمله واپاشی رادیواکتیو^۸ در چشمههای پرتوزا، تابش ترمزی^۴ حاصل از الکترونهای شتاب گرفته، گسیل پرتوهای X مشخصه ۱۰، نابودی ۱۰، پراکندی غیر کشسان نوترون^{۲۱}، و گیراندازی نوترون^{۳۱} تولید شود [۸]، که

به منظور محافظت از افراد و محیط در برابر چنین تابشهای خطرناکی، طراحی یا انتخاب مادهی حفاظ موثر و مناسب یک ضرورت است [۹]. حفاظ گذاری را میتوان بررسی کیفی چگونگی تاثیر یک ماده بر رفتار تابشهای گسیل شده از یک چشمه در یک نقطهی خاص دانست [۵]. به طور کلی، رفتار تضعیف فوتونها در عبور از یک محیط را میتوان با کمک سطح مقطع مهمترین اندرکنشها شرح داد: پراکندگی همدوس (رایلی) و غیرهمدوس (کامپتون)، اثر فوتوالکتریک، و تولید زوج^{۱۴} [۸، ۱۰]. به دلیل وابستگی سطح مقطع

¹ Nuclear power plants

² Accelerators

³ Industrial dosimetry

⁴ Space technology

⁵ Medical imaging

⁶ Nuclear medicine

⁷ Research laboratory

⁸ Radioactive decay

⁹ Bremsstrahlung

¹⁰ Characteristic X-ray

¹¹ Annihilation

¹² Inelastic neutron scattering

¹³ Neutron capture

¹⁴ Coherent scattering (Rayleigh), Incoherent scattering (Compton), Photoelectric effect, and Pair production

این اندرکنشها به عدد اتمی ماده، موادی با Z بالا عموما در حوزهی حفاظ گذاری تابش گاما و پرتوی X مورد استفاده قرار می گیرند. اگرچه استفاده از سرب به دلیل عدد اتمی و چگالی بالا، انعطاف پذیری، و قیمت مناسب [۱۲–۱۱] در حفاظت در برابر تابش گاما و پرتوی X متداول است [۱۳]، سمیت^۱ آن برای محیط زیست یک مسالهی حیاتی به حساب می آید [۱۵–۱۲]. همچنین، وزن بالا [۱۱]، تولید پرتوهای ثانویه در طول تابش [۱۲]، عدم انعطاف پذیری کافی در ضخامتهای بالا، و ترک برداشتن (در مواردی مانند در سرت می طول تابش ای ترک می ماند. در مواردی مانند

از این رو، در دو دههی اخیر تلاشهای گسترده برای معرفی موادی که بتوانند جایگزین سرب شوند صورت گرفته است، که از جمله میتوان به ساختارهای تک لایه و چندلایه [۸۸–۱۹]، شیشهها^۲ [۲۳–۱۹]، بتنها^۳ [۲۶–۲۴]، و انواع کامپوزیتها^۴ [۱۱، ۱۳، ۳۰–۲۷] اشاره کرد. ضرورت وجود برخی توانمندیها مانند انعطاف پذیری^۵، کارایی^۶، دوام^۷، پایداری شیمیایی^۸، قدرت مکانیکی^۹، پایداری حرارتی^{۱۰}، روشهای ساخت کم هزینه^{۱۱}، سهولت تولید^{۱۲}، و وزن کم^{۱۳} منجر به ارائهی ساختارهای کامپوزیت به عنوان حفاظهای تابش در دههی گذشته شده است [۲۳–۳۰]. کامپویتهای پایه پلیمری^{۱۴} (PMCs) از جمله متداول ترین مواد پیشرفتهی مورد بحث در استفاده برای تضعیف تابش گاما و پرتوی X در سالهای اخیر به حساب میآیند

- ¹ Toxicity
- ² Glasses
- ³ Concretes
- ⁴ Composites
- ⁵ Flexibility
- ⁶ Workability
- ⁷ Durability
- ⁸ Chemical stability
- ⁹ Mechanical strength
- ¹⁰ Thermal stability
- ¹¹ Low-cost manufacturing methods

- ¹³ Light weight
- ¹⁴ Polymer matrix composites

¹² Ease of production

میان تمام کامپوزیتهای مورد استفاده، شبکهی پلیمر تقویت شده با ذرات فلزی و اکسید فلزی توجه بسیار زیادی را در حوزهی مطالعات حفاظت در برابر پرتوهای X و گاما به خود جذب کرده است [۴۰-۳۵]. ویژگیهای بهبود یافتهی این مواد در نتیجهی توزیع یکنواخت ذرات کوچک با Z بالا درون یک شبکهی سبک و انعطاف پذیر حاصل می شود [۳۹]. در حقیقت، این مواد هر دو مزیت را دارند: سبک هستند و در عین حاصل تاثیر بسزایی در حفاظ گذاری تابش گاما و پرتوی X دارند. توانمندی کامپوزیتهای پلیمری تقویت شده با ذرات فلزی و اکسید فلزی در تضعیف فوتون به طور گسترده هم به صورت تجربی [۱۴، ۵۰-

افزون بر این، کامپوزیتهای PMC دارای خواص شیمیایی، فیزیکی، و مکانیکی بهبود یافته هستند [۵۵]. بهبود در خواص این ساختارها به ویژگیهای ماده ی پرکننده، یکنواختی توزیع پرکننده در شبکه ی پلیمر، و اندازه ی پرکننده نسبت داده میشود [۸۵–۵۷]. علاوه بر این، ذرات پرکننده ی کوچک به حفظ انعطاف پذیری ساختار پلیمر کمک میکنند [۵۹] و به دلیل محدود کردن زنجیره ی پلیمر سبب افزایش مقاومت آن در برابر کشیدگی^۱ میشوند [۶۰]. باور بر این است که نانوساختارها توانایی بهتری برای حفاظت در برابر پرتوهای X و گاما در مقایسه با ساختارهای تقویت شده با میکروذرات دارد، که دلیل اصلی آن توزیع یکنواخت تر ذرات [۳۵، ۵۲، ۲۶–۶۱] عنوان شده است. در نتیجه میتوان گفت هر چه ساختار ماده یکنواخت تر باشد، اثربخشی بهتری در تضعیف و جذب فوتونها خواهد داشت [۳۰].

افزون بر مطالعات تجربی که در بررسی اثربخشی ساختارهای کامپوزیت پلیمر تقویت شده با ذرات فلزی و اکسید فلزی در تضعیف تابش گاما و پرتوی X و عوامل موثر بر آن صورت گرفته است [۵۰-۴۵، ۶۳-۶۱]، مطالعات تئوری با کمک مدلسازی شبکهای که به صورت یکنواخت توسط ذرات پر شده است انجام گرفته است [۶۹-۶۹]. اولین محاسبات تئوری بر روی اثربخشی حفاظ گذاری کامپوزیتهای شبکه پلیمری توسط

¹ Elongation

کد مونت کارلو MCNP در سال ۲۰۰۹ توسط یک گروه پژوهشی در کرهی جنوبی انجام گرفت [۵۱]. در این بررسی، مدلی برای مطالعهی اثر اندازهی ذرات پرکننده که به طور یکنواخت در شبکهی پلیمر توزیع شدهاند ارائه شد. پس از آن در ۲۰۱۴، آنها آهنگ عبور پرتوهای گاما از کامپوزیتهای پلیمری تقویت شده با میکروذرات و نانوذرات تنگستن را به صورت تجربی و تئوری مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج نشان داد که استفاده از کامپوزیتهای تقویت شده با نانوذرات تنگستن تضعیف فوتونهای فرودی با انرژی MeV (ر ا

پس از آن، بدنهی رو به رشدی از مطالعات از مدل ارائه شده در بررسی ساختارهای مختلف تقویت شده با ذرات کروی استفاده کردند [۵۴–۵۳، ۷۰–۶۴]. در بسیاری از مطالعاتی که از مدلسازی ارائه شده به روش مونت کارلو استفاده کردهاند، افزایش اثربخشی استفاده از نانوذرات برای تقویت ساختار شبکه در مقایسه با میکروذرات (اثر اندازه^۱) به اثبات رسیده است [۵۴–۵۱، ۶۴، ۶۷–۶۶]. با این وجود، هنوز هم حوزههای مطالعه نشدهای در این زمینه باقی مانده است. ازیابی اثر کسر وزنی^۲ ذرات پرکننده در شبکه یکی از این موارد است که به دلیل نقش چگالی، ترکیب شیمیایی، و ضخامت مادهی جاذب در تضعیف پرتوهای گاما از اهمیت برخوردار است [۲۱]. علی رغم این که در مطالعات تجربی اثر اندازه و کسر وزنی ذرات پرکننده در ساختار کامپوزیت به طور همزمان مورد بررسی قرار گرفتهاند، مانند [۳۱، ۵۲]، مدل ارائه شده برای بررسیهای تئوری در این زمینه قادر به در نظر گرفتن همزمان این دو اثر نیست. بنابراین، مطالعاتی که از این مدل استفاده کردهاند نمی توانند توصیف همه جانبه و کاملی برای اثر همزمان اندازه و کسر وزنی ذرات پر کنده در این مدل استفاده کردهاند نمی توانند توصیف همه جانبه و کاملی برای اثر همزمان اندازه و کسر وزنی ذرات بر وزنی ذرات

در راستای جبران این نقص، پژوهش حاضر یک مدل بهبود یافته بر اساس محاسبات شبکه-پرکننده [۷۲] برای بررسی همزمان اثر اندازه و کسر وزنی ذرات پرکننده بر توانایی کامپوزیتهای فلز- پلیمر در حفاظت

¹ Filler size effect

² Filler proportion effect

در برابر تابش گاما و پرتوی X ارائه میدهد. به طوری که در یک کسر وزنی معین، با کوچکتر شدن اندازهی ذرات یکنواختی ساختار کامپوزیت حفظ شود. به همین ترتیب، برای یک اندازهی مشخص از ذرات بتوان ساختارهایی با کسرهای وزنی متفاوت به دست آورد که از نظر یکنواختی با ساختارهای معادل برای ذرات بزرگتر یکسان باشند.

در این مطالعه، از فلزات سرب (Pb)، تنگستن (W)، روی (Zn)، و تیتانیم (Ti) و اکسیدهای آنها شامل مونوکسید سرب^۱ (PbO)، تریاکسید تنگستن^۲ (WO₃)، مونوکسید روی^۳ (ZnO)، و دیاکسید تیتانیم[†] (TiO₂) به صورت ماکروساختارها^۵ و همچنین به صورت میکروذرات و نانوذرات در تقویت کامپوزیتهای شبکه پلیمر استفاده شده است. دلایل انتخاب این ترکیبات را در چند مورد میتوان به شرح ذیل بیان کرد: نخست، به استثنای PD که به عنوان عنصر متداول در حفاظ گذاری فوتونها [11] انتخاب شد، سایر عناصر منتخب در گروه فلزات واسطه قرار می گیرند که نانوذرات این فلزات دارای خواص مطلوبی از جمله دمای

¹ Lead monoxide

² Tungsten trioxide

³ Zinc monoxide

⁴ Titanium dioxide

⁵ Macrostructures (Bulk)

ذوب بالا در مقایسه با سایر فلزات [۸۷]، و پایدار شدن آنها در ترکیب با پلیمرها [۸۸] هستند. دوم، اثربخشی نانوذرات PbO و WO3 در افزایش توانایی پلیمرها در تضعیف پرتوهای X و گاما در مطالعات متعددی به اثبات رسیده است [۸۲، ۸۲]. بنابراین، بررسی جامع پارامترهای حفاظ در بازهی وسیع انرژی گاما، اندازه و کسر وزنی ذرات برای ساختارهای مبتنی بر این ترکیبات ضروری به نظر میرسد. افزون بر این، نانوذرات فلزات واسطه شامل ZnO ،WO₃ و TiO₂ دارای کاربردهای گسترده در زمینههای مغناطیسی، الکترونیکی، و اپتیکی هستند و ویژگیهای منحصر بفردی از جمله پایداری گرمایی، و سمیت پایین دارند [۸۹]. همچنین، نانوذرات PbO به دلیل خواص ایتیکی، الکترونیکی، مکانیکی، و سادگی تولید به عنوان یکی از پرکاربردترین مواد در صنعت نانوفناوری مورد استفاده قرار می گیرد [۹۱–۹۰]. علاوه بر این، نانوذرات WO₃ موادی زیست سازگار [۹۲] هستند که می توانند به عنوان فوتوکاتالیزور^۲ [۹۳]، سنسور گاز^۳ [۸۹]، و آنود در باتریهای لیتیومی^۴ [۹۴]، مورد استفاده قرار گیرند. همچنین، نانوذرات ZnO و TiO₂ به دلیل پایداری گرمایی و شیمیایی بالا [۹۶–۹۵] بهترین گزینهها برای استفاده به عنوان فوتوالکترود^۵ در سلولهای خورشیدی هستند. از این رو، تمام این ترکیبات از نظر صنعتی گزینههای مطلوبی در تقویت شبکههای یلیمر به حساب میآیند و به دلیل نیمرسانا بودن [۹۸–۹۷] بررسی آنها میتواند در مبحث اسیکتروسکوپی پرتوهای گاما مورد توجه قرار گیرد [۱۰۰-۹۹]. سوم، بررسی پارامترهای حفاظ بر اساس فیزیک اندر کنش های پرتوهای گاما با ماده محور اصلی در پژوهش حاضر است. بنابراین، تفاوت در چگالی و عدد اتمی این مواد که طبیعتا ضرایب تضعیف متفاوت را موجب می شود و در حقیقت سبب می شود بازهی انرژیهای میانی برای این مواد متفاوت باشد میتواند مقایسهی خوبی فراهم آورد. در نهایت، لازم است خاطر نشان شود که سمیت این مواد در مقایسه با سرب بسیار کمتر است [۱۰۱]

¹ Melting point

²Photocatalysist

³ Gas sensor

⁴ Li-ion battery

⁵ Photoelectrode

هدف اصلی از این مطالعه، بررسی و مقایسه ی پارامترهای حفاظ گذاری برای ترکیبات مذکور در برابر تابش گاما و پرتوی X با تکیه بر نقش اثر اندازه و اثر کسر وزنی ذرات پرکننده در شبکهی پلیمر در دو بخش تئوری و تجربی است. پارامترهای حفاظ گذاری فوتونها در این بررسی عبارت هستند از ضریب تضعیف جرمی (μ/ρ)، مسافت آزاد میانگین (mfp)، ضخامت نیم لایه (HVL)، عدد اتمی موثر (Z_{eff})، چگالی الکترون موثر^۵ (Ne)، ضریب عبور^۶ (T)، و ضریب انباشت^۷ (B). با توجه به پیشینه ی پژوهشی موجود می توان گفت تاکنون مطالعهی جامعی که اثرات همزمان اندازه و کسر وزنی ذرات پرکننده را در بازهی بزرگی از انرژی فوتونها و بر روی پارامترهای حفاظ گذاری بررسی کرده باشد، ارائه نشده است. مطالعاتی که تاکنون در این زمینه صورت گرفته است غالبا بر ارزیابی ضریب تضعیف جرمی، ضخامت نیم لایه، و درصد تضعیف پرتوها در عبور از حفاظ تمرکز داشتهاند [۵۴–۵۲، ۶۲]. با این وجود، در سالهای اخیر سایر پارامترها از جمله عدد اتمی موثر، چگالی الکترون موثر، و ضریب انباشت در برخی مطالعات مورد توجه و ارزیابی قرار گرفتهاند [۲۲، ۲۰]. لازم به یادآوری است که در بیشتر این مطالعات از روشهای تحلیلی مانند روش پیشرفت هندسی^۸ (GP) برای محاسبهی ضرایب انباشت [۳۲] و از دادههای پایگاه WinXCOM برای محاسبهی عدد اتمی موثر و چگالی الکترونی موثر [۱۲] استفاده شده است، که برای بررسی اثر اندازهی یرکننده در ساختار حفاظ قابل استناد نیستند زیرا هندسهی ساختار در این روشها در نظر گرفته نمی شود. از این رو، تلاش کردیم تا مطالعهی حاضر را در دو بخش تئوری و تجربی به شرح ذیل ارائه دهیم: بخش اول، بررسی تئوری جامع با استفاده از کد مونت کارلوی MCNPX بر روی توانمندی ماکروساختارها و ساختارهای کامیوزیت فلز-پلیمر با استفاده از میکروذرات و نانوذرات فلزات Zn ،W ،Pb، و Ti و اکسیدهای

¹ Mass attenuation coefficient

² Mean free path

³ Half-value layer

⁴ Effective atomic number

⁵ Electron density

⁶ Transmission factor

⁷ Buildup factor

⁸ Geometry progress method

پرکاربرد آنها شامل LDPE) در WO3، وTiO2 و TiO2 در شبکهی پلیاتیلن سبک^۱ (LDPE) در تضعیف تابش گاما و پرتوی X بر اساس پارامترهای حفاظ گذاری است. پرتوهای گاما در بازهی وسیع انرژی MeV– ۵/۱۰ در نظر گرفته شده و محاسبات با تکیه بر نقش اثر اندازه (μm ۱۰۰–۱۰۰) و اثر کسر وزنی (%wt ۵–۱) انجام گرفت؛ بخش دوم شامل اندازه گیری تجربی ضرایب عبور و انباشت ساختارهای رزین اپوکسی^۲ تقویت شده با نانوذرات AG، RD، PbO، و TiO2 برای چشمههای ¹³⁴²، و ⁶⁰Co با تکیه بر اثر کسر وزنی (%wt ۲۵ و ۵) و اثر اندازه (تنها برای ذرات Pb). همچنین، در پایان ضرایب عبور و انباشت برای هر ماده که در حفاظ گذاری فوتونها مورد استفاده قرار گرفت مقایسه شده و مورد ارزیابی قرار گرفت.

در ادامهی این فصل، به منظور آشنایی بیشتر با روند توسعهی ساختارهای PMC تقویت شده با ذرات فلزی و اکسید فلزی در زمینهی حفاظت در برابر تابش گاما و پرتوی X چکیدهای از مطالعات موجود ارائه شده است. همچنین، خلاصهی مطالب مندرج در رساله در انتهای فصل آورده شده است.

۲-۱ مروری بر مطالعات گذشته

در سالهای اخیر، استفاده از نانومواد در حفاظ گذاری تابش به طور گسترده مورد توجه قرار گرفته و مطالعات متعددی در ارتباط با آن انجام شده است. کاربرد این مواد در حفاظ گذاری تابش گاما و پرتوی X از اوایل دههی ۲۰۱۰–۲۰۰۰ به طور جدی مطرح شد. به عنوان یکی از اولین مطالعات، میتوان به بررسی سینگ و همکاران^۳ بر روی تاثیر نانوکامپوزیت ZnO-PbO-B₂O₃ در تضعیف گاما که در سال ۲۰۰۳ انجام شد، اشاره کرد. در این مطالعه، ضرایب تضعیف، مسافت آزاد میانگین، عدد اتمی موثر، و چگالی الکترون به صورت تجربی برآورد شدند. تطابق مقادیر محاسبه شده با مقادیر تئوری مورد تائید قرار گرفت و نتایج نشان داد

¹ Light weight polyethylene

² Epoxy resin

³ Singh et al

که این مواد پتانسیل کاربرد در حفاظ گذاری تابش گاما را دارند [۱۰۲]. پس از آن، اثربخشی ساختارهای مبتنی بر نانوذرات به صورت تجربی در چندین مطالعه مورد ارزیابی و تائید قرار گرفت [۵، ۲۷، ۱۰۴–۱۰۳]. کامپوزیتهای فلز- پلیمر ^۱ (MPCs) که از یک شبکهی پلیمر تقویت شده با میکروذرات و نانوذرات فلزی و اکسید فلزی تشکیل شدهاند، بخش اعظمی از این مطالعات را به خود اختصاص دادهاند. همانطور که در بخش قبل اشاره شد، این مواد سبک و در عین حال به دلیل وجود ذرات با عدد اتمی بالا در تضعیف تابش گاما و پرتوی X موثر هستند. در این زمینه میتوان به بررسی Polypyrrole/Pb [۵۲]، Polyethylene/W Epoxy Resin/WO3 .[47] PDMS/BiO .[49] Polyimide/Bi2O3.[87] Epoxy Resin/Pb3O4 .[81] [٣٩]، و ساير مطالعات [٢٨] Epoxy/Gd₂O₃ و (٣٤] EPVC/PbO,WO₃ ، [٨٤] Epoxy Resin/CuO ، [٣٩] [۱۳–۱۱، ۳۲–۲۹، ۸۵–۸۰] اشاره کرد. نتایج حاصل از این مطالعات، بر اثربخشی ساختارهای MPC در تضعیف فوتونهایی با انرژی پایین تاکید داشتند. به عنوان نمونه، در سال ۲۰۱۱ حفاظهایی با پوشش نانوذرات جدید برای پرتوهای گاما طراحی و ساخته شد. در این بررسی تاثیر مقادیر مختلف نانوذرات PbWO4 و Bi₂WO₆ برای تابش ۵۹/۵ keV بررسی شد. نتایج بیانگر پایداری و یکنواختی خوب این مواد بود. مقدار بهینهی این ذرات در ترکیب ۳۰٪–۲۷٪ برآورد شد که توانایی تضعیف پرتوهای گاما تا ۵۰٪ مقدار اولیه را نشان داد [۴۱]. همچنین، اثربخشی نانوکامپوزیتهای پلیمری به منظور تضعیف پرتوهای X تشخیصی نیز مورد بررسی قرار گرفت. این مواد که بر پایهی اکسید بیسموت (BiO) بودند برای پرتوهای X با انرژیهای ۲۵۰ -۵۰ تطابق خوبی را با ۲۵ mm ۰/۲۵ سرب نشان دادند [۴۲].

اغلب مطالعات بر روی کاربرد حفاظ گذاری ساختارهای MPC، بر اثر اندازهی ذرات در تضعیف تابش گاما تمرکز داشتهاند. اثربخشی بیشتر نانوساختارها در تضعیف فوتونها در مقایسه با میکروساختارها در چندین مطالعهی تجربی مورد تائید قرار گرفته است [۵۲، ۷۶، ۸۶، و ۱۰۵]. به عنوان مثال، استفاده از نانوذرات

¹ Metal- polymer composite

CuO در ساختار رزین اپوکسی در مقایسه با میکروساختارها مقدار تضعیف پرتوهای X در محدوده انرژیهای تشخیصی را تا ۳۰٪ مافزایش میدهد [۸۶]. همچنین، استفاده از نانوذرات WO3 در ساختار رزین E44 مقدار ضریب تضعیف جرمی برای انرژی I/۳۳۲ MeV چشمهی ⁶⁰Co را در مقایسه با میکروساختارهای معادل تا ۱۸٪ میدهد.

افزون بر مطالعات تجربی، در اواخر دههی ۲۰۱۰–۲۰۰۰ یک گروه پژوهشی در کرهی جنوبی مدل سازی شبکههای کامپوزیت در MCNP را مطرح کردند. محققان تاثیر ابعاد اکسید بور در شبکهی پلیمر را در دو اندازهی میکرو، و نانو برای حفاظگذاری چشمهی نوترون و چشمه مختلط نوترون-گاما با استفاده از این مطالی مونت کارلو بررسی کرده و نتایج را با مقادیر مشابه برای ماکروساختار این ماده مقایسه کردند. این مطالیات نشان دادند که حفاظ طراحی شده برای پرتوهای گامای کم انرژی بسیار موثر عمل میکند این مطالعات نشان دادند که حفاظ طراحی شده برای پرتوهای گامای کم انرژی بسیار موثر عمل میکند [10]. همچنین، اثربخشی کامپوزیت پلیاتیلن تقویت شده با نانوپودرهای اکسید تنگستن در حفاظ گذاری پرتوهای گامای کم انرژی بسیار موثر عمل میکند [10]. همچنین، اثربخشی کامپوزیت پلیاتیلن تقویت شده با نانوپودرهای اکسید تنگستن در حفاظ گذاری پرتوهای گامای کم انرژی بسیار موثر عمل میکند [10]. همچنین، اثربخشی کامپوزیت پلیاتیلن تقویت شده با نانوپودرهای اکسید تنگستن در حفاظ گذاری میاهای گامای کم انرژی بسیار موثر عمل میکند [10]. همچنین، اثربخشی کامپوزیت پلیاتیلن تقویت شده با نانوپودرهای اکسید تنگستن در حفاظ گذاری پرتوهای گامای کم این مواد میتوانند عبور پرتوهای گامای کام ۲۰ را تا ۲۵٪ کاهش دهند. همچنین، تطابق خوبی میان نتایج تجربی و تئوری مشاهده کردند [24]. در طول سالهای اخیر، از این مدل در شبیه سازی شبکههای مختلف استفاده شده است [34– ۵۳]. در طول سالهای اخیر، از این مدل در شبیه سازی شبکههای مختلف استفاده شده است (34– ۵۳]. در طول سالهای اخیر، از این مدل در شبیه سازی شبکههای مختلف استفاده شده است (34– ۵۳]. در طول سالهای اخیر، از این مدل در شبیه سازی شبکههای مختلف استفاده شده است (34– ۵۳]. در طول سالهای اخیر، از این مدل در شبیه مین مقایسه شده است (34– 38] که برسی توانایی کامپوزیتهای در ۲۰۰ ولر در شبه می مونه، در تومی و تنوری حداقل ۲۰٪ مر آورد شد [30]. همچنین، اختلاف ضرایب تضعیف مرآورد شده برای فومهای بررسی توانایی کامپوزیتهای ۲۰۰ رسی وازه در آلامی ای ۲۰٪ مه دست آمد [34]. مربی موانای کامپوزیتهای ۲۰۰ مربیو مروانای کامپوزی و توانا دازل ۲۰۰ مربیه مین مانی خرایب تضعیف برآورد شده برای فومهای تحربی و تئوری حداق ۲۰٪ مربی مرایم تضعیف برآورد شده برای ای ۲۰٪ مرایم ترمپوزی مای مرایم رویده مرایه مرایب مری مرای

همانطور که از مجموع مطالعات برمی آید، تاکنون بررسی جامعی که توانمندی ساختارهای MPC در تضعیف پرتوهای گاما را در دو بعد تجربی و تئوری بررسی و مقایسه کرده باشد صورت نگرفته است. ما در این مطالعه تلاش کردیم تا با در نظر گرفتن عواملی مانند، اثر اندازهی ذرات، اثر کسر وزنی پرکننده، اثر انرژی فوتون، و اثر عدد اتمی ساختار، پروفایل دقیقتری از عملکرد کامپوزیتهای پلیمری تقویت شده با ذرات فلزی و اکسید فلزی در تضعیف تابش گاما و پرتوی X ارائه دهیم.

۱–۳ خلاصه رساله

به طور کلی، این رساله در چند بخش و به شرح ذیل تدوین شده است:

- مقدمهای بر تابش گاما و پرتوی X، برهم کنشهای فوتون با ماده، پارامترهای حفاظ گذاری فوتون؛ مروری بر تاریخچهی حفاظ گذاری تابش گاما و پرتوی X و اهمیت آن، استفاده از مواد پیشرفته در حفاظ گذاری فوتونها؛ معرفی کامپوزیتها به عنوان حفاظ پرتوها، مروری بر کامپوزیتهای فلز-پلیمر، و در نهایت معرفی کامپوزیتهای مطالعه شده در پژوهش حاضر در فصل دوم ارائه شده است؛
- فصل سوم به طراحی هندسهی شبیهسازی با کمک کد مونت کارلو MCNPX، شرح روش برآورد شار فوتون، و اطمینان از درستی نتایج شبیهسازی، محاسبهی پارامترهای حفاظ با استفاده از هندسهی طراحی شده برای ماکروساختارهای اتمی فلزات و اکسیدهای آنها، مدل سازی ساختار کامپوزیت پایه پلیمر تقویت شده با ذرات فلزی و اکسید فلزی، راستیآزمایی مدل شبیهسازی، پیادهسازی مدل بهینهسازی شده به منظور برآورد اثر همزمان اندازه و کسر وزنی ذرات در شبکهی پلیمر برای کامپوزیت پلیاتیلن سبک (LDPE) تقویت شده با میکروذرات و نانوذرات فلزی در گسترهی وسیع انرژی فوتون فرودی، و برای اندازهها و کسرهای وزنی مختلف ذرات پر کننده، تعمیم مدل طراحی شده به ساختارهای پلیمری تقویت شده با ذرات اکسید فلزی، برآورد و مقایسهی پارامترهای حفاظ گذاری آنها با تکیه بر نقش چگالی، اندازه، و کسر وزنی ذرات پر کننده اختصاص داده شده است.

- طراحی، آماده سازی و ساخت کامپوزیت های پایه پلیمر رزین اپوکسی تقویت شده با نانوذرات Pb، Po، آماده سازی و ساخت کامپوزیت های پایم رزین اپوکسی آزمایش برای انجام کار تجربی، W، X، TiO، GO، و TiO، طراحی هند سه ازمایش برای انجام کار تجربی، مقایسه ی اثر کاهش اندازه ی پرکننده بر قابلیت تضعیف پرتوهای گاما برای گاما برای Pb، مقایسه ی اثر افزایش کسر وزنی پرکننده بر قابلیت تضعیف پرتوهای گاما برای تحلیل شار فوتون ثبت شده، محاسبه ی پارامترهای حفاظ، و مقایسه ی نتایج با مطالعات تئوری در فصل چهارم ارائه شده است.
- در انتها، نتیجه گیری از مجموع یافته ها، مقایسه ی عمل کرد نمونه ها، پیشنهادات، نقاط ضعف و
 کمبودها در فصل پنجم آورده شده است.
فصل ۲: مبانی نظری

۲-۱ مقدمه

فوتونها، تابشهای الکترومغناطیسی هستند که با توجه به منشا گسیل و انرژی خود به دو دستهی پرتو X و تابش گاما تقسیم میشوند. آشنایی با انواع برهم کنش این پرتوها در ماده و رویدادهایی که برای هر فوتون پرتوی X یا گاما در طول حرکت در ماده میافتد، مبنای مطالعات رفتار تضعیف آنها است. بنابراین فصل حاضر به مطالعهی برهماندرکنش فوتونهای تابش گاما و پرتوی X و تضعیف شدت و انرژی آنها در ماده میپردازد. همچنین، معرفی و دستهبندی ساختارهای کامپوزیت به عنوان یکی از مواد جدید در حفاظ گذاری پرتوهای گاما ارائه میشود. مشخصات فلزات و اکسیدهای فلزی که در این مطالعه مورد بررسی قرار گرفتهاند،

۲-۲ برهم کنشهای تابش با ماده

هنگامی که یک پرتو وارد ماده میشود با توجه به ماهیتی که دارد با ذرات ماده برهم کنش انجام میدهد. پرتوهای یوننده شامل سه دستهی کلی است: (۱) ذرّات باردار شامل یونهای سبک (4 $\geq 2, A \leq 2$ مثل He ،He ،⁺e⁺ ،⁻e⁺ +⁰ ، و⁻ β) و یونهای سنگین؛ (۲) فوتونها شامل پرتوهای X و گاما؛ و (۳) نوترون (n) [۱۰]. اثراتی که پرتوهای یوننده بر محیط اطراف خود بر جای میگذارند در مجموع به چهار عامل بستگی دارد که عبارت هستند از:

- نوع پرتو،
- انرژی پرتو،
- تعداد ذرات يا پرتوها، و

• ساختار مادهای که در معرض تابش قرار گرفته است [۸، ۱۰].

توانایی نسبی انواع مختلف پرتوهای یوننده برای نفوذ در بافتهای مختلف، متفاوت است. از آنجایی که فوتونهای پرتوی X و گاما توانایی نفوذ بالایی دارند [۱۰] و در بسیاری از میدانهای تابش و در طول برهم کنش انواع ذرات و تابشها با ماده تولید میشوند [۸]، حفاظ گذاری و تضعیف آنها از اهمیت برخوردار است. بخشهای بعد به بررسی برهم کنشهای متنوع این ذرات و سازوکارهای تضیف آن اختصاص داده شده است.

۲-۳ برهم کنشهای فوتون با ماده

پیش از شروع بحث، بهتر است با فوتون و ماهیت آن آشنا شویم. فوتونها را بر اساس منشا تولید میتوان به صورت زیر دستهبندی کرد: ✓ پرتوهای گاما، که تابشهای الکترومغناطیسی حاصل از گذارهای هستهای هستند؛

- ✓ پرتوهای X پیوسته، که حاصل از شتاب گرفتن الکترونهای آزاد یا ذرات باردار و پدیدهی تابش ترمزی
 ۸ هستند؛
- ✓ پرتوهای X مشخصه، که در اثر گذار الکترونهای پیوندی در لایههای اتمی (M ،L ،K، و …) تابش می شوند؛
 - ✓ تابش نابودی، که حاصل از ترکیب پوزیترون و الکترون است [۴].
- در تقابل فوتون با ماده، احتمال رخداد چند فرایند وجود دارد: پراکندگی رایلی^۱، پراکندگی تامسون^۲، پراکندگی تامسون^۲، پراکندگی پراکندگی

¹ Rayleigh Scattering

² Thomson Scattering

³ Delbruck Scattering

⁴ Nuclear Resonance Scattering

⁵ Nuclear Decay

⁶ Meson Production

کامپتون، و تولید زوج. در محدودهی انرژی ۱۰ keV تا ۱۰ MeV سه فرآیند اساسی اثر فوتوالکتریک، پدیده کامپتون، و تولید زوج در برهم کنش فوتون با ماده اهمیت مییابند و نقش پراکندگی رایلی نیز در انرژیهای پایین مطرح میشود. احتمال وقوع هر یک از این برهم کنشها به انرژی فوتون فرودی و عدد اتمی ماده بستگی دارد. ویژگی مهم برهم کنش پرتوهای X و گاما با ماده از طریق سه سازوکار فوق، تولید ذرهی باردار پرانرژی (الکترون و پوزیترون) است که انرژی خود را از طریق یونسازی و برانگیختگی از دست میدهد. به همین دلیل گاهی اوقات پرتو X یا گاما را تابش یونساز غیرمستقیم مینامند [۱۰]. برهم کنشهای تابش با ماده تابع قوانین احتمال هستند. تعداد φ فوتون را در نظر بگیرید که به صورت تصادفی به سمت ورقهای با سطح A پرتاب شدهاند. سطح A شامل n هدف هر یک با سطح σ هستند. به سادگی میتوان انتظار داشت که تعداد اندر کنشهای φΔ بین فوتونها و هدفها عبارت هستند از:

۲-۳-۲ پراکندگیهای همدوس

به پراکندگیهای کشسان فوتون با ماده پراکندگی همدوس میگویند که در آن طول موج پرتو تغییری نمیکند و تنها مسیر آن عوض میشود. پراکندگیهای همدوس تابش X و گاما عبارت هستند از: پراکندگی تامسون و پراکندگی رایلی.

۲-۳-۱ پراکندگی تامسون

پراکندگی تامسون، پراکندگی کشسان تابش الکترومغناطیسی با ذرات باردار آزاد است. در این پراکندگی انرژی جنبشی ذره یباردار و طول موج فوتون قبل و بعد از پراکندگی بدون تغییر باقی می ماند. بر اساس انرژی جنبشی ذره یباردار و طول موج فوتون قبل و بعد از پراکندگی بدون تغییر باقی می ماند. بر اساس این نظریه، کسری از انرژی تابش فرودی که توسط الکترون پراکنده می شود مستقل از طول موج تابش است. مادامی که انرژی تابش η از انرژی بستگی الکترون پراکنده می شود مستقل از طول موج تابش است. مادامی که انرژی تابش η از انرژی بستگی الکترون و این این براکنده می شود مستقل از طول موج تابش است. مادامی که انرژی تابش η از انرژی بستگی الکترون و این این از از از از انرژی سکون الکترون η و موج تابش است. مادامی که انرژی تابش η از انرژی بستگی الکترون و این و ما از از رژی سکون الکترون η و موج تابش η و موج تابش η از انرژی بستگی الکترون و و مول و موج برای از از از از از این برهم کنش است. مادامی که انرژی تابش η از انرژی بستگی الکترون و و مول و مول و مول از از از از از و می ما از انرژی سکون الکترون η و موج و ما از از از از از این که شرط η و ما از از رگ و می ما از انرژی سکون الکترون و موج و ما ما از انرژی سکون الکترون و موج و دارد [۸]. شکل ۲–۱ پراکندگی تامسون برای فوتون پس از برخورد با عنصر حجم مادی VD را نشان می دهد. در حالی که سطح مقطع دیفرانسیلی $d\sigma_{sTh}/d\Omega$ احتمال برخورد فوتون و پراکندگی تامسون در جهت θ تحت زاویه فضایی Ω D را نشان می دهد.



شکل ۲–۱ پراکندگی تامسون فوتون فرودی بر واحد حجم $\mathrm{d} V$ که در جهت heta در زاویهی فضایی Ω [۱۰۶]

تامسون نشان داد که سطح مقطع دیفرانسیلی برای پراکندگی فوتون توسط یک الکترون آزاد در جهت θ به سادگی عبارت است از:

$$\frac{d\sigma_{sTh}}{d\Omega} = \frac{r_0^2}{2} (1 + \cos^2 \theta)$$
در این عبارت، r₀ شعاع کلاسیکی الکترون^۱ و برابر با r₀=e²/m₀c²= ۲/۸۱۷۹۴×۱۰^{-۱۳} cm² است، که e بار
t+dt الکترون، و 20m انرژی سکون الکترون است [۸، ۱۰۶]. اگر موج تخت X با شدت I₀ در مدت زمان t

¹ Classical electron radius

با الکترون برخورد کند، انرژی متوسط (
$$_{0}Q_{0}$$
) از تابش توسط الکترون پراکنده میشود. بنابراین آهنگ
پراکندگی انرژی توسط هر الکترون در جهت θ تحت زاویهی فضایی Ω D عبارت است از:
(۲-۳)
(۳-۳)
با توجه به این که $\Omega = 2\pi \sin\theta d\theta$ (۵)
با توجه به این که $\Omega = 2\pi \sin\theta d\theta$ (در ابطهی (۲-۲)
(۲) بر روی تمام زوایای پراکندگی از صفر تا π ، سطح مقطع پراکندگی تامسون به دست میآید، که در
رابطهی (۲-۴) نشان داده شده است. عبارتی که برای π_{sTh} به دست آمد یک مقدار ثابت است، و پیش بینی
رابطهی (۲-۴) نشان داده شده است. عبارتی که برای σ_{sTh} به دست آمد یک مقدار ثابت است، و پیش بینی
میکند که احتمال پراکندگی کلاسیک فوتون مستقل از انرژی تابش است.
می کند که احتمال پراکندگی کلاسیک فوتون مستقل از انرژی تابش است.
(۲-۴) $\sigma_{sTh} = \int \frac{d\sigma_{sTh}}{d\Omega} d\Omega = \frac{r_0^2}{2} \int_0^{\pi} 2\pi (1 + \cos^2 \theta) \sin\theta d\theta = \frac{8\pi r_0^2}{3} = 66.52 \times 10^{-30} \text{ cm}^2$
در نتیجه، انرژی کل حذف شده از تابش اولیه در برخورد با یک الکترون توسط رابطهی (۲–۵) ارائه میشود.
بر اساس این رابطه، کسر انرژی که فوتون در طول برخورد تامسون با الکترون از دست میده متناسب با
شدت فرودی آن است.

$$\frac{Q_e}{t} = I_0 \frac{8\pi r_0^2}{3} \frac{\text{ergs}}{\text{electron.s}}$$
 (۵–۲)
روشن است که این نتیجه همواره صحیح نیست. به عبارت بهتر، نتایج حاصل از فیزیک کلاسیک همان نتایج
کوانتوم است زمانی که انرژی فوتون به صفر میل کند [۸].

۲-۳-۱-۲ پراکندگی رایلی

در واقعیت، برخلاف فرض پراکندگی تامسون الکترونهای اتمی آزاد نیستند و فوتون توسط مجموع الکترونهای اتمی پراکندگی کشسان تابش الکترونهای اتمی پراکندگی کشسان تابش الکترومغناطیسی با ذراتی با ابعاد کوچکتر از طول موج تابش است [۸]. پس از پراکندگی رایلی حالت ماده تغییر نمیکند. ذرات برهمکنشی میتوانند اتمها یا ملکولها باشند. اندازه ذره ی پراکننده با کمیت بدون بعد b و با رابطهی (۲–۶) مشخص میشود.

$$d = \frac{2\pi r}{\lambda}$$

که r طول مشخصهی ذره (شعاع) و λ طول موج تابش است [۱۰۶]. زاویه در پراکندگی رایلی غالبا کوچک
است زیرا پسزنی اتم نباید برانگیختگی یا یونش ایجاد کند [۸]. سطح مقطع پراکندگی رایلی برای hv
کوچک و Z بزرگ توسط وایت ⁽ ارائه شده است.

$$\sigma_{sR} = \frac{2\pi^5}{3} \frac{d^6}{\lambda^4} \left(\frac{n^2 - 1}{n^2 + 2}\right)^2 \text{ cm}^2$$
 (۷-۲)
که در آن n چگالی الکترونی ماده است [۱۰۶]. با این که پراکندگی رایلی غالبا برای فوتون با انرژی کمتر
از ۱۰ keV رخ میدهد، ایوانز^۲ در کتابش مینویسد حتی در انرژیهای MeV ا/۰ و بالاتر پراکندگی کشسان
رایلی با الکترونهای اتمی مقید در عناصر سنگین میتواند حائز اهمیت باشد [۸].

۲-۳-۲ پراکندگی کامپتون

اثر کامپتون، پراکندگی غیرهمدوس فوتون از الکترون است. در حقیقت، فرایند برخورد فوتون پرتوی X یا گاما با الکترونهای مقید صورت می گیرد اما با توجه به این که انرژی فوتونها از مرتبهی چند ده keV تا چند MeV است در حالی که انرژی بستگی الکترونها به هستهی اتم از مرتبهی eV میباشد، میتوان الکترونهای اتمی را آزاد در نظر گرفت. حالتی را در نظر بگیرید که الکترون در حالت سکون قرار دارد و فوتون با انرژی hv که هم از انرژی بستگی الکترون بیشتر است و هم از مقدار آن در برابر انرژی سکون الکترون نمیتوان صرفنظر کرد با الکترون برخورد میکند. پس از برخورد انرژی و راستای حرکت فوتون تغییر میکند به طوری که فوتون با انرژی 'hv در زاویهی θ و الکترون با انرژی جنبشی Te در زاویهی φ نسبت به راستای اولیهی فوتون پراکندگی فوتون و الکترون صفحهی پراکندگی ^T می گویند.

¹ White

² Evans

³ Scattering plane



شکل ۲-۲ پراکندگی کامپتون فوتون فرودی از الکترون اتمی

در این حالت، بر اساس قانون پایستگی انرژی، اختلاف انرژی فوتون اولیه (hv) و فوتون پراکنده ('hv) به صورت انرژی جنبشی (T_e) به الکترون منتقل میشود، و برابر است با:

$$\frac{hv}{c} = \frac{hv'}{c} \cos\theta + p \sin\phi$$
(۹-۲)
 $\frac{hv}{c} = \frac{hv'}{c} \cos\theta + p \sin\phi$
که در آن p تکانه یالکترون پراکنده است و ارتباط آن با انرژی به صورت رابطه ی (۲-۳) بیان می شود.
 $pc = \sqrt{T_e(T_e + 2m_0c^2)}$
(۱۰-۲)
 $pc = \sqrt{T_e(T_e + 2m_0c^2)}$
(۱۰-۲)
 $pc = \sqrt{T_e(T_e + 2m_0c^2)}$
(1-1)
 $pc = \sqrt{T_e(T_e + 2m_$

¹ Compton shift ² Compton wavelength

$$h\nu' = \frac{h\nu}{1 + \alpha(1 - \cos\theta)} \tag{17-7}$$

$$T_e = h\nu \frac{\alpha(1 - \cos\theta)}{1 + \alpha(1 - \cos\theta)}$$
(1)(7-7)

لازم به ذکر است که در پراکندگی کامپتون الکترونها همواره رو به جلو پراکنده میشوند به طوری که بازهی تغییرات برای φ از صفر تا $\pi/1$ است در حالی که θ میتواند مقادیر از صفر تا π را بگیرد. اگر انرژی فوتون فرودی خیلی بیشتر از انرژی سکون الکترون باشد (1 $\ll \alpha$)، تقریبا تمام انرژی خود را به الکترون انتقال داده و با انرژی بسیار کم MeV مرکنه سکون الکترون باشد (1 $\ll \alpha$)، تقریبا تمام انرژی خود را به الکترون انتقال داده و با انرژی بسیار کم MeV مرکنه سکون الکترون باشد (1 $\ll \alpha$)، تقریبا تمام انرژی خود را به الکترون انتقال داده و با انرژی بسیار کم MeV مرکنه میشود. احتمال وقوع برهم کنش کامپتون یا همان سطحمقطعهای کامپتون از روابطی که کلاین و نیشینا^۱ با استفاده از تئوری نسبیت دیراک¹ در سال ۱۹۲۸ ارائه کردند، به دست میآید. برای یک پرتوی غیرقطبیده، سطح مقطع دیفرانسیلی برخورد^۳ با استفاده از رابطهی کلاین – نیشینا با استفاده از رابطهی کلاین برخورد^۳

$$d(\sigma_{e}) = \frac{r_{0}^{2}}{2} d\Omega \left(\frac{\nu'}{\nu}\right)^{2} \left(\frac{\nu'}{\nu} + \frac{\nu}{\nu'} - \sin^{2}\theta\right)$$
(۱۴-۲)
با انتگرال گیری از این کمیت بر روی بازهی تغییرات θ (π -0)، سطح مقطع متوسط برخورد^۴ به صورت
رابطهی (۲–۱۵) به دست میآید.

$$\sigma_{e} = \int_{0}^{\pi} d(\sigma_{e}) = 2\pi r_{0}^{2} \left\{ \frac{1+\alpha}{\alpha^{2}} \left[\frac{2(1+\alpha)}{1+2\alpha} - \frac{1}{\alpha} \ln(1+2\alpha) \right] + \frac{1}{2\alpha} \ln(1+2\alpha) - \frac{1+3\alpha}{(1+2\alpha)^{2}} \right\} \frac{\mathrm{cm}^{2}}{\mathrm{electron}}$$
(1Δ-٢)

دسته پرتوی موازی از فوتونها هر یک دارای انرژی hv را در نظر بگیرید به طوری که در هر ثانیه n فوتون از سطح S cm² عبور میکنند. بنابراین، شدت تابش فرودی (Io) عبارت است از:

¹ Klein & Nishina

² Dirac's relativistic theory

³ Differential Collision Cross Section

⁴ Average Collision Cross Section

$$I_0 = \frac{n}{s}h\nu \quad \frac{ergs}{cm^2.s}$$
 (۱۶-۲)
هنگامی که این پرتوها از کنار یک الکترون می گذرند، کسری از N/S فوتون فرودی که با انرژی 'vh و در
زاویه فضایی Qb از این الکترون پراکنده می شود، عبارت هستند از:
 $dn = \frac{n}{s}d(\sigma_e)$ (۱۷-۲)
اگر (Qe) انرژی کل پراکنده شده در زمان t بر واحد زاویه یفضایی باشد، ارتباط آن با سطح مقطع

$$\frac{d(Q_e)}{t} = h\nu'\frac{n}{s}d(\sigma_e)$$
(1A-Y)

کمیت d(Qe)/I₀t دارای ابعاد cm²/electrons است و سطح مقطع دیفرانسیلی پراکندگی^۱ نام دارد که در

$$d(\sigma_{e,s}) = \frac{\nu'}{\nu} d(\sigma_e) = \frac{r_0^2}{2} d\Omega \left(\frac{\nu'}{\nu}\right)^3 \left(\frac{\nu'}{\nu} + \frac{\nu}{\nu'} - \sin^2\theta\right)$$
(19-7)

$$\sigma_{e,s} = \int_0^{\pi} d(\sigma_{e,s}) = \pi r_0^2 \left\{ \frac{1}{\alpha^3} \ln(1+2\alpha) + \frac{2(1+\alpha)(2\alpha^2-2\alpha-1)}{\alpha^2(1+2\alpha)^2} + \frac{8\alpha^2}{3(1+2\alpha)^3} \right\} \frac{cm^2}{electron}$$
(Y - Y)

پیش از این گفتیم که بر اساس پایستگی تکانه در طول برهم کنش کامپتون، تفاوت انرژی میان فوتون اولیه و فوتون پراکنده بصورت انرژی جنبشی به الکترون داده می شود (رابطهی ۲–۸)، بنابراین سطح مقطع متوسط جذب^۳ را می توان به صورت زیر نوشت:

$$\sigma_{e,a} = \sigma_{e} - \sigma_{e,s} = 2\pi r_{0}^{2} \left\{ \frac{2(1+\alpha)^{2}}{\alpha^{2}(1+2\alpha)} - \frac{1+3\alpha}{(1+2\alpha)^{2}} - \frac{(1+\alpha)(2\alpha^{2}-2\alpha-1)}{\alpha^{2}(1+2\alpha)^{2}} - \frac{4\alpha^{2}}{3(1+2\alpha)^{3}} - \left(\frac{1+\alpha}{\alpha^{3}} - \frac{1}{2\alpha} + \frac{1}{2\alpha^{3}}\right) \ln(1+2\alpha) \right\} \quad \frac{\mathrm{cm}^{2}}{\mathrm{electron}}$$
(YI-Y)

⁸Differential Scattering Cross Section

⁹ Average Scattering Cross Section

¹⁰ Average Absorption Cross Section

با توجه به رابطهی (۲–۱۷)، باریکهای شامل n فوتون در عبور از ورقهای شامل N atoms/cm³، هر یک دارای Z electrons/atom و ضخامت dx احتمال برخورد با NZdx الکترون در واحد سطح را دارند. بنابراین، تعداد برخورد متوسط در ثانیه در گذار از این ورقه عبارت است از:

در نتیجه، با توجه به این که نسبت Z/A برای اکثر اتمهای سبک و میانی حدود ۱/۲ است، ضریب تضعیف خطی کامپتون برای یک ماده را با تقریب میتوان به صورت رابطهی (۲–۲۸) نوشت.

 $\sigma \simeq \frac{1}{2} N_A \rho \sigma_e \ cm^{-1}$ (۲۸–۲) احتمال برهم کنش کامپتون با افزایش انرژی در محدودهی انرژیهای پایین افزایش یافته، و سپس به کندی کاهش مییابد. همچنین، احتمال وقوع کامپتون تقریباً مستقل از عدد اتمی و وابسته به چگالی الکترونی است [۸]. این تغییرات در نمودارهای شکل (۲–۳) نشان داده شده است.



۲-۳-۳ اثر فوتوالکتریک

اثر فوتوالکتریک برخوردی میان یک فوتون و یک الکترون اتمی مقید است که به موجب آن، فوتون نابود شده و یکی از الکترونهای اتمی از سطح ماده جدا میشود که فوتوالکترون^۱ نام دارد. اثر فوتوالکتریک از جمله فرایندهای گسیل میدانی^۲ است زیرا فوتون، الکترون را در میدان مغناطیسی خود درگیر می کند و با دادن انرژی کافی به آن موجب جدا شدن الکترون از اتم می گردد. بنا بر قوانین پایستگی، برهم کنش فوتوالکتریک ترویالکتریک ترجیحاً با الکترونهای مقیدتر به اتم صورت می گیرد، به طوری که الکترون معمولا از لایههای لا در اتم برانگیخته میشود آل الکترون از اتم می گردد. بنا بر قوانین پایستگی، برهم کنش فوتوالکتریک ترجیحاً با الکترونهای مقیدتر به اتم صورت می گیرد، به طوری که الکترون معمولا از لایههای لا در اتم برانگیخته میشود [۸].

در فرایند فوتوالکتریک، از پایستگی انرژی داریم:

¹ Photoelectron

² Field Emission

$$T_e - T_A = hv - B_e$$
 (۲۹-۲)
که در این رابطه Te انرژی جنبشی الکترون، $E_q = hv$ انرژی فوتون فرودی، B_e انرژی بستگی الکترون اتمی
مقید و Ta انرژی جنبشی اتم پسزده است که به دلیل کوچکی از آن صرفنظر کرده و مینویسیم:
 $T_e = hv - B_e$ (۳۰-۲)



شکل ۲-۴ اثر فوتوالکتریک

مادامی که انرژی فوتون فرودی پایین باشد، فوتوالکترون در جهتهای نزدیک به عمود بر جهت فوتون فرودی پراکنده میشود و در انرژیهای بالاتر پراکندگی فوتوالکترون تقریبا رو به جلو است. زمانی که hv به میزان قابل توجهی از انرژی بستگی الکترون بیشتر باشد، انرژی فوتوالکترون تقریبا برابر با hv است اما به دلیل جرم سکون الکترون اندازه حرکت آن $(2)(2)(2) + (2\pi)(2) = 2\pi)$ از اندازه حرکت فوتون فرودی دلیل جرم سکون الکترون اندازه حرکت آن $(2)(2)(2) + (2\pi)(2) = 2\pi)$ از اندازه حرکت فوتون فرودی باید تکانه رو به عقب داشته باشد یا به اصطلاح پس زده میشود. احتمال رخداد اثر فوتوالکتریک را با سطح باید تکانه رو به عقب داشته باشد یا به اصطلاح پس زده میشود. احتمال رخداد اثر فوتوالکتریک را با سطح مقطع فوتوالکتریک ^۲ یا ضریب فوتوالکتریک بیان میکنند که به صورت زیر تعریف شده است: (۲۵–۲۱) معقادیر تجربی و به ترتیب برابر با ۵/۵–۹۶ و مقداری در بازهی ۵/۵–۵۶ هستند (برای عدد اتمی که n و m مقادیر تجربی و به ترتیب برابر با ۵/۵–۹۶ و مقداری در بازهی ۵/۵–۵۲ هستند (برای عدد اتمی کوچکتر، بزرگتر هستند) [۸، ۱۰۶]. در ناحیهی انرژی کمتر از MeV ایرای ۱۰ سطح مقطع فوتون دارای

¹ Photoelectric Cross-section

پیچیدگیهایی است که مربوط به لایههای اتمی است. در این لبه ها سطح مقطع دارای ناپیوستگی است زیرا hv کمتر از انرژی بستگی الکترون اتمی شده و باعث میشود تعداد الکترونهایی که امکان فرار از اتم را دارند ناگهان کاهش یابند. با جدا شدن الکترون از لایه داخلی یکی از دو پدیدهی گسیل پرتوی X مشخصه ایا گسیل الکترون اوژه ۲ رخ میدهد [۸].

گسیل پرتو X مشخصه: زمانی که برخورد فوتون موجب جدا شدن الکترونی از لایهی داخلی اتم می شود، جای خالی آن با الکترونی از لایهی بالاتر پر می شود. اختلاف انرژی لایهی اول و لایهای که الکترون ثانویه آن را ترک می کند به صورت یک پرتوی X گسیل می گردد. مطالعهی این پرتو، نوع گذار صورت گرفته در لایههای اتمی را نشان می دهد و به همین دلیل به آن پرتو X مشخصه می گویند [۸].

گسیل الکترون اوژه: زمانی که برخورد فوتون موجب جدا شدن الکترونی از لایهی داخلی اتم میشود، جای خالی آن با الکترونی از لایهی بالاتر پر میشود. در این حالت، اختلاف انرژی لایهها به صورت پرتوی X گسیل میشود و با برخورد به الکترونی از لایههای بیرونی اتم موجب جدا شدن آن می گردد. این الکترون را اوژه مینامند [۸].



شکل Y = 0 رویداد (۱) گسیل پرتو X مشخصه و (۲) گسیل الکترون اوژه

¹ Characteristic X-ray

² Auger Electron

احتمال رخداد اثر فوتوالكتريك بالاتر است. همچنين، با افزايش انرژی فوتون احتمال رخداد اين پديده كاهش مييابد [۱۰].



شکل ۲-۶ وابستگی سطح مقطع فوتوالکتریک به (۱) انرژی فوتون و (۲) عدد اتمی ماده [۱۰]

۲-۳-۲ پدیدهٔ تولید زوج

وقوع برهم کنش تولید زوج در مجاورت هسته، نیازمند پرتوی گاما با انرژی بیش از 2moc²=1/۰۲۲ MeV وقوع برهم کنش، فوتون کاملا جذب شده و زوج الکترون- پوزیترون با انرژی کل hv به وجود میآیند. اختلاف انرژی فوتون فرودی و انرژی سکون الکترون و پوزیترون به صورت انرژی جنبشی بین آنها تقسیم میشود:

$$T_{+} + T_{-} = E_{\gamma} - 2m_0 c^2 \tag{(7.4)}$$

پوزیترون در انتهای مسیر خود یک جفت فوتون با انرژی ۸۵۱۱ MeV گسیل میکند. این پدیده تنها در میدان ذرات باردار رخ میدهد. در مجاورت الکترون، حداقل انرژی موردنیاز برای وقوع آن 4m₀c²است [۸، میدان ذرات باردار رخ میدهد. در مجاورت الکترون، حداقل انرژی موردنیاز برای وقوع آن 2-4m₀c است [۸، ۱۰]. احتمال رخداد تولید زوج، بنام سطح مقطع تولید زوج^۱، تابع پیچیدهای از عدد اتمی ماده Z و انرژی فوتون فرودی است که با رابطهی (۲–۳۴) بیان میشود [۸].

$$\kappa_a = Z^2 f(h\nu, Z) \frac{cm^2}{electron}$$



شکل ۲-۷ پدیدهی تولید زوج

ضریب تضعیف خطی تولید زوج (۲) از حاصلضرب سطح مقطع فوتوالکتریک در تعداد اتم موجود در واحد حجم (N) به دست میآید. $\kappa = \kappa_a. N \ cm^{-1}$ (۳۶-۲) اگر دو ماده با وزن اتمی A1 و A1 ید. اگر دو ماده با وزن اتمی A1 و A2، عدد اتمی Z2 و Z2، و چگالی A1 و 20 داشته باشیم، ضرایب تضعیف خطی تولید زوج آنها با رابطهی (۲-۳۶) به هم مربوط میشوند [۸، ۱۰]. $\kappa_2 = \kappa_1 \frac{\rho_2}{\rho_1} \frac{A_2}{A_1} \left(\frac{Z_2}{Z_1}\right)^2$

¹ Pair Production Cross-section

از رابطه (۲–۳۵) و نمودارهای شکل (۲–۱۰) مشخص است که احتمال تولید زوج در مجاورت هسته برای انرژیهای کمتر از ۱/۰۲۲ MeV صفر است و در انرژیهای بیش از این حد با افزایش انرژی، زیاد می شود تا این که در انرژیهای بیش از ۱۰ MeV برهم کنش غالب خواهد بود [۱۰].



شکل ۲-۸ وابستگی سطح مقطع تولید زوج به (۱) انرژی فوتون و (۲) عدد اتمی ماده [۱۰]

۲-۴ جذب و تضعیف فوتون

باریکهای از پرتوهای موازی X یا گاما با شدت I₀ به ورقهی نازکی میتابد. با عبور پرتوها از این ورقه، سه رویداد ممکن است اتفاق افتد:

۱- فوتون کاملاً توسط ماده جذب شود،
 ۲- فوتون با کاهش انرژی پراکنده شود،
 ۳- فوتون بدون برهم کنش از ماده عبور کند [۱۰].
 ۱۰ احتمال عبور پرتو از ماده با ضخامت x بدون برهم کنش برابر با حاصلضرب احتمال عبور آن بدون وقوع هر

یک از برهم کنش ها است. به عبارت دیگر، اگر I شدت فوتون های که در طول عبور از ماده برهم کنش نمی کنند را نشان دهد، تغییرات dI پس از عبور از ضخامت dx ماده عبارت است از: $dI = -I\mu dx$ که علامت منفی برای نشان دادن کاهش این شدت است، و µ ضریب تضعیف خطی کل و برابر با مجموع ضرایب تضعیف برهم کنشهای فوتون با ماده است. ضریب تضعیف خطی احتمال برهم کنش پرتوی گاما در عبور از واحد سطح یک ماده به ضخامت ۱ cm را نشان میدهد.

 $\mu = \sigma_{coh} + \sigma_{comp} + \tau + \kappa \ cm^{-1}$ (۳۹–۲) با انتگرال گیری از رابطهی (۲–۳۷) و جایگذاری مقدار μ رابطهی (۲–۳۹) برای تضعیف پرتوهای موازی فوتون در عبور از ماده به دست میآید.

 $I = I_0 e^{-\tau x} e^{-\sigma_{inc} x} e^{-\sigma_{coh} x} e^{-\kappa x} = I_0 e^{-\mu x}$ که در آن $e^{-\sigma_{coh} x}$ تضعیف ناشی از پراکندگی همدوس، $e^{-\sigma_{comp} x}$ به دلیل پراکندگی کامپتون، $\tau^{-\alpha} e^{-\alpha_{coh} x}$ برای اثر فوتوالکتریک، و $\tau^{-\alpha} e^{-\alpha_{coh} x}$ برای می دهد. رابطه ی (۲-۴۰) تضعیف نمایی پرتوهای موازی گاما در ماده را نشان می دهد و به آن قانون بیر-لامبرت می گویند [۸، ۱۰].

۲-۵ پارامترهای حفاظ گذاری فوتون

به منظور ارزیابی چگونگی تضعیف فوتونها در یک محیط مادی، پارامترهای مختلفی تعریف شده و مورد استفاده قرار گرفتهاند. در این بخش به چند مورد از مهمترین پارامترها اشاره میشود.

۲-۵-۲ ضریب تضعیف جرمی

ضریب تضعیف خطی به چگالی مادهی پراکننده وابسته است، که به نوبهی خود به حالت فیزیکی ماده بستگی دارد. در نتیجه، μ کمیت مناسبی برای دادههای پیچیده نیست [۱۰]. به منظور حذف اثر چگالی در ضریب تضعیف خطی، کمیت دیگری بنام ضریب تضعیف جرمی^۲ (μ/ρ) تعریف میشود که از تقسیم ضریب تضعیف خطی (بر حسب ¹-cm) بر چگالی جرمی (بر حسب g/cm³) محاسبه میشود و بر حسب g²/g

¹ Beer-Lambert law

² Mass attenuation coefficient

بیان می گردد. این ضریب به دلیل حذف اثر چگالی، غالبا با اهمیت ر از ضریب تضعیف خطی است. ضریب تضعیف جرمی، معرف احتمال برهم کنش فوتون با واحد جرم ماده است. هر برهم کنش دارای ضریب تضعیف جرمی مخصوص به خود میباشد که مجموع آنها ضریب تضعیف جرمی کل را به ما میدهد [۸، ۱۰]. معادلهی (۲–۳۹) برای یک دسته پرتوی موازی از فوتونها که با عبور از ماده با جرم در واحد سطح مر از مقدار I تا I تضعیف می شوند عبارت است از:

$$I/I_0 = \exp(-(\mu/\rho).\rho x)$$
 (۴۱-۲)
از بازنویسی رابطهی (۲-۴۰) داریم:

$$\mu/\rho = (\rho x)^{-1} \ln(I_0/I) \quad \frac{cm^2}{g} \tag{\mathbf{F}_{-}}$$

که μ/ρ برابر با شیب نمودار $\ln(I_0/I)$ بر حسب ρx است.

نمونهای از ضرایب تضعیف جرمی برای یک ترکیب در شکل ۲-۹ نشان داده شده است. همانطور که مشخص است، برهم کنش فوتوالکتریک سهم غالبی در انرژیهای پایین دارد که با افزایش انرژی به سرعت کاهش مییابد تا زمانی که پراکندگی کامپتون غالب شود [۱۰].



نقطهی برخورد کامپتون و تولید زوج آغاز بازهی انرژیهای بالا است که در آن تولید زوج سهم عمدهای در برهم کنش فوتون با ماده دارد. لبههای تیز در انرژیهای پایین از کاهش گسیل فوتوالکترونها در لبههای K و L اتم به وجود میآید [۱۰]. لازم به ذکر است که برای یک ترکیب یا مخلوط، ضرایب تضعیف جرمی را میتوان از مجموع وزنی ضرایب تضعیف جرمی مولفهها در آن ترکیب به دست آورد. (۴۳-۲) که ن۵ کسر وزنی نامین عنصر (یا نامین مولفهی مخلوط) در هر ماده است [۱۰۶].

۲-۵-۲ مسافت آزاد میانگین

زمانی که یک فوتون وارد مادهای با ضریب تضعیف خطی کل μ میشود، احتمال برخورد در فاصله یکوتاه dx را بدون dx برابر با μ dx است که این مقدار کمتر از ۱ است. همچنین، احتمال این که فوتون فاصله یx را بدون برهم کنش طی کند، $x^{-\mu}$ است. اگر تعداد بسیار زیاد n فوتون یکسان وارد مادهای با ضخامت محدود شوند، x برهم کنش طی کند، $x^{-\mu}$ است. اگر تعداد بسیار زیاد x فوتون یکسان وارد مادهای با ضخامت محدود شوند، x برهم کنش طی کند، $x^{-\mu}$ است. اگر تعداد بسیار زیاد n فوتون یکسان وارد مادهای با ضخامت محدود شوند، x برهم کنش طی کند، $x^{-\mu}$ است. اگر تعداد بسیار زیاد n فوتون یکسان وارد مادهای با ضخامت محدود شوند، x برهم کنش می کند، $x^{-\mu}$ است. اگر تعداد بسیار زیاد n فوتون یکسان وارد مادهای ما محدود شوند، x برهم کنش مای که بدون برهم کنش مسافت x را طی می کنند، $x^{-\mu}$ و تعداد فوتونهایی که بدون برهم کنش مسافت x ما حمی کنند، $x^{-\mu}$ و تعداد فوتونهایی که بدون برهم کنش مسافت x می کنند، $x^{-\mu}$ و تعداد فوتونهایی که بدون برهم کنش مسافت x ما صی کنند، $x^{-\mu}$ و تعداد فوتونهایی که بدون برهم کنش مسافت x ما صی کنند، می می می و تمام مسیرهای ممکن جمع ببندیم، مسافت آزاد میانگین (λ) به صورت معکوس ضریب تضعیف خطی حاصل می شود.

$$\lambda = \int_0^\infty e^{-\mu x} dx = \frac{1}{\mu}$$
 cm
یعنی بر اساس رابطه بیر-لامبرت، در x= λ تعداد فوتونها به 1/e مقدار اولیهی خود میرسد. مسافت آزاد
میانگین برای هر نوع برهم کنش، متوسط مسافتی است که یک فوتون بدون برهم کنشی از این نوع طی
می کند [۱۰۸].

۲-۵-۲ ضخامت نیم لایه

ضخامت نیم لایه (HVL) ضخامتی از ماده است که نیمی از فوتونهای فرودی را تضعیف میکند. از نظر تجربی تعیین پارامتر HVL راحت ر از μاست. ضخامت HVL با معادلهٔ زیر به μ مربوط می شود:

HVL =
$$\frac{0.693}{\mu}$$
 cm (۲–64)
همچنین، کمیت دیگری بنام ضخامت یک دهم لایه (TVL) نیز به عنوان ضخامتی از ماده که شدت
پرتوهای ورودی γ را تا یک دهم آن تضعیف می کند، تعریف شده است. این کمیتها دارای بعد طول هستند
و معمولا بر حسب cm بیان می شوند. همچنین، HVL و TVT مانند ضرایب تضعیف به انرژی فوتون فرودی
وابسته هستند و توانایی نفوذ تابش گاما و پرتوی X از یک مادهی معین را نشان می دهند [۱۰۹].

۲-۵-۴ عدد اتمی موثر

در ترکیبات و مخلوطها، نمی توان یک عدد اتمی را برای برهم کنشهای فوتون در کل ناحیه ی انرژی مشخص کرد. بنابراین، کمیت عدد اتمی موثر (Zeff) به عنوان تعداد متوسط الکترونها در اتم که احتمال برهم کنش با پرتوهای گاما را دارند معرفی شد. به عبارت دیگر، برای هر برهم کنش فوتون با ماده می توان عدد اتمی موثر را به عنوان تعداد متوسط الکترونهای اتم ماده که احتمال آن نوع برهم کنش را دارند تعریف کرد [۱۱۰]. عدد اتمی موثر، یک پارامتر فراگیر در محاسبات حفاظ گذاری تابش است که برهم کنشهای فوتون-ماده را بر حسب تغییرات انرژی و ترکیب ماده بیان می کند [۱۱۱]. عدد اتمی موثر با کمک q/μ به دست می آید که گاهی با عنوان عدد اتمی موثر برهم کنشهای فوتون^۲ ZPIeff مطرح می شود و پارامتری متداول برای نمایش برهم کنشهای فوتون در ماده است [۱۱۲]. این کمیت در مطالعه ی حاضر با آولی میداول می شود. یک ترکیب شیمیایی یا مخلوط در نظر بگیرید. در این ماده، سطح مقطع ملکولی کل^۳ برهم کنش

$$\sigma = \sum_{i} n_i \sigma_i \tag{$$$$$$$$$$$$$$$

که ni تعداد اتمها و oi سطح مقطع ملکولی برهم کنش فوتون بری ilمین عنصر در ترکیب هستند.

¹ One-Thenth Value Layer

² Photon interaction effective atomic number

³ Total molecular cross section

تعداد کل اتهها n در ملکول عبارت است از:

$$n = \sum_{i} n_{i}$$
 (۴۷-۲)
فرض کنید که سطح مقطع هر ملکول را میتوان بر حسب یک سطح مقطع موثر (متوسط) به ازای هر اتم
فرض کنید که سطح مقطع هر ملکول را میتوان بر حسب یک سطح مقطع موثر (متوسط) به ازای هر اتر
یا سطح مقطع اتمی کل['] $_{a}$ σ و یک سطح مقطع موثر (متوسط) برای هر الکترون یا سطح مقطع الکترونی
 $\sigma = n\sigma_{a} = nZ_{eff}\sigma_{e} = (\underline{\mu}/\rho)A$ (۴۸-۳)
 $\sigma = n\sigma_{a} = nZ_{eff}\sigma_{e} = (\underline{\mu}/\rho)A^{-1/2} rm 1-1/2$ است [۲۱، ۴۱۲]. با
 $\sigma = n\sigma_{a} = nZ_{eff}\sigma_{e} = (\underline{n}/r) \sum_{i} n_{i} n_{i} - (n_{i} - 1/2) \sum_{i} (n_{i} - 1/2) \sum_{i} n_{i} - (n_{i} - 1/2) \sum_{i} (n_{i}$

.[١١٣]

¹ Total atomic cross section ² Total electronic cross section

۲-۵-۵ چگالی الکترونی موثر

عدد اتمی موثر Zeff ارتباط نزدیک با چگالی الکترون موثر ^۱ Nel دارد که تعداد الکترون در واحد جرم را بیان می کند. از آنجا که برای یک عنصر شیمیایی Nel=NAZ/A برقرار است، از Zeff چگالی الکترون موثر Nel به دست می آید که قادر به توضیح تعداد الکترون برهم کنش کننده با فوتون در واحد جرم ماده (بر حسب electron/g) است و عبارت است از:

$$N_{el} = \frac{N_A}{A} Z_{eff} \sum n_i = \frac{\mu_{\rho}}{\sigma_e} = \frac{N_A}{\sum_i n_i A_i} Z_{eff} \sum_i n_i \quad \frac{\text{electron}}{g}$$
 (۵۳-۲)
که Ai عدد آووگادرو، $(\mu/\rho)_c$ ضریب تضعیف جرمی ترکیب، n_i تعداد اتمها $(\mu/\rho)_i$ ضریب تضعیف خطی، Ai وزن اتمی، و fi کسر مولی نامین عنصر در ترکیب است [۱۱۱].

۲-۵-۲ ضریب انباشت

در آشکارسازی پرتوها، هندسهی طراحی شده تاثیر بسزایی دارد. اگر فرض شود که تمام فوتونهایی که برهم کنش می کنند جذب ماده می شوند و از پراکندگی کامپتون و فوتونهای ثانویهی فرایند تولید زوج صرفنظر شود، هندسه خوب^۲ حاصل می شود. در این هندسه، چشمه و آشکارساز موازی در نظر گرفته شده و فواصل آنها بسیار کم در نظر گرفته می شود. تضعیف فوتون در این هندسه به کمک قانون بیر – لامبرت که در رابطهی (۲–۴۰) آمده است انجام می گیرد [۸].

همانطور که پیش از این اشاره شد، ضریب جذب انرژی را میتوان مقدار انرژی بجامانده از فوتونها در هر سانتیمتر از مادهی حفاظ تعریف کرد. این ضریب پراکندگی کامپتون و فوتون ثانویهی تولید زوج را در نظر میگیرد اما فرض میشود که تمام فوتونهای پراکنده به آشکارساز رسیدهاند. جذب انرژی در این حالت با رابطهی بیر- لامبرت و با جانشینی ضریب جذب انرژی^۳ (μρen) به جای ضریب تضعیف صورت میگیرد. به

¹ Effective electron density

² Narrow beam geometry

³ Energy absorption attenuation coefficient

این شرایط، هندسهی بد ^۱ می گویند زیرا چشمه و آشکارساز غیرموازی تعریف شدهاند [۳۸]. همانطور که در بخش قبل دیدیم، در هندسهی خوب تابش پراکنده به آشکارساز نمی رسد یا مقدار آن ناچیز است اما در هندسهی بد به دلیل پراکندگی برخی از پرتوها که در زوایای بزرگتر از دهانهی آشکارساز گسیل شدهاند نیز وارد آشکارساز شده و شمارش می شوند. در حقیقت، استفاده از تقریب هندسهی خوب با حذف تابش های پراکنده، نرخ تابش در آنسوی حفاظ را بدون تابش های پراکنده در نظر می گیرد و تقریب هندسهی بد با شمارش تمام تابش های پراکنده در آشکارساز نرخ تابش را فراتر از آنچه هست محاسبه می کند. این امر شمارش تمام تابش های پراکنده در آشکارساز نرخ تابش را فراتر از آنچه هست محاسبه می کند. این امر باعث می شود که قانون بیر – لامبرت دیگر صادق نباشد. در حقیقت، این قانون مادامی معتبر است که سه شرط برآورده شوند: (i) پرتوهای گامای تک انرژی؛ (ii) ماده ی جاذب باریک؛ (iii) هندسه ی پرتو باریک (in) ایم می بر این که یکی از شروط بالا برآورده نشود، این قانون نامعتبر می شود. یک ضریب تصحیح، به نام «ضریب انباشت» برای اصلاح قانون وارد می شود.

¹ Broad beam geometry

(۲-۵۶)
$$I \leq \frac{I_t}{I_u} = 1 + \frac{I_s}{I_u} > 1$$
 خریب انباشت (B) تاثیر هر پرتوی گامای ثانویه و پراکنده را نشان میدهد و به عنوان نسبت فوتونهای کل عبوری رسیده به ناحیهی آشکارسازی (It) به آنها که از نمونه عبور میکنند و بدون برهمکنش به ناحیهی آشکارسازی میرسند (Iu) تعریف میشود [۱۰].

در حقیقت، پراکندگیهای چندگانه اعلت اصلی ایجاد ضریب انباشت هستند. پراکندگی چندگانه فرایندی است که در آن فوتونهای فرودی با پراکندگیهای متوالی انرژی از دست میدهند و محاسبهی سطح مقطع دیفرانسیلی کامیتون را مختل می کند. هنگامی که باریکهای از پرتوهای گاما بر ضخامتی از ماده فرود می آیند چندین اندرکنش رخ میدهد که در انرژیهای میانی پدیده کامپتون از همه محتمل تر است. این پراکندگی ممکن است یگانه یا چندگانه باشد. در پراکندگی یگانه، پرتوی گاما پس از یک پراکندگی کامپتون از ماده خارج شده یا با فوتوالکتریک جذب ماده می شود اما در حالت چندگانه ممکن است تا زمان جذب یا فرار از ماده چندین برهم کنش کامپتون را تجربه کند [۱۱، ۱۱۵]. ضریب انباشت همواره بزرگتر از یک است و آن را می توان برای متغیرهای بسیاری از جمله شار، انرژی، و دز تعریف کرد [۱۰]. ضریب انباشت، B (1≤B)، سهم پرتوهای پراکنده را در نظر می گیرد و عبارت است از نسبت کل پرتوهای رسیده به آشکارساز به یر توهایی که بدون پراکندگی به آشکارساز رسیدهاند. بنابراین، در حالت ایدهآل ضریب انباشت دارای کمترین مقدار و برابر با ۱ است و هر عاملی که بتواند اثر پراکندگیها در هندسه را کاهش دهد سبب میشود ضریب انباشت به سمت ۱ میل کند. هر چه مقدار ضریب انباشت به یک نزدیکتر باشد، هندسه بهتر بوده و تابش های ناخواسته کمتر است [۱۱۰، ۱۱۹]. مفهوم ضریب انباشت برای نخستین بار توسط وایت ۲ در ۱۹۵۰ معرفی شد و درستی آن در مطالعات تضعیف پرتوهای گاما که توسط فانو^۳ در ۱۹۵۳ انجام شد مورد تائید

¹ Multiple scattering

² White

³ Fano

قرار گرفت [۱۱۷]. در ۱۹۵۴، اولین مجموعه از ضرایب انباشت توسط گلداشتاین و ویلکینز^۱ برای چشمههای نقطهای، همسانگرد، و تک انرژی گاما در عبور از یک محیط همگن ارائه شد [۱۱۸]. در چهار دههی گذشته، مطالعات گستردهای چه از طریق روشهای تئوری [۱۲۰–۱۱۹] و چه به صورت تجربی [۱۲۱] به محاسبه و بررسی ضرایب انباشت در راستای حفاظ گذاری فوتونها پرداختهاند. به منظور محاسبه ضریب انباشت روابط و جداول متنوعی وجود دارد، که در ادامه به چند مورد اشاره شده است:

- فرمول خطی^۲
- $B(x) = 1 + \alpha(E, Z)x \qquad (\Delta V Y)$
 - فرمول بر گر ^۳
- B(E, μ r) = 1 + a(E) μ re^{-b(E) μ r</sub> (۵۸-۲) فرمول تیلور[†]}
- $B(E, \mu r) = A(E)e^{-a_1(E)\mu r} + (1 A(E))e^{-a_2(E)\mu r}$ (\$\Delta 9-7\$)
 - فرم چندجملهای^۵

$$B(E, \mu r) = 1 + \alpha \mu r + \beta (\mu r)^2 + \gamma (\mu r)^3$$
($\mathcal{F} \cdot -\mathcal{T}$)

همچنین، روش «پیشرفت هندسی^۶ یا GP» یکی از متداول ترین ابزارهای محاسبه ی ضریب انباشت است [۱۰]. در این روش، ابتدا ضریب تضعیف جرمی در بازه ی انرژی مشخصی از فوتون فرودی برآورد می گردد. سپس، با استفاده از جداول مرجع [۱۲۲] تعیین می شود که مقدار ضریب تضعیف جرمی در هر انرژی بین کدام دو عنصر قرار دارد. عدد اتمی این دو عنصر به عنوان Z_1 و Z_2 و نسبت استفاده از رابطهی (μ/ρ) که آن را با R نشان می دهیم برای آن ها با R_1 و R_2 نشان داده می شوند. حال، با استفاده از رابطهی (1–6)، عدد

¹ Goldestein & Wilkins

² Linear formula

³ Berger formula

⁴ Taylor formula

⁵ Polynomial formula

⁶ Geometry Progress method

اتمی معادل (
$$Z_{eq}$$
) برای مادهی موردنظر تعیین میشود که رفتار نمونه در یک بازهی انرژی مشخص را
نشان میدهد.
در دی $Z_1(\log R_2 - \log R) + Z_2(\log R - \log R_1)$

$$B(E, x) = \begin{cases} 1 + \frac{(b-1)(K^{x}-1)}{(K-1)} & K \neq 1\\ 1 + (b-1)x & K = 1 \end{cases}$$

$$K(x) = ca^{x} + d \frac{tanh[(\frac{x}{X_{k}})^{-2}] - tanh(-2)}{1 - tanh(-2)} \qquad (\%7-7)$$

که در آن K ضریب تکثیر در مسافت آزاد میانگین و k، k، k، k، k و k پارامترهای فیت وابسته به انرژی هستند. برای تکمیل محاسبات، به این پارامترهای فیت نیاز داریم. این مقادیر برای ۲۸ عنصر و ۳ ترکیب در مرجع [۱۲۲] موجود هستند و برای سایر ترکیبات و عناصر باید از فیت مقادیر موجود استفاده کرد که با کمک رابطه زیر صورت می گیرد و در آن P معادل پارامترهای فیت k، k، k، k، k، k و K و اعو 2 مقادیر معادل برای Z_2 و Z_1 هستند [۱۲۲].

$$P = \frac{P_1(\log Z_2 - \log Z_1) + P_2(\log Z - \log Z_1)}{\log Z_2 - \log Z_1}$$
 (۶۳-۲)
ضریب انباشت به عوامل متعددی از جمله نوع و ضخامت ماده، انرژی فوتون، هندسه ی چشمه، فاصله چشمه
تا آشکارساز، و زاویه ی آشکارساز نسبت به نمونه وابسته است [۱۰]. همانطور که پیش از این بیان شد،
برهم کنش های فوتون با ماده به عدد اتمی ماده وابسته است. از این رو، میتوان استدلالل کرد که ضریب
انباشت نیز به عدد اتمی ماده بستگی دارد. به این ترتیب که فوتوالکتریک، در انرژی های کم احتمال بیشتری
دارد که موجب کاهش B میشود زیرا نسبت پرتوهای کل رسیده به آشکارساز نسبت به پرتوهای پراکنده

¹ Equivalent Atomic Number

² Exposure Buildup Factor

³ Energy Absorption Buildup Factor

نشده بسیار کاهش مییابد. در انرژیهای میانی، پدیده یکامپتون غالب است اما با تغییر عدد اتمی ماده چندان تغییری نمی کند. با افزایش بیشتر انرژی، افزایش عدد اتمی با توان ۲ احتمال رخداد تولید زوج را افزایش می دهد و موجب کاهش B در این ناحیه می شود اما با نابودی پوزیترون دو گاما با انرژی MeV افزایش می دهد و موجب کاهش B در این ناحیه می شود اما با نابودی پوزیترون دو گاما با انرژی NeV در ۱۵/۰ گسیل می شوند که در محدوده یی انرژی های میانی قرار دارند و شمار فوتون های ثانویه در این بازه را افزایش می دهند. از طرفی، افزایش ضخامت ماده بر حسب مسافت آزاد میانگین مقدار B زیاد می شود اما در محدوده کامپتون و تولید زوج این افزایش قابل توجه است زیرا احتمال فرار پرتو کمتر شده و بیشتر برهم کنش می کند. نمودار شکل (۲–۱۰) تغییرات ضریب انباشت را در انرژی های مختلف برای ماده یا ب ضخامت از ماش می کند. نمودار شکل (۲–۱۰) تغییرات ضریب انباشت را در انرژی های مختلف برای ماده یا ب مندامت از ماش می ده تا مقدار ممکن؛ استفاده از موازی ساز برای چشمه و آشکارساز؛ استفاده از پرتوهای موازی؛ برابر کردن هدف تا مقدار ممکن؛ استفاده از موازی ساز برای چشمه و آشکارساز؛ استفاده از پرتوهای موازی؛ مقدار ممکن رساند [۱۰، ۱۲۴–۱۲۵].



شکل ۲-۱۰ تغییرات ضریب انباشت بر حسب انرژی و ضخامت ماده [۱۲۳]

۲-۶ خطای محاسبات

از رابطهی انتشار خطا برای ارزیابی خطای پارامترهای محاسبه شده استفاده می شود. برای کمیت f، خطای نسبی به صورت رابطهی (۲-۶۴) است.

$$\frac{\sigma_{f}}{f} = \frac{1}{f} \sqrt{\sum_{i=1}^{n} \left(\frac{\partial f}{\partial x_{i}} \sigma_{x_{i}}\right)^{2}}$$

$$\sum_{i=1}^{n} \sum_{j=1}^{n} \left(\frac{\partial f}{\partial x_{i}} \sigma_{x_{i}}\right)^{2}$$

$$\sum_{i=1}^{n} \sum_{j=1}^{n} \sum_{j=1}^{n} \sum_{i=1}^{n} \sum_{j=1}^{n} \sum_{$$

۲-۷ حفاظت در برابر پر توگیری خارجی

پرتوگیری خارجی عبارت است از پرتوگیری سلولها و بافتها از چشمههای پرتوزا که در خارج از بدن قرار دارند. برای حفاظت از افراد در برابر پرتوگیری خارجی، سه مسالهی اصلی باید در نظر گرفته شود که عبارت هستند از:

عامل زمان: دز دریافتی ناشی از پرتوگیری خارجی متناسب با زمان حضور در میدان پرتو میباشد. جهت محاسبهی دز کل دریافتی میتوان از رابطه زیر استفاده نمود:

آهنگ دز × زمان پرتوگيري = دز کل

عامل فاصله: پرتوهایی که از یک چشمهی پرتوزای نقطهای انتشار مییابند همراه با افزایش فاصله از چشمه واگرا میشوند که این واگرایی باعث کاهش موثر آهنگ دز چشمه در فواصل دور میشود، به طوری که با افزایش فاصله از چشمه، آهنگ دز متناسب با عکس مجذور فاصله کاهش مییابد.

عامل حفاظ: پرتوهای X و گاما دارای قدرت نفوذ زیادی در ماده میباشند. این پرتوها هنگام عبور از ماده یونسازی نموده و نهایتا یا جذب ماده میشوند و یا انرژی آنها کاهش مییابد. یکی از روشهای توصیف قدرت نفوذ این پرتوها تخمین ضخامت و نوع حفاظ در برابر آنها میباشد [۱۲۶].

۸–۲ استفاده از نانوکامپوزیتها در حفاظ گذاری

اثربخشی یک مادهی معین در تضعیف تابش گاما و پرتوی X بستگی شدید به نوع تابش و بازهی انرژیهای آن دارد [۱۰]. به دلیل وابستگی سطح مقطع اندر کنشهای فوتون به عدد اتمی ماده، غالبا استفاده از موادی با Z بالا توصیه و استفاده شده است. با این وجود، استفاده از مادهی Z بالا برای پرتوهای X و گاما منجر به گسیل تابش ترمزی میشود که نیازمند حفاظ گذاری بیشتر است. تولید تابش ترمزی درون مادهی هدف به دلیل این که انرژی خود را بر جای می گذارد ممکن است بر خطرات آن بیافزاید [۱۲]. از این رو، استفاده از مادهای که همزمان تضعیف پرتوهای X و گاما و کاهش تولید تابش ترمزی را داشته باشد در اولویت است

کامپوزیتهای دسته مواد جدیدی هستند که این امکان را فراهم میکنند. مطالعات متعددی نشان دادهاند که کامپوزیتها قدرت مکانیکی افزوده و پایداری گرمایی بالاتری در مقایسه با پلیمر بدون پرکننده نشان میدهند [۸۸] افزایش در خواص ماده به خواص مادهی پرکننده، یکنواختی توزیع پرکننده در شبکهی پلیمر، و نوع اندرکنش بین پرکننده و ماده، و اندازهی پرکننده نسبت داده میشود [۸۹]. مادهی کامپوزیت را میتوان مادهای تعریف کرد که در آن دو یا چند ماده که از نظر ساختاری کاملا مجزا هستند با هم ترکیب میشوند تا خواص ساختاری یا کاربردی ارائه دهند که در هیچ یک از مولفهها به طور مجزا وجود ندارد [۵۳]. در بسیاری از موارد، یک مولفهی قوی و خشک به شکل کشیده در داخل یک مولفهی نرمتر که شبکه را تشکیل میدهد قرار می گیرد. بر اساس ساختار شبکه، میتوان کامپوزیتها را در سه دستهی اصلی قرار

- کامپوزیتهای شبکه فلزی^۱ (MMCs): دارای شبکهی فلزی پر شده با ذرات سرامیکی یا فلزی هستند.

¹ Metal matrix composites

- کامپوزیتهای شبکه سرامیکی^۱ (CMCs): دارای شبکهی سرامیک پر شده با ذرات سرامیکی هستند.
- **کامپوزیت های شبکه پلیمری (PMCs):** دارای شبکه ای از پلیمرهای گرماسخت یا گرمانرم پر شده با ذراتی از مواد متنوع مانند کربن، ترکیبات فلزی، و شیشه هستند.

از نظر هندسه و ساختار مادهی پرکننده نیز میتوان کامپوزیتها را در چهار بخش پر شده با ذرات، فیبرهای بلند و کوتاه، و ورقهها دستهبندی کرد [۱۲۷]. پلیمرها هم دارای مزایا (قیمت کم، چگالی پایین، و سادگی فرایند تولید) و هم معایب (خواص مکانیکی ضعیف) در مقایسه با سایر انواع مواد مانند فلزات و سرامیکها هستند. یک روش برای حذف یا بهبود این معایب تولید مواد کامپوزیت بر پایهی پلیمر با استفاده از ذرات پرکننده است. این مواد مستقل از نوع پلیمر (ترموپلاستیک^۲ یا ترموست^۳) در مقایسه با سایر انواع کامپوزیت (فلز شبکه، سرامیک شبکه، یا کربن شبکه) سادهتر تولید میشوند که دلیل آن دماهای نسبتا کم موردنیاز برای فراوری پلیمرها است. دمای فرایند نرمال برای پلیمرهای گرماسخت مانند رزینهای اپوکسی از دمای اتاق تا ۲[°] ۲۰۰۰، و برای پلیمرهای گرمانرم مانند پلیاترسولفات[†] (PES) دماها از حدود ۲[°] ۲۰۰۰ تا ۲[°] ۲۰۰۰

کامپوزیتهای شبکه پلیمر پر شده با ذرات ترکیبات فلزی را کامپوزیت فلز- پلیمر (MPCs) مینامند. این مواد در بسیاری از شاخههای مهندسی از اهمیت خاص برخوردار هستند. همان طور که اشاره شد، مواد فلزی خواص و مشخصههای مفیدی دارند که برای بسیاری از کاربردها ضروری است که رسانایی الکتریکی بالا، پارامغناطیس، هدایت حرارتی بالا و خواص مکانیکی خوب از جمله مهمترین آنها است. گرایش به کامپوزیتهای فلز-پلیمر از این حقیقت نشات می گیرد که خواص الکتریکی و مغناطیسی چنین موادی به

¹ Ceramic matrix composites

² Thermoplastic

³ Thermoset

⁴ Poly ether sulphate

فلزات نزدیک تر است؛ همچنین بهبود در خواص گرمایی آنها و اثر تقویت مکانیکی نسبت به پلیمرهای خالص را هم می توان در این مواد مشاهده کرد [۸۹-۸۷]. با توجه به مبانی مطرح شده و پیشینه مطالعاتی موجود، روشن است که نانوساختارهای فلز – پلیمر می توانند گزینه یمناسب و اثربخشی در جهت استفاده در حفاظ گذاری پر توهای X و تابش گاما باشند. از جمله مهمترین دلایل این امر می توان به موارد زیر اشاره کرد:

- این مواد دارای ذراتی با ابعاد کوچکتر هستند [۲۱]،
- امکان ساخت ساختارهایی با چگالی الکترونی بیشتر در این بعد وجود دارد [۴۲، ۶۲، ۱۲۹]،
 - امکان ساخت آنها در قالبهای سخت و نرم و ساختارهای متنوع وجود دارد [۱۹]،
- نانوساختارهای فلزی بسیار متنوع بوده و با هزینهی بسیار مناسبی تولید میشوند [۲۱، ۵۱]، و
- ویژگیهای فیزیکی و شیمیایی آنها از قبیل استحکام و مقاومت گرمایی بهبود یافته است [۳۱،
 ۸۸].

تولید نانوساختاری متنوع فلزی در داخل کشور بسیار زیاد بوده و مطالعات گستردهای بر روی ویژگیهای ساختاری آنها انجام شده و در حال انجام است.

۲-۹ کامپوزیتهای طراحی شده در مطالعهی حاضر

در پژوهش حاضر، از ماکروساختار و کامپوزیتهای تقویت شده با میکروذرات و نانوذرات فلزات تیتانیم (Ti)، روی (Zn)، تنگستن (W)، و سرب (Pb)، و اکسیدهای متداول آنها در تقویت ساختارهای پلیمر شامل PbO، WO₃، PbO، و ZnO، و 20 به منظور طراحی حفاظ مناسب برای تابش گاما و پرتوی X در انرژیهای متفاوت استفاده می شود. مشخصات این عناصر شامل عدد اتمی، جرم اتمی، نقطهی ذوب، و چگالی جرمی در جدول ۲–۱ ارائه شده است. همچنین، مشخصات فیزیکی و شیمیایی و اکسیدهای فلزات شامل چگالی جرمی، و نقطهی ذوب در جدول ۲–۲ آورده شده است.

چگالی (g/cm ³)	نقطه ذوب (C°)	جرم اتمی (g/mol)	عدد اتمی	نماد	فلز
۴/۵۱	1880	۴V/۸۸	22	Ti	تيتانيم
۷/۱۳	۴۱۹/۷۳	۶۵/۴۰۹	٣٠	Zn	روى
۱٩/٢۵	741.	۱۸۳/۸۴	۷۴	W	تنگستن
11/84	۳۲۸	T • V/T	٨٢	Pb	سرب

جدول ۲-۱ ویژگیهای عمومی فلزات منتخب [۱۵، ۱۳۰-۱۳۲]

چگالی (g/cm ³)	نقطه ذوب (C°)	نماد	اكسيد فلزات
۴/۲۳	۱۸۵۵	TiO ₂	دىاكسيد تيتانيم
۵/۶۱	۱۹۷۵	ZnO	مونوکسید روی
۲/۱۶	141.	WO ₃	ترىاكسيد تنگستن
٩/۵٣	٨٨۶	PbO	مونوکسید سرب

جدول ۲-۲ ویژگیهای عمومی اکسیدهای فلزی منتخب [۹۲-۹۱، ۹۶-۹۵]

به منظور درک بهتر رفتار این مواد در تضعیف تابش گاما و پرتوی X، ضرایب تضعیف جرمی آنها با تکیه بر دادههای NIST XCOM [۱۳۳] مورد بررسی و مقایسه قرار گرفته است. زمانی که یک فوتون وارد محیط میشود، اندرکنشهای اصلی فوتون – ماده شامل پراکندگی همدوس (رایلی) و غیر همدوس (کامپتون)، جذب فوتوالکتریک، و اثر تولید زوج است که منجر به جذب کسری از انرژی فوتونهای فرودی میشود [۸]. در نظر گرفتن رفتار ضرایب تضعیف جرمی در کل بازهی انرژی، میتواند به ما نگاه عمیقتری از احتمال اندرکنشها برای هر ماده را به طور جداگانه ارائه دهد. از آنجا که انرژی فوتون در پژوهش حاضر تا MeV ۱۵ مورد نظر ما است، ضریب تضعیف جرمی کل به همراه ضرایب تضعیف جرمی پراکندگی کامپتون برای هر چهار عنصر AP، W، Dت و Tr

از مقایسهی ضرایب تضعف جرمی برای پراکندگی روشن است که احتمال برهم کنش برای تنگستن و سرب تقریبا مشابه است، به همین دلیل تنگستن جایگزین خوبی برای سرب به حساب میآید. روی و تیتانیم دارای ضرایب تضعیف جرمی کوچک تر بویژه در بازهی انرژیهای میانی هستند. با این وجود، ضرایب تضعیف در انرژیهای کوچک (کمتر از MeV) برای عناصر Ti و Zn با عدد اتمی بزرگ است که احتمال بیشتر برای جذب فوتوالکتریک توسط این مواد را نشان میدهد.



همچنین، شکل ۳–۱۲ مقادیر مشابه برای اکسیدهای فلزات WO₃، PbO، WO₃ و TiO₂ و TiO₂ را ارائه میدهد. در بازهی انرژیهای کم، جذب فوتوالکتریک فرایند غالب و سطح مقطع آن متناسب با انرژی فوتون فرودی و عدد اتمی محیط به صورت ^mC^m است (که n و m به ترتیب در بازهی ۳/۵–7/۶ و ۲/۵–۲/۵ است که برای عدد اتمی محیط به صورت ^mCⁿ است (که n و m به ترتیب در بازهی ۳/۵–7/۶ و ۲/۵–۲/۵ است که برای عدد اتمی محیط به صورت ^mCⁿ است (که n و m به ترتیب در بازهی ۳/۵–7/۶ و ۲/۵–۲/۵ است که برای معدد اتمی محیط به صورت ^mCⁿ است (که n و m به ترتیب در بازهی ۳/۵–7/۶ و ۲/۵–۲/۵ است که برای معدد اتمی کمتر بزرگتر است) [۲۰۶]. در اثر فوتوالکتریک، فوتون با انتقال کل انرژی خود به یک الکترون مقید بر انرژی پیوند آن غلبه کرده و آن را از اتم پراکنده میکند [۸]. مطابق با شکل ۳–۱۲ (الف–د)، بازهی انرژیهای پایین برای OdG، WO3، OdG، و TiO به ترتیب شامل انرژی های کمتر از VM۵ (۱۰/۰، ۲/۰، ۲/۰، ۲/۰) انرژیهای پایین برای OdG، WO3، OdG، و TiO به ترتیب شامل انرژی چند Va تر از VM۵ (۱۰/۰، ۲/۰، ۲/۰) انرژی های پایین برای OdG، WO3، OdG، VD3، و TiO به ترتیب شامل انرژی چند Va تا چند صد VA توسط انرژی های پایین برای OdG، WO3، VD3، ۲/۰، ۲/۰، ۲/۰، ایک ایکترون اوربیتالی دستخوش انحراف در زاویهای کوچک میگردد بدون این که انرژی از دست بدهد [۸]. پراکندگی همدوس در انرژیهای کمتر از VMe۷ (VO3، VD4، ۲/۰، ۲/۰، ۲/۰) ایک (Vo 7) است. پراکندگی همدوس در انرژیهای کمتر از VM0 (VO4، VD4، VD5) (VO4، VD4) (VO4، VD5) (VO4، VD5) (VO5، VD5) (VO5، VD5) (VO5، VD5) (VO5، VD5) (VO5، VD5) (VO5، VD5) (V05، VD5) (V05، VD5) (V05) (V05)

یک الکترون اتمی آزاد در نزدیکی خود با انرژی کاهش یافته پراکنده شده و الکترون با بقیهی انرژی پس زده میشود [۸۰،۸]. با در نظر گرفتن محل تقاطع تغییرات جدب فوتوالکتریک، پراکندگی کامپتون، و تولید زوج، بازهی انرژیهای میانی برای PbO از PbO ۵–۵/۰، برای WO3 ز MeV ۶–۴/۰، برای ZnO از MeV زوج، بازه و برای TiO2 از TiO2 از PbO ۵–۵/۰ است. در بازه انرژیهای بالا، فرایند غالب اثر تولید زوج است که در آن فوتون ناپدید شده و زوج الکترون- پوزیترون خلق میشوند. سطح مقطع تولید زوج شدیدا به عدد Iroی و انرژی فوتون فرودی به صورت (ZnC) ایت است. در بازه میشوند. سطح مقطع تولید زوج شدیدا به عدد اتمی و انرژی فوتون فرودی به صورت (ZnC) وابسته است [۱۰]. در نتیجه، بازهی انرژی بالا برای PbO



از انرژی برای (الف) PbO، (ب) WO₃، (ج) ZnO، و (د) ITO2 و (د)
هل ۳: مدل سازی ومحاسبات مونت کارلو

۳-۱ مقدمه

شبیهسازی روشی مناسب برای کمینه کردن خطا در اندازه گیریهای تجربی، از طریق ارائهی یک سامانهی بهینه برای انجام آزمایش است. مطالعهی حاضر به دنبال بررسی توانمندی کامپوزیتها با ساختار پیچیده در تضعیف تابش گاما و پرتوی X است. از آنجا که محاسبات تحلیلی معمولا برای زمانی که هندسه و ساختار ماده بسیار ساده است مورد استفاده قرار می گیرد، مطالعهی ساختار پیچیدهی کامپوزیتها نایزمند ماده بسیار ساده است مورد استفاده قرار می گیرد، مطالعهی ساختار پیچیدهی کامپوزیتها با ساختار پیچیده ماده بسیار ساده است مورد استفاده قرار می گیرد، مطالعهی ساختار پیچیدهی کامپوزیتها نیازمند شبیه سازی کامپیوتری است. مورد استفاده قرار می گیرد، مطالعه می ساختار پیچیده کامپوزیتها نیازمند شبیه سازی کامپیوتری است. شبیه سازی مونت کارلو روشی تئوری است که با در نظر گرفتن ترابرد تک تک فرات، رفتار متوسط آنها در عبور از ماده را مطالعه می کند [۵]. این روش مانند یک آزمایشگاه مجازی عمل می کند و میتوان در آن کل رویدادها و احتمالات برای تابشهای مختلف را در نظر گرفتن. به عبارت بهتر، مزیت شبیه سازی مونت کارلو نسبت به روشهای محاسباتی تحلیلی توانایی آن در لحاظ کردن بهتر، مزیت شبیه سازی مونت کارلو نوش های محاسباتی تعلیلی تواند یک آزمایشگاه مجازی بهتر، میتار میتوان در آن کل رویدادها و احتمالات برای تابشهای مختلف را در نظر گرفت. به عبارت بهتر، مزیت شبیه سازی مونت کارلو نسبت به روشهای محاسباتی تعلیلی توانایی آن در لحاظ کردن پیچیدگیهای هندسی، و جزئیات چشمه و آشکارساز مورد استفاده است.

به طور خلاصه، روش مونت کارلو مستقیما گذار ذرات را شبیه سازی کرده و از طریق توابع احتمال، زمان و مکان وقوع برخورد ذره با ماده و نتیجه ی این برخورد را تعیین می کند. فیزیک برخورد، گذار انرژی، تولید ذرات ثانویه، و در نهایت جذب ذره را «تاریخچه ی ذره^۱» می نامند. با در نظر گرفتن تعداد زیاد تاریخچه که از یک چشمه ی پر توزا نمونه گیری می شود، بر آورد آماری دقیقی از شار تابش را می توان به دست آورد. کد مونت کارلو N ذره ای^۲ MCNP یک کد عملی و به شدت انعطاف پذیر در محاسبات ترابرد و اندر کنش های نوترون، فوتون، و الکترون به حساب می آید [۱۳۴]. این کد سه بعدی تقریبا برای هر هندسه ای قابل تعریف است و از کتابخانه های توسعه داده شده برای سطح مقطعهای هسته ای به منظور مدل سازی اندر کنش های تابش با مواد استفاده می کند [۱۳۵]. در این کد محاسباتی، مدهای مختلف ترابرد شامل نوترون، فوتون،

¹ Particle history

² N-particles monte carlo code

الکترون، ترکیبی از نوترون- فوتون (که در آن فوتونها از برهم کنش نوترونها با مادهی مسیر تولید میشوند)، نوترون- فوتون- الکترون، و الکترون- فوتون قابل محاسبه هستند. در این کد، محدودهی انرژی قابل تعریف برای نوترونها از MeV ^{۱۱-۱۱} تا MeV ۲۰ (برای برخی عناصر تا MeV) و برای فوتونها و الکترونها از keV تا KeV است. برای استفاده از کد MCNP باید یک فایل ورودی تولید شود که شامل اطلاعاتی در مورد هندسه و ترکیبات مساله از قبیل هندسهی مساله شامل سطوح و سلولها، معرفی مواد و سطح مقطعهای مورد نیاز، چشمه، پارامترها و انرژی آن، پاسخ یا تالی موردنظر، و تعداد ذراتی که بررسی تاریخچهی آنها مد نظر است، میباشد [۱۳۴]. در این پژوهش از MCNPX نسخهی 2.6 [۱۳۶] برای بررسی مسالهی تضعیف پرتوها استفاده شده است.

۲-۳ شبیهسازی مونت کارلو

به منظور بررسی اثربخشی مواد حفاظ معرفی شده در پژوهش حاضر، هندسهای ساده برای شبیهسازی در نظر گرفته شد. در این هندسه، ورقهی مادهی حفاظ در مرکز مختصات و عمود بر راستای فاصلهی میان چشمه و آشکارساز تعریف شد به طوری که فاصلهی ورقهی حفاظ از هر کدام از بخشهای چشمه و آشکارساز Model باشد.



همچنین، ضخامت نمونه در شبیهسازی به قدر کافی زیاد انتخاب شد تا امکان پراکندگی ذره را فراهم کند و در عین حال حداقل تولید تابشهای غیرضروری را سبب شود [۱۳۶]. آنچه باید در نظر داشت، بهینهسازی هندسهی شبیهسازی جهت دستیابی به نزدیکترین نتایج به شرایط واقعی است. چند عامل مهم در این شرایط نقش مهمی ایفا میکنند. مهمترین عواملی که در دقت اندازه گیری نقش دارد شکل و انرژی چشمه، و نوع آشکارساز است.

۳-۲-۱ چشمهی پرتوزای فوتون

از چشمهی تک انرژی نقطهای همسانگرد با انرژی فوتون ۱/۲۵۳ MeV (انرژی متوسط چشمهی ⁶⁰Co) برای راستیآزمایی محاسبات در مقایسه با کارهای تجربی پیشین استفاده شد. با این وجود، از آنجا که این پژوهش با تکیه بر اندرکنشهای فوتون با ماده انجام میشود، انتخاب بازهی وسیعی از انرژی برای فوتونها از اهمیت برخوردار است. بنابراین، باریکهی تک انرژی موازی از پرتوهای گاما با انرژی در بازهی گستردهی موا میت از اهمیت برخوردار است. بنابراین، باریکهی تک انرژی موازی از پرتوهای گاما با انرژی در بازهی گستردهی که به طور متداول در محاسبات فوتون به کار گرفته میشود و توسط موسسهی ملی استانداردهای امریکا^۱ تحت عنوان استاندارد (ANS) ANSI/American National Standard (ANS) ارائه شده است. در حقیقت، یک چشمهی پرتوزای گاما با انرژی E (که E مقادیر ۵۰ ۱۰ ۱۰ ۱۰ ۱۰ ۱۰ ۱۰ ۱۰ ۱۰ ۱۰ ۲۰ ۵۰ ۱۰ ۱۰ و ۱۰ را در بر میگیرد) در فاصلهی ۲۰ در سمت چپ نمونه در نظر گرفته شد.

۲-۲-۳ تالیها

پرسش اصلی که در مبحث حفاظ گذاری تابش مطرح می شود این است که آیا شار تابش یوننده به اندازهی کافی تضعیف می شود تا از افراد و یا تجهیزات در مقابل تابش خارجی جلوگیری کند؟ برای پاسخ دادن به

¹ American National Standards Institute

این مساله، لازم است خاطر نشان شود که شبیه سازی مونت کارلو در برآورد شار تابش عبور کرده از یک حجم، سطح، یا از یک نقطه در فضا با انتخاب تالی مناسب بسیار دقیق عمل میکند [۱۳۵]. در شبیه سازی مونت کارلو استفاده از دو تالی آشکار ساز نقطه ای (F5) و شار حجمی (F4) به منظور برآورد شار فوتون در محل آشکار سازی متداول است [۱۳۸]. آشکار ساز نقطه ای (F5) و شار حجمی (F4) به منظور برآورد شار فوتون در امحل آشکار سازی متداول است [۱۳۸]. آشکار ساز نقطه ای (F5) و شار حجمی (F4) به منظور برآورد شار فوتون در اره کار آیک استازی متداول است [۱۳۸]. آشکار ساز نقطه ای (F5) برآورد شار ذرات در نقطه ای از فضا است [۱۳۹]، که در محاسبات حفاظ گذاری بسیار مورد استفاده قرار می گیرد. همچنین، تالی شار حجمی (F4) در سلول معین هم بدون تعریف ماده و هم با در نظر گرفتن ماده ی سلول آشکار سازی عموما در محاسبات دو نقطه ای (F4). در محاسبات مواد استان مورد استفاده می گردد. این تالی برآوردی از محامی (F4) مونت کارلو به کار می رود [۱۴۰]. در بسیاری از مطالعات مبتنی بر شبیه سازی مونت کارلو، از تالی آشکار ساز نقطه ای (F5) برای برآورد شار فوتون در مکان موردنظر استفاده می گردد. این تالی برآوردی از مجموع موا در محاسبات تصادفی و تحلیلی است که دقت آماری آن نسبت به تالی شار حجمی (F4) به عنوان برآوردی کاملا تصادفی از طول مسیر بیشتر است. همچنین، تالی F5 سریع تر از جامی (F4) به عنوان برآوردی کاملا تصادفی از طول مسیر بیشتر است. همچنین، تالی F5 سریع تر از F4 به دقت قابل قبول می رسد کاملا تصادفی از طول مسیر بیشتر است. همچنین، تالی F5 سریع تر از F4 به دقت قابل قبول می رسد (F4) به منظور برآورد شار ذرات در نقطه معینی از کاملا تصادفی از آنجا که F5 یکی از روش های کاهش واریانس به حساب می آید، در بخش بعد بیشتر به فضا استفاده شد. از آنجا که F5 یکی از روش های کاهش واریانس به حساب می آید، در بخش بعن بر به فضا است از بر خرد تسلول معینی از آن پرداخته شده است.

۳-۲-۳ روشهای کاهش واریانس

کاهش واریانس به روشهایی اطلاق میشود که به بهبود آمار در شرایط معین کمک کنند. این روشها به طور غیرآنالوگ ذرات را در روش مونت کارلو ترابرد میکنند. در پژوهش حاضر، از روش برشی^۱ (انرژی)، روش مبتنی بر کنترل جمعیت^۲ (پنجرههای وزنی^۳)، و روش قطعی^۴ (آشکارساز نقطهای) استفاده شد.

¹ Truncation method

² Population control method

³ Weight window

⁴ Partially deterministic method

۳-۲-۳-۱ برش انرژی

برش انرژی از سادهترین روشهای کاهش واریانس است. با تعریف این کارت زمانی که انرژی یک ذره به کمتر از انرژی کمینهی تعریف شده برسد ترابرد آن متوقف می گردد تا زمان اجرای برنامه را کاهش دهد [۱۳۴]. در محاسبات حاضر، حداقل انرژی ذرات ۱۸۷۷ ۱۰/۰ تعریف شد تا تاریخچهی ذرات با انرژی کمتر از این مقدار حذف شده و زمان اجرای برنامهها کوتاهتر شود.

۳-۲-۳-۲ پنجرههای وزنی

پنجرههای وزنی عموما در محاسبات مونت کارلو و به منظور کنترل وزن آماری ذرات در طول تاریخچه استفاده میشوند تا اثربخشی محاسبات را افزایش دهند [۱۴۱]. در این روش، برای هر بخش از فضای فاز یک پنجره تعریف میشود که دارای حد پایین و حد بالای مشخص برای وزن ذرات است [۱۳۶]. اگر وزن ذره بیشتر از حد بالای پنجره باشد تکثیر¹ رخ میدهد و به ذراتی با وزن قابل قبول تقسیم میشود و اگر وزن ذره کمتر از حد پایین باشد رولت روسی^۲ اتفاق میافتد و ذره یا نابود میشود یا وزن آن افزایش یافته و درون پنجره قرار میگیرد [۱۴۵، ۱۴۱]. وقتی ذره وارد پنجره با وزن بالاتر از بیشینه وزن مجاز آن ناحیه میشود دستخوش تکثیر میگردد تا جایی که وزن آن درون پنجره قرار گیرد. زمانی که یک ذره با وزن میشود دستخوش تکثیر میگردد تا جایی که وزن آن درون پنجره قرار گیرد. زمانی که یک ذره با وزن از پیش تعیین شده توسط کاربر تعیین میشود، از آن چشمپوشی میشود. این وزن از پیش قدین شده باید درون محدودهی پنجره باشد. اگر ذره از رولت روسی زنده بماند، وزن آن همان وزن زی پیش فرض در نظر باید درون محدوده پنجره باشد. اگر ذره از رولت روسی زنده بماند، وزن آن همان وزن پیش فرض در نظر بر همیت میشود [۱۳۴]. استفاده از پنجرههای وزنی محلی از روش تکثیر ذره برای نواحی معین است. این روش بر اهمیت ذره تکیه دارد و بیشینه سW و کمینه یاW وزن ذره را که از پنجره میگذرد در نظر میگیرد.

¹ Splitting

² Russian rullete

این وزنها پنجرهای با وزن مناسب را تعریف میکنند. برای ذرهای با وزن اولیهی Wini، اگر Wini خره دستخوش رولت روسی میگردد؛ اگر Wini Wini Wini باشد، تکثیر رخ میدهد تا زمانی که وزن تمام ذرات در محدودهی وزن پنجره قرار گیرند. اگر Wini Wini درون پنجره باشد ذره با همان وزن ادامه میدهد. اهمیت در هر سلول به معنای نمرهی مورد انتظار تولید شده از یک ذره با وزن واحد پس از ورود به آن سلول است [۱۴۲]. مولد پنجرههای وزنی یک برآورد نسبتا ساده از اهمیت متوسط ذرات در ناحیهی معین از فضای فاز است و حروجی آن از معکوس نمرهی متوسط تولید شده توسط ذرات فرودی به یک ناحیه به دست میآید [۱۴۲]. مولد پنجرههای وزنی یک برآورد نسبتا ساده از اهمیت متوسط ذرات در ناحیهی معین از فضای فاز است و خروجی آن از معکوس نمرهی متوسط تولید شده توسط ذرات فرودی به یک ناحیه به دست میآید [۱۳۶]. مولد پنجرههای وزنی به صورت خودکار و با کمک رابطهی (۳–۱) توزیع پنجرههای وزنی را برای سلول ها تعیین میکند.

تعداد ذرات وارد شده به سلول
$$=$$
 اهمیت وزن کل وارد شده به سلول وزن کل وارد شده به سلول

برای تعریف وزن پایین هر پنجره، یعنی LW از معکوس «اهمیت» که طبق رابطهی (۳–۱) به دست آمده است، استفاده میشود. استفاده از پنجرههای وزنی مزایای بسیاری دارد، اول این که بر اساس هندسهی سلول میتواند تعریف شود، یا به عنوان یک شبکهی مجازی در نظر گرفته شود که نیاز نیست روی سطوح سلول قرار گیرد و در واقع نباید با سطوح حقیقی همپوشانی کند؛ دوم این که توسط مولد ایجاد میشود پس مقادیر آن دقیق تر است. همچنین، از وزن مطلق ذرات استفاده میکند نه وزن نسبی و در نتیجه اندرکنش مناسب تر ذرات را سبب میشود [۱۳۴].

یکی از روشهای اعمال پنجرههای وزنی این است که چشمهی پرتوزا به صورت حقیقی نگه داشته شود، و چگالی مادهی حفاظ تا مقدار معینی پایین آورده شود تا در زمان ثابت تعدادی از ذرات ثبت شوند و سپس از وزنهای جدید برای به دست آوردن وزن ذرات در مادهای با چگالی واقعی استفاده میشود [۱۴۰]. در پژوهش حاضر، از این روش به منظور اعمال پنجرههای وزنی و بهبود زمان و نتیجهی محاسبات استفاده شده است.

۳-۲-۳ تالی شار نقطهای

از آنجا که احتمال عبور هر ذره از هر نقطهی معین در فضا در طول تاریخچهاش بسیار کم است، تعیین شار عبوری از یک نقطه از طریق برآوردهای آماری در نگاه اول به شدت ناامیدکننده به نظر می رسد. با این حال، MCNP شار عبوری از یک نقطه را از طریق روش «پیش بین رویداد بعدی^۱» انجام می دهد. آشکارساز نقطهای در واقع یک روش کاهش واریانس قطعی است زیرا امکان محاسبهی شار در یک نقطه را فراهم می کند. در طول تاریخچه هر ذره، سهم ذره در برآورد شار در ابتدا تخمین زده می شود و پس از آن هر برخورد از طریق محاسبهی احتمال رویداد پس از برخورد از آشکارساز نقطهای پراکنده می شود. برای مثال، یک فوتون به طور تصادفی وارد ماده ی حفاظ می گردد و هر برخورد به طور مناسب یک سهم وزنی به شار آشکارساز نقطهای می افزاید. بنابراین در هر برخورد یا رویدادی که از چشمه گسیل شود، یک شبه ذره در

$$\omega = \frac{\omega_0 P(\mu) e^{-\lambda}}{2\pi r^2} \tag{7-7}$$

که 000 وزن واقعی ذره در هنگام برخورد یا گسیل از چشمه، ($P(\mu)$ تابع چگالی احتمال برای پراکنده شدن ذره مستقیما به سمت آشکارساز نقطهای، و $i^r \Sigma_i X'_i$ فاصلهی بین برخورد یا رویداد چشمه با آشکارساز است. همچنین، $\lambda = \Sigma_{ti} X'_i$ مسافت آزاد میانگین در تمام نواحی بین نقطهی تولید ذره (چه از طریق برخورد چه از چشمه) و نقطهی آشکارسازی است که Σ_{ti} سطح مقطع کل ذره و i'x طول مسیر شبه ذره در ناحیهی i است چشمه) و نقطهی آشکارسازی است که Σ_{ti} سطح مقطع کل ذره و i'x طول مسیر شبه ذره در ناحیهی i است زرات باعث برآورد معنادار در تالی شار نقطهای 57 می گردد [۱۳۶]. در این پژوهش، از تالی F5 به منظور برآورد شار ذرات در نقطهای از فضا استفاده شده است.

¹ Next event predictor

۳-۲-۳ صحت و دقت نتایج شبیه سازی

نتایج مونت کارلو در حقیقت متوسط تمام تاریخچههای نمونه گرفته شده برای یک مسالهی معین را ارائه میدهند که عدم قطعیت آن به اندازهی خود تالی حائز اهمیت است. بررسی خطای محاسبه شده در مقایسه با تعداد تاریخچه به کاربر اجازه میدهد تا کمیت نتایج را بهتر بشناسد و دریابد که آیا تالی از نظر آماری قابل قبول هست یا نه. برای نمونه، اگر رفتار یک تالی قابل قبول نباشد، خطای برآورد شده فاصله اطمینان درست را برای نتایج ایجاد نمی کند و منجر به پاسخ اشتباه می شود. به منظور تعریف برخی مفاهیم، فرض کنید نتایج مونت کارلو با نمونه گیری تصادفی انجام شده و نمرهی x_i مربوط به هر گام تصادفی باشد. تابع چگالی احتمال برای انتخاب یک گام تصادفی بین x و x+dx به صورت P(x)dx بیان می شود اما ماهیت این تابع به ندرت مشخص است. در نتیجه، مقدار مورد انتظار x یعنی E(x) یا میانگین کامل عبارت است از: $E(x) = \int xP(x)dx$ $(\mathcal{T}-\mathcal{T})$ از انجا که این کمیت معمولا قابل تعیین نیست، از میانگین نمونه به صورت رابطهی (۳-۴) استفاده می شود: $\overline{\mathbf{x}} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} \mathbf{x}_i$ (4-4) $\overline{\mathrm{x}}$ که x_{i} مین تاریخچه در مقدار تالی و N تعداد تاریخچههای محاسبه شده است. بنابراین، میانیگن $\overline{\mathrm{x}}$ (تالی متوسط) مقدار متوسط نمرات xi برای تمام تاریخچه هاست. در طول افزایش تاریخچه، مقدار متوسط تالی باید به مقدار تقریبا ثابتی برسد. اگر تعداد تاریخچهها بسیار زیاد باشد x به سمت E(x) میل می کند. انحراف استاندارد S براورد شده برای جمعیت x بر اساس مقادیر x_i را میتوان از رابطهی (۳–۵) به دست آور د.

$$\bar{\mathbf{x}}^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} \mathbf{x}_i^2 \tag{9-7}$$

در نتیجه، واریانس برآورد شده برای x برابر است با،

$$S_x^2 = \frac{1}{N}S^2$$
 (۷-۳)
در خروجی MCNP باید توجه داشت که متوسط تالی در گامهای آخر یک مقدار تقریبا ثابت باشد. مقدار
بعدی، خطای نسبی R است. این مقدار خطا نسبت به تاریخچهی ذرهی اولیه نرمال شده و عبارت است از:
R = $(\lambda - \pi)$
 $\frac{S_x}{\pi} = \frac{S/\sqrt{N}}{\pi}$

کد مونت کارلو کمیت ضریب شایستگی^۱ FOM را نیز برای هر مساله محاسبه می کند تا کاربر را در تعیین رفتار آماری به عنوان تابعی از N و اثربخشی کل تالی به دلیل طبیعت آماری تالیها در MCNP راهنمایی کند. ضریب شایستگی را می توان برای سه هدف مورد استفاده قرار دارد. مهمترین کاربرد آن در ارزیابی اعتبار تالی است که اگر FOM به یک مقدار تقریبا ثابت برسد می توان گفت اعتبار تالی محاسبه شده مورد تائید است. به دلیل نوسانات آماری، این مقدار ثابت ممکن است در آغاز راه نمونه گیری حاصل نشود. اگر را همپوشانی نکنند. دومین کاربر متوجه می شود که فواصل اطمینان ممکن است مقدار مورد انتظار (x) با پارامترهای کاهش واریانس متفاوت و انتخاب مسالهای با بیشترین مقدار MCN است. سومین مورد، با پارامترهای کاهش واریانس متفاوت و انتخاب مسالهای با بیشترین مقدار MCN است. سومین مورد، می انتخاب زمان موردنیاز برای رسیدن به سطح مطلوب دقت است که با افزایش FOM به طور متناسب کاهش می یابد. می توان گفت:

$$R = 1/\sqrt{FOM \times T}$$
 (۹–۳)
در نتیجه، مقدار ضریب شایستگی عبارت است از:

¹ Figure of Merit

$$FOM = \frac{1}{R^2T}$$
 (۱۰-۳)
از آنجا که مربع خطای نسبی (R²) متناسب با معکوس تعداد تاریخچهی ذرات و زمان اجرای برنامه (T)
متناسب با تعداد تاریخچه است، اگر برنامه در زمان ثابت اجرا شود واریانس کمتر به معنای FOM بزرگتر و
اعتبار بیشتر محاسبات است. برای یک شبیهسازی قابل قبول، ضریب شایستگی FOM باید با افزایش تعداد
تاریخچهی ذرات تقریبا ثابت باقی بماند [۱۳۴]. واریانس واریانس نسبی^۲ (VOV) در حقیقت واریانس نسبی
برآورد شده برای خطای R است که به کاربر در تعیین فواصل اطمینان موثق کمک می کند. VOV بیشتر
از R به نوسانات تاریخچهی بزرگتر حساس است و مقدار برآورد شدهی آن برای میانگین تالی عبارت است

(۱۱–۳۱) که
$$S_x^4 = S^2(S_x^2)/S_x^4$$
 واریانس برآورد شده از S_x^2 است. مقدار VOV معیاری از عدم S_x² واریانس برآورد شده از S_x^2 است. مقدار VOV معیاری از عدم قطعیت آماری نسبی در برآورد R است. مونت کارلو می گوید که این مقدار باید کمتر از ۲/۱ باشد تا احتمال تشکیل فاصله اطمینان معتبر وجود داشته باشد [۹۳]. آخرین معیار در ارزیابی صحت نتایج، مقدار شیب است که در واقع معیاری از گسترش مقدار تالی در طول تاریخچه را ارائه میدهد. مقدار شیب با توجه به بزرگترین ۲۰۱ میدار تالی را دارند کمتر از ۲/۱ باشد تا احتمال است که در واقع معیاری از گسترش مقدار تالی در طول تاریخچه ای ارائه میدهد. مقدار شیب با توجه به بزرگترین ۲۰۱ مقدار تالی را دارند کمتر از ۲۰۰ باشد تالی را دارند کمتر است که در واقع معیاری از گسترش مقدار تالی در طول تاریخچه ای که بزرگترین مقدار تالی را دارند کمتر از ۲۰۰ مقدار تالی در مول تاریخچه ای که بزرگترین مقدار تالی را دارند کمتر از ۲۰۰ مقدار تالی در موان که بزرگترین مقدار تالی را دارند کمتر از ۲۰۰ مقدار تالی در موان تاریخچه می در تالی در موان تاریخچه ای که بزرگترین مقدار تالی در ارانه میدهد. مقدار تالی در ارزیابی صحت نتایج، مقدار شیب با توجه به بزرگترین ۲۰۱ مقدار تالی در موان تاریخچه در محال تاریخچه در ارائه میدهد. مقدار تالی در دارند کمتر از گردین مقدار تالی را دارند کمتر از ۲۰۰ میدود. اگر ۲۰۰ تاریخچه ای که بزرگترین مقدار تالی را دارند کمتر از ۲ درصد تغییرات داشته باشند، شیب برابر با ۱۰ است که بهترین حالت را برای توزیع نرمال مقادیر تالی ارائه میدهد. نمونهای از جدول خروجی MCNP که در محاسبات به دست آوردیم به صورت زیر است.

	t	allv 5			
nps	mean	error	vov	slope	fom
512000	1.6208E-02	0.0349	0.0129	1.5	987173
1024000	1.5756E-02	0.0242	0.0070	10.0	400046
1536000	1.5589E-02	0.0197	0.0048	10.0	490918
2048000	1.5644E-02	0.0170	0.0036	10.0	551355
2560000	1.5667E-02	0.0152	0.0029	10.0	499885
3072000	1.5840E-02	0.0140	0.0023	10.0	488868
3584000	1.5770E-02	0.0130	0.0020	10.0	433554
4096000	1.5826E-02	0.0121	0.0017	10.0	389182
4608000	1.5912E-02	0.0114	0.0015	10.0	207006
5120000	1.5868E-02	0.0108	0.0014	10.0	207880
5632000	1.5919E-02	0.0104	0.0012	10.0	208158
6128475	1.5987E-02	0.0100	0.0011	10.0	208862

¹ Relative variance of variance

۳-۳ پیادەسازی هندسەی مساله

همانطور که پیش از این بیان شد، از روش پنجرههای وزنی و آشکارساز نقطهای در جهت کاهش واریانس در محاسبات مطالعهی حاضر استفاده شده است. بنابراین، روشهای کاهش واریانس استفاده شده در محاسبات برای دستیابی به نتایج با دقت بیشتر شرح داده میشود. افزون بر این، اطمینان از درستی روش شبیهسازی و هندسهی طراحی شده در برآورد پارامترهای حفاظ پیش از انجام محاسبات ضروری به نظر میرسد. از این رو، راستیآزمایی هندسه با تکیه بر مطالعات پیشین در این بخش ارائه میشود.

۳-۳-۱ اعمال پنجرههای وزنی

به منظور کاهش خطای محاسبات، از کاهش واریانس به روش پنجرههای وزنی استفاده شد. در این روش، ضخامت حفاظ با توجه به مسافت آزاد میانگین پرتوها در مادهی موردنظر به لایههای مختلف تقسیم بندی شد. اهمیت هر بازه ۲ برابر بازهی قبل در نظر گرفته شد. سپس، با تقسیم چگالی ماده به یک چهارم مقدار اصلی در چندین مرحله وزنهای جدیدی توسط مولد وزنی برای سلولها تعیین شد. شار ۱۰۰۰ ذرهی گسیل شده از چشمه در (الف) حالتی که وزن ذرات در تمام سلولها یک است و (ب) حالتی که وزن ذرات با استفاده از مولد پنجرههای وزنی تعدیل شده است، در شکل ۳–۲ آمده است.



شکل ۳-۲ شار ۱۰۰۰ ذرهی گسیل شده از چشمه در (الف) حالت اول و (ب) پس از اعمال پنجرههای وزنی همچنین، تغییرات FOM با افزایش تاریخچهی ذرات برای مراحل مختلف اعمال پنجرههای وزنی در شکل ۳-۳ ارائه شده است.



همانطور که در نمودار شکل ۳-۳ میتوان دید با اعمال کاهش واریانس به روش پنجرههای وزنی، تغییرات FOM در هر مرحله بهبود مییابد، به طوری که این ضریب در آخرین مرحله با افزایش تاریخچهی ذرات تقریبا ثابت و قابل قبول است و میتوان ادعا کرد که شبیهسازی از اعتبار لازم برخوردار است.

۳–۳–۲ راستی آزمایی هندسه

در راستای تائید نتایج MCNP در محاسبه یپارامترهای حفاظ گذاری تابش گاما و پرتوی X، از مقایسه ی ضرایب انباشت پرتوهای گامای چشمه ی ⁶⁰Co در عبور از حفاظ سرب با مقادیر تجربی [۱۴۳] و تئوری [۱۴۵–۱۴۴] در مطالعات گذشته استفاده شد. با توجه به آنچه در بخش ۳–۱ بیان شد، ضریب انباشت را میتوان بر اساس سه رهیافت تعداد ذرات، انرژی ذخیره شده، و دز تابش حاصل از آنها به دست آورد [۱۰]. در پژوهش حاضر از رهیافت تعداد ذرات برای محاسبه ی ضرایب انباشت شار استفاده شده است. بر این اساس، بازه ی انرژی کل (۱۲۵۳ MeV) طوری تقسیم_ابندی شد که طول هر بازه ۱۰/۰ باشد. در نهایت، مقدار ثبت شده برای تالی کل به عنوان شار کل فوتونهای رسیده به نقطه ی آشکارسازی (I_I) و مقدار تالی در بازه ی آخر به عنوان شار فوتونهایی که بدون برخورد به نقطه ی موردنظر رسیدهاند (I_I)، در نظر گرفته شدند. در نهایت، ضرایب انباشت شار از نسبت شار کل به شار فوتونهای بدون برخورد محاسبه شدند. چشمهی پرتوزای ⁶⁰Co با گسیل پرتوهای گاما در دو خط انرژی ۱/۱۷۳ MeV و ۱/۱۷۳ ۲۰۲۱ و همچنین انرژی متوسط ۱/۲۵۳ MeV برای محاسبات در نظر گرفته شد.



 60 Co شکل ۳–۴ ضریب انباشت برای مقادیر انرژی گاماهای چشمه 60 Co

۳–۳–۳ انتخاب آشکارساز نقطهای

در نظر گرفتن عواملی همچون ماده، جنس دیواره و پنجره، و ابعاد آشکارساز این سوال را مطرح می کند که آیا تعریف آشکارساز در محاسبات مونت کارلو با تکیه بر مشخصات واقعی ابزار در اندازه گیری تجربی سبب

		انړژې نځ) ب														
(q .1. m) تىملغىغ	♥/٠ (
	*	[/4/]	[/۴۷]	*	[271]	[/*/]	[/4/]	*	[271]	*	[/4/]	*	[/4/]	*	[141]	[141]
♥/・	171147	-	-	١/٢٣٧	-	-	37/1	• 47/1	31/1	7.7/1	77/1	277/1	-	71/1	-	-
١	377/1	77/1	Y1/1	777/1	37/1	17/1	3٨/١	۵۶٦/۱	P7\1	·79/1	\$\\\\$	117/1	77/1	177/1	77/1	17/1
7	۰۵٦/ <i>۱</i>	١ /٣۴	۲ ۲/۲	P7V/1	७ २/ <i>\</i>	13/1	7/7	301/1	<i>२</i> ७/।	771/7	P7\7	301/1	٨٨/١	۱ • ۸/۱	1.1/1	٨٨/١
7	177/1	P7\1	1/46	PVP/1	79/1	٨٧/١	7/54	۲/۱۸۰	৫৭/৮	7.1/7	7/7	7/1/7	31/7	771/7	7/\7	71/7
k	797/1	৮৩/১	7.át	• • • / / 1	٨١/٦	• (/)	PP/7	700/7	<u>۸۶/۶</u>	(17/7	(7\7	٨٦٦/٦	• \(\)/\	P37/7	\V/\	10/7
\$	••3/\	٧٦/١	13/1	71/7	77/7	7/7	-	۰۰۷/۸	-	• 30/7	-	371/7	PA\7	• 7 P \ 7	79/7	18/7
5	763/1	37/1	৮ २/।	· 73/7	33/2	76/7	-	۲.۱.۲	_	777/7	-	· (7\7	· 7\7	(17/7	<i>P</i> ガ	444
٨	777//	7//	٨٨/١	۲/۸۴۱	VV/J	۵۷/۲	-	7/7/7	_	376/7	_	P73/7	٣٩/٣	۰۶۷\٦	۲۸/۲	۲/۸
۷	(• Y/(79/1	V/1	۲۵۰/۲	0.\7	२७/७	-	17/7	-	۷1/۶	-	۸۸۶/۲	1.17	177/7	77/7	۰ ۲\۶

ب س طلتخه ردله تمانغ و تولفته ردله ردی از ۲۱ ۹۹٬۱ میشیو تاماللمه و «بخله ردمعاللمه رایم رایم رایم استشابنا بیابخ ردمسیلقه **۲-۱ را وید**

اختلاف نتایج با یافتههای حاصل از تعریف آشکارساز نقطهای خواهد شد؟ در این بخش به دنبال بررسی مسالهی مطرح شده با تکیه بر تعریف آشکارساز با مشخصات واقعی و مقایسهی آن با نتایج حاصل از تعریف تالی در محاسبات مونت کارلو هستیم. از آنجا که شمارندهی گایگر – مولر (GM) و آشکارساز سوسوزن سدیم یدید ((NaI(TI)) دو ابزار معروف در مطالعات حفاظ هستند، ما در این بخش به بررسی اختلاف ضرایب انباشت حفاظهای فلزی ناشی از تعریف تالی آشکارساز نقطهای، تالی شار حجمی برای سلول بدون ماده، و شبیه سازی شمارنده یگایگر – مولر، و آشکارساز سوسوزن سدیم یدید پرداختهایم.

شناسایی فوتون بر اساس برهم کنش میان تابش و ماده ی آشکارساز رخ می دهد [۱۴۶]. پس از ورود پرتوهای گاما (کمتر از ۱/۰۲۲ MeV) به سلول آشکارساز، پراکندگی کامپتون و یا جذب فوتوالکتریک اولین رویدادها خواهند بود. در صورتی که انرژی پرتوها بیشتر از NeV ۱/۰۲۲ باشد احتمال وقوع تولید زوج نیز وجود دارد. در تمام این حالتها، الکترونهای پرانرژی (keV-) تولید می شود [۱۰]. چنان که آبشار الکترونی تولید شده پاسخ آشکارساز را شکل می دهد [۱۴۶]. به عبارت بهتر، شناسایی فوتونها از طریق انرژی بجا مانده در ماده ی آشکارساز را شکل می دهد [۱۴۶]. به عبارت بهتر، شناسایی فوتونها از طریق انرژی بجا الکترون در بلور سوسوزن انقدر کوتاه است که می توان فرض کرد فوتونها همه ی انرژی خود را در اثر برهم کنش با ماده به جا می گذارند [۱۰]. در شمارنده ی گایگر- مولر نیز تاثیر حفاظ، پنجره ورودی، و پنجره ی انتهایی سبب پس پراکندگی فوتونها به داخل حجم سلول گاز و افزایش شار فوتون می شود [۱۴]. با توجه به تفاوتهایی که در ثبت شار فوتونها به داخل حجم سلول گاز و افزایش شار فوتون می شود [۱۴]. می شود که نوع آشکارساز در برآورد ضرایب انباشت می تواند موثر باشد.

محاسبات مونت کارلو با استفاده از کد MCNPX [۱۳۹] انجام شد. هندسهی شبیهسازی شدهی مساله که در شکل ۳–۵ نشان داده شده است. این هندسه شامل سه بخش اصلی است: (الف) چشمهی نقطهای همسانگرد ⁶⁰Co که با انرژی متوسط ۱/۲۵۳ MeV در نظر گرفته شد؛ (ب) حفاظ تک لایه از فلزات تنگستن (W)، سرب (Pb)، روی (Zn) و تیتانیوم (Ti) که با ضخامتهای Cm ۵–۱ در فاصله ۲۰۵ از چشمه در نظر گرفته شد تا گسترهای از اعداد اتمی را به منظور مطالعه ی دقیق تر پراکندگی کامپتون مشخص کند، و (ج) آشکارساز که در چهار حالت (۱) استوانه ی خلا با ابعاد "۱×"۱ (2m ۲/۵۴×۲/۵۴)؛ (۲) شمارنده ی گایگر– مولر با طول Cm ۹/۹ دال (۱) استوانه ی خلا با ابعاد "۲×"۱ (۳) آشکارساز سوسوزن (To) Nal با ابعاد "۲×"۲ (گایگر– مولر با طول Cm ۹/۹ دال (۱) استوانه ی خلا با ابعاد (۳) آشکارساز سوسوزن (To) شمارنده ی گایگر– مولر با طول Cm ۹/۹ دال (۱) استوانه ی خلا با ابعاد "۱۰×"۱ (۳) آشکارساز که در چهار حالت (۱) استوانه ی خلا با ابعاد "۲×"۲ (۳) آشکارساز سوسوزن (To) ما با بعاد "۲×"۲ (۶) شمارنده ی ایگر مولر با طول Cm ۹/۹ دال (۲) استوانه ی خلا با ابعاد در انتخار ۵ دار از با مول در Cm ۹/۹ دال (۲) آشکارساز سوسوزن (To) در Cm ۹/۹ دار ۲) شمارنده در گایگر مولر با طول Cm ۹/۹ دال در تا در انه ای ۲۰ (۳) آشکارساز سوسوزن (To) در Cm ۹/۹ دار ۲) شمارنده در که در فاصله ی ۲۰ (۲) آشکارساز سوسوزن (To) در Cm ۹/۹ دار گرفته در در که در فاصله ی ۲۰ (۳) آز ۲) آز ۲) آز (۲) آز (۲) در Cm ۹/۹ دار گرفته در در Cm ۹/۹ در دار گرفته شد. نتایج حاصل از برآورد شار ذرات و محاسبه ی ضرایب انباشت در بخش بعد ارائه شده است. به منظور دستیابی به خطای آماری قابل قبول (۵/۰۰> برای تالی F4)، هر برنامه برای ^۷۱۰×۱ تاریخچه اجرا در.



شکل ۳–۵ هندسهی شبیه سازی شده جهت بررسی اثر انواع آشکارساز در برآورد ضرایب انباشت

شکل ۳–۶ (الف–د) تغییرات ضرایب انباشت بر حسب ضخامت ماده برای چهار عنصر تنگستن، سرب، روی، و تیتانیم در هر آشکارساز را نشان میدهد. همانطور که میتوان دید ضرایب انباشت برای تنگستن بیشترین و برای تیتانیم کمترین است. با این حال، بررسی تغییرات سرب و روی مشخص می کند اگرچه مقدار ضریب انباشت در ضخامتهای کم برای سرب بیشتر از روی است، افزایش ضخامت تا ۵ سبب بیشتر شدن آن برای روی نسبت به سرب می گردد. با توجه به ضرایب تضعیف جرمی کامپتون و کل برای هر چهار عنصر مورد نظر که در شکل ۲–۱۱ نشان داده شد، میتوان دید که برای تنگستن و سرب سطح مقطعها تقریبا مشابه است.



شکل ۳-۶ تغییرات ضریب انباشت شار بر حسب ضخامت ماده بر حسب cm برای عناصر Zn ،Pb ،W، و Ti برای زمانی که آشکارساز (الف) استوانه بدون ماده، (ب) شمارنده گایگر- مولر، (ج) سوسوزن سدیم یدید، و (د) آشکارساز نقطهای باشد

بنابراین، تفاوت ضرایب انباشت را میتوان به چگالی بالاتر تنگستن نسبت داد که سبب میشود یرتوهای بیشتری در ماده برهم کنش کنند. با توجه به تعریف پراکندگی کامیتون، هر چه زاویهی پراکندگی کوچکتر باشد فوتون گاما انرژی بیشتری را در هر برخورد از دست میدهد و سریعتر جذب ماده میشود. در نتیجه برای تنگستن با کوتاہترین مسافت آزاد میانگین در میان عناصر فوق، تعداد پرتوہای گاما که بدون پراکندگی از ماده عبور می کنند در برابر پرتوهایی که پس از پراکندگی وارد آشکارساز میشوند کاهش می یابد و ضرایب انباشت بزرگتر می شود. در ارتباط با تیتانیم، به روشنی می توان فهمید که سطح مقطع جذب کمتر احتمال رسیدن پرتوهای عبوری غیرپراکنده به آشکارساز را افزایش داده و موجب ضریب انباشت کوچکتر می شود. از سوی دیگر، مقایسهی ضرایب تضعیف کامپتون و کل نشان میدهد روی در انرژیهای میانی دارای سطح مقطع کامپتون بالاتر نسبت به سرب است و همچنین مسافت آزاد میانگین بزر گتری دارد. بنابراین، با افزایش ضخامت ماده سهم پرتوهای پراکنده برای روی بیشتر شده و در انرژیها میانی ضریب انباشت بزرگتری برای روی در مقایسه با سرب به دست میآید. با این وجود، این گونه نیست که افزایش ضخامت ماده به معنای افزایش ضریب انباشت باشد. به منظور بررسی بهتر این موضوع، بهتر است ضخامتها بر حسب مسافت آزاد میانگین در نظر گرفته شوند تا تغییرات ضرایب انباشت بر حسب ضخامت برای تمام مواد قابل مقایسه باشد. برای این منظور از رابطهی (۳–۱۲) برای تبدیل ضخامت حفاظها از واحد cm به m.f.p استفاده شد.

$$x(mfp) = \frac{x(cm)}{mfp(cm)}$$
 (۱۲-۳)
که در آن، (x(m.f.p) به عنوان ضخامت ماده بر حسب مسافت آزاد میانگین از تقسیم ضخامت هر ماده بر
حسب cm بر مسافت آزاد میانگین پرتوها در آن ماده بر حسب cm به دست میآید. شکل ۳–۷ (الف–د)
تغییرات ضرایب انباشت بر حسب (x(m.f.p) را نشان میدهد. در واقع، شدت پرتو پس از هر پراکندگی به
صورت نمایی کاهش مییابد و هر چه ضخامت ماده بیشتر شود احتمال اندرکنش افزایش مییابد. در

ضخامتهای بالا، زمانی که پرتو دستخوش پراکندگی می شود به دلیل پراکندگیهای ثانویه احتمال فرار فوتونها کم می شود. در شکل ۳–۷ مشخص است برای سرب ضرایب انباشت با کمترین شیب افزایش می یابد. برعکس، مسافت آزاد میانگین بزرگ تیتانیوم سبب می گردد ضرایب انباشت نسبت به سرب با سرعت بیشتری افزایش یابد.



شکل ۳–۷ تغییرات ضریب انباشت شار بر حسب ضخامت ماده بر حسب mfp برای عناصر W، Pb، ۷ و Ti برای زمانی که آشکارساز (الف) استوانه بدون ماده، (ب) شمارنده گایگر– مولر، (ج) سوسوزن سدیم یدید، و (د) آشکارساز نقطهای باشد با توجه به شکل ۳–۸، تغییر نوع آشکارساز سبب میشود نتایج متفاوتی حاصل گردد. به این صورت که استفاده از تالی شار حجمی در استوانه بدون ماده به عنوان حجم آشکارسازی مقدار ضرایب انباشت را کوچک تر ارزیابی می کند اما این مقادیر با افزایش ابعاد و چگالی ماده ی سلول آشکارساز در شمارنده ی

گایگر- مولر و سوسوزن یدید سدیم بیشتر میشود. با این حال، رفتار ضرایب انباشت در تمام آشکارسازها برای فلزات بررسی شده تقریبا مسیر یکسانی را طی میکند. بررسی تالی نقطهای به عنوان حجم آشکارسازی به عنوان یک تالی کاهش واریانس نتایجی نشان داد که انطباق خوبی با تالی شار حجمی دارد.



مولر، سوسوزن سدیم یدید، و تالی نقطهای زمانی که ماده (الف) سرب، (ب) تنگستن، (ج) روی، و (د) تیتانیم باشد

مقایسهی ضرایب تضعیف جرمی برای شمارندهی گایگر- مولر و سوسوزن یدید سدیم که در شکل ۳-۹ آمده است نشان میدهد که احتمال فوتوالکتریک برای سوسوزن یدید سدیم بیشتر است و پراکندگی کامپتون با احتمال بزرگتر برای شمارنده گایگر- مولر اتفاق میافتد. از این رو، مقدار انرژی بیشتری در سوسوزن یدید سدیم ثبت می گردد و به همین دلیل مقدار ضریب انباشت محاسبه شده از این طریق بالاتر از مقادیر به دست آمده برای شمارنده گایگر – مولر است. هنگامی که ذرهای وارد آشکارساز میشود با توجه به انرژی ذره، نوع، و اندازهی آشکارساز ممکن است بدون هیچ برهم کنشی آشکارساز را ترک کند. نسبت ذرات ثبت شده در واحد زمان به ذراتی که در واحد زمان وارد حجم آشکارساز میشوند بازده آشکارساز نام دارد. هر چه احتمال اندرکنش پرتو با ماده بیشتر شود بازدهی بیشتر میشود. چگالی بیشتر مادهی آشکارساز احتمال اندرکنش را بیشتر میکند و بازده را افزایش میدهد. از آنجا که چگالی جامدات حدود ۱۰۰۰ برابر چگالی گاز است، بازدهی آنها در آشکارسازی پرتوهای گاما بیشتر است.

ذرات بارداری که از ماده می گذرند همواره با الکترونها و هستههای آن محیط برهم کنش کولنی خواهند کرد و چون احتمال برهم کنش برای آنها تقریبا قطعی است بازده ثبت آنها ۱۰۰ درصد است. اما چون تضعیف نمایی برای فوتونها رخ میدهد همواره احتمال غیرصفری برای عبور بدون برهم کنش وجود دارد که باعث می شود بازده از ۱۰۰ درصد کمتر شود. در واقع، اختلاف مقادیر ثبت شده در شمارنده یگایگر-مولر و سوسوزن یدید سدیم را می توان به بازده آنها نسبت داد. انتظار می ود در نظر گرفتن بازده آنها منجر به مقادیر ثبت شده یکسان شود.



شکل ۳-۹ ضریب تضعیف جرمی کامپتون و کل بر حسب انرژی برای شمارنده گایگر مولر و سوسوزن یدید سدیم

ضرایب انباشت برای ضخامتهای مختلف ماده هم بر حسب cm و هم بر اساس مسافت آزاد میانگین عناصر به همراه خطای نسبی در جدول ۳–۲ آمده است که مقدار کمتر از ۰/۰۵ دال بر اعتبار نتایج به دست آمده است.

	ارساز	آشکا					
آشکارساز	سوسوزن	شمارندەي	استوانه		صحامت (m f n)	صحامت	مواد
نقطهای	سديم يديد	گايگر – مولر	بدون ماده		(m.r.p)	(CIII)	
۲/۰۷۷	1/847	1/277	١/۵٧٩	В	11.87	``	
•/••۵	•/•))	• / • • ١	• / • • ۶	σ_B/B	1/•11	1	
T/88V	۲/ • ۹۶	7/•74	۲/۰۱۳	В	71.40	~	
•/•))	•/• ١٣	•/••٢	•/••٩	σ_B/B	1/•70	۱ ١	
۳/۱۶۷	۲/۴۹۱	۲/۴۲۰	2/422	В	~~~~~	~	(W) F
•/•))	•/• 14	•/••٣	•/• ١٣	σ_B/B	1/11/	,	فتكسين (٧٧)
۳/۶۰۷	۲/۸۰۹	۲/۷۸۴	۲/۷۷۸	В	¥(1)/1	ĸ	
۰/۰۱۶	•/•٢•	•/••۵	•/• 17	σ_B/B	1/181	۱ ١	
۴/۰۷۷	۳/۲۳۰	۳/۱۳۴	۳/۱۶۸	В	A/7.1.W		
•/• ١٣	۰/۰۲۵	•/••٧	•/•71	σ_B/B	ω/ τ τ τ	ω	
١/٧٩ ١	١/۴٠٧	1/844	1/848	В	ICKK	,	
•/••٣	• / • • ٨	• / • • ١	•/••٣	σ_B/B	•///	, i	
۲/۱۱۵	١/۶۶٨	1/805	۱/۵۹۸	В		۲ ۲	
•/••۵	•/•))	•/••٢	•/••۴	σ_B/B		۱ ١	
۲/۱۷۵	۲/•۲۵	۱/۸۲۵	١/٨١۶	В	1/922	~	(Dh)
• / • • ٨	•/• ١٣	•/••٢	•/••۵	σ_B/B	1/311	, i	سرب (۲۵)
۲/۶۵۵	۲/۱۰۸	۲/•۲٩	۲/•۲۳	В	TIANY	۴	
• / • • ٧	۰/۰۱۶	•/••٣	•/•))	σ_{B}/B	1/644	۱ ١	
۲/۸۹۳	۲/۲۵۱	۲/۲۲۰	۲/۲۰۲	В	~~~~~		
• / • • ٧	•/• ١٨	•/••۴	•/• ١٣	σ_{B}/B	1/111	ω	
١/٧١٨	١/٣۶٨	۱/۳۰۱	۱/۳۰۱	В	. (W)/ Y	,	
•/••٣	• • • ۶	• / • • ١	• / • • ۶	σ_B/B	•/\ •\	, i	
۲/•۶۷	١/۶٨٩	1/818	1/877	В	./// 49 5		روی (Zn)
•/••٣	•/••٨	•/•• ١	•/••٨	$\sigma_{B}\!/B$	•/*\٦	,	
7/417	۲/۰۰۲	١/٩٢٧	۱/۹۲۶	В	1/174	٣	

جدول ۳-۲ نتایج شبیهسازی و خطای محاسبات

•/••۵	٠/٠٠٩	•/•• ١	•/••٨	σ_{B}/B			
۲/۷۶۳	۲/۳۲۶	7/744	۲/۲۳۷	В	1/1699	ĸ	
•/••۶	•/•))	•/•• ١	•/••٨	σ_B/B	1/1 ((۱ ١	
۳/۱۴۲	2/802	۲/۵۷۰	۲/۵۷۹	В	1/1/1×		
•/••۶	•/• 17	•/••٢	•/••٨	σ_B/B	1/7 1	ω	
۱/۵۸۸	1/747	۱/۱۸۵	١/١٨٣	В	. 1786	\ \	
•/••٢	• • • ۶	• / • • •	•/••٣	σ_B/B	•/\\/	1	
۱/۸۰۱	1/440	۱/۳۸۱	١/٣٨٣	В	I KVY K	۲	
•/••٢	• / • • ¥	•/•• ١	•/••۴	σ_B/B	•/ ١ ٧ ١	N N	
۲/۰۱۱	1/844	١/۵٧٨	١/۵٧٨	В	. /X . A	٣	(Ti) :1
•/••٣	• / • • Y	• / • • 1	•/••۴	σ_B/B	•/••	1	لينائيم (11)
۲/۳۷۶	۱/۸۴۵	١/٧٧۶	١/٧٧۴	В	. 19 6 6	ĸ	
•/••۴	٠/٠٠٩	•/••)	•/••۵	σ_B/B	•/ (1)	۱ ١	
۲/۴۳۷	۲/۰۳۶	١/٩٧٧	1/974	В			
۰/۰۰۵	•/•))	•/••)	•/••۵	σ_B/B	1/17.	ω	

همانطور که از جدول ۳–۲ مشخص است، نوع آشکارساز تعریف شده در محاسبات بر ضرایب انباشت محاسبه شده تاثیر دارد به طوری که برای شار حجمی بدون تعریف ماده و شار نقطهای مقادیر مشابهی به دست آمد اما این مقادیر با افزایش چگالی ماده ی آشکارساز در تعریف شمارنده ی گایگر– مولر و سوسوزن سدیم یدید افزایش یافت. با این حال، با توجه به سهم بازده آشکارساز به نظر می رسد اعمال این کمیت منجر به کسب مقادیر یکسان برای پرتوهای ثبت شده در انواع آشکارساز شود. از این رو، آشکارساز نقطهای برای ارزیابی شار ذرات در مطالعه ی حاضر مورد استفاده قرار گرفت تا با توجه به هندسه ی پیچیده ی حفاظ سریعتر به مقداری با خطای کمتر برسد.

۴-۳ پارامترهای حفاظ گذاری برای ماکروساختارها

به منظور محاسبهی اثربخشی ماکروساختارها در حفاظ گذاری فوتونها، نمونههای Pb، W، Pb، Ti، Zn، W، Pb، اکم، T در برابر باریکهی موازی از فوتونهای اکسیدهای آنها شامل PbO، WO3، PbO، و TiO با ضخامت ۲ در برابر باریکهی موازی از فوتونهای اکسیدهای آنها شامل Ob در بازهی کام با منطور برآورد شار تک انرژی در بازهی Vi م

فوتونها پس از عبور از نمونه استفاده شد. با تغییر ضخامت ماده از ۲۰/۱ cm ۵ مقدار ضریب تضعیف جرمی μ/ρ با کمک رابطهی بیر- لامبرت محاسبه شد. این مقادیر به همراه مقادیر محاسبه شده از طریق دادههای NIST XCOM [۱۳۳]، خطای نسبی و همچنین اختلاف نسبی آنها که از رابطهی (۳–۱۳) به دست میآید در جدول ۳–۳ آورده شده است.

 $\delta_1 = \frac{(\mu/\rho)_{MCNP} - (\mu/\rho)_{XCOM}}{(\mu/\rho)_{XCOM}} \times 100$

انرژی (MeV) δ_1 (%) (μ/ρ) xcom $\sigma_{(\mu/\rho)}/(\mu/\rho)$ (μ/ρ) calculated مادہ ٣/٣٩ 117/. •/•• \ 110/1 ./.10 ۸/۰۴ . | . . 9 ۰/۰۵ 9/40 $\lambda/\lambda\lambda$ ٨/۴۶ .1... 81.5 ٠/١ ۵/۵۵ ·/\VA 1./00 •/181 ./...۴ ۰/۵ •/••) ۹/۳۲ •/• ٧) ·/·YA ١ Pb 1.18 .1.49 •/•• \ •/• ۵1 ٢ ۳/۲۳ ./. 47 •/••۴ ./.44 ۵ ۱۰/۳۱ ./.49 ۰/۰۰۵ •/•09 ١٠ •/••٢ 9/41 •/• ۵Y .1.98 ۱۵ ۶/۵۸ ۱۳۹/۰ •/•• \ 141/10 ۰/۰۱۵ ٠/••٢ ۶/۲۸ ۰/۰۵ ۵/۲۵ ۵/۹۵ •/••٣ ٧/٣١ 4/44 4/19 ٠/١ ۰/۱۳۸ •/••٣ ./149 8/88 •/۵ ٧/9۴ .1.99 •/•• \ •/•YA ١ W .1.44 •/•• \ ۴/۸۸ ./.01 ۲ ۹/۲۸ ./.41 •/•• \ .1.08 ۵ . / . . 9 ۹/۳۲ ۰/۰۴۸ ۰/۰۶۱ ١٠ ./.98 ٧/۴١ ./.04 •/••٨ ۱۵ . | . . 9 ۸١/٢ ٩۶/٨ ./.10 V/TA۶/۸۸ ٢/٨٩ ./..۴ ٣/٣٩ •/•۵ ./491 •/•• \ ٩/٨١ ./018 •/1 Zn ۰/۰۸۵ •/•• \ ۰/۰۹۳ ٨/۴٢ ۰/۵ ٧/١٩ ۰/۰۵۹ •/••۵ •/•9٣ ١

جدول ۳-۳ ضرایب تضعیف جرمی ماکروساختارها و مقایسه ی آن ها با مقادیر XCOM

(17-7)

	٢	•/•۵۵	• / • • ۲	•/• ۴۲	٨/ • ۶
	۵	•/•۵١	•/••۴	•/• ٣٢	٩/١٨
	١.	•/• ۵۲	• / • •)	•/•٣٢	۵/۲۱
	۱۵	•/•۵١	• / • •)	• / • ٣٣	٩/٢٢
	•/•10	۴۱/۶	•/••۴	۳۵/۹	٨/٩٧
	•/•۵	١/٨١	•/••۵	۱/۲ ۱	۸/۲ ۱
	• /)	•/४११	•/••٢	•/٣٧٢	٧/٠١
	•/۵	•/• ٧۶	• / • •)	•/• A Y	٧/١١
Ti	١	•/•۶•	•/••٢	•/•۵٩	۵/۴۹
	٢	•/•۴٩	•/••٣	•/• 47	4/47
	۵	۰/۰۳۵	•/••)	•/•۲٩	۶/۳۹
	1.	•/•٣۴	•/••)	•/• ٢٧	۷/۴۸
	۱۵	•/•٣١	•/••)	•/• ۲٨	ν/Δν
	۰/۰۱۵	111/8	•/••٨	۱ • ۳/۷	۶/۲۸
	•/•۵	٨/٩٩	•/••٨	٧/۴٨	٩/٢٩
	• /)	0/V14	• / • • ۶	۵/۱۶۲	۱۰/۱۱
	•/۵	•/\YY	•/••۵	•/108	۱۰/۳۵
PbO	١	•/• ٨ •	•/••٢	•/•∀١	٨/٨٩
	٢	•/•۵١	•/••٣	•/• 48	۱۰/۱۲
	۵	۰/۰۵۳	•/••٣	•/• 47	٩/٣٢
	١.	•/•۵۴	•/••٣	•/•۴٨	۶/۲۹
	۱۵	• • 88	• / • •)	•/•۵۴	1./41
	۰/۰۱۵	۱۲۸/۴	• / • • ١	۱۱۰/۵	٨/١٣
	•/•۵	۴/۷۹	• / • • ١	۴/۷۶	8/94
	• / ١	۴/۶۹	•/••٢	٣/۵۵	۵/۹۹
	•/۵	•/١۵١	•/••۶	•/1YY	٧/۴٨
WO ₃	١	۰/۰۶۱	•/•• ١	•/•۶۶	4/47
	٢	•/•۴٣	•/••٢	•/• ۴۴	۱۰/۱۱
	۵	•/• **	• / • • ١	•/• ٣٨	٨/٢٩
	1.	• / • ۵ ۱	•/••A	•/• ۴۲	۵/۷۴
	۱۵	٠/٠۵٩	•/••)	•/•۴٧	۱۰/۵۹
	•/•1۵	۸٠/٣٣	• • • ۶	۶۵/۵۸	11/22
ZnO	•/•۵	۲/۷۹	•/••۵	۲/۳۷	٩/٩٧
	•/1	• / a • ۲	•/••٢	•/4٣	٩/۵۶

	•/۵	٠/•٩١	•/••٣	•/• 🗛 ۵	٨/١٨
	١	•/•۵۶	• / • • ٣	• / • ۶	۷/۵۴
-	٢	•/•۴٩	•/••۵	•/• ۴٣	4/88
	۵	•/•۴١	• / • •)	• / • ٣ ١	17/41
	1.	•/•٣۶	• / • • ١	•/•۲٩	۱۰/۲۱
	۱۵	•/•٣٩	• / • • ١	• / • ٣	٨/۵٩
	۰/۰۱۵	T0/9V	• / • • ٣	22/26	٧/۵۵
	•/•۵	٠/٧۴١	•/••۵	۰/۸۱۳	λ/۶λ
	• /)	• / ٣ • ٢	•/••۴	•/YYD	11/54
	•/۵	•/• 98	•/••٨	•/•*	۶/۹۸
TiO ₂	١	• / • ٧ ١	•/••٨	•/•۶١	٩/١
	٢	۰/۰۴۵	• / • • ۲	•/• 4٣	۷/۲۳
	۵	•/• ٣۶	• / • • ۲	•/•۲٩	۸/۳۱
	١.	• / • ٣٧	• / • •)	•/• ۲۵	۹/۵۵
	۱۵	• / • ٣٧	• / • •)	•/•74	۱۰/۱۲

افزون بر این، ضرایب انباشت حفاظ و خطای نسبی برای ماکروساختارهای بررسی شده در جدول ۳-۴ آورده

شده است.

1.					انرژ	ی (MeV)				
356		+/+10	۰/۰۵	•/1	•/۵	١	۲	۵	1+	10
DL	В	١/•١٨	۲/۲۳۲	۱٣/۲۸	4/171	٣/٢١٧	7/447	۲/۱۸۰	٢/٢٨٩	۳/۱۱۱
PD	$\sigma_{\rm B}/{\rm B}$	•/••٨	•/•• \	•/••٨	•/••٣	•/•• ١	•/••٢	•/••۶	•/•• ١	•/•• ١
XX 7	В	1/261	2/410	18/88	4/214	5/100	7/887	2/261	۲/۳۸ ۱	٣/۵۰۵
vv	$\sigma_{\rm B}/{\rm B}$	•/•• ١	•/•• ١	•/••٨	•/••۵	•/•• ١	• / • • ١	•/••۶	•/•• ١	•/•• ١
7	В	۱/۰۱۱	۲/۱۰۶	11/71	۳/۲۴۱	۳/۰۰۱	7/194	۲/۰۱۸	۲/۱۱۰	۲/۱۵۳
Zn	$\sigma_{\rm B}/{\rm B}$	•/••۴	•/•• ١	•/••۶	•/••۶	•/•• ١	• / • • ١	•/•))	•/•• ١	•/•• ١
T	В	۱/۰۰۸	۲/۱۰۵	۱۰/۹۶	۳/۰۰۹	۲/۸۹۶	۲/۰۰۱	۱/۱۹۳	1/114	۲/۲۲۳
	$\sigma_{\rm B}/{\rm B}$	•/••٨	•/•))	•/••٣	•/••۶	•/•• ١	•/••۴	•/••٢	•/•• ١	•/••٢
DLO	В	1/171	۲/۱۸۸	18/98	4/1.5	٣/١٩١	۲/۳۱۵	۲/۱۹۳	۲/۳۱۷	٣/٠٠۴
PDU	σ _B /B	•/••۶	•/•• \	•/••٢	•/•• \	•/••٣	• / • • ١	•/••۶	•/•• ١	• / • • ١
WO	В	1/117	۲/۱۶۸	17/01	4/310	۳/۱۰۰	۲/۵۱۱	۲/۱۱۳	7/704	۳/۲۷۸
	$\sigma_{\rm B}/{\rm B}$	•/•• ١	•/•• ١	•/••٢	•/••)	•/••٣	•/•• ١	•/•• ١	•/• \ \	•/•• ١

جدول ۳-۴ ضرایب انباشت و اثربخشی حفاظ برای ماکروساختارها

7.0	В	۱/۰۰۹	۲/۰۰۲	9/54	۳/۳۱۱	۲/۸۱۵	۲/۰۱۱	۱/۷۱۵	1/198	۲/۰۰۶
3	$\sigma_{\rm B}/{\rm B}$	•/••۴	•/•))	•/••)	•/•• \	•/•• ١	•/•• ١	•/•))	•/•• ١	•/•• ١
TO	B	۲/۰۰۴	۲/۰۰۱	٩/٢١	7/977	7/814	1/171	1/180	۱/۱۰۱	۲/۱۰۰
3	σ _B /B	•/••٣	•/•))	•/•• \	•/•• \	•/•• ١	•/••۴	•/••۴	•/•• ١	•/••٢

۵-۳ شبیهسازی شبکهی پلیمر تقویت شده با ذرات فلزی

کامپوزیتها در واقعیت آنقدر که انتظار میرود ساختار یکنواختی ندارند. در حقیقت، دو معیار توزیع و پراکندگی ذرات در شبکهی پلیمر همواره ایدهآل نیستند اما ما برای سادگی شبکهای یکنواخت پر شده با ذرات کروی کامل را در مطالعات شبیهسازی در نظر گرفتیم. سرعت محاسبات تاریخچهی یک ذره برای کامپیوتر بستگی شدیدی به تعداد مرزهایی که در میان مواد مختلف باید طی کند دارد. زمانی که یک ذره وارد مادهای میشود، MCNP عددی تصادفی تولید میکند که نشان میدهد برای ذره درون حجم مورد نظر برخوردی رخ میدهد یا نه. هر چه هندسهی محیط سادهتر باشد، تعداد مرزهای میان سلولهای مختلف کمتر و زمان اجرای برنامه کوتاهتر خواهد بود. برای مثال، شکل ۳–۱۰ (الف) ساختاری کاملا ساده را در مقایسه با (ب) یک سلول از شبکهی پر شده با ذره نشان میدهد.



شکل ۳-۱۰ هندسهی (الف) کاملا ساده در مقایسه با (ب) ساختار دوبخشی دارای دو فاز شبکه و پرکننده

زمانی که ذره وارد سلول (الف) شود پس از تولید احتمال برهم کنش برای آن اگر دچار پراکندگی شود به مسیر خود در همان سلول یا سلولهای مجاور ادامه میدهد. در حالی که در سلول (ب) ذره ابتدا وارد شبکه (ناحیه ۱) سپس پرکننده (ناحیه ۲) و مجدد وارد شبکه (ناحیه ۱) شده و در صورتی که زنده بماند به سلول مجاور می رود. در تمام این نواحی، MCNP احتمال برخورد برای ذره را در نظر می گیرد. به همین دلیل، اجرای برنامه برای این مواد زمان بیشتری را در گیر می کند. ممکن است پرسیده شود که آیا استفاده از این ساختار واقعا نیاز است؟ در پاسخ باید گفت، استفاده از یک مدل کاملا همگن ما را قادر می سازد تا تاریخچه های بیشتری را دنبال کنیم. تا اثر ذره و همچنین اثر همزمان اندازه ی ذره در نظر گرفته شوند. در این مطالعه، به منظور بررسی ویژگی های حفاظ گذاری کامپوزیت پایه پلیمر تقویت شده با میکروذرات و نانوذرات فلزی در برابر پرتوهای گاما، از کارتهای (LAT) و (U) در MCNP برای تعریف شبکه که به طور

یکنواخت با پرکنندهی کروی پر شدهاند استفاده شد. نمونهای از دستور عبارت است از:

0 0 1 2	-11.34 -0.945	-2 -3 -4 4	1 u=1 u=2 u=2	fill= 1 lat=1	fill=2	<pre>imp:p=1 imp:p=1 imp:p=1 imp:p=1</pre>	នុ នុ នុ	Slab filled with 'Unit cells' Unit cell filled with a perfect Sphere Perfect Sphere as filler Area surronding Sphere as matrix
کيم و	۲۰ توسط	۹ ر	در سال	مپوزيت	اختارهای کا	زی برای سا	سا	همانطور که پیش از این گفتیم، مدل شبیه
بيشتر	ں جزئیات	، (برای	ائه شد	و گاما ار	های نوترون	معيف تابش	تض	همکاران در بررسی اثر اندازهی پرکننده بر
ت. هر	م شده اس	تقسي	وچک	مکعب ک	رد که به N	ِ نظر میگی	در	مراجعه شود به [۵۱]). این مدل ورقهای را
در این	میگیرد.	در بر	نده را	وان پرکن	ِ با آن به عن	پر هم مرکز	تو	مکعب معرف ساختار شبکه است که کرهای
				ظر است.	محيط متنا	،ی ذرات در	،ازد	مدل ابعاد شبکه ثابت است و قطر کره با اند

مجموع مکعب و کرهی درون آن، که سادهترین واحد تکرار شونده درون شبکه است، را «سلول واحد^۱» مینامیم. از یک طرف، اگر قطر ذرات پرکننده در مدل بدون توجه به کسر وزنی آنها در محیط تغییر داده شود، ساختارهایی با تراکم کمتر متناسب با کوچک شدن اندازهی کره حاصل می شود زیرا سهم پلیمر بیشتر شده و یکنواختی ساختار کاهش می یابد. در نتیجه، لازم است که کسر وزنی پرکننده در نظر گرفته شود. از سوی دیگر، در طراحی تجربی، کسر وزنی پرکننده در کامپوزیت نیز مطالعه می شود، مانند [۶۳–۶۲] که در

¹ Unit cell

حال حاضر بجز در موارد معدود در مطالعات تئوری کمبود آن احساس می گردد [۵۲]. به منظور جبران نقص فوق، ما یک مدل بهینه سازی شده را ارائه می دهیم که جزئیات آن در ادامه شرح داده شده است. این مدل در شکل ۳–۱۱ ارائه شده است.



شکل ۳–۱۱ طرح شبیهسازی شبکهی همگن پلیمر تقویت شده با ذرات فلزی

در مدل بهینهسازی شده، طول سلول واحد (a) همزمان با قطر کرهی درون آن (b) تغییر میکند که منجر به توزیع یکنواخت تر پرکننده درون شبکه می گردد. این مدل در مواردی که بررسی اندازهها و کسر وزنی های متفاوت پرکننده به طور همزمان مدنظر است قابل کاربرد است. از آنجایی که ساختار کامپوزیت از تکرار سلول واحد به دست می آید (uV=Nv به طوری که V حجم کل ساختار، uV حجم سلول واحد، و N تعداد سلول ها درون ساختار است)، محاسبات برای سلول واحد را می توان به کل ساختار تعمیم داد. در حقیقت، ما یک سلول واحد مکعبی با ضلع a و حجم u را در نظر می گیریم که به دو بخش شامل یک کره ی مرکزی به قطر b و فضای اطراف آن تقسیم می گردد. در صورتی که پرکننده دارای حجم v و شبکه دارای حجم vm باشد، کسر حجمی پرکننده برابر است با:

$$v_f = \frac{v_f}{v_u} = \frac{v_f}{v_f + v_m}$$
 (۱۴-۳)
از آنجایی که $M_u = M_f + M_m$ و $M = \rho V_h$ ، می توان نوشت:

$$V_{\rm f} = \frac{M_f/\rho_f}{M_f/\rho_f + M_m/\rho_m}$$
 (۱۵–۳)
 $V_{\rm f} = \frac{M_f/\rho_f}{M_f/\rho_f + M_m/\rho_m}$ (۱۵–۳)
 $V_{\rm f} = \frac{1}{N_{\rm f}} (1500 - 1000 - 00000 - 000$



کمیتی که باید در طول محاسبات در نظر گرفته شود، چگالی ساختار کامپوزیت (p) است. از آنجایی که
جرم کل ساختار مجموع جرم پرکننده و جرم شبکه است، و با توجه به ارتباط میان جرم و حجم، داریم:
$$\rho_c \cdot V = \rho_f \cdot V_f + \rho_m \cdot V_m$$

(۱۹–۳)
با توجه به رابطهی کسر حجمی برای پرکننده و شبکه، چگالی کامپوزیت عبارت است از:
 $\rho_c = \rho_f \cdot v_f + \rho_m \cdot (1 - v_f)$
در نهایت، با استفاده از رابطهی (۳–۱۶) چگالی کامپوزیت بر حسب کسر وزنی مولفهها به دست میآید،
رابطهی (۳–۲۰). در شرایطی که ساختار کامپوزیت بیشتر از یک مولفه را در بر داشته باشد، از رابطهی (۳–

$$\begin{split} \rho_{c} &= \frac{1}{\omega_{f}/\rho_{f} + (1-\omega_{f})/\rho_{m}} \end{split} \tag{Y1-7} \\ \rho_{c} &= \frac{1}{\sum_{i}^{n}(\omega_{i}/\rho_{i})} \end{aligned} \tag{Y7-7} \end{split}$$

$$\begin{split} \rho_{c} &= \frac{1}{\sum_{i}^{n}(\omega_{i}/\rho_{i})} \end{aligned}$$

$$\begin{split} P_{c} &= \frac{1}{\sum_{i}^{n}(\omega_{i}/\rho_{i})} \end{aligned}$$

جذابیت کامپوزیتهای پلیمری در وزن کم آنها است، سنگینی^۱ به عنوان نسبت چگالی کامپوزیت (p_c) به

چگالی سرب (ρPb) یک کمیت متداول است که مطابق با رابطهی زیر محاسبه میشود [۱۱]:

¹ Heaviness

Heaviness =
$$\frac{\rho_c}{\rho_{Pb}} \times 100$$
 (۲۳-۳)
علاوه بر این، نسبت فوتونهایی که بدون برهم کنش در حضور ذرات فلزی و اکسید فلزی در ساختار
کامپوزیت (IMatrix/Filler) به آشکارساز رسیدهاند به آنهایی که پس از عبور از شبکهی پلیمر بدون ذرات
پرکننده (IMatrix) بدون برهم کنش از نمونه عبور کردهاند، را در این بررسی ضریب عبور (T) نامیدیم که با
رابطهی (۲–۲۴) نمایش داده می شود.

$$T = \frac{I}{I_0}$$

 $T = \frac{I}{I_0}$
الزم است خاطر نشان شود که حداقل اندازهی ذرات در شبیهسازی MCNP برابر با N۰۰ و حداکثر کسر
وزنی مطلوب ذرات فلزی و اکسید فلزی در ساختار پلیمر %wt ۵۰ در نظر گرفته شد. شکل ۳–۱۳ برخورد
پرتوهای گاما در شبکهی پلیمر تقویت شده با ذرات nm ۱۰۰ را نشان میدهد. با توجه به توضیحات ارائه
شده، پیادهسازی نتایج هندسه و مدل و صحت نتایج آن در بخشهای بعد آورده شده است.



شکل ۳–۱۳ برخورد فوتونها با دو بخش شبکه و ذرات پرکننده در هندسهس شبیهسازی

۳-۶ اعتبارسنجی مدل شبیهسازی

به منظور اطمینان از نتایج شبیهسازی، ضرایب تضعیف خطی برای LDPE پر شده با درصدهای متفاوت W برای پرتوهای گامای چشمهی نقطهای ⁶⁰Co با انرژی متوسط ۱/۲۵۳ MeV برآورد شده و با دادههای تجربی سایر مطالعات گذشته مقایسه شد [۵۲، ۱۵۱، ۴۵]. از جدول ۳–۵ مشخص است که توافق نسبتا خوبی میان نتایج MCNP و تجربی وجود دارد. اختلاف نسبی که با رابطهی (۳–۲۵) محاسبه شد در بازهی ۱/۵ تا ۹/۵ درصد قرار دارد که نشان میدهد هندسهی شبیهسازی مدلسازی شدهی MCNP به عنوان ورودی استاندارد برای تعریف ذرات پرکننده درون یک آرایش یکنواخت توزیع شده مورد تایید است. $\delta_2 = \frac{\mu_{Exp} - \mu_{MCNP}}{\mu_{Exp}} \times 100$

۷-۳ پارامترهای حفاظ گذاری برای کامپوزیتهای پلیمر تقویت

شده با میکروذرات و نانوذرات فلزات

بر اساس مدل ارائه شده در بخش قبل، ابتدا پارامترهای ضریب تضعیف جرمی، مسافت آزاد میانگین، ضریب انباشت و ضریب عبور در بازهی بزرگی از اندازهی (μm ۱۰۰ – ۱۰۰) و کسرهای وزنی (%wt μc – ۱) ذرات تنگستن در شبکهی پلیاتیلن سبک محاسبه شد تا اثر اندازه و کسر وزنی بر اثربخشی این ساختارها مورد مطالعه قرار گیرد. بر این اساس، مشخصات کامپوزیتها در جدول ۳–۶ آمده است.

مشخصات مدل طراحی شده با کمک توضیحات بخش ۳–۵ و بر اساس اندازه و کسر وزنی ذرات محاسبه شد. ساختار تکرار شده ی شکل یافته بر اساس مدل در نهایت درون یک ورقه با ابعاد 3mm³ ×۰۰۰× ۱۰۰× جای داده شدند، بنابراین تعداد ذرات معینی از W به شبکه ی LDPE اضافه شد. جدول ۳–۷ طول سلول واحد (۵)، و تعداد سلول واحد درون ورقه (۸) را برای اندازه و کسر وزنیهای متفاوت پرکننده در ساختار کامپوزیت پلیمر نشان میدهد. ورقه با ساختار منظم شبکه در میان چشمه و نقطه ی آشکارسازی و در مرکز در نظر گرفته شد. یک دسته پرتوی موازی با انرژی فوتون در بازه ی MeV ما ما معازی به سمت ورقهای که به حقیقت، این بررسی موقعیتی را می سنجد که در آن فوتونهای تک انرژی موازی به سمت ورقهای که به سلولهای واحد مربعی تقسیم شده است گسیل میشوند.

LDPE: A. Wt% W				737/.	777.	۶۷۳/۲	٨٨٧/٠	٨٤/٠	VVØ/b
ГDБЕ: ү. wt% W				781/.	۶۰۶/۰	\$\Y\\$	· 7/\ ·	₽٨\.	777/3
LDPE: ۶. wt% W							33N/ •	(۲/۰	۵/۴۳۲
LDPE: 3. wt% W				۰/۱۲۷	۲٦٢/٠	PP7/V	८ ७४/ •	۲۷\ •	2/77/Q
LDPE: Y. wt% W				VP • / •	7.1.	₽ ₹¥\\∆			
LDPE: 12 Wt% W	٧٦٠/٠	۲٦٠/٠	२९२/।						
LDPE: V/& Wt% W	73.1.	13.1.	۳/۲						
	MCNP	Exp	(%) ² Q	MCNP	Exp	(%) ^z Q	MCNP	Бхр	(%) ^z Q
بيري		mn ••7			աղ հ			un YY	

دهما ۲۰ اس الم ۲۰ الم ۲۰ من دومان درمان درمان درمان درمان درمان درمان درمان درمان درمسیاته ۵–۲ (۱۵۲ می ارد) در ا

LDPE/W ردلمتيزېپوالا تالمخشه وييخېة ۶-۲ رامىي

تىنېپەلا		(g/cm ³) ريالگې	ترکيب نيمنه) روينه بيک تر يه در يې د بيک تر
LDPE :/ wt% V	%1м бб	708/.	W: ۰/۰۰:۷ ؛ ۲۰/۰۰:۵ ؛ ۲۶۰/۰
LDPE : & wt%	%ји др	7 P P \ •	۲۰۲/۰ :H ; ۲۶۹/۰ :D ; ۲۵۲/۰ :W
CDBE :/• Mt%	[%]М •Р	44.11	۲۸۰\۰ :H ; ۵۶۶\۰ :D ; ۲۲۶\. :W
%1₩ Ø\: ∃4Q	[%]M ØY	7 • 1/1	۲۶۰/۰ :H ، ۷۶۶/۰ :D ، ۷۶۵/۰ :W
. 0.0 :	I %1W •A	٨٦١/١	۲۶۹٬۰: H ; ۲۲۶٬۰: C ; ۲۲۶٬۰: W
%JW &Y: JAG	I %JW &Y	アイン/ /	$\texttt{SP}(\cdot,\cdot;\mathbf{H},\texttt{AP}(\cdot;\mathbf{D},\texttt{VAP}(\cdot;\mathbf{W}$

هر سلول شامل کرهای مرکزی به عنوان ذرات W و فضای اطراف آن به عنوان شبکهی LDPE است. زمانی که فوتون وارد یک سلول میشود، احتمال نسبی اندرکنشها تعیین میکند که با ذرهی پرکننده برخورد کند، یا با شبکه، و یا بدون اندرکنش عبور کند. اگر فوتون یک اندرکنش را تجربه کند، ممکن است جذب یا پراکنده شود. اگر پراکنده شود، ممکن است دستخوش پراکندگیهای متوالی در همان سلول یا سلولهای مجاور گردد تا زمانی که در نهایت جذب شده یا از محیط فرار کند. در نهایت، شار فوتونهای رسیده به محرف محاور گردد تا زمانی که در نهایت جذب شده یا از محیط فرار کند. در نهایت، شار فوتونهای رسیده به مجاور گردد تا زمانی که در نهایت جذب شده یا از محیط فرار کند. در نهایت، شار فوتونهای رسیده به ناحیهی آشکارسازی برای بررسی ویژگیهای حفاظگذاری ماده مورد استفاده قرار می گیرد. به منظور محاسبه ی پارامترهای حفاظ گذاری ماده مورد استفاده قرار می گیرد. به منظور تقسیم بندی میشود که طول هر بازه ۲۰۰۱۰ باشد. مقدار کل تالی به عنوان شار فوتونهای کل آشکارسازی شده در نقطه موردنظر (۱) و تالی که در (۲) باشد. مقدار کل تالی به عنوان شار فوتونهای کل آشکارسازی مدون همود که طول هر بازه ۲۰۰۱۰ باشد. مقدار کل تالی به عنوان شار فوتونهای کل آشکارسازی شده در نقطه موردنظر (۱) و تالی که در (I) در نظر گرفته میشود.

ویژگیهای حفاظ گذاری شامل ضریب تضعیف جرمی، مسافت آزاد میانگین، ضریب عبور، و ضریب انباشت، برای نمونههای LDPE تقویت شده با درصدهای متفاوت ذرات W با کمک MCNP برای ۱۰ انرژی متفاوت بررسی شد. نخست، مقادیر ضریب تضعیف جرمی برای کامپوزیتهای WDPE/W محاسبه شدند (شکل ۳-۱۴). نتایج نشان داد که ضرایب تضعیف جرمی رفتارهای متفاوتی را دنبال میکنند که می توان در سه بازهی انرژی آن را شرح داد: در انرژیهای پایین (کمتر از MeV ۵/۰ برای W)، کاهش شدیدی از ρ/μ را می توان با غلبهی اثر فوتوالکتریک شرح داد؛ در انرژیهای میانی (MeV – ۵/۰ برای W)، کاهش شدیدی از ρ/μ را می توان افزایش انرژی فرودی به دلیل غلبهی فرایند پراکندگی کامپتون نشان می دهد؛ در انرژیهای بالا (بالاتر از MeV با برای W)، فرایند تولید زوج مسئول غلبهی جذب بر پراکندگی و از این رو، رفتار نسبتا ثابت است. علاوه بر این، نتایج نشان داد که ρ/μ با افزایش کسر وزنی W در نمونههای LDPE افزایش می یابد، چنان که آن را می توان بر اساس وابستگی سطح مقطع فرایندهای متفاوت اندر کنش فوتون به Z دانست.


شکل ۳-۴ تغییرات ضریب تضعیف جرمی (cm²/g) به عنوان تابعی از انرژی فوتون برای کامپوزیتهای LDPE/W

از شکل ۳–۱۵ به وضوح می توان دید که تغییرات مسافت آزاد میانگین شدیدا به کسر وزنی W در شبکهی LDPE بستگی دارد، به طوری که درصد بالاتر W به معنای احتمال بالاتر اندرکنش فوتون است و بنابراین، فاصلهی کوتاهتری توسط فوتون بین دو رویداد متوالی طی می شود.



شکل ۳-1۵ تغییرات مسافت آزاد میانگین (cm) به عنوان تابعی از انرژی فوتون برای کامپوزیتهای LDPE/W

شکل ۳–۱۶ (الف-د) ضرایب عبور را برای کامپوزیتهای LDPE/W نشان میدهد. با افزایش انرژی فوتونهای فرودی تا MeV، ضرایب عبور به شدت افزایش مییابد و سپس، روند رو به افزایش به آرامی پیش میرود تا در انرژیهای میانی به مقدار بیشینه میرسد. پس از آن، با کمی کاهش تا انرژی های بالاتر پیش میرود.



شکل ۳–۱۶ ضرایب عبور فوتون کامپوزیتهای LDPE/W برای ذرات با اندازههای (الف) μm ۱۰۰، (ب) μm ۱۰، (ج) ۱۰۰ محاسبه شده توسط کد MCNP

به نظر میرسد دلیل این است که غلبهی جذب فوتوالکتریک در ناحیهی انرژیهای پایین به کاهش شار فوتون در ناحیهی آشکارسازی و همچنین ضرایب عبور کمک میکند. علاوه بر این، در ناحیهی انرژی میانی، افزایش احتمال پراکندگی کامپتون منجر به شار فوتون افزایش یافتهای در ناحیهی آشکارسازی و در نتیجه افزایش ضرایب عبور می شود. در ناحیه ی انرژی های بالا، به دلیل فرایند تولید زوج آهنگ جذب افزایش یافته و منجر به کاهشی تقریبا جزئی در ضرایب عبور می گردد. تغییرات مشاهده شده در ضرایب عبور روندی مشابه را با توجه به تمام اندازه ها و کسر وزنی های W دنبال می کنند در حالی که آهنگ عبور پایین تر برای ذرات ۱۰۰ ما کسر وزنی %tw ۲۵ مشاهده شد. در کسر وزنی کمتر، تضعیف بهتری در اندازه های کوچک تر مشاهده شد در حالی که در کسر وزنی بالاتر ضریب عبور در تمام اندازه ها نسبتا یکسان به دست آمد. زمانی که اندازه ی W افزایش می یابد، ضریب عبور بزرگتر می شود. برای نمونه، تغییرات آهنگ عبور در MeV در کسر وزنی کمتر در بازه ی ۹/۰-۷/۰ است در حالی که در کسر وزنی بالاتر در حدود ۶/۰-آمد. زمانی که اندازه ی تفاوت میان ضرایب عبور در کسر وزنی «the که در کسر وزنی بالاتر در اندازه های کوچک ر کمتر قابل توجه است.

پرکنندههایی با اندازهی ۱۰۰ nm ۱۰۰ به معنای ساختارهای توزیع شدهی همگن تر است که ضرایب عبور کمتری را به دلیل تعداد بیشتر ذرات W نشان می دهد که سبب می شود احتمال اندرکنش بین تابش و ذرات W بیشتر از احتمال تابش و شبکه باشد. کاهش نسبی عبور (RRT) در حالی که کسر وزنی ذرات W از %wt ا به ۵۰ wt

RRT =
$$\frac{T_{25\%}-T_{1\%}}{T_{1\%}} \times 100$$
 (۲۶-۳)
که $T_{1\%} \times 100 \times 100$ و ۱ است. ارزیابی
که $T_{50\%}$ و $T_{1\%}$ ضرایب عبور برای زمانی هستند که کسر وزنی W به ترتیب %tw ۲۵ و ۱ است. ارزیابی
کمیت برای تمام اندازههای ذرات W نشان میدهد که مقدار بیشینهی RRT در ناحیهی انرژیهای پایین
کمیت برای تمام اندازههای ذرات W نشان میدهد که مقدار بیشینهی RRT در ناحیهی انرژیهای پایین
(۱۰۷۵ MeV) رخ میدهند و به احتمال زیاد به دلیل اعداد اتمی بالاتر نمونهها است. بیشینهی RRT به
صورت ۸/۰۸٪، ۲/۸٪، ۸/۸٪، ۹/۸٪، به ترتیب برای ذرات mm ۱۰۰ µm ۱۰ و ۲۰۰ به
دست آمد.

¹ Relative reduction of transmission

ضرایب انباشت شار (B) همچنین برای تمام اندازهها و کسر وزنیهای W محاسبه شد که در شکل ۳-۱۷ (الف-د) نشان داده شده است.



شکل ۳–۱۷ ضرایب انباشت شار فوتون کامپوزیتهای LDPE/W برای ذرات با اندازههای (الف) μm (ب) ۱۰۰ (ب) MCNP (ج) MCNP (ج) ۱۰۰ nm (ج)

به روشنی می توان دید که ضریب انباشت شار قویا تا یک مقدار بیشینه در MeV ۰/۱ افزایش یافته، سپس شروع به کاهش می کند. غلبه یاثر فوتوالکتریک منجر به آهنگ جذب بیشینه توسط نمونه در ناحیه ی انرژی های پایین می شود. در ناحیه یانرژی های بالاتر، به طور مشابه، تولید زوج به عنوان فرایند جذب دیگر فوتون غالب است. غلبه ی جذب بر پراکندگی منجر به فوتون کمتر رسیده به نقطه ی آشکارسازی در نتیجه ضرایب انباشت شار کمتر می گردد. در ناحیه ی انرژی میانی، غلبه ی پراکندگی کامپتون تنها به کاهش انرژی فوتون به دلیل پراکندگی کمک میکند. این فرایند منجر به وجود طولانی تر فوتون، احتمال بالاتر فوتون برای فرار از نمونه، و در نتیجه مقدار بالاتر ضریب انباشت شار می گردد. روشن است که ضرایب انباشت شار در بازهی وسیعی تقریبا از ۱ تا ۱۲/۵ تغییر میکند.

مطابق با این یافته ها، می توان گفت که مقادیر بیشینه ی ضریب انباشت شار با افزایش کسر وزنی برای تمام کامپوزیت های میکرو و نانو ساختار کاهش می یابد. اگر چه، این کاهش در نمونه هایی با اندازه های کو چک تر کندتر رخ می دهد. این اثر می تواند با در نظر گرفتن تغییرات در مقادیر بیشینه ی ضرایب انباشت شار بر حسب کسر وزنی پرکننده از ۱ تا ۲۵ درصد مشاهده شود به طوری که مقادیر بیشنه از ۱۲/۵ تا ۶/۸ در ۲ مسب کسر وزنی پرکننده از ۱ تا ۲۵ درصد مشاهده شود به طوری که مقادیر بیشنه از ۱۲/۵ تا ۶/۸ در ۲ می ۱۰۰۰، از ۲/۳ تا ۱/۱ در ۲ سا ۱۰۰، از ۱۱/۹ تا ۳/۳ در ۲ سا ۱۰ و از ۱۰/۸ تا ۷/۳ در ۲۰۰ سمیایی این را می توان با این حقیقت شرح داد که در ساختارهای تقویت شده با ذرات بزرگ تر، ترکیب شیمیایی اثری قابل توجه بر خواص تضعیف دارد در حالی که در ساختارهای متناظر با اندازه ی کوچک تر اثر ترکیب شیمیایی به دلیل اثر اصلی یعنی همگنی توزیع ذرات W در شبکه LDPE کمتر است. این محاسبات همچنین برای ساختارهای LDPE تقویت شده با ذرات سایر فلزات برای کسر وزنی %۲ سازهی ۱۰ م ۱۰۰ محاسبه شد که مقادیر آن در جدول ۳–۷ ارائه شده است.

0, 1	• • • • • • • • • • • • • • • • • • • •	0,	0,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,	0,	1
مادہ	انرژی (MeV)	В	σ _B /B	Т	στ/Τ
	۰/۰۱۵	۱/۸۱۵	•/••٢	•/١٣۵	•/• \ \
	•/•۵	4/74.	•/•• ١	۰/۲۷۸	•/•• 1
	•/1	۱ • /۲۳۹	•/•• 1	•/۴١٢	•/••٨
	•/۵	۲/۳۳۶	•/••٢	•/۶۴۴	•/••٨
LDPE/Pb	١	1/194	•/••٣	•/٧١٩	•/••٢
	٢	١/۶١٨	•/••۴	• /V ۵ ۱	•/••1
-	۵	1/717	•/••)	•/۶٩١	•/•• 1
-	۱۰	1/110	•/•))	•/۶٩•	• / • • 1
	۱۵	1/111	•/••۶	٠/۶۵٩	•/••۶
LDPE/Zn	۰/۰۱۵	1/947	•/•))	•/١٧٨	• / • • 1

جدول ۳–۷ ضرایب عبور و ضریب انباشت برای LDPE در کسر وزنی %۵۰ wt و اندازهی nm فلزات

	•/•۵	۴/۳۳۸	• / • • 1	•/٣١١	•/••٢
	• / ١	۱۰/۴۱۵	•/••٣	•/۴۶۵	•/••٣
	•/۵	۲/۴۰۶	•/•• 1	・/۶A \	•/••۴
	١	١/٩١١	•/••٨	٠/٧۴٩	•/••۵
	٢	١/٦١٩	• / • • ٨	۰/۲۹۸	• / • • ۶
	۵	١/٨۴۴	•/••٢	•/Y \ \	• / • • ۶
	۱.	۱/۲۵۰	• / • • 1	۰/۷۲۵	٠/٠٠١
-	۱۵	١/١١٢	•/•• 1	•/۶٩٨	•/•• ١
	۰/۰۱۵	۲/۱۱۰	•/•• 1	•/511	•/• \ \
	•/•۵	4/422	•/••٢	•/٣۶۵	•/•• ١
	• /)	۱۰/۰۰۶	•/••٢	٠/۴٧٩	•/••٣
	•/۵	۲/۳۶۱	•/••٣	۰/۷۱۳	٠/٠٠١
LDPE/Ti	١	١/٧١۶	•/••٣	۰/ ۲۶ ۹	•/••٢
	٢	۱/۲۵۵	•/••۶	۰/٨ <i>٠۶</i>	•/••٣
	۵	۱/۲۵۳	•/••۶	•/४९९	•/••٣
1	١.	١/٢۶٩	•/•))	• /۷۸۶	•/•• ١
	۱۵	١/١١٩	٠/٠٠٩	۰/۷۵۴	۰/۰۰۲

۸-۳ پارامترهای حفاظ گذاری برای کامپوزیتهای تقویت شده با

میکروذرات و نانوذرات اکسید فلزی

مطالعه ی حاضر به بررسی اثرات چهار اکسید فلزی شامل PbO، WO3، و ZnO، O2 و TiO2 که به طور عمومی برای تقویت کامپوزیت های پلیمری مورد استفاده قرار می گیرند، بر پارامترهای حفاظ فوتون شبکه ی LDPE می پردازد. توضیح کامپوزیت ها، چگالی، سنگینی، ترکیبات عنصری، و کسرهای وزنی در جدول ۳–۸ داده شده اند. مطابق با مدل ارائه شده، ما هر ذره ی PbO، WO3، و TiO2 با قطر mm ۱۰۰۰، mm ۱، و nm ۱۰۰ به عنوان کره درون مکعبی در نظر گرفتیم که طول آن در تطابق با کسر وزنی پرکننده در ماتریس تعیین شد. علاوه بر این، ذرات اکسید فلزی در شبکه ی LDPE با کسر وزنی های ۲۰۵، و ۲۰۵ با گرفته شدند. ساختار تکراری تشکیل یافته به طور کلی درون یک ورقهی mm³ ۰/۰×۱۰۰×۲۰۰ جای داده شد.

ترکیب عنصری (عنصر: کسر وزنی)	سنگینی	چگالی	كامپوزيت	
	('/.)	(g/cm ³)		
Pb: •/488; O: •/•84; C: •/424; H: •/•48	٩/١۵٨	١/•٣٩	۹۰ wt% LDPE:۱۰ wt% PbO	
Pb: $\cdot/$ ۶۷۴; O: $\cdot/\cdot \Delta$ ۲; C: $\cdot/$ ۲۳ Δ ; H: \cdot/\cdot ۳۹	۱۰/۷۵۶	١/٢٢٠	۷۵ wt% LDPE:۲۵ wt% PbO	
Pb: \cdot/λ TF; O: \cdot/\cdot FF; C: \cdot/\cdot AF; H: \cdot/\cdot AF	10/188	١/٧١٩	۵۰ wt% LDPE:۵۰ wt% PbO	
W: $\cdot/$ $\forall \lambda \cdot$; O: \cdot/\cdot 99 ; C: $\cdot/$ 477 ; H: \cdot/\cdot 747	٩/١٢۵	۱/۰۳۵	۹۰ wt% LDPE:۱۰ wt% WO ₃	
W: $\cdot/\Delta \Lambda T$; O: $\cdot/\Lambda\Delta T$; C: $\cdot/\Upsilon \Lambda$; H: $\cdot/\cdot \Upsilon \Lambda$	1./848	۱/۲ . ۷	۷۵ wt% LDPE:۲۵ wt% WO ₃	
W: $\cdot/\gamma \cdot \lambda$; O: $\cdot/\lambda \Delta$; C: $\cdot/\cdot \mathfrak{A}$; H: $\cdot/\cdot \lambda \Delta$	14/422	١/۶٧٠	۵۰ wt% LDPE:۵۰ wt% WO ₃	
Zn: $\cdot/190; O: \cdot/\cdot fh; C: \cdot/8f9; H: \cdot/1\cdoth$	٩/•٨٩	1/• 31	۹۰ wt% LDPE:۱۰ wt% ZnO	
Zn: $\cdot/$ ξ AA; O: $\cdot/$ 1 ζ ; C: $\cdot/$ Δ ξ 1 ; H: $\cdot/$ \cdot 9 1	۱۰/۵۲۱	१/१९٣	۷۵ wt% LDPE:۲۵ wt% ZnO	
Zn: \cdot/Δ 99; O: $\cdot/1$ 49; C: $\cdot/1$ 77 \cdot ; H: \cdot/\cdot 77	14/784	١/۶١٨	۵۰ wt% LDPE:۵۰ wt% ZnO	
Ti: •/\۴۵; O: •/•٩۶; C: •/۶۵\; H: •/\•Λ	٩/•٣۵	۱/۰۲۵	۹۰ wt% LDPE: ۱۰ wt% TiO ₂	
Ti: •/۲۹۳; O: •/۱۹۵; C: •/۴۳۹; H: •/•۷۳	1./261	1/177	V& wt% LDPE:Y& wt% TiO ₂	
Ti: •/۴۴۴; O: •/۲۹۶; C: •/۲۲۲; H: •/•۳۸	18/828	1/545	۵۰ wt% LDPE:۵۰ wt% TiO ₂	

جدول ۳-۸ شرح کامپوزیتهای LDPE پر شده با ذرات اکسید فلزی

در این بررسی، ضخامت ماده تا حد امکان کم در نظر گرفته شد تا ضرایب انباشت به حداقل مقدار کاهش یابد. جدول ۳-۹ طول مکعب و تعداد سلولهای واحد برای اندازهها و کسر وزنیهای مختلف پرکننده درون شبکه را نشان میدهد. مشاهده میشود که با کوچک شدن اندازه و افزایش کسر وزنی ذرات اکسید فلزی درون ساختار یلیمر، تعداد سلولهای واحد افزایش یافته و ابعاد سلول کوچک می شود.

	- ,,, -		
كامپوزيت	اندازه ذره (cm)	طول ضلع مكعب (cm)	تعداد مكعبها
	1×1r	٣/۶٣۴×١٠ ^{-٢}	1/• 4×1 • 8
۹۰ wt% LDPE:۱۰ wt% PbO	1×14	٣/۶٣۴×١٠ ^{-۴}	1/• 4×1•17
	$1 \times 1 \cdot - 2$	٣/۶٣۴×١٠ ^{-۵}	1/• 4×1•10
VA wt% I DDE: VA wt% Pho	1×1۲	۲/۵۳ ۸ ×۱۰ ^{-۲}	۳/•۶×۱۰۶
	1×1+	۲/۵۳۸×۱۰ ^{-۴}	۳/۰۶×۱۰ ^{۱۲}

جدول ۳-۹ مشخصات شبکهی LDPE و پرکنندههای اکسید فلزی در شبیهسازی MC

	1×1 • -0	$r/drak \times 1 \cdot -d$	٣/•۶×١•١٥
	1×1r	۱/۷۹۶×۱۰ ^{-۲}	۸/۶۳×۱۰۶
۵۰ wt% LDPE:۵۰ wt% PbO	1×1k	۱/۷۹۶×۱۰ ^{-۴}	۸/۶۳×۱۰ ^{۱۲}
	1×1 • -0	۱/۷۹۶×۱۰ ^{-۵}	۸/۶۳×۱۰۱۵
	1×1 • -۲	۳/۳•۸×۱۰ ^{-۲}	۱/۳ ۸ ×۱۰۶
۹۰ wt% LDPE:۱۰ wt% WO ₃	1×1 _k	۳/۳• ۸× ۱ • - ^۴	۱/۳ ۸ ×۱۰ ^{۱۲}
	1×1 • -0	$\nabla / \nabla \cdot \Lambda \times 1 \cdot -\Delta$	۱/۳ ۸ ×۱۰ ^{۱۵}
	1×1 • -r	۲/۳۱۵×۱۰ ^{-۲}	4/•4×1•8
۷۵ wt% LDPE:۲۵ wt% WO3	1×1k	۲/۳۱۵×۱۰ ^{-۴}	4/+4×1+11
	1×1 • -0	r/r 1 $\Delta \times$ 1+- Δ	4/. 7×1.10
	1×1r	1/849×1+ ⁻⁷	۱/۱۲×۱۰ ^۷
۵۰ wt% LDPE:۵۰ wt% WO3	1×1+	1/849×1+-4	1/17×1.1r
	<i>۱×۱۰-</i> ۵	۱/۶۴٩×۱۰ ^{-۵}	1/17×1.18
	1×1r	٣/• ۵ ٣×١• ^{-٢}	۱/V۶×۱۰۶
۹۰ wt% LDPE:۱۰ wt% ZnO	1×1k	٣/• ۵ ٣×١• ^{-۴}	۱/V۶×۱۰ ^{۱۲}
	1×10	$r/\cdot \Delta r \times 1 \cdot -\Delta$	۱/V۶×۱۰ ^{۱۵}
	1×1r	۲/ <i>۱۴</i> ۳×۱۰ ^{-۲}	$\Delta/\cdot \Lambda \times 1 \cdot {}^{\wp}$
۷۵ wt% LDPE:۲۵ wt% ZnO	1×1k	۲/ <i>۱۴</i> ٣×۱۰ ^{-۴}	$\Delta/\cdot \Lambda \times 1 \cdot 17$
	1×1 • -0	۲/147×1۵	$\Delta/\cdot \Lambda \times 1 \cdot 1^{\Delta}$
	1×1r	1/2TV×1r	۱/۳ ۸ ×۱۰ ^۷
۵۰ wt% LDPE:۵۰ wt% ZnO	1×1k	1/2TV×1+-4	۱/۳ ۸ ×۱۰ ^{۱۳}
	1×1 • -0	$1/\Delta TV \times 1 \cdot -\Delta$	۱/۳ ۸ ×۱۰ ^{۱۶}
	1×1r	۲/۷۸۵×۱۰ ^{-۲}	$\gamma/\gamma\gamma$
۹۰ wt% LDPE:۱۰ wt% TiO ₂	1×1k	۲/۷۸۵×۱۰ ^{-۴}	7/71×1.17
	1×1 • -0	r/r	r/r r r r r r r
	1×1 • -r)/98)×)+ ⁻⁷	۶/۶۳×۱۰۶
۷۵ wt% LDPE:۲۵ wt% TiO2	1×1 _k	1/981×1 ⁴	۶/۶۳×۱۰ ^{۱۲}
	1×1 • -0	۱/٩۶١×١٠ ^{-۵}	۶/۶۳×۱۰۱۵
	1×1 • -۲	1/42•×1•-2	۱/۷۵×۱۰ ^۷
۵۰ wt% LDPE:۵۰ wt% TiO2	1×14	1/42•×1•-4	۱/۷۵×۱۰ ^{۱۳}
	1×10	1/42 • × 1 • -0	۱/۲۵×۱۰ ^{۱۶}

ارتباط معکوسی میان ضریب تضعیف خطی و ضخامت نیم لایه وجود دارد که تضعیف بر حسب نفوذ فوتونها از ضخامت معینی از ماده را نشان میدهد. تغییرات µ و HVL به عنوان تابعی از انرژی فوتون در شکل ۳-



LDPE/ZnO، و شكل ۲۱-۳ (الف-ج) براي LDPE/TiO2 نشان داده شده است.

شکل ۳–۱۸ ضرایب تضعیف خطی و ضخامت نیم لایه برای کامپوزیتهای LDPE پر شده با %۱۰ ۳۲، ۲۵، و ۵۰ از ذرات PbO با اندازهی (الف) μm (ب) ۱۰۰ (ب) μm (وج) ۱۰۰ سا ۱۰ و ۱۰۰ ایه عنوان تابعی از انرژی فوتون فرودی

میتوان دید که مقادیر µ به طور ثابت با افزایش انرژی کاهش مییابد که تقریبا برای کامپوزیتهای EDPE پر شده با تمام چهار ذرهی اکسید فلزی در اندازهها و کسر وزنیهای متفاوت مشابه است. لازم به ذکر است که مقادیر بالاتر µ برای نمونههای پر شده با ذرات چگال تر مشاهده میشود. همچنین میتوان از نمودارها دریافت که کاهش اندازهی ذره سبب افزایش مقادیر µ میشود. برای مثال، انرژیهای فوتون فرودی تا MeV ۵/۰ در بازهی انرژیهای پایین برای PbO جای میگیرند. بنابراین، در MeV ، مقدار µ برای کامپوزیت LDPE پر شده با ذرات OPO برابر با ¹⁻ وقتی اندازهی ذره μm ۱۰۰ باشد، ^۱-۱/۶۳ cm^{-۱} ، ۱/۵ و ۳/۷۹ (متناظر با ۳/۱۰ wt%، و ۵۰) است وقتی اندازهی ذره μm ۱ باشد، ^۱-۱/۶۸ cm^{-۱} و ۴/۳۵ (متناظر با ۳/۱۰ wt%، و ۵۰) است وقتی اندازهی ذره ۱۰۰ nm ذره.



شکل ۳–۱۹ ضرایب تضعیف خطی و ضخامت نیم لایه برای کامپوزیتهای LDPE پر شده با %۱۰ ۳۱، ۲۵، و ۵۰ از ذرات به عنوان تابعی از انرژی فوتون فرودی WO₃ (الف) WD، (ب) μm (ب) ۱۰۰ nm دو (ج)

رفتاری تقریبا یکسان نیز در تمام انرژیهای فوتون مشاهده میشود، که بویژه در ناحیهی انرژیهای پایین مشخص است (تا ΜeV ۵/۰). در بازهی انرژیهای کم، افزودن ذرات اکسید فلزی به شبکهی LDPE روندهای مشابهی با کاهش اندازهی ذره نشان میدهد. نکتهی مهمی که باید شرح داده شود چگونگی تغییر مقادیر μ با کسر وزنی ذرات در اندازههای متفاوت است. در بازهی انرژی کم، به روشنی میتوان دید که اندازهی ذره نقش موثرتری نسبت به کسر وزنی ذرات در تضعیف فوتون ایفا میکند. این امر احتمالا به دلیل این حقیقت است که ساختارهای یکنواختی از توزیع ذرات کوچکتر درون شبکهی پلیمر حاصل میشود. در انرژیهای میانی و بالا، اگر چه افزایش ۱ μm به جای ۱۰۰ به شبکه سبب افزایش در مقادیر μ میشود، هیچ تغییر قابل توجهی در استفاده از ذرات ۱۰۰ nm به جای ۱ μm نمی توان دید.



شکل ۲۰-۲ ضرایب تضعیف خطی و ضخامت نیم لایه برای کامپوزیتهای LDPE پر شده با %۲۸ ، ۱۰ ۲۵ و ۵۰ از ذرات با اندازهی (الف) μm (ب) ، (ب) μm (ب ۱۰۰ موری ای ۱۰۰ ۲۰ به عنوان تابعی از انرژی فوتون فرودی

به منظور بررسی توانایی حفاظ گذاری کامپوزیت، محاسبات HVL برای مقایسهی ضخامتی که شدت گاما را تا نصف مقدار اولیه در اندازه و کسر وزنیهای متفاوت کاهش میدهد انجام شد. همانطور که میتوان دید، مقادیر HVL مستقیما متناسب با ¹⁻μ هستند به طوری که افزایش در HVL با کاهش در μ به عنوان تابعی از انرژی فوتون فرودی مشاهده میشود. برای نمونه، وقتی یک فوتون MeV، ۱۵ وارد یک ماده میشود، مقادیر HVL کامپوزیت LDPE تقویت شده با ذرات PbO برابر با ۳۴/۷۱ cm ۲۵/۸۶، و ۱۱/۲۳ (به ترتیب برای %۲۰ ۱۰، ۲۵، و ۵۰) است وقتی اندازهی ذره ۲۱ ۱۰۰ باشد، ۳۱/۶۹ cm، ۲۷/۶۹ cm، ۲۲/۶۹ cm، ۲۲/۶۹ ۲۳/۹۹، و ۱۰/۹۷ (به ترتیب برای %۲۰ ۱۰، ۲۵، و ۵۰) است وقتی اندازهی ذره ۲۳ ۱ باشد، و ۲۷/۶۹ cm، ۲۷/۶۹ cm، ۲۲/۶۹ cm، ۲۲/۶۹ cm، ۲۰/۳۲، و ۲۲/۶۹



شکل ۳–۲۱ ضرایب تضعیف خطی و ضخامت نیم لایه برای کامپوزیتهای LDPE پر شده با %۱۰ wt، ۲۵، و ۵۰ از ذرات به عنوان تابعی از انرژی فوتون فرودی TiO₂ ۱۰ (ب) μm (با ۱۰۰ nm به عنوان تابعی از انرژی فوتون فرودی

شکل ۳-۲۲ (الف-ج) برای LDPE/PbO، شکل شکل ۳-۳۲ (الف-ج) برای LDPE/WO₃، شکل ۳-۲۴ (الف-ج) برای LDPE/TiO₂، شکل ۳-۲۴ (الف-ج) برای LDPE/TiO₂ خرایب تضعیف جرمی را بر حسب (الف-ج) برای فوتون فرودی نشان میدهد. برای اغلب بخشها، با افزایش انرژی μ/μ کاهش مییابد. در عین حال، نتایج نشان میدهد که این مقادیر با افزایش اندازه و غلظت افزایش مییابند. اگرچه μ/μ برای غلظت %wt ۵۰ فیلر در LDPE بالاتر از ۱۰ و ۲۵ درصد است، افزایش در کسر وزنی از ۳۵ ۲۵ تا ۳۵ wt منجر به کاهش قابل توجه در µ/p برای فوتون ۱۵ MeV می شود وقتی اندازهی این ذرات تا ۱۰۰ m کاهش می یابد.



شکل ۲–۲۲ ضرایب تضعیف جرمی برای کامپوزیتهای LDPE پر شده با %۲۰ ، ۲۵، و ۵۰ از ذرات PbO با اندازهی (الف) ۱۰۰ μm (ب) ، (ب) μm (و (ج) ۱۰۰ به عنوان تابعی از انرژی فوتون فرودی





شکل ۳–۲۳ ضرایب تضعیف جرمی برای کامپوزیتهای LDPE پر شده با %۱۰ wt، و ۵۰ از ذرات WO₃ با اندازهی (الف) ۱۰۰ µm (، (ب) µm ، و (ج) ۱۰۰ nm به عنوان تابعی از انرژی فوتون فرودی



شکل ۲۳–۲۴ ضرایب تضعیف جرمی برای کامپوزیتهای LDPE پر شده با %۲۱ ۱۰، ۲۵، و ۵۰ از ذرات ZnO با اندازهی (الف) ۱۰۰ µm (ب) ۱۰۰ و (ج) ۱۰۰ به عنوان تابعی از انرژی فوتون فرودی



شکل ۳–۲۵ ضرایب تضعیف جرمی برای کامپوزیتهای LDPE پر شده با %۱۰ wt، و ۵۰ از ذرات TiO₂ با اندازهی (الف) μm (ب) ۱۰۰ μm، و (ج) ۱۰۰ سه عنوان تابعی از انرژی فوتون فرودی این امر را می توان به اشباع تضعیف پرتو وقتی غلظت پرکننده از یک مقدار معین بیشتر است نسبت داد،

که در این مورد، ضریب تضعیف جرمی یعنی نسبت مقادیر µ به ρ به روشنی برای WO₃ و WO₃ و 50wt% LDPE/100 nm PbO کمتر از کامپوزیتهای متناظر آن با غلظتهای ۳۵ wt% و ۱۰ wt% است. عدد اتمی موثر به انرژی فوتون فرودی و ساختار اتمی مادهی پراکننده بستگی دارد که توضیح خوبی از

اندرکنشهای فوتون و تضعیف ارائه میدهد. تغییرات Zeff بر حسب انرژی فوتون برای تمام نمونهها در شکل ۲۹-۳ (الف-ج) برای LDPE/PbO، شکل ۳-۲۷ (الف-ج) برای LDPE/WO3، شکل ۳-۲۸ (الف-ج) برای LDPE/ZnO، و شکل ۳-۲۹ (الف-ج) برای LDPE/TiO2 نشان داده شده است. رفتار Zeff در نمونههای LDPE/ZnO تقویت شده با ذرات اکسید فلزی در نواحی مختلف انرژی متفاوت است.



شکل ۳–۲۶ عدد اتمی موثر برای کامپوزیتهای LDPE پر شده با ۱۰ wt، ۲۵، و ۵۰ از ذرات PbO با اندازهی (الف) ۱۰۰ μm (ب) ۱۰۰ μm ، و (ج) ۱۰۰ به عنوان تابعی از انرژی فوتون فرودی

اگرچه Z_{eff} با افزایش انرژی در ناحیه انرژیهای کم بالا میرود، با افزایش انرژی فوتون در ناحیه انرژیهای میانی این کمیت دچار کاهش میشود. در ناحیهی انرژیهای کم میتوان این پدیده را با بستگی معکوس مسلح مقطع فوتوالکتریک به عنوان فرایند غالب بر انرژی فوتون شرح داد. در ساختارهای تقویت شده با ذرات چگالی بالا (OP و WO3)، نقش قابل توجه پراکندگی همدوس احتمالا مسئول مقادیر بسیار پایین درات چگالی بالا (OP و WO3)، نقش قابل توجه پراکندگی همدوس احتمالا مسئول مقادیر بسیار پایین درات چگالی بالا (OP و WO3)، نقش قابل توجه پراکندگی همدوس احتمالا مسئول مقادیر بسیار پایین در انرژی های میانی میتوان فرایند غالب در این، سطح مقطع کامپتون تقریبا مستقل از انرژی به عنوان فرایند غالب در انرژیهای میانی میتواند یکی از دلایل در پس پرده رفتار Teff باشد. با افزایش انرژی فوتون در ناحیه یا انرژی بالا، مقادیر Teff به کندی افزایش مییابند که احتمالا به دلیل غلبه تولید زوج در این ناحیه اتفاق انرژی بالا، مقادیر Teff به کندی افزایش مییابند که احتمالا به دلیل غلبه تولید زوج در این ناحیه اتفاق

با این وجود، با در نظر گرفتن اثر غلظت ذرات میتوان دید که افزایش کسر وزنی پرکننده سبب افزایش قابل توجه در نرخ اندرکنش و در نتیجه افزایش Z_{eff} میگردد. از سوی دیگر، کاهش اندازهی پرکننده سبب بهبود در یکنواختی حجم میشود که باز هم احتمال اندرکنش فوتون را افزایش میدهد. برای نمونه، در wtw /۱۰ مقادیر Z_{eff} برای کامپوزیت LDPE/PbO برابر با ۴/۴۸، ۵/۵۷، و ۵/۷۷ (به ترتیب برای %tw ۱۰، ۲۵، و ۵۰) وقتی اندازهی ذره μm ۱۰۰ است، ۹/۶۶، ۵/۱۲، و ۳۴/۳۹ (به ترتیب برای ۲۵، ۵۰، ۵۰ و ۵۰) وقتی اندازهی ذره mm ۱ است، و ۲۱/۸۸، ۲۱/۸۹، ۳۹/۴۰ (به ترتیب برای ۳۹/۰ ، ۵۰) و ۵۰



شکل ۳–۲۷ عدد اتمی موثر برای کامپوزیتهای LDPE پر شده با %۱۰ wt، و ۵۰ از ذرات WO₃ با اندازهی (الف) ۱۰۰ μm ۱۰۰، (ب) μm ۱۰ و (ج) ۱۰۰ سه عنوان تابعی از انرژی فوتون فرودی



شکل ۲–۲۸ عدد اتمی موثر برای کامپوزیتهای LDPE پر شده با ۳۵٬ ۱۰ ۲۵٬ و ۵۰ از ذرات ZnO با اندازهی (الف) ۱۰۰ μm ۱۰۰، (ب) μm ۱۰ و (ج) ۱۰۰ به عنوان تابعی از انرژی فوتون فرودی

روندهای رفتاری مقادیر Z_{eff} برای افزایش ذرات WO₃ به شبکهی LDPE تقریبا با مقادیر Z_{eff} با مقادیر LDPE/PbO و TiO₂ و TiO₂ و TiO₂ و Z_lm نسبتا نزدیکی را با افزلیش انرژی فوتون نشان میدهند. مقادیر Z_{eff} بالاتر برای LDPE پر شده با OPG و WO₃ نسبت به ZnO و TiO₂ مشاهده فوتون نشان میدهند. مقادیر Z_{eff} بالاتر برای LDPE پر شده با OPG و WO₃ نسبت به ZnO و TiO₂ مشاهده می شود. این امر احتمالا به دلیل تعداد بیشتر اتمها و انرژی پیوند بزرگتر در لایههای داخلی رخ میدهد که می شود. این امر احتمالا به دلیل تعداد بیشتر اتمها و انرژی پیوند بزرگتر در لایههای داخلی رخ میدهد که می شود. این امر احتمالا به دلیل تعداد بیشتر اتمها و انرژی پیوند بزرگتر در نایههای داخلی رخ میدهد که می شود. این امر احتمالا به دلیل تعداد بیشتر اتمها و انرژی پیوند بزرگتر در نایههای داخلی رخ میدهد که می شود. این امر احتمالا به دلیل تعداد بیشتر اتمها و انرژی پیوند بزرگتر در ایههای داخلی رخ میدهد که می شود. این امر احتمالا به دلیل تعداد بیشتر اتمها و انرژی پیوند بزرگتر در ایههای داخلی رخ میدهد که می شود. این امر احتمالا به دلیل تعداد بیشتر اتمها و انرژی پیوند بزرگتر در ایههای داخلی رخ میدهد که می توان آن را با در نظر گرفتن جذب لبه که که درات اکمید فلزی شرح داد. به طور کلی، می توان گفت مقادیر Z_{eff} بالاتر برای ساختارهای چگال تر تقویت شده با ذرات کوچکتر مشاهده می شود.



شکل ۲۹–۲۹ عدد اتمی موثر برای کامپوزیتهای LDPE پر شده با ۳۱% ۲۰، ۲۵، و ۵۰ از ذرات TiO₂ با اندازهی (الف) ۱۰۰ μm ۱۰۰، (ب) μm ۱۰ و (ج) ۱۰۰ به عنوان تابعی از انرژی فوتون فرودی

همانطور که در شکل ۳–۳۰ (الف-ج) برای LDPE/PbO، شکل ۳–۳۱ (الف-ج) برای LDPE/WO₃، شکل ۳–۳۱ (الف-ج) برای LDPE/TiO₂ و شکل ۳–۳۳ (الف-ج) برای LDPE/TiO₂ نشان داده شده است، اثر اندازهی ذره و کسر وزنی بر تغییرات N_{el} بسیار به آنچه برای Z_{eff} مشاهده شد نزدیک است. در حقیقت، N_{el} اندازهی ذره و کسر وزنی بر تغییرات ای N_{el} بسیار به آنچه برای Z_{eff} مشاهده شد نزدیک است. در حقیقت، N_{el} تعداد الکترونهای درون ساختار را نشان میدهد که احتمال اندرکنش فوتون با سیستم را فراهم میکنند. تغییرات N_{el} می درون ساختار را نشان میدهد که احتمال اندرکنش فوتون با سیستم را فراهم میکنند. است. با این وجود، بیشینه آهنگ اندرکنش زمانی مشاهده می شود که غلظت ذرات ۵۰ wt و اندازهی آنها ۲۰۰ است. با این وجود، بیشینه آهنگ اندرکنش زمانی مشاهده می شود که غلظت ذرات ۸۰ wt و اندازه میکند. آنها ۲۰۰ ساین در مانی مشاهده می شود که غلظت درات ماه ۲۰۰ و اندازه می کند.



شکل ۳-۳۰ چگالی الکترونی موثر برای کامپوزیتهای LDPE پر شده با %۲۵ ،۱۰ «۵۰، و ۵۰ از ذرات PbO با اندازهی (الف) ۱۰۰ µm ، (ب) ۱۳ ، و (ج) ۱۰۰ به عنوان تابعی از انرژی فوتون فرودی

بنابراین، می توان گفت که تفاوت اصلی میان N_{el} برای نمونهها در انرژیهای پایین و بالا مشاهده می شود و



تغییر قابل توجهی در بازهی انرژیهای میانی مشاهده نمیشوند.



شکل ۳-۳۱ چگالی الکترونی موثر برای کامپوزیتهای LDPE پر شده با ۱۰ wt%، و ۵۰ از ذرات WO₃ با اندازهی (الف) ۱۰۰ µm، (ب) ۱۳ ۱۰، و (ج) ۱۰۰ سه عنوان تابعی از انرژی فوتون فرودی



(الف) μm ۱۰۰، (ب) μm ۱، و (ج) nw ۲۰۰ به عنوان تابعی از انرژی فوتون فرودی

این را میتوان با احتمالات بیشتر پراکندگی کامپتون در مقایسه با انرژیهای مجاور شرح داد که تقریبا مستقل از عدد اتمی ساختار است. اگرچه Nel نیز به تصویرسازی احتمال اندرکنش فوتون- ماده کمک میکند زیرا با حضور ذرات باردار در واحد جرم مرتبط است، عدد بزرگ آن (۱۰^{۳۳}–۱۰^{۳۴}) تحلیل نتایج را مشکل میسازد [۱۵۸].



شکل ۳-۳۳ چگالی الکترونی موثر برای کامپوزیتهای LDPE پر شده با %۲۵ ،۱۰ wt، و ۵۰ از ذرات TiO₂ با اندازهی (الف) ۱۰۰ µm (ب) ۱۰۰ ، و (ج) ۱۰۰ به عنوان تابعی از انرژی فوتون فرودی

شکل ۳-۳۴ (الف-ج) برای LDPE/PbO، شکل ۳-۳۵ (الف-ج) برای LDPE/WO₃، شکل ۳-۳۶ (الف-ج) برای LDPE/ZnO، و شکلهای ۳-۳۷ (الف-ج) برای LDPE/TiO₂ تغییرات ضریب عبور برای کامپوزیت#های تقویت شده با میکرو و نانو ذرات با سه غلظت %۲۰ سام، ۲۵، و ۵۰ بر حسب انرژی فوتون فرودی را نشان میدهد. همانطور که انتظار میرود، ضریب عبور با افزایش انرژی فوتون فرودی در تمام نمونهها افزایش مییابد. تفاوتهای قابل توجه بین نمونههای پر شده با ذرات با اندازههای متفاوت در بازهی انرژیهای کم وجود دارد، که پس از آن بیش از ۹۰٪ از فوتونهای فرودی از ضخامت ماده عبور میکنند که حفاظ را غیرموثر میکند. از آنجا که بازهی انرژی کم برای هر اکسید فلزی به طور جداگانه تعیین میشود، با تغییر انرژی فوتون متفاوت عمل میکنند.



سکل ۳۳–۳۴ ضرایب عبور برای کامپوزیتهای LDPE پر شده با ۱۰ wt%، و ۵۰ از ذرات PbO با اندازهی (الف) μm ۱۰۰، (ب) μm ، و (ج) ۱۰۰ به عنوان تابعی از انرژی فوتون فرودی

برای PbO (انرژیهای پایین MeV ۵۰/۵ (۲۴٪->)، در ۷۱۵ MeV کاهش کندی در مقدار T از ۹۲/۷ در %wt ۱۰ تا ۷۰/۲ در %Δ۰ wt (۲۴٪->) اتفاق میافتد وقتی ذرات μm ۱۰۰ درون شبکهی LDPE توزیع می شوند. کاهش نسبی متناظر برای μm ۱ و ۱۰۰ به ترتیب برابر با ۸۸/۵٪ و ۲۱/۳٪، ۷۱/۳٪، و ۸۱/۸ است. در کاهش نسبی در T برای μm ۱۰۰ μm ۱، و ۱۰۰ به ترتیب برابر با ۲۳/۲٪، ۸۶/۷٪، و ۸۱/۸٪ ۰/۱ Me۷، کاهش نسبی در T نیز برای µm ،۱۰۰ µm ، و ۱۰۰ به ترتیب برابر با ۲۲/۸٬، ۲۹/۴٬ و ۸۰۰ ۸۳ /۰۰ می دهش نسبی در ۸۳/۹٪ است. در نظر گرفتن اثر اندازهی ذره برای DPE/50 wt% PbO نشان می دهد که کاهش نسبی در ۸۳/۹٪ است. در نظر آرفتن اثر اندازه مرای ۲۰۱۵ هم مقدار T از ma در ۲۰ به ترتیب برابر با ۲۰/۳٬ ۹۸/۳٬ و ۸۰/۱ به ترتیب برابر با ۲۰/۳٬



شکل ۳۵–۳۵ ضرایب عبور برای کامپوزیتهای LDPE پر شده با ۳۵ ۱۰، ۵۰، و ۵۰ از ذرات WO₃ با اندازهی (الف) ۱۰۰ μm ۱۰، (ب) μm ۱۰، و (ج) ۱۰۰ به عنوان تابعی از انرژی فوتون فرودی

برای WO₃ (انرژیهای پایین MeV (۰/۴ MeV)، کاهش نسبی در T برابر با ۲۶/۷٬، ۹۰٬۰ و ۶۷/۵٪ (متناظر با μm ۱۰۰ μm)، و MeV، و ۱۰۰٬۰ μm (متناظر با μm ۱۰۰ μm)، و MeV در μm ۱۰۰ μm) در MeV در ۱۰۰ mm ۱۰۰ nm در MeV در ۲۳/۶٬، ۶۸/۵٪ و ۸۵/۹٪، و ۸۵/۹٪ (متناظر با μm ۱۰۰ μm)، و ۱۰۰ nm) در LDPE/50 wt% WO₃ به ۱۰۰ μm



۱۰۰ nm برای انرژیهای MeV ۱۵ MeV، و ۱/۱ به ترتیب برابر با مقادیر ۲٪٬۹۸٬۰ ٬۹۳/۴ و ۲٪۸۳

است.

شکل ۳۹–۳۶ ضرایب عبور برای کامپوزیتهای LDPE پر شده با %۲۵ ۱۰ ۲۵ و ۵۰ از ذرات ZnO با اندازهی (الف) µm ۱۰۰، (ب) µm ۱، و (ج) ۱۰۰ به عنوان تابعی از انرژی فوتون فرودی

> برای ZnO (انرژیهای پایین MeV>)، کاهش نسبی در T برابر با ۲۹/۸٬، ۳۹٬۹٬ و ۳۹/۴٬ (متناظر با μm ۱۰۰ μm ۱۰۰ μm (متناظر با μm ۱۰۰ μm) در ۱۰۰ MeV) در ۱۰۰ مو ۲۴/۴٬ ۲۴/۵٬ و ۳۳/۵۰ (متناظر با μm ۱۰۰ μm) و ۱۰۰ nm در MeV) در MeV ۵۰/۱است. علاوه بر این، کاهش نسبی مقدار T برای ZnO wt% ZnO از μm

> برای TiO₂ (انرژیهای پایین MeV>)، کاهش نسبی در T برابر با ٪۱۳/۸، ٪۹۱/۹، و ٪۹۳/۷ (متناظر با μm ،۱۰۰ μm، و ۱۰۰ ۱۰ در ۱۹۷ ۰/۱۵ ه (٪۱۴/۲، ٪۱۷/۶، ۱۶/۹ (متناظر با μm

1.0 1.0 (الف) 0.9 0.9 0.8 0.8 0.9 0.9 0.2 0.2 T LDPE/10 wt% 1 µm TiO₂ T LDPE/10 wt% 100 µm TiO2 0.1 0.1 -- T LDPE/25 wt% 1 μm TiO₂ – T LDPE/25 wt% 100 μm TiO₂ ▲ T LDPE/50 wt% 100 µm TiO2 0.0 0.0 -0.01 0.1 10 0.01 0.1 10 1 . Energy (MeV) Energy (MeV) (ج) 0.9 0.8 -0.98 0.2 — T LDPE/10 wt% 100 nm TiO₂ 0.1 TLDPE/25 wt% 100 nm TiO₂ T LDPE/50 wt% 100 nm TiO2 0.0 0.1 0.01 . Energy (MeV)

۱، و ۱۰۰ nm در MeV ۵/۰۵ ست. علاوه بر این، کاهش نسبی مقدار T برای LDPE/50 wt% TiO₂ از LDPE/50 از N·۰ nm ۱۰۰ μm

شکل ۳–۳۷ ضرایب عبور برای کامپوزیتهای LDPE پر شده با ۳۷% ۱۰، ۲۵، و ۵۰ از ذرات TiO₂ با اندازهی (الف) ۱۰۰ μm ۱۰، (ب) μm ۱۰ و (ج) ۱۰۰ سه عنوان تابعی از انرژی فوتون فرودی

فس ۲: اندازه کسری پی تحربی

۴-۱ مقدمه

بر اساس پیشینهی پژوهش و محاسبات مونت کارلو که در مطالعهی حاضر به آن پرداخته شد، اثربخشی کامپوزیتهای فلز پلیمر در تضعیف پرتوهای X و گاما و نقش چگالی، اندازه، و کسر وزنی ذرات در ترکیب مورد تائید است. با این وجود، به منظور اطمینان از نتایج شبیهسازی، این بخش به معرفی کار تجربی، ساخت نمونه، و توضیح نتایج آن اختصاص داده شده است.

۲-۴ آمادهسازی نمونهها

است.

¹ Epoxy resin

² Diglycidyl ether of bisphenol A

³ Hardener

⁴ Isophorone diamine

در تهیهی نمونهها، از یک همزن مغناطیسی به منظور دستیابی به مخلوطی از ذرات در شبکهی رزین اپوکسی که تا حد امکان همگن باشد استفاده شد. همانطور که در شکل ۴-۲ نشان داده شده است، فراهم کردن نمونهها به دو روش شامل تهیهی رزین ایوکسی (الف) و کامیوزیتها (ب) انجام گرفت.



شکل ۴-۱ تصویر پودرهای فلزات و اکسید فلزات استفاده شده

در تهیهی نمونهی رزین اپوکسی، پس از توزین مقدار رزین موردنیاز، هاردنر (با نسبت وزنی اختلاط ۱ به ۲) به مخلوط اضافه شد. دو عدد مگنت درون ظرف حاوی مخلوط قرار داده شد و فرایند مخلوط کردن به کندی توسط همزن مغناطیسی ادامه یافت (حدود ۱۵ دقیقه) تا از تشکیل حبابهای هوا تا حد امکان جلوگیری شود. پس از این که دو بخش به طور همگن مخلوط شدند، مخلوط آماده شده درون ظرف درپوش دار استوانهای از جنس پلیاتیلن با وزن تقریبی g ۵ به قطر cm ۶ و ضخامت nm ۱ ریخته شد. در مرحلهی بعد، ظرف (بدون درپوش) به مدت ۲۴ درون پمپ خلا و در دمای اتاق قرار گرفت تا به طور کامل خشک شود (شکل ۴–۲، الف).



شکل ۴-۲ طرح مراحل ساخت نمونههای (الف) رزین و (ب) کامپوزیت

به منظور ساخت نمونههای کامپوزیت، پس از توزین مقدار رزین موردنیاز، پودر موردنظر با توجه به مقدار وزنی محاسبه شده به مخلوط اضافه شد. سپس، فرایند مخلوط کردن بر روی همزن مغناطیسی و با استفاده از مگنت به مدت ۱۵ دقیقه ادامه داده شد تا مخلوط همگنی حاصل شود. پس از آن، هاردنر (با نسبت وزنی اختلاط ۱ به ۲) به مخلوط اضافه شد و به مدت ۱۵ دقیقهی دیگر بر روی همزن مغناطیسی قرار داده شد تا مخلوط به خوبی همگن شود. سپس، مخلوط فراهم شده درون ظروف درپوش دار استوانهای از جنس پلیاتیلن ریخته شد و بدون درپوش به مدت ۲ ۲ درون پمپ خلا و در دمای اتاق قرار گرفت تا به طور کامل خشک شود. در نهایت، درپوش ظروف با استفاده از پارافیلم بر روی ظروف محکم شد تا از نشستن گرد و غبار جلوگیری شود. بررسی اثربخشی کسر وزنی ذرات در عملکرد این ترکیبات برای تضعیف پرتوهای گاما از طریق فراهم کردن نمونهها در دو غلظت %wt ۵ و %wt ۵ انجام گرفت. همچنین، اثر اندازهی ذرات با کاربرد پودر Pb در دو اندازهی nm ۵۰ و mm ۶ و کسر وزنی %wt ۵ و %tw ۵ مورد ارزیابی قرار گرفت. برای محاسبه ی ترکیب و درصد وزنی نمونهها، حجم ظرف برابر با 3m² m² h² m² در نظر گرفته شد. سپس از رابطهی کسر حجمی برای کامپوزیتها که در رابطهی (۳–۱۷) ارائه شد و با توجه به رابطهی M² وزن نسبی هر بخش در ترکیب شامل شبکه و پرکننده مشخص شده و در تهیه ینمونهها مورد استفاده قرار گرفت. در نهایت، ۱۵ نمونه شامل رزین و کامپوزیتهای پلیمر – فلزی آماده شد. مشخصات این نمونهها شامل ترکیب وزنی دو بخش شبکه و پرکننده، چگالی و وزن نمونه در جدول ۴–۱ ارائه شده است و شکل ۴–۳ تصاویر این نمونهها را نشان می دهد.

چگالی (g/cm ³)	وزن نمونه (g)	ترکیب وزنی	نمونه
۱/۰۲۳	۳۳/۹ • ۹	Pure Epoxy Resin	S0
١/• ٧٢	36/201	۹۵wt% Epoxy/ ۵wt% nano-Pb	S 1
١/٣٢۴	43/211	۲۵wt% Epoxy/ ۲۵wt% nano-Pb	S2
١/•٧١	36/18.	۹۵wt% Epoxy/ ۵wt% nano-PbO	S3
١/٣١٧	47/718	۲۵wt% Epoxy/ ۲۵wt% nano-PbO	S4
١/•۶٩	34/21.	۹۵wt% Epoxy/ ۵wt% nano-Zn	S5
١/٣٠٢	41/201	۲۵wt% Epoxy/ ۲۵wt% nano-Zn	S 6
۱/•۶۶	34/122	۹۵wt% Epoxy/ ۵wt% nano-ZnO	S 7
۱/۲۸۳	41/200	۲۵wt% Epoxy/ ۲۵wt% nano-ZnO	S 8
۱/۰۶۳	34/ • 40	۹۵wt% Epoxy/ ۵wt% nano-Ti	S 9
۱/۲۶۵	۴ • / ۸ • •	۲۵wt% Epoxy/ ۲۵wt% nano-Ti	S10
۱/•۶۱	34/۵	۹۵wt% Epoxy/ ۵wt% nano-TiO2	S11
1/585	4.1880	۲۵wt% Epoxy/ ۲۵wt% nano- TiO ₂	S12
۱/•۸۱	۳۶/۵۸۰	۹۵wt% Epoxy/ ۵wt% micro-Pb	S13
१/९८४	44/ • • 4	۲۵wt% Epoxy/ ۲۵wt% micro-Pb	S14

جدول ۴–۱ مشخصات نمونههای ساخته شده



شکل ۴-۳ تصاویر نمونههای ساخته شده

۴-۳ چیدمان هندسهی آزمایش

در نظر گرفتن یک هندسهی خوب که در آن باریکهای تقریبا موازی از پرتوها به نمونه بتابد و تا حد امکان از ورود تابشهای پراکنده به آشکارساز جلوگیری شود، مهم ترین هدف در چیدمان آزمایش بود. آرایش هندسهی آزمایش در شکل ۴-۴ نشان داده شده است.









شکل ۴–۴ چیدمان هندسهی آزمایش

از دو پایه برای چشمه و آشکارسازی برای هم مرکز قرار دادن آرایهها استفاده شد. چشمه در نزدیکترین فاصله از نمونه قرار داده شد و نمونه تقریبا با شعاع یکسان (۳ cm) با پنجرهی آشکارساز (۲/۹ cm) انتخاب شد و دقیقا مماس بر پنجره نصب شد. در راستای انجام مطالعات بر روی طیف بزرگی از انرژی از سه چشمهی رادیواکتیو ²⁴¹Am یا گامای ۰/۰۵۹ MeV (۵۰ μCi)، ¹³⁷Cs با گامای ۰/۶۶۲ MeV، (۱۰۰ μCi)، و cm²) ۲۰۰ μCi) ۱/۱۷۳ MeV با ابعاد "۲۰۰") استفاده شد. همچنین، سوسوزن (NaI(Tl با ابعاد "۲×"۲ (⁶⁰Co ۵/۰۸ cm²×۵/۰۸) به عنوان آشکارساز انتخاب شد.

۴-۴ نرمالسازی طیفهای ثبت شده

در اولین مرحله، تابش زمینه که در زمان ۵ ۵۱۸۳ ثبت شده بود به زمان ۶ ۱۰۰۰ برای چشمه 60 Co همچنین ۲۰۰ برای چشمه که در زمان 241 Am شمچنین ۶ ۲۰۰ برای چشمه ای 241 Am و 241 Cs و 241 Cs نرمال شد. زمان شمارش برای هر چشمه بر اساس خطای آماری متناسب با $R = 1/\sqrt{N}$ در نظر گرفته شد، که N شمارش در فوتوپیک است. به این ترتیب که شمارش در قلهی فوتوپیک با خطای کمتر از ۲۰۱۰ برآورد شود. در این مرحله، تابش زمینهی نرمال شده از طیف اولیهی فوتوپیک است. به این ترتیب که شمارش در قلهی فوتوپیک با خطای کمتر از ۲۰۱۰ برآورد شود. در این مرحله، تابش زمینهی نرمال شده از طیف اولیهی ثبت شده برای چشمه مها تفریق شد و نتیجهی حاصل به عنوان طیف واقعی ثبت شده در نظر گرفته شد. که در شکل ۴–۵ نشان داده شده است.



شکل ۴–۵ طیفهای ثبت شده از چشمههای ²⁴¹Am، ¹³⁷ و ⁶⁰Co نرمال شده به زمان

سپس، انرژی هر قله بر حسب شمارهی کانالی که در آن ثبت شده است رسم شد و با توجه به انرژی هر قله در کانال موردنظر درونیابی به کمک رابطهی خط به دست آمد تا روش حداقل مربعات با بیشترین درجهی آزادی صورت گیرد و خطا در هر کانال متناسب با پهنای کانال باشد که در شکل ۴-۶ آمده است.



با توجه به رابطهی درونیابی، انرژیهای فوتوپیک محاسبه شد تا از مقایسه با مقادیر مورد انتظار مقدار اختلاف نسبی با مقادیر اندازه گیری شده به دست آید (جدول ۴-۲).

اختلاف نسبی (٪)	مقدار اندازهگیری شده (MeV)	مقدار مورد انتظار (MeV)	پیک	MCA کانال
-7/977	•/• ۵A	۰/۰۵۹	فوتوپيک ²⁴¹ Am	34
10/104	•/٧۶٢	•/887	فوتوپیک ¹³⁷ Cs	779
_٣/۴۳۸	1/177	1/17٣	اولين فوتوپيک ⁶⁰ Co	446
-1/787	۱/۳۰۹	١/٣٣٣	دومين فوتوپيک ⁶⁰ Co	۳۸۰

جدول ۴-۲ مقایسه یانرژی پیکهای انرژی حاصل از اندازه گیری با مقدار مورد انتظار

۴-۵ محاسبهی ضرایب عبور و ضرایب انباشت

همانطور که پیش از این گفتیم، ضریب انباشت (B) از نسبت کل پرتوهای ثبت شده در آشکارساز (I_t) به پرتوهایی که بدون پراکندگی در آشکارساز ثبت شدهاند (I_u) به دست میآید. همچنین، ضریب عبور با توجه به رابطهی بیر- لامبرت، نسبت پرتوهایی که در حضور نمونهی کامپوزیت بدون اندرکنش به آشکارساز
رسیدهاند (I_{Epoxy/F}) به پرتوهایی است که در حضور نمونهی رزین بدون برهم کنش در آشکارساز ثبت شدهاند (I_{Epoxy}).



شکل ۴–۷ درونیابی گاوسی فوتوپیک (الف) ۱۰۵۹ MeV چشمهی Am²⁴¹Am، (ب) ۷۹۶۲ MeV چشمهی ¹³⁷Cs ، و (ج) ۱/۱۷۳ MeV چشمهی ⁶⁰Co برای نمونهی رزین و محاسبهی سطح زیر کل نمودار (A_t) و سطح زیر فوتوپیک (A_p)

با توجه به فیزیک پرتوها می توان گفت که سطح زیر قلهی فوتوپیک را می توان شمار فوتونهایی دانست که بدون پراکندگی به آشکارساز رسیده و ثبت شدهاند. همچنین، شمار کل فوتونهایی که به آشکارساز می رسند بدون در نظر گرفتن اثرات آشکارساز برابر با سطح زیر کل طیف ثبت شده است. برای نمونه، نتایج برای سطح زیر کل طیف و سطح زیر فوتوپیک در عبور از نمونهی رزین برای انرژی ۸۷۰ MeV چشمهی 44⁶⁰ در شکل ۹-۴ (الف-ج) نشان داده شده است. محاسبات برای سایر نمونه ها به همین ترتیب تکرار شد و سطح کل و سطح زیر فوتوپیک در هر اندازه گیری مشخص شد.

با توجه به مقادیر به دست آمده برای A_t و A_t مرایب انباشت برای انرژی ۷۸۹ MeV، برابر با ۱/۱۰۹، برای ۱/۹۶۲ MeV برابر با ۲/۵۰۱، و برای ۱/۱۷۳ MeV برابر با ۲/۹۴۷ به دست میآید. همانطور که پیش از این گفته شد، به منظور محاسبهی ضرایب عبور برای سایر نمونهها به مقادیر A_p برای نمونهی رزین به عنوان _{Popy} نیاز داریم. این مقادیر برای انرژیهای ۱۰۵۹ MeV، ۲/۶۶۲، و ۱/۱۷۳ به ترتیب برابر با مقادیر ⁹-۱/۲۷۷۰، ²-۱/۲۷۸۰، و ⁹-۱/۲۸۴ به دست آمد.

۴-۶ نتایج حاصل از افزایش کسر وزنی ذرات پرکننده

در این بخش، طیف ثبت شده برای کامپوزیت تقویت شده با هر یک از مواد پرکننده (TiO - ، nano-Pb ، مواد پرکننده (TiO ، و TiO ، و TiO) برای دو درصد وزنی %tw t و ۵ رسم شده و با طیف اندازه گیری شده برای چشمه به تنهایی، و شبکهی رزین بدون پرکننده مقایسه شد. این نتایج برای چشمهی ²⁴¹Am برای پخشمه به تنهایی، و شبکهی رزین بدون پرکننده مقایسه شد. این نتایج برای چشمه و با طیف اندازه ترای نانوکامپوزیتهای Epoxy/TiO ، Epoxy/ZnO ، Epoxy/ZnO ، Epoxy/PbO ، و TiO برای ج





نانوذرات TiO2

می توان دید که با افزایش مقدار وزنی پرکننده در شبکه ی رزین، شمار فوتونهای ثبت شده در فوتوپیک کاهش می یابد که برای ذرات با چگالی بیشتر مشخص تر است. میکروذرات Pb با چگالی بزرگتر کاهش کمتری نسبت به PbO در شمار فوتونهای ثبت شده بدون اندرکنش ایجاد می کنند. طیفهای ثبت شده برای چشمه ی PbO در شمار فوتونهای ثبت شده بدون اندرکنش ایجاد می کنند. طیفهای ثبت شده برای چشمه ی PbO در شمار فوتونهای ثبت شده بدون اندرکنش ایجاد می کند. طیفه ی باز گتر کاهش برای چشمه ی PbO در شمار فوتونهای ثبت شده بدون اندرکنش ایجاد می کند. طیفه ی ثبت شده برای چشمه ی Pboxy/Zn در شمار فوتونهای ۴–۹ (الف–و) نشان داده شده است. می توان دید که با افزایش مقدار وزنی پرکننده در شبکه ی رزین، شمار فوتونهای ثبت شده در فوتوپیک کاهش می یابد که برای ذرات با چگالی بیشتر مشخص تر است.





شکل ۴–۱۰ مقایسهی طیف ثبت شده برای ⁶⁰Co به تنهایی و در حضور رزین اپوکسی بدون پرکننده، و با کسر وزنی ۵ wt% و %۲۵ wt (الف) نانوذرات Pb، (ب) نانوذرات PbO، (ج) نانوذرات Zn، (د) نانوذرات ZnO، (ه) نانوذرات Ti، (و) و نانوذرات TiO

همچنین، طیفهای ثبت شده برای چشمهی پرتوزای ⁶⁰Co در حضور نانوکامپوزیتهای Epoxy/Pb (الف-همچنین، طیفهای ثبت شده برای چشمهی پرتوزای Epoxy/TiO به ترتیب در شکلهای ۴–۱۰ (الف-و) نشان داده شده است. روشن است که مقدار اثربخشی افزایش کسر وزنی ذرات برای گاما با انرژیهای بالاتر کمتر است. در حقیقت، با وجود تاثیر افزایش کسر وزنی بر تضعیف پرتوهای گاما، این مقدار کاهش با افزایش انرژی کاهش مییابد. با استفاده از روش محاسبات که در بخش ۴–۴ شرح داده شد، ضرایب انباشت برای هر نمونهی کامپوزیت در انرژیهای MeV MeV، ۲۶۶۲، ۱۹۷۲، و ۱۹۷۳ محاسبه شد.

Epoxy/TiO، و Epoxy/TiO2 در جدول ۴-۳ در مقایسه با مقادیر تئوری که از MCNPX به دست آمده، آورده شده است.

⁶⁰ Co			¹³⁷ Cs			²⁴¹ Am				
$\delta_2(\%)$	MCNP	Exp	δ2(%)	MCNP	Exp	δ2(%)	MCNP	Exp	كامپوزيت	
					۲/•۳۵	•/٧٣۵	1/818	1/778	۹۵wt% Resin/	
7/17	۲/۱۰۱	7/199	1/67	۲/۰۰۲					۵wt% nano-Pb	
	W/ISC & A		N/0 N						۷۵wt% Resin/	
11/78	1/701	ווד/ו	۵/٦١	1/11	ו/גיו	ω/ ۱ ۱	1/119	1/171	۲۵wt% nano-Pb	
17/71	۳/۳۸۱	٣/١٨٣	•/78٣	۲/۱۱۰	۲/۱۱۶	۳۰/۱۵	1/882	1/784	۹۵wt% Resin/	
									∆wt% nano-PbO	
		٣/٠٠٢	۵/۴۵	۲/۰۱۰	۱/۹۰۶	71/14	1/412	1/147	۷۵wt% Resin/	
1.1/17	1/111								۲۵wt% nano-PbO	
۸/۳۸	४/१११	۳/۱۹۶	•/٣٧٧	۲/۱۱۳	7/171	۱/•۵	١/٢٢٠	1/777	۹۵wt% Resin/	
									۵wt% nano-Zn	
c is c		~/\\0	Y/A A	¥1	41.81			\ / \ \ \	۷۵wt% Resin/	
9/59	1/• 1•	רוו/ו	1/77	1/••1	1/• 5 1	•/\\\	1/114	1/111	۲۵wt% nano-Zn	
۴/۲۱	۳/۱۱۱	3/210	•/۶٩٨	۲/۱۳۱	7/149	۲/•۷	1/222	1/802	۹۵wt% Resin/	
									۵wt% nano-ZnO	
۲/۲۵	۳/• ٩۶	٣/١٧٣	•/۴٧١	7/117	٢/١٢٩	•/۵۶٨	1/774	1/771	۷۵wt% Resin/	
									۲۵wt% nano-ZnO	
٣/44	٣/١١٢	37/208	۰/ \ ۶۶	۲/۱۶۹	۲/۱۸۸	١/٢٨	١/٢٢٩	1/240	۹۵wt% Resin/	
									∆wt% nano-Ti	

جدول ۴-۳ مقایسهی ضرایب انباشت از طریق محاسبات تئوری و اندازه گیریهای تجربی

४/४१	۳/۱۶۹	۳/۲۱۱	•/۴۶٧	٢/١٢٩	۲/۱۳۹	•/۴٨۶	١/٢٢٨	1/774	۷۵wt% Resin/
									۲۵wt% nano-Ti
١/٣٧	٣/٢٢١	٣/۲٩Л	٠/• ٩ ١	۲/۲۱۹	7/771	١/١١	1/241	1/200	۹۵wt% Resin/
									∆wt% nano-TiO ₂
~ / K K		37/280	1/088	۲/۱۵۵	۲/۱۷۱	•/٨٨۴	1/222	1/744	۷۵wt% Resin/
1/55	1/111								۲۵wt% nano- TiO ₂

با توجه به مقادیر محاسبه شده برای ضرایب انباشت، مشخص است که افزایش چگالی و عدد اتمی ذرات پرکننده سبب کاهش این ضرایب می گردد. همچنین، روشن است که افزایش کسر وزنی ذرات پرکننده موجب کاهش ضرایب انباشت می گردد. با این حال، مشخص است که به دلیل افزایش پرتوهای ثانویه رسیده به آشکارساز، افزایش انرژی پرتوهای گاما سبب افزایش ضرایب انباشت می گردد. با در نظر گرفتن کسر وزنی ذرات پرکننده در شبکهی رزین می توان گفت نظم مشخصی برای تغییرات ضرایب انباشت در کسر وزنی ۵۰۲ ۵ مشاهده نمی شود، اما ضرایب انباشت برای کامپوزیتهای تقویت شده با ذرات فلزی و اکسید فلزی در کسر وزنی ۴۵ ۲۵ طبق ترتیب زیر محاسبه شده است:

 $Pb < PbO < Zn < ZnO < Ti < TiO_2$

که آن را می توان به توزیع یکنواخت تر ذرات در کسر وزنی بالاتر درون شبکهی رزین نسبت به زمانی که کسر وزنی ذرات کمتر است، نسبت داد. هر چه مقدار ذرات در شبکه بیشتر باشد، توزیع ذرات به صورت یکنواخت تری صورت می گیرد. همانطور که در بخش ۴-۴ شرح داده شد، ضرایب عبور برای هر نمونهی نانو کامپوزیت Epoxy/Ti ، Epoxy/ZnO ، Epoxy/Zn و Epoxy/TiO2 محاسبه شد.

نتایج ضرایب عبور برای انرژیهای ۲۰/۰۵۹ MeV، ۲۶۶۲، و ۱/۱۷۳ به ترتیب در نمودار شکل ۴–۱۱ (الف-ج) آمده است. مقادیر محاسبه شده برای ضرایب عبور، بار دیگر بر نقش افزایش چگالی و عدد اتمی ذرات پرکننده در کاهش این ضرایب اشاره دارد. همچنین، با افزایش کسر وزنی ذرات پرکننده در شبکهی رزین مقدار پرتوهایی که بدون اندرکنش به آشکارساز رسیده و ثبت میشوند نسبت به مقدار مشابه برای شبکهی خالص رزین کاهش مییابد. از سوی دیگر، افزایش انرژی پرتوی گامای فرودی سبب میشود ضرایب عبور با شیب کمتری در طول افزایش چگالی و کسر وزنی ذرات کاهش یابند. با وجود این که بر اساس گفتههای پیش از این تغییرات منظمی برای ضرایب انباشت در کسر وزنی %wt ۵ مشاهده نشد، میتوان گفت ضرایب عبور برای کامپوزیتهای تقویت شده با %tw t ذرات طبق ترتیب زیر محاسبه شده است:



 $Pb < PbO < Zn < ZnO < Ti < TiO_2$

در شکل ۴–۱۱، نتایج تجربی با نمودارهای هاشورزده و مقادیر حاصل از محاسبات MCNP با نمودارهای توپر سیاه رنگ مشخص شده است. از مقایسهی نتایج روشن است که با توجه به اختلاف نسبی کمتر از ۱۰٪ می توان گفت تطابق خوبی میان یافتههای تجربی و تئوری وجود دارد.

۴–۷ نتایج حاصل از کاهش اندازهی ذرات پرکننده

مسالهی نهایی در بررسی تجربی رزین اپوکسی تقویت شده با ذرات فلزی و اکسید فلزی، اثر اندازهی ذره بر توانایی این ترکیبات در تضعیف پرتوهای گامای تولید شده توسط سه چشمهی ²⁴¹Am، ⁶⁰Co، و ⁶⁰Co است. از این رو، از ذرات اکسید فلزی Pb در دو اندازهی mm ۶ و mm ۵۰ در دو کسر وزنی %۳۵ و ۵ برای تقویت ترکیبات استفاده شد. اثر اندازهی ذره برای Epoxy/Pb برای %۳۵ و %۳۵ در جدول ۴-

	يب عبور (٪)	ضر		ريب انباشت	کسہ مزنے	چشمه		
Dif(%)	Nano-Pb	Micro-Pb	Dif(%) Nano-Pb		Micro-Pb		مسر ورعي	
31/878	۶٩/۷۸	77/44	11/242	1/222	١/٣٧٨	5wt%	²⁴¹ Am	
TT/VT 1	۲۳/۷۹	30/60	11/404	1/147	١/٢٨٩	25wt%		
Δ/VAV	V۳/۴۲	٧٧/٩٣	۹/۱۰۵	۲/•۳۵	८/५५७	5wt%	137 C a	
22/088	49/77	۵٩/۶٩	11/808	١/٨٩٢	٢/٢٨ ١	25wt%	Cs	
۰/۸۲ ۰	٨٩/۴٧	٩ • /٢ ١	۲/۰۳۶	٣/١۶٩	۲/۳۱ ۸	5wt%	60 C a	
۱۱/۹۵۹	۶۷/۳۶	۷۶/۵۱	4/931	٣/951	۳/۲۸	25wt%		

جدول ۴-۴ مقایسه ی پارامترهای حفاظ برای کامپوزیتهای تقویت شده با میکروذرات و نانوذرات Pb

روشن است که با کاهش اندازهی ذرات در شبکهی پلیمر مقدار عبور کاهش یافته و ضریب انباشت کاهش می یابد. این نتیجه با انتظار ما در خصوص اهمیت یکنواختی ساختار در افزایش توانمندی کامپوزیت در تضعیف پرتوها تطابق دارد. شایان ذکر است که این اثر در انرژیهای کمتر مشخص تر است.

فصل ۵: شیجه کسری

۵-۱ نتیجهگیری

پژوهش حاضر، به بررسی اثربخشی کامپوزیتهای شبکه پلیمر تقویت شده با ذرات فلزی و اکسید فلزی پرداخت. در این راستا، اثر چگالی مادهی پرکننده بر توانایی ترکیبات در تضعیف پرتوهای X و تابش گاما با انتخاب متنوعی از ترکیبات بر پایهی صورت گرفت. همچنین، اثر اندازه و کسر وزنی ذرات فلزات PN، W، Zn و Ti و اکسیدهای آنها شامل OdO، وWO، وZoN، و ZoI بر پارامترهای حفاظ گذاری این ترکیبات از طریق انتخاب ذرات در اندازهها و غلظتهای مختلف مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج جدیدی در مورد پارامترهای حفاظ گذاری شامل OdO، وWO، وZoN، و ZoI بر پارامترهای حفاظ گذاری این ترکیبات از پارامترهای حفاظ گذاری شامل ضرایب تضعیف، مسافت آزاد میانگین، ضخامت نیم لایه، عدد اتمی و چگالی پارامترهای موثر، اثربخشی حفاظ، ضرایب عبور، و ضرایب انباشت بر حسب چگالی، اندازه و کسر وزنی پرکننده در شبکهی پلیمر در بازهی وسیع انرژی Me ۱۵–۱۵/۰ گزارش شد. این بررسی در دو بخش تئوری و کم چگالی و یکنواختی آنها در طول تغییر اندازه و سهم پرکننده درون شبکه به طور همزمان حفظ میشود. در بخش تجربی، از کامپوزیتهای با خواص ویژه از قبیل وزن کم، سادگی ساخت، ساخت، ساخت در دمای اتاق، و قابلیت ساخت در قالبهای دلخواه استفاده شد.

یافتههای حاضر به نظر می رسد با نتایج بسیاری از مطالعات گذشته در خصوص اثر اندازه ی ذره و کسر وزنی آن بر خواص تضعیف پرتوهای گامای یک شبکه مطابقت دارد. برای نمونه، در یک کار تجربی تضعیف بهتر پرتوهای گاما توسط اپوکسی E44 پر شده با نانوذرات WO3 در مقایسه با میکروذرات در بازه ی وسیع انرژی MeV MeV مورد تایید قرار گرفت [۵۳]. در ۲۰۱۴، کیم و همکاران نشان دادند که عبور گاما به اندازه و کسر وزنی پرکنندههایی بستگی دارد که در انرژیهای پایین موثرتر هستند (۱۰۳ MeV). [۵۲]. در چندین مطالعه، افزایش تضعیف گاما را با افزایش کسر وزنی ذرات و کاهش اندازه ی ذرات گزارش کردند [۶۲–۶۰، ۵۴–۵۱، ۸۲]. در سایر مطالعات، بیان شد که استفاده از نانوذرات سبب بهتر شدن تضعیف گاما نسبت به ساختارهای میکرو میشود [۶۷-۶۹]. از سوی دیگر، سازگاری خوبی با یک کار اخیر مشاهده شد که ضریب انباشت گاما را با کمک روش GP مورد ارزیابی قرار داده بود [۳۲]. آنها نشان دادند که بیشینهای در بازهی انرژیهای میانی وجود دارد که همراه با افزایش کسر وزنی ذرات 2(NO)Pb در PVA کاهش مییابد. اگرچه یافتههای بررسیهای ما چه در بخش تئوری و چه تجربی در توافق با سایر مطالعات است اما جزئیات بیشتر و نتایج کلیدی را ارائه میدهد که میتوان آنها را به صورت زیر بیان کرد:

در این پژوهش، از روش کاهش واریانس پنجرههای وزنی استفاده شد و مشخص شد که این روش
سهم مهمی در کاهش زمان محاسبات و نتایج دقیق تر بویژه در ضخامتهای بالاتر دارد. روش استفاده شده
که مبتنی بر کاهش چگالی ماده تا رسیدن به وزن مناسب ذرات بود موثر ارزیابی شد.

ضرایب انباشت به عدد اتمی ماده بستگی دارد و با توجه به ضرایب تضعیف جرمی برای فوتونها با
انرژی معین در ماده می توان رفتار پر توها در عبور از مواد حفاظ را پیش بینی کرد.

- نوع آشکارساز تعریف شده در محاسبات بر ضرایب انباشت محاسبه شده تاثیر دارد به طوری که برای شار حجمی بدون تعریف ماده و شار نقطهای مقادیر مشابهی به دست آمد اما این مقادیر با افزایش چگالی ماده ی آشکارساز در تعریف شمارنده ی گایگر – مولر و سوسوزن سدیم یدید افزایش یافت. با این حال، با توجه به سهم بازده آشکارساز به نظر می رسد اعمال این کمیت منجر به کسب مقادیر یکسان برای پر توهای ثبت شده در انواع آشکارساز شود.

 مشخص شد که مدل ارائه شده برای شبیه سازی شبکه یکامپوزیت در بررسی همزمان اثر اندازه و کسر وزنی ذرات تطابق خوبی با نتایج تجربی دارد. در بررسی ضرایب عبور بر حسب انرژی، به روشنی مشاهده شد که روند یکسانی را در تمام اندازهها
و غلظتها دنبال می کند که افزایش قابل توجهی در انرژیهای پایین دارد و سپس به کندی در انرژیهای
میانی و بالا کم می شود.

افزایش در درصد ذرات درون شبکهی پلیمر سبب کاهش ضریب عبور می شود که در انرژی های
پایین قابل توجه تر است.

کاهش در اندازهی ذرات سبب کاهش در مقادیر ضرایب عبور می شود که در کسر وزنی پایین تر مهم تر است. برای مثال، این مقدار در حدود ۰/۲ و ۰/۲ در ۱۵ MeV به ترتیب برای μm
۱۰۰ nm
است.

در هر نقطه از انرژی، تفاوت میان آهنگ عبور از شبکهی تقویت شده با %۲۵ wt و %۱ wt ذرات
با کمیت جدیدی به نام RRT سنجیده شد. نتایج نشان داد که بیشینهی RRT در MeV و تا ۸۹٪ با
افزایش کسر وزنی W مشاهده می شود.

ضرایب انباشت شار دارای بیشینهای در ۱۸۳۷ است، که پراکندگی بر جذب غالب است. قابل
توجهترین اختلاف در مقادیر بیشینهی ضرایب انباشت شار بر حسب کسر وزنی زمانی که اندازهی ذره بزرگتر
nm میدهد که بالاترین و پایین ترین کاهش از ۱۱/۳ تا ۶/۸ برای ۱۳۰ و از ۱۱ تا ۹/۷ برای ۱۰۰
۱۰۰ مشاهده شد.

نتایج حاصل از اثر همزمان اندازه و کسر وزنی نشان داد که کسر وزنی پرکننده در تضعیف پرتوهای
گاما موثرتر از اندازه ی ذره است. به عبارت بهتر، در استفاده از ذرات بزرگتر میتوان با افزایش غلظت ذرات
میزان تضعیف را تا مقدار قابل توجهی افزایش داد.

بررسی پارامترهای حفاظ گذاری نقش قابل توجه اندازه و کسر وزنی پرکننده در تضعیف پرتوهای
گاما را تائید کرد.

مطالعه ی اثربخشی کامپوزیت های تقویت شده با کسر وزنی های متفاوت از میکروذرات و نانوذرات
مطالعه ی اثربخشی کامپوزیت های تقویت شده با کسر وزنی های متفاوت از میکروذرات و نانوذرات
و ZnO، WO3، PbO
و SnO و WO3 در تقویت شبکه ی پلیمر موثرتر از ZnO و TiO2 عمل می کند.

می توان گفت که LDPE تقویت شده با %wt ۵۰ از ذرات PbO و WO با ابعاد ۱۰۰ nm توانایی
تضعیف بالاتری نسبت به سایر ساختارهای مطالعه شده نشان می دهند. علاوه بر این، عملکرد تضعیف
کامپوزیت های بررسی شده با کاهش انرژی پر توهای گاما بهبود می یابد. بنابراین، استفاده از نانوذرات فلزی
و اکسید فلزی در طراحی سیستمهای پلیمری جدید در تضعیف پر توهای گاما پیشنهاد می شود.

در بخش تجربی، از کامپوزیتهای مبتنی بر رزین اپوکسی که یک پلیمر ترموست با خواص جالب
توجه است استفاده شد. اثر اندازه و کسر وزنی در توانمندی این ترکیبات در تضعیف پرتوهای گاما مورد
تائید قرار گرفت. همچنین، دریافتیم که هر چه کسر وزنی ذرات در شبکهی رزین بیشتر شود به دلیل توزیع
یکنواخت ر فتار قابل پیشبینی تری را می توان انتظار داشت. اندازه گیریهای تجربی در تطابق با محاسبات
تئوری ارزیابی شد.

۵-۲ پیشنهادات

از آنجا که کامپوزیتها به عنوان گروه جدیدی از مواد با خواص ویژه در سالهای اخیر در حوزهی حفاظ گذاری پرتوها مورد استفاده قرار گرفتهاند، ادامهی مطالعات بر روی آنها توصیه می شود. از این رو، پیشنهاداتی به شرح ذیل ارائه می گردد:

- با توجه به این که بخش اول در کامپوزیتهای PMC، شبکهی پلیمر است که شامل عناصری مانند هیدروژن، کربن، و نیتروژن است، استفاده از این مواد در میدانهای آمیختهی نوترون و گاما پیشنهاد می شود. - پیشنهاد می شود از سایر ساختارهای کامپوزیت شامل کامپوزیت های شبکه سرامیک CMC، و شبکه فلز MMC، در تضعیف پرتوهای گاما استفاده شود زیرا به دلیل عدد اتمی موثر و چگالی الکترونی بیشتر، پیشبینی می شود اثربخشی بالاتری در این حوزه داشته باشند.

- با توجه به قابلیت ساخت کامپوزیتهای PMC در قالبهای مختلف، طراحی بخشهایی از قبیل موازی ساز چشمه و آشکارساز با استفاده از آنها توصیه می شود.

از آنجا که اثربخشی این مواد در انرژیهای پایین قابل توجه است، مطالعهی پارامترهای حفاظ به
طور جامع بر روی فوتونهایی با انرژی پایین پیشنهاد می گردد.

- مراجع
- 1. Tarim U. A., Ozmutlu E. N., Yalcin S., Gundogdu O., Bradley D. A., Gurler, O. (2017) "Evaluation of gamma-ray attenuation properties of bismuth borate glass systems using Monte Carlo method" **Radiat. Phys. Chem. 140**, pp. **403**.
- 2. Mostafa A. M. A., Issa S. A. M., Sayyed M. I. (2017) "Gamma ray shielding properties of PbO-B₂O₃-P₂O₅ doped with WO₃" Alloy. Compnd. 708, pp. 294.

glasses recycled from high pressure sodium lamp glass" J. Alloy. Compnd. 754, pp. 355.

- 4. Biswas R., Sahadath H., Mollah A. S., Huq Md. F. (**2016**) "Calculation of gamma-ray attenuation parameters for locally developed shielding material: Polyboron", J. Radiat. **Res. Appl. Sci. 9**, pp. **26**.
- 5. Sandev T. (**2010**) "Monte Carlo simulation of buildup factors for single and multi-layer shields by using Penelope code", Proceedings of the Second Conference on Medical Physics and Biomedical Engineering, Munich, Germany.
- 6. Nambiar S., Yeow J. T. W. (2012) "Polymer-Composite Materials for Radiation Protection" Appl. Mater. Interfaces 4, pp. 5717.
- 7. McAlister D. R. (**2018**) "Gamma Ray Attenuation Properties of Common Shielding Materials", University Lane Lisle, USA.
- 8. Evans R. D. (**1955**) "**The Atomic Nucleus**" 1st edition, Mcgraw-Hill.
- 9. Akkurt I., El-Khayatt A. M. (2013) "Effective atomic number and electron density of marble concrete" J. Radioanal. Nucl. Chem. 295, pp. 633.
- Tsoulfanidis N., Landsberger S. (2010) "Measurement and detection of radiation" 3rd Edition, Taylor & Francis.
- Harish V., Nagaiah N., Kumar H. G. H. (2012) "Lead oxides filled isophthalic resin polymer composite for gamma radiation shielding applications" Indian J. Pure Appl. Phys. 50, pp. 847.
- 12. Kazemi F., Malekie S., Hosseini M. A. (**2019**) "A Monte Carlo study on the shielding properties of a novel polyvinyl alcohol (PVA)/WO₃ composite, against gamma rays, using the MCNPX code" **Biomed. Phys. Eng. 9**, **4**, pp. **465**.
- Aminian M., Bakhshandeh M., Allahbakhshian-Farsani M., Bakhshandeh E., Shakeri N. (2017) "Comparison of the protection performance in a composite shield and a lead standard shield in terms of biological effects in nuclear medicine" Iran. J. Nucl. Med. 25, 2, pp. 129.
- Erol A., Pocan I., Yanbay E., Ersoz O. A., Lambrecht F. Y. (2016) "Radiation shielding of polymer composite materials with wolfram carbide and boron carbide" Radiat. Prot. Environ. 39, pp. 3.
- 15. Lead metal safety data sheet, Teck Metals Ltd. (2015).
- 16. Al-saadi J. A. (**2012**) "Calculation of buildup factor for gamma-ray exposure in two layered shields made of water and lead" **J. Kufa-Phys. 4**, **1**, pp. **1**.

- 17. Al-Arif M. S., Kakil D. O. (2015) "Calculated-experimental model for multilayer shield" ARO-The Sci. J. Koya Uni. 3, 1, pp. 23.
- 18. Cai Y., Hu H., Pan Z., Hu G., Zhang T. (2018) "A method to optimize the shield compact and lightweight combining the structure with components together by genetic algorithm and MCNP code", App. Rad. Isotop. 139, pp. 169.
- 19. Kaur K., Singh K. J., Anand V. (**2015**) "Correlation of gamma ray shielding and structural properties of PbO–BaO–P₂O₅ glass system", **Nucl. Eng. Des. 285**, pp. **31**.
- 20. Kumar A. (2017) "Gamma ray shielding properties of PbO-Li₂O-B₂O₃ glasses", **Rad.** Phys. Chem., 136, pp. 50.
- Dong M. G., El-Mallawany R., Sayyed M. I., Tekin H. O. (2017) "Shielding Properties of 80TeO₂-5TiO₂-(15-x)WO₃-xA_nO_m Glasses using WinXCom and MCNP5 code" Radiat. Phys. Chem. 141, pp. 172.
- 22. Sayyed M. I., Kaky K. M., Mhareb M. H. A., Abdalsalam A. H., Almousa N., Shkoukani G., Bourham M. A. (2019) "Borate multicomponent of bismuth rich glasses for gamma radiation shielding application" **Rad. Phys. Chem. 161**, pp. 77.
- Issa S. A. M., Tekin H. O., Elsaman R., Kilicoglu O., Saddeek Y. B., Sayyed M. I. (2019) "Radiation shielding and mechanical properties of Al₂O₃-Na₂O-B₂O₃-Bi₂O₃ glasses using MCNPX Monte Carlo code" Mater. Chem. Phys. 223, pp. 209.
- 24. Waly E. S. A., Bourham M. A. (2015) "Comparative study of different concrete composition as gamma-ray shielding materials" Annal. Nucl. Energy. 85, pp. 306.
- 25. Ouda A. S. (2015) "Development of high-performance heavy density concrete using different aggregates for gamma-ray shielding" **Prog. Nucl. Energy. 79**, pp. 48.
- Tekin H. O., Sayyed M. I., Altunsoy E. E., Manici T. (2017) "Shielding properties and effects of WO₃ and PbO on mass attenuation coefficients by using MCNPX code" Dig. J. Nanomater. Biostruct. 12, pp. 861.
- 27. Harish V., Nagaiah N., Niranjana T., Varughese P. K. T. (**2010**) "Thermo-mechanical analysis of lead monoxide filled unsaturated polyester based polymer composite radiation shields" **J. Appl. Poly. Sci. 117**, pp. **3623**.
- 28. Li R., Gua Y., Wang Y., Yang Z., Li M., Zhang Z. (2017) "Radiation shielding property of structural polymer composite: Continuous basalt fiber reinforced epoxy matrix composite containing erbium oxide" Mater. Res. Express 4, pp. 035035.
- 29. Poltabtim W., Wimolmala E., Saenboonruang K. (2018) "Properties of lead-free gamma-ray shielding materials from metal oxide/EPDM rubber composites" **Rad.** Phys. Chem. 153, pp. 1.
- NoorAzman N. Z., Musa N. F. L., Razak N. N. A. N. A., Ramli R. M., Mustafa I. S., Rahman A. A., Yahay N. Z. (2016) "Effect of Bi₂O₃ particle sizes and addition of starch into Bi₂O₃–PVA composites for X-ray shielding" Appl. Phys. A. 122, pp. 818.
- Mahmoud M. E., El-Khatib A. M., Badawi M. S., Rashed A. R., El-Sharkawy R. M., Thabet A. A. (2017) "Fabrication, characterization and gamma rays shielding properties of nano and micro lead oxide-dispersed-high density polyethylene composites" Rad. Phys. Chem. <u>https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2017.10.0177</u>
- Issa S. A. M., Mostafa A. M. A., Hanafy T. A., Dong M., Xue X. (2019) "Comparison study of photon attenuation characteristics of Poly vinyl alcohol (PVA) doped with Pb(NO₃)₂ by MCNP5 code, XCOM and experimental results" Prog. Nucl. Energy 111, pp. 15.

- 33. Gwon S. H., Oh J. H., Kim M., Choi S., Oh K. H., Sun J. Y. (**2018**) "Sewable soft shields for the γ-ray radiation" **Sci. RepORtS 8**, pp. **1852**.
- Asari Shik N., Gholamzadeh L. (2018) "X-ray shielding performance of the EPVC composites with micro- or nanoparticles of WO₃, PbO or Bi₂O₃" Appl. Radiat. Isot. 139, pp. 61.
- 35. Khan W. S., Hamadneh N. N., Khan W. A. (**2016**) "Polymer nanocomposites synthesis techniques, classification and properties, book: Science and applications of Tailored Nanostructures" Chapter 4, pp. **50-67**. One Central Press (OCP).
- 36. Zhao Y. S., Yu Z., Douraghy A., Chatziioannou A. F., Moc Y., Pei Q. (2008) "A facile route to bulk high-Z polymer composites for gamma ray scintillation" Chem. Commun. 18, pp. 6008.
- Ambika M. R., Nagaiah N., Suman S. K. (2016) "Role of bismuth oxide as a reinforcer on gamma shielding ability of unsaturated polyster based polymer composites" J. Appl. Polym. Sci. 134, pp. 44657.
- 38. Hou Y., Li M., Gu Y., Yang Z., Li R., Zhang Z. (2017) "Gamma ray shielding property of tungsten powder modified continuous basalt fiber reinforced epoxy matrix composites" **Poly. Compos. 39**, pp. **E2106**.
- Higgins M. C. M., Radclife N. A., Toro-González M., Rojas J. V. (2019) "Gamma ray attenuation of hafnium dioxide- and tungsten trioxide-epoxy resin composites" J. Radioanal. Nucl. Chem. doi: <u>https://doi.org/10.1007/s10967-019-06714-33</u>
- Ambika M. R., Nagaiah N., Suman S. K. (2018) "Evaluation of gamma shielding parameters of bismuth oxide filled polymer composites" Indian J. Pure. Appl. Phys. 56, pp. 604.
- 41. Song C., Zheng J., Zhang Q. P., Li Y. T., Li Y. J., Zhou Y. L. (**2016**) "Numerical simulation and experimental study of PbWO₄/EPDM and Bi₂WO₆/EPDM for the shielding of γ-rays", **Chinese. Phys. C. 14**, pp. **21**.
- 42. Nambiar S., Osei E. K., Yeow J. T. W. (2013) "Polymer Nanocomposite-Based Shielding Against Diagnostic X-rays" J. Appl. Polym. Sci. 127, pp. 4939.
- 43. Soylu H. M., Lambrecht F. U., Ersoz O. A. (2014) "Gamma radiation shielding efficiency of a new lead-free composite material" J. Radioanal. Nucl. Chem. 305, pp. 401.
- 44. Tang L., Zheng Y., Chen S., Wang L., Wang H. (**2016**) "Flexible X-ray radiation protection membrane PVA/Pb(NO₃)₂ microcapsule composites supported by bacterial cellulose" **J. Appl. Polym. Sci. 133**, pp. **43120**.
- 45. Chang L., Zhang Y., Liu Y., Fang J., Luan W., Yang X., Zhang W. (**2015**) "Preparation and characterization of tungsten/epoxy composites for gamma-rays radiation shielding" **Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B. 88**, pp. **356**.
- 46. Fontainha C. C. P., Baptista-Neto A. T., Faria L. O. (**2016**) "Polymer-based nanocomposites of P(VDF-TrFE)/Bi₂O₃ applied to X-ray shielding" **J. M. Sci.**, <u>https://doi.org/10.4172/2321-6212.1000149</u>
- Gavrish V. M., Baranov G. A., Chayka T. V., Derbasova N. M., Lvov A. V., Matsuk Y. M. (2016) "Tungsten nanoparticles influence on radiation protection properties of polymers", IOP Conf. Series: Mat. Sci. Eng. 110, pp. 012028.
- 48. Özdemir T., Güngör A., Akbay I. K., Uzun H., Babucçuoglu Y. (**2017**) "Nano lead oxide and epdm composite for development of polymer based radiation shielding material: gamma irradiation & attenuation tests" **Rad. Phys. Chem. 144**, pp. **248**.

- 49. Pavlenko V. I., Cherkashina N. I., Yastrebinsky R. N. (2019) "Synthesis and radiation shielding properties of polyimide/Bi₂O₃ composites" Heliyon 5, pp. 01703.
- 50. Jamil M., Hazlan M. H., Ramli M. H., NoorAzman N. Z. (**2019**) "Study of electrospun PVA-based concentrations nanofibre filled with Bi₂O₃ or WO₃ as potential X-ray shielding material" **Rad. Phys. Chem. 156**, pp. **272**.
- 51. Kim J., Lee B. C., Uhm Y. R., Jung J., Rhee C. K. (**2009**) "Effects of Filler Size on Radiation Shields" Transactions of the Korean Nuclear Society, May 22.
- 52. Kim J., Seo D., Lee B. C., Seo Y. S., Miller W. H. (2014) "Nano-W dispersed gamma radiation shielding materials" Adv. Eng. Mater. 16, pp. 1083.
- 53. Malekie S., Hajiloo N. (2017) "Comparative Study of Micro and Nano Size WO₃/E44 Epoxy Composite as Gamma Radiation Shielding Using MCNP and Experiment" Chin. Phys. Lett. 34, pp. 108102.
- 54. Verdipoor K., Alemi A., Mesbahi A. (**2018**) "Photon mass attenuation coefficients of a silicon resin loaded with WO₃, PbO, and Bi₂O₃ micro and nano-particles for radiation shielding" **Radiat. Phys. Chem. 147**, pp. **85**.
- 55. Osei-Mensah W., Fletcher J. J., Danso K. A. (2012) "Assessment of radiation shielding properties of polyester steel composite using MCNP5" Int. J. Sci. Tech. 2, 7, pp. 455.
- 56. Hanemann T., Szabó D. V. (**2010**) "Polymer-nanoparticle composites: from synthesis to modern applications" **Materials**, **3**, pp. **3468**.
- 57. Tauban M. (**2016**) "Impact of filler morphology and distribution on the mechanical properties of filled elastomers: theory and simulations" **Mat. Sci. Université de Lyon**.
- 58. Pegoretti M. (2019) "Polymer composites: reinforcing fillers", IOP Publication.
- 59. Yan B., Song J., Wang W., Yu Y. (**2017**) "Tungsten powder filled polymers for flexible radiation shields in nuclear industries", Proceedings of the 25th International Conference on Nuclear Engineering, China.
- Stawarz S., Witek N., Kucharczyk W., Bakar M. (2019) "Thermo-protective properties of polymer composites with nano-titanium dioxide" Int. J. Mech. Mater. Des. 15, pp. 585.
- 61. Hosseini S. H., Ezzati S. N., Askari M. (2015) "Synthesis, characterization and X-ray shielding properties of polypyrrole/lead nanocomposites" **Polym. Adv. Technol. 26**, pp. 561.
- 62. Eid Gh. A., Kany A. I., El-Toony M. M., Bashter I. I., Gaber F. A. (**2013**) "Application of Epoxy/ Pb₃O₄ composite for gamma ray shielding" **J. Nucl. Sci. Appl. 46**, pp. **226**.
- Lebedev S. M., Gefle O. S., Amitov E. T., Yu D., Zhuravlev D. V. (2017) "Influence of heavy metal powders on rheological properties of poly (lactic acid)" Russian Phys. J. 60, 4, pp. 624.
- 64. Tekin H. O., Singh V. P., Manici T. (**2016**) "Effects of micro-sized and nano-sized WO₃ on mass attenuation coefficients of concrete by using MCNPX code" **Appl. Radiat. Isot. 121**, pp. **122**.
- Tekin H. O., Singh V. P., Kara U., Manıcı T., Altunsoy E. E. (2016) "Investigation of Nanoparticle Effect on Radiation Shielding Property Using Monte Carlo Method" CBU J. of Sci. 12, pp. 195.
- 66. Tekin H. O., Singh V. P., Manici T. (**2017**) "Effects of micro-sized and nano-sized WO₃ on mass attenauation coefficients of concrete by using MCNPX code" **Appl. Radiat. Isot 121**, pp. **122**.

- 67. Soltani Z., Beigzadeh A., Ziaie F., Asadi E. (**2016**) "Effect of particle size and percentages of Boron carbide on the thermal neutron radiation shielding properties of HDPE/B₄C composite: Experimental and simulation studies" **Radiat. Phys. Chem. 127**, pp. **182**.
- 68. Tekin H. O., Sayyed M. I., Issa S. A. M. (**2018**) "Gamma radiation shielding properties of the hematite-serpentine concrete blended with WO₃ and Bi₂O₃ micro and nano particles using MCNPX code" **Radiat. Phys. Chem. 150**, pp. **95**.
- 69. Chen S., Bourham M., Rabiei A. (2015) "Attenuation efficiency of X-ray and comparison to gamma ray and neutrons in composite metal foams" Radiat. Phys. Chem. 117, pp. 12.
- 70. Malekzadeh R., Mehnati P., Sooteh M. Y., Mesbahi A. (**2019**) "Infuence of the size of nano- and microparticles and photon energy on mass attenuation coefcients of bismuth–silicon shields in diagnostic radiology" **Radiological Phys. Tech. 12**, pp. **325**.
- 71. Degrelle D., Mavon C., Groetz J. E. (**2016**) "Determination of mass attenuation coefficient by numerical absorption calibration with Monte-Carlo simulations at 59.54 keV" **Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A. 816**, pp. **47**.
- 72. Wong C. P., Bollampally R. S. (**1999**) "Thermal conductivity, elastic modulus, and coefcient of thermal expansion of polymer composites flled with ceramic particles for electronic packaging" **J. Appl. Polym. Sci. 74**, pp. **3396**.
- 73. Kazempour M., Saeedimoghadam M., Shekoohi Shooli F., Shokrpour N. (2015) "Assessment of the radiation attenuation properties of several lead free composites by Monte Carlo simulation" **Biomed. Phys. Eng. 5**, pp. 67.
- 74. Husain H. S., Rasheed Naji N. A., Mahmood B. M. (2018) "Investigation of gamma ray shielding by polymer composites" IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 454, pp. 012131.
- 75. Bagheri K., Razavi S. M., Ahmadi S. J., Kosari M., Abolghasemi H. (**2017**) "Thermal resistance, tensile properties, and gamma radiation shielding performance of unsaturated Polyester/Nanoclay/PbO composites" **Radiat. Phys. Chem. 146**, pp. **5**.
- 76. Sabri J. H., Alsarraf A. H., Mahdi K. H. (2019) "A comparative study for micro and nano shield of (PbO) composite for gamma radiation" Energy Procedia 157, pp. 802.
- 77. Gong P., Ni M., Chai H., Chen F., Tang X. (**2018**) "Preparation and characteristics of a flexible neutron and γ -ray shielding and radiation-resistant material reinforced by benzophenone" **Nucl. Eng. Tech. 50**, pp. **470**.
- Mahmoud M. E., El-Khatib A. M., Badawi M. S., Rashed A. R., El-Sharkawy R. M., Thabet A. A. (2017) "Recycled high-density polyethylene plastics added with lead oxide nanoparticles as sustainable radiation shielding materials J. Cleaner Product. 176, pp. 276.
- Harish V., Niranjana Prabhu T., Nagaiah N. (2015) "Effect of lead monoxide as filler on chemical stability of unsaturated polyester radiation shields" Chemical Sci. Trans. 4, 1, pp. 18.
- Derradji M., Zegaouia A., Xua Y., Wanga V., Dayoa A. Q., Wanga J., Liua W., Liuc Y., Khiarib K. (2018) "Toward advanced gamma rays radiation resistance and shielding efficiency with phthalonitrile resins and composites" Nucl. Inst. Methods Phys. Research B. 421, pp. 13.

- Aghaz A., Faghihi R., Mortazavi S. M. J., Haghparast A., Mehdizadeh S., Sina S. (2016) "Radiation attenuation properties of shielding materials containing micro and nano-sized WO₃ in diagnostic x-ray energy range" Int. J. Radiat. Res. 14, pp. 127.
- Toyen D., Rittirong A., Poltabtim W., Saenboonruang K. (2018) "Flexible, lead-free, gamma-shielding materials based on natural rubber/metal oxide composites" Iranian Polymer J. 27, pp. 33.
- 83. Güngöra A., Akbaya İ. K., Yaşarb D., Özdemir T. (**2018**) "Flexible X/gamma ray shielding composite material of EPDM rubber with bismuth trioxide: mechanical, thermal investigations and attenuation tests" **Prog. Nucl. Energy 106**, pp. **262**.
- Abdalsalama A. H., Sayyed M. I., Husseina T. A., Şakarc M. H. A., Betul M., Şakarf C., Alimg B., Kak K. M. (2019) "A study of gamma attenuation property of UHMWPE/Bi₂O₃ nanocomposites" Chemical Phys. 523, pp. 92.
- Botelho M. Z., Kunzel R., Okuno E., Levenhagen R. S., Basegio T., Bergmann C. P. (2011) "X-ray transmission through nanostructured and microstructured CuO materials" Appl. Radiat. Isot. 69, pp. 527.
- 86. Kunzel R., Okuno E. (**2012**) "Effects of the particle sizes and concentrations on the X-ray absorption by CuO compounds" **Appl. Radiat. Isot. 70**, pp. **781**.
- 87. Khan I., Saeed K., Khan I. (2017) "Nanoparticles: properties, applications and toxicities" Arabian J. Chem., doi: <u>http://dx.doi.org/10.1016/j.arabjc.2017.05.011</u>
- 88. Astruc D. (2008) "Transition metal Nanoparticles in Catalysis: From Historical Background to the State of the Art, Nanoparticles and Catalysis". WILEY-VCH.
- 89. Guo T., Yao T., Lin Y. H., Nan C. W. (2015) "A comprehensive review on synthesis methods for transition-metal oxides nanostructures" CrysEngComm 17, pp. 3551.
- Meshram S. D., Rupnarayan R. V., Jagtap S. V., Mete V. G., Sangawar V. S. (2015) "Synthesis and characterization of Lead Oxide nanoparticles" Int. J. Chemical. Physical. Sci. 4, pp. 83.
- 91. Lead monoxide safety data sheet, LTS Research Labratoary. (2015).
- 92. Tungsten oxide safety data sheet, LTS Research Labratoary. (2019).
- 93. Qamar M., Gondal M. A., Hayat K., Yamani Z. H., Al-Hooshani K. (2009) "Laserinduced removal of a dye C.I. Acid Red 87 using n-type WO₃ semiconductor catalyst" J. Hazardous Mat. 170, pp. 584.
- Huang K., Pan Q., Yang F., Ni S., Wei X., He D. (2008) "Controllable synthesis of hexagonal WO₃ nanostructures and their application in lithium batteries" J. Phys. D: Appl. Phys. 41, pp. 155417.
- 95. Zinc monoxide safety data sheet, LTS Research Labratoary. (2015).
- 96. Titanium dioxide safety data sheet, LTS Research Labratoary. (2014).
- 97. Hu D., Li R., Li M., Pei J., Guo F., Zhang F. (**2018**) "Photocatalytic efficiencies of WO₃/TiO₂ nanoparticles for exhaust decomposition under UV and visible light irradiation" **Mater. Res. Express.**, **5**, pp. **095029**.
- 98. Alagar M., Theivasanthi T., Kubera Raja A. (2012) "Chemical synthesis of nano-sized particles of lead oxide and their characterization studies" J. App. Sci. 12, 4, pp. 5.
- 99. Oto B., Gulebaglan S. E., Kanberoglu G. S. (2017) "The calculation of some gamma shielding parameters for semiconductor CsPbBr₃" J. Appl. Phys. 1815, pp. 130008.

- 100. Pak R. O. (**2016**) PhD thesis, "Investigation of wide bandgap semiconductor devices for radiation detection applications", College of Engineering and Computing, University of South Carolina.
- 101. Galstyan V., Bhandari M. P., Sberveglieri V., Sberveglieri G., Comini E. (**2018**) "Metal oxide nanostructures in food applications: quality control and packaging" **Chemosensors 6**, pp. **16**.
- 102. Singh H., Singh K., Gerward L., Singh K., Singh Sahota H., Nathuram R. (2003) "ZnO– PbO–B₂O₃ glasses as gamma-ray shielding materials" Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B 207, pp. 257.
- 103. Harrison C., Weaver S., Bertelsen C., Burgett E., Hertel N., Grulke E., (2008) "Polyethylene/Boron nitride composites for space radiation shielding" J. App. Poly. Sci. 109, pp. 2529.
- 104. Hu H., Wang Q., Qin J., Wu Y., Zhang T., Xie Z., Jiang X., Zhang G., Xu H., Zheng H., Zhang J., Liu W., Li Z., Zhang B., Li L. (2008) "Study on composite material for shielding mixed neutron and γ-rays" IEEE Trans. Nucl. Sci. 55, 4, pp. 2376.
- 105. Dong Y., Chang S. Q., Zhang H. X., Ren C., Kang B., Dai M. Z., Dai Y. D. (2012) "Effects of WO₃ particle size in WO₃/epoxy resin radiation shielding material" Material. Chin. Phys. Lett. 29, pp. 108102.
- 106. Dance C. T., Jacques D. R., Gilbert G., (2008) "Atom Photon Interactions" Mc-Grew Hill.
- 107. Salvat F. and Fern J. M. (2009) "Overview of physical interaction models for photon and electron transport used in Monte Carlo codes" **IOP Pub. Metrologia 46**, pp. **S112**.
- 108. Singh S., Kumar A., Singh C., Singh Thind K., and G. S. Mudahar (**2008**) "Effect of finite sample dimensions and total scatter acceptance angle on the gamma ray buildup factor" **Ann. Nucl. Energy. 35**, **pp.** 2414.
- 109. Akkaş A. (2016) "Determination of the tenth and half value layer thickness of concretes with different densities" Acta. Phys. Polonica A 129, 4, pp. 770.
- 110. Henriksen T. and Baarli J. (**1957**) "Effective atomic numbers for photon energy absorption and photon attenuation of tissues from human organs" **Radiat. Res. 6**, 4, pp. **415**.
- 111. Shivaramu S. (2002) "Effective atomic numbers for photon energy absorption and photon attenuation of tissues from human organs" Medical. Dosimetry 27, pp. 1.
- 112. Han A. (2011) "Radiation Shielding and Radiological Protection", Department of Mechanical and Nuclear Engineering, Kansas State University, Manhattan, KS, USA.
- 113. Manohara S. R., Hanagodimath S. M., Thind K. S., Gerward L. (2008) "On the effective atomic number and electron density: A comprehensive set of formulas for all types of materials and energies above 1 keV" Nucl. Inst. Method Phys. Res. B 266, pp. 3906.
- Singh K. (2002) "Gamma-ray attenuation coefficients in bismuth borate glasses" Nucl. Inst. Method Phys. Res. B 194, pp. 1.
- 115. Singh T., Kaur G., Singh P. S. (2013) "Investigation of mass attenuation coefficient and energy absorption build-up factors of some low-Z gamma ray shielding materials" Int. J. Latest Res. Sci. Tech. 2, 5, pp. 73.
- 116. Knoll G. F. (**2010**) "**Radiation Detection and Measurement**" 4th edition, John Wiley & Sons, NewYork.

- 117. Al-Ani L. A., Goarge L. E., and Mahdi M. S. (2015) "Gamma ray buildup factor for finite media in energy range (4-10) MeV for Al and Pb" J. Al-Nahrain Uni. 18, pp. 88.
- 118. Deatanyah P., Arwui C. C., Wotorchi-Gordon S., Lawluvi H., Kpeglo D. O., Ankaah J., Emi-Reynold G., Darko E. O. (2011) "Determination of photon ambient dose buildup factors for radiological applications for points and plaque source configurations using MCNP5" Int. J. Sci. Tech. 1, 5, pp. 174.
- Musilek L., Cechak T., and F. Seda (1980) "The use of the Monte Carlo method for the calculation of build-up factors in wide conical gamma-radiation beams" Nucl. Instr. Meth. 174, pp. 565.
- 120. Kurudirek M., Dogan B., Ozdemir Y., Moreira A. C., Appoloni C. R., (2011) "Analysis of some earth, moon and mars samples in terms of gamma ray energy absorption buildup factors: penetration depth, weight fraction of consetituent elements and photon energy dependence", Radiat. Phys. Chem. 80, pp. 354.
- 121. Singh S., Kumar A., Singh C., Singh Thind K., Mudahar G. S. (2008) "Effect of finite sample dimensions and total scatter acceptance angle on the gamma ray buildup factor" Annal. Nucl. Energy 35, pp. 2414.
- 122. ANSUANS-6.4.3. (**1991**) "Gamma-ray attenuation coefficients and buildup factors for engineering materials" American Nuclear Society, North Kensington Avenue La Grange Park' Illinois, 60525 USA.
- 123. Harima Y. (1983) "An approximation of gamma-ray buildup factors by modified geometrical progression" Nucl. Sci. Eng. 83, 2, pp. 299.
- 124. Rasouli A., Tavakoli-Anbaran H. (2017) "Study of relation between the gamma flux buildup factors and source geometry by M-C simulation" Nucl. Sci. Tech. 28, pp. 136.
- 125. Alamatsaz M. H., Mokari M. (**2010**) "Calculating gamma ray exposure buildup factors for plane source and double stratified layers of water and lead and investigating effect of coherent scattering on these factors" **Iranian J. Phys. Res. 10**, **4**, pp. **103**.
- 126. Radiation Safety Manual (2014) University of Illinois, Urbana, Champaign.
- 127. Leo W. R. (**1993**) "Techniques for Nuclear and Particle Physics Experiments", 2nd edition, Springer, Germany.
- 128. Meja O. F. O. (**2007**) PhD thesis, "Micro and nano composites composed of a polymer matrix and a metal disperse phase" Department of Materials Science and Engineering, University of North Texas.
- 129. Saleh N. A. (2013) "Shielding for Gamma Ray and Beta Particles Made from Rubber Composite" Int. J. Current Eng. Tech. 3, 4, pp. 1387.
- 130. Tungsten metal safety data sheet, Teck Metals Ltd. (2015).
- 131. Zinc metal safety data sheet, Teck Metals Ltd. (2015).
- 132. Titanium metal safety data sheet, Teck Metals Ltd. (2015).
- Berger M. J., Hubbell J. H., "XCOM: Photon Cross Sections Database", Web Version 1.2, (1999). Available from: <u>http://physics.nist.gov/xcom</u>. Originally published as NBSIR 87-3597 XCOM: Photon Cross Sections on a Personal Computer, (1987).
- 134. Pelowitz D. B. (2002) "MCNPX User's Manual Version 2.4.0." Los Alamos National Laboratory, USA.
- Saiide N., and H. Kharratia (2013) "Monte Carlo simulation of photon buildup factors for shielding materials in radiotherapy x-ray facilities" Med. Phys. 40 (2013) 073901-13.

- 136. Pelowitz D. B. (2008) "MCNPX User's Manual Version 2.6.0." Los Alamos National Laboratory, USA.
- ANSI/ANS, gamma-ray attenuation coefficient and buildup factors for engineering materials. ANSI/ANS-6.4.3-1991. American Nuclear Society, La Grange, (1991) Illinois.
- 138. Karoui M. K., and H. Kharratia (**2013**) "Monte Carlo simulation of photon buildup factors for shielding materials in radiotherapy x-ray facilities" **Med. Phys. 40**, pp. 073901.
- DeMarco J. J., Wallace R. E., Boedeker K. (2002) "An analysis of MCNP crosssections and tally methods for low-energy photon emitters". Phys. Medicine. Biology. 47, pp. 1321.
- Briesmeister J. F. (2000) "MCNP- A general Monte Carlo N-particle transport code, version 4C", Los Alamos National Laboratory Report No. LA-13709-M (Los Alamos, NM).
- 141. Hoogenboom J. E., and D. Legrady (**2005**) "A critical review of the weight window generator in MCNP", American Nuclear Society, on CD-ROM.
- 142. Booth T. E. (2005) "MCNP Variance Reduction Examples" os Alamos National Laboratory, Diagnostic Applications Group X-5, Los Alamos, New Mexico, 87545 USA.
- 143. Aldhuhaibat M. J. R., Alfakhar M. K., Amana M. S. (2015) "Numerical buildup factor calculation of gamma rays for single, dual, and multi-layers shields using lead and aluminum" IJRSP. 6, pp. 5184.
- 144. Lin U. T. and Jiang S. H. (1996) "A dedicated empirical formula for γ-ray buildup factors for a point isotropic source in stratified shields" Radiat. Phys. Chem. 48, pp. 389.
- Shimizu A., Onda T., Sakamoto Y. (2004) "Calculation of gamma-ray buildup factors up to depths of 100 mfp by the method of invariant embedding (III)" J. Nucl. Sci. Tech. 41, 4, pp. 413.
- 146. Kai. M. (1981) "Alpha-, Beta- and Gamma-Ray Spectroscopy" Elsevier, NewYork.
- Sharaf J. M., Saleh H. (2015) "Gamma-ray energy buildup factor calculations and shielding effects of some Jordanian building structures" Radiat. Phys. Chem. 110, pp. 87.
- 148. Meric I., Johansen G. A., Holstad M. B., Gardner R. P. (2011) "Nuclear Monte Carlo modelling of gamma-ray stopping efficiencies of Geiger–Muller counters" Inst. Meth. Phys. Res. A. 636, pp. 61.
- 149. Tavakli-Anbaran H., Miri-Hakimabad H., and R. Izadi-Najafabadi. (**2009**) "Effects of the detector-collimator on the gamma-rays response function for a NaI(Tl) detector in a constant time of counts" **J. App. Sci. 9**, pp. **1550**.
- 150. Agarwal B. D., Broutman L. J. (1990) "Analysis and Performance of Fiber Composites" 2nd ed. John Wiley and Sons, New York.
- 151. Azeez A. B., Mohammed K. S., Abdullah M. M. A. B., Sandu A. V., Rahmat A., Hussin K., Jamaludin L. (2014) "Replacement of lead by green tungsten-brass composites as a radiation shielding material" Appl. Mech. Mater. 679, pp. 39.

Abstract

Lead and lead-based materials are commonly used as a shield against X- and gamma- rays in the environments exposed to radiation. Toxicity of this material caused unreversible effects on the people and environment. Therefore, an increasing efforts have been done to introduce a suitable replacement for lead. Although metals such as tungsten and bismuth are considered very good substituents for leas due to their high atomic number, introducing other parameters such as flexibility, workability, chemical stability, mechanical strength, thermal stability, low cost manufacturing, and low weight have been attracted attention to a new category of materials called composites in a great number of studies.

Metal-polymer composites (MPCs) are a new category of advanced materials whose effectiveness in the field of radiation protection has been proven both experimentally and theoretically. Using the MCNPX Monte Carlo code, an improved method is presented for modeling the polymer matrix reinforced with particles that is able to investigate the simultaneous effect of particle size and proportion on improving the ability of these materials to attenuate X-ray and gamma radiation so that structure homogeneity is preserved. Metal particles and metal oxide were used to strengthen the polymer structure. Such a product has a high potential for use as a photon shield.

Metals including lead (Pb), tungsten (W), zinc (Zn), and titanium (Ti) and their oxides including lead monoxide (PbO), tungsten trioxide (WO₃), zinc monoxide (ZnO), and titanium dioxide (TiO₂) was used as a macrostructure as well as microparticles and nanoparticles to reinforce polymer matrix composites. In order to find the proper geometry and to assure the variance reduction methods used, the buildup factors were calculated for the metals and metal oxides microstructures. According to the results, point detectors were used to increase the accuracy of the simulation and reduce the runtime of the program.

Next, modeling for light density polyethylene (LDPE) structure reinforced with Pb, W, Zn, and Ti particles in sizes of 100 μ m-100 nm and proportions of 1-25% wt% was done and shielding parameters including mass attenuation coefficient (μ/ρ), mean free distance (mfp), transmission factor (T), and buildup factor (B) were calculated for these structures. Using the relative difference between the amounts of nanostructures versus microstructures, the effect of particle size and proportion on the attenuation of the gamma radiation was evaluated and it was found that the effect of proportions on smaller particle sizes was less significant.

As the last part of the computation work, theoretical modeling was done in a good geometry for LDPE structures reinforced with nanoparticles and microparticles of metal oxides PbO, WO₃, ZnO, and TiO₂ and a comparative and comprehensive study on the shielding parameters including mass attenuation coefficient (μ/ρ), mean free distance (mfp), half-layer thickness (HVL), effective atomic number (Z_{eff}), effective electron density (N_e), transmission factor (T), and buildup factor (B) were done. On the basis of the photon-matter interactions at different energy intervals, it was found that these structures have the ability to attenuate radiation by ~ 98% at low energy region.

Then, the experimental study of epoxy resin structures reinforced with Pb, Zn, Ti, PbO, ZnO, and TiO₂ nanoparticles for ²⁴¹Am, ¹³⁷Cs, and ⁶⁰Co sources relying on proportions (5 and 25 wt%) and size effect (for Pb particles only) was performed. transmission factor (T), and buildup factor (B) of these structures were evaluated using area under photopeaks analysis.

The results showed that Pb and Pb-based structure have the best performance in attenuating gamma radiation both as a macrostructure and as microparticles and nanoparticles in the composite structure. However, the use of nanoparticles of other materials especially in the high proportions showed a good performance in protecting gamma rays. Finally, it should be noted that these materials perform remarkably well only at low energies in the investigated thicknesses (<200 mm).

Keywords: Metal-polymer composite, Gamma shielding, Size effect, Proportion effect, Monte Carlo simulation, Experimental measurement.



Faculty of Physics and Nuclear Engineering

Ph.D. Thesis in Nuclear Physics

Studying on the effectiveness of the Structures of Metals Titanium, Zinc, Tungsten, and Lead for X-rays and Gamma Radiation Shielding

By: Hoda Alavian

Supervisor: Dr. **Hossein Tavakoli-Anbaran**

September, 2019