DOI: 10.48305/jims.v40.i691.0832

مجله دانشکده پزشکی اصفهان | سال چهلم/شماره‌ی ۶۹۱/هفته‌ی سوم آذر ۱۴۰۱

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۵/۲۹ | تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۷/۲۶ | تاریخ چاپ: ۱۴۰۱/۹/۲۱

کاربرد مواد جایگزین سرب در حفاظ‌های بکار رفته برای تضعیف پرتوهای ایکس و گاما در محدوده‌ی انرژی‌های رادیولوژی تشخیصی: مقاله‌ی مروری

آرش صفری[۱،۳]، سید محمد جواد مرتضوی[۲،۳]، پویا سرائی[۴]

مقاله مروری

چکیده

سرب، پرکاربردترین ماده برای ساخت حفاظ‌های پرتویی در بخش‌های رادیولوژی تشخیصی می‌باشد، زیرا توانایی آن در تضعیف پرتوهای ایکس به دلیل عدد اتمی و چگالی بالا نسبت به سایر مواد برتر بوده و از لحاظ اقتصادی مقرون به صرفه‌تر می‌باشد. از طرفی، حفاظ‌های سربی معایب جدی مانند سمیت و وزن بالا، انعطاف‌پذیری و پایداری کمی دارند. لذا لزوم استفاده از حفاظ‌های عاری از سرب، توسط محققین در سال‌های اخیر به طور جدی مطرح شده است. هدف از این مطالعه، مروری بر مواد و ترکیبات جایگزین سرب در محافظ‌های پرتویی و همچنین میزان اثربخشی آن‌ها در رفع محدودیت‌های حفاظ‌های سربی رایج می‌باشد. در بین جستجوهای صورت گرفته در پایگاه‌های داده‌ای از قبیل Google Scholar, Web of Science, Medline, Scopus و Embase با کلید واژه‌های حفاظت در برابر اشعه، حفاظ‌های غیرسربی، پرتونگاری تشخیصی، در مجموع ۸۳ مقاله مورد مطالعه قرار گرفت. با توجه به طیف گسترده‌ی مواد قابل استفاده در حفاظ‌های پرتویی، نتایج نشان می‌دهند علاوه بر عدد اتمی، سایز ذرات نیز می‌تواند در افزایش قابلیت حفاظ‌ها مؤثر واقع شود تا جایی که ترکیبات پیشنهاد شده در سایز نانو بازده تضعیف پرتوی بیشتری داشتند. همچنین در مقایسه با حفاظ‌های تک ماده و یا ترکیب‌های پلیمری رایج، کامپوزیت‌های پلیمری چند لایه، احتمال نفوذ اشعه‌ی ایکس را به طور مؤثرتری کاهش داده‌اند. تحقیقات برای یافتن مواد جایگزین سرب و بهینه‌سازی حفاظ‌های پرتویی همچنان ادامه دارد زیرا دستیابی به حفاظ سبک، منعطف، ارزان و با قابلیت تضعیف بالا در کل طیف انرژی‌های تشخیصی دشوار می‌باشد.

واژگان کلیدی: حفاظت در برابر اشعه؛ حفاظ‌های غیرسربی؛ پرتونگاری تشخیصی

ارجاع: صفری آرش، مرتضوی سید محمد جواد، سرائی پویا. **کاربرد مواد جایگزین سرب در حفاظ‌های بکار رفته برای تضعیف پرتوهای ایکس و گاما در محدوده‌ی انرژی‌های رادیولوژی تشخیصی: مقاله‌ی مروری.** مجله دانشکده پزشکی اصفهان ۱۴۰۱؛ ۴۰ (۶۹۱): ۸۴۲-۸۳۲

مقدمه

با کشف پرتو ایکس از آن‌جایی که این پرتوها انرژی کافی برای نفوذ به عمق مواد را دارند، در امر تشخیص و درمان، بسیار مورد توجه قرار گرفتند. از طرفی با افزایش کاربردهای پرتو ایکس به خصوص در علوم پزشکی، خطرات و آسیب های ناشی از پرتوگیری‌های بیش از حد افراد به تدریج مورد تحقیق و بررسی قرار گرفت (۱). بنابراین سازمان‌های ملی و بین‌المللی مسؤول حفاظت پرتویی تأسیس شدند تا با ارائه‌ی توصیه‌ها و تعیین حدود دوزهای مجاز برای پرسنل و سایر افراد جامعه، از پرتوگیری‌های غیرضروری، ناخواسته و بیش از حد افراد به ویژه پرتوکاران، جلوگیری کرده و اثرات زیانبار پرتو را کاهش دهند. سه اصل مهم در حفاظت پرتویی شامل: کاهش زمان قرارگیری در معرض پرتو، افزایش فاصله از منبع پرتویی تا حد امکان و در برخی موارد ساده‌ترین راه قرار دادن یک حفاظ پرتویی بین منبع تولید پرتو و فرد است (۲). حفاظ‌های پرتویی مؤثر منجر به تضعیف پرتویی بسیار بالایی حتی در فاصله‌های کوتاه از منبع تشعشع می‌گردد و در مواجهه‌های طولانی‌مدت در برابر پرتوهای یونیزان از پرتوکاران، بیماران و سایر افراد مرتبط با پرتو محافظت می‌نماید (۳، ٤).

سرب، همواره به عنوان یک انتخاب رایج و سنتی برای حفاظ‌گذاری (Shielding) مطرح بوده است (۵-۸). عدد اتمی و

۱- استادیار، گروه رادیولوژی، دانشکده‌ی پیراپزشکی، دانشگاه علوم پزشکی شیراز، شیراز، ایران

۲- استاد، گروه فیزیک و مهندسی پزشکی، دانشکده‌ی پزشکی، دانشگاه علوم پزشکی شیراز، شیراز، ایران

۳- عضو هیأت علمی مرکز تحقیقات حفاظت در برابر پرتوهای یون‌ساز و غیر یون‌ساز، دانشکده‌ی پیراپزشکی، دانشگاه علوم پزشکی شیراز، شیراز، ایران

۴- دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه رادیولوژی، دانشکده‌ی پیراپزشکی، دانشگاه علوم پزشکی شیراز، شیراز، ایران

نویسنده‌ی مسؤول: سید محمد جواد مرتضوی: استاد، گروه فیزیک و مهندسی پزشکی، دانشکده‌ی پزشکی، دانشگاه علوم پزشکی شیراز، شیراز، ایران

Email: mortazavismj@gmail.com

چگالی بالای سرب، سبب تضعیف بالای پرتوهای ایکس اولیه، ثانویه و پراکنده شده در بخش‌های مختلف رادیولوژی می‌شود و می‌تواند پرتوکاران را از دریافت این پرتوها تا حد زیادی در امان نگه دارد (۹، ۱۰). برای ساخت حفاظ‌های سربی انعطاف‌پذیر معمولاً از موادی همچون لاستیک، پلیمرها، یا الاستومرها (پلیمرهایی که دارای ویژگی‌های الاستیک هستند) به عنوان بستری برای جای گرفتن ذرات ریز سرب استفاده می‌شود (۱۱). با وجود پیشرفت‌های زیادی که در توسعه‌ی حفاظ‌های سربی صورت گرفته است، اما خطرات و آسیب‌هایی که عنصر سرب در سلامت انسان و محیط زیست ایجاد می‌کند، دانشمندان و محققین را وادار به توجه و روی آوردن به سمت حفاظ‌های غیرسربی کرده است. در دهه‌های اخیر بحث حفاظ‌های انعطاف‌پذیر غیرسربی سبک با عملکرد بالا در حفاظت پرتویی یکی از زمینه‌های مهم تحقیقاتی به شمار می‌رود که منجر به طراحی و ساخت و توسعه‌ی حفاظ‌هایی با قدرت تضعیف پرتویی بالا و در مواردی بهتر از سرب گردیده که بسیار مورد توجه واقع شده است (۱۲، ۱۳).

به طور کلی، مباحث حفاظت در برابر اشعه از قوانین خاصی پیروی کرده و به فاکتورهای زیادی وابسته است. ضخامت حفاظ و جنس آن وابسته به نوع و انرژی پرتو، شدت تابش اولیه و شدت تابش نهایی خارج شده از حفاظ و فاصله‌ی موجود بین چشمه و حفاظ می‌باشد. فاکتورهای دیگری نیز مانند وزن، استحکام، پایداری و هزینه‌ی ساخت نیز در انتخاب حفاظ مهم است. یک حفاظ مؤثر، باعث کاهش زیادی در شدت پرتو تابشی در یک عمق نفوذ کم بدون گسیل تابش مضر اضافی می‌شود. یک حفاظ خوب باید دارای سطح مقطع تضعیف بالا برای پرتو تابش بوده به گونه‌ای که اثرات تابش بر روی خصوصیات مکانیکی آن باید کم باشد (۱۴-۱۶).

ضریب تضعیف فوتون یک پارامتر مهم برای مشخص کردن میزان نفوذ و انتشار اشعه‌های ایکس و گاما در مواد می‌باشد. پراکندگی و جذب پرتوهای ایکس و گاما به چگالی و عدد اتمی مؤثر ماده‌ی حفاظ بستگی دارد. ضریب تضعیف خطی یا μ (1/cm) و ضریب تضعیف جرمی یا μ/ρ (cm^2/g) که به عنوان احتمال تمام بر همکنش‌های ممکن بین پرتوهای ایکس و اتم‌های ماده‌ی هدف تعریف می‌شود، برای تحقیق کارآیی حفاظ‌های پرتویی به کار می‌رود. این ضرایب تضعیف وابسته به انرژی فوتون فرودی و اجزای تشکیل‌دهنده‌ی ماده‌ی هدف و چگالی آن (در مورد ضریب تضعیف خطی) می‌باشد.

اشعه‌ی ایکس تک انرژی مطابق با رابطه لامبرت- بیر در عبور از ماده‌ی هدف تضعیف می‌شود:

$$I = I_0 \exp(-\mu x) \qquad (۱)$$

که در این رابطه (۱) I_0 و I به ترتیب شدت تابش‌های فرودی و خروجی از ماده‌ی جاذب بوده، x ضخامت ماده‌ی جاذب و μ ضریب تضعیف خطی است. ضریب تضعیف جرمی را می‌توان با استفاده از روابط مربوطه محاسبه کرد. اگر σ را سطح مقطع مجموع برخوردها (جذب و پراکندگی) به ازای هر اتم از ماده‌ی هدف در نظر بگیریم، رابطه‌ی بین μ/ρ و σ به صورت مقابل خواهد بود:

$$\frac{\mu}{\rho}\ [cm^2/g] = \frac{\sigma\left(\frac{b}{atom}\right) N_A \left(\frac{atom}{mol}\right)\times 10^{-24} cm^2/b}{A\left(\frac{g}{mol}\right)} \qquad (۲)$$

که N_A عدد آووگادرو، A وزن اتمی ماده‌ی هدف و سطح مقطع برخورد با واحد b (بارن) می‌باشد. باید توجه کرد که پارامتر اصلی که ضریب تضعیف را تحت تأثیر قرار می‌دهد، عدد اتمی و چگالی ماده می‌باشد. همچنین تغییرات در ترکیب شیمیایی مواد در اثر تابش نیز بسیار مهم است (۱۷-۱۹).

نکته‌ی قابل توجه در حفاظ‌سازی در برابر اشعه‌ی ایکس این می‌باشد که طیف پرتویی هنگام عبور از هدف، با ضخامت‌های مختلف از مواد مختلف روبه‌رو می‌گردد که اثرگذار بر طیف پیوسته‌ی اشعه‌ی ایکس بوده و مانند یک فیلتر عمل می‌نماید و موجب می‌شود پرتوهای کم انرژی در لایه‌های اولیه تضعیف گردد و در نهایت میانگین انرژی دسته پرتو افزایش یابد. لذا کیفیت پرتوی ایکس تابع فیلترهای مختلفی است که در سر راه پرتو قرار می‌گیرند. به همین دلیل نمی‌توان (μ) اشعه‌ی ایکس را مستقیماً تعیین کرد و باید ضخامت لایه‌ی نیم جذب (HVL) آن‌ها را اندازه گرفت و با استفاده از رابطه‌ی HVL = ۰/۶۹۳/μ مقدار μ را محاسبه نمود (۲۰، ۲۱).

معایب حفاظ‌های سربی

حفاظ‌های لاستیکی حاوی سرب که روپوش‌های سربی (Lead Aprons) از این دست حفاظ‌ها به شمار می‌آیند، دارای معایبی هستند که به مواردی از قبیل سمیت (Toxicity) سرب، وزن زیاد حفاظ‌ها، عدم انعطاف‌پذیری (Flexibility) کافی به خاطر زیاد بودن ضخامت حفاظ‌ها ویژه در مواردی که فاکتور انعطاف‌پذیری نقش بسیار کلیدی در فرایند تشخیصی یا درمانی دارد، می‌توان اشاره داشت. به طور کلی، مسمومیت ناشی از سرب، یک مسأله‌ی جهانی بوده و این ترکیب عمدتاً از راه گوارش و تنفس جذب بدن می‌شود. بر طبق اطلاعات موجود، سرب در خون، استخوان‌ها، بافت‌های نرم، مو، ناخن، ترشحات پانکراس، صفرا، معده و بزاق ذخیره می شود. سرب برای جوانان، کودکان و به ویژه برای رشد ذهنی و سیستم عصبی در نوزادان می‌تواند آسیب‌های غیرقابل جبرانی وارد نماید (۲۲-۲۴). سازمان جهانی بهداشت حد آستانه‌ی مجاز برای میزان سرب خون در بالغین را ۲۰ تا ۳۰ میکروگرم در دسی‌لیتر خون ذکر

کرده است. مقادیر بیش از این محدوده می‌تواند منجر به اثرات بیولوژیکی از جمله تداخل در فعالیت‌های متابولیکی، ممانعت از فعالیت آنزیم‌های مختلف و نیز تأثیر بر میتوکندری سلول‌های مغز استخوان گردد. به علاوه شواهدی وجود دارد که وزن زیاد روپوش‌های سربی در رادیولوژیست‌ها و کاردیولوژیست‌ها در طولانی‌مدت باعث کمر درد (Low back pain) و گردن درد می‌شود. مقایسه‌ی بین سه گروه پزشکان کاردیولوژیست‌ها، متخصصین ارتوپد و روماتولوژیست‌ها نشان داد که کاردیولوژیست‌ها بیشتر از کمر درد شکایت دارند. در واقع، تحمل وزن یک روپوش سربی به وزن ۱۵ پوند می‌تواند فشاری معادل ۳۰۰ پوند بر هر اینچ مربع از دیسک بین مهره‌ای وارد کند (۲۵-۲۷).

استفاده از مواد جایگزین سرب

سرب در دامنه‌ی انرژی‌های تشخیصی به خاطر برخورداری از عدد اتمی بالا (Z = ۸۲) و قابل ملاحظه بودن سهم اندرکنش‌های فتوالکتریک در آن به دلیل محل قرارگیری لبه‌ی جذب K در محدوده‌ی انرژی ۸۸ کیلو الکترون ولت از جایگاه خوبی در تضعیف پرتویی برخوردار است (۲۸). در انرژی‌های بالاتر که پراکندگی کمپتون بسیار غالب می‌باشد، دانسیته‌ی الکترونی مواد نقش برجسته‌تری در تضعیف پرتویی پیدا می‌نماید. همچنین سرب با دارا بودن دانسیته‌ای معادل ۱۱/۳٤ g/cm^3، پایین‌تر از عناصری همچون تنگستن که از دانسیته‌ای معادل ۱۹/۳۵g/cm^3 برخوردار می‌باشد، قرار می‌گیرد. از این‌رو استفاده از عناصری چون تنگستن، طلا، اورانیوم، تانتالیوم و هافنیوم می‌تواند در محدوده‌ی انرژی‌های بالا تضعیف بهتری را سبب شود، در حالی‌که در صورت امکان استفاده در حفاظ‌های پرتوی، از ضخامت و وزن کمتری نسبت به حفاظ‌های سربی بهره‌مند می‌باشند (۲۹-۳٤). از سوی دیگر همین مزیت موجب می‌شود در محدوده‌ی انرژی معمول در پزشکی هسته‌ای (برای مثال پرتوهای ۱٤۰ keV تابش شده از Tc-99m) دستکش‌های تنگستنی مورد استفاده برای تزریق رادیودارو با داشتن ضخامت کمتر، از درجه‌ی انعطاف‌پذیری بسیار بالاتری برخوردار باشند و دز دست‌های اپراتور را تا حد زیادی کاهش دهند (۳۵، ۳٦).

استانداردی که اخیراً برای میزان تضعیف کنندگی مواد مورد استفاده در ساخت حفاظ‌های پرتویی عاری از سرب در بخش‌های رادیولوژی تدوین شده است، آزمایش این مواد را در دامنه‌های انرژی فوتونی ۳۰ تا ۱۵۰ keV الزامی نموده است (۳۷). از آن‌جا که جذب فتوالکتریک فلزات مختلف در انرژی‌های متفاوت به خاطر تفاوت لبه‌ی جذب K آن‌ها از تنوع بسیار زیادی برخوردار است، انتخاب یک فلز برای حفاظ‌سازی در این محدوده‌ی گسترده طیف انرژی پرتو ایکس غیرقابل دستیابی به نظر می‌رسد؛ اما استفاده از حفاظ‌های ترکیبی با لبه‌های جذب متفاوت می‌تواند علاوه بر برخورداری از تضعیفی برابر و یا در مواردی بیشتر از سرب، تا حد قابل توجهی وزن حفاظ‌ها را نیز کاهش دهد که این پدیده، پنجره‌ی تضعیف نامیده می‌شود (۳۸). با توجه به مطالب ارائه شده، لزوم طراحی و ساخت حفاظ‌های انعطاف‌پذیر، فاقد سرب، سبک و دارای تضعیف فوتونی مناسب از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است و تحقیقات راجع به جایگزینی حفاظ‌های سربی با حفاظ‌های عاری از سرب همچنان در اولویت است.

مزایای حفاظ‌های غیرسربی

با توجه به معایبی که برای سرب در بالا اشاره شد، استفاده از موادی به عنوان جایگزین مواد سربی برای حفاظ گذاری پرتوها می‌تواند به ارتقاء حفاظ‌های پرتویی کمک کند که از میان موادی که بر سرب برتری دارند، فلزات سنگینی مانند تنگستن و بیسموت نمونه‌های مناسبی می‌باشد (۳۹-٤۱). در ابتدا، عنصر بیسموت به دلیل ویژگی همچون عدد اتمی بالای (Z = ۸۳) در امر حفاظت در برابر پرتوهای یونیزان مورد توجه پژوهشگران فعال در این زمینه قرار گرفت (٤۲). در ادامه، عنصر تنگستن علاوه بر عدد اتمی مناسب (Z = ۷٤)، به دلیل داشتن ویژگی‌هایی همچون چگالی و نقطه‌ی ذوب بالا (۳۳۸۷ درجه‌ی سانتی‌گراد)، انعطاف‌پذیری (Flexibility) مناسب و سمیت (Toxicity) کمتر نسبت به سرب، در حفاظ‌سازی برتری‌های خاصی یافته و مورد توجه قرار گرفت (٤۳-٤۵).

در مطالعه‌ای که در سال ۲۰۰۷ انجام گردید، McCaffrey و همکاران، مقایسه‌ای بین حفاظ‌های حاوی سرب و بدون سرب انجام دادند. در این تحقیق، از شبیه‌سازی کامپیوتری به روش مونت کارلو به منظور بررسی انواع جایگزین‌های سرب و از پرتوهای ایکس (۳۹-۲۵۰ کیلوولتاژ) برای مقایسه‌ی هفت نوع شیلد تجاری موجود استفاده گردید. مقایسه ای که در این مطالعه بین فلزات مختلف شامل کادمیوم، ایندیوم، قلع، آنتیموان، سزیوم، باریوم، سریوم، گادولینیوم، تنگستن، سرب و بیسموت انجام گرفت، نشان داد، فلزاتی که عدد اتمی بالا و دانسیته‌ی پایینی دارند، در انرژی‌های ذکر شده بهترین تضعیف را ایجاد می‌نمایند (۱۲).

همچنین در سال ۲۰۰۹ میلادی McCaffrey و همکاران مطالعه‌ی دیگری را برای بهینه‌سازی وزن روپوش‌های دو لایه بدون سرب انجام دادند. آن‌ها از روش مونت کارلو و اندازه‌گیری تجربی جهت مطالعه بر روی تضعیف پرتوهای ۳۰ تا ۱۵۰ کیلو الکترون ولتی استفاده کرده و در نهایت به این نتیجه رسیدند که روپوش‌های دو لایه‌ای که از دو ماده با عدد اتمی بالا و عدد اتمی پایین ساخته شده

بودند، از وزن و تضعیف پرتویی بهینه‌تری نسبت به روپوش‌های حاوی یک ماده‌ی خالص و یا مخلوطی از دو ماده برخوردار می‌باشند. در این مطالعه، روپوش‌های دو لایه مورد بررسی شامل Ba/Bi, Sb/W, Sb/Bi بود که با روپوش سربی خالص مقایسه گردید (۳۷).

در همین رابطه، مرتضوی و همکاران در مطالعه‌ای شبیه‌سازی نشان دادند حفاظ غیرسربی تشکیل شده از عناصری مانند قلع و بیسموت، از تضعیف پرتویی مناسبی در محدوده‌ی انرژی تشخیصی بهره‌مند می‌باشد و کارآیی بهتری نسبت به محافظ‌های سربی دارد. بنابر نتایج به دست آمده از این مطالعه، استفاده از ۳ عنصر بیسموت (۴۵ درصد وزنی)، تنگستن (۱۵ درصد وزنی) و قلع (۲۰ درصد وزنی) در بستری از پلی وینیل کلرید (EPVC) منجر به ایجاد تضعیف پرتویی قابل قبولی در انرژی‌های تشخیصی بکار رفته شد (٤٦).

همچنین، نتایج حاصل از مطالعه‌ای که با هدف حفاظت در برابر پرتوهای گاما و ایکس با انرژی کم به وسیله‌ی شبیه‌سازی مونت کارلو در سال ۲۰۱۱ انجام شد، بیانگر این می‌باشد که دو عنصر تنگستن و قلع به دلیل ارزان بودن و سمیت کمتر، گزینه‌های خوبی برای جایگزینی سرب جهت حفاظت پرتویی در محدوده‌ی تشخیصی محسوب می‌گردد. در این مطالعه، ضخامت لایه‌ی نیم جذب برای انرژی ۱۰۰ کیلوولتاژ در شبیه‌سازی مونت کارلو و آزمایشات عملی به ترتیب ۰/۲٦ و ۰/۲٤ میلی‌متر گزارش گردید. علاوه بر ضخامت کمتر، حفاظ‌های ساخته شده در این مطالعه، از ویژگی‌های مکانیکی و پایداری شیمیایی و فیزیکی قابل توجهی برخوردار بودند (٤٧).

استفاده از عناصری با ویژگی‌های تضعیف پرتویی مناسب مانند بیسموت در بستری از پلی اتیلن، از دیگر روش‌های دست‌یابی به حفاظت پرتویی مناسب در محدوده‌ی تشخیصی می‌باشد که توسط محققین بسیاری مورد مطالعه قرار گرفته است (٤٨-٥١).

در مطالعه‌ای که به بررسی استفاده از اکسید بیسموت (Bi_2O_3) در بستری از پلی اتیلن (Low-density polyethylene)LDPE با غلظت کم (LDPE) پرداخته شد، نتایج به این صورت بیان گردید که استفاده از Bi_2O_3 با درصد جرمی ۱۵ در LDPE، سبب کاهش ۸۰ درصدی پرتوهای ایکس با انرژی ٤۷/۹ کیلو الکترون ولت می‌گردند و در نهایت، به هر میزانی که ضخامت ترکیب مذکور بیشتر گردد، میزان تضعیف پرتوها نیز افزایش می‌یابد (۵۲).

از طرفی دیگر می‌توان علاوه بر استفاده از بیسموت، از جایگزین‌های دیگری مانند سیلیکون، یون کاربید و یا برم استفاده نمود. در واقع، بر اساس مطالعه‌ای که توسط Alshahri و همکاران (۵۲) و Almurayshid و همکاران (۵۳) انجام شده است، در کنار هم قرار دادن سیلیکون، سیلیکون کاربید (SiC)، برم کاربید (B_4C) با درصدهای جرمی به ترتیب ۳۰، ۱۵ و ۱۵ درصد، می‌تواند سبب تضعیف حدوداً ۹۰ درصدی پرتوهای ایکسی با انرژی ۸۰ کیلوولتاژ گردد.

یکی از کاندیداهای مناسب برای امر حفاظت در برابر پرتوهای یونیزان به صورتی که سرب در آن به کار نرفته باشد، روشی است که توسط Li و همکاران پیشنهاد کرده‌اند. این مطالعه که به تازگی در سال ۲۰۲۱ منتشر شده است، بیان می‌نماید که استفاده از یک پلیمر چند لایه‌ای که از عناصر مختلفی همچون تنگستن و بیسموت تشکیل شده است، اثری هم‌افزایی (Synergistically) خواهد داشت و می‌تواند در ساخت محافظی انعطاف‌پذیر، بدون سرب، سبک وزن و با کارآیی بالا، در تصویربرداری تشخیصی استفاده گردد. همچنین، این روش می‌تواند بر نقص حفاظ‌های سربی که در محدوده‌ی انرژی ۷۰- ۹۰ کیلوولتاژ دچار مشکل در تضعیف می‌گردند، غلبه نماید (٥٤).

در همین راستا، مطالعه‌ی دیگری که توسط Gilys و همکاران بر اساس این فرضیه در سال ۲۰۲۰ انجام شد تأیید کننده‌ی نتایج مطالعه‌ی قبلی می‌باشد، بر اساس این پژوهش، از ترکیبات مناسب قابل استفاده جهت محافظت در برابر پرتوها که در بستری از پلیمرهای چند لایه‌ای سیلیکونی جای می‌گیرند، می‌توان به بیسموت، تنگستن و سریم اشاره کرد. در واقع می‌توان این چنین اظهار نمود که این پلیمرهای چند لایه‌ای به دلیل داشتن ویژگی‌های مکانیکی، حرارتی و الکتریکی مناسب، می‌توانند نسل بعدی از محافظ‌های پرتویی به شمار آیند (۵۵).

علاوه بر موارد ذکر شده، از ترکیبات ویژه دیگری مانند اکسیدهای فلزی تلوریم، مولیبدن، آنتیموان، هولمیوم، روی و بور می‌توان نام برد که در ساخت شیشه‌های محافظ پرتوی نیز مورد استفاده قرار می‌گیرند. بر اساس مطالعاتی که به تازگی انجام شده است، قرار دادن اکسید تلوریم (تلوریت) در کنار عناصری همچون فسفر، روی و اربیوم، می‌تواند منجر به ساختن شیشه‌ای شفاف شده که دارای خواص محافظ پرتویی خوبی است. در حقیقت مطالعه‌ی مذکور پس از آنالیز ضریب تضعیف جرمی، ضریب تضعیف خطی، لایه‌ی نیم جذب، میانگین مسیر حرکت پرتوها، عدد اتمی مؤثر و فاکتور انتقال (Transmission factor)، نشان داد که این ترکیبات به دلیل داشتن ویژگی‌هایی مانند غیر سمی، سبک و کم هزینه بودن می‌توانند به عنوان مواد محافظ پرتویی شفاف در کاربردهای پزشکی و صنعتی مورد استفاده قرار گیرند (٥٦-٦٠).

به طور کلی، خلاصه‌ای از ترکیبات غیرسربی پیشنهاد شده توسط پژوهشگران مختلف در جدول ۱ بیان شده است.

جدول ۱. ترکیبات غیرسربی پیشنهاد شده در حفاظهای پرتویی برای بخش‌های تصویربرداری

پژوهشگر / سال مطالعه	عنصر	پایه شیلد
مرتضوی و همکاران (۴۶)/ ۲۰۱۶	قلع- سرب- تنگستن	پلی وینیل کلرید
Aghamiri و همکاران (۴۷)/ ۲۰۱۱	تنگستن- قلع	پلیمر چند لایه‌ای
Alshahri و همکاران (۵۲)/ ۲۰۲۱	بیسموت	پلیمر پلی اتیلن
Almurayshid و همکاران (۵۳)/ ۲۰۲۱	سیلیکون- کاربید- برم	پلیمر پلی وینیل کلرید
Li و همکاران (۵۴)/ ۲۰۲۱	بیسموت- تنگستن	پلیمر چند لایه‌ای
Gilys و همکاران (۵۵)/ ۲۰۲۲	سیلیکون	پلیمر چند لایه‌ای
Hussein و همکاران (۵۷)/ ۲۰۲۱	تلوریم	پلیمر اکسید فلز

در کنار ترکیبات یاد شده که عموماً در بستر پلی اتیلن قرار می‌گرفتند، ترکیباتی همچون هایپوفسفات (PO_2)، اکسید آهن (III) (Fe_2O_3) و اکسید گادلنیوم (III) (Ga_2O_3) می‌توانند به ترتیب در بسترهای متفاوتی همچون بتن، بتن و رزین سیلیکونی قرار گرفته تا حفاظت در برابر پرتوهای یونیزان به طور مؤثرتری صورت پذیرد (۶۱-۶۳).

نانوتکنولوژی

موادی با ساختار نانو، موادی هستند که عناصر سازنده‌ی آنها ابعادی در گستره‌ی (۱۰۰-۱ نانومتر) دارند. این مواد می‌توانند به صورت دانه (Seeds)، میله، ذره و غیره باشند که ذرات تشکیل‌دهنده‌ی آنها حداقل در یکی از ابعاد خود در حدود نانومتر می‌باشد. مواد در ابعاد نانو، از خود ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی ویژه‌ای بروز می‌دهند که در ذرات با اندازه‌های بزرگ‌تر یافت نمی‌شود و این امر از عواملی مانند افزایش نسبت سطح به حجم و برهمکنش‌های سطحی و نیز بروز رفتار کوانتومی به دلیل کوچک شدن ذرات ناشی می‌شود. خواص ویژه‌ی فیزیکیو شیمیایی و گرمایی نانو باعث شده است که برای بسیاری از برنامه‌های کاربردی در پزشکی شیمی، فیزیک و علم مواد مورد توجه قرار گیرند (۶۴-۶۷).

نتایج حاصل از مطالعات Künzel و همکاران در ۲۰۱۱ و ۲۰۱۲ که با استفاده از اکسید مس در دو مقیاس نانو و میکرو به دست آمده بود، نشان داد که برای پرتوهای ایکس کم انرژی، موادی با ساختار نانو دارای قدرت تضعیف بیشتری نسبت به همان مواد با ساختار میکرو می‌باشند(۶۸، ۶۹).

در مطالعه‌ی دیگری که در سال ۲۰۱۲ توسط Azman و همکاران برای بررسی اثر اندازه‌ی ذرات اکسید تنگستن در بستر اپوکسی (WO3-epoxy) رزین در تضعیف پرتوهای ایکس انجام شد، به خوبی نتایج قبلی را مبنی بر توانایی تضعیف بیشتر این ذرات در ابعاد نانو نسبت به ابعاد میکرو در ولتاژهای پایین تیوب اشعه‌ی ایکس (۲۵-۳۵ کیلوولتاژ) تصدیق نمود. همچنین اثر اندازه‌ی ذرات با افزایش انرژی (۴۰-۱۲۰ کیلوولتاژ) در میزان تضعیف، کاهش می‌یابد (۳۹).

بر اساس مطالعاتی، استفاده از نانو ذرات و نانوساختارهای جاسازی شده در یک مخلوط پلیمری را برای استفاده در حفاظسازی در برابر پرتوهای ایکس و گاما پیشنهاد شده است. به دلیل اندازه‌های کوچک موادی با ساختار نانو، این مواد می‌توانند خصوصیات فیزیکی و شیمیایی جدیدی همچون افزایش نسبت سطح به حجم، ایجاد پیوندهای قوی‌تر بین ذرات و افزایش سطح مقطع برهمکنش پرتو با ذرات نسبت به ترکیب شیمیایی یکسان با آن‌ها در مقیاس میکرو داشته باشند. در حقیقت برخی از خصوصیات نانو مواد برای کاربردهای حفاظتی رادیولوژیکی جالب هستند، بویژه در طراحی روپوش‌های بدون سرب برای حفاظت در افرادی که تحت پرتوگیری شغلی می‌باشند (۷۰-۷۲).

در تحقیقی که در سال ۲۰۱۱ توسط Botelho و همکاران در برزیل انجام گردید، ثابت شد که موادی با ساختار نانو دارای ضریب تضعیف بزرگتری نسبت به موادی با ساختار میکرو برای گستره‌ی انرژی‌های پایین اشعه‌ی ایکس هستند. آن‌ها برای این کار از اکسید مس (CuO) در مقیاس نانو و میکرو استفاده کردند که این نانو ذرات و میکرو ذرات با موم ترکیب و به صورت صفحات چهار گوشی در آمده بودند. در این مطالعه از اشعه‌ی ایکس با ولتاژهای ۲۶ تا ۱۰۲ کیلوولتاژ و دزیمتر اتاقک یونش به منظور اندازه‌گیری شدت پرتو بکار گرفته شد. نتایج این بررسی نشان داد که عبور پرتوهای ایکس با انرژی‌های ۲۶، ۳۰، ۶۰ و ۱۰۲ کیلوولتاژ از ترکیبات اکسید مس همراه با موم با ساختار نانو و میکرو و موم خالص، به عنوان تابعی از جرم بر واحد سطح (گستره‌ی جرم بر واحد سطح ۰/۱۷ و ۱/۰۵ گرم بر سانتی‌متر مربع) می‌باشند. برای پرتوهای ایکس ۶۰ و ۱۰۲ کیلوولتاژ در هنگام عبور از موادی با ساختار نانو و میکرو تفاوت چندانی دیده نشد، اما برای پرتوهای ۲۰ و ۳۰ کیلوولتاژ، میزان تضعیف اشعه در نانوماده، ۱۴ درصد بیشتر از ساختار میکرو آن گزارش گردید. درحقیقت، هر چقدر انرژی پرتو افزایش می‌یابد، تضعیف توسط مواد کاهش یافته و از میزان نقش اندازه‌ی ذرات در

تضعیف پرتویی کاسته می‌شود. برای مقایسه‌ی عبور اشعه‌های ایکس از موادی با ساختار نانو و میکرو، مقادیر گرمای هوای مربوط به ایکس‌های گسیلی اندازه‌گیری شد. گرمای هوای مربوط به ٦٠ و ١٠٢ کیلوولتاژ برای هر دو ساختار نانو و میکرو تقریباً یکسان بوده و برای باریکه‌های ٢٦ و ٣٠ کیلوولتاژ، مقادیر گرمای هوا برای نمونه‌های با ساختار نانو کمتر می‌باشد (٧٣).

بنابراین بر اساس بررسی‌های صورت گرفته، اندازه‌ی ترکیبات مورد استفاده در حفاظ‌های پرتویی پیشنهادی، بسیار حائز اهمیت می‌باشد؛ می‌توان بیان نمود که نمونه‌هایی با ساختار نانو برای تضعیف اشعه‌های ایکس کم انرژی مؤثرتر از موادی با ساختار میکرو می‌باشند. به عنوان مثال عنصری مانند بیسموت در یک ترکیب به شکل نانو نسبت به حالت میکرو آن، دارای ضریب تضعیف بیشتری (١١ تا ١٨ درصد) برای فوتون‌های ایکس تشخیصی است (٧٤).

همچنین، مطالعه‌ای که توسط Aghaz و همکاران در سال ٢٠١٦ بر روی ترکیبی از تنگستن و اکسیژن (WO_3) با دو حالت نانو و میکرو انجام شد، نشان داد که WO_3 در هر دو حالت به ویژه نانو، سبب تضعیف شدید فوتون‌های کم انرژی ایکس تشخیصی می‌گردد؛ تا جایی که می‌توان این ترکیب را به دلیل ویژگی‌های مناسب در امر حفاظت در برابر پرتو پیشنهاد نمود (٧٥).

در مطالعه‌ی Verdipoor و همکاران نشان داده شد، نانوکامپوزیت‌های پلیمری بر پایه‌ی اکسید بیسموت به ازای مقدار ماده‌ی پرکننده بسیار کمتری در مقایسه با سایز میکرو خود تضعیف به مراتب بالاتری را از خود نشان داده‌اند (٦١).

Abdalsalam و همکاران نیز نانوکامپوزیت‌هایی از پلی اتیلن با وزن مولکولی فوق العاده بالا (UHMWPE) و HDPE حاوی مقدار بسیار کم پرکننده (تا ٢ درصد وزنی) نانوذرات (Bi_2O_3) در ابعاد ٢٥ نانومتر) برای کاربردهای محافظ پرتویی تولید کردند (٧٦، ٧٧). در مقایسه با مطالعه‌ی قبلی Verdipoor و همکاران (٦١) حفاظ‌های ساخته شده توسط Abdalsalam و همکاران با وجود درصد وزنی بسیار کمتر نانوذرات به کار گرفته شده، در انرژی ٣٥٦ کیلوالکترون ولت تضعیف معنی‌دار بیشتری ایجاد کرده بودند که یکی از دلایل احتمالی چنین افزایشی می تواند تفاوت نانومتریک در اندازه پرکننده باشد؛ زیرا Verdipoor و همکاران در مطالعه‌ی خود میکروذرات ١ میلی‌متری و نانوذرات ١٠٠ نانومتری را در نظر گرفته بودند.

در نهایت، این مطالعات در سال‌های اخیر نشان می‌دهند که اندازه ذرات در مواد مورد استفاده در حفاظ‌سازی، بر روی میزان تضعیف پرتویی آن‌ها تأثیر می‌گذارد؛ به همین دلیل، محققین برآن شدند که از موادی با ساختار نانو (Nano materials) در صنعت حفاظ‌سازی هسته‌ای استفاده کنند، زیرا در حال حاضر کوچک‌ترین اندازه‌ی ذرات در دسترس برای حفاظ‌سازی در مقیاس نانو می‌باشد.

مجموعه‌ای ترکیبات مطرح شده که قابلیت استفاده در حالت نانو برای استفاده از حفاظ‌های پرتویی در بخش‌های تصویربرداری تشخیصی می‌توانند مورد استفاده قرار گیرند و شامل عناصری همچون بیسموت، تنگستن، تالیم و گادلنیوم هستند، در جدول ٢ بیان شده است (٧٨-٨٣).

نتیجه‌گیری

با توجه به موارد و نمونه های ذکر شده در این مقاله، مطالعه در مورد حفاظ های غیرسربی و بهینه کردن شرایط تضعیف پرتویی آن‌ها نسبت به سرب، امری مهم و ضروری است. همانطور که نتایج مطالعات تجربی و شبیه‌سازی نشان دادند، طیف وسیعی از مواد را می‌توان به عنوان جایگزین سرب در حفاظ پرتویی به کار برد. تنگستن، بیسموت، گادولینیوم، مس، تیتانیوم، زیرکونیوم، نقره، باریوم، آنتیموان، قلع و کادمیوم از جمله موادی هستند که در مطالعات از آن‌ها به منظور حفاظ پرتویی جایگزین سرب استفاده شده است (٣٧، ٤٠، ٦٣، ٧٤، ٧٩). عامل مهم در انتخاب حفاظ مناسب در رادیولوژی تشخیصی، عدد اتمی و محل قرارگیری لبه‌ی جذب K عنصر تضعیف‌کننده است. با توجه به طیف وسیع انرژی پرتوهای ایکس در رادیولوژی تشخیصی (محدوده‌ی ٢٠ تا ١٤٠ کیلوالکترون ولت)، یافتن یک عنصر منحصر به فرد برای ایجاد تضعیف در تمام انرژی‌ها امری غیر ممکن می‌باشد. بنابراین محققین با استفاده از ترکیب چند عنصر با عدد اتمی و لبه‌ی جذب K متفاوت، به حفاظ‌های سبک‌تر با تضعیف پرتوی بیشتر دست یافتند. همچنین نتایج نشان داد، با استفاده از ساختار لایه‌ای (لایه‌هایی از فلزات مختلف) می‌توان به حفاظ‌هایی با تضعیف بیشتر و وزن کمتر نسبت به حفاظ‌های سربی همتا و حفاظ‌های ترکیبی (مخلوط چند عنصر) دست یافت. اخیراً دانشمندان با استفاده از فناوری نانو و ساخت و آزمایش حفاظ‌هایی از جنس نانو ذرات فلزی، به بهینه‌سازی هرچه بیشتر حفاظ‌های پرتویی پرداخته و به این نتیجه رسیدند که اندازه‌ی ذرات می‌توانند در میزان تضعیف پرتوهای ایکس مؤثر باشد. به طور کلی، می‌توان این چنین اظهار نمود که هرچه اندازه‌ی ذرات مورد استفاده کوچک‌تر گردند، میزان تضعیف آن‌ها و قابلیت‌های تضعیف پرتوی و مکانیکی حفاظ‌های ساخته شده افزایش می‌یابد. بررسی‌ها نشان داد که استفاده از فناوری نانو امکانات جدیدی را در تولید مواد محافظ تشعشع ارائه می‌دهد که قابل تنظیم هستند (مانند سنتز نانوذرات در اندازه‌های مختلف) و عملکرد بالایی به عنوان تضعیف‌کننده‌ی فوتون نشان می‌دهند. ترکیب نانومواد با اعداد اتمی بالا در ماتریس‌های پلیمری امکان تولید حفاظی را فراهم می‌کند که می‌تواند جایگزین سرب شود. کامپوزیت‌های مبتنی بر نانو با سطح مقطع جذب و پراکندگی

پرتو بالایی که ایجاد می‌کنند می‌توانند فوتون‌ها را به میزان قابل توجهی تضعیف کنند و بنابراین می‌توانند به طور مؤثر در کاربردهای حفاظت پرتویی مورد استفاده قرار گیرند. عوامل مختلفی مانند اندازه‌ی ذرات، نسبت پرکننده به ماتریس پلیمری و انرژی فوتون مورد استفاده، مستقیماً بر اثربخشی نانو حفاظ‌ها تأثیر می‌گذارند. بر اساس مطالعات مرور شده در این مقاله، نتیجه‌گیری می‌شود که استفاده از نانوذرات متعدد متشکل از عناصر با انرژی لبه‌ی جذب K متفاوت به عنوان اجزای سازنده‌ی نانوکامپوزیت‌ها برای دستیابی به حفاظ‌های کارآمدتر پرتویی امیدوارکننده است. علاوه بر این، ماتریس‌های جدید مانند پلیمرها محافظت بهتر و بهبود عملکرد فیزیکی این حفاظ‌ها را به دنبال دارد. در نهایت، تحقیقات تجربی و نظری بیشتری برای حمایت و بهره‌برداری از پتانسیل کامل نانوذرات در فناوری حفاظت در برابر پرتوها توصیه می‌شود. با توجه به مطالعات انجام شده، پیشنهاد می‌شود مطالعات بیشتری بر روی نانوحفاظ‌های چند لایه‌ای با ترکیبی از عناصر با عدد اتمی و ضخامت‌های متفاوت صورت پذیرد. همچنین با بکارگیری عناصر مختلف جهت تضعیف پرتوهای گوناگون (الکترومغناطیسی و ذره‌ای) در کنار بهره‌گیری از فن‌آوری نانو امکان دستیابی به حفاظ‌های بهینه‌ی چند منظوره در کاربردهای فضایی نیز میسر می‌گردد که تحقیقات در این زمینه در حال انجام است.

تشکر و قدردانی

بدین‌وسیله از تمامی افرادی که ما را در انجام این مطالعه یاری نمودند، مراتب سپاس و تشکر تقدیم می‌گردد.

جدول ۲. مقایسه‌ی ترکیبات غیرسربی پیشنهاد شده در حالت نانو و میکرو برای استفاده در حفاظ‌های پرتویی در بخش‌های تصویربرداری تشخیصی

پژوهشگر/ سال مطالعه	پرکننده	پایه شیلد	مزیت
Künzel و همکاران (۶۹)/ ۲۰۱۲	اکسید مس	اپوکسی رزین	افزایش معنی‌دار تضعیف پرتوهای کم انرژی با کاهش اندازه‌ی ذرات از میکرو به نانو
Botelho و همکاران (۷۳)/ ۲۰۱۱	اکسید مس	موم (Beeswax)	افزایش معنی‌دار تضعیف پرتوهای کم انرژی با کاهش اندازه‌ی ذرات از میکرو به نانو
Azman و همکاران (۳۹)/ ۲۰۱۳	اکسید تنگستن	اپوکسی رزین	تضعیف بیشتر نانوذرات نسبت به میکروذرات در انرژی‌های کم تشخیصی
Noor Azman و همکاران (۷۸)/ ۲۰۱۳	بیسموت	پلی لاکتیک اسید (PLA)	تضعیف بیشتر نانوذرات نسبت به میکروذرات در انرژی‌های کم تشخیصی (۲۲ تا ۴۹ keV)
Noor Azman و همکاران (۷۹)/ ۲۰۱۶	اکسید بیسموت	پلی وینیل الکل (PVA)	اضافه کردن درصد بسیار کمی نشاسته به حفاظ‌های ساخته شده، اثر اندازه‌ی ذرات Particle size effect و برتری حفاظ‌های نانو را به صورت بارزتری نشان داد.
Rashidi و همکاران (۸۰)/ ۲۰۱۵	اکسید بیسموت	مواد نیمه جامد مانند کرم ointment	برتری نانو حفاظ‌های ساخته شده نسبت به حفاظ‌های سربی همتای خود
Verdipoor و همکاران (۶۱)/ ۲۰۱۸	WO3, PbO, and Bi_2O_3	سیلیکون رزین	نمونه‌های محافظ ساخته شده از نانوذرات دارای ضرایب تضعیف جرمی بالاتر، تا ۱۷ درصد نسبت به نمونه‌های ساخته شده از میکروذرات بودند و این برتری به غلظت پرکننده و انرژی فوتون‌ها بستگی داشت.
Muthamma و همکاران (۶۵)/ ۲۰۲۱	اکسید بیسموت (Bi_2O_3)	اپوکسی رزین	سبک‌تر، استحکام کششی بیشتر و ظرفیت گرمایی بالاتر نسبت به حالت میکرو
Alavain و Tavakoli-Anbaran (۸۱)/ ۲۰۱۹	تنگستن (W)	پلی اتیلن با چگالی کم	تضعیف پرتویی بیشتر نسبت به حالت میکرو
Prabhu و همکاران (۸۲)/ ۲۰۲۱	اکسید تالیم (Ta_2O_5)	اپوکسی رزین	پایداری حرارتی، استحکام کششی و ویسکوالاستیسیته‌ی بیشتر نسبت به حالت میکرو
Li و همکاران (۸۳)/ ۲۰۱۷	گادلنیوم اکسید (Gd_2O_3)	اپوکسی رزین	تضعیف پرتویی و استحکام خمشی بیشتر نسبت به حالت میکرو

References

1. Duggar BM. Grants in support of research on the biological effects of radiation. Science 1938; 87(2266): 507-8.
2. Kim JH. Three principles for radiation safety: time, distance, and shielding. Korean J Pain 2018; 31(3): 145.
3. Hashemi SA, Mousavi SM, Faghihi R, Arjmand M, Sina S, Amani AM. Lead oxide-decorated graphene oxide/epoxy composite towards X-Ray radiation shielding. Radiat Phys Chem 2018; 146: 77-85.
4. Farhood B, Raei B, Malekzadeh R, Shirvani M, Najafi M, Mortezazadeh T. A review of incidence and mortality of colorectal, lung, liver, thyroid, and bladder cancers in Iran and compared to other countries. Contemp Oncol (Pozn) 2019; 23(1): 7-15.
5. Ngaile JE, Uiso CBS, Msaki P, Kazema R. Use of lead shields for radiation protection of superficial organs in patients undergoing head CT examinations. Radiat Prot Dosimetry 2008; 130(4): 490-8.
6. Lynskey 3rd GE, Powell DK, Dixon RG, Silberzweig JE. Radiation protection in interventional radiology: survey results of attitudes and use. J Vasc Interv Radiol 2013; 24(10): 1547-51.e3.
7. Lakhwani OP, Dalal V, Jindal M, Nagala A. Radiation protection and standardization. J Clin Orthop Trauma 2019; 10(4): 738-43.
8. Musallam A, Volis I, Dadaev S, Abergel E, Soni A, Yalonetsky S, et al. A randomized study comparing the use of a pelvic lead shield during trans-radial interventions: Threefold decrease in radiation to the operator but double exposure to the patient. Catheter Cardiovasc Interv 2015; 85(7): 1164-70.
9. Finnerty M, Brennan PC. Protective aprons in imaging departments: manufacturer stated lead equivalence values require validation. Eur Radiol 2005; 15(7): 1477-84.
10. Hyun SJ, Kim KJ, Jahng TA, Kim HJ. Efficiency of lead aprons in blocking radiation-how protective are they? Heliyon 2016; 2(5): e00117.
11. Nambiar S, Yeow JT. Polymer-composite materials for radiation protection. ACS Appl Mater Interfaces 2012; 4(11): 5717-26.
12. McCaffrey JP, Shen H, Downton B, Mainegra-Hing E. Radiation attenuation by lead and nonlead materials used in radiation shielding garments. Med Phys 2007; 34(2): 530-7.
13. Saeedi-Moghadam M, Tayebi M, Chegeni N, Sina S, Kolayi T. Efficiency of non-lead and lead thyroid shields in radiation protection of CT examinations. Radiat Phys Chem 2021; 180: 109265.
14. Tekin HO, Altunsoy EE, Kavaz E, Sayyed MI, Agar O, Kamislioglu M. Photon and neutron shielding performance of boron phosphate glasses for diagnostic radiology facilities. Results Phys 2019; 12: 1457-64.
15. Scuderi GJ, Brusovanik GV, Campbell DR, Henry RP, Kwon B, Vaccaro AR. Evaluation of non-lead-based protective radiological material in spinal surgery. Spine J 2006; 6(5): 577-82.
16. Kato M, Chida K, Munehisa M, Sato T, Inaba Y, Suzuki M, et al. Non-lead protective aprons for the protection of interventional radiology physicians from radiation exposure in clinical settings: an initial study. Diagnostics (Basel) 2021; 11(9): 1613.
17. Singh C, Singh T, Kumar A, Mudahar GS. Energy and chemical composition dependence of mass attenuation coefficients of building materials. Ann Nucl Energy 2004; 31(10): 1199-205.
18. Elmahroug Y, Tellili B, Souga C. Determination of total mass attenuation coefficients, effective atomic numbers and electron densities for different shielding materials. Ann Nucl Energy 2015; 75: 268-74.
19. Gaikwad DK, Pawar PP, Selvam TP. Mass attenuation coefficients and effective atomic numbers of biological compounds for gamma ray interactions. Radiat Phys Chem 2017; 138: 75-80.
20. Nickoloff EL, Berman HL. Factors affecting x-ray spectra. Radiographics 1993; 13(6): 1337-48.
21. Sitko R. Influence of X-ray tube spectral distribution on uncertainty of calculated fluorescent radiation intensity. Spectrochim Acta B: At Spectrosc 2007; 62(8): 777-86.
22. Ara A, Usmani JA. Lead toxicity: a review. Interdiscip Toxicol 2015; 8(2): 55.
23. Ahamed M, Siddiqui MKJ. Environmental lead toxicity and nutritional factors. Clin Nutr 2007; 26(4): 400-8.
24. Murata K, Iwata T, Dakeishi M, Karita K. Lead toxicity: does the critical level of lead resulting in adverse effects differ between adults and children? J Occup Health 2008; 51(1): 1-12.
25. Moore B, VanSonnenberg E, Casola G, Novelline RA. The relationship between back pain and lead apron use in radiologists. AJR Am J Roentgenol 1992; 158(1): 191-3.
26. Pelz DM. Low back pain, lead aprons, and the angiographer. AJNR Am J Neuroradiol 2000; 21(7): 1364.
27. Rees CR, Duncan BW. Get the lead off our Backs! Tech Vasc Interv Radiol 2018; 21(1): 7-15.
28. Saritha B, Rao ASN. A study on photon attenuation coefficients of different wood materials with different densities. J Phys: Conference Series 2015: 012030.
29. Singh AK, Singh RK, Sharma B, Tyagi AK. Characterization and biocompatibility studies of lead free X-ray shielding polymer composite for healthcare application. Radiat Phys Chem 2017; 138: 9-15
30. Atashi P, Rahmani S, Ahadi B, Rahmati A. 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 2018; 29(14): 12306-22.
31. Molina Higgins MC, Radcliffe NA, Toro-González M, Rojas JV. Gamma ray attenuation of hafnium dioxide-and tungsten trioxide-epoxy resin composites. J Radioanal Nucl Chem 2019; 322(2): 707-16.
32. Prabhu S, Bubbly SG, Gudennavar SB. X-Ray and γ-Ray shielding efficiency of polymer composites: Choice of fillers, effect of loading and filler size, photon energy and multifunctionality. Polymer Reviews 2022; 1-43.
33. Li Q, Wei Q, Zheng W, Zheng Y, Okosi N, Wang Z,

et al. Enhanced radiation shielding with conformal light-weight nanoparticle-polymer composite. ACS Appl Mater Interfaces 2018; 10(41): 35510-5.
34. Adlienė D, Gilys L, Griškonis E. Development and characterization of new tungsten and tantalum containing composites for radiation shielding in medicine. Nucl Instrum Methods Phys Res B 2020; 467: 21-6.
35. Dell MA. Radiation safety review for 511-keV emitters in nuclear medicine. J Nucl Med Technol 1997; 25(1): 12-7.
36. AbuAlRoos NJ, Amin NAB, Zainon R. Conventional and new lead-free radiation shielding materials for radiation protection in nuclear medicine: A review. Radiat Phys Chem 2019; 165: 108439.
37. McCaffrey JP, Mainegra-Hing E, Shen H. Optimizing non-Pb radiation shielding materials using bilayers. Med Phys 2009; 36(12): 5586-94.
38. Livingstone RS, Varghese A. A simple quality control tool for assessing integrity of lead equivalent aprons. Indian J Radiol Imaging 2018; 28(2): 258-62.
39. Azman NN, Siddiqui SA, Hart R, Low IM. Effect of particle size, filler loadings and x-ray tube voltage on the transmitted x-ray transmission in tungsten oxide-epoxy composites. Appl Radiat Isot 2013; 71(1): 62-7.
40. Park S, Kim H, Kim Y, Kim E, Seo Y. Multilayer-structured non-leaded metal/polymer composites for enhanced x-ray shielding. MRS Advances 2018; 3(31): 1789-97.
41. Kim H, Lim J, Kim J, Lee J, Seo Y. Multilayer Structuring of Nonleaded Metal (BiSn)/Polymer/Tungsten Composites for Enhanced γ-Ray Shielding. Adv Eng Mater 2020; 22(6): 1901448.
42. Hopper KD, King SH, Lobell ME, TenHave TR, Weaver JS. The breast: in-plane x-ray protection during diagnostic thoracic CT--shielding with bismuth radioprotective garments. Radiology 1997; 205(3): 853-8.
43. Yue K, Luo W, Dong X, Wang C, Wu G, Jiang M, et al. A new lead-free radiation shielding material for radiotherapy. Radiat Prot Dosimetry 2009; 133(4): 256-60.
44. Mukundan Jr S, Wang PI, Frush DP, Yoshizumi T, Marcus J, Kloeblen E, et al. MOSFET dosimetry for radiation dose assessment of bismuth shielding of the eye in children. AJR Am J Roentgenol 2007; 188(6): 1648-50.
45. Mehnati P, Malekzadeh R, Yousefi Sooteh M. Application of personal non-lead nano-composite shields for radiation protection in diagnostic radiology: a systematic review and meta-analysis. Nanomed. J 2020; 7(3): 170-82.
46. Mortazavi SMJ, Zahiri A, Shahbazi-Gahrouei D, Sina S, Haghani M. Designing a shield with lead-free polymer base with high radiation protection for X-ray photons in the range of diagnostic radiology using monte carlo simulation Code MCNP5 [in Persian]. J Isfahan Med Sch 2016; 34(385): 637-41.
47. Aghamiri MR, Mortazavi SMJ, Tayebi M, Mosleh-Shirazi M, Baharvand H, Tavakkoli-Golpayegani A, et al. A novel design for production of efficient flexible lead-free shields against X-ray photons in diagnostic energy range. J Biomed Phys Eng 2011; 1(1): 17-21.
48. Thumwong A, Darachai J, Saenboonruang K. Comparative X-ray shielding properties of single-layered and multi-layered Bi2O3/NR composites: Simulation and numerical studies. Polymers (Basel) 2022; 14(9): 1788.
49. Poltabtim W, Wimolmala E, Markpin T, Sombatsompop N, Rosarpitak V, Saenboonruang K. X-ray shielding, mechanical, physical, and water absorption properties of wood/PVC composites containing bismuth oxide. Polymers (Basel) 2021; 13(13): 2212.
50. Yılmaz SN, Güngör A, Özdemir T. The investigations of mechanical, thermal and rheological properties of polydimethylsiloxane/bismuth (III) oxide composite for X/Gamma ray shielding. Radiat Phys Chem 2020; 170: 108649.
51. Azman NZN, Ramzun MR. Polymeric composites for X-ray shielding applications. In: LowM, Dong Y, editors. Composite materials: Manufacturing, properties and applications. Amsterdam, Netherlands: Elsevier; 2021. p. 503-41.
52. Alshahri S, Alsuhybani M, Alosime E, Almurayshid M, Alrwais A, Alotaibi S. LDPE/bismuth oxide nanocomposite: Preparation, characterization and application in X-ray shielding. Polymers (Basel) 2021; 13(18): 3081.
53. Almurayshid M, Alssalim Y, Aksouh F, Almsalam R, ALQahtani M, Sayyed M, et al. Development of new lead-free composite materials as potential radiation shields. Materials (Basel) 2021; 14(17): 4957.
54. Li Z, Zhou W, Zhang X, Gao Y, Guo S. High-efficiency, flexibility and lead-free X-ray shielding multilayered polymer composites: layered structure design and shielding mechanism. Sci Rep 2021; 11(1): 4384.
55. Gilys L, Griškonis E, Griškevičius P, Adlienė D. Lead free multilayered polymer composites for radiation shielding. Polymers (Basel) 2022; 14(9): 1696.
56. Sayyed M, Ersundu MÇ, Ersundu AE, Lakshminarayana G, Kostka P. Investigation of radiation shielding properties for MeO-PbCl2-TeO2 (MeO = Bi2O3, MoO3, Sb2O3, WO3, ZnO) glasses. Radiat Phys Chem 2018; 144: 419-25.
57. Hussein KI, Alqahtani MS, Grelowska I, Reben M, Afifi H, Zahran H, et al. Optically transparent glass modified with metal oxides for X-rays and gamma rays shielding material. J Xray Sci Technol 2021; 29(2): 331-45.
58. AlBuriahi M, Hegazy HH, Alresheedi F, Olarinoye IO, Algarni H, Tekin HO, et al. Effect of CdO addition on photon, electron, and neutron attenuation properties of boro-tellurite glasses. Ceram Int 2021; 47(5): 5951-8.
59. Kassab LRP, da Silva Mattos GR, Issa SAM, Bilal G, Bordon CDS, Kilic G, et al. Optical and physical behaviours of newly developed germanium-tellurium (GeTe) glasses: a comprehensive experimental and in-silico study with commercial glasses and ordinary shields. J Mater Sci Mater Electron 2021; 32(18): 22953-73.
60. Alharshan GA, Alrowaili ZA, Olarinoye IO, Al-Buriahi MS. Holmium (III) oxide and its significant

effects on the radiation shielding performance of P2O5 + B2O3 + ZnSO4 optical glasses. Optik 2022; 261: 169188.
61. Verdipoor K, Alemi A, Mesbahi A. Photon mass attenuation coefficients of a silicon resin loaded with WO 3 , PbO, and Bi 2 O 3 Micro and Nano-particles for radiation shielding. Radiat Phys Chem 2018; 147: 85-90.
62. Jayakumar S, Saravanan T, Philip J. Preparation, characterization and X-ray attenuation property of Gd2O3-based nanocomposites. Appl Nanosci 2017; 7(8): 919-31.
63. Mansouri E, Mesbahi A, Malekzadeh R, Mansouri A. Shielding characteristics of nanocomposites for protection against X- and gamma rays in medical applications: effect of particle size, photon energy and nano-particle concentration. Radiat Environ Biophys 2020; 59(4): 583-600.
64. Thibeault SA, Kang JH, Sauti G, Park C, Fay CC, King GC. Nanomaterials for radiation shielding. Mrs Bulletin 2015; 40(10): 836-41.
65. Muthamma MV, Prabhu S, Bubbly SG, Gudennavar SB. Micro and nano Bi2O3 filled epoxy composites: Thermal, mechanical and γ-ray attenuation properties. Appl Radiat Isot 2021; 174: 109780.
66. Hosseini MA, Malekie S, Kazemi F. Experimental evaluation of gamma radiation shielding characteristics of polyvinyl alcohol/tungsten oxide composite: A comparison study of micro and nano sizes of the fillers. NIM-A 2022; 1026: 166214.
67. Mirji R, Lobo B, Radiation shielding materials: A brief review on methods, scope and significance. Proceedings of the National Conference on 'Advances in VLSI and Microelectronics. PC Jabin Science College, Huballi, India; 2017.
68. Künzel R, Okuno E. X-ray spectroscopy applied to the study of the radiation transmission through nano materials. Rev Bras de Ensino de Fis 2011; 5(2): 209-12.
69. Künzel R, Okuno E. Effects of the particle sizes and concentrations on the X-ray absorption by CuO compounds. Appl Radiat Isot 2012; 70(4): 781-4.
70. Friedman H, Singh M. Radiation transmission measurements for Demron fabric: United States. Department of Energy; 2003.
71. Taylor EW. Organics, polymers and nanotechnology for radiation hardening and shielding applications. Proceeding of the Nanophotonics and Macrophotonics for Space Environments; 26 Sep 2007. California, CA: International Society for Optics and Photonics; 2007.
72. El Haber F, Froyer G. Transparent polymers embedding nanoparticles for X-rays attenuation. J Univ Chem Technol Metall 2008; 43(3): 283-90.
73. Botelho MZ, Künzel R, Okuno E, Levenhagen RS, Basegio T, Bergmann CP. X-ray transmission through nanostructured and microstructured CuO materials. Appl Radiat Isot 2011; 69(2): 527-30.
74. Malekzadeh R, Mehnati P, Sooteh MY, Mesbahi A. Influence of the size of nano- and microparticles and photon energy on mass attenuation coefficients of bismuth-silicon shields in diagnostic radiology. Radiol Phys Technol 2019; 12(3): 325-34.
75. Aghaz A, Faghihi R, Mortazavi S, Haghparast A, Mehdizadeh S, Sina S. Radiation attenuation properties of shields containing micro and Nano WO3 in diagnostic X-ray energy range. Int J Radiat Res 2016; 14(2): 127-31.
76. Abdalsalam AH, Sayyed MI, Hussein TA, Şakar E, Mhareb MHA, Şakar BC, et al. A study of gamma attenuation property of UHMWPE/Bi2O3 nanocomposites. Chemical Physics 2019; 523: 92-8.
77. Abdalsalam AH, Şakar E, Kaky KM, Mhareb MHA, Şakar BC, Sayyed MI, et al. Investigation of gamma ray attenuation features of bismuth oxide nano powder reinforced high-density polyethylene matrix composites. Radiat Phys Chem 2020; 168: 108537.
78. Noor Azman NZ, Siddiqui SA, Haroosh HJ, Albetran HMM, Johannessen B, Dong Y, et al. Characteristics of X-ray attenuation in electrospun bismuth oxide/polylactic acid nanofibre mats. J Synchrotron Radia 2013; 20(Pt 5): 741-8.
79. Noor Azman NZ, Musa NFL, Nik Ab Razak NNA, Ramli R, Shahrim I, Rahman A, et al. Effect of Bi2O3 particle sizes and addition of starch into Bi2O3-PVA composites for X-ray shielding. Applied Physics A 2016; 122(9): 818.
80. Rashidi M, Saffari M, Shirkhanloo H, Avadi MR. Evaluating X-ray absorption of nano-bismuth oxide ointment for decreasing risks associated with X-ray exposure among operating room personnel and radiology experts. J Health Saf Work 2015; 5(4): 13-22.
81. Alavain H, Tavakoli-Anbaran H. Study on gamma shielding polymer composites reinforced with different sizes and proportions of tungsten particles using MCNP code. Prog Nucl Energy 2019; 115: 91-8.
82. Prabhu S, Bubbly SG, Gudennavar SB. Thermal, mechanical and γ-ray shielding properties of micro- and nano-Ta2O5 loaded DGEBA epoxy resin composites. J Appl Polym Sci 2021; 138(44): 51289.
83. Li Z, Zhou W, Zhang X, Gao Y, Guo S. High-efficiency, flexibility and lead-free X-ray shielding multilayered polymer composites: layered structure design and shielding mechanism. Sci Rep 2021; 11(1): 4384.

DOI: *10.48305/jims.v40.i691.0832*

Journal of Isfahan Medical School **Vol. 40, No. 691, 3rd Week, December 2022**

Received: 20.08.2022 Accepted: 18.10.2022 Published: 12.12.2022

Application of Lead Substitute Shielding Materials for X and Gamma-Rays Attenuation in Diagnostic Radiology: A Review Article

Arash Safari[1,3], Seyed Mohammad Javad Mortazavi[2,3], Pouya Saraei[4]

Review Article

Abstract

Lead is the most widely used material for radiation protection in diagnostic radiology because its ability to attenuate x-rays is superior to other materials due to its high atomic number, high density, and its higher economic affordability. However, lead shields have serious disadvantages, such as high toxicity, heavy weight, poor flexibility, and low chemical stability. These disadvantages have oriented extensive research toward the use of non-lead composite shields. This study aims to review the materials and compounds proposed as alternatives to lead in x-ray shields and investigate their effectiveness in removing the limitations of standard lead shields. In total, 83 articles were reviewed using databases such as Google Scholar, Medline, Web of Science, Scopus, and Embase with the keywords of radiation protection, lead-free shields, and dianostic radiology. Since a wide range of materials can be used as radiation shields, the results show that in addition to the atomic number, the size of the particles can also be effective in increasing the radiation attenuation efficiency to the extent that the nano-sized non-lead shields have been more effective in radiation protection. Also, compared to common single and combined materials, multilayer polymer composites have better photon attenuation capability and reduce the possibility of x-ray penetration more effectively. Research to find appropriate alternative materials for lead and the optimization of the efficacy of radiation shields, should be continued, as it is difficult to achieve a light, flexible, low cost shield with a high x-ray attenuation in the entire range of diagnostic photon energies.

Keywords: Radiation protection; Lead-free shields; Diagnostic radiology

Citation: Safari A, Mortazavi SMJ, Saraei P. **Application of Lead Substitute Shielding Materials for X and Gamma-Rays Attenuation in Diagnostic Radiology: A Review Article.** J Isfahan Med Sch 2022; 40(691): 832-42.

1- Assistant Professor, Department of Radiology, School of Paramedical Sciences, Shiraz University of Medical Sciences, Shiraz, Iran
2- Professor, Department of Medical Physics, School of Medicine, Shiraz University of Medical Sciences, Shiraz, Iran
3- Ionizing and Non-Ionizing Radiation Protection Research Center (INIRPRC), School of Paramedical Sciences, Shiraz University of Medical Sciences, Shiraz, Iran
4- MSc Student, Department of Radiology, School of Paramedical Sciences, Shiraz University of Medical Sciences, Shiraz, Iran
Corresponding Author: Seyed Mohammad Javad Mortazavi, Professor, Department of Medical Physics, School of Medicine, Shiraz University of Medical Sciences, Shiraz, Iran; Email: mortazavismj@gmail.com