



## بررسی ویژگی‌های حفاظت تابشی کامپوزیت پلی‌کاپرولاکتون / اکسید آهن و بیسموت

احمد رضمانی مقدم آرانی\* و محمدمین علوی نسب اردبیلی

دانشکده فیزیک، دانشگاه کاشان، کاشان، اصفهان، ایران.

\*اصفهان، کاشان، دانشگاه کاشان، دانشکده فیزیک، کدپستی: ۸۷۳۱۷۵۳۱۵۳

پست الکترونیکی: ramezamo@kashanu.ac.ir

### چکیده

گسترش روز افزون علوم هسته‌ای و کاربردهای مربوطه در زمینه‌های مختلف مواجهه‌ی انسان و محیط زیست با پرتوهای یونیزان را گریزناپذیر کرده است. از طرفی مواجهه‌ی مداوم انسان با این پرتوها می‌تواند خطرات و عوارض جدی بسیاری به دنبال داشته باشد. بنابراین برای کاهش خطر پرتوگیری راهکارهایی مانند کاهش زمان مواجهه، فاصله گرفتن از چشمه و همچنین استفاده از انواع حفاظ‌های پرتوی پیشنهاد می‌گردد. یکی از مؤثرترین مواد شناخته شده در طبیعت جهت ساخت حفاظ در مقابل پرتوهای گاما و ایکس سرب است که البته سمی بودن و وزن بالای حفاظ، استفاده از این ماده به منظور استفاده در حفاظ‌های شخصی را با تردید مواجه کرده است. جایگزینی سرب با دیگر عناصر سنگین و قرار دادن ذرات در یک بستر پلیمری می‌تواند تا حدی مشکل سمیت و سنگین بودن را مرتفع نماید. همچنین براساس تحقیقات انجام شده انتظار می‌رود استفاده از نانوذرات به جای ذرات توده‌ای خصوصاً در انرژی پایین منجر به افزایش عملکرد حفاظ گردد. در این پژوهش ترکیبات اکسید بیسموت و اکسید آهن در بستر پلیمر پلی‌کاپرولاکتون مورد بررسی قرار گرفته‌اند. میزان تضعیف پرتوهای گامای ساطع شده از دو چشمه  $^{137}\text{Cs}$  و  $^{60}\text{Co}$  در نمونه‌های تولیدی اندازه‌گیری شد. نتایج به دست آمده افزایش توان تضعیف هر دو نوع پلیمر ساخته شده با نانوذرات در قیاس با ترکیبات توده‌ای را نشان می‌دهد، به نحوی که ضخامت نیم‌لایه به میزان ۴۸ (۳۷) درصد برای نمونه‌ی اکسید بیسموت و ۳۶ (۲۱) درصد در نمونه‌ی اکسید آهن برای پرتوهای گامای ساطع شده از چشمه‌ی  $^{137}\text{Cs}$  ( $^{60}\text{Co}$ ) است.

کلیدواژگان: پلیمر نانوکامپوزیت، پلی‌کاپرولاکتون، نانوذرات اکسید بیسموت، نانوذرات اکسید آهن، حفاظ، پرتوهای ایکس و گاما.

### ۱. مقدمه

چون این پرتوها کاربردهای بسیاری در زمینه‌های پزشکی، صنعتی، کشاورزی و تحقیقاتی دارند، گسترش مواجهه با این پرتوها گریزناپذیر شده و لزوم استفاده از حفاظ مناسب در مقابل آن‌ها را به یک موضوع مهم تبدیل کرده است. سرب

پرتوهای گاما بخشی از امواج طیف الکترومغناطیس می‌باشند که دارای انرژی بالا بوده و هنگام عبور از یک محیط می‌توانند ایجاد یونش نمایند. از این جهت پرتوهای مذکور می‌توانند هم برای موجودات زنده و هم غیرزنده خطرآفرین باشند. از طرفی

یکی از عناصری است که از گذشته با اشکال مختلفی جهت حفاظت در مقابل پرتوهای یونیزان مورد استفاده قرار گرفته است اما مشکلاتی مانند سنگینی، سمیت، غیر قابل انعطاف پذیر بودن و نسبتاً گران بودن، استفاده از آن را با تردید مواجه کرده است. تلاش‌های گسترده‌ای برای دستیابی به حفاظ‌هایی که تا حد ممکن محدودیت‌های مذکور را مرتفع کنند صورت پذیرفته است.

یکی از مناسب‌ترین و پرکاربردترین مواد با خواص مکانیکی مناسب جهت حفاظت در مقابل تابش‌های هسته‌ای ترکیبات کامپوزیت‌های پلیمری می‌باشند. یک کامپوزیت در ساده‌ترین حالت، از یک یا چند جزء به‌عنوان پرکننده و یک پایه‌ی پلیمری تشکیل می‌شود [۱].

به‌منظور تهیه‌ی یک حفاظ مطلوب در مقابل پرتوهای یونیزان می‌توان از پرکننده‌هایی با عدد اتمی بالا (مانند سرب) یا ترکیبات پرکننده‌ها به‌صورت یکنواخت در ماتریس پلیمری استفاده کرد [۲، ۳]. مزیت اصلی عناصر سنگین در تضعیف پرتوهای الکترومغناطیسی مرسوم متناسب بودن احتمال انجام پدیده فوتوالکتریک با توان چهارم عدد اتمی جاذب است [۳-۶].

در حفاظ‌های کامپوزیتی، برای افزایش استحکام مکانیکی، افزایش مقاومت در فرآیند پرتوگیری، افزایش انعطاف‌پذیری، افزایش ضریب تضعیف و کاهش حجم و وزن، از ذرات ریزتر و خصوصاً نانومتری به‌عنوان پرکننده استفاده می‌شود. نکته قابل توجه این است که اگر درصد فلز پرکننده افزایش یابد استحکام مکانیکی کامپوزیت کاهش یافته و از این‌رو با میزان درصد پرکننده با محدودیت مواجه است [۷]. بنابراین در حفاظ‌های نانوکامپوزیتی با به‌کار بردن ذرات ریزتر، بدون این‌که از حداقل مقدار استحکام مکانیکی گذر کنیم، امکان افزایش درصد وزنی فلز سنگین مهیا می‌شود که این امر به‌معنی افزایش ضریب تضعیف جرمی کامپوزیت می‌باشد. از این‌رو

برای دستیابی به یک مقدار جذب مشخص برای ساخت حفاظ مطلوب می‌توان از مقدار ماده کمتری (از نظر جرمی و وزنی) استفاده نمود [۷].

مطالعات نشان می‌دهد که استفاده از نانوذرات در حفاظ‌های کامپوزیتی می‌تواند منجر به افزایش ضریب جذب گاما خصوصاً در انرژی‌های پایین شود که این امر مزیتی نسبت به حفاظ‌های شامل ذرات در مقیاس ذرات با ابعاد میکرومتری می‌باشد [۳، ۴، ۸، ۹]. از فواید دیگر استفاده از پرکننده‌های نانومتری می‌توان به حفظ انعطاف‌پذیری پلیمر به‌دلیل توزیع یکنواخت‌تر تنش در کامپوزیت و کاهش تمرکز تنش در نقاط مختلف آن [۱۰] و افزایش مقاومت حفاظ در پرتوگیری اشاره کرد.

در یک پژوهش مارتینز<sup>۱</sup> و همکاران، لزوم جایگزینی سرب با فلزات دیگر را بررسی کردند و ضمن بیان مضرات سرب، فلزاتی از جمله بیسموت و تنگستن را برای جایگزینی سرب معرفی کردند [۱۱]. مک کارفی<sup>۲</sup> و همکاران از روش شبیه‌سازی جهت بررسی فلزات و از روش اندازه‌گیری تجربی جهت بررسی چند حفاظ ترکیبی استفاده کردند. آن‌ها نتیجه گرفتند که تضعیف واحد جرم بعضی از فلزات مثل تنگستن، گادولینیوم، باریوم و قلع در اغلب موارد بیشتر از سرب یا مشابه با سرب است [۱۲].

کالوشکین<sup>۳</sup> و همکارانش از پایه‌ی پلیمری پلی‌اتیلن با وزن مولکولی بالا و نانوذرات (W, B4C) به‌عنوان پرکننده استفاده کردند که نانوکامپوزیت‌های به‌دست آمده افزایش ضریب تضعیف اشعه‌ی ایکس را نشان می‌دهند [۱۳]. هاریش<sup>۴</sup> و همکارانش اثر ترکیب سه اکسیدسرب (PbO<sub>2</sub>، PbO و Pb<sub>3</sub>O<sub>4</sub>) را روی کامپوزیت پلیمری رزین ایزوفتالیک

<sup>1</sup> Martinez

<sup>2</sup> McCaffrey

<sup>3</sup> Kaloshkin

<sup>4</sup> Harish

بررسی را به نسبت‌های ۵، ۲۰ و ۴۰ درصد از نانوذرات در دستگاه اکسترودر قرار داد و پس از مخلوط شدن کامل و ایجاد یک ترکیب همگن برای تهیه قرص مورد استفاده قرار گرفت. در یک بالن حاوی مگنت حدود ۵ میلی‌لیتر تولوئن ریخته و به آن ۰/۰۵ گرم آمونیاک هپتامولیدات (به‌عنوان کاتالیزور) اضافه شد، سپس ۱/۸ گرم کاپرولاکتون و ۰/۰۴ گرم ۴-متوکسی‌فنول به‌عنوان آغازگر به آن اضافه کرده تا محتویات واکنش تحت گاز نیتروژن در دمای ۱۲۰ درجه سانتی‌گراد به‌مدت ۷ ساعت رفلاکس شود. بعد از کامل شدن پلیمریزاسیون سیستم تا دمای اتاق خنک شده و تحت فشار کاهش یافته، حلال تولوئن تبخیر می‌شود تا رسوب باقیمانده به‌وسیله کلروفرم خالص‌سازی شود. در آخر پلیمر PCL حاصل در دمای اتاق به‌مدت ۲۴ ساعت خشک می‌شود.

در این پژوهش از چشمه‌ی  $^{137}\text{Cs}$  با فعالیت ۳۰ میکروکوری و نیمه‌عمر ۳۰/۰۷ سال که فوتون‌هایی با انرژی ۰/۶۶۲ MeV و چشمه‌ی  $^{60}\text{Co}$  با نیمه‌عمر ۵/۲۷۱۳ سال که دو پرتو گاما با انرژی‌های ۱/۱۷ MeV و ۱/۳۳ MeV از خود گسیل می‌کند استفاده شد. آشکارساز مورد استفاده، سوسوزن یدور سدیم با ناخالصی تالیم NaI (Tl) می‌باشد که داخل محفظه‌ای از جنس آلومینیوم قرار دارد و همین امر باعث می‌شود فوتون‌هایی که انرژی کمتر از ۴۰ keV دارند به آشکارساز نرسند. طرح شماتیک اجزاء مورد استفاده، در شکل ۱، نمایش داده شده است. این سیستم شامل یک چشمه رادیواکتیو، موازی‌کننده تابش، آشکارساز سوسوزن که با ورقه‌های سربی حفاظت می‌شود و سیستم الکترونیکی پردازش و ثبت سیگنال است.

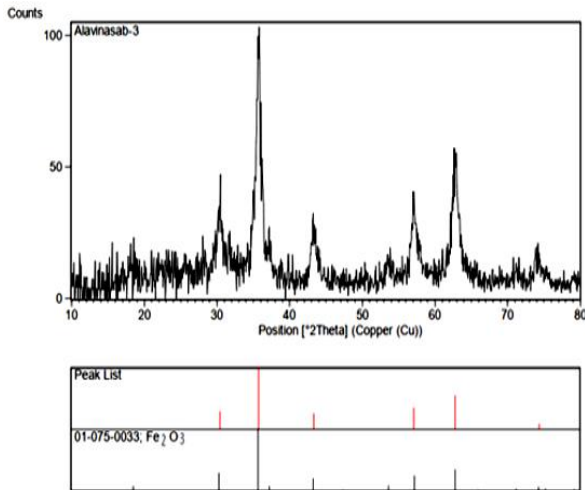
در تضعیف پرتوهای گاما بررسی کرده و مشاهده کردند که با افزایش میزان پرکننده میزان تضعیف افزایش پیدا می‌کند. هم‌چنین کامپوزیت‌های ISO + PbO به نسبت دو کامپوزیت دیگر از تضعیف بهتری برخوردار بوده که دلیل آن را بالاتر بودن درصد پرکننده‌ی Pb درون ماتریس کامپوزیت معرفی کرده‌اند و نیز به این نتیجه دست یافتند که توزیع یکنواخت پرکننده‌ی اکسیدسرب اثربخشی بهتری در کارایی حفاظت کامپوزیت دارد [۱۴]. هم‌چنین ایوانوف<sup>۱</sup> حفاظت نانوکامپوزیتی از جنس ماده‌ی پلیمری پلی‌اتیلن با وزن مولکولی بالا با پرکننده‌ی تنگستن و کربن‌کاربید تهیه و مورد بررسی قرار داده‌اند. نتایج حاکی از افزایش ضریب جذب با افزایش میزان پرکننده است [۱۵].

## ۲. مواد و روش‌ها

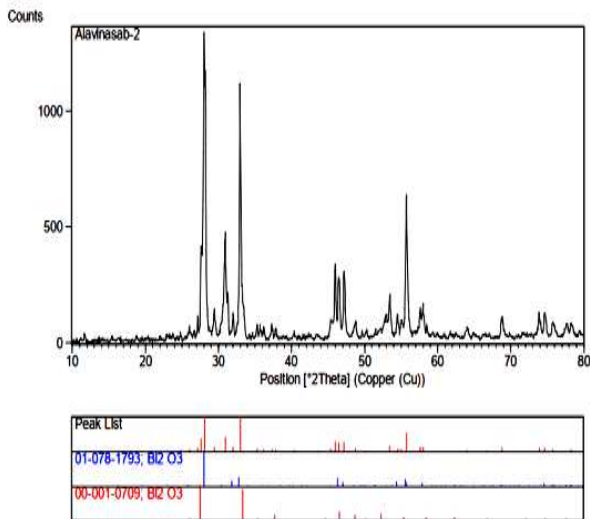
در این پژوهش از پلی‌کاپرولاکتون (PCL<sup>۲</sup>) به‌عنوان پایه‌ی پلیمری و اکسید بیسموت ( $\text{Bi}_2\text{O}_3$ ) و اکسید آهن ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) به‌عنوان پرکننده استفاده شد. پلی‌کاپرولاکتون با فرمول شیمیایی  $(\text{C}_6\text{H}_{10}\text{O}_2)$  یک پلی‌استر زیست تخریب‌پذیر با دمای ذوب حدود ۶۰ درجه سلسیوس و چگالی  $1/145 \text{ g/cm}^3$  است و مقاومت خوبی در برابر آب، روغن و حلال و کلر حاصل از پلی‌اورتان تولید شده دارد. اکسید بیسموت مورد استفاده به روش هیدروترمال و هیدروکسید آهن به روش هم‌رسوبی ساخته شدند. علت به‌کار بردن روش‌های متفاوت در ساخت نمونه‌ها مربوط به کیفیت نوع نمونه، کیفیت در روند بهتر نانو شدن ذرات سازنده نمونه و به‌کارگیری روش حتی‌الامکان ساده می‌باشد. برای ساخت کامپوزیت، پلیمر و نانوذره مورد

<sup>1</sup> Harish

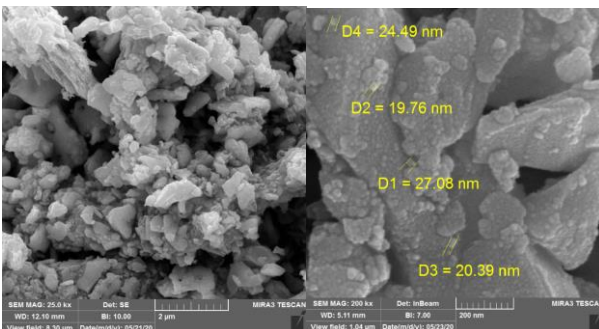
<sup>2</sup> Polycaprolactone



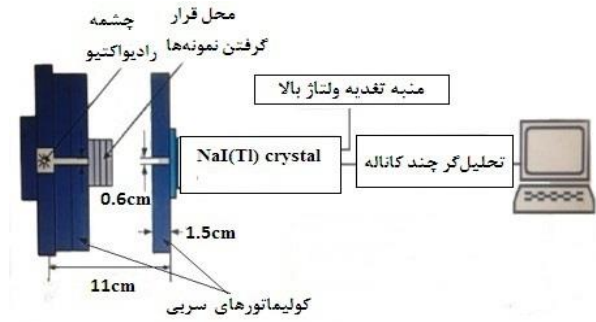
شکل (۲): طیف XRD مربوط به نانوذرات اکسید آهن ساخته شده.



شکل (۳): طیف XRD مربوط به نانوذرات اکسید بیسموت ساخته شده.



شکل (۴): تصاویر SEM گرفته شده از نانوذرات اکسید بیسموت.



شکل (۱): طرح شماتیکی از چینش اجزا برای اندازه‌گیری ضریب تضعیف.

در جدول ۱ چگالی و ضخامت نمونه‌های ساخته شده آورده شده است.

جدول (۱): مقادیر چگالی و ضخامت نمونه‌ها.

نمونه	ضخامت (میلی‌متر)	چگالی (گرم / سانتی‌متر مکعب)
اکسید بیسموت ۵٪	۷/۸۲	۱/۰۶۵۱
اکسید بیسموت ۲۰٪	۷/۸۹	۱/۰۳۷۸
اکسید بیسموت ۴۰٪	۶/۶۷	۱/۰۱۲۰
اکسید آهن ۵٪	۷/۸۶	۱/۵۵۹۱
اکسید آهن ۲۰٪	۷/۷۷	۱/۱۰۸۳
اکسید آهن ۴۰٪	۸/۵۵	۱/۰۳۹۷

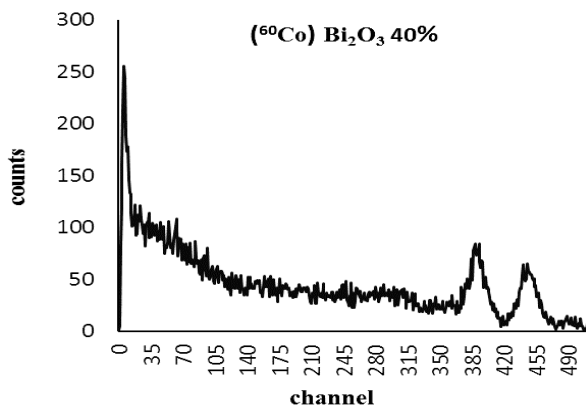
### ۳. نتایج و بحث

مشخصه‌یابی و ارزیابی نمونه‌های ساخته شده با استفاده از طیف پراش پرتوی ایکس (XRD<sup>۱</sup>) و میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM<sup>۲</sup>) انجام شده است. نتیجه‌ی طیف XRD ذرات مورد آزمایش مربوط به اکسید آهن در شکل ۲ و اکسید بیسموت در شکل ۳ نشان داده شده است.

با استفاده از رابطه دبای-شرر اندازه میانگین نانوذرات اکسید بیسموت ۲۹ نانومتر و اکسید آهن ۲۵ نانومتر به دست آمد. نتیجه‌ی طیف SEM گرفته شده از نمونه نانوذرات اکسید بیسموت و اکسید آهن با دو مقیاس ۲۰۰ nm و ۲ μm به ترتیب در شکل‌های ۴ و ۵ نشان داده شده است.

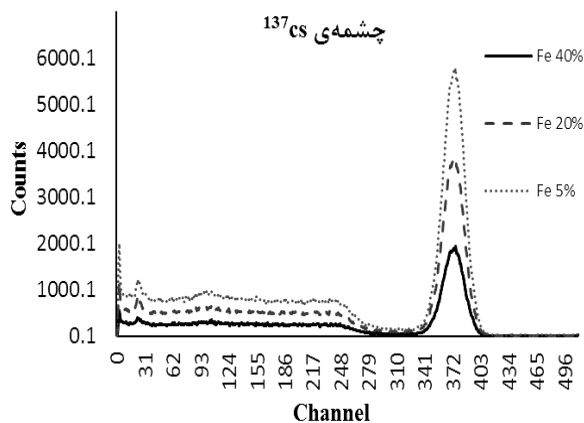
<sup>۱</sup> X-Ray Diffraction

<sup>۲</sup> Scanning Electron Microscope

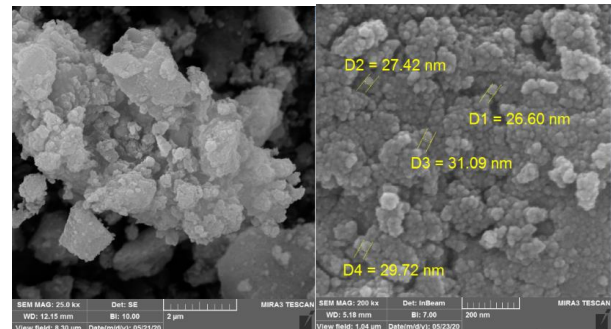


شکل (۷): طیف فوتون‌های گامای چشمه  $^{60}\text{Co}$  پس از عبور از نمونه‌ی اکسید بیسموت ۴۰ درصد.

بعد از کالیبره کردن سیستم اندازه‌گیری، طیف‌های ثبت شده به‌وضوح، قله تمام انرژی، لبه کامپتون و طیف پیوسته کامپتونی مربوط به چشمه‌ی مدنظر را نشان می‌دهد. طیف فوتون‌های حاصل از چشمه‌های  $^{60}\text{Co}$  و  $^{137}\text{Cs}$  پس از عبور نمونه‌های ساخته شده با ضخامت‌های مختلف در نمودار شکل‌های ۸ تا ۱۱ مقایسه شده‌اند.

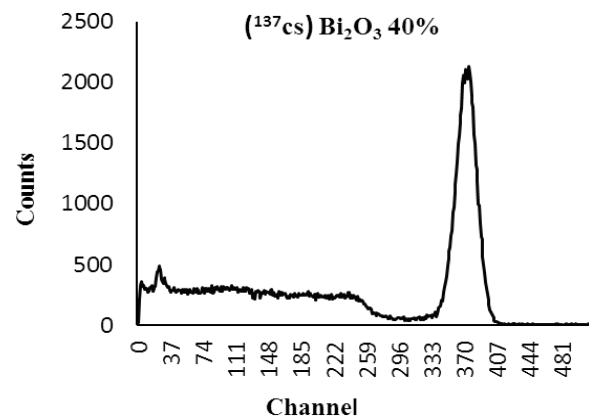


شکل (۸): فوتوپیک‌های مشاهده شده در چشمه  $^{137}\text{Cs}$  برای نمونه‌ی اکسید آهن با درصد بارگذاری مختلف.



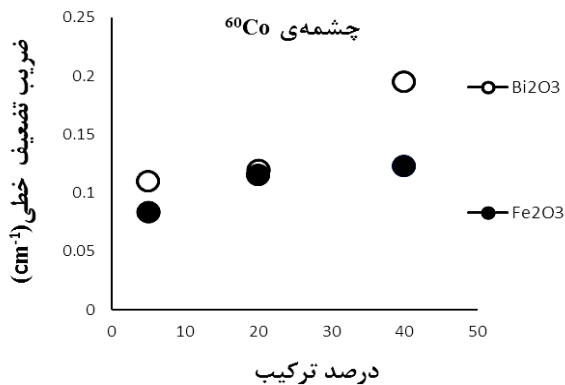
شکل (۵): تصاویر SEM گرفته شده از نانوذرات اکسید آهن.

برای به‌دست آوردن اندازه ذرات از برنامه Digimizer استفاده شد و با بررسی تصاویر SEM متوسط اندازه ذرات برای اکسید بیسموت ۳۲ نانومتر و برای اکسید آهن ۲۲ نانومتر به‌دست آمده است که با نتایج به‌دست آمده از طیف پراش پرتوی ایکس هم‌خوانی دارد. طیف پرتوهای گامای ساطع شده توسط دو چشمه‌ی  $^{60}\text{Co}$  و  $^{137}\text{Cs}$  پس از عبور از نمونه‌ی بیسموت ۴۰ درصد به‌ترتیب در شکل‌های ۶ و ۷ نشان داده شده است.

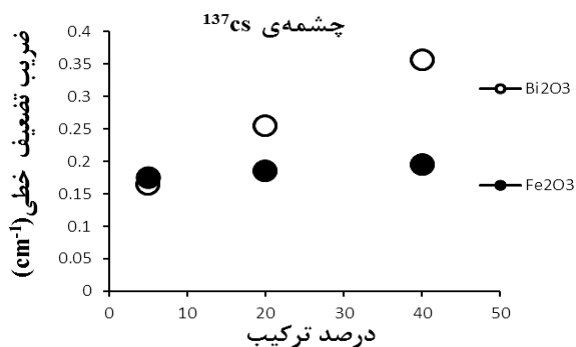


شکل (۶): طیف فوتون‌های گامای چشمه  $^{137}\text{Cs}$  پس از عبور از نمونه‌ی اکسید بیسموت ۴۰ درصد.

است که به معنای کاهش شدت پرتوهای گاما با به کارگیری حفاظ‌های ساخته شده می‌باشد. با مقایسه مساحت زیر هر قله با مساحت زیر قله وقتی که حفاظی وجود ندارد می‌توان ضریب تضعیف خطی نمونه را به دست آورد. اندازه‌گیری ضریب تضعیف به کمک رابطه  $I = I_0 \exp^{-\mu x}$  که در آن  $I$  و  $I_0$  به ترتیب شدت پرتوها قبل ورود به نمونه و بعد از عبور از نمونه،  $\mu$  ضریب تضعیف خطی و  $x$  ضخامت نمونه است انجام شده است. نمودارهای مربوط به ضریب تضعیف خطی برای دو چشمه  $^{137}\text{Cs}$  و  $^{60}\text{Co}$  در شکل‌های ۱۲ و ۱۳ نشان داده شده است.

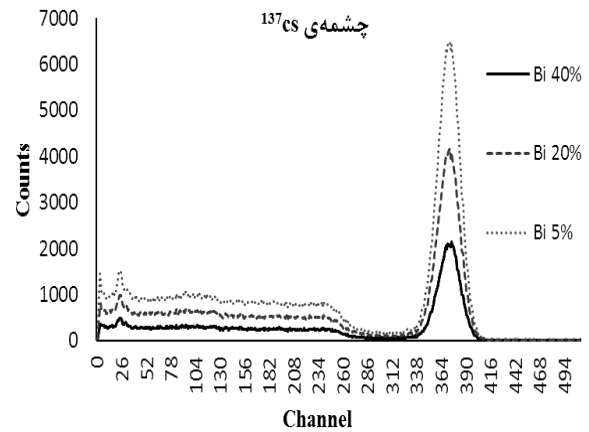


شکل (۱۲): مقایسه ضریب تضعیف خطی برای نمونه‌های اکسید آهن و اکسید بیسموت در مقابل فوتون‌های حاصل از چشمه  $^{60}\text{Co}$ .

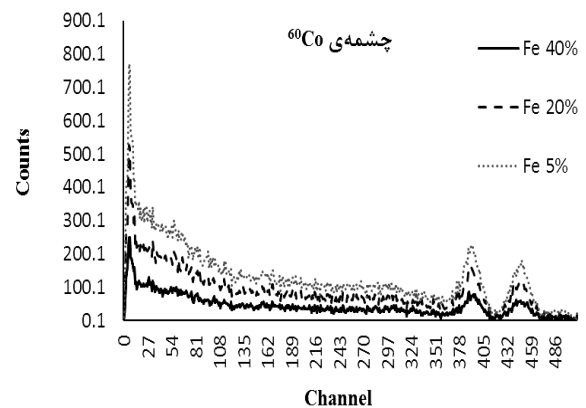


شکل (۱۳): مقایسه ضریب تضعیف خطی برای نمونه‌های اکسید آهن و اکسید بیسموت در مقابل فوتون‌های حاصل از چشمه  $^{137}\text{Cs}$ .

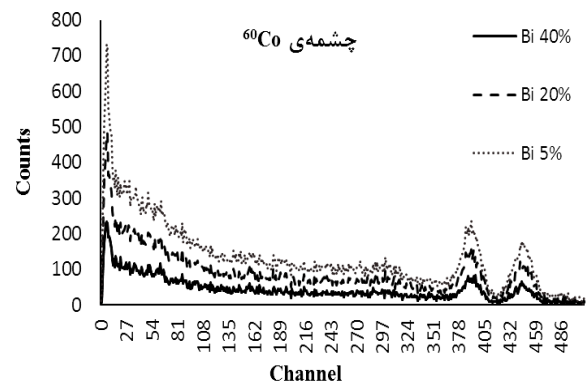
نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که در مورد هر دو چشمه افزایش میزان ماده پرکننده باعث افزایش قدرت جذب پرتویی محیط شده و بنابراین انتظار می‌رود برای رسیدن به حداکثر



شکل (۹): فوتویک‌های مشاهده شده در چشمه  $^{137}\text{Cs}$  برای نمونه‌ی اکسید بیسموت با درصد بارگذاری مختلف.



شکل (۱۰): فوتویک‌های مشاهده شده در چشمه  $^{60}\text{Co}$  برای نمونه‌ی اکسید آهن با درصد بارگذاری مختلف.



شکل (۱۱): فوتویک‌های مشاهده شده در چشمه  $^{60}\text{Co}$  برای نمونه‌ی اکسید بیسموت با درصد بارگذاری مختلف.

آنچه که از سطح زیر قله فوتویک، برداشت می‌شود این است که با افزایش درصد پرکننده بارگذاری شده در ضخامت‌های مشابه و یکسان، سطح زیر این قله کاهش یافته

در جدول ۴ و ۵، مقادیر ضخامت نیم لایه، ضخامت یک‌دهم لایه مربوط به نمونه‌های ساخته شده در این تحقیق در مقایسه با سرب مشاهده می‌شود. همان‌طور که در جدول ۴ و ۵ مشاهده می‌شود، هر دو کمیت به دست آمده با افزایش درصد پرکننده بارگذاری شده کاهش می‌یابند.

جدول (۴): ضخامت نیم لایه و یک‌دهم لایه برای نمونه‌ها براساس نتایج مربوط به چشمه  $^{137}\text{Cs}$ .

نام ترکیب	ضخامت یک‌دهم (سانتی‌متر)	ضخامت نیم لایه (سانتی‌متر)
اکسید بیسموت ۵٪	۱۳/۰۹۵۳	۳/۹۴۲۰
اکسید بیسموت ۲۰٪	۹/۰۳۳۵	۲/۸۱۹۳
اکسید بیسموت ۴۰٪	۶/۴۶۴۱	۱/۹۴۵۸
اکسید آهن ۵٪	۱۴/۰۲۴۶	۴/۲۲۱۸
اکسید آهن ۲۰٪	۱۲/۴۰۸۱	۳/۷۳۵۲
اکسید آهن ۴۰٪	۱۱/۸۲۲۳	۳/۵۵۸۸
سرب ۱۰۰٪	۲/۱۳۲۴	۰/۶۴۲۱

جدول (۵): ضخامت نیم لایه و یک‌دهم لایه برای نمونه‌ها براساس نتایج مربوط به چشمه  $^{60}\text{Co}$ .

نام ترکیب	ضخامت یک‌دهم لایه (سانتی‌متر)	ضخامت نیم لایه (سانتی‌متر)
اکسید بیسموت ۵٪	۲۰/۸۵۹۰	۶/۲۷۹۱
اکسید بیسموت ۲۰٪	۱۹/۱۲۴۰	۵/۷۶۰۰
اکسید بیسموت ۴۰٪	۱۱/۸۱۷۰	۳/۵۶۳۳
اکسید آهن ۵٪	۲۷/۴۷۴۶	۸/۲۷۰۶
اکسید آهن ۲۰٪	۲۰/۲۹۶۵	۶/۱۰۹۸
اکسید آهن ۴۰٪	۱۸/۰۸۸۳	۵/۴۴۵۱
سرب ۱۰۰٪	۲/۳۴۲۱	۰/۹۹۵۴

#### ۴. نتیجه‌گیری

در این پژوهش از نانوذرات اکسید بیسموت و آهن به‌عنوان پرکننده و از پلیمر پلی‌کاپرولاکتون به‌منظور زمینه یا ماتریس استفاده شده است تا امکان تهیه‌ی حفاظ کارآمد، سبک و با آلودگی زیست محیطی کمتر مورد بررسی قرار گیرد. از این‌رو ابتدا از طریق روش‌های مختلف شیمیایی نانوذرات اکسید بیسموت و آهن را تهیه کرده، سپس با روش مخلوط‌سازی، این نانوذرات با درصد‌های وزنی مختلف با پلی‌کاپرولاکتون مخلوط شده است. پس از بررسی‌های ریخت‌شناسی به‌کمک طیف XRD و SEM در ادامه برای

میزان جذب لازم است ماده ساخته شده نهایی حداکثر میزان پرکننده ممکن را دربر داشته باشد. البته تعیین دقیق حداکثر میزان پرکننده مستلزم در نظر گرفتن ملاحظات از جمله انجام آزمایش‌های تکمیلی برای بررسی پایداری مکانیکی نمونه‌ها است. از سوی دیگر مشخص است که میزان قدرت جذب نمونه‌ها به انرژی فوتون‌های وارد شده به محیط بستگی دارد. با توجه به این‌که فوتون‌های گامای تولیدی از چشمه  $^{137}\text{Cs}$  نسبت به فوتون‌های ساطع شده از چشمه  $^{60}\text{Co}$  انرژی کمتری دارند با احتمال بیشتری جذب می‌شوند.

جدول (۲): ضریب تضعیف جرمی در نمونه‌های توده‌ای و نانو.

ضریب تضعیف جرمی (سانتی‌متر مربع / گرم) برای چشمه $^{137}\text{Cs}$		
نمونه توده‌ای	نمونه نانو	نام ترکیب
۰/۰۸۶۹	۰/۱۳۷۳	اکسید بیسموت ۵٪
۰/۰۸۹۶	۰/۲۰۶۳	اکسید بیسموت ۲۰٪
۰/۰۹۴۶	۰/۲۱۸۳	اکسید بیسموت ۴۰٪
۰/۰۸۴۱	۰/۱۳۶۳	اکسید آهن ۵٪
۰/۰۸۰۴	۰/۱۵۲۱	اکسید آهن ۲۰٪
۰/۰۷۹۸	۰/۱۱۴۵	اکسید آهن ۴۰٪
۰/۱۱۳۴	-	سرب ۱۰۰٪

ضریب تضعیف جرمی نمونه‌های ساخته شده با نتایج پیش‌بینی مربوط به نمونه توده‌ای از پایگاه داده‌ی XCOM [۶] برای همان ترکیب مقایسه گردید که نتایج مقایسه در جداول ۲ و ۳، نشان داده شده است. براساس گزارش‌های موجود انتظار می‌رفت که نمونه‌ها در حالت نانو دارای ضریب تضعیف جرمی بالاتری نسبت به حالت توده‌ای باشند که نتایج جداول ۲ و ۳، بیانگر همین موضوع می‌باشد.

جدول (۳): ضریب تضعیف جرمی در نمونه‌های توده‌ای و نانو.

ضریب تضعیف جرمی (سانتی‌متر مربع / گرم) برای چشمه $^{60}\text{Co}$		
نمونه توده‌ای	نمونه نانو	نام ترکیب
۰/۰۶۱۶	۰/۰۹۲۳	اکسید بیسموت ۵٪
۰/۰۶۰۹	۰/۰۹۸۱	اکسید بیسموت ۲۰٪
۰/۰۶۰۱	۰/۰۹۴۸	اکسید بیسموت ۴۰٪
۰/۰۶۱۴	۰/۰۷۱۷	اکسید آهن ۵٪
۰/۰۶۰۳	۰/۰۸۶۳	اکسید آهن ۲۰٪
۰/۰۵۸۸	۰/۰۹۰۷	اکسید آهن ۴۰٪
۰/۰۵۹۰	-	سرب ۱۰۰٪

ضریب تضعیف خطی و جرمی قابل مقایسه با سرب می‌باشد. نتایج به‌دست آمده افزایش توان تضعیف هر دو نوع پلیمر ساخته شده با نانوذرات در قیاس با ترکیبات توده‌ای را نشان می‌دهد. تفاوت مذکور در مورد پرتوهای گامای ساطع شده از چشمه‌ی  $^{137}\text{Cs}$  بیشتر است می‌دهد. نتایج به‌دست آمده حاکی از کاهش ضخامت نیم‌لایه به میزان ۴۸ (۳۷) درصد برای نمونه‌ی اکسیدبیسیموت و ۳۶ (۲۱) درصد در نمونه‌ی اکسید آهن برای پرتوهای گامای ساطع شده از چشمه‌ی  $^{137}\text{Cs}$  ( $^{60}\text{Co}$ ) است. خطای اندازه‌گیری به‌صورت عمده از دو منشأ شمارش‌های انجام شده بر مبنای طیف‌سنجی و اندازه‌گیری چگالی نمونه‌ها مورد بررسی قرار گرفت و حداکثر خطای ۷ درصد را برای داده‌های به‌دست آمده تخمین زده می‌شود.

این‌که میزان توانایی تضعیف نمونه‌های ساخته شده در برابر پرتوهای گاما سنجیده شود این کامپوزیت‌ها را در مقابل چشمه‌های  $^{60}\text{Co}$  و  $^{137}\text{Cs}$  قرار داده شده و میزان تضعیف شدت پرتوهای ورودی برای ضخامت‌های مختلف هر نمونه اندازه‌گیری شده است. در نهایت به‌کمک طیف‌نگاری پرتوهای گاما توسط سیستم آشکارسازی شامل سوسوزن  $\text{NaI(Tl)}$  مقدار ضریب تضعیف خطی، ضریب تضعیف جرمی و ضخامت نیم و یک‌دهم لایه برای کامپوزیت‌های ساخته شده به‌دست آمدند. با توجه به نتایج به‌دست آمده، مشاهده می‌شود که افزایش مقدار بارگذاری نانوذرات در ماتریس پلیمری منجر به کاهش چشمگیر دز جذب شده و افزایش ضریب تضعیف خطی و ضریب تضعیف جرمی می‌شود. بهترین نتیجه به‌دست آمده مربوط به اکسیدبیسیموت ۴۰ درصد می‌باشد که دارای

## ۵. مراجع

- [1] R.F. Landel, L.E. Nielsen. Mechanical properties of polymers and composites, CRC Press, (1993).
- [2] L. Liu, H. Lei, Y. Cheng, Z. Wan, J. Ri-Guang, Z. Li-Qun, 25(12) Macromolecular rapid communications (2004) 1197-1202.
- [3] S. Nambiar, J.T. Yeow, ACS applied materials & interfaces, 4(11) (2012) 5717-5726.
- [4] M.Z. Botelho, R. Künzel, E. Okuno, R.S. Levenhagen, T. Basegio, C.P. Bergmann, Applied Radiation and Isotopes 69(2) (2011) 527-530.
- [5] M.I. Alymov, I.V. Tregubova, K.B. Povarova, A.B. Ankudinov, E.V. Evstratov, Russian Metallurgy (Metally), (2006) 217-220.
- [6] M.J. Berger, J.H. Hubbell, S.M. Seltzer, J. Chang, J.S. Coursey, R. Sukumar, D.S. Zucker, and K. Olsen NIST, PML, Radiation Physics Division, XCOM: Photon Cross Sections Database, (1998).
- [7] S. Y. Fu, X. Q. Feng, B. Lauke, Y. W. Mai., Composites Part B, (39) (2008) 933-961.
- [8] N.N. Azman, S. Siddiqui, and I.M. Low, Materials Science and Engineering, C 33(8) (2013) 4952-4957.
- [9] J. Kim, D. Seo, B.C. Lee, Y.S. Seo, W.H. Miller, Adv. Eng. Mater, 16 (2014) 1083-1089.
- [10] P.M. Ajayan, L.S. Schadler, P.V.A. Braun, Nanocomposite Science and Technology. Wiley VCH: Weinheim, Germany, (2003).
- [11] Martinez TP, Cournoye ME, Proceedings of the WM'01 Conference, (2001).
- [12] McCaffrey JP, Shen H, Downton B, Mainegra-Hing E, Med. Phys, 34(2) (2007) :530-537.
- [13] S.D. Kaloshkin, V.V. Tcherdyntsev, M.V. Gorshenkov, V.N. Gulbin, Journal of Alloys and Compounds, 536S (2012) S522-S526.
- [14] V. Harish, N. Nagaiah, H. G. Harish, Indian Journal of Pure and Applied Physics, 50(11) (2012) 847-850.
- [15] S. Ivanov, S.M. Ivanov, S.A. Kuznetsov, A.E. Volkov, P.N. Terekhin, S.V. Dmitriev, V.V. Tcherdyntsev, M.V. Gorshenkov, A.A. Boykov, Journal of Alloys and Compounds, 586 (2014) 455-458.