

Comparative Analysis of Radiation Shielding Properties between Lead and Tetrafluoroethylene Propylene Reinforced with Sodium Bromide Salt

Enayatolah Yazdankish^{1,*}, Saeed Ghobadpouri²

1- Applied Chemistry Department, Faculty of Gas and Petroleum, Yasouj University, Gachsaran, Iran.

2- Mechanical Engineering Department, Yasouj University, P. O. Box: 75914-353, Yasouj, Iran.

Abstract

This research focuses on studying and investigating the properties of Tetrafluoroethylene Propylene reinforced with Sodium Bromide as a shielding material against high-energy X-ray and gamma radiation, and the results are compared with the properties of lead. The weight percentages of sodium bromide range from 10% to 50%. The mass attenuation coefficient, linear attenuation coefficient, effective atomic number, and effective electron density per gram of material were calculated using PSD software. Although the radiation attenuation properties of the polymer were weaker compared to lead, it can still be used in many conditions where lead is unsuitable. The findings indicate that the mass and linear attenuation coefficients are higher for low-energy photons, and the composites reinforced with higher percentages of sodium bromide exhibit higher values of these coefficients. The contribution of Compton scattering remains almost constant throughout the energy range, while the photoelectric effect dominates at low energies and pair production becomes increasingly dominant at higher energies. As the weight percentage of sodium bromide in the composite increases, the required thickness to halve the radiation intensity decreases. This makes composites with higher weight percentages of sodium bromide more efficient in radiation attenuation. The effective atomic number is also higher for composites with higher weight percentages of sodium bromide, indicating greater effectiveness in reducing radiation. Overall, Tetrafluoroethylene Propylene reinforced with Sodium Bromide shows promise as a material for radiation protection applications.

Keywords

Mass attenuation coefficient, Radiation protection, Tetrafluoroethylene propylene

Article history:

Received: 01-01-2024

Accepted: 24-02-2024

Corresponding author:

enayat.yazdankish@gmail.com

*

تجزیه و تحلیل مقایسه‌ای خواص محافظ تابش بین سرب و تترافلورواتیلن پروپیلن تقویت شده با نمک برومید سدیم

عنایت‌اله یزدان کیش^{۱*}، سعید قبادپوری^۲

۱- گروه شیمی کاربردی، دانشکده نفت و گاز، دانشگاه یاسوج، صندوق پستی: ۷۵۸۱۳-۵۶۰۰۱، گجساران، ایران

۲- گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه یاسوج، صندوق پستی: ۷۵۹۱۴-۳۵۳، یاسوج، ایران

این پژوهش به مطالعه و بررسی خواص تترافلورواتیلن پروپیلن تقویت شده با برومید سدیم به عنوان محافظ در برابر تابش-های پرنرژی ایکس و گاما پرداخته و نتایج با خصوصیات فلز سرب مقایسه شده است. درصدهای وزنی برومید سدیم که استفاده شده‌اند در پنج دسته از ۱۰٪ تا ۵۰٪ وزن متغیر است. ضریب تضعیف جرمی، ضریب تضعیف خطی، عدد اتمی مؤثر و چگالی الکترونی مؤثر در هر گرم ماده با استفاده از نرم‌افزار PSD محاسبه شدند. اگر چه خصوصیات تضعیف تابش پلیمر در نظر گرفته شده نسبت به سرب ضعیف‌تر بودند اما در بسیاری از شرایط که امکان استفاده از سرب نامناسب است می‌توان از این پلیمر استفاده کرد. نتایج نشان می‌دهند که مقادیر ضریب تضعیف جرمی و ضریب تضعیف خطی برای فوتون‌های کم انرژی بیشتر است و کامپوزیت‌های تقویت‌شده با درصد‌های بالاتر برومید سدیم، ضریب تضعیف جرمی و ضریب تضعیف خطی بالاتری را نشان می‌دهند. سهم پراکندگی کامپتون در سراسر محدوده انرژی تقریباً ثابت باقی ماند، در حالی که اثر فوتوالکتریک در انرژی‌های پایین غالب است و برهمکنش تولید زوج در انرژی‌های بالا به طور فزاینده‌ای غالب شد. با افزایش درصد وزنی برومید سدیم در کامپوزیت، ضخامت لایه مورد نیاز که شدت تابش را به نصف برساند، کاهش می‌یابد. این امر باعث می‌شود کامپوزیت‌هایی با درصد وزنی بالاتر برومید سدیم در تضعیف تشعشع کارآمدتر باشند. عدد اتمی مؤثر نیز برای کامپوزیت‌هایی با درصد وزنی بیشتر از برومید سدیم بالاتر بود، که نشان می‌دهد آنها در کاهش تشعشع مؤثرتر هستند. به طور کلی، تترافلورواتیلن پروپیلن تقویت شده با برومید سدیم، به عنوان ماده‌ای برای کاربردهای محافظت در برابر تشعشعات، امیدوار کننده است.

چکیده

تاریخ دریافت:

۱۴۰۲/۱۰/۱۱

تاریخ پذیرش:

۱۴۰۲/۱۲/۰۵

ضریب تضعیف جرمی، محافظت در برابر تابش، تترافلورواتیلن پروپیلن

واژگان کلیدی

۱- مقدمه

حفاظت در برابر تابش در موقعیت‌های مختلف، از جمله در پزشکی، فضاوردی، راکتورهای هسته‌ای و آزمایشگاه‌های تحقیقاتی بسیار مهم است. در بخش پزشکی، پرتودهی ممکن است برای بیماران و حتی کارکنان مضر باشد [۱]. برای حفاظت در برابر تابش در این موارد، پزشکان و دیگر کارکنان باید از وسایل حفاظتی مانند لباس‌های پرتودهی، عینک‌های پرتودهی و دستکش‌های پرتودهی استفاده کنند. در فضاوردی، افراد باید در برابر تابش‌های کیهانی و ناشی از پرتودهی خورشید محافظت شوند. در این موارد، کابین فضایی باید با موادی که تابش را جذب می‌کنند، پوشیده شوند و سیستم‌های حفاظتی برای کاهش تابش باید در کابین نصب شوند. در صنایع مرتبط با انرژی هسته‌ای، مانند نیروگاه‌های هسته‌ای و راکتورهای هسته‌ای، کارکنان باید در برابر تابش‌های ناشی از مواد هسته‌ای محافظت شوند. در آزمایشگاه‌های تحقیقاتی نیز، محققان باید در برابر تابش ناشی از دستگاه‌های لیزری و پرتودهی محافظت شوند. در کل، حفاظت در برابر تابش در هر موقعیتی که تابشی وجود داشته باشد، بسیار مهم است و برای این منظور، وسایل حفاظتی مناسب باید استفاده شود. در تمامی موارد یاد شده، استفاده از وسایل حفاظتی مناسب می‌تواند از آسیب دیدن کارکنان و افراد در معرض تابش، جلوگیری کند. به طور سنتی از موادی مانند بتن و سرب برای حفاظت در برابر پرتو استفاده می‌شود، اما اینها محدودیت‌ها و معایبی دارند. به عنوان مثال، بتن مستعد ترک خوردگی و از دست دادن رطوبت است که می‌تواند باعث کاهش راندمان جذب تابش و افزایش نشت آن شود. سرب سنگین و سمی است، نقطه ذوب پایینی دارد و با قرار گرفتن طولانی مدت در برابر تابش، به دلیل گرمای تولید شده و یا ترک خوردن، تابش از آن نشت می‌کند و همچنین اثرات نامطلوب بر روی محیط زیست دارد. در سال‌های اخیر، تحقیقاتی برای بررسی اثربخشی سایر مواد برای محافظت در برابر تابش انجام شده است، که به عنوان مثال می‌توان از بتن اصلاح‌شده، پلیمرها، مواد کامپوزیت، شیشه‌ها، آلیاژهای فلزی، فولاد ضد زنگ و سرامیک‌ها نام برد. این مواد از نظر مناسب بودن به عنوان مواد محافظ در کاربردهای مختلف مورد ارزیابی قرار گرفته‌اند [۲-۵]. مواد محافظ ایده‌آل باید اثربخشی بالایی داشته باشند، مقرون به صرفه، به راحتی در دسترس و کار با آنها آسان باشد به همین دلیل، برخی از کشورها، استفاده از سرب در وسایل حفاظتی را در برخی موارد محدود کرده‌اند و در جستجوی جایگزین‌هایی با ویژگی‌های بهتر هستند. پلیمرها به عنوان جایگزینی برای سرب می‌توانند در وسایل حفاظت در برابر تابش به کار روند. این مواد به دلیل ویژگی‌هایی مانند سبکی،

انعطاف‌پذیری، مقاومت بالا در برابر شکنندگی، قیمت به صرفه‌تر از سرب و اثرات زیست محیطی بهتر، جایگزینی مناسب برای سرب به شمار می‌روند [۶-۱۰].

تترافلورواتیلن پروپیلن که با نام TFE/P نیز شناخته می‌شود، فلوروپلیمری است که خواص و ویژگی‌های برجسته و بسیار خوبی دارد. TFE/P مقاومت شیمیایی استثنایی در برابر طیف گسترده‌ای از مواد شیمیایی نظیر اسیدها، آمین‌ها و بخار آب، مقاومت در برابر دمای بالا و تابش فرابنفش و ضریب اصطکاک پایین را نشان می‌دهد. همچنین دارای خواص عایق الکتریکی عالی است و می‌تواند در برابر قرار گرفتن در معرض محیط‌های شدید مانند محیط‌هایی که در صنایع هوا فضا و نیمه هادی‌ها یافت می‌شود مقاومت کند. TFE/P همچنین در برابر اشعه ماوراء بنفش و هوا بسیار مقاوم است و آن را به ماده‌ای بادوام و طولانی مدت برای کاربردهای خارج از منزل تبدیل می‌کند. علاوه بر این، TFE/P نجسب است و آن را برای استفاده در کاربردهایی که چسبندگی یک نگرانی است، مانند صنایع فرآوری مواد غذایی و بسته بندی، ایده آل می‌کند. در صنایع پزشکی و هسته‌ای، مناسب برای استفاده در یک طیف گسترده از برنامه‌ها است [۱۱، ۱۲]. TFE/P به دلیل وزن مولکولی بالا و دیگر ویژگی‌های استثنایی و چند منظوره‌ای که دارد، یک گزینه عالی برای حفاظت در برابر تابش است. تابش شامل نوترون، پروتون، الکترون و ذرات سنگین‌تر است. تابش ذرات پرانرژی در ماده از میرایی بیشتری نسبت به امواج الکترومغناطیسی ایکس و گاما باشد. شدت تابش ذرات پرانرژی در ماده از میرایی بیشتری نسبت به امواج الکترومغناطیسی ایکس و گاما برخوردار است. بنابراین مقدار ماده بیشتری باید در سر راه امواج الکترومغناطیسی قرار گیرد تا برای انسان و یا بافت زنده بی‌ضرر باشد. شدت امواج الکترومغناطیسی معمولاً از طریق پراکنش رایلی، اثر فوتوالکتریک، اثر کامپتون و برهمکنش تولید زوج کاهش می‌یابد. تابش ذرات باردار عمدتاً از طریق نیروی کولونی میرا می‌شوند ولی علاوه بر آن نوکلئون‌ها از طریق نیروی هسته‌ای نیز جذب شده یا انرژی از دست می‌دهند. نوترون فقط برهمکنش هسته‌ای دارد.

برهمکنش تابش‌های X و گاما با ماده، پدیده‌ای کوانتومی است و عمدتاً از طریق اثر فوتوالکتریک، پراکندگی کامپتون و تولید زوج صورت می‌گیرد [۱۸-۱۳]. برای اینکه برهمکنش پلیمر با تابش بیشتر شود پلیمر را با عناصر سنگین مانند تنگستن، آهن، مس، کبالت و غیره تقویت می‌کنند. این تقویت سازی باعث می‌شود که ضریب میرایی پلیمر بالاتر رفته تا بتواند در ضخامت کمتر شدت تابش را به حدی کاهش دهد که برای بافت زنده و به خصوص انسان بی‌ضرر باشد. علاوه بر عناصر از ترکیب‌های شیمیایی

تقویت کرد تا به ویژگی‌های مورد نیاز اضافه شود. پراکنش رایلی یکی از انواع برخورد فوتون با ماده است که در آن فوتون انرژی از دست نمی‌دهد. وقتی که سایز و اندازه ذره‌ای که در مسیر تابش فوتون قرار گرفته کوچک‌تر از یک‌دهم طول موج فوتون تابشی باشد، فوتون بدون اینکه انرژی از دست دهد از مسیر خود منحرف می‌شود. بسیاری از پدیده‌ها توسط پراکنش رایلی توضیح داده می‌شود که یکی از شناخته‌شده‌ترین آن‌ها، توضیح رنگ آبی آسمان است. همانطور که گفته شد، اعتبار پراکنش رایلی به نسبت سایز ذره و طول موج تابش وابسته است و معمولاً با رابطه $x = 2\pi r/\lambda$ بیان می‌گردد. در اینجا λ طول موج فوتون و r شعاع ذره است.

اثر فوتوالکتریک پدیده فیزیکی است که در آن فوتون تابشی به فلز توسط الکترون‌های سطحی آن جذب شده و در نتیجه الکترون، فلز را ترک می‌کند. به منظور کندن الکترون از سطح فلز، انرژی فوتون تابشی باید بر انرژی بستگی الکترون غلبه کند تا بتواند آن را از سطح ماده جدا کند. بنابراین انرژی آستانه فوتوالکتریک، که برابر با انرژی بستگی الکترون است، حداقل انرژی مورد نیاز پدیده فوتوالکتریک است. در انرژی‌های کم که در آن انرژی فوتون فرودی کمتر از ۰٫۹ انرژی حالت سکون الکترون است، سطح مقطع فوتوالکتریک با رابطه ساده شده زیر تقریب زده می‌شود [۲۲].

$$\sigma_{ph} \approx 3 \times 10^{12} \frac{Z^4}{E^{3.5}} \quad (1)$$

در این رابطه σ_{ph} سطح مقطع فوتوالکتریک، Z عدد اتمی هسته اتم و E انرژی فوتون فرودی است.

اثر کامپتون برهمکنش اساسی بین فوتون‌ها و الکترون‌هاست. در این برهمکنش، معمولاً فوتونی پرا انرژی با الکترونی از بیرونی‌ترین لایه الکترونی اتم برخورد کرده، که باعث جدا شدن الکترون از هسته و تغییر مسیر فوتون ورودی می‌شود. در این برخورد، اتم هدف پس زده می‌شود و فوتون بازتابش شده دارای انرژی کمتری نسبت به فوتون تابشی است. تفاوت انرژی بین فوتون تابشی و بازتابشی (با نادیده گرفتن انرژی اتم پس‌زده شده) تقریباً برابر با انرژی جنبشی و انرژی بستگی الکترون کنده شده است. این یک فرآیند بسیار مهم در طیف‌سنجی پرتو ایکس و پرتو گاما است، زیرا تعیین انرژی و جهت فوتون‌های پراکنده را امکان‌پذیر می‌کند، که می‌تواند بینش‌های ارزشمندی در مورد خواص ماده مورد مطالعه ارائه دهد. در محدوده وسیعی از انرژی فوتون ورودی، (۰٫۲ MeV تا ۲ MeV) اثر کامپتون برهمکنش غالب است. اکثر تجهیزات رادیولوژی پزشکی در این محدوده انرژی کار می‌کنند [۲۳].

نیز می‌توان برای تقویت سازی پلیمر استفاده کرد. یکی از این ترکیب‌ها برومید سدیم است. برومید سدیم مفیدترین برومید معدنی در صنعت است. سدیم بروماید به عنوان خواب‌آور، ضد تشنج و آرام‌بخش در پزشکی استفاده می‌شود که در اواخر قرن نوزدهم و اوایل قرن بیستم به‌طور گسترده به عنوان یک ضد تشنج و آرام‌بخش استفاده می‌شد. در سال ۱۹۷۵، برومیدها به دلیل سمیت، از داروها در ایالات متحده حذف شدند [۱۹، ۲۰].

ضریب تضعیف جرمی یک کمیت فیزیکی و خصوصیتی از ماده است که توصیف می‌کند که یک مقدار ماده به چه میزان شدت پرتوهای الکترومغناطیسی (مانند اشعه ایکس، پرتوهای گاما یا فوتون‌ها) را هنگام عبور از آن کاهش می‌دهد، که البته به نوع تابشی که از آن عبور می‌کند وابسته است. ضریب تضعیف خطی با حاصل ضرب ضریب تضعیف جرمی در چگالی ماده تعریف می‌شود. ضریب تضعیف خطی، به عنوان یکی از مهمترین خصوصیات مواد در حوزه حفاظت در برابر تابش مورد استفاده قرار می‌گیرد، زیرا به ما اجازه می‌دهد ضخامت مورد نیاز ماده را برای کاهش شدت تابش به سطح ایمن تعیین کنیم و معمولاً با واحدهای برعکس طول مانند cm^{-1} یا m^{-1} مشخص می‌شود. ضریب تضعیف جرمی بالاتر به معنای این است که ماده در کاهش شدت تابش بسیار موثرتر است [۲۱]. به طور خلاصه، ضریب کاهش تابش یک خصوصیت حیاتی از مواد استفاده شده در حفاظت در برابر تابش است زیرا ضخامت مورد نیاز ماده را برای کاهش شدت تابش به سطح ایمن تعیین می‌کند. در فصل بعد تئوری و روابط مورد نیاز ارائه شده و در فصل سوم نتایج و بحث و بررسی راجع به نتایج بیان شده است.

۲- تئوری

تترافلورواتیلن پروپیلن (TFE/P) کوپلیمری است که از تترافلورواتیلن (TFE) و پروپیلن ساخته شده است. TFE/P مقاومت بسیار خوبی در برابر هوازدگی و طیف وسیعی از مواد شیمیایی از جمله اسید، باز و بخار دارد. یک انتخاب قابل اعتماد برای برنامه‌هایی که در محیط‌های سخت کار می‌کنند. کاربردها عبارتند از خنک کننده موتور خودرو، روغن موتور، برخی از مایعات ترمز و مایعات فرمان. از معایب آن می‌توان از مجموعه فشرده‌سازی بالا و مقاومت اکستروژن، به ویژه در دماهای بالا نام برد. حلقه‌های P/TFE سفت و سخت هستند و خاصیت ارتجاعی کمی دارند. اصطکاک کم باعث کاهش سایس می‌شود و در برابر بسیاری از مواد شیمیایی غیر قابل نفوذ است. علاوه بر قابلیت فشار بالا، محافظت خوبی در دمای بالا ارائه می‌دهد. P/TFE را می‌توان

قطعات کوچک‌تر می‌شود. در این فرایند، ذرات فرودی انرژی از دست می‌دهند و کند می‌شوند ولی ذرات جدا شده از هسته هدف و تابش‌های ساطع شده از آن ممکن است به مراتب انرژی و یا سرعت بیشتری داشته باشند. از آنجایی که شکافت هسته‌ای هدف منجر به تولید تشعشعات ثانویه می‌شود به حداقل رساندن شکافت هسته‌ای هدف تنها راه‌حل عملی برای توسعه مواد محافظ موثر است.

قانون بیر-لامبرت (معادله (۲)) با مقایسه شدت یک باریکه فرودی تک انرژی با باریکه خروجی که از ماده‌ای با ضخامت x عبور کرده است، برای تعیین ضریب تضعیف جرمی $(MAC = \mu/\rho)$ آن ماده استفاده می‌شود. علاوه بر MAC ، ضریب تضعیف خطی کل (μ) نیز برای درک بهتر نحوه تعامل تشعشع با مواد محاسبه می‌شود. مقدار ضریب تضعیف خطی کل با ضرب چگالی ماده در ضریب تضعیف جرم آن ماده به دست می‌آید و احتمال برهمکنش فوتون با ماده را هنگام عبور از آن نشان می‌دهد. این مقدار برای محاسبه سایر کمیت‌های مرتبط با تشعشع ضروری است. کمیت‌هایی مانند مقدار ضخامت ماده که شدت تابش را به نصف (HVL) یا یک-دهم (TVL) کاهش می‌دهد. یک باریکه موازی تک انرژی تابش ایکس و گاما در هنگام عبور از ماده طبق رابطه زیر میرا می‌شود [۲۵].

$$I = I_0 e^{-(\mu/\rho)\rho x} \quad (3)$$

در این رابطه I_0 و I به ترتیب شدت تابش ورودی و خروجی از ماده است، μ ضریب تضعیف خطی، ρ چگالی و x ضخامت ماده است. ضریب تضعیف جرمی برای هر ترکیب شیمیایی و یا مخلوطی از مواد با رابطه زیر داده می‌شود.

$$\mu_m = \left(\frac{\mu}{\rho}\right)_c = \sum_i w_i \left(\frac{\mu}{\rho}\right)_i \quad (4)$$

در این رابطه $(\mu_m)_i = (\mu/\rho)_i$ ضریب تضعیف جرمی آمین عنصر و $(\mu/\rho)_c$ ضریب تضعیف جرمی ترکیب و یا مخلوط است، w_i کسر جرمی عناصر داخل ترکیب شیمیایی یا مخلوط است که با رابطه زیر داده می‌شود.

$$w_i = \frac{a_i A_i}{\sum_j a_j A_j} \quad (5)$$

در اینجا A_i عدد جرمی و a_i تعداد عنصر مورد نظر در ترکیب شیمیایی است.

$$E_f = \frac{E_i}{1 + \frac{E_i}{m}(1 - \cos \theta)} \quad (2)$$

در اینجا E_i و E_f به ترتیب انرژی فوتون ورودی و فوتون پراکنده شده است، m جرم سکون الکترون و θ زاویه بین مسیر فوتون ورودی و مسیر فوتون پراکنده شده است.

تولید زوج یا جفت‌سازی فرایند ایجاد یک ذره ابتدایی و پادزاده‌اش از یک بوزون خنثی است. ساخته شدن یک جفت الکترون و پوزیترون، یک جفت موون و آنتی موون، یا یک جفت پروتون و آنتی پروتون نمونه‌هایی از واکنش تولید زوج هستند. در فیزیک ذرات، بوزون‌ها (Boson) ذره‌هایی با عدد اسپین غیر کسری هستند که از آمار بوز-اینشتین پیروی می‌کنند و بر اساس نام ساتیندرا بوز نام‌گذاری شده‌اند. در مقابل آن‌ها فرمیون‌ها با عدد اسپین نیم-درست هستند که از آمار فرمی-دیراک پیروی می‌کنند. فوتون شناخته شده‌ترین بوزون در بین جوامع علمی و غیر علمی است. تولید زوج معمولاً به یک فوتون که در مجاورت هسته‌ی یک اتم، جفت الکترون و پوزیترون می‌سازد نسبت داده می‌شود. هنگامی که یک فوتون با انرژی بالا به هسته اتم نزدیک می‌شود، می‌تواند به یک جفت الکترون و پوزیترون تبدیل شود، جایی که انرژی فوتون به جرم ذره، طبق معادله اینشتین، $E = mc^2$ ، تبدیل می‌شود. برهمکنش تولید زوج به طور معمول هنگامی می‌تواند به وقوع بپیوندد که انرژی فوتون ورودی بیش‌تر از انرژی سکون دو ذره تولید شده باشد. الکترون و پوزیترون دو ذره‌ای است که معمولاً در برهمکنش تولید زوج ایجاد می‌شوند. از آنجایی که جرم پوزیترون با جرم الکترون برابر است، بنابراین حداقل انرژی مورد نیاز برای وقوع برهمکنش تولید زوج، دو برابر جرم الکترون یعنی MeV 1.022 است. این انرژی متناظر طول‌موج 1.2132 پیکومتر برای فوتون تابشی است. تولید یک جفت الکترون و پوزیترون به حضور یک هسته نیاز دارد که به دلیل اصل پایداری تکانه خطی، تکانه اضافی را جذب کند [۲۴]. جفت ذره تولید شده در معرض برهمکنش‌های بیشتر با ماده است. تولید زوج فرآیندی حیاتی در فیزیک انرژی بالا، فیزیک هسته‌ای، اخترفیزیک و فیزیک پزشکی است، زیرا امکان تشخیص و مطالعه فوتون‌های پرانرژی را فراهم می‌کند و بینشی در مورد ساختار و ترکیب ماده ارائه می‌دهد و همچنین در اکثر موارد برهمکنش غالب در انرژی‌های بیش از $2 MeV$ است.

شکافت هسته‌ای یکی دیگر از برهمکنش‌های مهم بین ذرات پرتابه و مواد هدف است. شکافت هسته هدف، شامل تجزیه یون‌های سنگین هدف به ذرات باردار سبک‌تر و نوترون‌ها است. به عبارت دیگر، شکافت هسته‌ای یون‌های هدف منجر به تشکیل

1- Half Value Layer
2- Tenth Value Layer

مکانیکی مناسبی در برابر تابش است، به عنوان ماده پایه انتخاب کردیم و به منظور کارایی بهتر در برابر تابش، نوع تقویت شده با نمک سدیم برومید را در نظر گرفتیم. درصد سدیم برومید اضافه شده در پنج دسته‌ی ۱۰٪، ۲۰٪، ۳۰٪، ۴۰٪، ۵۰٪ انتخاب شد. چگالی کوپلیمر انتخاب شده برابر با 1.55 gr/cm^3 و برای سدیم برومید 3.21 gr/cm^3 در نظر گرفته شد. از طرف دیگر عنصر سرب، که پرکاربردترین ماده محافظ در برابر تابش است، را در نظر گرفتیم و خصوصیات مورد نظر آن را محاسبه و با مقادیر متناظر از TFE/P (تقویت شده با ۵۰٪ برومید سدیم) مقایسه کردیم. چگالی سرب برابر با 11.34 g/cm^3 انتخاب شد. برای محاسبه چگالی کوپلیمر تقویت شده از رابطه زیر استفاده کردیم.

$$\frac{1}{\rho} = \frac{w_p}{\rho_p} + \frac{w_s}{\rho_s} \quad (12)$$

در اینجا ρ ، ρ_p ، ρ_s ، w_p و w_s به ترتیب چگالی کامپوزیت، چگالی پلیمر، چگالی نمک سدیم برومید، درصد وزنی پلیمر و درصد وزنی نمک سدیم برومید است. با استفاده از این رابطه چگالی کامپوزیت‌های مختلف از ۱۰ درصد تا ۵۰ درصد را به ترتیب برابر با $1/6345$ ، $1/7288$ ، $1/8346$ ، $1/9542$ و $2/0905$ برحسب گرم بر سانتی‌متر مکعب محاسبه شدند. مشخصه کلیدی یک ماده محافظ تشعشع ضریب تضعیف جرم آن است که به سطح مقطع اثر فوتوالکتریک، پراکندگی کامپتون و بزه‌مکنش تولید زوج بستگی دارد. در این مقاله، ضریب تضعیف جرم با استفاده از نرم‌افزار PSD² محاسبه شده است [۲۵]. در جدول ۱، ضریب تضعیف جرم، ضریب تضعیف خطی، عدد اتمی مؤثر و چگالی مؤثر الکترون در هر گرم، بین سرب و تترافلورواتیلن پروپیلن تقویت شده با برومید سدیم نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهد که مقادیر MAC و LAC برای فوتون‌های کم انرژی در مقایسه با فوتون‌های پرانرژی برای هر دو ماده بالاتر است. همچنین مقادیر MAC و LAC فلز سرب چندین برابر مقادیر کامپوزیت تترافلورواتیلن پروپیلن است. در حالی که مقادیر عدد اتمی مؤثر و چگالی مؤثر الکترون، برای سرب ثابت است اما این پارامترها برای تترافلورواتیلن پروپیلن تقویت شده، با افزایش انرژی کاهش می‌یابند. در شکل ۱، ضریب تضعیف جرمی (MAC) برای دو ماده سرب و تترافلورواتیلن پروپیلن تقویت شده با برومید سدیم نشان داده شده است. اگر چه ضریب تضعیف جرمی برای سرب بیشتر است ولی در محدوده‌ای خیلی به هم نزدیک می‌شوند. شکستگی در نمودار ضریب تضعیف جرمی سرب ناشی از اثرات پوسته‌ای

عدد اتمی مؤثر (Z_{eff}) یک پارامتر مهم برای تعیین عنصر جایگزین برای یک ماده است. مرتبط با انرژی مورد نیاز است و با انرژی در نوسان است. شبیه عدد اتمی عناصر است و ترکیب مواد را بر اساس عناصر معادل توصیف می‌کند. عدد اتمی مؤثر از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$Z_{eff} = \frac{\sigma}{\sigma_e} \quad (6)$$

σ_e و σ_a به ترتیب سطح مقطع کل اتمی و الکترونیک نامیده می‌شوند که با دو رابطه زیر تعریف می‌شوند.

$$\sigma_a = \frac{1}{N_A} \sum_i f_i A_i (\mu_m)_i \quad (7)$$

$$\sigma_e = \frac{1}{N_A} \sum_i f_i A_i (\mu_m)_i \quad (8)$$

در اینجا N_A عدد آووگادرو، μ_m ضریب تضعیف جرمی ماده و f_i دلالت بر نسبت تعداد اتم نام به تعداد کل همه اتم‌های موجود در جاذب دارد و با رابطه زیر بیان می‌شود.

$$f_i = \frac{n_i}{\sum_j n_j} \quad (9)$$

چگالی مؤثر الکترون (N_{eff}) بر حسب تعداد الکترون در واحد جرم داده می‌شود و مطابق رابطه زیر به عدد اتمی مؤثر و میانگین جرم اتمی ماده $\langle A \rangle$ ، وابسته است.

$$N_{eff} = \frac{N_A}{\langle A \rangle} Z_{eff} \quad (10)$$

فاصله متوسط بین دو برخورد یا برهمکنش متوالی را مسیر پوشش آزاد میانگین فوتون (λ) می‌نامند، که می‌توان آن را با استفاده از مقدار ضریب تضعیف خطی به صورت $\lambda = 1/\mu$ محاسبه کرد. براندمان حفاظت در برابر تشعشع RPE¹ یک ماده کامپوزیتی با توانایی آن در کاهش تشعشعات یونیزان تعیین می‌شود و به شرح زیر تعیین می‌شود.

$$RPE = \left(1 - \frac{I}{I_0}\right) \times 100 \quad (11)$$

۳- نتایج، بحث و بررسی

کوپلیمر تترافلورواتیلن پروپیلن که دارای خواص فیزیکی و

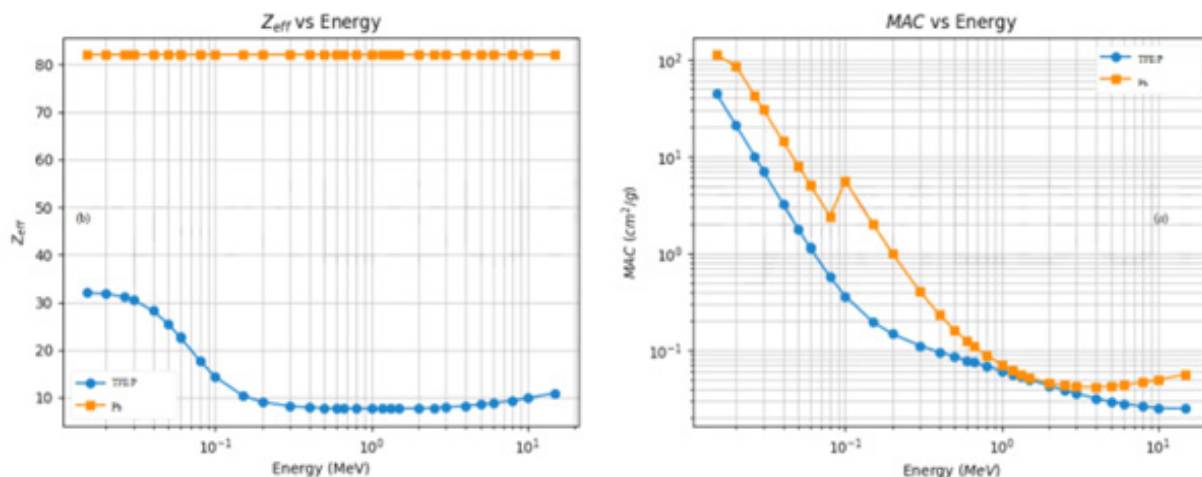
جدول ۱. مقایسه ضریب تضعیف جرمی MAC، ضریب تضعیف خطی LAC، عدد اتمی مؤثر Zeff، چگالو مؤثر الکترون Neff در هر گرم، بین سرب و تترافلوئورواتیلن پروپیلن تقویت شده با برومید سدیم ۵۰٪ جرمی.

Table 1. Comparison of mass attenuation coefficient MAC, linear attenuation coefficient LAC, effective atomic number Zeff, effective electron density per gram Neff, between lead and tetrafluoroethylene propylene reinforced with 50% sodium bromide.

Energy (MeV)	MAC(cm ² /g)		LAC(1/cm)		Zeff		Neff(×1023)	
	Na-Br(50%)	Pb	Na-Br(50%)	Pb	Na-Br(50%)	Pb	Na-Br(50%)	Pb
1.50E-02	44.7	112	93.5	1270	32.0196	82	12.0064	2.38
2.00E-02	21.1	86.4	44.0	985	31.8365	82	11.9378	2.38
3.00E-02	7.06	30.3	14.8	3.46	30.5103	82	11.4405	2.38
4.00E-02	3.24	14.4	6.77	164	28.2405	82	10.5894	2.38
6.00E-02	1.12	5.02	2.35	57.2	22.5997	82	8.4742	2.38
8.00E-02	0.569	2.42	1.19	27.6	17.7075	82	6.6398	2.38
1.00E-01	0.362	5.55	0.757	63.3	14.3781	82	5.3914	2.38
1.50E-01	0.196	2.02	0.410	23.0	10.4646	82	3.9239	2.38
2.00E-01	0.147	0.999	0.308	11.4	9.0978	82	3.4114	2.38
3.00E-01	0.112	0.4.03	0.233	4.60	8.2264	82	3.0847	2.38
4.00E-01	0.0958	0.2.32	0.200	2.65	7.9624	82	2.9857	2.38
6.00E-01	0.0787	0.1.25	0.165	1.42	7.7949	82	2.9228	2.38
8.00E-01	0.0685	0.0887	0.143	1.01	7.7398	82	2.9022	2.38
1.00E+00	0.0613	0.0710	0.128	0.810	7.7153	82	2.893	2.38
1.50E+00	0.0499	0.0522	0.104	0.595	7.7119	82	2.8918	2.38
2.00E+00	0.0432	0.0461	0.0903	0.525	7.7788	82	2.9168	2.38
3.00E+00	0.0358	0.0423	0.0749	0.483	8.0046	82	3.0015	2.38
4.00E+00	0.0319	0.0420	0.0667	0.479	8.2789	82	3.1044	2.38
6.00E+00	0.0280	0.0439	0.0585	0.501	8.8587	82	3.3218	2.38
8.00E+00	0.0263	0.0468	0.0550	0.533	9.4194	82	3.532	2.38
1.00E+01	0.0255	0.0497	0.0533	0.567	9.9317	82	3.7241	2.38
1.50E+01	0.0250	0.0566	0.0522	0.645	10.974	82	4.1149	2.38

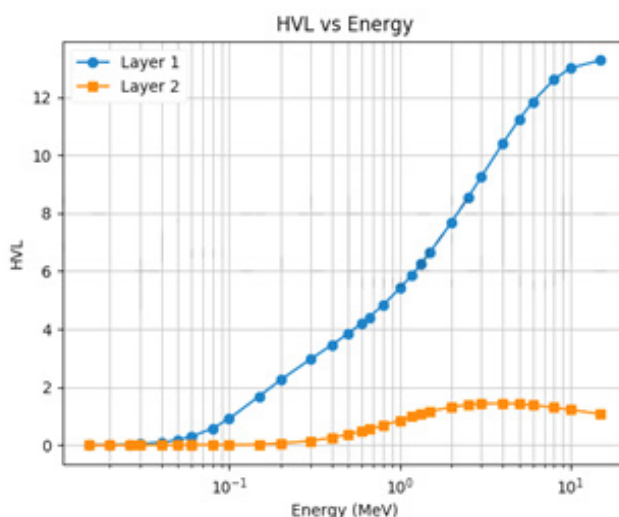
ماده که در طی عبور تابش از آن شدت تابش به نصف کاهش میابد (HVL) و ضخامتی از ماده که در طی عبور تابش از آن شدت تابش به یک-دهم کاهش می یابد (TVL). همانطور که از مقادیر می توان نتیجه گرفت، این پارامترها برای سرب به مراتب پایین تر است. در شکل ۲، برای مقایسه بهتر، مقادیر HVL برای دو ماده سرب و تترافلوئورواتیلن پروپیلن تقویت شده با برومید سدیم نسبت به

است. علاوه بر ضریب تضعیف جرمی، عدد اتمی مؤثر نیز برای این دو ماده رسم شده است. عدد اتمی مؤثر سرب ثابت است ولی برای تترافلوئورواتیلن پروپیلن وابسته به انرژی است. در جدول ۲، دو کمیت مهم در بحث حفاظت از تابش، برای هر دو ماده سرب و تترافلوئورواتیلن پروپیلن تقویت شده با برومید سدیم نشان داده شده است. این دو کمیت مهم عبارتند از: ضخامتی از



شکل ۱. تصویر (a) ضریب تضعیف جرمی (MAC) برای دو ماده سرب و تترافلوئورواتیلن پروپیلن تقویت شده با ۴۰٪ برومید سدیم. تصویر (b) عدد اتمی مؤثر را برای همان دو ماده نشان می دهد. عدد اتمی مؤثر سرب ثابت است ولی برای تترافلوئورواتیلن پروپیلن وابسته به انرژی است.

Figure 1. Part (a), mass attenuation coefficient (MAC) for lead and tetrafluoroethylene propylene reinforced with 40% sodium bromide. Part (b) shows the effective atomic number for the same two substances. The effective atomic number of lead is constant, but it is energy-dependent for tetrafluoroethylene propylene.



شکل ۲. HVL (ضخامتی از ماده که در طی عبور تابش از آن شدت تابش به نصف کاهش می یابد) برای دو ماده سرب و تترافلوئورواتیلن پروپیلن تقویت شده با برومید سدیم. در اینجا "layer 1" برای فلز سرب و "layer 2" برای تترافلوئورواتیلن پروپیلن تقویت شده با برومید سدیم به کار رفته است.

Figure 2. HVL (thickness of the material through which the intensity of radiation is reduced by half during the passage of radiation) for two materials lead and tetrafluoroethylene propylene reinforced with sodium bromide. Here "layer 1" is used for lead metal and "layer 2" is used for tetrafluoroethylene propylene reinforced with sodium bromide.

انرژی نشان داده شده است. این مقادیر برای سرب بیشتر است. در جدول ۳، دو پارامتر HVL و TVL برای پنج کامپوزیت مختلف از پلیمر تترافلوئورواتیلن پروپیلن که با درصدهای وزنی مختلفی از برومید سدیم با درصدهای ۱۰٪، ۲۰٪، ۳۰٪، ۴۰٪ و ۵۰٪ تقویت شده‌اند، نشان داده شده‌اند. همانطور که قابل مشاهده است، هر چه درصد وزنی برومید

جدول ۲. HVL (ضخامتی از ماده که در طی عبور تابش از آن شدت تابش به نصف کاهش می‌یابد) و TVL (ضخامتی از ماده که در طی عبور تابش از آن شدت تابش به یک-دهم کاهش می‌یابد) برای دو ماده سرب و تترافلوئورواتیلن پروپیلن تقویت شده با برومید سدیم (۵۰٪ جرمی) و مقایسه آن‌ها.

Table 2. HVL (thickness of the material through which the radiation intensity is reduced by half) and TVL (thickness of the material through which the radiation intensity is reduced to one-tenth) for lead and tetrafluoroethylene propylene reinforced with sodium bromide (50% by mass).

Energy (MeV)	HVL (cm)		TVL (cm)	
	Na-Br(50%)	Pb	Na-Br(50%)	Pb
1.50E-02	0.0074	0.0005	0.0246	0.0018
2.00E-02	0.0157	0.0007	0.0523	0.0023
3.00E-02	0.0469	0.002	0.1559	0.0067
4.00E-02	0.1024	0.0042	0.3403	0.0141
6.00E-02	0.2954	0.0121	0.9813	0.0402
8.00E-02	0.5824	0.0251	1.9347	0.0835
1.00E-01	0.9155	0.011	3.0412	0.0364
2.00E-01	2.251	0.0609	7.4777	0.2023
3.00E-01	2.969	0.1508	9.8629	0.5009
4.00E-01	3.4599	0.2617	11.4935	0.8695
6.00E-01	4.2136	0.4872	13.9973	1.6184
8.00E-01	4.8413	0.6855	16.0825	2.2771
1.00E+00	5.4076	0.8561	17.9638	2.844
1.50E+00	6.6489	1.1644	22.0873	3.8679
2.00E+00	7.6734	1.3198	25.4903	4.3842
3.00E+00	9.2535	1.4361	30.7393	4.7705
4.00E+00	10.3965	1.4484	34.5364	4.8114
6.00E+00	11.8427	1.3847	39.3406	4.5999
8.00E+00	12.6087	1.3006	41.8852	4.3205
1.00E+01	13.0027	1.2229	43.194	4.0624
1.50E+01	13.2686	1.0746	44.0775	3.5698

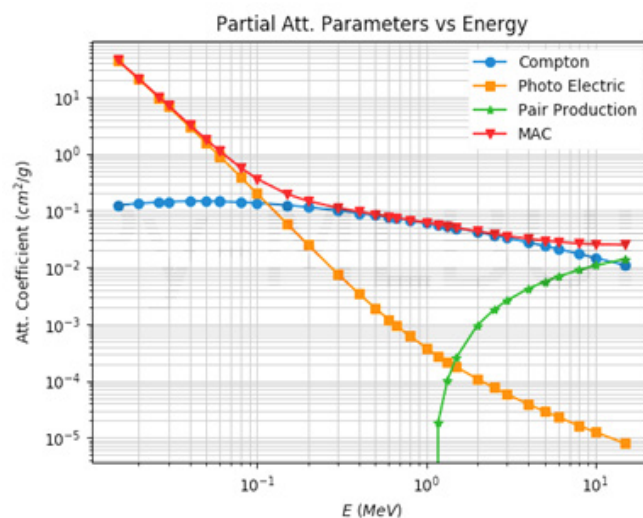
جدول ۳. HVL (صخاشتی از ماده که در طی عبور تابش از آن شدت تابش به نصف کاهش می‌یابد) و TVL (صخاشتی از ماده که در طی عبور تابش از آن شدت تابش به یک-دهم کاهش می‌یابد) برای پنج لایه مختلف از کامپوزیت تترافلوئورواتیلن پروپیلن تقویت شده با بروفید سدیم از ۱۰٪ تا ۵۰٪ جرمی و مقایسه آن‌ها با هم.

Table 3. HVL (thickness of the material through which the radiation intensity is reduced to half) and TVL (thickness of the material through which the radiation intensity is reduced to one-tenth) for five Different layers of tetrafluoroethylene propylene composite reinforced with sodium bromide from 10% to 50% by mass and their comparison.

Energy (MeV)	Na-Br (10%)		Na-Br (20%)		Na-Br (30%)		Na-Br (40%)		Na-Br (50%)	
	HVL (cm)	TVL (cm)	HVL (cm)	TVL (cm)	HVL (cm)	TVL (cm)	HVL (cm)	TVL (cm)	HVL (cm)	TVL (cm)
1.50E-02	0.041	0.1362	0.0212	0.0705	0.0137	0.0456	0.0098	0.0325	0.0074	0.0246
1.00E-01	2.1436	7.121	1.6808	5.5834	1.349	4.4812	1.1039	3.667	0.9149	3.0394
3.00E-01	3.8916	12.9276	3.6595	12.1565	3.4231	11.3713	3.196	10.6169	2.9689	9.8624
6.62E-01	5.4633	18.1488	5.2117	17.3129	4.9463	16.4311	4.6861	15.5668	4.4166	14.6716
8.00E-01	5.9626	19.8072	5.694	18.9152	5.4099	17.9714	5.1311	17.0453	4.8415	16.0831
1.17E+0	7.1844	23.866	6.8698	22.8209	6.5357	21.711	6.2074	20.6204	5.865	19.4833
1.33E+0	7.6692	25.4765	7.3328	24.359	6.9758	23.1731	6.6249	22.0073	6.2591	20.7923
1.50E+0	8.1556	27.0923	7.7959	25.8976	7.4145	24.6303	7.0396	23.3852	6.6492	22.0882
2.51E+0	10.6668	35.4343	10.1495	33.7159	9.6079	31.9168	9.0784	30.1579	8.5336	28.3481
5.00E+0	15.0546	50.0104	14.0742	46.7534	13.0925	43.4924	12.155	40.3779	11.2299	37.3048
8.00E+0	18.2721	60.6985	16.7308	55.5784	15.2586	50.6881	13.8958	46.1607	12.6064	41.8776
1.00E+1	19.6721	65.3493	17.798	59.1236	16.0532	53.3275	14.4674	48.0598	12.9997	43.184
1.50E+01	21.7402	72.2194	19.2179	63.8406	16.9786	56.4018	15.0142	49.876	13.2644	44.0633

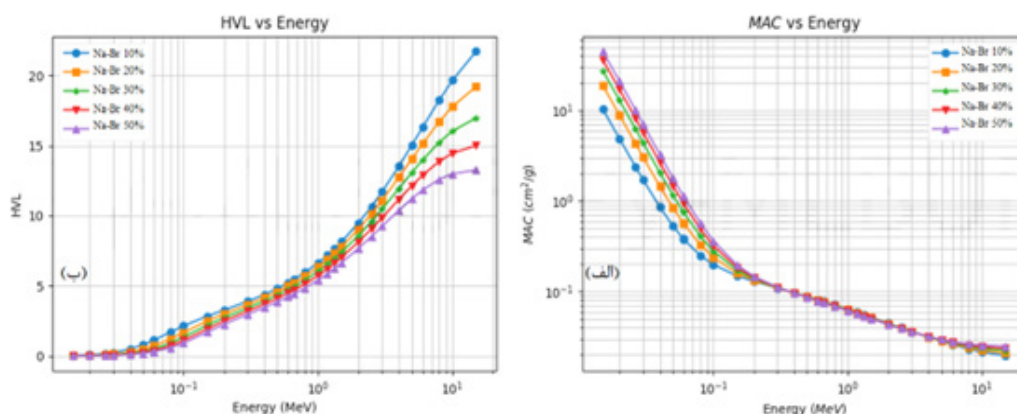
کامپوزیت‌های مختلف تقویت شده با آهن ترسیم شده است. MAC پارامتری از ماده است که نشان می‌دهد شدت پرتو تابش، در عبور از آن ماده، تا چه حد تضعیف یا کاهش می‌یابد. در این مورد، نمودار نشان می‌دهد که MAC با افزایش کسر وزنی برومید سدیم در کامپوزیت، افزایش می‌یابد. این بدان معنی است که در انرژی مشخص، کامپوزیت‌هایی با کسر وزنی برومید سدیم بالاتر، در کاهش تشعشعات بهتر خواهند بود. قسمت (ب) شکل ۴، لایه نیم شدت تابش (HVL) را نشان می‌دهد، که معیاری از ضخامت ماده مورد نیاز برای کاهش شدت پرتو تابش به نصف مقدار اولیه آن است. با افزایش درصد وزنی برومید سدیم در کامپوزیت، HVL کاهش می‌یابد. این بدان معناست که کامپوزیت‌هایی با درصد

سدیم افزایش یابد، این دو پارامتر کاهش خواهند یافت. تضعیف تابش ارتباط نزدیکی با سطح مقطع اثر فوتوالکتریک، پراکندگی کامپتون و تولید زوج دارد. در شکل ۳ این اثرات برای یک کامپوزیت ۵۰٪ تقویت شده با برومید سدیم رسم شده‌اند، که نشان می‌دهد اثر فوتوالکتریک در انرژی‌های پایین غالب است، در حالی که برهمکنش تولید زوج در انرژی‌های بالاتر از ۱.۰ MeV به طور فزاینده‌ای غالب می‌شود. در همین حال، سهم پراکندگی کامپتون تقریباً در سراسر محدوده انرژی ثابت می‌ماند، به طوری که در محدوده ۰.۱ تا ۱۰ MeV به برهمکنش غالب تبدیل می‌شود. در قسمت (الف) شکل ۴، ضرایب تضعیف جرم نسبت به انرژی برای



شکل ۳. ضریب تضعیف جرمی اثر فوتوالکتریک، پراکندگی کامپتون، تولید زوج و ضریب تضعیف کل تترافلوئورواتیلن پروپیلن تقویت شده با ۴۰٪ برومید سدیم.

Figure 3. Mass attenuation coefficient of photoelectric effect, Compton scattering, pair production and total attenuation coefficient of tetrafluoroethylene propylene reinforced with 40% sodium bromide.



شکل ۴. قسمت (الف) ضرایب تضعیف جرم نسبت به انرژی را برای کامپوزیت‌های مختلف تقویت شده با برومید سدیم نشان می‌دهد. MAC با کسر وزنی بالاتر برومید سدیم افزایش می‌یابد. قسمت (ب) HVL رسم شده را نشان می‌دهد که با افزایش کسر وزنی برومید سدیم کاهش می‌یابد.

Figure 4. Part (a) shows the mass-to-energy attenuation coefficients for various sodium bromide-reinforced composites, where MAC increases with higher sodium bromide weight fraction. Part (b) shows the plotted HVL, which decreases with increasing sodium bromide weight fraction.

۵- مراجع

- [1] Al-Sarray, E., et al., Radiation shielding properties of some composite panel. *Acta Physica Polonica A*, 2017. 132(3): p. 490-492.
- [2] Masoud, M., et al., An experimental investigation on the effects of barite/hematite on the radiation shielding properties of serpentine concretes. *Progress in Nuclear Energy*, 2020. 120: p. 103220.
- [3] BAYKAL, D.Ş., H.O. TEKİN, and R.B.Ç. MUTLU, An investigation on radiation shielding properties of borosilicate glass systems. *International Journal of Computational and Experimental Science and Engineering*, 2021. 7(2): p. 99-108.
- [4] Abbas, M.I., et al., Effect of Kaolin Clay and ZnO-Nanoparticles on the Radiation Shielding Properties of Epoxy Resin Composites. *Polymers*, 2022. 14(22): p. 4801.
- [5] Al-Buriah, M., E.M. Bakhsh, B. Tonguc, and S.B. Khan, Mechanical and radiation shielding properties of tellurite glasses doped with ZnO and NiO. *Ceramics International*, 2020. 46(11): p. 19078-19083.
- [6] Nagaraja, N., et al., Radiation shielding properties of silicon polymers. *Radiation Physics and Chemistry*, 2020. 171: p. 108723.
- [7] Azqhandi, M.H.A., M. Foroughi, and E. Yazdankish, A highly effective, recyclable, and novel host-guest nanocomposite for Triclosan removal: a comprehensive modeling and optimization-based adsorption study. *Journal of colloid and interface science*, 2019. 551: p. 195-207.
- [8] Keshavarz, M., M. Tabatabaee, M. Shahabi, and E. Yazdankish, A Sulfonated Phenanthroline Salt of Phosphotungstate as Novel Catalyst for the Efficient Synthesis of 3,3'-Diaryloxindoles. *Polycyclic Aromatic Compounds*, 2021. 41(2): p. 427-439.
- [9] Ghahramany, N., H. Sarafraza, and E. Yazdankish, Stability and mass parabola in integrated nuclear model. *Universal Journal of Physics and Application*, 2013. 1(1): p. 18-25.
- [10] More, C.V., et al., Polymeric composite materials for radiation shielding: a review. *Environmental chemistry letters*, 2021. 19: p. 2057-2090.
- [11] Kostov, G. and P. Chr. Petrov, Study of synthesis and properties of tetrafluoroethylene-propylene copolymers. *Journal of Polymer Science Part A: Polymer Chemistry*, 1992. 30(6): p. 1083-1088.
- [12] Sano, E., et al., Tetrafluoroethylene-propylene elastomer for fabrication of microfluidic organs-on-

وزنی بیشتر برومید سدیم به مواد کمتری نیاز دارند تا تابش را تا حد معینی کاهش دهند.

۴- نتیجه گیری

کوپلیمر تترافلوئورواتیلن پروپیلن که دارای خواص فیزیکی و مکانیکی مناسبی در برابر تابش است. کامپوزیت‌های مختلفی از این کوپلیمر که با نانو ذرات برمید سرب تقویت شده بودند، در نظر گرفته شدند. خصوصیات محافظ تابش آن‌ها محاسبه گردید و با خصوصیات عنصر سرب، پرکاربردترین ماده به عنوان محافظ تابش، مقایسه گردید. در برابر فوتون‌های با انرژی پایین‌تر، کوپلیمر تترافلوئورواتیلن پروپیلن کارایی بهتری از خود نشان می‌دهد و در برابر فوتون‌های با انرژی بالاتر کارایی ضعیف‌تری از خود نشان می‌دهد. علاوه بر این هر چه درصد وزنی برمید سدیم در کامپوزیت بیشتر باشد، کارایی آن بهتر است. اگر چه سرب در برابر تابش قدرت میرایی بهتری دارد ولی به دلیل دیگر خصوصیات پلیمرها از جمله انعطاف پذیری که قابلیت ساخت موادی همچون لباس، پیش‌بند، دستکش و غیره را می‌دهد، در بعضی کاربردها کارایی بهتری دارد.

chips resistant to drug absorption. *Micromachines*, 2019. 10(11): p. 793.

[13] Yazdankish, E., Solving of the Schrodinger equation analytically with an approximated scheme of the Woods–Saxon potential by the systematical method of Nikiforov–Uvarov. *International Journal of Modern Physics E*, 2020. 29(06): p. 2050032.

[14] Yazdankish, E., Calculation of the energy eigenvalues of the Yukawa potential via variation principle. *International Journal of Modern Physics E*, 2020. 29(09): p. 2050067.

[15] Yazdankish, E., Bound state solution of the Schrodinger equation for the Woods–Saxon potential plus coulomb interaction by Nikiforov–Uvarov and supersymmetric quantum mechanics methods. *International Journal of Modern Physics E*, 2021. 30(04): p. 2150023.

[16] Yazdankish, E., Investigation of the effect of nucleus temperature on proton decay half-lives of deformed nuclei using proximity potential. *Journal of Nuclear Science and Technology*, 2023. 102(1).

[17] Yazdankish, E., Analytical Bound-State solution of the Schrodinger equation for the morse potential within the Nikiforov-Uvarov method. *Mathematics and Computational Sciences*, 2021. 2(1): p. 61-70.

[18] Yazdankish, E., M. Foroughi, and M.H.A. Azghandi, Capture of I131 from medical-based wastewater using the highly effective and recyclable adsorbent of g-C3N4 assembled with Mg-Co-Al-layered double hydroxide. *Journal of hazardous materials*, 2020. 389: p. 122151.

[19] Sangster, B., et al., The influence of sodium bromide in man: a study in human volunteers with special emphasis on the endocrine and the central nervous system. *Food and Chemical Toxicology*, 1983. 21(4): p. 409-419.

[20] Van Leeuwen, F., R. Hanemaaijer, and J. Loeber. The effect of sodium bromide on thyroid function. in *The Target Organ and the Toxic Process: Proceedings of the European Society of Toxicology Meeting Held in Strasbourg, September 17–19, 1987*. 1988. Springer.

[21] Al-Buriah, M.S., H. Arslan, and B.T. Tonguç, Mass attenuation coefficients, water and tissue equivalence properties of some tissues by Geant4, XCOM and experimental data. *Indian Journal of Pure & Applied Physics (IJPAP)*, 2019. 57(6): p. 433-437.

[22] Qian, W., On the Physical Process and Essence of the Photoelectric Effect. *Journal of Applied Mathematics and Physics*, 2023. 11(6): p. 1580-1597.

[23] Roshani, M., et al., Proposing a gamma radiation based intelligent system for simultane-

ous analyzing and detecting type and amount of petroleum by-products. *Nuclear Engineering and Technology*, 2021. 53(4): p. 1277-1283.

[24] Wang, L., B. Wu, and B. Xie, Electron-positron pair production in an oscillating Sauter potential. *Physical Review A*, 2019. 100(2): p. 022127.

[25] Şakar, E., et al., Phy-X/PSD: development of a user friendly online software for calculation of parameters relevant to radiation shielding and dosimetry. *Radiation Physics and Chemistry*, 2020. 166: p. 108496.