

## محاسبه ضریب تضعیف جرمی کامپوزیت‌های حاوی نانو و میکروذرات اکسید مس برای پرتوهای X تشخیصی

مرضیه فیاض فر، لیلا غلامزاده\* و محسن خواجه‌امینیان

گروه فیزیک هسته‌ای، دانشگاه یزد، یزد، ایران.

\* یزد، دانشگاه یزد، گروه فیزیک هسته‌ای، کدپستی: ۷۴۱-۸۹۱۹۵

پست الکترونیکی: gholamzadeh@yazd.ac.ir

### چکیده

حفاظت در برابر پرتو و انتخاب مواد مناسب جهت تضعیف پرتو به‌عنوان یکی از شاخه‌های مهم در علم پرتو پزشکی و صنایع مربوط پرتو است. در این مقاله، ضرایب تضعیف جرمی  $\frac{\mu}{\rho}$ ، ضخامت‌های نیم‌لایه و ضخامت‌های معادل  $0.5 \text{ mm}$  سرب برای کامپوزیت پلی‌وینیل کلراید حاوی نانو و میکروذرات اکسید مس به‌طور تجربی به ازای ولتاژهای مختلف  $40 \text{ kV}$ ،  $60$  و  $80$  پرتو ایکس محاسبه شده است. نتایج به‌دست آمده نشان می‌دهند که در ولتاژهای  $40$  و  $60$  کیلوولت، کامپوزیت‌های حاوی نانوذرات نسبت به کامپوزیت‌های حاوی میکروذرات عملکرد حفاظتی بهتری دارند اما در ولتاژ  $80$  کیلوولت، کامپوزیت حاوی میکروذرات محافظ بهتری هستند. مقدار ضریب تضعیف جرمی کامپوزیت حاوی میکروذرات اکسید مس در ولتاژهای پرتو ایکس به‌وسیله کد شبیه‌سازی MCNP به‌دست آمده و با نتایج تجربی مقایسه شده است.

کلیدواژه‌گان: پرتو X، ضریب تضعیف جرمی، کامپوزیت پلی‌وینیل کلراید، نانو و میکروذرات، اکسید مس.

### ۱. مقدمه

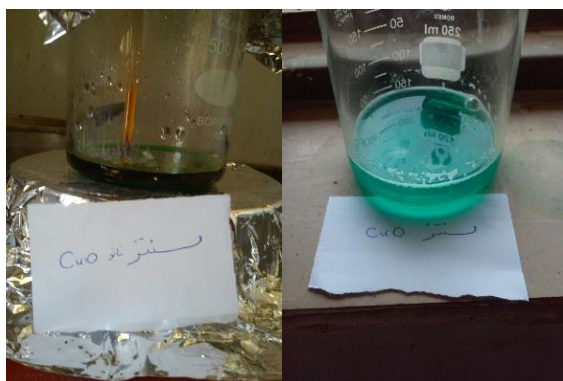
استفاده از حفاظی که قابلیت جلوگیری از نفوذ پرتوها را داشته باشد به‌عنوان بهترین عامل بازدارنده در مقابل پرتوها در نظر گرفته می‌شود. بررسی‌ها نشان داده است که از بین مواد مختلف، عناصر با عدد اتمی بالا مثل سرب، بیسموت، تنگستن می‌توانند عملکرد مناسب‌تری در این زمینه داشته باشند [۴]. سرب به علت چگالی بالا، عدد اتمی بالا و قیمت پایین پرکاربردتر است، اما معایبی چون سمیت بالا، سنگین بودن و ثبات شیمیایی و مکانیکی پایین استفاده از آن را محدود

پرتو X یکی از انواع تابش‌های الکترومغناطیس و یون‌ساز بوده که از قرن بیستم تاکنون در صنایع مانند تصویربرداری، پرتودهی به مواد غذایی، حوزه‌های تشخیص و درمانی پزشکی، استریل‌سازی و غیره کاربرد داشته است. علی‌رغم کاربردهای فراوان، مجاورت و تماس با پرتو ایکس می‌تواند باعث بروز اختلالات ژنتیکی، سرطان و یا حتی منجر به مرگ گردد [۱-۳]. از این‌رو حفاظت در برابر اثرات تخریبی و بیولوژیکی آن‌ها نیز از اهمیت فوق‌العاده‌ای برخوردار است که

## ۲. مواد و روش‌ها

## ۱.۲. روش تجربی

ابتدا نانوذرات اکسید مس مورد استفاده با روش سل-ژل ساخته شد. در این روش ۴/۲۷ گرم محلول کلرید مس ( $\text{CuCl}_2$ ) با ۰/۲۵ گرم اسیداستیک ترکیب کرده و هم‌زمان با هم‌زدن به‌طور پیوسته حرارت داده و وقتی دما به  $100^\circ\text{C}$  رسید، ۱۰ گرم محلول هیدروکسید سدیم ( $\text{NaOH}$ ) را به مواد اضافه کرده (رابطه ۱) و رنگ محلول خیلی سریع از سبز به سیاه تبدیل شده و مقداری رسوب سیاه تشکیل می‌شود، فرآیند کامل در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل (۱): محلول آبی کلرید مس است که بعد از اضافه کردن قطره‌قطره هیدروکسید سدیم از رنگ سبز به رنگ سیاه تبدیل می‌شود. رسوب سیاه‌رنگ را ۳ تا ۴ دفعه با آب مقطر شست و شو داده و رسوب به‌دست‌آمده را در محیط باز برای ۲۴ ساعت خشک می‌شود، پودر به‌دست‌آمده نانوذرات اکسید مس است [۹].



$\text{Cu}(\text{OH})_2$  روی حرارت ملایم طبق رابطه ۲ تجزیه می‌شود:



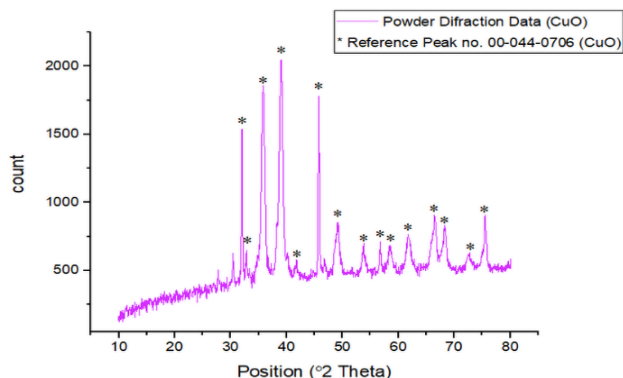
می‌کند [۵-۷]. بنابراین در حال حاضر مهم‌ترین نیاز، تولید ماده‌های محافظ جدید و همچنین توسعه خواص ماده‌های مناسب است.

مقاله‌هایی که در این زمینه منتشر شده‌اند، کاربرد کامپوزیت‌های حاوی نانوذرات را برای اهداف حفاظتی پرتوهای X و گاما نشان می‌دهند. مواد نانو ساختار به‌عنوان موادی که اجزای آن؛ در گسترده ۱۰۰-۱ نانومتر بوده، تعریف می‌شوند. برخی از خواص کامپوزیت‌های نانو ساختار مانند افزایش استحکام مکانیکی، مقاومت در فرآیند پرتوگیری، انعطاف‌پذیری و عاری از سرب بودن برای کاربردهای حفاظ جذاب می‌باشند [۸، ۹].

نانوذرات اکسید مس به علت کارهای بالقوه در زمینه‌های مختلف مثل سنسورها، وسایل قوی مغناطیس، ابررساناها، کاتالیزورها، انتقال انرژی خورشیدی، خازن‌ها با اندازه بزرگ مورد توجه است، البته استفاده این نانوذرات در کامپوزیت‌ها می‌تواند به‌عنوان حفاظ پرتوی X مورد استفاده قرار بگیرند [۸].

در این مقاله، با روش تجربی ضریب تضعیف جرمی نمونه‌های کامپوزیتی حاوی میکرو و نانوذرات اکسید مس محاسبه شده است. بدین منظور ابتدا به ساخت نانوذرات اکسید مس پرداخته و سپس بعد از تهیه میکروذرات اکسید مس، کامپوزیت‌های حاوی این ذرات تهیه شده و به صورت ورقه‌هایی با ضخامت ۱ mm آماده گردیده‌اند و سپس به ازای ولتاژهای مختلف پرتو ایکس، ضریب تضعیف نمونه‌ها محاسبه شده‌اند. در ادامه کامپوزیت پلی‌وینیل‌کلراید حاوی میکروذرات اکسید مس با استفاده از کد شبیه‌سازی MCNP شبیه‌سازی شده و ضریب تضعیف جرمی نمونه محاسبه شده سپس نتیجه حاصل با نتایج تجربی مقایسه شده‌اند.

بیشینه و  $2\theta$  زاویه پراش در شدیدترین قله می‌باشد.  $k$  نیز یک مقدار ثابت است که به شکل و اندازه بلور بستگی دارد.

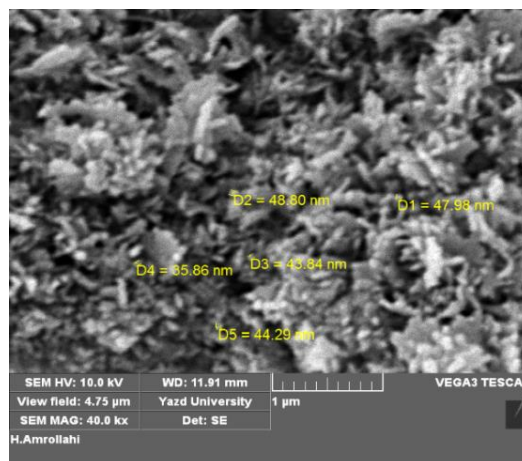


شکل (۳): مقایسه طیف XRD با طیف مرجع نمونه CuO.

برای تهیه نمونه کامپوزیتی حاوی نانو، میکروذرات و یا ترکیب این دو به ترتیب ۲۰ درصد وزنی از نانوذرات اکسید مس، ۲۰ درصد وزنی میکروذرات اکسید مس و یا ترکیب ۱۰ درصد میکرو ذرات با ۱۰ درصد نانو ذرات را با ۴۰ درصد وزنی از وینیل کلراید<sup>۱</sup> EPVC ( $C_2H_3Cl$ ) و ۴۰ درصد وزنی روغن Dop ( $C_{24}H_{38}O_2$ ) مخلوط کرده، به منظور افزایش یکنواختی مخلوط، فرآیند هم‌زدن با استفاده از هم‌زن مغناطیسی با میزان دور مناسب انجام شد پس از مخلوط شدن کامل، مواد به ظرف قالب‌گیری انتقال می‌یابند.

جهت کاهش حباب‌های هوا در نمونه، مواد در دستگاه فوق‌صوت به مدت ۱۸۰ ثانیه قرار داده شده و سپس در کوره  $125^\circ C$  به مدت ۴۵ دقیقه فرآیند پخت انجام می‌شود. ضخامت نمونه تهیه شده تقریباً  $1\text{ mm}$  بوده و داری انعطاف‌پذیری خوبی هستند. پس از آماده‌سازی نمونه‌ها، با استفاده از ریزسنج، ضخامت قسمت‌های مختلف هر نمونه به طور تصادفی ۴ مرتبه اندازه‌گیری شد و ضخامت میانگین نمونه مشخص گردید. نتایج این مقادیر در جدول ۱ آورده شده است.

میکرو ذرات اکسید مس از شرکت مرک تهیه شده و در تهیه کامپوزیت‌ها مورد استفاده قرار گرفته‌اند. تصویر میکروسکوپی الکترونی (SEM) نمونه‌ها با استفاده از میکروسکوپی الکترونی VEGA3 TESCAN تهیه شده و در شکل ۲ نشان داده شده است. اندازه متوسط نانوذرات اکسید مس تقریباً  $44\text{ nm}$  است.



شکل (۲): تصویر SEM نانوذرات اکسید مس.

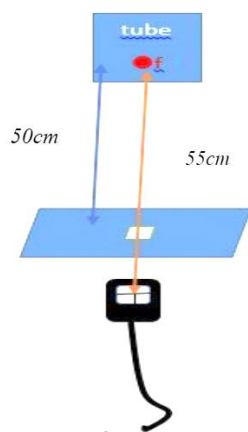
طیف XRD نمونه با استفاده از دستگاه پراش پرتو  $X$ ، با طول موج پرتو  $\lambda = 1.54\text{ \AA}$  تعیین گردید و با استفاده از رابطه ۳ (رابطه دبای-شرر) اندازه بلور نیز محاسبه شد که اندازه متوسط نانوبلورهای اکسید مس برابر  $44\text{ nm}$  است. همان‌طور که در شکل ۳ دیده می‌شود هم‌خوانی خوبی بین قله‌های طیف نانوذرات ساخته شده (کل طیف) و قله‌های نمونه مرجع (که با علامت \* مشخص شده) وجود دارد. بنابراین، فرآیند ساخت این مواد به درستی انجام گرفته است. رابطه دبای-شرر برابر است با:

$$D = k \frac{\lambda}{\beta \cos \theta} \quad (3)$$

که  $D$  اندازه بلور،  $\lambda$  طول موج پرتو ایکس مورد استفاده در دستگاه پراش پرتو ایکس،  $\beta$  پهنای کل در نصف ارتفاع قله

<sup>1</sup> Emulsion Poly Vinyl Chloride

پس از ساخت پلیمرها، نسبت به پرتودهی به آن اقدام گردید. فرآیند پرتودهی به نمونه‌ها به وسیله سیستم فلوروسکوپی صنعتی در مرکز تحقیقات تابش دانشگاه شیراز انجام گرفت. نمونه‌ها در فاصله ۵۰ سانتی متری از دستگاه پرتو ایکس قرار گرفته و اندازه‌گیری دز با استفاده از آشکارساز R1۰۰ به ازای ولتاژهای ۴۰، ۶۰، ۸۰ کیلوولت پیک محاسبه و داده‌ها با دقت بسیار بالا (به میزان چهار رقم اعشار) ثبت گردید. دستگاه پرتودهی X به نمونه‌ها، دستگاه فلوروسکوپی صنعتی (radiography system) بوده و فاصله نقطه کانونی تا دزیتر ۵۰ cm و فاصله دهانه دستگاه پرتودهی تا دزیتر، ۵۵ cm است. همچنین برای حذف پرتوهای اضافی، از صفحه سربی با ضخامت ۱ mm که روزنه‌ای بر روی آن تعبیه شده است استفاده گردید. جهت ثبت نتایج، از دزیتر RTI-100 (RTI-100 Sweden) با پروب RTI-100 و دقت بالا استفاده شد. شکل طراحی از چیدمان پرتودهی در شکل ۶ نشان داده شده است.



شکل (۶): چیدمان پرتودهی و ثبت دز.

## ۲.۲. روش محاسبه ضریب تضعیف خطی

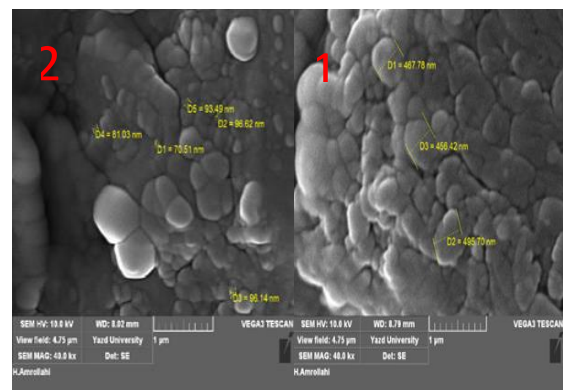
ضریب تضعیف خطی ( $\mu(cm^{-1})$ ) با استفاده از رابطه ۴ محاسبه شده است که ( $\phi_0$ ) شار بدون حضور نمونه کامپوزیتی و ( $\phi$ ) میزان شار عبوری در حضور نمونه است. البته با تغییر ضخامت

جدول (۱): ضخامت و چگالی نمونه ذرات اکسید مس با ضخامت

تقریبی ۱ mm

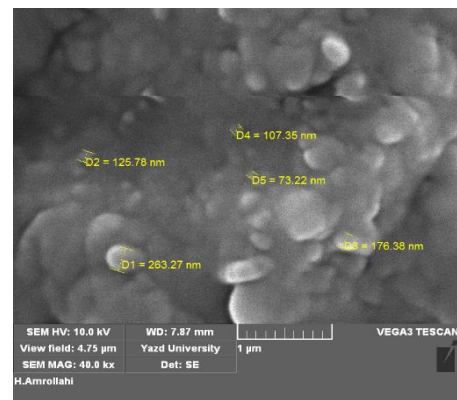
ماده	میانگین (mm)	چگالی ( $gr/cm^3$ )
Micro CuO	۱/۰۶	۱/۱۹
Nano CuO	۱/۰۳	۱/۱۷
Composite CuO	۱/۰۷	۱/۱۵

همان‌طور که از جدول فوق دیده می‌شود، تفاوت چگالی کامپوزیت‌ها اندک بوده و چگالی میانگین کامپوزیت نانوذرات کمتر از چگالی کامپوزیت حاوی میکروذرات بوده و همچنین چگالی کامپوزیت حاوی ترکیب میکرو و نانوذرات از دو نمونه دیگر کمتر بوده است. تصویر SEM، پلیمرهای حاوی میکرو، نانو و ترکیب میکرو و نانوذرات اکسید مس تهیه شد. تصویر نمونه‌ها در شکل‌های ۴ و ۵ نشان داده می‌شود.



شکل (۴): (۱) تصویر SEM پلیمری حاوی میکروذرات اکسید مس،

(۲) تصویر SEM پلیمری حاوی نانوذرات اکسید مس.



شکل (۵): تصویر SEM پلیمری حاوی ترکیب میکرو و نانوذرات

اکسید مس.

ضخامت نیم‌لایه  $(HVL)^2$  نمونه‌ها نیز با رابطه  $HVL = \frac{Ln2}{\mu(cm^{-1})}$  به دست آمده و همچنین ضخامت معادل  $0.5\text{ mm}$  سرب برای کامپوزیت‌های حاوی میکرو و نانوذرات محاسبه شده است و نتایج در جدول ۲ و ۳ به ترتیب نشان داده شده است. با توجه به مقادیر ضخامت معادل  $0.5\text{ mm}$  سرب جدول ۳ و ۴ مشخص می‌شود که این ضخامت‌ها برای کامپوزیت‌های حاوی نانوذرات اکسید مس کمتر از کامپوزیت‌های حاوی میکروذرات اکسید مس هستند.

جدول (۲): ضخامت نیم‌لایه و ضخامت معادل  $0.5\text{ mm}$  سرب برای کامپوزیت‌های حاوی میکروذرات اکسید مس.

ولتاژ (kV)	$\mu(cm^{-1})$	HVL(cm)	ضخامت معادل سرب $0.5\text{mm}$ (cm)
۴۰	۵/۰۸	۰/۱۳	۱/۶۰
۶۰	۲/۰۱	۰/۳۴	۱/۴۱
۸۰	۰/۸۸	۰/۷۸	۱/۵۵

جدول (۳): ضخامت نیم‌لایه و ضخامت معادل سرب برای کامپوزیت‌های حاوی نانوذرات اکسید مس.

ولتاژ (kV)	$\mu(cm^{-1})$	HVL(cm)	ضخامت معادل سرب $0.5\text{mm}$ (cm)
۴۰	۵/۵۷	۰/۱۲	۱/۴۶
۶۰	۲/۳۷	۰/۲۹	۱/۱۹
۸۰	۱/۷۳	۰/۴۰	۰/۷۹

### ۳.۲. مقایسه‌ی مقدار ضریب تضعیف جرمی نتایج

#### تجربی با کد شبیه‌سازی MCNP

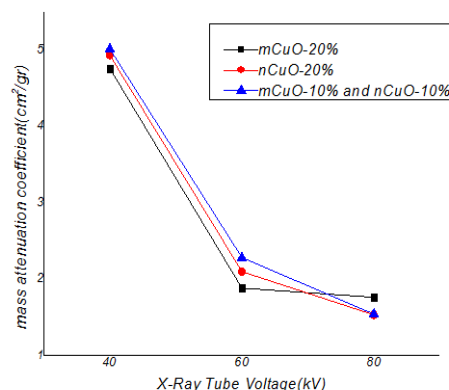
در ادامه به منظور مقایسه‌ی مقدار ضریب تضعیف جرمی نتایج تجربی کامپوزیت حاوی میکروذرات اکسید مس با کد شبیه‌سازی MCNP، ابتدا نمونه کامپوزیتی حاوی میکروذرات اکسید مس را شبیه‌سازی کرده، سپس به ازای انرژی‌های مختلف پرتو ایکس، ضریب تضعیف نمونه‌ها محاسبه شد. کد MCNPX یک کد انتقال تابش است که برای مدل انتقال تابش

نمونه کامپوزیتی و با استفاده از شیب نمودار  $Ln(\frac{\phi}{\phi_0})$  بر حسب X مقدار ضریب تضعیف خطی به دست آمده است.

$$\mu = -\frac{1}{x} Ln(\frac{\phi}{\phi_0}) \quad (۴)$$

سپس با کمک رابطه ۴ ضریب تضعیف خطی کامپوزیت‌های حاوی میکرو، نانو و ترکیب میکرو - نانوذرات اکسید مس به ازای ولتاژهای مختلف پرتو ایکس محاسبه شده و بر چگالی کامپوزیت‌ها تقسیم کرده تا ضریب تضعیف جرمی نمونه‌ها به دست آیند. نتایج در شکل ۷ نشان داده شده است.

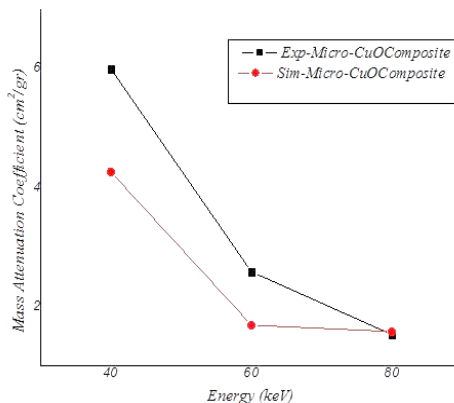
همان طور که در شکل ۷ دیده می‌شود، با افزایش ولتاژ پرتو ایکس ضریب تضعیف روند کاهشی داشته و این بدین معنی است که کامپوزیت در انرژی‌های پایین نسبت به انرژی‌های بالا حفاظ مناسب‌تری است و کامپوزیت‌های نانوذرات و ترکیب میکرو - نانو اکسید مس تضعیف بهتری نسبت به میکروذرات دارا هستند. در ولتاژهای ۴۰ و ۶۰ کیلوولت پیک، کامپوزیت‌های حاوی نانوذرات نسبت به کامپوزیت‌های حاوی میکروذرات عملکرد تضعیفی بهتری دارند اما در ولتاژ ۸۰ کیلوولت پیک، کامپوزیت حاوی میکروذرات محافظ بهتری هستند. البته این نتایج با نتایج مرجع شماره ۸ همخوانی دارند.



شکل (۷): تغییرات ضریب تضعیف جرمی تجربی بر حسب تغییرات ولتاژ لامپ پرتو X کامپوزیت‌های مختلف حاوی پودر اکسید فلزی.

<sup>2</sup> Half Value Layer

اختلاف به ازای ۸۰ کیلو الکترون‌ولت تقریباً به صفر رسیده و دو نمودار بر هم منطبق است.

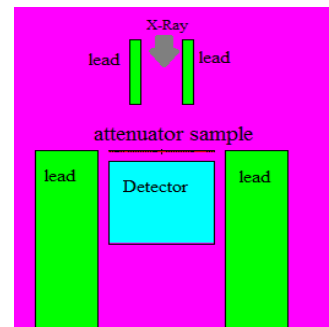


شکل (۹): مقایسه مقدار ضریب تضعیف جرمی کامپوزیت با استفاده از کد شبیه‌سازی MCNP و نتایج تجربی.

### ۳. نتیجه‌گیری

در این مقاله، به منظور بررسی قابلیت تضعیف کامپوزیت‌های حاوی میکرو، نانو و ترکیب میکرو نانوذرات اکسید مس، به ساخت نانو ذرات اکسید مس، ساخت کامپوزیت، پرتو دهی و مقایسه قابلیت تضعیف کامپوزیت‌ها پرداخته شد. طبق نتایج به دست آمده، با افزایش ولتاژ پرتو ایکس ضریب تضعیف روند کاهشی دارد و این بدین معنی است که کامپوزیت‌ها در ولتاژهای پایین نسبت به ولتاژهای بالا حفاظ مناسب‌تری هستند. با توجه به شکل ۵ کامپوزیت‌های نانوذرات اکسید مس و ترکیب میکرو - نانواکسید مس تضعیف بهتری نسبت به میکروذرات را در ولتاژهای ۴۰ و ۶۰ کیلوولت پیک دارا هستند. با مقایسه مقادیر جدول‌های ۱ و ۲ مشخص می‌شود که کامپوزیت‌های حاوی نانوذرات دارای ضخامت معادل سرب کمتری در مقایسه با کامپوزیت‌های حاوی میکروذرات اکسید مس هستند و با مقایسه ضریب تضعیف جرمی ( $\mu_m$ ) کد شبیه‌سازی MCNP و نتایج تجربی نشان داده شد که با افزایش انرژی پرتو ایکس، اختلاف  $\mu_m$  کاهش می‌یابد. این اختلاف به ازای ۸۰ کیلو الکترون‌ولت تقریباً به صفر رسیده و دو نمودار بر هم منطبق است.

و برهم کنش تابش پرتوهای ایکس، گاما، نوترون، الکترون‌ها و غیره با ماده استفاده می‌شود. این کد توسط آزمایشگاه ملی لوس آلموس ارائه شده و یک روش عمومی با اهداف کلی، با هندسه مشخص برای محاسبات مختلف وابسته به زمان، شامل انتقال پرتو برای پیگیری بسیاری از انواع ذرات در محدوده وسیعی از انرژی طراحی شده است. فایل ورودی کد شامل کارت‌های مختلف از جمله کارت سلول، کارت سطح و کارت مواد است [۱۰]. کارت سلول شامل کامپوزیت پلی‌وینیل کلراید PVC ( $C_2H_3Cl$ )، روغن Dop ( $C_{24}H_{38}O_2$ ) و میکروذرات اکسید مس (CuO) که به طور یکنواخت داخل آن توزیع شده‌اند، می‌باشد. درصد‌های جرمی PVC و DOP و CuO به ترتیب برابر با ۴۰، ۴۰ و ۲۰ است. در شکل ۸ نیز هندسه شبیه‌سازی که محاسبات روی آن انجام شده است، نمایش داده می‌شود.



شکل (۸): نمایی از هندسه شبیه‌سازی تضعیف.

در اینجا چشمه پرتو ایکس در فاصله ۵۰ cm از نمونه استوانه‌ای به شعاع ۵ cm با ضخامت‌های متفاوت قرار گرفته شده است. برای محاسبه شار خروجی از تالی حلقه‌ای آشکارساز F5 استفاده شده است. ضریب تضعیف خطی و جرمی با کمک رابطه ۴ محاسبه می‌شود. شکل ۹ مقایسه مقدار ضرایب تضعیف جرمی کامپوزیت حاوی میکروذرات اکسید مس را با استفاده از کد شبیه‌سازی MCNP و نتایج تجربی نشان می‌دهد. این شکل نشان می‌دهد که اختلاف ضریب تضعیف جرمی به دست آمده از کد شبیه‌سازی MCNP و نتایج تجربی با افزایش انرژی پرتو ایکس کاهش می‌یابد. این

## ۴. مراجع

- [1] J. Kim, Y.R. Uhm, B. LEE, J. Jung, Ch.K. Rhee, M. LEE, H.M. LEE and S.H. Lee. Radiation shielding members including nano-particles as a radiation shielding material and method for preparing the same, US8318045B2, (2009).
- [2] E. Eren Belgin and G.A. Aycik. A novel metal oxide filled polyethylene based composite shielding material for protection from harmful effects of Ionizing Electromagnetic. Radiation, ISITES, (2014) 1194–1201.
- [3] Sh. Nambiar and J.T.W. Yeow. polymer-composite materials for radiation protection, Applied Materials and interfaces 4(11) (2012) 5717–5726.
- [4] D.J. Storm. Ten Principles and Ten Commandments of Radiation Protection. Health Physics 70 (1996) 388–393.
- [5] J.P. McCaffery, H. Shen, B. Downton and E. Mainegra-Hing. Radiation attenuation by lead and non-lead material used in radiation shielding garments. Medical Physics 34(2) (2007) 530–537.
- [6] N.Z. Azman, S.A. Siddiqi, M Ionescu and I.M. Low. Synthesis and characterization of ion-implanted epoxy composites for X-ray shielding, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B 287 (2012) 120–123.
- [7] A. Aghaz, R. Faghihi, S.M.J. Mortazavi, A. Haghparast, S. Mehdizadeh and S. Sina. Radiation attenuation properties of shields containing micro and Nano  $WO_3$  in diagnostic X-ray energy range. International Journal of Radiation Research 14(2) (2016) 128–130.
- [8] M.Z. Botelho, R. Kunzel, E. Okuno, R.S. Levenhagen, T. Basegio and C.P. Bergmann. X-ray transmission through nanostructured and microstructure CuO materials, Applied Radiation and Isotope 69 (2011) 527–530.
- [9] M.J. Kshirsagar, Sh. Ramakant and P.S. Adwani. Preparation and characterization of copper oxide nanoparticles and determination of enhancement in critical heat flux, Thermal Science 21 (2017) 233–242.
- [10] V.P. Singh, M.E. Medhat and S.P. Shirmardi. Comparative studies on shielding properties of some steel alloys using Geant4, MCNP, WinXCOM, and experimental results, Radiation Physics and Chemistry 106 (2015) 255–260.

