



تهیه کامپوزیت‌های انعطاف پذیر محافظ پرتوی گاما بر پایه لاستیک SBR

علیرضا مورکی^{۱*}، مهسا قصری^۱، غلامرضا مورکی^۲، پویا ع-کسائی^۳، بهزاد احدی^۴، اکبر رحمتی^۵
 ۱. پژوهشکده علوم، پژوهشگاه پلی‌مر و پتروشیمی ایران، صندوق پستی: ۱۴۹۷۷۱۳۱۱۵، تهران - ایران
 ۲. گروه برق، دانشکده فنی شهید مطهری تفت، دانشگاه فنی و حرفه‌ای، صندوق پستی: ۸۹۱۶۹۹۷۶۶۳، تفت - ایران
 ۳. دانشکده شیمی، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، صندوق پستی: ۱۴۷۷۸۹۳۸۵۵، تهران - ایران
 ۴. دانشکده فیزیک، دانشگاه پیام نور تهران، صندوق پستی: ۱۴۵۵۶۴۳۱۸۳، تهران - ایران
 ۵. دانشکده فیزیک، دانشگاه کاشان، صندوق پستی: ۸۷۳۱۷۵۳۱۵۳، کاشان - ایران

مقاله‌ی پژوهشی

تاریخ دریافت مقاله: ۹۹/۲/۳ تاریخ پذیرش مقاله: ۹۹/۴/۱۸

چکیده

در عصر فن‌آوری، حفاظت در برابر منابع بی‌شمار پرتوهای گامای موجود در محیط همواره یک دغدغه به شمار می‌رود. در سال‌های گذشته روش‌های گوناگونی جهت جذب پرتوهای گاما گسترش یافته که به‌طور کلی بر استفاده از حفاظ‌های فلزی و سنگین بر پایه سرب استوار است. سرب به دلیل هزینه زیاد، سمیت و سنگین بودن، حفاظ مناسبی محسوب نمی‌شود. هدف از انجام این پژوهش، تهیه کامپوزیت‌های سبک با بالاترین قدرت حفاظتی بر پایه لاستیک SBR می‌باشد. بنابراین فرمولاسیون‌های مختلف جهت تهیه لاستیک ضدپرتو در دستور کار قرار گرفت. برای دستیابی به این هدف، از خاکرس مونت‌موریلونیت (MMT) و اکسیدهای فلزی مختلف از قبیل اکسید آهن (Fe_2O_3)، اکسیدروی (ZnO)، اکسیدمولیبدن (MoO_3) و اکسیدتیتانیوم (TiO_2) به‌عنوان پرکننده استفاده شد. خواص حفاظتی کامپوزیت‌های تهیه شده با چشمه پرتوهای یوروپیم (^{152}Eu) در محدوده انرژی ۱۲۲ تا ۹۶۴ keV مورد ارزیابی قرار گرفت. برای بررسی خواص حفاظتی (ضریب تضعیف خطی، میزان جذب، ضخامت نیم‌لایه و ضخامت یک‌دهم لایه) و دیگر خواص کامپوزیت‌های لاستیکی تهیه شده از آزمون‌های کشش، سختی، TGA و SEM استفاده شد. از بین نمونه‌های تهیه شده، نمونه‌های حاوی MoO_3 و MMT با میزان جذب ۹۹٪، بهترین عملکرد را برای جذب پرتوها از خود نشان دادند.

کلیدواژه‌ها: محافظ پرتو گاما، اکسیدهای فلزی، مونت‌موریلونیت، کامپوزیت، لاستیک SBR

Preparation of flexible composites based on SBR as gamma shielding

A. Mouraki^{1*}, M. Ghasri¹, Gh. Mouraki², P. E-Kasaei³, B. Ahadi⁴, A. Rahmati⁵

1. Department of Polymer Science, Iran Polymer & Petrochemical Institute, P.O.Box: 1497713115, Tehran - Iran
2. Department of Electrical Engineering, Taft Shahid Motahari, Technical and Vocational University, P.O.Box: 8916997663, Taft - Iran
3. Department of Chemistry, Tehran Science and Research Branch, Islamic Azad University, 1477893855, Tehran - Iran
4. Department of Physics, Payame Noor University of Tehran, P.O.Box: 1455643183, Tehran - Iran
5. Department of Physics, Kashan University, P.O.Box: 8731753153, Kashan - Iran

Research Article

Received 22.4.2020, Accepted 8.7.2020

Abstract

Today, humans are surrounded by countless sources of gamma radiation, and therefore, radiation shielding has always been a big concern. Different methods which are generally based on the use of lead-based metal and heavy shielding materials have been developed to absorb this radiation in recent years. Lead is not a good shield due to its high cost, toxicity and weight. The purpose of this study is to produce lightweight composites with the highest protective strength based on SBR rubber. Therefore, in order to produce anti-radiation rubber, various formulations were used. For this purpose, montmorillonite (MMT) Clay and various metal oxides such as Iron Oxide (Fe_2O_3), Zink Oxide (ZnO), Molybdenum Oxide (MoO_3), and Titanium Oxide (TiO_2) were used as filler. Then, the shielding properties of the composites made with Europium (^{152}Eu) radioactive source in the energy range of 122 to 964 keV were investigated. The shielding properties of the composites including linear attenuation coefficient, absorption rate, half-value layer (HVL), and tenth-value layer (TVL), and other properties of rubber composites were studied by different analysis including mechanical strength, hardness, TGA, SEM. Among the samples tested, the sample containing MoO_3 and MMT was the best material for absorbing these rays with an absorption rate of about 99%.

Keywords: Gamma ray shielding, Metallic oxides, Montmorillonite, Composite, Styrene butadiene rubber

*Email: moroki.alireza@gmail.com

۱. مقدمه

امروزه با پیشرفت فن‌آوری، استفاده از دانش هسته‌ای در زمینه‌های مختلف صنعتی، پزشکی، پژوهشی، کشاورزی و ... رو به گسترش می‌باشد. در طی عملیات استفاده یا بهره‌برداری از فن‌آوری هسته‌ای، حفاظت از اشخاص و وسایل در برابر مواد پرتوزا بسیار مهم بوده و کاهش میزان جذب پرتوهای پرخطر گاما به حد قابل قبول توسط بدن انسان و دستگاه‌های امری ضروری است [۱]. پرتو گاما، از نوع یونیزان دارای بسامد بالا و در نتیجه انرژی بسیار زیاد است که برای سلامتی مضر است. از پرتو گاما در تشخیص سرطان و فیزیوتراپی و هم‌چنین در تشخیص ترکیدگی لوله و بررسی چاه‌های نفت به‌عنوان آزمون غیرمخرب استفاده می‌شود [۲]. در دستگاه‌های پرتوپزشکی که تنها بخشی از بدن فرد باید پرتو دهی شود، استفاده از حفاظ‌های سربی و قالب‌های بتنی که مستحکم و غیرقابل انعطاف هستند، مشکلاتی ایجاد خواهد کرد. روش‌های متفاوتی جهت حفاظت در برابر این پرتوها در سال‌های گذشته براساس استفاده از حفاظ‌های فلزی و سنگین بر پایه سرب گسترش یافت، چرا که سرب علاوه بر داشتن هزینه زیاد، سمیت، سنگین بودن و فرایندپذیری سخت، قابلیت کاربردهای گوناگون را ندارد [۳-۴]. در نتیجه همواره تلاش می‌شود تا جاذب‌های غیرسربی انعطاف‌پذیر به‌منظور حفاظت در برابر پرتوهای یون‌ساز مورد استفاده در پزشکی ساخته شود. در این بین کامپوزیت‌های پلی‌مری یکی از مناسب‌ترین و پرکاربردترین مواد برای ساخت حفاظ در برابر این پرتوها با خواص مکانیکی مناسب است؛ طی چند سال اخیر استفاده از کامپوزیت‌های لاستیکی رونق بیشتری داشته و موجب تحولی عظیم در این صنعت گشته است.

مطالعات گذشته نشان دادند عواملی مانند نوع پلی‌مر، مقدار نانوذرات و ضخامت در اثربخشی حفاظتی حفاظ‌های ساخته شده نقش مهمی دارند [۵، ۶]. کامپوزیت‌های لاستیکی به‌دلیل نسبت بسیار بزرگ استحکام و مدول به وزن، پایداری در برابر رطوبت، غیرسمی بودن، سازگاری با محیط زیست، فرایندپذیری مطلوب، سبکی، قیمت پایین، مقاومت در برابر خوردگی، چند منظوره بودن و عمل‌آوری آسان، نقش بسیار مهمی در صنایع هوافضا، ماشین‌سازی، پزشکی، ساختمان و سایر صنایع ساخت قطعات مهندسی ایفا می‌کنند [۷، ۸]. در این میان، حفاظ‌های لاستیکی تقویت‌شده با پرکننده‌های مناسب با حفظ خاصیت انعطاف‌پذیری، خواص فیزیکی و مکانیکی بهبود یافته، مزایای اقتصادی مناسب و هم‌چنین جذب مناسب پرتوهای گاما، توجه‌ی زیادی را به خود جلب کرده است. هدف از نوع حفاظ، ساخت محصول سبک با بالاترین قدرت جذب بود [۹]. تاکنون استفاده از چندین نوع لاستیک متفاوت از قبیل لاستیک استایرن بوتادین (SBR)، لاستیک ایزوپرن (IR)، لاستیک بوتادین (BR)، اتیلن پروپیلن رابر (EDM/EPDM)، بوتیل رابر (IIR)، کلروپرن رابر (CR) و نیتریل رابر (NBR) به‌همراه ذرات مختلفی برای تهیه این

حفاظ‌ها بررسی شده است [۱۰-۱۴]. کامپوزیت‌های لاستیکی با استفاده از روش‌های متداول فرایند لاستیک‌ها مانند اکستروژن، غلتک‌کاری، قالب‌گیری فشاری و قالب‌گیری تزریقی ساخته می‌شوند [۱۵، ۱۶].

کامپوزیت‌های پلی‌مری با خاک رس سیلیکاتی لایه‌ای، مانند خاک‌رس مونت‌موریلونیت (MMT) جایگزین خوبی برای کامپوزیت‌های معمولی هستند. ساختار درهم‌تنیده^۱ با نفوذ زنجیر پلی‌مری به درون لایه‌های سیلیکا و ایجاد ساختار ساندویچی به دست می‌آید. ساختار ورقه‌ای^۲ وقتی ایجاد می‌شود که تک‌لایه سیلیکاتی به‌طور همگن و یکنواخت در بستر پلی‌مری توزیع شده باشد. این نوع ساختار دارای اهمیت بالایی است زیرا برهم‌کنش لایه‌های خاک رس و پلی‌مر را به مقدار بیشینه رسانده و تغییرات مشهودی را در خواص فیزیکی مکانیکی پلی‌مر ایجاد می‌کند [۱۷]. کامپوزیت‌های بر پایه لاستیک SBR حاوی خاک رس در طی سالیان اخیر مورد توجه بسیاری از پژوهش‌گران قرار گرفته است [۱۸-۲۱]. ساختار MMT نقش مهمی در بهبود خواص مکانیکی، گرمایی و نفوذ در لایه‌های پلی‌مری ایفا می‌کند [۲۲].

به‌منظور دستیابی به خواص حفاظتی مناسب در برابر پرتوهای گاما، ضروری است که پرکننده‌های فلزی با عدد اتمی بالا (مانند سرب) که به‌طور یکنواخت در ماتریس پلی‌مری پخش شده، استفاده شود. دلیل استفاده از عناصر با عدد اتمی بالا این است که سطح مقطع پراکندگی هر اتم در اثر پدیده فوتوالکتریک تقریباً با توان چهارم عدد اتمی متناسب است و هم‌چنین با توجه به کاربرد این کامپوزیت‌ها برای حفاظت پرتویی، باید مقدار زیادی پرکننده مورد استفاده قرار گیرد [۲۳، ۲۴].

تعدادی از حفاظ‌های مشابه در جدول ۱ گردآوری شده است. در این پژوهش از پلی‌مر لاستیکی SBR با توجه به ویژگی‌های انعطاف‌پذیری، خواص مکانیکی مناسب، وزن کم، عایق آب، عایق هوا، عایق صدا و مقاوم در برابر روغن، استفاده شد. برای دستیابی به حفاظ پرتوهای گاما از خاک‌رس مونت‌موریلونیت (MMT) و اکسیدهای فلزی از قبیل اکسید آهن (Fe_2O_3)، اکسید روی (ZnO)، اکسید تیتانیوم (TiO_2) و اکسید مولیبدن (MoO_3) با توجه به عدد اتمی نسبتاً بالا و هم‌چنین غیرسمی بودن آن‌ها به‌عنوان پرکننده استفاده شد. این پروژه با هدف تهیه کامپوزیت‌های حفاظتی جدید با خصوصیات مناسب محافظتی پرتو، منعطف و کم‌هزینه انجام شده است. بنابراین در این پژوهش کامپوزیت‌های لاستیکی با خاک‌رس به‌همراه چهار اکسید فلزی که به‌خوبی در ماتریس پلی‌مری پخش شده، تهیه گردید. کامپوزیت‌های تهیه شده در این پژوهش برای اولین بار تهیه شده است که با ضخامت کم و وزن پایین قابلیت کاربرد برای حفاظت از انسان را دارا باشد.

1. Intercalated
2. Exfoliated

جدول ۱. مروری بر مطالعات انجام شده

ردیف	نویسندگان	خلاصه فعالیت انجام شده	پرتوهای قابل جذب	درصد جذب پرتو	مرجع
۱	Dubey و همکاران	حفاظ کامپوزیتی منعطف بر پایه پلی‌دی‌متیل‌سیلوکسان و بیسموت اکسید در درصدهای وزنی پرکننده ۵، ۱۰، ۳۰، ۵۰ و ۷۰ با ضخامت‌های ۱ تا ۴ mm تهیه گردیده است.	گاما	٪۹۰	[۲۵]
۲	Yue و همکاران	صفحات کامپوزیتی بر پایه کاپلیمر استایرن- بوتادی ان- استایرن و فلز تنگستن در درصدهای وزنی تنگستن ۷۰، ۷۵ و ۸۰ با ضخامت ۳۰ mm برای ساخت حفاظ تهیه شد.	گاما	٪۹۰	[۱۰]
۳	Kim و همکاران	با استفاده از شیوه کیسول کردن تنگستن در پلی‌اتیلن در درصدهای وزنی ۷۵ و ۱۵ از نانو و میکروتنگستن به روش پرس گرانول، حفاظ کامپوزیتی تهیه گردیده است.	گاما	٪۸۰	[۲۶]
۴	Chen و همکاران	با استفاده از شیوه ذوب، فوم‌های سلول بسته و سلول باز حاوی واکس پلی‌اتیلنی با مساحت‌های ۵، ۱۰، ۲۰ و ۳۰ g/cm ^۲ با ضخامت‌های ۱ تا ۱۰ cm ساخته شده است.	گاما	٪۵۰	[۲۷]
۵	Harish و همکاران	حفاظ کامپوزیتی منعطف بر پایه پلی‌استر غیراشباع و سرب مونوکسید به روش پرس در درصدهای وزنی پرکننده ۵، ۱۰، ۲۰، ۳۰، ۴۰ و ۵۰ تهیه گردیده است.	گاما	٪۶۰	[۲۸]
۶	Saiyad و همکاران	برای تهیه حفاظ کامپوزیتی بر پایه اپوکسی و ۳٪ وزنی پرکننده (گرافیت، سرب و نیتريد بور) با ضخامت ۳ mm به روش اختلاط شدید اپوکسی / پرکننده و سپس پرس کردن کامپوزیت و پخت آن انجام گردید.	گاما	٪۳۰	[۲۹]
۷	Okuno و همکاران	حفاظ کامپوزیتی بر پایه اپوکسی و کلمانیت (۲۵٪ وزنی پرکننده) با ضخامت ۳۰ mm به روش اختلاط رزین و کلمانیت و سپس پخت به‌وسیله فشار و حرارت تهیه گردیده است.	گاما و نوترون	٪۶۰	[۳۰]

۲. تجربی

۱.۲ مواد

لاستیک استایرن- بوتادین با مشخصه SBR-۱۵۰۲ دارای وزن مولکولی متوسط عددی ۱۷۶۰۰۰ g/mol محصولی از پتروشیمی بندر امام ایران، به عنوان ماتریس استفاده شد. این پلی‌مر شامل ۲۳/۵٪ استایرن، با چگالی ویژه ۰/۹۴۵ و گرانی مونی (۱+۴) ML در دمای ۱۰۰ °C برابر ۸۴ است. از دوده N۵۵۰ محصول شرکت دوده سیمرغ ایران استفاده شد. خاک رس سدیم مونت‌موریلونیت با ظرفیت تبادل یونی ۱۱۹ میلی‌اکی‌والان به ازای ۱۰۰ g خاک با نام تجاری Kunipia-F, KF محصول شرکت Kunimine ژاپن استفاده شد. روغن آروماتیک از شرکت بهران به‌عنوان نرم‌کننده، استئاریک‌اسید از شرکت Palm-Oleo مالزی، گوگرد از شرکت تسداک ایران و شتاب‌دهنده‌های Tetramethylthiuram disulfide و Mercaptobenzothiazole از منابع چینی تهیه شد.

۲.۲ دستگاه‌ها و روش‌ها

۱.۲.۲ دستگاه‌ها

غلنک ۲۰۰L Polymix ساخت شرکت Schwabenthan با قابلیت تنظیم دور رول‌ها تا ۵۰ rpm و تنظیم فاصله رول‌ها در محدوده ۰/۲ تا ۲/۵ cm برای تهیه آمیزه‌ها استفاده شد. عملیات آمیزه‌سازی در دمای محیط انجام شد. جهت پخت نمونه‌ها و تهیه ورق از نمونه‌های پخت نشده از روش قالب‌گیری فشاری استفاده شد. برای این منظور از دستگاه پرس ۱۰۰ تنی مدل Bucher ساخت سوئیس با قابلیت اعمال

فشار ۱۵۰ bar و قابلیت کنترل دما در محدوده ۱۰۰ تا ۳۰۰ °C استفاده شد. پخت نمونه‌ها در دمای ۱۶۰ °C و فشار ۱۵۰ Kgf/cm^۲ انجام شد.

جهت بررسی پخش پرکننده‌ها در ماتریس پلی‌مری از آزمون میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) استفاده شد. این آزمون به‌وسیله دستگاه مدل Vega II از شرکت Tescan، ساخت کشور چک انجام گردید. به‌منظور بررسی پایداری حرارتی کامپوزیت‌های لاستیکی ساخته‌شده با دستگاه TGA-PL مدل ۱۵۰۰ TGA ساخت کشور انگلستان اندازه‌گیری شد. حرارت‌دهی به نمونه‌ها از دمای اتاق تا دمای ۶۰۰ °C با سرعت ۱۰ °C/min انجام گردیده است. پیش از انجام آزمون TGA، نمونه‌ها به مدت ۲۴ h در آن خلاء در دمای ۷۰ °C قرار داده شدند. علت این کار رطوبت‌گیری از نمونه‌ها می‌باشد. جهت بررسی خواص کششی کامپوزیت‌های تهیه‌شده، نمونه‌هایی به شکل دمبل تهیه شد که به کمک دستگاه Tensile Testing Machine Hiwa مطابق استاندارد ASTM D ۴۱۲ با سرعت کشش ۵۰۰ mm/min آزمون انجام شد. استحکام کششی و ازدیاد طول در نقطه پارگی و مدول ۱۵٪، پارامترها و خواص مهم حاصل از این آزمون هستند. نمونه‌های دمبلی شکل برای این آزمون از ورقه‌های پخت‌شده نهایی، پانچ شده است که اندازه وسط ناحیه باریک ۳۳ mm است. هم‌چنین به‌منظور بررسی سختی این نمونه‌ها به کمک دستگاه سختی‌سنج (Zwick Company) TECLOCK-GSV۰۹N ساخت کشور آلمان مطابق استاندارد ASTM D۲۲۴۰ انجام شد.

برای هر نمونه در سطوح انرژی مختلف از پرتوهای گاما، ضرایب تضعیف خطی، ضخامت نیم‌لایه^۱ (HVL) و ضخامت یک‌دهم لایه^۲ (TVL) مطابق رابطه‌های ۲ و ۳ محاسبه شده است.

$$HVL(mm) = \frac{\ln 2}{\mu} \quad (2)$$

$$TVL(mm) = \frac{\ln 10}{\mu} \quad (3)$$

HVL و TVL نشان‌دهنده ضخامتی از ماده هستند که شدت پرتو ایکس یا گاما را به ترتیب به نصف و یک‌دهم مقدار اولیه کاهش می‌دهند.

به منظور درک بهتر خواص حفاظتی کامپوزیت‌های تولید شده، درصد جذب پرتوهای گاما برای هر کامپوزیت برحسب ضخامت مطابق رابطه ۴ محاسبه گردیده است.

$$100 \times \frac{I_0 - I}{I_0} = \text{درصد جذب پرتوهای گاما} \quad (4)$$

۲.۲.۲ تهیه کامپوزیت‌های محافظ پرتو

در این پژوهش سه متغیر مقدار خاک‌رس، مقدار اکسیدهای فلزی و نوع اکسیدهای فلزی به‌عنوان عوامل تأثیرگذار بر خواص کامپوزیت لاستیکی در نظر گرفته شدند؛ مقادیر این متغیرها در جدول ۲ نشان داده شده است. همان‌طور که در این جدول مشخص است، با در نظر گرفتن سه متغیر که هر کدام در سه سطح تغییر می‌کنند، در مجموع ۱۶ نمونه تهیه شد.

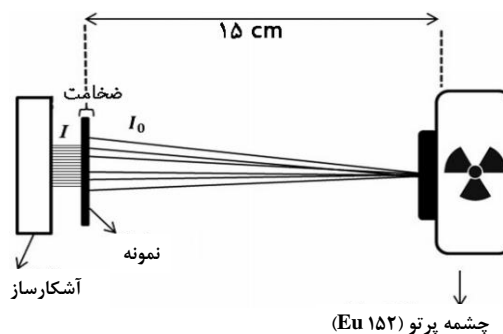
چنان‌که در شکل ۲ نمایش داده شده است، برای تهیه نمونه‌ها ابتدا SBR را در غلطک (Two-roll mill) ریخته و بعد از نرم‌شدن آن، پودر خاک‌رس و دیگر اکسید فلزی مورد استفاده به آن افزوده می‌شود. زمان اختلاط برای هر نمونه متفاوت بوده و تا پخش کامل آن در الاستومر، غلطک کردن ادامه داده می‌شود. سپس مواد افزودنی باقی‌مانده به آن اضافه شده و مخلوط به‌صورت کامل غلطک می‌شود. بعد از غلطک کامل و پخش مناسب، نمونه نهایی حاوی پرکننده‌ها به دست می‌آید. به نمونه‌های تهیه شده اجازه داده می‌شود ۲۴ ساعت در محیط باقی بماند تا تنش‌های وارد شده به آن در طی غلطک رفع شود.

به دلیل تفاوت داشتن نوع پرکننده و مقدار آن، زمان مورد نیاز جهت پخت هر نمونه لاستیکی، متفاوت است که به علت تفاوت در دفع حرارتی یا جذب حرارتی نمونه‌ها می‌باشد. برای تهیه نمونه ۲۰×۲۰ سانتی‌متر مربعی با ضخامت ۲ میلی‌متر از

برای مطالعه و بررسی خواص محافظتی نمونه‌ها در مقابل پرتو، از چشمه یورویوم (^{۱۵۲}Eu) (نیمه‌عمر ۱۳/۵ سال) با قطر ۴ میلی‌متر و اکتیویته ۱ μCi که چشمه تولید گاما است، استفاده شده است. نمونه‌ها بین چشمه تابش پرتو و آشکارساز قرار می‌گیرد و فاصله نمونه تا چشمه تابش پرتو ۱۵ سانتی‌متر است (شکل ۱). نمونه‌ها تحت تابش انرژی‌های فوتون مختلف (۱۲۲، ۳۴۴، ۷۷۹ و ۹۶۴ keV) قرار گرفته و ضریب تضعیف خطی کامپوزیت‌های تهیه شده بررسی شده است. آشکارساز مورد استفاده در این دستگاه از نوع سوسوزن یدور سدیم فعال شده با تالیوم بوده است. برای هر آنالیز ابتدا یک بار امواج گاما بدون حضور کامپوزیت و سپس در حضور کامپوزیت به مدت ۱۸۰ ثانیه تابیده شد. جهت کاهش خطا، هر آنالیز سه بار تکرار شد. با افزایش ضخامت کامپوزیت موردنظر با درصد پرکننده مشخص، برای هر سطح انرژی، نمودار مربوط به آن رسم گردید. در نهایت با درون‌یابی نمودار رسم شده و پیدا کردن تابع آن توسط نرم‌افزار Origin، ضریب تضعیف خطی پرتوهای گاما توسط هر کامپوزیت با استفاده از رابطه ۱ محاسبه گردید. طیف جذب پرتو تابعی از ضخامت مواد گزارش شده است. افزایش ضخامت کامپوزیت‌های تهیه شده برای محافظت در برابر پرتو تا ضخامت ۲۰ میلی‌متر با افزودن صفحات ۲ میلی‌متری انجام شده است. مقایسه بر اساس شدت جریان برای حالتی که هیچ نمونه‌ای بین آشکارساز و چشمه (^{۱۵۲}Eu) نباشد و جریان هنگامی که نمونه وجود (I) داشته باشد، انجام می‌شود.

$$\mu = -\frac{\ln \frac{I}{I_0}}{t} \quad (1)$$

در این رابطه، t ضخامت نمونه موردنظر و μ ضریب تضعیف خطی آن است که به جنس ماد جاذب و انرژی فوتون‌های فرودی بستگی دارد.



شکل ۱. نحوه‌ی قرارگیری نمونه‌های کامپوزیتی در برابر پرتو [۱].

1. Half-Value Layer
2. Tenth-Value Layer

بین ماتریس پلی مری و پرکننده‌ها ربط داد. این افزایش به صورت تقریباً خطی با مقدار پرکننده متناسب است. سختی نمونه اولیه (SBR) ۳۵ است، که با افزایش خاک رس و اکسیدهای فلزی، افزایش می‌یابد. بیشینه سختی برای نمونه حاوی خاک رس و اکسید روی (SBR-MZn-۵۰) به مقدار ۵۶/۱ بوده است.

قالبی به همین ابعاد استفاده شده است. از دستگاه پرس ۱۰۰ تنی برای تهیه این نمونه‌ها استفاده شد و دمای پخت 160°C تنظیم شد. از قطعات تهیه شده ۱۰ عدد قطعه 5×5 سانتی‌متر مربع تهیه شد که برای آزمون جذب پرتو مورد استفاده قرار گرفت.

۳. نتایج و بحث

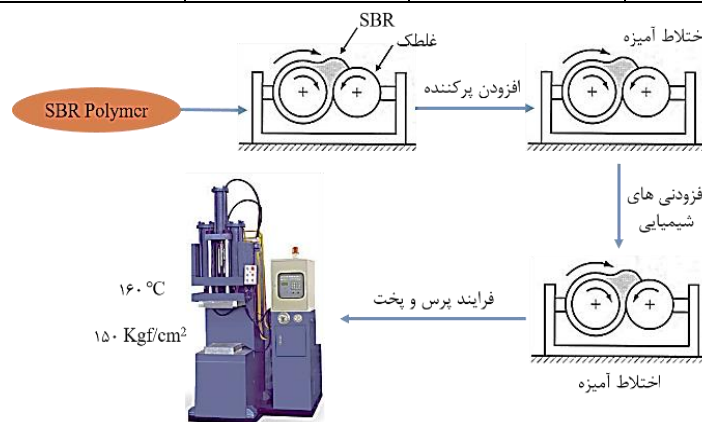
۱.۳ بررسی سختی کامپوزیت‌های تهیه شده

۲.۲ بررسی پایداری حرارتی کامپوزیت‌های تهیه شده
برای بررسی خواص حرارتی و تأثیر وارد شدن پرکننده‌ها بر آن، در لاستیک خالص (SBR) از تکنیک وزن‌سنجی حرارتی (TGA) استفاده شد. نتایج حاصل از تجزیه حرارتی نمونه‌های مختلف بر پایه لاستیک SBR در شکل ۴ گزارش شده است. نتایج نشان داد که در دمای 250°C تا حدود دمای 400°C کاهش وزن حدود ۱۰٪ است و در دماهای بین ۴۰۰ تا 500°C ، به شدت افت وزن رخ می‌دهد.

سختی کامپوزیت‌ها به معنی مقاومت در برابر فرورفتگی توسط یک جسم سخت‌تر است؛ این مقاومت در حالتی که ماتریس پلی‌مر لاستیکی با خاک‌رس و اکسید فلزی پر شده باشد، بیشتر است. مقادیر سختی کامپوزیت‌های تهیه شده در جدول ۳ و شکل ۳ نشان داده شده است. طبق این نتایج، با افزایش مقدار خاک‌رس و اکسیدهای فلزی مقدار سختی افزایش می‌یابد. افزایش سختی را می‌توان به افزایش اتصالات

جدول ۲. متغیرهای فرایندی در تهیه آمیزه‌ها (مقادیر برحسب Phr هستند)

MMT+TiO ₂			MMT+MoO ₃			MMT+ZnO			MMT+Fe ₂ O ₃			MMT			خالص	
SBR-MTi-50	SBR-MTi-30	SBR-MTi-15	SBR-MMo-50	SBR-MMo-30	SBR-MMo-15	SBR-MZn-50	SBR-MZn-30	SBR-MZn-15	SBR-MFe-50	SBR-MFe-30	SBR-MFe-15	SBR-M-50	SBR-M-30	SBR-M-15	SBR	کد نمونه
۱۰۰			۱۰۰			۱۰۰			۱۰۰			۱۰۰			۱۰۰	SBR
	۲			۲			۲			۲			۲		۲	Stearic acid
	۱۰			۱۰			۱۰			۱۰			۱۰		۱۰	Ormatic oil
	۲			۲			۲			۲			۲		۲	MBTS
	۰.۳۳			۰.۳۳			۰.۳۳			۰.۳۳			۰.۳۳		۰.۳۳	TMTD
	۱			۱			۱			۱			۱		۱	S
۵۰	۳۰	۱۵	۵۰	۳۰	۱۵	۵۰	۳۰	۱۵	۵۰	۳۰	۱۵	۵۰	۳۰	۱۵	۰	clay
									۵۰	۳۰	۱۵				۰	Fe ₂ O ₃
						۵۰	۳۰	۱۵							۰	ZnO
			۵۰	۳۰	۱۵										۰	MoO ₃
۵۰	۳۰	۱۵													۰	TiO ₂



شکل ۲. طرح‌واره تهیه نمونه.

با توجه به طیف به دست آمده می‌توان دریافت که افزودن خاک رس سبب می‌شود که شروع تخریب در دماهای بالاتری روی دهد، همچنین مقدار خاکستر باقی‌مانده افزایش داشته که به دلیل حضور خاک رس است. با افزودن دیگر اکسیدهای فلزی تخریب در دماهای بالاتری شروع شده و باعث افزایش پایداری حرارتی شده است. همچنین میزان خاکستر باقی‌مانده افزایش پیدا می‌کند که نشانه‌ای از حضور پرکننده‌ها در ماتریس پلی‌مری می‌باشد. نتایج نشان می‌دهد که پایداری حرارتی کامپوزیت‌های تهیه شده در همه غلظت‌های پرکننده‌ها نسبت به آمیزه SBR خالص بهتر است. این مسئله عمدتاً به دلیل برهم‌کنش‌های قوی بین پرکننده‌ها و ماتریس لاستیکی و عمل ممانعت از عبور گاز از لایه‌های خاک‌رس و همچنین به ظرفیت گرمایی اکسیدهای فلزی نسبت داده می‌شود.

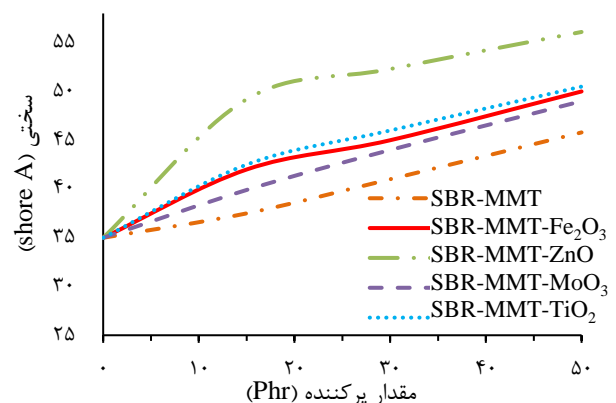
۳.۳ بررسی مورفولوژی و پخش افزودنی‌ها

یکی از پارامترهای مهم در کامپوزیت‌های محافظ پرتو، یکنواخت بودن تضعیف پرتو در سراسر بافت کامپوزیت می‌باشد. این ویژگی تنها در صورتی به دست خواهد آمد که توزیع پرکننده‌ها در بستر کامپوزیت به صورت یکنواخت صورت گیرد. همان‌طور که پیش از این اشاره شد، عاملی که باعث تضعیف پرتوهای پرتوهای پرتوئی و ممانعت از عبور آن‌ها از کامپوزیت می‌شود، فلزات سنگین هستند که به عنوان پرکننده در بستر کامپوزیت مورد استفاده قرار می‌گیرند. از آن‌جا که درصد پرکننده در کامپوزیت‌های محافظ پرتوهای ایکس و گاما نسبتاً بالا بوده و از این لحاظ با سایر کامپوزیت‌ها که بیشینه میزان پرکننده در آن‌ها به بیش از ۱۰٪ تجاوز نمی‌کند، متفاوت هستند، بنابراین توزیع ذرات پرکننده‌ها در ماتریس پلی‌مری باید با دقت و حساسیت بالا صورت گیرد. به منظور اطمینان از توزیع یکنواخت پرکننده‌ها در بستر کامپوزیت از آنالیز میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) استفاده شد. جهت بررسی پخش پرکننده‌ها در ماتریس پلی‌مری، نمونه‌های SBR، SBR-M-30، SBR-MFe-30، SBR-MZn-30، SBR-MMo-30، SBR-MTi-30 برای تصویربرداری SEM انتخاب شده است. طبق تصاویر به دست آمده، میزان پخش پرکننده‌ها در ماتریس پلی‌مری نسبتاً یکنواخت صورت گرفته است. همچنین پس از افزودن اکسیدهای فلزی، پخش بهبود یافته است.

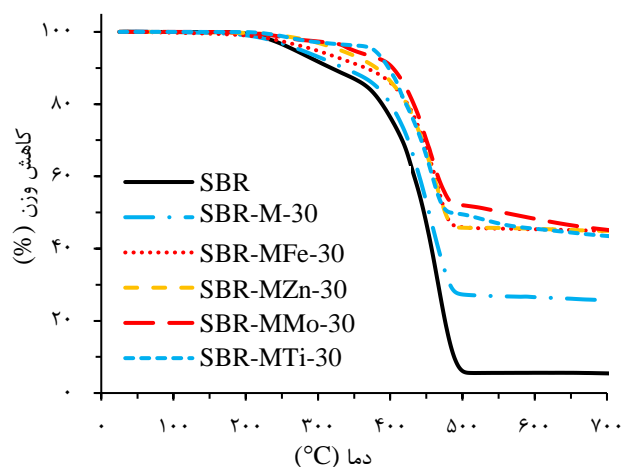
شکل ۵ الف لاستیک خالص، که پرکننده‌ای در آن استفاده نشده، را نشان می‌دهد؛ در حالی که تصاویر دیگر به خوبی نشان‌دهنده اختلاط مناسب و پخش پرکننده‌ها هستند.

جدول ۳. مقادیر سختی کامپوزیت‌های لاستیکی تهیه شده

سختی (shore A)	کد نمونه
۳۵	SBR
۳۷.۵	SBR-M-۱۵
۴۱	SBR-M-۳۰
۴۵.۸	SBR-M-۵۰
۴۲	SBR-MFe-۱۵
۴۵	SBR-MFe-۳۰
۵۰	SBR-MFe-۵۰
۴۹.۲	SBR-MZn-۱۵
۵۲.۳	SBR-MZn-۳۰
۵۶.۱	SBR-MZn-۵۰
۳۹.۹	SBR-MMo-۱۵
۴۴	SBR-MMo-۳۰
۴۹	SBR-MMo-۵۰
۴۲.۵	SBR-MTi-۱۵
۴۶	SBR-MTi-۳۰
۵۰.۵	SBR-MTi-۵۰



شکل ۳. نمودار سختی کامپوزیت‌های تهیه شده بر حسب مقدار پرکننده.



شکل ۴. نمودار TGA نمونه‌های منتخب (SBR، SBR-M-30، SBR-MFe-30، SBR-MZn-30، SBR-MMo-30، SBR-MTi-30).

جبران این پدیده باید اختلاط مناسبی انجام شود. نمونه‌های SBR-MMo-۵۰ و SBR-MFe-۵۰ دارای بالاترین کرنش (از دید طول) و استحکام کششی هستند و نمونه‌های حاوی اکسید روی به دلیل خاصیت تسریع‌کنندگی در پخت باعث کاهش کرنش شده است.

از بین کامپوزیت‌های حاوی خاک‌رس و اکسیدهای فلزی، کامپوزیت SBR-MMo-۵۰ دارای بالاترین ضریب تضعیف خطی (0.38 mm^{-1}) و کامپوزیت SBR-MTi-۱۵ دارای کمترین ضریب تضعیف خطی (0.36 mm^{-1}) است. کامپوزیت SBR-MMo-۵۰ دارای پایین‌ترین مقادیر HVL (1.8 mm) و TVL (6.1 mm) است. در حالی که کامپوزیت SBR-MTi-۱۵ دارای بالاترین مقادیر HVL (1.93 mm) و TVL (6.4 mm) است.

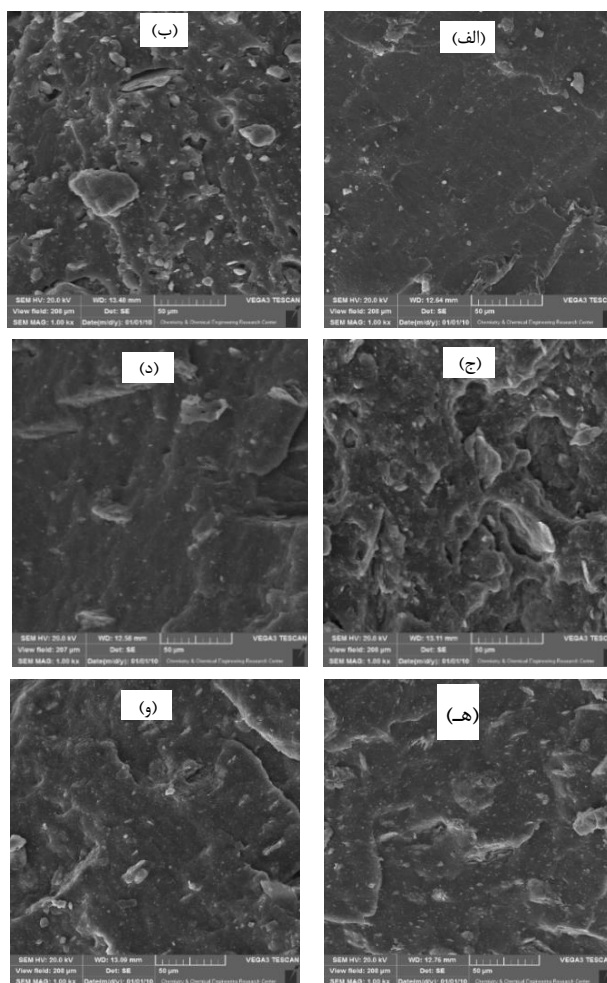
۶.۳ بررسی میزان جذب کامپوزیت‌های تهیه شده

کامپوزیت‌های تهیه شده در سطح انرژی 122 keV خواص محافظتی مناسبی را نشان داد. از این رو میزان جذب نمونه‌ها در این سطح انرژی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد تمامی کامپوزیت‌ها از جذب مناسبی برخوردار هستند (جدول ۵ و ۶).

کامپوزیت‌های تهیه شده در حضور اکسیدهای فلزی، میزان جذب بهتری را نشان می‌دهند. میزان جذب پرتوهای گاما در این ناحیه از انرژی تا ضخامت ۲۰ میلی‌متر برای همه کامپوزیت‌ها روند افزایشی داشته است. از بین کامپوزیت‌های حاوی خاک‌رس و اکسیدهای فلزی، کامپوزیت‌های حاوی MoO_3 میزان جذب مناسب‌تری داشته که نمونه SBR-MMo-۵۰ دارای بالاترین درصد جذب (98.9%) و کامپوزیت‌های حاوی TiO_2 میزان جذب کمتری داشته است و در بین این دسته از کامپوزیت‌ها، نمونه SBR-MTi-۱۵ دارای کمترین درصد جذب (51.8%) است.

برای نمونه‌ی SBR-MMo-۵۰ در ضخامت 8 mm میزان جذب حدود 90% بوده که در مقایسه با دیگر کامپوزیت‌ها در این ضخامت جذب بسیار بالاتری داشته است.

مقایسه یافته‌های این مطالعه با پژوهش‌های پیشین، بر اثربخشی چشم‌گیر حفاظ‌های تهیه شده در این پروژه تأکید می‌کند. در مطالعات گذشته معمولاً پرکننده‌های فلزی، آلیاژهای فلزی و ذرات کربنی مورد استفاده قرار گرفته است [۳۲-۳۵]. یو و همکاران کامپوزیت استایرن بوتادین حاوی پرکننده تنگستن را تهیه کردند. از بین درصدهای مختلف تنگستن استفاده شده، بهترین نمونه حاوی 85% تنگستن در ضخامت 2.7 cm با جذب 94% بوده است [۳۶]. در حالی که در این پروژه در ضخامت 1.2 cm ، میزان جذب حدود 94% به دست آمده است.

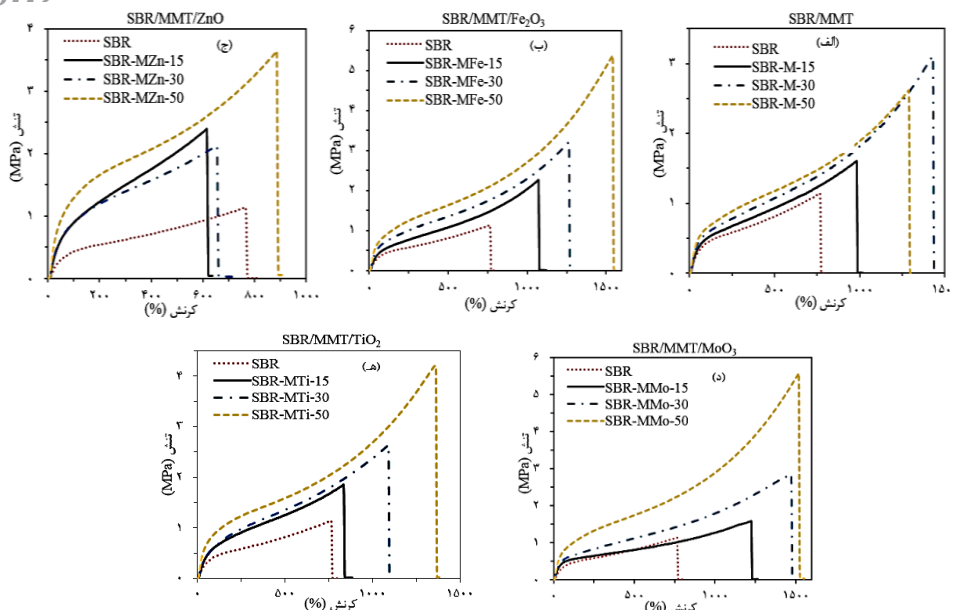


شکل ۵. تصاویر SEM برای نمونه‌های الف) SBR خالص، ب) SBR-M-۳۰، ج) SBR-MFe-۳۰، د) SBR-MZn-۳۰، ه) SBR-MMo-۳۰، و و) SBR-MTi-۳۰.

۴.۳ بررسی خواص مکانیکی کامپوزیت‌های تهیه شده

کامپوزیت‌های محافظ پرتو به منظور جلوگیری از نفوذ این پرتوها به بدن افراد و محیط پیرامون باید از استحکام و مقاومت خوبی برخوردار باشند؛ زیرا در صورت ایجاد خراش و پارگی در آن‌ها امکان جذب پرتوهای خطرناک توسط افراد و محیط به وجود می‌آید و این پدیده می‌تواند اثرات جبران‌ناپذیری را بر روی سلامت بدن و محیط زیست ایجاد کند [۳۱]. به همین دلیل، میزان استحکام و مقاومت در برابر پارگی و کشش در این کامپوزیت‌ها از اهمیت خاصی برخوردار است.

نمودار تنش-کرنش کامپوزیت‌های لاستیکی تهیه شده در شکل ۶ گزارش شده و اطلاعات مربوط به نمونه‌های مختلف در جدول ۴ خلاصه شده است. انتظار بر این است که با افزایش مقدار پرکننده مدول کششی، استحکام کششی و ازدیاد طول در نقطه شکست افزایش یابد در حالی که مقدار پرکننده مورد استفاده مهم بوده و از میزان درصد بهینه به بعد، موجب کاهش این کمیت‌ها می‌شود. اگر مقدار پرکننده‌های مورد استفاده زیاد باشد، موجب کلوخه‌شدن و افت خواص نهایی می‌شود که برای



شکل ۶. نمودار تنش- کرنش کامپوزیت‌های لاستیکی حاوی پرکننده‌های (الف) MMT، (ب) MMT/Fe₂O₃، (ج) MMT/ZnO، (د) MMT/MoO₃ و (ه) MMT/TiO₂.

جدول ۴. نتایج نمودار تنش- کرنش کامپوزیت‌های تهیه شده

SBR-MTi-50	SBR-MTi-30	SBR-MTi-15	SBR-MMo-50	SBR-MMo-30	SBR-MMo-15	SBR-MZn-50	SBR-MZn-30	SBR-MZn-15	SBR-MFe-50	SBR-MFe-30	SBR-MFe-15	SBR-M-50	SBR-M-30	SBR-M-15	SBR	کد نمونه
۱,۵۹	۱,۰۹	۱,۰۵	۱,۶۳	۱,۱۹	۱	۲,۲۱	۱,۵۳	۱,۴۹	۱,۵۴	۱,۲۷	۰,۹۴	۱,۱۸	۱,۰۷	۰,۸۸	۰,۷۸	مدول کششی (MPa) × ۱۰ ^{-۲}
۴,۲۱	۲,۶۳	۱,۸۵	۵,۵۸	۲,۸۵	۱,۵۶	۳,۶۴	۲,۱۲	۲,۳۹	۵,۳۷	۳,۲	۲,۲۷	۲,۶۲	۳,۱۱	۱,۶	۱,۱۴	استحکام کششی (MPa)
۱۳۶۳	۱۰۹۳	۸۳۵	۱۵۱۷	۱۴۷۱	۱۲۲۵	۸۸۴	۶۵۴	۶۱۴	۱۵۴۲	۱۲۶۲	۱۰۶۹	۱۲۸۶	۱۴۲۸	۹۸۳	۷۶۶	ازدیاد طول در نقطه شکست (%)

جدول ۵. ضرایب تضعیف خطی و پارامترهای HVL و TVL برای کامپوزیت‌های لاستیکی تهیه شده در انرژی‌های مختلف پرتوی گاما

TVL (mm)				HVL (mm)				ضریب تضعیف خطی (mm ⁻¹)				کد نمونه
Eu-۱۵۲				Eu-۱۵۲				Eu-۱۵۲				
۹۶۴ keV	۷۷۹ keV	۳۴۴ keV	۱۲۲ keV	۹۶۴ keV	۷۷۹ keV	۳۴۴ keV	۱۲۲ keV	۹۶۴ keV	۷۷۹ keV	۳۴۴ keV	۱۲۲ keV	
۲۰,۹۳	۱۹۱,۹	۱۵۳,۵	۱۰۴,۷	۶۳	۵۷,۸	۴۶,۲	۳۱,۵	۰,۱۱	۰,۱۲	۰,۱۵	۰,۲۲	SBR خالص
۲۰,۹۳	۲۵۵,۸	۱۵۳,۵	۸۸,۶	۶۳	۷۷	۴۶,۲	۲۶,۷	۰,۱۱	۰,۰۹	۰,۱۵	۰,۲۶	SBR-M-۱۵
۱۶۴,۵	۲۳۰,۳	۱۳۵,۴	۸۲,۲	۴۹,۵	۶۹,۳	۴۰,۸	۲۴,۸	۰,۱۴	۰,۱	۰,۱۷	۰,۲۸	SBR-M-۳۰
۱۴۳,۹	۱۷۷,۱	۱۲۷,۹	۷۶,۸	۴۳,۳	۵۳,۳	۳۸,۵	۲۳,۱	۰,۱۶	۰,۱۳	۰,۱۸	۰,۳	SBR-M-۵۰
۲۰,۹۳	۱۷۷,۱	۱۲۷,۹	۳۸,۴	۶۳	۵۳,۳	۳۸,۵	۱۱,۶	۰,۱۱	۰,۱۳	۰,۱۸	۰,۰۶	SBR-MFe-۱۵
۱۷۷,۱	۱۹۱,۹	۱۲۱,۲	۲۸,۸	۵۳,۳	۵۷,۸	۳۶,۵	۸,۷	۰,۱۳	۰,۱۲	۰,۱۹	۰,۰۸	SBR-MFe-۳۰
۱۴۳,۹	۱۶۴,۵	۹۲,۱	۲۰,۹	۴۳,۳	۴۹,۵	۲۷,۷	۶,۳	۰,۱۶	۰,۱۴	۰,۲۵	۰,۱۱	SBR-MFe-۵۰
۱۶۴,۵	۱۷۷,۱	۱۰۴,۷	۲۳,۰	۴۹,۵	۵۳,۳	۳۱,۵	۶,۹	۰,۱۴	۰,۱۳	۰,۲۲	۰,۱	SBR-MZn-۳۰
۱۴۳,۹	۱۳۵,۴	۷۴,۳	۱۲,۱	۴۳,۳	۴۰,۸	۲۲,۴	۳,۶	۰,۱۶	۰,۱۷	۰,۳۱	۰,۱۹	SBR-MZn-۵۰
۱۶۴,۵	۲۰,۹۳	۱۱۵,۱	۳۲,۹	۴۹,۵	۶۳	۳۴,۷	۹,۹	۰,۱۴	۰,۱۱	۰,۰۲	۰,۰۷	SBR-MMo-۱۵
۱۵۳,۵	۱۶۴,۵	۱۰۴,۷	۱۹,۲	۴۶,۲	۴۹,۵	۳۱,۵	۵,۸	۰,۱۵	۰,۱۴	۰,۲۲	۰,۱۲	SBR-MMo-۳۰
۱۲۷,۹	۱۴۳,۹	۶۷,۷	۶,۱	۳۸,۵	۴۳,۳	۲۰,۴	۱,۸	۰,۱۸	۰,۱۶	۰,۳۴	۰,۳۸	SBR-MMo-۵۰
۱۶۴,۵	۲۰,۹۳	۱۴۳,۹	۶۴,۰	۴۹,۵	۶۳	۴۳,۳	۱۹,۳	۰,۱۴	۰,۱۱	۰,۱۶	۰,۳۶	SBR-MTi-۱۵
۱۵۳,۵	۱۹۱,۹	۱۱۵,۱	۴۱,۹	۴۶,۲	۵۷,۸	۳۴,۷	۱۲,۶	۰,۱۵	۰,۱۲	۰,۰۲	۰,۰۵۵	SBR-MTi-۳۰
۱۴۳,۹	۱۵۳,۵	۱۰۰,۱	۲۵,۶	۴۳,۳	۴۶,۲	۳۰,۱	۷,۷	۰,۱۶	۰,۱۵	۰,۲۳	۰,۰۹	SBR-MTi-۵۰

جدول ۶: مقادیر درصد جذب پرتوهای گاما برای کامپوزیت‌های لاستیکی تهیه شده با ضخامت‌های مختلف در انرژی ۱۲۲ keV

کد نمونه	ضخامت لایه‌های محافظ (mm)							
	۰	۲	۴	۶	۸	۱۲	۱۶	۲۰
SBR خالص	۰	۳٫۷	۸٫۶	۱۲٫۷	۱۵٫۵	۲۱٫۷	۲۷٫۳	۳۳٫۲
SBR-M-۱۵	۰	۶٫۴	۱۰٫۵	۱۵٫۸	۱۸٫۴	۲۵٫۷	۳۱٫۷	۳۷٫۱
SBR-M-۳۰	۰	۵٫۵	۹٫۶	۱۵٫۵	۲۰٫۵	۲۸٫۳	۳۴٫۸	۴۰٫۶
SBR-M-۵۰	۰	۶٫۱	۱۲٫۲	۱۸٫۱	۲۲٫۳	۳۱٫۸	۳۸٫۶	۴۵٫۵
SBR-MFe-۱۵	۰	۹٫۶	۱۸٫۸	۲۶٫۷	۳۳٫۸	۴۵٫۸	۵۵٫۰	۶۲٫۱
SBR-MFe-۳۰	۰	۱۵٫۸	۲۸٫۲	۳۷٫۵	۴۷٫۲	۵۹٫۸	۶۹٫۷	۷۷٫۳
SBR-MFe-۵۰	۰	۱۹٫۷	۳۵٫۴	۴۷٫۷	۵۷٫۳	۷۱٫۰	۷۹٫۹	۸۵٫۸
SBR-MZn-۳۰	۰	۷٫۸	۲۵٫۰	۳۹٫۷	۵۰٫۸	۶۶٫۸	۷۷٫۰	۸۲٫۸
SBR-MZn-۵۰	۰	۳۲٫۴	۵۰٫۴	۶۳٫۷	۷۲٫۷	۸۲٫۶	۸۸٫۵	۹۰٫۸
SBR-MMo-۱۵	۰	۱۳٫۱	۲۳٫۶	۳۴٫۰	۴۱٫۰	۵۴٫۱	۶۴٫۵	۷۲٫۶
SBR-MMo-۳۰	۰	۱۸٫۴	۳۴٫۰	۴۷٫۲	۵۸٫۲	۷۲٫۳	۸۰٫۳	۸۵٫۴
SBR-MMo-۵۰	۰	۵۰٫۶	۷۳٫۱	۸۴٫۴	۸۹٫۸	۹۳٫۷	۹۶٫۳	۹۸٫۹
SBR-MTi-۱۵	۰	۸٫۴	۱۴٫۷	۲۰٫۰	۲۶٫۳	۳۵٫۴	۴۴٫۳	۵۱٫۸
SBR-MTi-۳۰	۰	۱۰٫۳	۲۰٫۳	۲۸٫۷	۳۷٫۱	۴۸٫۴	۵۶٫۹	۶۴٫۴
SBR-MTi-۵۰	۰	۱۶٫۲	۲۸٫۱	۳۸٫۷	۴۵٫۶	۵۸٫۳	۶۷٫۳	۷۳٫۷

$\langle \text{SBR/MMT} + \text{Fe}_2\text{O}_3 \rangle < \text{SBR/MMT} + \text{ZnO} < \text{SBR/MMT} + \text{MoO}_3$

$\text{SBR/MMT} + \text{TiO}_2$ می‌باشد.

کامپوزیت‌های حاوی خاک رس با اکسید مولیبدن را می‌توان به‌عنوان مواد جدید محافظ پرتو برای پرتو گاما استفاده کرد. این محصولات قابلیت استفاده در مراکز پژوهشی هسته‌ای یا در بخش‌های پزشکی هسته‌ای به‌عنوان مواد محافظ با ضخامت بسیار کم برای کاهش اثرات زیان‌بار پرتو بر انسان را داراست که موجب بهره‌وری بیشتر و مناسب این پرتو می‌گردد.

مراجع

1. P. Atashi, et al. *Efficient, flexible and lead-free composite based on room temperature vulcanizing silicone rubber/W/Bi₂O₃ for gamma ray shielding application*, *J. Mater. Sci.: Mater. Electron.*, **29**, 12306 (2018).
2. N. Tsoulfanidis, S. Landsberger, *Measurement and Detection of Radiation*, 4th edn. (CRC Press, Hoboken, 2015)
3. E.R. Atta, K. M. Zakaria, A. M. Madbouly, *Study on Polymer Clay Layered Nanocomposites As Shielding Materials for Ionizing Radiation*, *Int. J. Recent Sci. Res.*, **6**, 4263 (2015).
4. S. P. Shirmardi, et al. *High Energetic Gamma Attenuating from a Neutron Field Using a Lead Free Reinforced Composite*, *J. Nucl. Sci. Technol.*, **37**, 23 (2016).

۴. نتیجه‌گیری

این مطالعه موفق به تولید کامپوزیت‌های حفاظتی غیرسمی، بدون سرب، انعطاف‌پذیر و کم‌هزینه در مقابل پرتوهای گاما شده است. کامپوزیت‌های تهیه شده بر پایه SBR حاوی MMT، Fe_2O_3 ، ZnO ، MoO_3 و TiO_2 خواص حفاظتی، مکانیکی، حرارتی و مورفولوژی مناسبی را داراست که می‌توان جهت کاربردهای حفاظتی مختلف از آنها استفاده کرد. کامپوزیت‌های حاوی اکسید فلزی MoO_3 خواص حفاظتی بهتری را از خود به نمایش گذاشته است که نمونه‌ی SBR-MMo-50 دارای بالاترین خواص حفاظتی در مقابل پرتوی گاما در محدوده انرژی ۱۲۲-۹۶۴ keV (مقادیر کم HVL و TVL) نسبت به سایر کامپوزیت‌ها بود؛ میزان جذب این کامپوزیت در ضخامت ۸ mm حدود ۹۰٪ است که در مقایسه با دیگر کامپوزیت‌ها در این ضخامت جذب بسیار بالاتری داشته است و همچنین در ضخامت ۲۰ mm حدود ۹۹٪ جذب پرتو داشته است. توزیع مناسب پرکننده‌ها در ماتریس پلی‌مری موجب بهبود خواص حفاظتی این کامپوزیت‌ها شده است. کامپوزیت‌های $\text{SBR/MMT} + \text{TiO}_2$ و SBR/MMT در این محدوده انرژی، دارای بالاترین مقادیر HVL و TVL هستند. ضرایب تضعیف خطی کامپوزیت‌های لاستیکی تهیه شده حاوی اکسیدهای فلزی به ترتیب

5. Y. Yang, M. C. Gupta, K. L. Dudley, *Studies on electromagnetic interference shielding characteristics of metal nanoparticle- and carbon nanostructure-filled polymer composites in the Ku-band frequency*, *Micro Nano Lett.*, **2**, 85 (2007).
6. A. Hashim, I. R. Agool, K. J. Kadhim, *Novel of (polymer blend-Fe₃O₄) magnetic nanocomposites: preparation and characterization for thermal energy storage and release, gamma ray shielding, antibacterial activity and humidity sensors applications*, *J. Mater. Sci. Mater. Electron.*, **29**, 10369 (2018).
7. S.M. Badawy, A.A. Abd El-Latif, *Synthesis and characterizations of magnetite nanocomposite films for radiation shielding*, *Polym. Compos.*, **38**, 974 (2017).
8. M. R. Ambika, et al. *Preparation and characterisation of Isophthalic-Bi₂O₃ polymer composite gamma radiation shields*, *Radiat. Phys. Chem.*, **130**, 351 (2017).
9. N. Das, et al. *Electromagnetic interference shielding effectiveness of carbon black and carbon fibre filled EVA and NR based composites*, *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, **31**, 1069 (2000).
10. K. Yue, et al. *A new lead-free radiation shielding material for radiotherapy*, *Radiat. Prot. Dosim.*, **133**, 256 (2009).
11. M. Salimi, N. Ghal-Eh, E.A. Amirabadi, *Characterization of a new shielding rubber for use in neutron-gamma mixed fields*, *Nucl. Sci. Technol.*, **29**, 36 (2018).
12. M. Dejangah, et al. *X-ray attenuation and mechanical properties of tungsten-silicone rubber nanocomposites*, *Mater. Res. Express*, **6**, 85045 (2019).
13. A.K. Mheemeed, H.I. Hasan, F.M. Al-Jomaily, *Gamma-ray absorption using rubber-lead mixtures as radiation protection shields*, *J. Radioanal. Nucl. Chem.*, **291**, 653 (2012).
14. W. Huang, et al. *Preparation and characterization of γ -ray radiation shielding PbWO₄/EPDM composite*, *J. Radioanal. Nucl. Chem.*, **309**, 1097 (2016).
15. T.D. Sreeja, S.K.N. Kutty, *Cure Characteristics and Mechanical Properties of Natural Rubber- Short Nylon Fiber Composites*, *J. Elastom Plast.*, **33**, 225 (2001).
16. N. Noriman, et al. *Curing Characteristics and Mechanical and Morphological Properties of SBR/vNBR and SBR/rNBR Blends*, *Polym. Plast. Technol. Eng.*, **47**, 1016 (2008).
17. A. Chavooshi, et al. *Effect of Nanoclay and Microwave Thermal Treatment on Mechanical Properties of MDF Dust-PP Nanocomposite*, *Iran. J. Polym. Sci. Technol.*, **25**, 323 (2012).
18. H. Zhang, et al. *Study on flammability of montmorillonite/SBR nanocomposites*, *J. Appl. Polym. Sci.*, **97**, 844 (2005).
19. W. Kim, et al. *Styrene butadiene rubber-clay nanocomposites using a latex method: morphology and mechanical properties*, *Compos. Interfaces*, **14**, 409 (2007).
20. M. Tavakoli, et al. *NR/SBR/organoclay nanocomposites: Effects of molecular interactions upon the clay microstructure and mechano-dynamic properties*, *J. Appl. Polym. Sci.*, **123**, 1853 (2012).
21. R. M. Radwan, R. M. Mohamed, M.M. Abdel-Aziz, *Electrical Properties of Irradiated Rubber-Clay Composites Based on NBR and SBR*, *Adv. Polym. Technol.*, **32**, E198 (2013).
22. F. M. Uhl, et al. *Polymer Films Possessing Nanoreinforcements via Organically Modified Layered Silicate*, *Chem. Mater.*, **16**, 1135 (2004).
23. S. Obaid, D. Gaikwad, P. Pawar, *Determination of gamma ray shielding parameters of rocks and concrete*, *Radiat. Phys. Chem.*, **144**, 356 (2018).
24. S. M. Ivanov, et al. *Photons transport through ultra-high molecular weight polyethylene based composite containing tungsten and boron carbide fillers*, *J. Alloys Compd.*, **586**, S455 (2014).
25. L. V. Dubey, et al. *Synthesis of Flexible Polymeric Shielding Materials for Soft Gamma Rays: Physicomechanical and Attenuation Characteristics of Radiation Crosslinked Polydimethylsiloxane/Bi₂O₃ Composites*, *Polym. Compos.*, **16**, 101 (2014).
26. J. Kim, et al. *Nano-W dispersed gamma radiation shielding materials*, *Adv. Eng. Mater.*, **16**, 1083 (2014).
27. S. Chen, M. Bourham, A. Rabiei, *Novel light-weight materials for shielding gamma ray*, *Radiat. Phys. Chem.*, **96**, 27 (2014).
28. V. Harish, et al. *Preparation and characterization of lead monoxide filled unsaturated polyester based polymer composites for gamma radiation shielding applications*, *J. Appl. Polym. Sci.*, **112**, 1503 (2009).
29. M. Saiyad, N. Devashrayee, R. Mevada, *Study the Effect of Dispersion of Filler in Polymer Composite for Radiation Shielding*, *Polym. Compos.*, **35**, 1263 (2014).
30. K. Okuno, *Neutron shielding material based on colemanite and epoxy resin*, *Radiat. Prot. Dosim.*, **115**, 258 (2005).
31. H. Chai, et al. *Preparation and properties of novel, flexible, lead-free X-ray-shielding materials containing tungsten and bismuth(III) oxide*, *J. Appl. Polym. Sci.*, **133**, 43012 (2016).
32. J. Kim, S. Lee, C. Kim, *Comparison study on the effect of carbon nano materials for single-layer microwave absorbers in X-band*, *Compos. Sci. Technol.*, **68**, 2909 (2008).
33. H. Gargama, A. Thakur, S. Chaturvedi, *Polyvinylidene fluoride/nanocrystalline iron composite materials for EMI shielding and absorption applications*, *J. Alloys Compd.*, **654**, 209 (2016).
34. Y. Liu, et al. *EMI shielding performance of nanocomposites with MWCNTs, nanosized Fe₃O₄ and Fe*, *Compos. Part B Eng.*, **63**, 34 (2014).
35. S. Vinayasree, et al. *A microwave absorber based on strontium ferrite-carbon black-nitrile rubber for S and X-band applications*, *Compos. Sci. Technol.*, **82**, 69 (2013).
36. K. Yue, et al. *A new lead-free radiation shielding material for radiotherapy*, *Radiat. Prot. Dosim.*, **133**, 256 (2009).