

بررسی اثر غلظت نانو ذرات اکسید روی (ZnO) در پلی اتیلن بر روی ضریب عبور حفاظ پرتوهای گامای حاصل از چشمه‌های ^{241}Am و ^{137}Cs

سمیه سالاری و حسین توکلی عنبران*

دانشکده فیزیک و مهندسی هسته‌ای، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، سمنان، ایران.

*سمنان، شاهرود، دانشگاه صنعتی شاهرود، دانشکده فیزیک و مهندسی هسته‌ای، کد پستی: ۳۶۱۹۹-۹۵۱۶۱.

پست الکترونیکی: tavakoli-anbaran@shahroodut.ac.ir؛ tavakoli.anbaran@gmail.com

چکیده

اخیراً در بین پژوهشگران تلاش برای ساخت حفاظ‌های غیر سربی به دلیل وزن پایین و غیرسمی بودن آن اهمیت پیدا کرده است. در این پژوهش تلاش کردیم تا با ساخت حفاظ‌های نانوکامپوزیتی به دلیل سبکی، قیمت مناسب و غیرسمی بودن آن، جایگزینی مناسب برای حفاظ‌های سربی قرار دهیم. در این راستا ابتدا پلیمر پلی اتیلن با چگالی (0.923 g/cm^3) (LDPE) با حلال زایلین به صورت محلول ذوب کرده و پس از تبخیر کامل حلال در دمای محیط، پلی اتیلن را به صورت پودر به دست آوردیم. سپس به روش مخلوط سازی با غلظت‌های مختلف درصد وزنی نانوذرات اکسید روی در دو حالت جرم و حجم ثابت ترکیب کردیم. سپس با دستگاه پرس تحت فشار، قرص‌هایی با ابعاد مختلف ساختیم. قرص‌های ساخته شده را در معرض دو چشمه ^{241}Am (0.059 MeV) و ^{137}Cs (0.662 MeV) قرار دادیم. سپس با آشکارساز سوسوزن NaI(Tl)، شدت پرتوهای فرودی را اندازه‌گیری کردیم. با استفاده از داده‌های XCOM ضریب تضعیف خطی کل μ ، HVL و MFP را به روش تحلیلی به دست آوردیم. نتایج همخوانی خوبی بین داده‌های XCOM و تجربی نشان می‌دهد. همچنین نتایج داده‌های محاسبه شده تجربی و تئوری نشان می‌دهد نانوذرات اکسید روی با داشتن عدد اتمی و چگالی کمتر از سرب برای انرژی‌های پایین‌تر می‌تواند عملکرد حفاظتی مناسبی را از خود نشان دهد.

کلیدواژه‌ها: حفاظ‌گذاری، پرتوهای گاما، نانوکامپوزیت، پلی اتیلن، نانو اکسید روی.

۱. مقدمه

سرب به عنوان محافظ در لباس‌ها و مراکز هسته‌ای استفاده می‌شود. علی‌رغم این‌که سرب در حفاظ‌گذاری‌ها می‌تواند آسیب ناشی از پرتوها را به طور قابل توجهی کاهش دهد، به دلیل وزن خیلی بالا غیر انعطاف پذیر و سمی بودن‌شان می‌تواند خطرات جدی برای سلامت کارکنان و محیط زیست داشته باشد. بنابراین محققان در سال‌های اخیر تلاش کردن تا با ساخت نانوکامپوزیت‌ها جایگزینی ایمن و مناسب برای سرب پیدا کنند.

پرتوهای ایکس و گاما در زمینه‌های پزشکی مانند تصویربرداری، پرتودرمانی، صنعت و کشاورزی کاربردهای زیادی دارد که اگر به صورت اصولی و صحیح حفاظ‌گذاری در برابر پرتوها صورت نگیرد می‌تواند خطرات جدی برای جان انسان داشته باشد [۱-۴]. سرب به دلیل داشتن چگالی و عدد اتمی بالا، به خوبی می‌تواند پرتوهای پر انرژی مثل گاما و کم انرژی مثل ایکس را جذب و یا پراکنده کند. به همین خاطر از گذشته تا به الان از

نانوکامپوزیت‌ها ترکیبی از یک بخش پایه از جنس پلیمر، سرامیک و یا فلز است که با ذراتی در مقیاس نانومتر تقویت شده است. در این بین نانوکامپوزیت‌های پایه پلیمری به دلیل وزن کم، استحکام، پایداری حرارتی و مقاومت شیمیایی بالا بیشتر مورد توجه قرار گرفته‌اند [۵].

خواص مکانیکی کامپوزیت‌های ذرات-پلیمر به شدت به اندازه ذرات، چسبندگی رابط ذره-ماتریس و بارگذاری ذرات بستگی دارد. اندازه ذرات تأثیر آشکاری بر این خواص مکانیکی دارد [۶]. پلیمرها می‌توانند با بهبود خواص مکانیکی خود مانند مقاومت و چقرمگی و به دلیل اصطکاک کمتر و جابه‌جایی منظم، تأثیر قابل توجهی بر عملکرد و دوام فلزات داشته باشند [۷]. نتایج نشان می‌دهد ترکیب تنها ۱۰٪ ذرات بیسموت در سیلیکون در ابعاد نانو باعث کاهش ۱۸/۴٪ و در ابعاد میکرو تنها موجب کاهش ۱۲٪ دز شدند که این کامپوزیت جهت حفاظت بیماران در تصویربرداری پزشکی CT اسکن پستان طراحی شده بود [۸]. در پژوهشی دیگر، مقایسه ترکیب نانوذرات اکسید روی و اکسید تیتانیوم به طور جداگانه با پلی‌اتیلن با چگالی بالا (HDPE) نشان داد، ترکیب ۱۵٪ ZnO و HDPE کارایی برتر را در حفاظت در برابر تابش گاما نشان می‌دهد به طوری که در سطح انرژی ۱/۳۳۲ مگا الکترون‌ولت منجر به افزایش ۲۰ درصدی ضریب تضعیف جرمی و کاهش ۳۴ درصدی ضخامت نیم لایه (HVL) می‌شود [۹]. محققان دیگری با سنتز رزین اپوکسی تقویت شده با نانوذرات اکسید روی دریافتند، با افزایش غلظت نانوذرات اکسید روی تا ۲۰٪ وزنی موجب افزایش مقدار μ از ۰/۰۶۷ به ۰/۰۸۱ cm^{-1} می‌شود [۱۰]. با استفاده از ذرات ریزتر، بدون نیاز به کاهش حداقل استحکام، می‌توان درصد وزنی از فلزات سنگین را در حفاظت کامپوزیتی افزایش داد. این ویژگی باعث افزایش ضریب تضعیف جرمی می‌شود [۱۱]. افزودن نانوذرات به حفاظ‌های کامپوزیتی مزیت دیگری نیز دارد و آن افزایش ضریب جذب

خطی برای انرژی‌های کمتر است. این به دلیل افزایش زاویه پراکندگی رخ می‌دهد [۱۲]. در حقیقت عامل اصلی که باعث بروز رفتارهای متفاوت در نانوذرات می‌شود، ظهور اثرات کوانتومی - شامل محبوس شدن الکترون‌ها و تغییر چگالی حالت‌های انرژی و پاسخ اپتیکی ماده که موجب افزایش برهم‌کنش فوتون-الکترون می‌گردد و همچنین افزایش نسبت سطح به حجم در نانوذرات است. این دو عامل در کنار هم سبب افزایش چشمگیر ضریب تضعیف خطی تابش می‌شوند.

همچنین از دیگر پلیمرهایی که اخیراً استفاده شده از جمله PVC [۱۳، ۱۴]، پلی‌وینیل الکل [۱۵]، PVA/PVP [۱۶، ۱۷] و پلی‌پروپیلن (PP) [۱۸] و... با فلزات سنگین اصلاح شده‌اند تا بر روی فوتون‌های کم انرژی و متوسط به عنوان مواد محافظ هسته‌ای قرار گیرند [۱۹].

با توجه به مطالعات پیشین، تلاش کردیم تا برای ساخت نانوکامپوزیت سبک با قیمت مناسب و اثربخشی قابل توجه، از پلیمر پلی‌اتیلن سبک به همراه فلز اکسید روی در ابعاد نانومتر استفاده کنیم.

۲. تئوری مسئله

غالب‌ترین اندرکنش‌های پرتوهای ایکس و گاما با ماده شامل اثر فتوالکتریک، پراکندگی کامپتون و تولید زوج هستند. سهم هر یک از این فرایندها عمدتاً به انرژی فوتون و عدد اتمی و ترکیب ماده بستگی دارد. برای پرتوهای فرودی کمتر از 1.02 MeV اندرکنش غالب اثر فتوالکتریک و یا پراکندگی کامپتون خواهند بود. در صورتی که انرژی فوتون فرودی بیشتر از 1.02 MeV باشد، احتمال رخداد تولید زوج در کنار اثر فتوالکتریک و پراکندگی کامپتون افزایش می‌یابد [۲۰، ۲۱]. بنابراین با توجه به چشمه‌های انتخابی ^{241}Am و ^{137}Cs که به ترتیب پرتوهای گامای 59 keV و 662 keV گسیل می‌کنند، پس از برخورد فوتون به ماده، احتمال رخداد اثر فتوالکتریک و پراکندگی کامپتون بیشتر است.

میزان تضعیف پرتوهای ایکس و گاما یک ماده به وسیله قانون تضعیف نمایی بیر-لامبرت توضیح داده می شود. ارتباط بین پرتو ایکس و گاما با ماده توسط رابطه (۵) نشان داده شده است:

$$I = I_0 e^{-\mu_l t} \quad (5)$$

که I تعداد فوتون های عبوری از ماده بدون اندرکنش، I_0 تعداد فوتون های اولیه قبل از عبور از ماده، t (cm) ضخامت ماده محافظتی و μ_l (cm^{-1}) ضریب تضعیف خطی کل ماده حفاظتی است. ضریب تضعیف خطی کل (μ_l) ویژگی شاخص ماده است که به انرژی فوتون، عدد اتمی و چگالی ماده حفاظتی بستگی دارد. با توجه به رابطه (۵) می توان ضریب عبور T ، با استفاده از رابطه (۶) به دست آوریم:

$$T = \frac{I}{I_0} = e^{-\mu_l t} \quad (6)$$

۲.۲. محاسبه ضخامت نیم لایه HVL

کمیت مهم دیگر برای اندازه گیری، ضخامت نیم لایه (HVL) است. ضخامت نیم لایه میزان ضخامت از ماده جاذب است که پرتوهای فرودی را به نصف مقدار اولیه کاهش می دهد، از رابطه (۷) محاسبه می شود:

$$HVL(\text{cm}) = \frac{0.693}{\mu_l(\text{cm}^{-1})} \quad (7)$$

۳.۲. محاسبه مسافت آزاد میانگین MFP

مسافتی که در آن ذره پس از ورود به ماده بدون برهم کنش طی می کند با معادله (۸) محاسبه می شود:

$$MPF(\text{cm}) = \frac{1}{\mu_l} \quad (8)$$

۴.۲. محاسبه ضریب تضعیف خطی کل با استفاده از

روش تئوری

ضریب تضعیف خطی کل استخراج شده از پایگاه داده XCOM به صورت ضریب تضعیف جرمی μ_m (با واحد cm^2/g) ارائه می شود. برای محاسبه پارامترهایی نظیر ضخامت نیم لایه (HVL) و مسیر آزاد میانگین (MFP)، لازم است

در این پژوهش برای بررسی کارایی حفاظ ساخته شده در مقابل پرتوهای پر انرژی، کمیت های ضریب تضعیف خطی کل μ_l ، HVL و MFP محاسبه می شود.

۱.۲. محاسبه ضریب تضعیف خطی کل μ_l

فوتون ها در انرژی های کمتر احتمال وقوع اثر فتوالکتریک بیشتری دارند و از آنجایی که ضریب تضعیف خطی فتوالکتریک بستگی قوی به عدد اتمی ماده و انرژی پرتوهای فرودی دارد، ضریب تضعیف خطی فتوالکتریک را از معادله (۱) محاسبه می کنند:

$$\tau(m^{-1}) \sim \frac{Z^n}{E_\gamma^m} \quad (1)$$

برای گستره انرژی های فوتون، n و m بین ۳ تا ۵ تغییر می کند که مقدار آن بستگی به انرژی فوتون دارد. در انرژی های میانی، احتمال وقوع پراکندگی کامپتون افزایش می یابد و ضریب تضعیف خطی مربوط به پراکندگی کامپتون با نماد σ مطابق معادله (۲) محاسبه می شود.

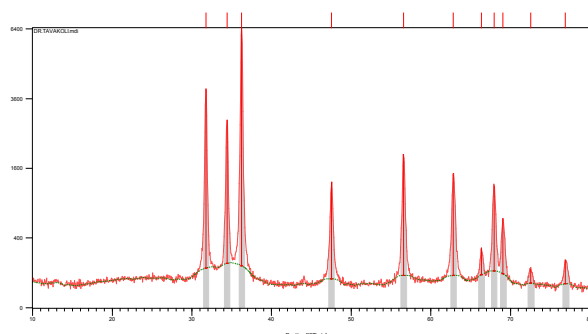
$$\sigma(\text{cm}^{-1}) \approx N_A \rho \sigma_e \quad (2)$$

در این رابطه σ_e ضریب تضعیف خطی کامپتون برای تک الکترون است. افزایش عدد اتمی به مقادیر بالاتر سبب می شود جذب به پراکندگی غلبه کند و احتمال وقوع پراکندگی کامپتون در این شرایط کاهش یابد. در انرژی های بالاتر، احتمال فرآیند تولید زوج بر اساس ضریب تضعیف خطی تولید زوج κ مطابق معادله (۳) افزایش می یابد:

$$\kappa(m^{-1}) = NZ^2 f(E_\gamma, Z) \quad (3)$$

مطابق با رابطه (۴)، از مجموع ضریب تضعیف خطی های سه برهم کنش فوق، ضریب تضعیف خطی کل μ_l به دست می آید که به Z و E وابسته است. بنابراین، هر چه عدد اتمی ماده بیشتر باشد احتمال اندرکنش فوتون بیشتر است.

$$\mu_l(m^{-1}) = \tau + \sigma + \kappa \quad (4)$$



شکل (۱): طیف اندازه‌گیری شده XRD از نانو ذرات ZnO.

با توجه به طیف XRD نانوذرات، پیک با بالاترین شدت انتخاب شده و مقدار FWHM آن در جدول ۳ مشخص گردیده است. این مقادیر سپس برای محاسبه اندازه کریستالیت در رابطه (۱۰) مورد استفاده قرار می‌گیرند.

$$D = \frac{\kappa\lambda}{\beta \cos \theta} \quad (10)$$

در رابطه دبی-شرر، D اندازه کریستالیت، K ضریب شکل هندسی، λ طول موج اشعه X، β عرض پیک در نیمه بیشینه (FWHM) بر حسب رادیان و θ زاویه پیک نسبت به صفحه بلوری است.

$$K = 0.98$$

$$\lambda = 0.154 \text{ nm}$$

$$\beta = \frac{\pi}{180} \times FWHM = \frac{3.14}{180} \times 0.2952 = 0.0051$$

$$2\theta = 36.2499 \rightarrow \theta = 18.12495$$

$$\cos(18.12495) = 0.95$$

$$D = \frac{0.98 \times 0.154}{0.0051 \times 0.95} = 30.2 \text{ nm}$$

که اندازه محاسبه شده ۳۰/۲ نانو است.

حلال استفاده شده در این پژوهش، زایلین با فرمول شیمیایی C_8H_{10} است که از شرکت مرک آلمان خریداری کردیم. نقطه جوش زایلین ۱۳۹ درجه سانتی‌گراد است که از نقطه ذوب پلی‌اتیلن که بین ۱۰۵ تا ۱۱۵ درجه سانتی‌گراد است، بیشتر است و همین ویژگی کمک می‌کند، پلی‌اتیلن را با دمای بالاتر داخل حلال ذوب کنیم.

ضریب تضعیف خطی کل به دست آید. این مقدار با ضرب ضریب تضعیف جرمی در چگالی نمونه طبق رابطه (۹) محاسبه می‌شود. چگالی قرص‌های تهیه شده نیز از طریق اندازه‌گیری جرم و حجم نمونه تعیین می‌گردد.

$$\mu_l = \mu_m \times \rho \quad (9)$$

۳. بخش تجربی

۱.۳. مشخصات پلی‌اتیلن و نانوذرات اکسیدروی

پلی‌اتیلن با گرید $2420 E+2$ از شرکت پترو شیمی کردستان تهیه کردیم. ویژگی‌های این گرید در جدول ۱ آمده است. جدول (۱): اطلاعات پلی‌اتیلن با چگالی کم (LDPE) گرید $2420 E+2$.

چگالی (g/cm^3)	0.923 ± 0.02
شاخص جریان مذاب ($g/10min$)	$1/9 \pm 0.2$
نقطه ذوب ($^{\circ}C$)	۱۱۵-۱۰۵
فرمول شیمیایی	$(C_2H_4)_n$

نانوذرات اکسید روی با ابعاد ۳۰ nm از شرکت آرمان نانو فناوری رابین تهیه کردیم. برخی از ویژگی‌های نانوذرات ZnO در جدول ۲ ذکر شده است.

جدول (۲): مشخصات نانوذره اکسید روی.

ZnO	ترکیب شیمیایی
۹۸/۴ %	درصد خلوص
۳۰	متوسط اندازه بلورک (nm)
۰/۳۶	چگالی (g/cm^3)
۶/۵	اندازه حفرات سطحی (nm)

۲.۳. تست XRD

قبل از ساخت نمونه برای اندازه‌گیری دقیق از اندازه بلورک‌های نانوذرات اکسید روی از آنالیز XRD استفاده کردیم که در شکل ۱ ترسیم شده است.

جدول (۳): الگوی پراش XRD نمونه و مشخصات پیک‌ها (PeakList).

Pos. (°2Th.)	Height (cts)	FWHM (°2Th.)	d-spacing	Rel. Int. (%)	Tip width (°2Th.)	Matched by
۳۱/۷۶۵۶	۳۸۲۷/۲۷	۰/۲۴۶۰	۲/۸۱۷۰۲	۶۰/۴۰	۰/۲۵۰۰	۰۱-۰۷۹-۲۲۰۵
۳۴/۴۱۱۱	۲۷۴۳/۴۳	۰/۲۴۶۰	۲/۶۰۶۲۷	۴۳/۳۹	۰/۲۵۰۰	۰۱-۰۷۹-۲۲۰۵
۳۶/۲۴۹۹	۶۳۳۷/۰۴	۰/۲۹۵۲	۲/۴۷۸۱۸	۱۰۰/۰۰	۰/۳۰۰۰	۰۱-۰۷۹-۲۲۰۵
۴۷/۵۳۹۸	۱۲۳۲/۵۲	۰/۳۴۴۴	۱/۹۱۲۶۹	۱۹/۴۵	۰/۳۵۰۰	۰۱-۰۷۹-۲۲۰۵
۵۶/۵۶۱۶	۱۸۵۶/۹۵	۰/۳۴۴۴	۱/۶۳۷۱۶	۲۹/۳۰	۰/۳۵۰۰	۰۱-۰۷۹-۲۲۰۵
۶۲/۸۲۰۳	۱۴۰۲/۷۵	۰/۳۹۳۶	۱/۴۷۹۲۷	۲۲/۱۴	۰/۴۰۰۰	۰۱-۰۷۹-۲۲۰۵
۶۶/۳۴۷۸	۲۰۲/۸۷	۰/۲۴۶۰	۱/۴۰۸۹۲	۳/۲۰	۰/۲۵۰۰	۰۱-۰۷۹-۲۲۰۵
۶۷/۹۳۹۷	۱۱۰۶/۰۸	۰/۳۴۴۴	۱/۳۷۹۷۴	۱۷/۴۵	۰/۳۵۰۰	۰۱-۰۷۹-۲۲۰۵
۶۹/۰۵۶۰	۵۶۴/۳۵	۰/۳۹۳۶	۱/۳۶۰۱۴	۸/۹۱	۰/۴۰۰۰	۰۱-۰۷۹-۲۲۰۵
۷۲/۵۵۳۷	۷۰/۹۱	۰/۴۹۲۰	۱/۳۰۲۹۵	۱/۱۲	۰/۵۰۰۰	۰۱-۰۷۹-۲۲۰۵
۷۶/۸۸۸۲	۱۴۰/۶۱	۰/۴۸۰۰	۱/۲۳۸۹۲	۲/۲۲	۰/۴۰۰۰	۰۱-۰۷۹-۲۲۰۵

$$\omega_{ZnO} = \frac{M_{ZnO}}{M_{PE} + M_{ZnO}} \times 100 \quad (11)$$

در روش دوم (حجم ثابت)، با ثابت در نظر گرفتن حجم نمونه، جرم نانوذره مورد نیاز بر اساس مقدار اولیه پلی اتیلن تعیین شد و از رابطه (۱۲) برای محاسبه درصد وزنی استفاده گردید.

$$M_{ZnO} = \frac{\rho_{ZnO}}{\rho_{PE}} (M - M_{PE}) \quad (12)$$

در این رابطه M بزرگ، جرم کل در نظر گرفته شده است که به ترتیب برابر ۳، ۴ و ۳ گرم است.

درصدهای نهایی حاصل در حالت حجم ثابت به این شرح بودند: برای نمونه‌های ۲ گرمی: ۵/۲، ۱۱/۵، ۱۹، ۲۸ و ۳۰ درصد برای نمونه‌های ۳ گرمی: ۷/۲، ۱۶ و ۲۸ درصد و برای نمونه‌های ۴ گرمی: ۵/۳، ۱۲، ۱۹ و ۲۹ درصد.

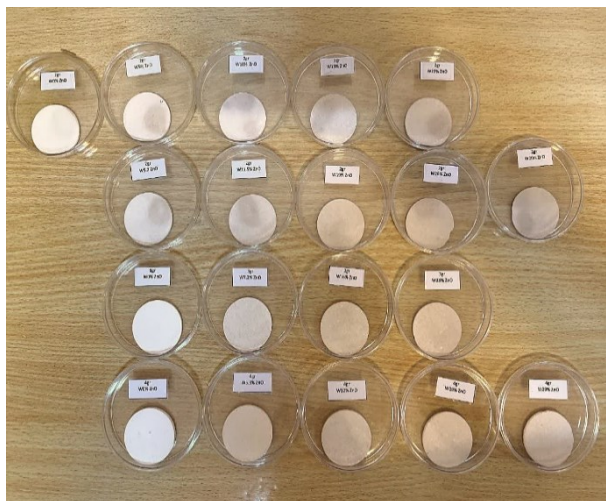
حداکثر درصد وزنی نانوذرات به ۳۰ درصد محدود شد، چراکه در مقادیر بالاتر، به دلیل کاهش پلی اتیلن و افزایش ذرات اکسید روی، نمونه‌ها هنگام پرس شدن به دستگاه چسبیده و شکل‌گیری قرص انجام نمی‌شد.

در نهایت، با تعیین درصدهای وزنی و آماده‌سازی مخلوط، فرآیند ساخت قرص‌ها با استفاده از دستگاه پرس آزمایشگاه تجزیه مطابق شکل ۳ انجام شد. پودر تهیه شده داخل نگهدارنده نمونه ریخته شده و در زیر فک‌های دستگاه قرار گرفت. این دستگاه قادر است فشاری تا ۳۷۵ کیلوگرم نیرو (معادل ۲۰۰ نیوتن) وارد کند. فشار اعمال شده برای هر قرص به صورت

۳.۳. ساخت نانو کامپوزیت ZnO-LDPE

برای ساخت تمام نمونه‌های نانوکامپوزیت، از ۴۰ گرم پلی اتیلن و ۴۰۰ میلی‌لیتر حلال زایلین استفاده شد. در آغاز، مخلوط پلی اتیلن و زایلین به داخل بشر منتقل گردید و بشر روی هیتز مگنت قرار گرفت. دمای هیتز در بازه ۸۰ تا ۹۰ درجه سانتی‌گراد و سرعت چرخش بین ۹۰۰ تا ۱۲۰۰ دور بر دقیقه تنظیم شد. برای ذوب کامل پلی اتیلن در حلال، حدود یک ساعت زمان لازم بود. پس از آن، محلول به ظروف پتری‌دیش منتقل گردید و به مدت ۲۴ ساعت در فضای آزاد قرار داده شد تا تبخیر کامل حلال انجام شود. محصول نهایی در این مرحله، پلی اتیلن خالص بود که مطابق شکل ۲ پس از خشک‌شدن، با استفاده از هاون دستی یا آسیاب گلوله‌ای به پودر تبدیل شد.

در ادامه، برای ساخت نمونه‌هایی با درصد وزنی متفاوت از نانوذرات اکسید روی، مقادیر مورد نیاز با ترازوی دیجیتال با دقت ۰/۰۰۱ گرم اندازه‌گیری شد. سپس، نانوذرات با درصدهای مختلف وزنی به پودر پلی اتیلن افزوده شده و به روش مخلوط‌سازی ترکیب شدند. برای تهیه قرص‌ها، دو رویکرد جرم ثابت و حجم ثابت به کار گرفته شد. در روش اول، با ثابت نگه داشتن جرم پلی اتیلن (۲ گرم)، نانوذرات با درصد وزنی ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ درصد طبق رابطه (۱۱) به آن افزوده شدند.



شکل (۴): قرص‌های ساخته شده با دستگاه پرس.

در نهایت، چگالی قرص‌های ساخته شده با محاسبه وزن، ضخامت و قطر نهایی و با استفاده از ترازو بادقت 0.001 g و ریزسنگ بادقت 0.001 cm ، طبق رابطه (۱۳) به دست آمد.

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (13)$$

برای محاسبه حجم V مورد نیاز در رابطه (۱۳)، از رابطه (۱۴) استفاده شد که در آن شعاع و ضخامت هر قرص است.

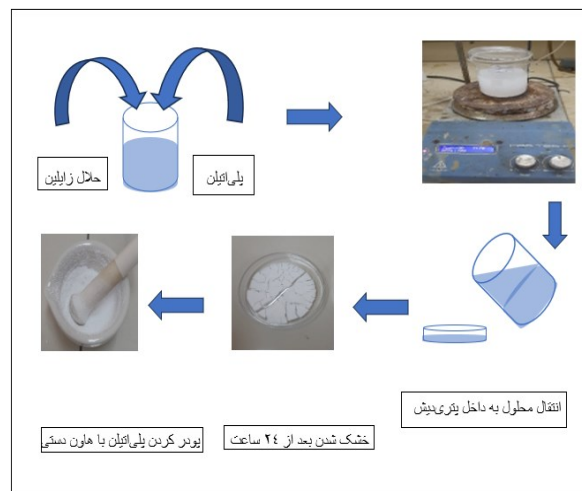
$$V = \pi r^2 x \quad (14)$$

اطلاعات مربوط به قطر r ، ضخامت x و جرم m هر نمونه در جدول‌های ۴ تا ۷ مشخص شده است.

جدول (۴): درصد وزنی، جرم کل، ضخامت و چگالی کل در حالت ۲ گرم جرم ثابت در محاسبات تجربی به همراه درصد خطای محاسباتی.

چگالی قرص‌ها (g/cm^3) $\pm \sigma$	ضخامت (cm)	جرم کل (g)	درصد وزنی نانوذرات $\omega_{\text{ZnO}} (\%)$
0.769 ± 0.006	0.189	1.97	0
0.734 ± 0.005	0.210	2.09	5
0.809 ± 0.005	0.198	2.17	10
0.808 ± 0.005	0.211	2.31	15
0.797 ± 0.005	0.225	2.43	20

تجربی تعیین شد؛ به گونه‌ای که برای نمونه‌های ۲ گرمی فشاری معادل 30 kPa ، برای ۳ گرمی‌ها 20 kPa و برای ۴ گرمی‌ها 10 kPa در نظر گرفته شد. تصاویر تمام قرص‌های تهیه شده در شکل ۴ آمده است. قطر هر قرص برابر با $4/155$ سانتی‌متر است.

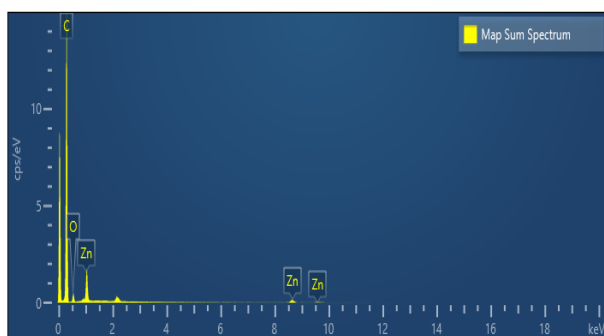


شکل (۲): مراحل آماده سازی پودر پلی اتیلن.



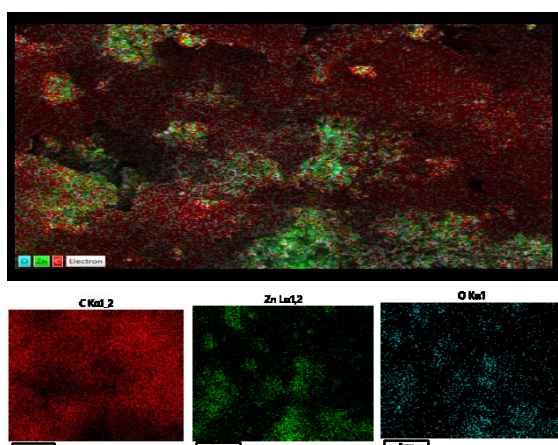
شکل (۳): دستگاه پرس آزمایشگاه تجزیه.

FE-SEM که در شکل های ۵ و ۶ مشخص شده است، استفاده کردیم. تصاویر FE-SEM و نقشه های EDAX با بزرگنمایی ۵ میکرومتر نشان می دهند که نانوذرات اکسید روی به طور یکنواخت در ماتریس پلی اتیلن توزیع شده اند و خوشه بندی قابل توجهی مشاهده نمی شود. همچنین آنالیز EDAX نشان می دهد که در نمونه ها هیچ گونه ناخالصی یا عنصر خارجی قابل تشخیص وجود ندارد و ترکیب شیمیایی مورد انتظار حفظ شده است.



Map Sum Spectrum				
Element	Lime Type	Weight%	Weight% Sigma	Atomic%
C	K series	۸۵/۳۸	۰/۳۰	۹۲/۸۱
Zn	L series	۷/۶۹	۰/۱۵	۱/۵۴
O	K series	۶/۹۲	۰/۲۸	۵/۶۵
Total		۱۰۰/۰۰		۱۰۰/۰۰

شکل (۵): درصد مواد تشکیل دهنده و خالص بودن قرص ها.



شکل (۶): میزان پخش شدگی نانوذرات اکسید روی در پلی اتیلن با

بزرگنمایی ۵ میکرومتر.

جدول (۵): درصد وزنی، جرم کل، ضخامت و چگالی کل در حالت گرم حجم ثابت در محاسبات تجربی به همراه درصد خطای محاسباتی.

چگالی قرص ها $\pm \sigma$ (g/cm ^۳)	ضخامت (cm)	جرم کل (g)	درصد وزنی نانوذرات ω_{ZnO} (%)
0.796 ± 0.06	۰/۱۸۹	۱/۹۷	۰
0.772 ± 0.06	۰/۱۷۳	۱/۸۱	۵/۲
0.800 ± 0.07	۰/۱۵۳	۱/۶۶	۱۱/۵
0.820 ± 0.09	۰/۱۳۵	۱/۵۰	۱۹
0.8۱۹ ± 0.09	۰/۱۱۸	۱/۳۱	۲۸
0.7۸۷ ± 0.09	۰/۱۲۰	۱/۲۸	۳۰

جدول (۶): درصد وزنی، جرم کل، ضخامت و چگالی کل در حالت گرم حجم ثابت در محاسبات تجربی به همراه درصد خطای محاسباتی.

چگالی قرص ها $\pm \sigma$ (g/cm ^۳)	ضخامت (cm)	جرم کل (g)	درصد وزنی نانو ذرات ω_{ZnO} (%)
0.771 ± 0.03	۰/۲۸۹	۲/۹۹	۰
0.777 ± 0.03	۰/۲۵۴	۲/۶۷	۷/۲
0.774 ± 0.03	۰/۲۲۶	۲/۳۷	۱۶
0.8۸۰ ± 0.05	۰/۱۷۲	۲/۰۵	۲۸

جدول (۷): درصد وزنی، جرم کل، ضخامت و چگالی کل در حالت گرم حجم ثابت در محاسبات تجربی به همراه درصد خطای محاسباتی.

چگالی قرص ها $\pm \sigma$ (g/cm ^۳)	ضخامت (cm)	جرم کل (g)	درصد وزنی نانو ذرات ω_{ZnO} (%)
0.672 ± 0.01	۰/۴۳۸	۳/۹۹	۰
0.677 ± 0.02	۰/۳۹۹	۳/۶۶	۵/۳
0.6۹۲ ± 0.02	۰/۳۵۴	۳/۳۲	۱۲
0.6۹۷ ± 0.02	۰/۳۲۰	۳/۰۲	۱۹
0.7۴۸ ± 0.03	۰/۲۶۵	۲/۶۹	۲۹

مقایسه چگالی پلی اتیلن قبل و بعد از ساخت نانوکامپوزیت نشان می دهد، چگالی از ۰/۹۲۳ به ۰/۷۶۹ g/cm^۳ کاهش یافته است. این کاهش به دلیل فشردگی پلی اتیلن توسط دستگاه پرس است. همچنین چگالی ترکیب پلی اتیلن و نانوذرات نیز از تئوری به تجربی کاهش یافته است که علت آن متخلخل بودن نانوذرات است. تحت فشار زیاد، نانو ذرات فشرده شده و در نتیجه چگالی قرص ها نسبت به مقادیر محاسبه شده به صورت تئوری کاهش می یابد.

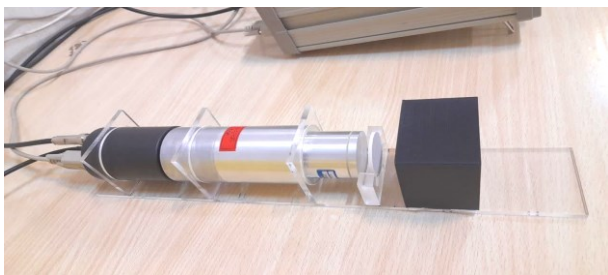
۴. تست FESEM و EDAX

بعد از ساخت قرص ها برای اطمینان از خالص بودن نمونه ها و میزان پخش شدگی نانوذرات در پلی اتیلن از آنالیز EDAX و

۱.۵. نتایج اندازه‌گیری ضریب عبور و ضریب تضعیف خطی

کل برای چشمه ^{241}Am

در ابتدا، از چشمه ^{241}Am با اکتیویته $5\ \mu\text{Ci}$ استفاده می‌کنیم. نحوه چیدمان آزمایش مطابق شکل ۷ نشان داده شده است.



شکل (۷): چیدمان آزمایش.

با قراردادن H.V روی $686\ \text{V}$ ، بعد از $30\ \text{دقیقه}$ جهت پایداری جریان تاریکی در PMT اقدام به انجام آزمایش نمودیم. ابتدا با دو چشمه ^{241}Am و ^{137}Cs سیستم را کالیبره می‌کنیم. بعد از اندازه‌گیری چشمه ^{241}Am بدون نمونه در مدت زمان $150\ \text{ثانیه}$ ، قرص‌های ساخته شده را در چیدمان آزمایش قرار می‌دهیم. در انتها بعد از برداشتن چشمه، پرتوهای زمینه را ثبت می‌کنیم. برای مقایسه ضریب تضعیف خطی کل و ضریب عبور به همراه خطای نسبی آن‌ها به دست آمده از داده‌های تجربی با چشمه ^{241}Am در انرژی $59\ \text{keV}$ با داده‌های XCOM در جداول ۸ تا ۱۱ قرار داده شده است. برای محاسبه خطای نسبی هر پارامتر از رابطه انتشار خطا طبق معادله (۱۵) و (۱۶) استفاده کردیم:

$$\frac{\sigma_T}{T} = \sqrt{\left(\frac{\sigma_r}{r}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{r_0}}{r_0}\right)^2} \quad (15)$$

۵. آزمایش تجربی جهت اندازه‌گیری ضریب عبور و

ضریب تضعیف خطی کل

در نهایت به بررسی میزان اثرگذاری حفاظ‌های ساخته شده در مقابل چشمه‌های ^{241}Am و ^{137}Cs به ترتیب با انرژی‌های $59\ \text{keV}$ و $662\ \text{keV}$ در پارامترهای ضریب عبور، ضریب تضعیف خطی کل μ_m ، ضریب تضعیف جرمی μ_m ، HVL و MFP می‌پردازیم.

آشکارساز استفاده شده NaI(Tl) است با ابعاد $2\ \text{اینچ}$ و طول آن در حدود $10\ \text{سانتی‌متر}$ ($2\ \text{تا}\ 4\ \text{اینچ}$) است. این نوع آشکارساز به دلیل قابلیت جذب فوتون‌های گاما در طیف‌سنجی هسته‌ای و اندازه نسبتاً کوچک، در تحقیقات و اندازه‌گیری‌های پرتو گاما کاربرد فراوان دارند. راندمان این نوع آشکارسازها به عوامل مختلفی نظیر انرژی فوتون‌ها، هندسه چشمه، فاصله چشمه از آشکارساز و ضخامت کریستال بستگی دارد. برای نمونه، برای چشمه ^{137}Cs با انرژی $662\ \text{کیلو الکترون‌ولت}$ (keV)، راندمان مطلق آشکارسازهای $2\ \text{اینچ}$ معمولاً بین $1\ \text{تا}\ 2\ \text{درصد}$ متغیر است. همچنین، برای چشمه امرسیوم- ^{241}Am (با انرژی $59\ \text{کیلو الکترون‌ولت}$)، راندمان معمولاً در حدود $3\ \text{تا}\ 4\ \text{درصد}$ است. این راندمان از ترکیب راندمان هندسی (وابسته به زاویه دید آشکارساز نسبت به منبع تابش و فاصله آن) و راندمان ذاتی (وابسته به جذب فوتون‌ها در کریستال) به دست می‌آید. در این نوع آشکارسازها، زمان مرده معمولاً از نوع غیر قابل بازیابی (Non-paralyzable) است؛ به این معنا که پس از ثبت هر رویداد، مدت زمان مشخصی، معمولاً بین $1\ \text{تا}\ 10\ \text{میکروثانیه}$ لازم است تا آشکارساز قادر به ثبت رویداد بعدی باشد. این ویژگی به‌ویژه در شرایطی که نرخ رویدادها بالا باشد، می‌تواند تأثیرگذار باشد و منجر به کاهش دقت در اندازه‌گیری‌ها گردد. این آشکارسازها به دلیل دقت بالا و طراحی مناسب، در بسیاری از سیستم‌های اندازه‌گیری پرتوگاما در کاربردهای مختلف هسته‌ای و پزشکی استفاده می‌شوند [۲۲].

مطابق جدول ۱۰ با افزایش درصد نانوذرات اکسیدروی، کاهش خوبی در ضریب عبور و افزایش مناسبی در ضریب تضعیف خطی کل از خود نشان داده است. کمترین میزان ضریب عبور و بیشترین مقدار ضریب تضعیف خطی کل مربوط به نمونه ۲۸٪ است. مطابق جدول ۱۱ ضریب عبور روند نزولی دارد جز نمونه ۵/۳٪ که افزایش ضریب عبور داشته است. نمونه ۲۹٪ با کمترین میزان ضریب عبور و بیشترین میزان ضریب تضعیف خطی کل است.

$$\sigma_{\mu_l} = \sqrt{\left(\frac{\sigma_x}{x}\right)^2 + \left(\frac{1}{\ln(T)}\right)^2 \left(\frac{\sigma_T}{T}\right)^2} \quad (16)$$

مطابق جدول ۸ نمونه ۲۰٪ کمترین میزان ضریب عبور و بالاترین ضریب تضعیف خطی کل با کمترین خطای ۰/۲۴ به دلیل افزایش نانوذرات اکسیدروی دارد همچنین مشاهده می گردد خطای اندازه گیری ضریب تضعیف خطی کل حدود ۵۰٪ است که برای کاهش آن و به دست آوردن داده هایی با اعتبار بالاتر در قسمت ۶ راهکار آن بیان گردیده است.

مطابق جدول ۹ نمونه ۵/۲٪ کمترین میزان ضریب عبور و نمونه های ۲۸٪ و ۳۰٪ بیشترین میزان ضریب تضعیف خطی کل به دلیل افزایش درصد نانوذرات اکسیدروی را دارا است.

جدول (۸): ضریب عبور و مقایسه ضریب تضعیف خطی کل تئوری و تجربی و خطای نسبی هر کدام در حالت جرم ثابت ۲ گرم برای چشمه ^{241}Am .

ضریب تضعیف خطی کل تئوری $\mu_l(\text{m}^{-1})$	ضریب تضعیف خطی کل تجربی $\mu_l(\text{m}^{-1})$	ضریب عبور T $\pm \sigma_T / T$	درصد وزنی نانوذرات $\omega_{\text{ZnO}} (\%)$
۰/۱۵	۰/۱۰ $\pm$ ۰/۴۹	۰/۹۸ $\pm$ ۰/۰۱	۰
۰/۱۹	۰/۰۰ $\pm$ ۰/۴۹	۱/۰ $\pm$ ۰/۰۱	۵
۰/۲۷	۰/۱۰ $\pm$ ۰/۴۹	۰/۹۸ $\pm$ ۰/۰۱	۱۰
۰/۳۲	۰/۰۹ $\pm$ ۰/۴۹	۰/۹۸ $\pm$ ۰/۰۱	۱۵
۰/۳۷	۰/۱۸ $\pm$ ۰/۲۴	۰/۹۶ $\pm$ ۰/۰۱	۲۰

جدول (۹): ضریب عبور و مقایسه ضریب تضعیف خطی کل تئوری و تجربی و خطای نسبی هر کدام در حالت حجم ثابت ۲ گرم برای چشمه ^{241}Am .

ضریب تضعیف خطی کل تئوری $\mu_l(\text{m}^{-1})$	ضریب تضعیف خطی کل تجربی $\mu_l(\text{m}^{-1})$	ضریب عبور T $\pm \sigma_T / T$	درصد وزنی نانوذرات $\omega_{\text{ZnO}} (\%)$
۰/۱۵	۰/۲۶ $\pm$ ۰/۲۱	۰/۹۵ $\pm$ ۰/۰۱	۰
۰/۲۰	۰/۳۲ $\pm$ ۰/۱۹	۰/۹۴ $\pm$ ۰/۰۱	۵/۲
۰/۲۸	۰/۲۶ $\pm$ ۰/۲۷	۰/۹۶ $\pm$ ۰/۰۱	۱۱/۵
۰/۳۷	۰/۳۱ $\pm$ ۰/۲۵	۰/۹۶ $\pm$ ۰/۰۱	۱۹
۰/۴۶	۰/۳۹ $\pm$ ۰/۲۳	۰/۹۵ $\pm$ ۰/۰۱	۲۸
۰/۴۷	۰/۳۹ $\pm$ ۰/۲۳	۰/۹۵ $\pm$ ۰/۰۱	۳۰

جدول (۱۰): ضریب عبور و مقایسه ضریب تضعیف خطی کل تئوری و تجربی و خطای نسبی هر کدام در حالت حجم ثابت ۳ گرم برای چشمه ^{241}Am .

ضریب تضعیف خطی کل تئوری $\mu_l(\text{m}^{-1})$	ضریب تضعیف خطی کل تجربی $\mu_l(\text{m}^{-1})$	ضریب عبور T $\pm \sigma_T / T$	درصد وزنی نانوذرات $\omega_{\text{ZnO}} (\%)$
۰/۱۵	۰/۰۹ $\pm$ ۰/۳۹	۰/۹۷ $\pm$ ۰/۰۱	۰
۰/۲۲	۰/۱۹ $\pm$ ۰/۲۲	۰/۹۵ $\pm$ ۰/۰۱	۷/۲
۰/۳۲	۰/۲۰ $\pm$ ۰/۲۲	۰/۹۵ $\pm$ ۰/۰۱	۱۶
۰/۵۰	۰/۴۲ $\pm$ ۰/۱۵	۰/۹۳ $\pm$ ۰/۰۱	۲۸

جدول (۱۱): ضریب عبور و مقایسه ضریب تضعیف خطی کل تئوری و تجربی و خطای نسبی هر کدام در حالت حجم ثابت ۴ گرم برای چشمه ^{241}Am .

ضریب تضعیف خطی کل تئوری $\mu_l(\text{m}^{-1})$	ضریب تضعیف خطی کل تجربی $\mu_l(\text{m}^{-1})$ $\pm \sigma_{\mu_l} / \mu_l$	ضریب عبور T $\pm \sigma_T / T$	درصد وزنی نانوذرات $\omega_{\text{ZnO}} (\%)$
۰/۱۳	۰/۰۸ $\pm$ ۰/۳۰	۰/۹۶ $\pm$ ۰/۰۱	۰
۰/۱۸	۰/۰۵ $\pm$ ۰/۴۶	۰/۹۸ $\pm$ ۰/۰۱	۵/۳
۰/۲۴	۰/۱۰ $\pm$ ۰/۳۰	۰/۹۶ $\pm$ ۰/۰۱	۱۲
۰/۳۱	۰/۱۷ $\pm$ ۰/۱۸	۰/۹۴ $\pm$ ۰/۰۱	۱۹
۰/۴۳	۰/۲۷ $\pm$ ۰/۱۵	۰/۹۳ $\pm$ ۰/۰۱	۲۹

۲.۵. نتایج اندازه‌گیری ضریب عبور و ضریب تضعیف خطی

کل برای چشمه ^{137}Cs

از چشمه ^{137}Cs با اکتیویته $10 \mu\text{Ci}$ استفاده می‌کنیم. نحوه چیدمان ستاپ آزمایش مطابق شکل ۵ نشان داده شده است. مطابق جدول ۱۲ تغییر قابل توجهی در ضریب عبور نداشته و افزایش بسیار ناچیز در ضریب تضعیف خطی کل نمونه ۱۰٪ داشته است. مطابق جدول ۱۳ هیچ تغییری در روند ضریب عبور

نداشته و تغییر ناچیزی در افزایش ضریب تضعیف خطی کل در نمونه ۲۸٪ نشان داده است. مطابق جدول ۱۴ هیچ گونه تغییر قابل توجهی در روند ضریب عبور و ضریب تضعیف خطی کل نداشته است. مطابق جدول ۱۵ هیچ گونه تغییر قابل توجهی در روند ضریب عبور نداشته و ضریب تضعیف خطی کل در نمونه ۲۹٪ افزایش ناچیزی داشته است.

جدول (۱۲): ضریب عبور و مقایسه ضریب تضعیف خطی کل تئوری و تجربی و خطای نسبی هر کدام در حالت جرم ثابت ۲ گرم برای چشمه ^{137}Cs .

ضریب تضعیف خطی کل تئوری $\mu_l(\text{m}^{-1})$	ضریب تضعیف خطی کل تجربی $\mu_l(\text{m}^{-1})$ $\pm \sigma_{\mu_l} / \mu_l$	ضریب عبور T $\pm \sigma_T / T$	درصد وزنی نانوذرات $\omega_{\text{ZnO}} (\%)$
۰/۰۷	۰/۰۵ $\pm$ ۰/۹۹	۰/۹۹ $\pm$ ۰/۰۱	۰
۰/۰۶	۰/۰۸ $\pm$ ۰/۵۸	۰/۹۸ $\pm$ ۰/۰۱	۵
۰/۰۷	۰/۰۹ $\pm$ ۰/۹۰	۰/۹۸ $\pm$ ۰/۰۱	۱۰
۰/۰۶	۰/۰۸ $\pm$ ۰/۳۹	۰/۹۸ $\pm$ ۰/۰۱	۱۵
۰/۰۷	۰/۰۸ $\pm$ ۰/۵۵	۰/۹۸ $\pm$ ۰/۰۱	۲۰

جدول (۱۳): ضریب عبور و مقایسه ضریب تضعیف خطی کل تئوری و تجربی و خطای نسبی هر کدام در حالت حجم ثابت ۲ گرم برای چشمه ^{137}Cs .

ضریب تضعیف خطی کل تئوری $\mu_l(\text{m}^{-1})$	ضریب تضعیف خطی کل تجربی $\mu_l(\text{m}^{-1})$ $\pm \sigma_{\mu_l} / \mu_l$	ضریب عبور T $\pm \sigma_T / T$	درصد وزنی نانوذرات $\omega_{\text{ZnO}} (\%)$
۰/۰۷	۰/۰۵ $\pm$ ۰/۹۹	۰/۹۹ $\pm$ ۰/۰۱	۰
۰/۰۷	۰/۰۵ $\pm$ ۰/۹۹	۰/۹۹ $\pm$ ۰/۰۱	۵/۲
۰/۰۷	۰/۰۳ $\pm$ ۰/۹۹	۰/۹۹ $\pm$ ۰/۰۱	۱۱/۵
۰/۰۷	۰/۰۲ $\pm$ ۰/۹۹	۰/۹۹ $\pm$ ۰/۰۱	۱۹
۰/۰۷	۰/۱۰ $\pm$ ۰/۹۹	۰/۹۹ $\pm$ ۰/۰۱	۲۸
۰/۰۶	۰/۰۸ $\pm$ ۰/۹۹	۰/۹۹ $\pm$ ۰/۰۱	۳۰

جدول (۱۴): ضریب عبور و مقایسه ضریب تضعیف خطی کل تنوری و تجربی و خطای نسبی هر کدام در حالت حجم ثابت ۳ گرم برای چشمه ^{137}Cs .

ضریب تضعیف خطی کل تنوری $\mu_l(\text{m}^{-1})$	ضریب تضعیف خطی کل تجربی $\mu_l(\text{m}^{-1})$ $\pm \sigma_{\mu_l} / \mu_l$	ضریب عبور T $\pm \sigma_T / T$	درصد وزنی نانوذرات $\omega_{\text{ZnO}} (\%)$
۰/۰۷	۰/۰۳ $\pm$ ۰/۹۹	۰/۹۹ $\pm$ ۰/۰۱	۰
۰/۰۷	۰/۰۴ $\pm$ ۰/۴۹	۰/۹۸ $\pm$ ۰/۰۱	۷/۳
۰/۰۶	۰/۰۴ $\pm$ ۰/۹۹	۰/۹۹ $\pm$ ۰/۰۱	۱۶
۰/۰۷	۰/۰۶ $\pm$ ۰/۹۹	۰/۹۹ $\pm$ ۰/۰۱	۲۸

جدول (۱۵): ضریب عبور و مقایسه ضریب تضعیف خطی کل تنوری و تجربی و خطای نسبی هر کدام در حالت حجم ثابت ۴ گرم برای چشمه ^{137}Cs .

ضریب تضعیف خطی کل تنوری $\mu_l(\text{m}^{-1})$	ضریب تضعیف خطی کل تجربی $\mu_l(\text{m}^{-1})$ $\pm \sigma_{\mu_l} / \mu_l$	ضریب عبور T $\pm \sigma_T / T$	درصد وزنی نانوذرات $\omega_{\text{ZnO}} (\%)$
۰/۰۶	۰/۰۵ $\pm$ ۰/۵۰	۰/۹۸ $\pm$ ۰/۰۱	۰
۰/۰۶	۰/۰۵ $\pm$ ۰/۵۴	۰/۹۸ $\pm$ ۰/۰۱	۵/۳
۰/۰۶	۰/۰۷ $\pm$ ۰/۴۳	۰/۹۷ $\pm$ ۰/۰۱	۱۲
۰/۰۶	۰/۰۸ $\pm$ ۰/۳۹	۰/۹۷ $\pm$ ۰/۰۱	۱۹
۰/۰۶	۰/۰۹ $\pm$ ۰/۴۲	۰/۹۷ $\pm$ ۰/۰۱	۲۹

۶. روش های کاهش خطا در اندازه گیری های تجربی

با توجه به داده های جداول ۸ تا ۱۵، تغییر قابل توجهی در ضریب عبور مشاهده نشد و خطای نسبی اندازه گیری این ضریب حدود ۰/۰۱ است؛ ولی خطای نسبی ضریب تضعیف خطی کل (μ_l) برای همه نمونه ها تا ۰/۹۹ و غیر قابل اطمینان است. هرچند ضریب عبور و ضریب تضعیف خطی کل به یک پدیده فیزیکی مرتبط هستند، محاسبه μ_l به دلیل امکان مقایسه مستقیم با مقادیر تنوری و پیش بینی نفوذپذیری تابش در مواد، اهمیت دارد؛ بنابراین برای کاهش خطاهای شمارش و افزایش دقت اندازه گیری μ_l ، سه عامل اصلی مدنظر قرار گرفت: ۱- افزایش فعالیت چشمه، ۲- افزایش زمان داده برداری و ۳- کاهش فاصله چشمه از آشکارساز و در شرایط جدید بیان شده در فوق، کلیه آزمایش های تجربی مجدداً انجام گردید. با بهره گیری از سه عامل یادشده، زمان داده برداری از ۱۵۰ ثانیه به ۶۰۰ ثانیه افزایش یافت و فاصله چشمه تا آشکارساز از ۳ سانتی متر به ۰/۵ سانتی متر کاهش داده شد. این تغییرات ضمن کاهش چشمگیر خطاهای نسبی ضریب تضعیف خطی کل که بالاترین خطا برای چشمه ^{241}Am در نمونه های جرم ثابت ۲ گرم با خطای ۰/۴۹ به ۰/۰۲

و برای چشمه ^{137}Cs در نمونه های جرم و حجم ثابت ۲ گرم و حجم ثابت ۳ گرم با خطای ۰/۹۹، تا ۰/۰۲ نیز کاهش پیدا کرد. همچنین کاهش قابل توجه ضریب عبور و در نتیجه افزایش ضریب تضعیف خطی کل نیز گردید. نتایج نهایی در جداول ۱۶ تا ۲۴ ارائه شده است.

۱.۶. نتایج اندازه گیری ضریب عبور و ضریب تضعیف خطی

برای چشمه ^{241}Am در شرایط جدید

مطابق جدول ۱۶ با افزایش درصد نانوذرات اکسیدروی کاهش چشمگیری در ضریب عبور و افزایش قابل ملاحظه ای در ضریب تضعیف خطی کل پیدا کرده است. مطابق جدول ۱۷ با افزایش درصد نانوذرات اکسیدروی ضریب عبور کاهش یافته و ضریب تضعیف خطی کل افزایش پیدا کرده است.

مطابق جدول ۱۸ با افزایش درصد نانوذرات اکسیدروی ضریب عبور کاهش یافته و ضریب تضعیف خطی کل افزایش پیدا کرده است. مطابق جدول ۱۹ با افزایش درصد نانوذرات اکسیدروی ضریب عبور کاهش خوبی داشته و ضریب تضعیف خطی کل افزایش پیدا کرده است.

جدول (۱۶): ضریب عبور و مقایسه ضریب تضعیف خطی کل تئوری و تجربی و خطای نسبی هر کدام در حالت جرم ثابت ۲ گرم برای چشمه ^{241}Am .

ضریب تضعیف خطی کل تئوری $\mu_l(\text{m}^{-1})$	ضریب تضعیف خطی تجربی $\mu_l(\text{m}^{-1})$ $\pm \sigma_{\mu_l} / \mu_l$	ضریب عبور T $\pm \sigma_T / T$	درصد وزنی نانوذرات $\omega_{\text{ZnO}} (\%)$
۰/۱۵	۰/۲۰ $\pm$ ۰/۰۲	۰/۹۶ $\pm$ ۰/۰۰۴	۰
۰/۱۹	۰/۳۶ $\pm$ ۰/۰۴	۰/۹۳ $\pm$ ۰/۰۰۳	۵
۰/۲۷	۰/۶۲ $\pm$ ۰/۰۲	۰/۸۸ $\pm$ ۰/۰۰۳	۱۰
۰/۳۲	۰/۶۳ $\pm$ ۰/۰۲	۰/۸۷ $\pm$ ۰/۰۰۳	۱۵
۰/۳۷	۰/۷۶ $\pm$ ۰/۰۲	۰/۸۴ $\pm$ ۰/۰۰۳	۲۰

جدول (۱۷): ضریب عبور و مقایسه ضریب تضعیف خطی کل تئوری و تجربی و خطای نسبی هر کدام در حالت حجم ثابت ۲ گرم برای چشمه ^{241}Am .

ضریب تضعیف خطی کل تئوری $\mu_l(\text{m}^{-1})$	ضریب تضعیف خطی کل تجربی $\mu_l(\text{m}^{-1})$ $\pm \sigma_{\mu_l} / \mu_l$	ضریب عبور T $\pm \sigma_T / T$	درصد وزنی نانوذرات $\omega_{\text{ZnO}} (\%)$
۰/۰۷	۰/۲۰ $\pm$ ۰/۰۲	۰/۹۶ $\pm$ ۰/۰۰۴	۰
۰/۰۷	۰/۳۷ $\pm$ ۰/۰۷	۰/۹۴ $\pm$ ۰/۰۰۴	۵/۲
۰/۰۷	۰/۶۶ $\pm$ ۰/۰۴	۰/۹۰ $\pm$ ۰/۰۰۴	۱۱/۵
۰/۰۷	۰/۷۶ $\pm$ ۰/۰۴	۰/۹۰ $\pm$ ۰/۰۰۴	۱۹
۰/۰۷	۰/۹۶ $\pm$ ۰/۰۴	۰/۸۹ $\pm$ ۰/۰۰۴	۲۸
۰/۰۶	۱/۰۱ $\pm$ ۰/۰۴	۰/۸۸ $\pm$ ۰/۰۰۴	۳۰

جدول (۱۸): ضریب عبور و مقایسه ضریب تضعیف خطی کل تئوری و تجربی و خطای نسبی هر کدام در حالت حجم ثابت ۳ گرم برای چشمه ^{241}Am .

ضریب تضعیف خطی کل تئوری $\mu_l(\text{m}^{-1})$	ضریب تضعیف خطی تجربی $\mu_l(\text{m}^{-1})$ $\pm \sigma_{\mu_l} / \mu_l$	ضریب عبور T $\pm \sigma_T / T$	درصد وزنی نانوذرات $\omega_{\text{ZnO}} (\%)$
۰/۱۵	۰/۰۷ $\pm$ ۰/۱۳	۰/۹۸ $\pm$ ۰/۰۰۳	۰
۰/۲۲	۰/۱۵ $\pm$ ۰/۰۷	۰/۹۶ $\pm$ ۰/۰۰۳	۷/۲
۰/۳۲	۰/۲۴ $\pm$ ۰/۰۵	۰/۹۴ $\pm$ ۰/۰۰۳	۱۶
۰/۵۰	۰/۴۳ $\pm$ ۰/۰۴	۰/۹۲ $\pm$ ۰/۰۰۳	۲۸

جدول (۱۹): ضریب عبور و مقایسه ضریب تضعیف خطی کل تئوری و تجربی و خطای نسبی هر کدام در حالت حجم ثابت ۴ گرم برای چشمه ^{241}Am .

ضریب تضعیف خطی کل تئوری $\mu_l(\text{m}^{-1})$	ضریب تضعیف خطی تجربی $\mu_l(\text{m}^{-1})$ $\pm \sigma_{\mu_l} / \mu_l$	ضریب عبور T $\pm \sigma_T / T$	درصد وزنی نانوذرات $\omega_{\text{ZnO}} (\%)$
۰/۱۳	۰/۲۲ $\pm$ ۰/۰۳	۰/۹۱ $\pm$ ۰/۰۰۳	۰
۰/۱۸	۰/۲۱ $\pm$ ۰/۰۳	۰/۹۲ $\pm$ ۰/۰۰۳	۵/۳
۰/۲۴	۰/۲۳ $\pm$ ۰/۰۳	۰/۹۲ $\pm$ ۰/۰۰۳	۱۲
۰/۳۱	۰/۲۸ $\pm$ ۰/۰۳	۰/۹۱ $\pm$ ۰/۰۰۳	۱۹
۰/۴۳	۰/۴۱ $\pm$ ۰/۰۲	۰/۸۹ $\pm$ ۰/۰۰۳	۲۹

۲.۶. نتایج اندازه گیری ضریب عبور و ضریب تضعیف خطی

کل برای چشمه ^{137}Cs در شرایط جدید

مطابق جدول ۲۰ ضریب عبور کاهش پیدا کرده است اما با افزایش درصد نانوذرات اکسیدروی هیچ روند نزولی در کاهش ضریب عبور وجود ندارد به علاوه ضریب تضعیف خطی کل نیز مقدار ناچیزی کاهش پیدا کرده است.

مطابق جدول ۲۱ به طور کل ضریب عبور کاهش پیدا کرده اما با افزایش درصد نانوذرات اکسیدروی ضریب عبور مقداری افزایش از خود نشان داده است، درحالی که ضریب تضعیف خطی کل افزایش پیدا کرده است.

مطابق جدول ۲۲ با افزایش درصد نانوذرات اکسیدروی ضریب عبور کاهش یافته و ضریب تضعیف خطی کل افزایش پیدا کرده است. کمترین میزان ضریب عبور و بیشترین مقدار ضریب تضعیف خطی کل مربوط به نمونه ۱۶٪ است.

مطابق جدول ۲۳ ضریب عبور کاهش یافته اما با افزایش درصد نانوذرات اکسیدروی اثری بر ضریب عبور نداشته در حالی که ضریب تضعیف خطی کل افزایش پیدا کرده است. این تغییرات ضمن کاهش چشمگیر خطاهای نسبی ضریب تضعیف خطی کل، باعث کاهش قابل توجه ضریب عبور و افزایش ضریب تضعیف خطی کل نیز گردید. همچنین در شکل های ۸ تا ۱۱ مقایسه ضریب تضعیف خطی کل در حالت تئوری و تجربی در دو انرژی ۵۹ keV و ۶۶۲ keV انجام شد. سپس به مقایسه HVL و MFP تجربی و تئوری در شکل های ۱۲ تا ۱۹ می پردازیم. با توجه به معادله (۱۶) انتشار خطا، خطای نسبی HVL و MFP برابر خطای نسبی ضریب تضعیف خطی کل است.

جدول (۲۰): ضریب عبور و مقایسه ضریب تضعیف خطی کل تئوری و تجربی و خطای نسبی هر کدام در حالت جرم ثابت ۲ گرم برای چشمه ^{137}Cs .

ضریب تضعیف خطی کل تئوری $\mu_l(\text{m}^{-1})$	ضریب تضعیف خطی کل تجربی $\mu_l(\text{m}^{-1})$	ضریب عبور T $\pm \sigma_T / T$	درصد وزنی نانوذرات $\omega_{\text{ZnO}} (\%)$
۰/۰۷	۰/۴۸ $\pm$ ۰/۰۵	۰/۹۱ $\pm$ ۰/۰۰۴	۰
۰/۰۶	۰/۴۳ $\pm$ ۰/۰۵	۰/۹۱ $\pm$ ۰/۰۰۴	۵
۰/۰۷	۰/۴۶ $\pm$ ۰/۰۵	۰/۹۱ $\pm$ ۰/۰۰۴	۱۰
۰/۰۶	۰/۴۳ $\pm$ ۰/۰۵	۰/۹۱ $\pm$ ۰/۰۰۴	۱۵
۰/۰۷	۰/۴۱ $\pm$ ۰/۰۵	۰/۹۱ $\pm$ ۰/۰۰۴	۲۰

جدول (۲۱): ضریب عبور و مقایسه ضریب تضعیف خطی کل تئوری و تجربی و خطای نسبی هر کدام در حالت حجم ثابت ۲ گرم برای چشمه ^{137}Cs .

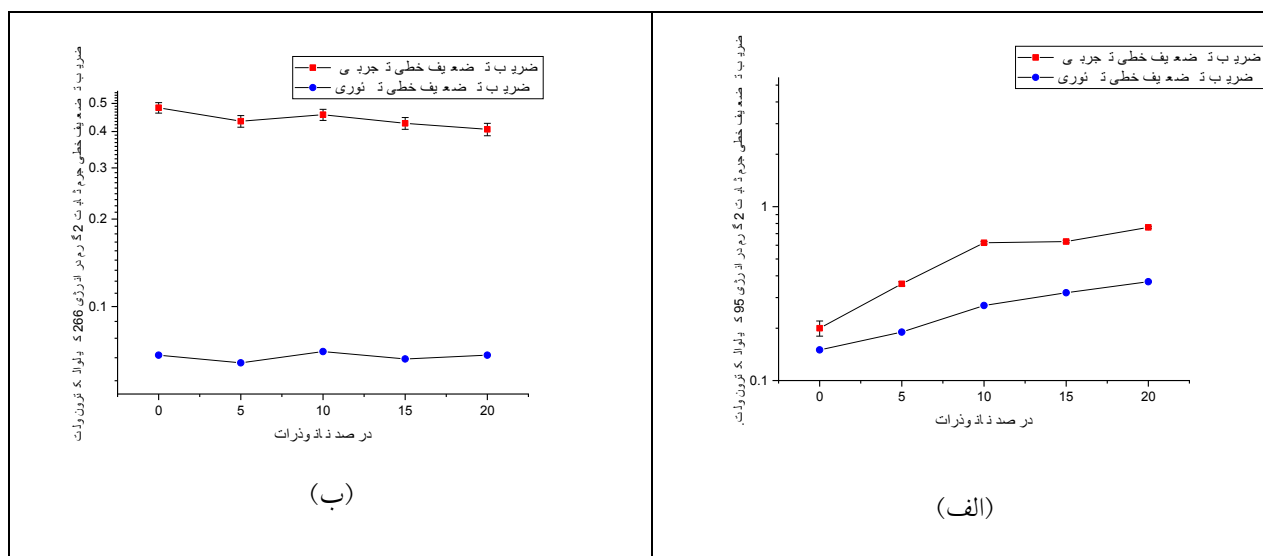
ضریب تضعیف خطی کل تئوری $\mu_l(\text{m}^{-1})$	ضریب تضعیف خطی کل تجربی $\mu_l(\text{m}^{-1})$	ضریب عبور T $\pm \sigma_T / T$	درصد وزنی نانوذرات $\omega_{\text{ZnO}} (\%)$
۰/۰۷	۰/۴۸ $\pm$ ۰/۰۵	۰/۹۱ $\pm$ ۰/۰۰۴	۰
۰/۰۷	۰/۵۲ $\pm$ ۰/۰۵	۰/۹۱ $\pm$ ۰/۰۰۴	۵/۲
۰/۰۷	۰/۵۶ $\pm$ ۰/۰۵	۰/۹۱ $\pm$ ۰/۰۰۴	۱۱/۵
۰/۰۷	۰/۶۰ $\pm$ ۰/۰۶	۰/۹۲ $\pm$ ۰/۰۰۴	۱۹
۰/۰۷	۰/۶۹ $\pm$ ۰/۰۶	۰/۹۲ $\pm$ ۰/۰۰۴	۲۸
۰/۰۶	۰/۶۶ $\pm$ ۰/۰۶	۰/۹۲ $\pm$ ۰/۰۰۴	۳۰

جدول (۲۲): ضریب عبور و مقایسه ضریب تضعیف خطی کل تئوری و تجربی و خطای نسبی هر کدام در حالت حجم ثابت ۳ گرم برای چشمه ^{137}Cs .

ضریب تضعیف خطی کل تئوری $\mu_l(\text{m}^{-1})$	ضریب تضعیف خطی کل تجربی $\mu_l(\text{m}^{-1})$	ضریب عبور T $\pm \sigma_T / T$	درصد وزنی نانوذرات $\omega_{\text{ZnO}} (\%)$
$\pm \sigma_{\mu_l} / \mu_l$			
۰/۰۷	۰/۰۹ $\pm$ ۰/۱۸	۰/۹۷ $\pm$ ۰/۰۰۵	۰
۰/۰۷	۰/۱۳ $\pm$ ۰/۱۴	۰/۹۷ $\pm$ ۰/۰۰۵	۷/۲
۰/۰۶	۱/۳۷ $\pm$ ۰/۰۵	۰/۷۳ $\pm$ ۰/۰۰۴	۱۶
۰/۰۷	۱/۱۱ $\pm$ ۰/۰۲	۰/۸۲ $\pm$ ۰/۰۰۴	۲۸

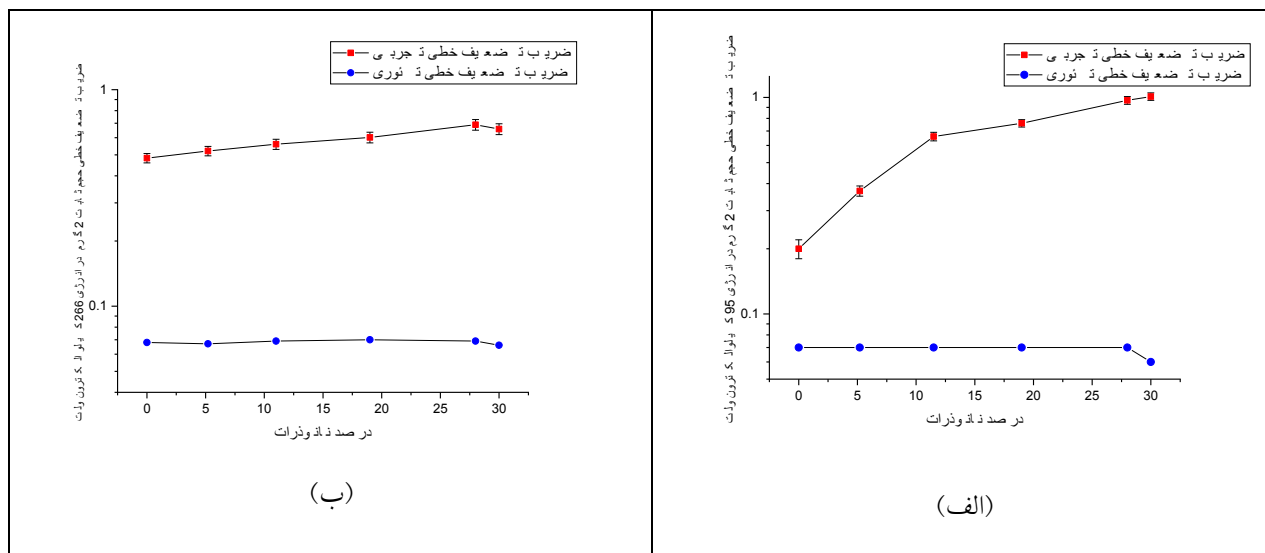
جدول (۲۳): ضریب عبور و مقایسه ضریب تضعیف خطی کل تئوری و تجربی و خطای نسبی هر کدام در حالت حجم ثابت ۴ گرم برای چشمه ^{137}Cs .

ضریب تضعیف خطی کل تئوری $\mu_l(\text{m}^{-1})$	ضریب تضعیف خطی کل تجربی $\mu_l(\text{m}^{-1})$	ضریب عبور T $\pm \sigma_T / T$	درصد وزنی نانوذرات $\omega_{\text{ZnO}} (\%)$
$\pm \sigma_{\mu_l} / \mu_l$			
۰/۰۶	۰/۳۴ $\pm$ ۰/۰۳	۰/۸۶ $\pm$ ۰/۰۰۴	۰
۰/۰۶	۰/۳۸ $\pm$ ۰/۰۳	۰/۸۶ $\pm$ ۰/۰۰۴	۵/۳
۰/۰۶	۰/۴۲ $\pm$ ۰/۰۳	۰/۸۶ $\pm$ ۰/۰۰۴	۱۲
۰/۰۶	۰/۴۷ $\pm$ ۰/۰۳	۰/۸۶ $\pm$ ۰/۰۰۴	۱۹
۰/۰۶	۰/۵۷ $\pm$ ۰/۰۳	۰/۸۶ $\pm$ ۰/۰۰۴	۲۹



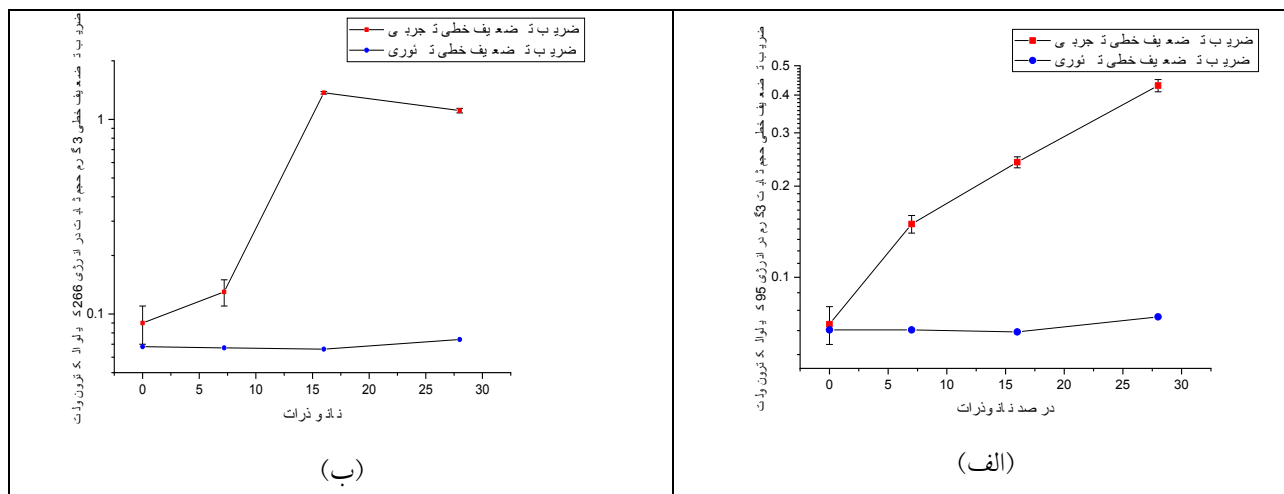
شکل (۸): (الف) مقایسه ضریب تضعیف خطی کل تجربی و تئوری نمونه‌های جرم ثابت ۲ گرم در انرژی ۵۹ کیلوالکترون ولت.

شکل (ب) مقایسه ضریب تضعیف خطی کل تجربی و تئوری نمونه‌های جرم ثابت ۲ گرم در انرژی ۶۶۹ کیلوالکترون ولت.



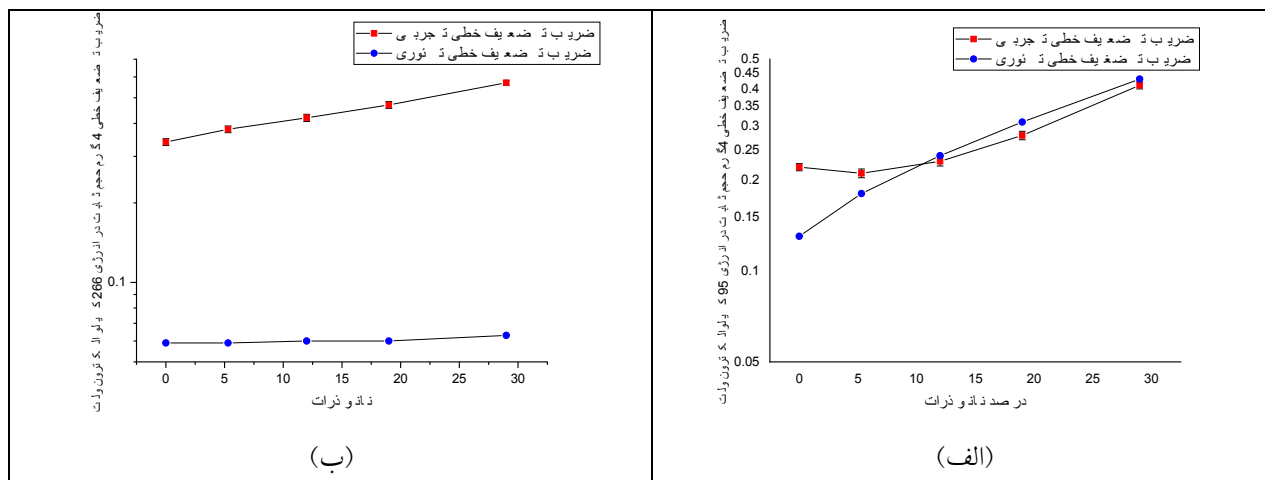
شکل (۹): (الف) مقایسه ضریب تضعیف خطی کل تجربی و تئوری نمونه‌های حجم ثابت ۲ گرم در انرژی ۵۹ کیلو الکترون ولت.

شکل (ب) مقایسه ضریب تضعیف خطی کل تجربی و تئوری نمونه‌های حجم ثابت ۲ گرم در انرژی ۶۶۹ کیلو الکترون ولت.



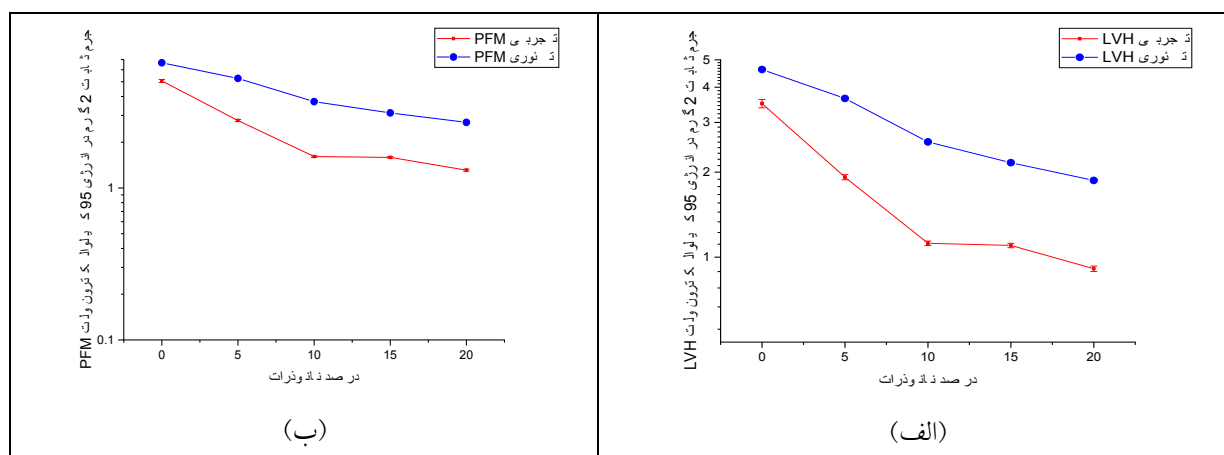
شکل (۱۰): (الف) مقایسه ضریب تضعیف خطی کل تجربی و تئوری نمونه‌های حجم ثابت ۳ گرم در انرژی ۵۹ کیلو الکترون ولت.

شکل (ب) مقایسه ضریب تضعیف خطی کل تجربی و تئوری نمونه‌های حجم ثابت ۳ گرم در انرژی ۶۶۹ کیلو الکترون ولت.



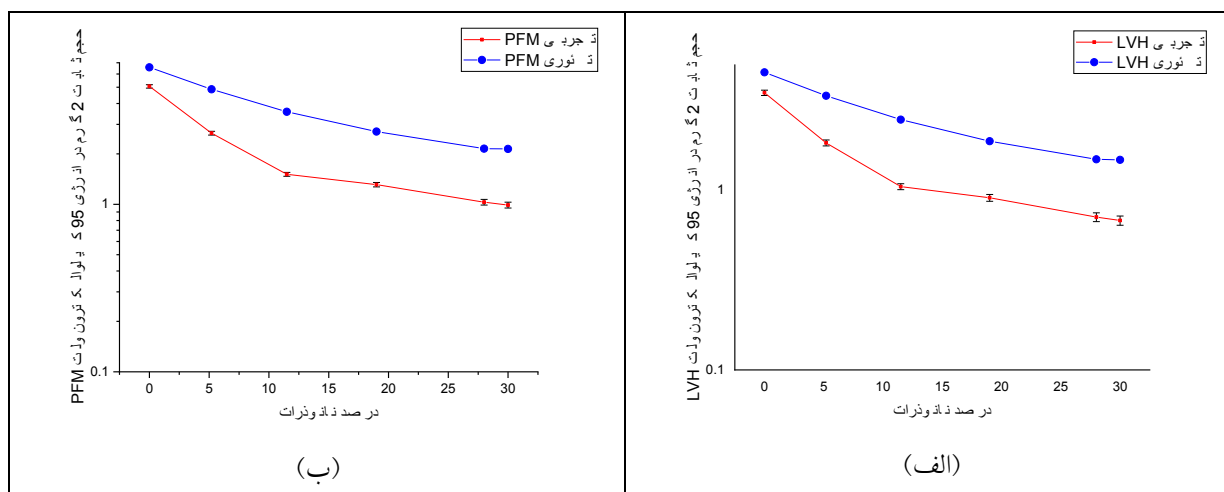
شکل (۱۱): (الف) مقایسه ضریب تضعیف خطی کل تجربی و تئوری نمونه‌های حجم ثابت ۴ گرم در انرژی ۵۹ کیلو الکترون ولت.

شکل (ب) مقایسه ضریب تضعیف خطی کل تجربی و تئوری نمونه‌های حجم ثابت ۴ گرم در انرژی ۶۶۹ کیلو الکترون ولت.

۷. نتایج اندازه‌گیری HVL و MFP برای چشمه‌های ^{241}Am و ^{137}Cs .

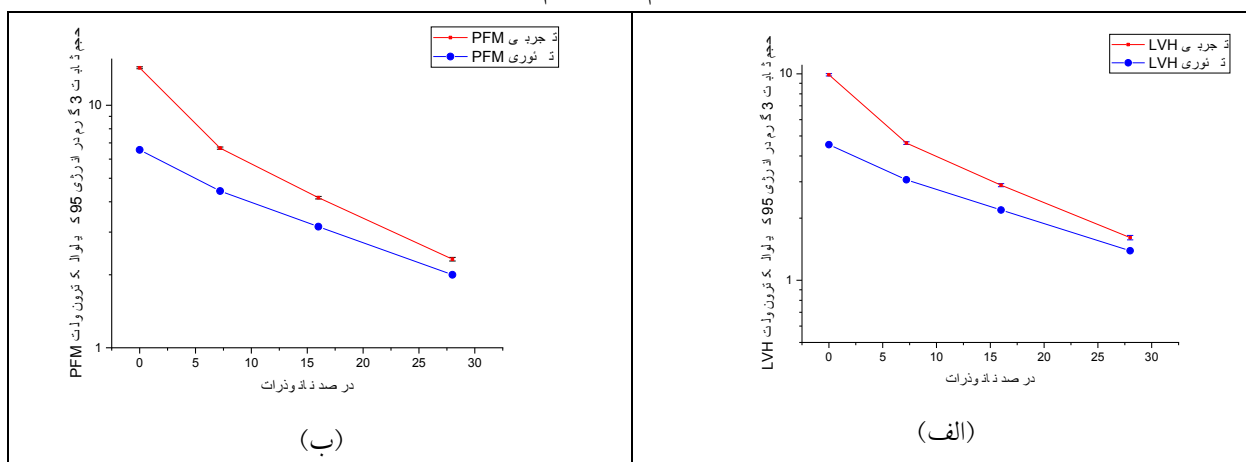
شکل (۱۲): (الف) مقایسه HVL تجربی و تئوری جرم ثابت ۲ گرم در انرژی ۵۹ کیلو الکترون ولت.

(ب) مقایسه MFP تجربی و تئوری جرم ثابت ۲ گرم در انرژی ۵۹ کیلو الکترون ولت.



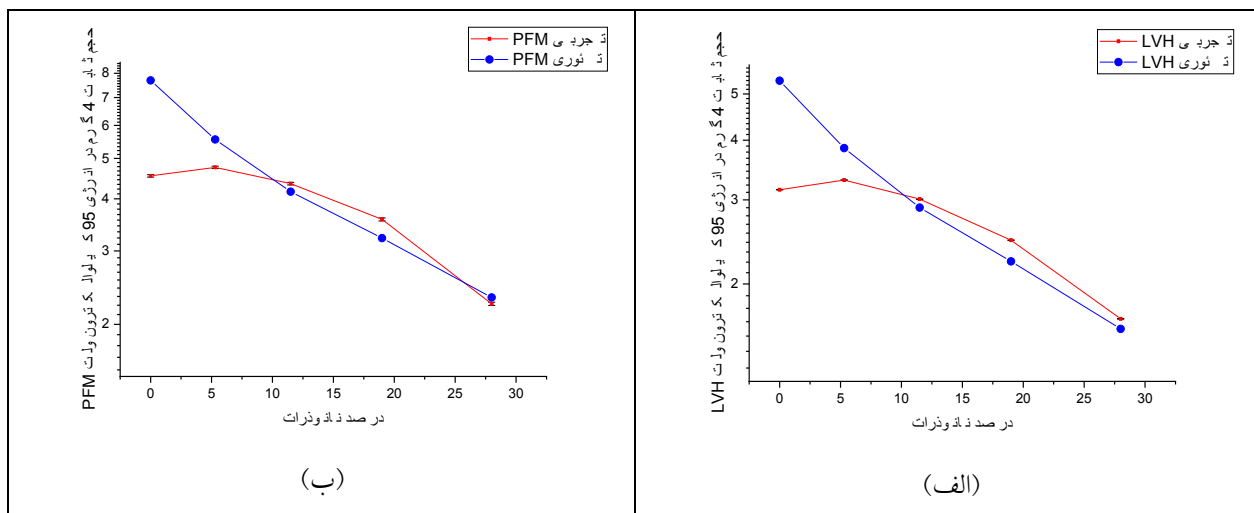
شکل (۱۳): (الف) مقایسه HVL تجربی و تئوری حجم ثابت ۲ گرم در انرژی ۵۹ کیلو الکترون ولت.

(ب) مقایسه MFP تجربی و تئوری حجم ثابت ۲ گرم در انرژی ۵۹ کیلو الکترون ولت.



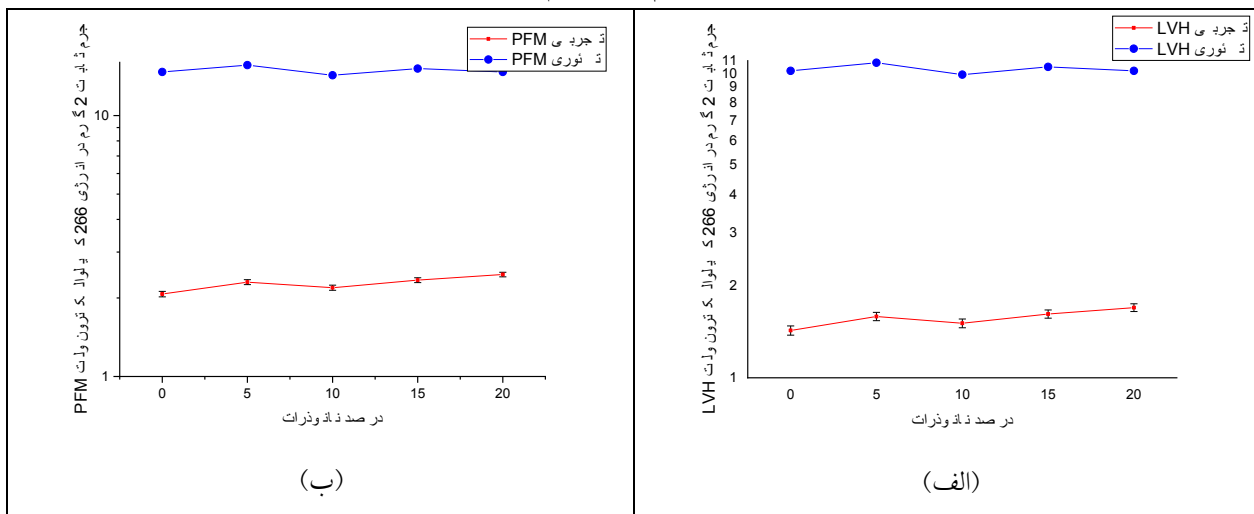
شکل (۱۴): (الف) مقایسه HVL تجربی و تئوری حجم ثابت ۳ گرم در انرژی ۵۹ کیلو الکترون ولت.

(ب) مقایسه MFP تجربی و تئوری حجم ثابت ۳ گرم در انرژی ۵۹ کیلو الکترون ولت.



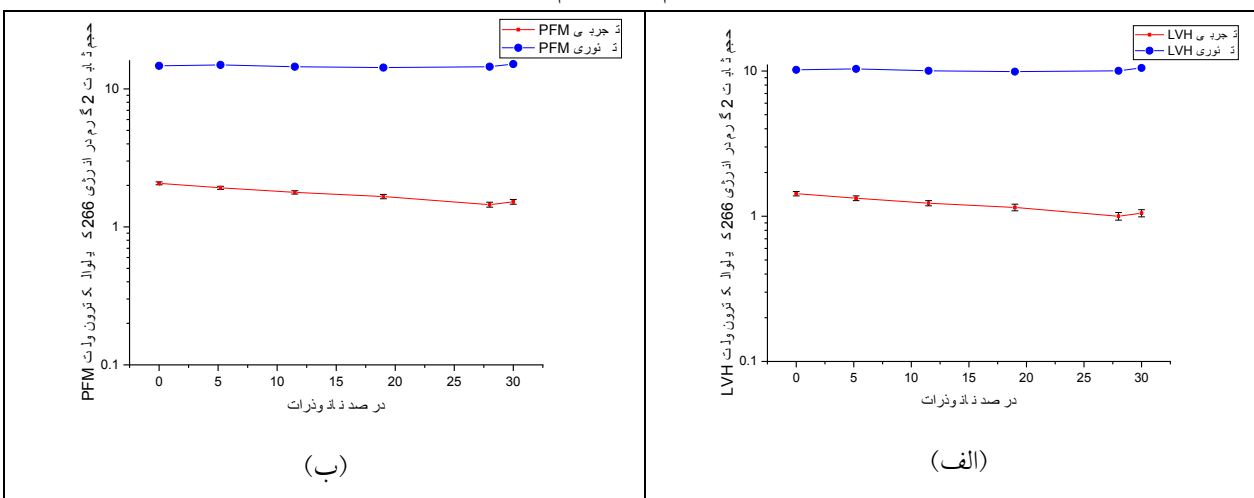
شکل (۱۵): (الف) مقایسه HVL تجربی و تئوری حجم ثابت ۴ گرم در انرژی ۵۹ کیلو الکترون ولت.

(ب) مقایسه MFP تجربی و تئوری حجم ثابت ۴ گرم در انرژی ۵۹ کیلو الکترون ولت.



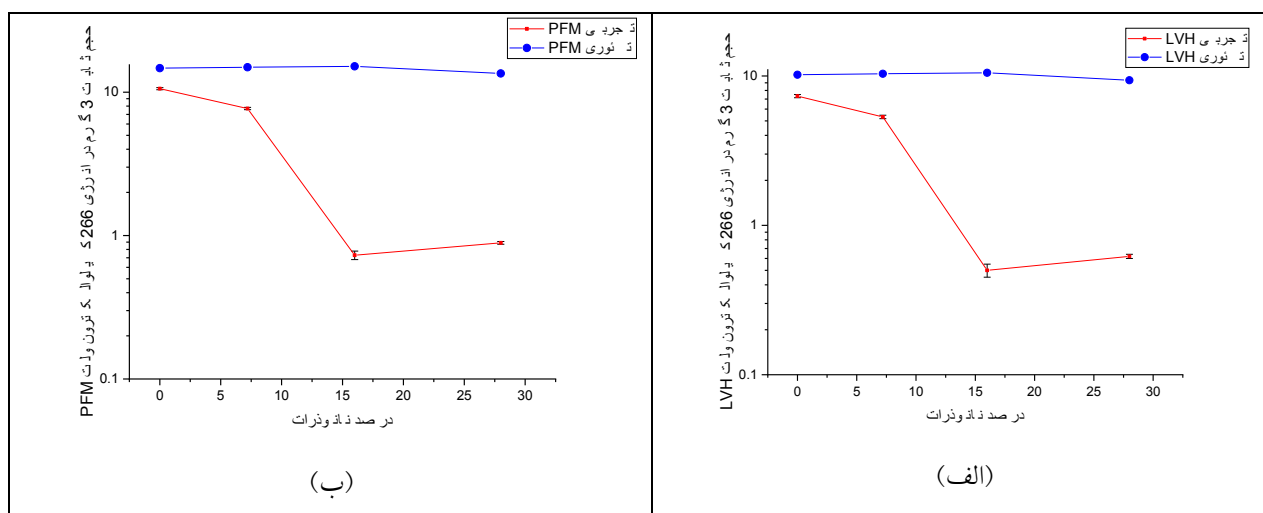
شکل (۱۶): (الف) مقایسه HVL تجربی و تئوری جرم ثابت ۲ گرم در انرژی ۶۶۲ کیلو الکترون ولت.

(ب) مقایسه MFP تجربی و تئوری جرم ثابت ۲ گرم در انرژی ۶۶۲ کیلو الکترون ولت.



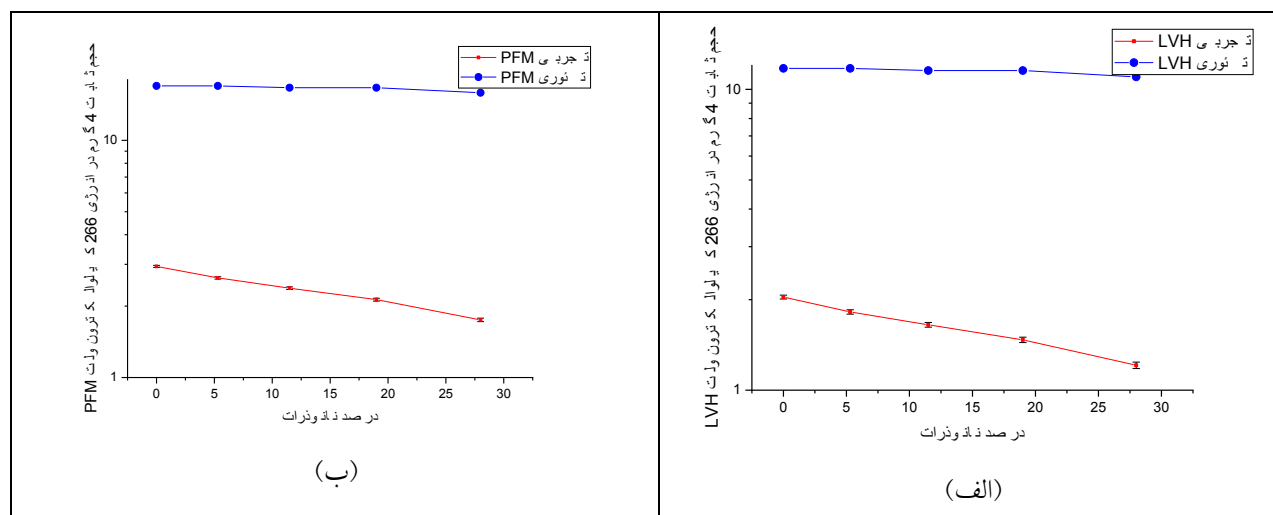
شکل (۱۷): (الف) مقایسه HVL تجربی و تئوری حجم ثابت ۲ گرم در انرژی ۶۶۲ کیلو الکترون ولت.

(ب) مقایسه MFP تجربی و تئوری حجم ثابت ۲ گرم در انرژی ۶۶۲ کیلو الکترون ولت.



شکل (۱۸): (الف) مقایسه HVL تجربی و تئوری حجم ثابت ۳ گرم در انرژی ۶۶۲ کیلو الکترون ولت.

(ب) مقایسه MFP تجربی و تئوری حجم ثابت ۳ گرم در انرژی ۶۶۲ کیلو الکترون ولت.



شکل (۱۹): (الف) مقایسه HVL تجربی و تئوری حجم ثابت ۴ گرم در انرژی ۵۹ کیلو الکترون ولت.

(ب) مقایسه MFP تجربی و تئوری حجم ثابت ۴ گرم در انرژی ۶۶۲ کیلو الکترون ولت.

۸. نتیجه گیری

تجربی و تئوری در اکثر موارد تطابق بسیار خوبی از خود نشان دادند. در میان تمام حالت‌ها، نمونه‌های اندازه‌گیری شده در شرایط حجم ثابت ۳ گرم بهترین عملکرد را ثبت کردند؛ زیرا بیشترین همخوانی بین مقادیر تئوری و تجربی، کمترین نوسان و منظم‌ترین روند افزایش ضریب تضعیف در این شرایط مشاهده شد. این موضوع بیانگر آن است که چشمه ^{241}Am در حضور نانوذرات ZnO از نظر افزایش توان جذب و تضعیف تابش، رفتاری پایدار، قابل‌پیش‌بینی و کاملاً اثربخش دارد. در

نتایج به‌دست‌آمده از اندازه‌گیری ضریب عبور، ضریب تضعیف خطی، HVL و MFP در حضور نانوذرات اکسید روی نشان داد که رفتار تابش‌دهی نمونه‌ها با دو چشمه ^{241}Am و ^{137}Cs به شکل قابل‌توجهی متفاوت است. برای چشمه ^{241}Am افزایش درصد وزنی نانوذرات ZnO موجب کاهش یکنواخت و پیوسته ضریب عبور و افزایش منظم ضریب تضعیف خطی در تمامی شرایط آزمایشی شد. این روند پایدار باعث کاهش محسوس مقادیر HVL و MFP نیز گردید؛ به‌گونه‌ای که مقادیر

به طور کلی می توان نتیجه گرفت که اثرگذاری نانوذرات اکسید روی در بهبود تضعیف تابش برای چشمه ^{241}Am بسیار قوی تر، پایدارتر و قابل اتکاتر از چشمه ^{137}Cs است. همچنین حالت حجم ثابت ۳ گرم در هر دو چشمه بهترین شرایط عملکردی را فراهم کرده و بیشترین دقت، کمترین خطا و بیشترین همخوانی بین مقادیر تئوری و تجربی را ارائه داده است. این نتایج نشان می دهد که استفاده از نانوذرات ZnO، به ویژه در شرایط حجمی کنترل شده، می تواند نقش مؤثری در تقویت خواص حفاظتی مواد در برابر فوتون های انرژی پایین تا متوسط داشته باشد.

مقابل، نتایج به دست آمده برای چشمه ^{137}Cs از یک نواختی مشابه برخوردار نبود. اگرچه در برخی حالت ها کاهش ضریب عبور و افزایش ضریب تضعیف مشاهده شد، اما داده ها در شرایط مختلف رفتار نوسانی نشان دادند. توجه به این نکته حائز اهمیت است که برای پرتوهای گامای چشمه Cs احتمال پراکندگی کامپتون بسیار بالا و نزدیک به ۹۹٪ است؛ لذا در این انرژی غیریک نواخت پخش شدن نانوذرات ZnO در پلی اتیلن و یا کلوخه بندی غیریک نواخت نانوذرات ZnO در پلی اتیلن بهتر نمایان می گردد؛ بنابراین منجر به این نوسانات در ضریب عبور و ضریب تضعیف خطی کل در این انرژی می گردد.

۹. مراجع

1. H. Al-Ghamdi, E. A. Allam, N. A. M. Alsaif, N. Alfryyan, Y. S. Rammah, I. M. Nabil, M. E. Mahmoud, R. M. El-Sharkawy. Sustainable wastewater sludge@bimetallic cadmium-MOFs and nano-copper oxide as a promising shielding composite for gamma rays: Experimental and simulation investigations. *Mater. Sci. Eng.: B* 308 (2024) 117609.
2. S. Harris, M. D. Chan, J. F. Lovato, T. L. Ellis, S. B. Tatter, J. D. Bourland, M. T. Munley, A. F. deGuzman, E. G. Shaw, J. J. Urbanic, K. P. McMullen. Gamma knife stereotactic radiosurgery as salvage therapy after failure of whole-brain radiotherapy in patients with small-cell lung cancer. *Int. J. Radiat. Oncol. Biol. Phys.* 83(1) (2012) e53–e59.
3. P. Vaz. Radiological protection, safety and security issues in the industrial and medical applications of radiation sources. *Radiat. Phys. Chem.* 116 (2015) 48–55.
4. X. B. Wang, C. N. Wang, Y. C. Zhang, T. T. Liu, J. P. Lv, X. Shen, M. R. Guo. Effects of gamma radiation on microbial, physicochemical, and structural properties of whey protein model system. *J. Dairy Sci.* 101 (6) (2018) 4879–4890.
5. V. Parvaneh. Fabrication of polymer/CNTs nanocomposites using a spray method for improvement of their mechanical properties. PhD Thesis, Shahrood University of Technology (2016) P. 3.
6. S. Y. Fu, X. Q. Feng, B. Lauke, Y. W. Mai. Effects of particle size, particle/matrix interface adhesion and particle loading on mechanical properties of particulate-polymer composites. *Composites Part B: Eng.* 39 (2008) 933–961.
7. M. M. Mourad, T. Sharshar, F. Elhussiny, M. R. Berber, Y. Abdou, H. M. Badran, Structural, morphological, thermal, mechanical, positron annihilation, and γ -ray shielding studies of nano-tungsten oxide/polyvinyl alcohol composites. *Chem. Phys.* 580 (2024) 112239.
8. P. Mehnati, R. Malekzadeh, M. Yousefi-Sooteh, F. Yazdansetad. Comparison of X-ray dose reduction capability of bismuth micro- and nanocomposite shields using chest CT test. *J. Radiat. Safety Measurement* 7 (3) (2019) 35–40.
9. M. Alshipli, T. A. Altaim, M. W. Aladailah, A.A. Oglat, S. A. Alsenany, O. L. Tashlykov, S. M. F. Abdelaliem, M. W. Marashdeh, R. Banat, D. O. Pyltsova, E. V. Kuvshinova, R. A. Gaowgzeh. High-density polyethylene with ZnO and TiO₂ nanoparticle filler: Computational and experimental studies of radiation-protective characteristics of polymers. *J. Radiat. Res. Appl. Sci.* 16 (2023) 100720.
10. K. G. Mahmoud, O. L. Tashlykov, S. Praveenkumar, M. I. Sayyed, S. Hashim. Synthesis of a new epoxy resin reinforced by ZnO nanoparticles for γ -ray shielding purposes: Experimental and Monte Carlo simulation assessments. *Radiat. Phys. Chem.* 208 (2023) 110938.
11. M. Dejangah, M. Ghojavand, R. Poursalehi, R. Gholipour Peyvandi. Study of gamma radiation protection properties of silicon rubber-bismuth oxide nanocomposites: Synthesis, characterization and simulation. *J. Radiat. Safety Measurement* 5 (4) (2016) 37–46.
12. M. Z. Botelho, R. Künzel, E. Okuno, R. S. Levenhagen, T. Basegio, C. P. Bergmann. X-ray transmission through nanostructured and microstructured CuO materials. *Appl. Radiat. Isot.* 69 (2) (2011) 527–530.

13. R. A. Elsad, K. A. Mahmoud, Y. S. Rammah, A. S. Abouhaswa. Fabrication, structural, optical, and dielectric properties of PVC-PbO nanocomposites, as well as their gamma-ray shielding capability. *Radiat. Phys. Chem.* 189 (2021) 109753.
14. M. Nasrabadi, H. Tavakoli-Anbaran, E. Ebrahimibasab. Investigation of nano MgO loaded polyvinyl chloride polymer in protective clothing as a nonlead materials. *Heliyon* 10 (2024) e32711.
15. M. M. Mourad, Y. Abdou, M. R. Berber, F. Elhussiny. Using nano tungsten oxide polymer composite as a gamma radiation shielding. *Delta J. Sci.* (2021) 126-132.
16. N. A. Kawady, M. Elkattan, M. Salah, A. A. Galhoum. Fabrication, characterization, and gamma ray shielding properties of PVA-based polymer nanocomposite. *J. Mater. Sci.* 57 (2022) 11046-11061.
17. S. Choudhar. Structural, morphological, thermal, dielectric, and electrical properties of alumina nanoparticles filled PVA-PVP blend matrix-based polymer nanocomposites. *Polymer Composites* 39 (S3) (2018) E1788-E1799.
18. A. M. El-Khatib, T. I. Shalaby, A. Antar, M. Elsafi. Improving Gamma Ray Shielding Behaviors of Polypropylene Using PbO Nanoparticles: An Experimental Study. *Materials* 15 (11) (2022) 3908.
19. O. L. Tashlykov, I. I. Milman, M. W. Aladailah, I. A. Bessonov, S. V. Chalpanov, V. Yu Yarkov, D. O. Pyltsova, E. V. Kuvshinova, K. A. Mahmoud. An extensive experimental study on the role of micro-size pozzolana in enhancing the gamma-ray shielding properties of high-density polyethylene. *Radiat. Phys. Chem.* 212 (2023) 111079.
20. H. Alavian, H. Tavakkoli Anbaran, Investigation of the effect of detector type on the estimation of gamma-ray buildup factors using Monte Carlo simulation with variance reduction. *J. Radiat. Safety Measurement* 7 (4) (2018) 65-79.
21. A. Rasouli, H. Tavakkoli Anbaran. Study the location and the direction of detector in order to minimize the gamma-rays buildup factor. *J. Radiat. Safety Measurement* 15 (2016) 1-10.
22. G. F. Knoll. *Radiation Detection and Measurement* (4th ed.). John Wiley & Sons, Hoboken, NJ, 2010.

۱۰. پیوست

۱.۱۰. نتایج اندازه گیری HVL و MFP برای پرتوهای گامای چشمه ^{241}Am

جدول (۲۴): HVL و MFP تجربی و تئوری و خطای نسبی هر کدام در حالت جرم ثابت ۲ گرم برای چشمه ^{241}Am .

درصد وزنی نانوذرات $\omega_{\text{ZnO}} (\%)$	HVL تجربی $\pm \sigma_{\mu_i} / \mu_i$	MFP تجربی $\pm \sigma_{\mu_i} / \mu_i$	HVL تئوری	MFP تئوری
۰	$3/50 \pm 0/12$	$5/06 \pm 0/12$	۴/۶۲	۶/۶۶
۵	$1/92 \pm 0/04$	$2/78 \pm 0/04$	۳/۶۵	۵/۲۶
۱۰	$1/12 \pm 0/02$	$1/61 \pm 0/02$	۲/۵۶	۳/۷۰
۱۵	$1/1 \pm 0/02$	$1/59 \pm 0/02$	۲/۱۶	۳/۱۲
۲۰	$0/91 \pm 0/02$	$1/31 \pm 0/02$	۱/۸۷	۲/۷۰

مطابق جدول ۲۴ با افزایش درصد نانوذرات اکسیدروی HVL و MFP تجربی و تئوری افزایش می یابند.

جدول (۲۵): HVL و MFP تجربی و تئوری و خطای نسبی هر کدام در حالت حجم ثابت ۲ گرم برای چشمه ^{241}Am .

درصد وزنی نانوذرات $\omega_{\text{ZnO}} (\%)$	HVL تجربی $\pm \sigma_{\mu_i} / \mu_i$	MFP تجربی $\pm \sigma_{\mu_i} / \mu_i$	HVL تئوری	MFP تئوری
۰	$3/50 \pm 0/12$	$5/06 \pm 0/12$	۴/۵۵	۶/۵۷
۵/۲	$1/84 \pm 0/07$	$2/66 \pm 0/07$	۳/۳۷	۴/۸۶
۱۱/۵	$1/05 \pm 0/04$	$1/51 \pm 0/04$	۲/۴۸	۳/۵۷
۱۹	$0/91 \pm 0/04$	$1/31 \pm 0/04$	۱/۸۸	۲/۷۲
۲۸	$0/71 \pm 0/04$	$1/03 \pm 0/04$	۱/۴۹	۲/۱۵
۳۰	$0/68 \pm 0/04$	$0/99 \pm 0/04$	۱/۴۸	۲/۱۴

مطابق جدول ۲۵ با افزایش درصد نانوذرات اکسیدروی HVL و MFP تجربی و تئوری افزایش می یابند.

جدول (۲۶): HVL و MFP تجربی و تئوری و خطای نسبی هر کدام در حالت حجم ثابت ۳ گرم برای چشمه ^{241}Am .

MFP تئوری	HVL تئوری	MFP تجربی	HVL تجربی	درصد وزنی نانو ذرات $\omega_{\text{ZnO}} (\%)$
		$\pm \sigma_{\mu_i} / \mu_i$	$\pm \sigma_{\mu_i} / \mu_i$	
۶/۵۵	۴/۵۴	$14/28 \pm 0/13$	$9/9 \pm 0/13$	۰
۴/۴۳	۳/۰۷	$6/66 \pm 0/07$	$4/62 \pm 0/07$	۷/۲
۳/۱۶	۲/۱۹	$4/16 \pm 0/05$	$2/89 \pm 0/05$	۱۶
۲/۰۰	۱/۳۹	$2/32 \pm 0/04$	$1/61 \pm 0/04$	۲۸

مطابق جدول ۲۶ با افزایش درصد نانو ذرات اکسید روی HVL و MFP تجربی و تئوری افزایش می یابند.

جدول (۲۷): HVL و MFP تجربی و تئوری و خطای نسبی هر کدام در حالت حجم ثابت ۴ گرم برای چشمه ^{241}Am .

MFP تئوری	HVL تئوری	MFP تجربی	HVL تجربی	درصد وزنی نانو ذرات $\omega_{\text{ZnO}} (\%)$
		$\pm \sigma_{\mu_i} / \mu_i$	$\pm \sigma_{\mu_i} / \mu_i$	
۷/۶۹	۵/۳۳	$4/54 \pm 0/03$	$3/15 \pm 0/03$	۰
۵/۵۵	۳/۸۵	$4/76 \pm 0/03$	$3/3 \pm 0/03$	۵/۳
۴/۱۶	۲/۸۹	$4/35 \pm 0/03$	$3/01 \pm 0/03$	۱۲
۳/۲۲	۲/۲۳	$3/57 \pm 0/03$	$2/47 \pm 0/03$	۱۹
۲/۳۲	۱/۶۱	$2/44 \pm 0/02$	$1/69 \pm 0/03$	۲۹

مطابق جدول ۲۷ با افزایش درصد نانو ذرات اکسید روی HVL و MFP تجربی و تئوری افزایش می یابند.

۲.۱۰. نتایج اندازه گیری HVL و MFP برای پرتوهای گامای چشمه ^{137}Cs

جدول (۲۸): HVL و MFP تجربی و تئوری و خطای نسبی هر کدام در حالت جرم ثابت ۲ گرم برای چشمه ^{137}Cs .

MFP تئوری	HVL تئوری	MFP تجربی	HVL تجربی	درصد وزنی نانو ذرات $\omega_{\text{ZnO}} (\%)$
		$\pm \sigma_{\mu_i} / \mu_i$	$\pm \sigma_{\mu_i} / \mu_i$	
۱۴/۷۰	۱۰/۱۹	$2/07 \pm 0/05$	$1/43 \pm 0/05$	۰
۱۵/۶۲	۱۰/۸۳	$2/30 \pm 0/05$	$1/59 \pm 0/05$	۵
۱۴/۲۸	۹/۹	$2/19 \pm 0/05$	$1/51 \pm 0/05$	۱۰
۱۵/۱۵	۱۰/۵	$2/34 \pm 0/05$	$1/62 \pm 0/05$	۱۵
۱۴/۷۰	۱۰/۱۹	$2/46 \pm 0/05$	$1/70 \pm 0/05$	۲۰

مطابق جدول ۲۸ با افزایش درصد نانو ذرات اکسید روی HVL و MFP در حالت تجربی روند صعودی طی می کند و در حالت تئوری دچار نوسانات شده است.

جدول (۲۹): HVL و MFP تجربی و تئوری و خطای نسبی هر کدام در حالت حجم ثابت ۲ گرم برای چشمه ^{137}Cs .

MFP تئوری	HVL تئوری	MFP تجربی	HVL تجربی	درصد وزنی نانو ذرات $\omega_{\text{ZnO}} (\%)$
		$\pm \sigma_{\mu_i} / \mu_i$	$\pm \sigma_{\mu_i} / \mu_i$	
۱۴/۷۰	۱۰/۱۹	$2/07 \pm 0/05$	$1/43 \pm 0/05$	۰
۱۴/۹۲	۱۰/۳۴	$1/92 \pm 0/05$	$1/33 \pm 0/05$	۵/۲
۱۴/۴۹	۱۰/۰۴	$1/78 \pm 0/05$	$1/23 \pm 0/05$	۱۱/۵
۱۴/۲۸	۹/۹	$1/66 \pm 0/06$	$1/15 \pm 0/06$	۱۹
۱۴/۴۹	۱۰/۰۴	$1/45 \pm 0/06$	$1/00 \pm 0/06$	۲۸
۱۵/۱۵	۱۰/۵	$1/52 \pm 0/06$	$1/05 \pm 0/06$	۳۰

مطابق جدول ۲۹ با افزایش درصد نانوذرات اکسیدروی HVL و MFP در حالت تجربی روند نزولی طی می‌کند و در حالت تئوری تقریباً ثابت مانده است.

جدول (۳۰): HVL و MFP تجربی و تئوری و خطای نسبی هر کدام در حالت حجم ثابت ۳ گرم برای چشمه ^{137}Cs .

درصد وزنی نانوذرات $\omega_{\text{ZnO}} (\%)$	HVL تجربی $\pm\sigma_{\mu_l} / \mu_l$	MFP تجربی $\pm\sigma_{\mu_l} / \mu_l$	HVL تئوری	MFP تئوری
۰	$7/33 \pm 0/18$	$10/58 \pm 0/18$	۱۰/۱۹	۱۴/۷۰
۷/۲	$5/32 \pm 0/14$	$7/69 \pm 0/14$	۱۰/۳۴	۱۴/۹۲
۱۶	$0/50 \pm 0/05$	$0/73 \pm 0/05$	۱۰/۵	۱۵/۱۵
۲۸	$0/62 \pm 0/02$	$0/89 \pm 0/02$	۹/۳۶	۱۳/۵۱

مطابق جدول ۳۰ با افزایش درصد نانوذرات اکسیدروی HVL و MFP در حالت تجربی و تئوری تقریباً روند نزولی طی می‌کنند.

جدول (۳۱): HVL و MFP تجربی و تئوری و خطای نسبی هر کدام در حالت حجم ثابت ۴ گرم برای چشمه ^{137}Cs .

درصد وزنی نانوذرات $\omega_{\text{ZnO}} (\%)$	HVL تجربی $\pm\sigma_{\mu_l} / \mu_l$	MFP تجربی $\pm\sigma_{\mu_l} / \mu_l$	HVL تئوری	MFP تئوری
۰	$2/04 \pm 0/03$	$2/94 \pm 0/03$	۱۱/۷۴	۱۶/۹۵
۵/۳	$1/82 \pm 0/03$	$2/63 \pm 0/03$	۱۱/۷۴	۱۶/۹۵
۱۲	$1/65 \pm 0/03$	$2/38 \pm 0/03$	۱۱/۵۵	۱۶/۶۶
۱۹	$1/47 \pm 0/03$	$2/13 \pm 0/03$	۱۱/۵۵	۱۶/۶۶
۲۹	$1/21 \pm 0/03$	$1/75 \pm 0/03$	۱۱	۱۵/۸۷

مطابق جدول ۳۱ با افزایش درصد نانوذرات اکسیدروی HVL و MFP در حالت تجربی و تئوری روند نزولی طی می‌کنند.