

مروری بر پوشش‌های محافظتی در برابر پرتو ایکس با استفاده از مواد معدنی در کاربردهای پزشکی

فاطمه ایمانی پور^۱، محمد خواجه مهریزی^{۲*}، پدرام پیوندی^۲، محمد اسلامی کلانتری^۳

۱- کارشناس ارشد، دانشکده مهندسی نساجی، دانشگاه یزد، یزد، ایران، صندوق پستی: ۸۹۱۹۵-۷۴۱

۲- دانشیار، دانشکده مهندسی نساجی، دانشگاه یزد، یزد، ایران، صندوق پستی: ۸۹۱۹۵-۷۴۱

۳- استادیار، دانشکده فیزیک، دانشگاه یزد، یزد، ایران، صندوق پستی: ۸۹۱۹۵-۷۴۱

تاریخ دریافت: ۹۸/۰۳/۲۳ تاریخ بازبینی نهایی: ۹۸/۰۹/۰۵ تاریخ پذیرش: ۹۸/۰۹/۰۶ در دسترس به صورت الکترونیک: ۹۸/۱۲/۷

چکیده

انسان با پیشرفت فناوری همواره در برابر خطرات ناشی از پرتو به خصوص پرتو یون‌ساز ایکس و گاما قرار دارد. از پرتو ایکس در بخش‌های مختلفی اعم از پزشکی، صنعتی و کشاورزی استفاده می‌شود. از آنجایی که بیشترین کاربرد پرتو ایکس در بخش پزشکی است، بسیاری از افراد از جمله بیماران و بیشکان و کارکنان بیمارستان در برابر خطرات ناشی از این پرتو قرار دارند. تاکنون تلاش‌های بسیاری برای محافظت این افراد صورت گرفته که استفاده از کابین‌ها و منسوجات پوشش داده شده با مواد سربی یکی از این موارد است. محققان بنا به دلایلی همچون سمی‌بودن، سنگینی، انعطاف‌پذیرنبوذ و غیره در صدد جایگزینی سرب هستند. در این مقاله، به بررسی مواد معدنی همچون باریم، تنگستن، بیسموت و قلع که به عنوان جاذب پرتوهای یون‌ساز مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است، پرداخته شده است. نتایج محققان نشان داد که این مواد می‌توانند با وزنی کمتر، زیست‌سازگاری و انعطاف‌پذیری بیشتری نسبت به سرب، پرتوهای ایکس را تا حد قابل قبولی تضعیف سازند. هم‌چنین، میزان جذب پرتو ایکس به اندازه ذره ماده معدنی، ضریب تضعیف ماده و ضخامت ماده جاذب بستگی دارد. در این مقاله، انواع مواد معدنی جاذب پرتو ایکس و مقایسه آن‌ها با سرب به طور اجمالی مورد بررسی قرار می‌گیرد.

واژه‌های کلیدی

مواد جاذب پرتوهای ایکس، مواد معدنی، پوشش محافظ پرتو، سرب.

چکیده تصویری





A Review of X-ray Shielding Coatings Using Mineral Materials in Medical Applications

Fatemeh Imanipoor¹, Mohammad. Khajeh Mehrizi^{*1}, Pedram Payvandy¹, Mohammad Eslami Kalantari²

1- Textile Engineering Department, Yazd University, P. O. Box: 89195-741, Yazd, Iran

2- Physics Department, Yazd University, P. O. Box: 89195-741, Yazd, Iran.

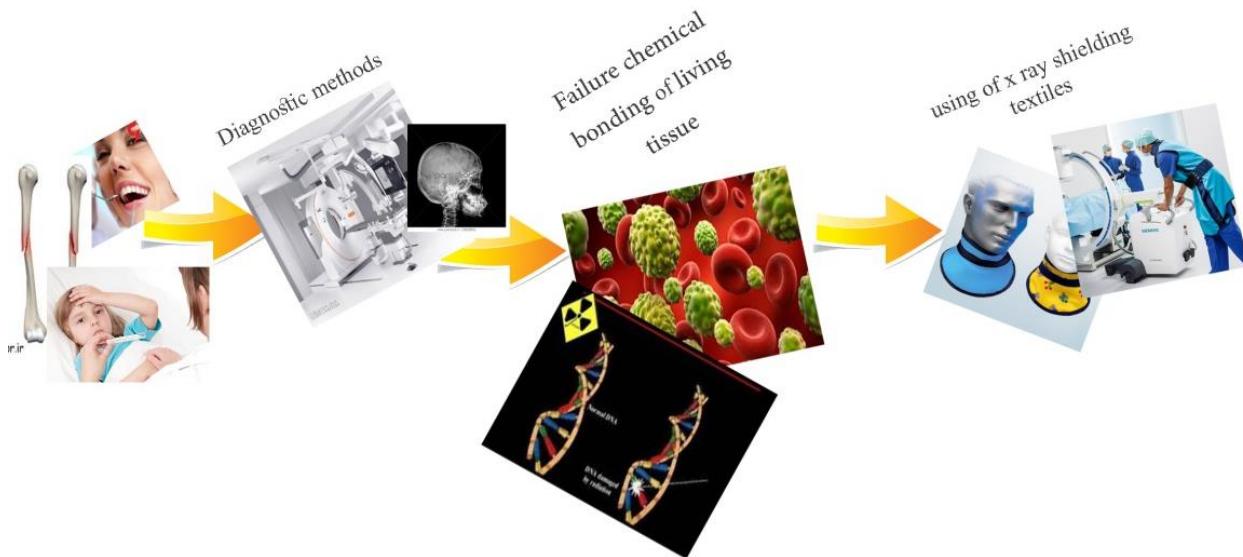
Abstract

With the advancement of technology, humans are always against the dangers of waves, especially ionized waves, such as X and Gamma waves. X-rays are used in various sections such as medicine, industry, and agriculture. Since most X-rays are used in the medical sector, many people including patients, doctors and hospital staff, are at risk from the dangers of this wave. So far, there have been many attempts to protect these people, which include the use of lead cabins and textiles coated with lead. But researchers, because of toxicity, heavy, un-flexibility and etc are studying for alternative of lead. In this paper, mineral materials such as barium, tungsten, bismuth and tin as absorb of ionized rays has attracted the attention of researchers. The results showed these materials have been able to attenuation the X-rays an acceptable level with less weight, more biocompatibility and flexibility than lead. Also, the scientists' observations showed that the amount of X-ray absorption depends on the size of the mineral, the attenuation coefficient, and the thickness of the adsorbent. In this paper, the types of X-ray absorber minerals and their comparison with lead are briefly examined.

Keywords

X-rays absorbent materials, Inorganic materials, X-ray coated protective, Lead.

Graphical abstract



۱- مقدمه

تشخیص بیماری، بررسی روند درمان و پشتیبانی از برنامه‌های درمانی و پزشکی استفاده می‌شود. به همین خاطر، امروزه استفاده از پرتوهای یون‌ساز به امری اجتناب‌ناپذیر تبدیل شده است اما این پرتوها می‌توانند سبب ایجاد آسیب‌های جدی و برگشت‌ناپذیر و غیرقابل درمان، در افرادی که به نحوی با پرتو سر و کار دارند و یا افرادی که جهت تشخیص و درمان مراجعه می‌نمایند، شود. تماس با مقدار بیش از حد مجاز پرتوهای یون‌ساز می‌تواند اثراتی روی دستگاه خون‌ساز، دستگاه گوارش بدن، سیستم اعصاب مرکزی و در نهایت کل بدن بگذارد یا ممکن است آثار آن در نسل‌های بعدی ظاهر شود. اگر در به کارگیری این پرتوها بهترین شرایط کنترلی و حفاظتی اعمال شود، باز هم کارکنان و بیماران در معرض تابش مقداری از این پرتوها خواهند بود. در واقع نمی‌توان صدرصد جلوی نفوذ این پرتوها را گرفت، بلکه می‌توان متناسب با زمان تابش و شدت آن محافظه‌ای طراحی نمود تا میزان دریافتی کارکنان و بیماران حداقل در حد مجاز پرتوگیری شغلی، کنترل شود. استفاده صحیح و مناسب از وسایل حفاظت فردی در رعایت مقررات و آیین نامه‌های موجود در امر حفاظت سازمان که در آن دستگاه‌های مولد یا منبع پرتوهای یون‌ساز قرار دارند، می‌توانند تا حد زیادی این آسیب‌ها و اثرات را کاهش دهد [۵].

منسوجات بخش جدایی‌ناپذیر از اکثر تجهیزات حفاظتی هستند. پوشش محافظت با استفاده از تکنولوژی تولید نساجی سنتی مانند بافت‌گی، تاری پودی و بی‌بافت و همچنین با روش‌های تخصصی مانند سوزن‌دوزی و بافت‌گی سه‌بعدی با استفاده از الیاف طبیعی و بشرساخت تولید می‌شود. پوشش محافظت در حال حاضر بخش عمده‌ای از منسوجات طبقه‌بندی شده به عنوان منسوجات صنعتی یا فنی می‌باشد [۶]. طی سال‌های گذشته، پس از کشف پرتو ایکس، از سرب و پوشش‌های سربی به علت داشتن عدد اتمی بالا و توانایی زیاد در جذب پرتو ایکس، به عنوان محافظ در برابر آن استفاده می‌شود. محققین زیادی نیز به بهبود خواص سرب، مانند وزن و انعطاف پذیری آن با استفاده از کامپوزیت‌ها پرداختند. به عنوان مثال، صدیقی و همکارانش در سال ۲۰۱۳، کامپوزیت‌هایی بر پایه پلیمر اپوکسی با پرکننده‌های میکروساختاری تراکسید سرب و سرب اکسید، PbO به منظور ماده محافظ پرتو ایکس ساختند. ضخامت 5 mm این کامپوزیت، نسبت به نمونه‌های سربی کمتر بود. نتایج نشان داد کامپوزیت‌های اپوکسی پر شده با ذرات PbO خواص تضعیف خوبی در مقابل پرتوهای ایکس دارند و می‌توانند به عنوان محافظ پرتو در رادیولوژی استفاده شود [۸]. اما سرب به خاطر موارد متعددی مانند سنگین بودن پوشش‌های سربی که در طولانی مدت سبب آسیب‌های فیزیکی برای کارکنان پزشکی می‌شود [۹] و دارا نبودن ویژگی‌های راحتی به عنوان یک محصول پوشیدنی، مانند عدم نفوذ آب و هوا به درون سرب، نداشتن انعطاف‌پذیری و مهم‌تر از همه، سمی بودن این ماده، که طبق آزادی از تأثیرات مواد سمی و ثبت بیماری‌ها، سرب دومین ماده سمی است (ATSDR, 2013) و همچنین، سختی استفاده و دفع سرب بعد از استفاده، نگرانی عمده‌ای را به ویژه برای کشورهای در حال توسعه به دلیل ارتباط آن با خطرات زیست‌محیطی ایجاد می‌کند [۱۰]. بنابراین جایگزینی سرب با دیگر مواد ممکن، به موضوعات مورد بحث محققان تبدیل شده است. در بی جایگزینی سرب، مواد معدنی با عدد اتمی بالا و چگالی زیاد که توانایی

پرتو، به تابش الکترومغناطیسی^۱ و ذرات حامل انرژی که در خلاء یا ماده منتشر می‌شوند گفته می‌شود. پرتوها، بسته به انرژی‌شان دارای جرم‌های متفاوتی هستند. قدرت نفوذ آن‌ها در ماده، بر اساس میزان انرژی آن‌ها است. به عبارتی پرتوها به دو دسته‌ی یون‌ساز و غیر یون‌ساز تقسیم می‌شوند. پرتوهای غیریون‌ساز انرژی لازم برای یونیزه کردن ماده را ندارند که شامل پرتو زیرقرمز، مرئی، فرابینکش و پرتو رادیویی و مایکروویو می‌باشند [۱۲]. پرتو ایکس و گاما دو نوع تابش یون‌ساز می‌باشند. با این تفاوت که گاما منشا هسته‌ای دارد ولی ایکس دارای منشأ اتمی است. این پرتوها با عبور از ماده، یون‌سازی می‌کنند و نهایتاً جذب ماده می‌شوند یا انرژی آن‌ها کاهش می‌یابد به دلیل انرژی و بسامدهای بسیار بالا، این نوع از پرتو الکترومغناطیسی، باعث شکست پیوندهای شیمیایی در بافت‌های زنده می‌گردد [۳].

۲- نحوه تولید پرتو ایکس و انواع آن

پرتو ایکس وقتی تولید می‌شود که الکترون‌ها با یک هدف فلزی برخورد می‌کنند. الکترون‌ها از یک فیلامنت گرمادیده آزاد می‌شوند و با یک جریان ولتاژ بالا به سمت هدف فلزی شتاب داده می‌شوند. در برخورد این الکترون‌ها با هدف، انرژی آن‌ها تبدیل به پرتو ایکس می‌شود. پرتو ایکس عموماً به دو نوع مختلف تقسیم می‌شود: پرتو ایکس نرم و پرتو ایکس سخت. پرتو ایکس نرم در طیف الکترومغناطیسی بین نور فرابینکش و پرتو گاما قرار دارد. این نوع پرتو ایکس فرکانس نسبتاً بالا (بین $10^{16} \times 10^{18}$ چرخه در ثانیه یا هرتز) و طول موج نسبتاً کوتاه (بین ۱۰ نانومتر تا ۱۰۰ پیکومتر) دارد. فرکانس پرتو ایکس سخت بین 10^{18} تا بیش از 10^{20} هرتز و طول موج آن بین ۱۰۰ پیکومتر تا یک پیکومتر است. پرتو ایکس سخت در طیف الکترومغناطیسی در همان محدوده پرتو گاما قرار می‌گیرد. تنها تفاوت پرتو گاما و پرتو ایکس سخت در منبع آن‌ها است؛ پرتو ایکس توسط الکترون‌های شتاب‌دهنده تولید می‌شوند اما پرتو گاما در هسته اتم ساخته می‌شود [۴].

۳- اهمیت پوشش محافظ در برابر پرتو ایکس

با شناخت پرتوهای ایکس و گاما توسط بشر، استفاده از این پرتوهای الکترومغناطیس نافذ به سرعت در زمینه‌های مختلف مانند روش‌های تشخیصی (نظیر انواع رادیوگرافی و ماموگرافی)، درمان توده‌های سرطانی (توضیح روش‌های مختلف پرتو درمانی) و نیز رادیوگرافی صنعتی گسترش یافت. اما استفاده اصلی از پرتو ایکس تصویربرداری از استخوان‌ها است که به راحتی از پس بافت‌های نرم اطراف استخوان قابل تشخیص است. توموگرافی کامپیوترا یا همان سی تی اسکن چندین تصویر پرتو ایکس را به مدل سه‌بعدی منطقه موردنظر تبدیل می‌کند. تصویربرداری پرتو ایکس یکی از مهم‌ترین ابزارهای پزشکی است که کاربردهای بسیار گسترده‌ای دارد. از این روش به عنوان یک روش غیرتھاجمی و بدون درد برای

^۱ Electromagnetic Radiation

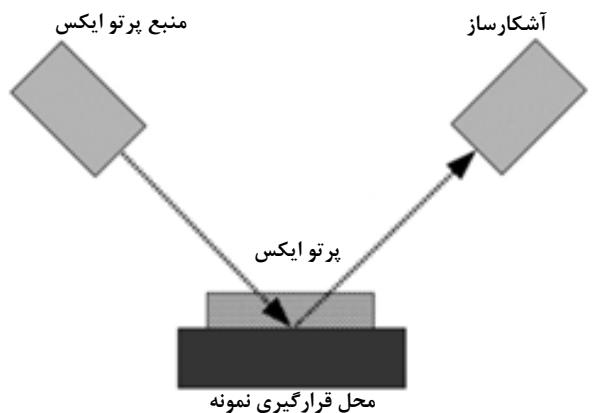
مقاله

۴- کاربرد مواد معدنی در پوشش‌های محافظت پرتو ایکس
 مواد رایج نساجی به دلیل شکل و موقعیت شیمیابی که در ساختار خود دارند، خواص جذب پرتو ایکس قابل توجهی ندارند. الیاف پایه از پلیمرهای آلی که شامل عنصرهای اصلی هیدروژن، اکسیژن، کربن و نیتروژن هستند ساخته شدن. این عناصر سبک با عدد اتمی پایین، ضریب جذب پرتو ایکس کمی دارند، اما در مقابل، مواد معدنی تشکیل شده از عناصر سنگین با عدد اتمی بالا به علت افزایش الکترون طرفیت این مواد، دارای خواص جذب پرتو ایکس بالای می‌باشند. برای رسیدن به یک منسوج انعطاف‌پذیر با خواص جذب پرتو ایکس بالا، هردی این مواد، پلیمرهای آلی و معدنی جاذب پرتو ایکس، می‌توانند به عنوان یک منسوج کامپوزیت آلی /معدنی ترکیب شوند [۱۲-۱۳].

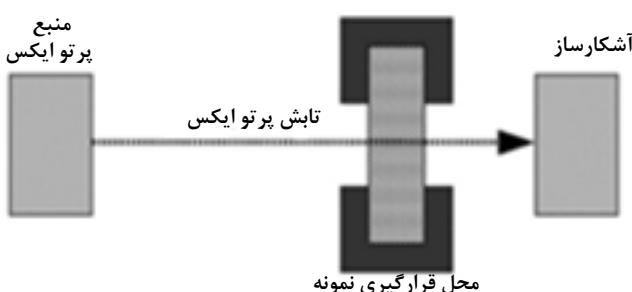
۵- انواع روش‌های تولید منسوج محافظ

۱-۱- سل-ژل

یکی از روش‌های تولید منسوج محافظ، تکمیل منسوج به روش سل-ژل می‌باشد. هرچند با این روش می‌توان به کاهش چشم‌گیری در عبور پرتو ایکس دست یافت، اما یافته‌ها نشان دهنده آن است که با افزایش ضخامت فیلم، مقاومت سایشی کاهش می‌یابد و زبردست منسوج، سفت و شق خواهد بود. با این حال، روش سل-ژل باعث شد که گام‌های بعدی در راستای آمده‌سازی ماده‌های غیرسریبی با راحتی پوششی زیاد با خواص جذب پرتو ایکس قابل توجهی صورت بگیرد [۱۱].



شکل ۱- طرح‌واره‌ای از چیدمان اندازه‌گیری غیرمستقیم پرتو ایکس [۱۱]



شکل ۲- طرح‌واره‌ای از چیدمان اندازه‌گیری مستقیم پرتو ایکس [۱۰]

جذب پرتو ایکس را دارند به عنوان ماده جاذب پرتو ایکس و جایگزین سرب مورد توجه محققان قرار گرفته است. در ادامه این مقاله، مروی بر کارهای انجام شده در زمینه روش‌های تولید پوشش‌های معدنی محافظ پرتو ایکس، عوامل موثر در بهبود کارایی آن و بررسی حفظ خواص مکانیکی منسوج در عین حفظ ویژگی‌های محافظتی پوشش‌های معدنی صورت گرفته است.

۳- روش‌های اندازه‌گیری میزان محافظت در برابر پرتو ایکس
 توانایی محافظتی تابش نمونه‌ها در ولتاژ‌های مختلف مطابق با استاندارهای کاربردی پژوهشی اندازه‌گیری می‌شود. برای اندازه‌گیری میزان جذب پرتو ایکس از دو روش می‌توان استفاده کرد.

۱-۳- روش غیرمستقیم

این روش، که طرح‌واره آن در شکل ۱ نشان داده شده است از عبور غیرمستقیم پرتو ایکس استفاده می‌کند که منسوجی روی یک صفحه مسی قرار داده شده می‌شود. بنابراین، پرتو ایکس دوبار در منسوجات بدليل انعکاس تابش روی یک صفحه مسی نفوذ می‌کند [۱۱].

۲- روش مستقیم

در این روش، فاصله بین منبع انتشار پرتو ایکس و آشکارساز برحسب مورد نیاز تنظیم می‌شود. نمونه پارچه‌های پوشش داده شده با مواد محافظ بین آشکارساز و منبع انتشار پرتو، در یک موقعیت خیلی نزدیک به آشکارساز قرار می‌گیرند. طرح‌واره‌ای از روش اندازه‌گیری محافظت پرتو ایکس در شکل ۲ آورده شده است. این روش برای اندازه‌گیری میزان عبور در شرایط عمومی پرتو ایکس استفاده می‌شود. این روش، تخمینی از بیشینه عبور یا در واقع حداقل جذب از منسوجات را نشان می‌دهد [۱۰].

میزان تضعیف پرتو ایکس یک ماده به وسیله قانون تضعیف نمایی توضیح داده می‌شود. ارتباط بین پرتو ایکس و ماده توسط رابطه ۱ نشان داده شده است.

$$(1) \quad I/I_0 = e^{-\mu t}$$

در رابطه ۱، I جریان پرتو تضعیف شده، I_0 جریان ورودی، t (cm) ضخامت ماده محافظتی و μ (1/cm) ضریب تضعیف‌سازی ماده حفاظتی است. ضریب تضعیف (μ) ویژگی شاخص ماده است که به انرژی پرتو بستگی دارد و می‌تواند طبق معادله ۲ که در زیر آمده تعیین شود [۱۲].

$$(2) \quad \mu = -\ln(\frac{I}{I_0})/t$$

نسبت تضعیف پرتو^۱ (RARs) برای هر نمونه با رابطه ۳ محاسبه می‌شود [۱۲].

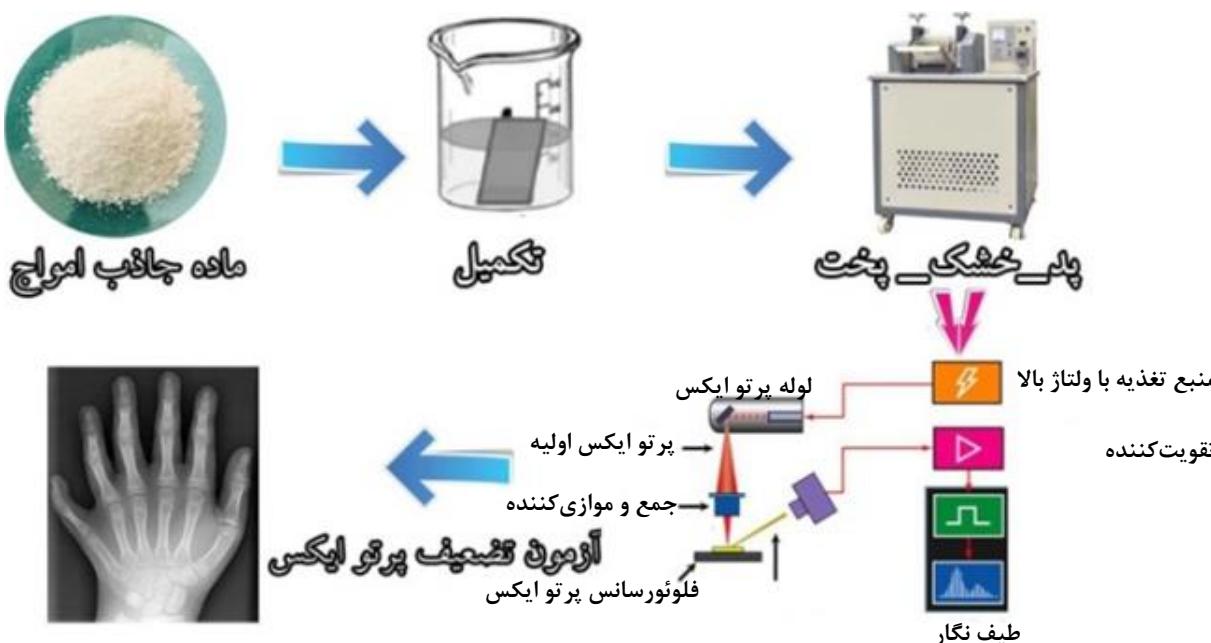
$$(3) \quad RARs\% = \frac{I_0 - I}{I} \times 100$$

^۱Radiation attenuation ration

هستند اما نسبت به پوشش‌های سربی، حدود ۹۴٪ سبک‌تر می‌باشند. هرچند استفاده از چند فیلامنți‌ها برای منسوجات فی‌و صنعتی به صرفه است اما در منسوجات پوشیدنی، به علت ذات شق و سفت خود، رایج نیستند. این در حالی است که نخ‌های تابیده به علت ساختار خود و داشتن پیز، زیردست نرم‌تر، راحتی بیشتری را به دنبال دارند. بهطور کلی، می‌توان مواد معدنی در غلظت‌های کم (۰.۲٪ یا کمتر) را برای مصارف متنوع و تولید الیاف استفاده کرد، اما ذکر این نکته حائز اهمیت است که در غلظت‌های زیاد، مواد معدنی چسبندگی بین الیاف را کاهش می‌دهند. به همین علت، لیف به راحتی می‌شکند در نتیجه تولید پارچه امکان‌پذیر نیست. هرچند الیاف چند فیلامنți‌می‌توانند به طور مستقیم به عنوان نخ پود در بافت پارچه به کار بrede شوند اما الیاف کوتاه نیازمند اعمال فرآیندهای متعددی مانند باز کردن، مخلوط کردن، تمیز کردن عدل الیاف به دسته الیاف در خط حلاجی، و سپس توده الیاف، با فرآیند کاردینگ و چندلاکنی، تمیز شده و نخریسی نهایی با ماشین روتور انجام می‌شود تا بتواند به عنوان نخ پود استفاده شود. مراحل طولانی فرآیند رسندگی الیاف کوتاه علی‌برای مقرون‌به‌صرفه نبودن استفاده از الیاف کوتاه برای تولید نخ محافظت پرتو ایکس می‌باشد [۱۵-۱۱].

۵- الکتروریسی

روش الکتروریسی الیاف با توجه به مزایای آن از قبیل عملکرد آسان، خواص مکانیکی عالی و سادگی تولید در مقیاس بزرگ، به عنوان یک روش مؤثر و مفید شناخته شده است. کامپوزیت‌های پلیمری به عنوان ماده پوششی در ساخت الیاف به طور گسترده‌ای مورد استفاده قرار می‌گیرند، زیرا می‌توانند نانو ذرات را در بستر پلیمر، تعییه کنند، بنابراین پراکندگی نانو ذرات و خواص نانو کامپوزیت‌های پلیمری را بهبود می‌بخشد [۱۰].



شکل ۳- طرح‌واره‌ای از روش کار تهیه منسوج محافظتی پرتو/ایکس [۱۴].

۲-۵- پد-خشک- پخت

این روش، به علت سادگی، در دسترس بودن، عدم نیاز به تجهیزات خاص و مقرر به صرفه بودن، مورد توجه محققان است. در این روش، ماده محافظه در رزین مناسبی با نسبت‌های مختلف وزنی، به صورت محلول تهیه می‌شود. سپس محلول بدست آمده بر روی پارچه مورد نظر که می‌تواند جنس‌های مختلفی اعم از پنبه، پلی‌استر، ویسکوز و غیره را شامل شود، پد می‌شود و در دمای مناسب که معمولاً دمایی بین ۶۰-۸۰ درجه سانتی گراد است، خشک شده و در نهایت در دمای بالا، پخت می‌شود. طرح‌واره‌ای از تهیه منسوج محافظه پوشش داده شده به روش معمول پد- خشک- پخت در شکل ۳ نشان داده شده است [۱۴]. از جمله مزایای این روش به توزیع نایکنواخت ماده بر روی منسوج، عدم ثبات سایشی و ثبات شستشوی منسوج به علت پیوندهای واندروالسی ماده با بستر منسوج، زیردست سفت و شق، انعطاف‌پذیری کم منسوج محافظه اشاره کرد.

۳- لایوسل

برای تولید نخ، گونتر^۱ و همکارانش، الیاف کامپوزیت را با روش لایوسل تولید کردند. لایوسل متفاوت از شرایط تولید لیف ویسکوز از یک فرآیند مستقیم حلal برای سلولز است که از حلالیت فیزیکی سلولز در N- متیل مورفولین-N- اکسید(NMNO) استفاده می‌کند. در این روش به جای اینکه ذرات معدنی با جذب بالای پرتو ایکس تنها بر روی سطح منسوج پوشش داده شوند، به بستر لیف نساجی افزوده می‌شوند و می‌توان الیاف چندفیلامنți و الیاف کوتاه تولید کرد. استفاده از نخ‌های چندفیلامنți حاوی مواد معدنی به علت وزن این مواد، نسبت به نخ‌های رایج موجود در نساجی سنگین تر

¹Gunther

مقاله

محصول در رادیولوژی برای کارکنان و بیماران برخوردار است. آرال^۱ و همکارانش، به بررسی این مهم پرداختند و تاثیر عوامل مختلفی مانند نوع سوزن و نخ دوخت، اندازه سوزن و تراکم بخیه را مورد بررسی قرار دادند. نتایج آن‌ها نشان داد که دوخت پارچه‌های پوشش داده شده با BaSO_4 به علت نیروی کمتری که به سوزن اعمال می‌کند، راحت‌تر است اما با توجه به شکل ۵ که تصویر SEM انواع پارچه‌های پوشش داده شده با انواع مواد معدنی (W , Bi , BaSO_4) را نشان می‌دهد، بیشترین آسیب ناشی از ورود سوزن خیاطی به پارچه را دارد [۱۸]. همچنین، مهلتیگ^۲ و همکارانش امکان دوخت‌پذیری منسوج را با دوخت دستکشی که از تولید دو نوع لیف محافظ پرتو ایکس F1 (ترکیبات: ۷۷/۲٪ سلوول، ۱۹٪ باریم سولفات و ۳/۸٪ گرافیت) و لیف F2 (ترکیبات: ۶۷٪ سلوول، ۳۰٪ اکسید بیسموت، ۳٪ گرافیت) با روش لاپوس، تهیه شده بود، نشان دادند.

¹ Aral

² Mahltig

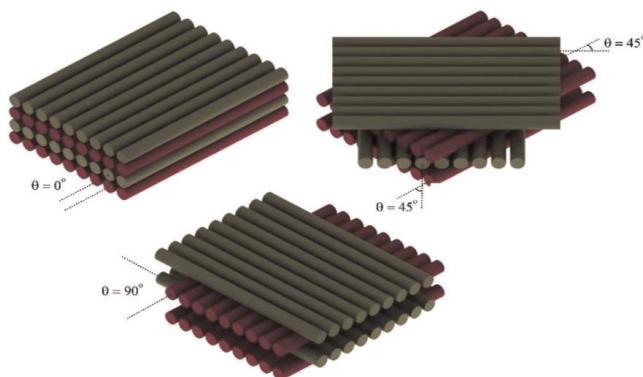
۵-۵- ذوب‌رسی

میرزایی و همکارانش با بررسی تحقیقات قبلی صورت گرفته، دریافتند که تا حال از فرآیند ذوب‌رسی برای تولید الیاف حاوی مواد معدنی جاذب پرتو ایکس استفاده نشده است. آن‌ها با این فرضیه که پوشک تولیدی از این روش، مقرن به صرفه، دارای ساختی آسان و مقاوم در برابر ترک است، می‌توانند به نتایج مطلوبی در خصوص منسوج محافظ دست یابند. آن‌ها نخ‌های پروپیلن تک فیلامنتی حاوی سرب و قلع را با قطرهای مختلفی با روش ذوب رسی تولید کردند [۱۶، ۱۷]. نتایج تحقیقات آن‌ها نشان داد که استفاده از ذرات فلزی با غلظت بیشتر و همچنین آرایش لایه‌ها با زاویه ۹۰° نخ پود، ضریب تعییف بیشتری را در پی دارد (شکل ۴).

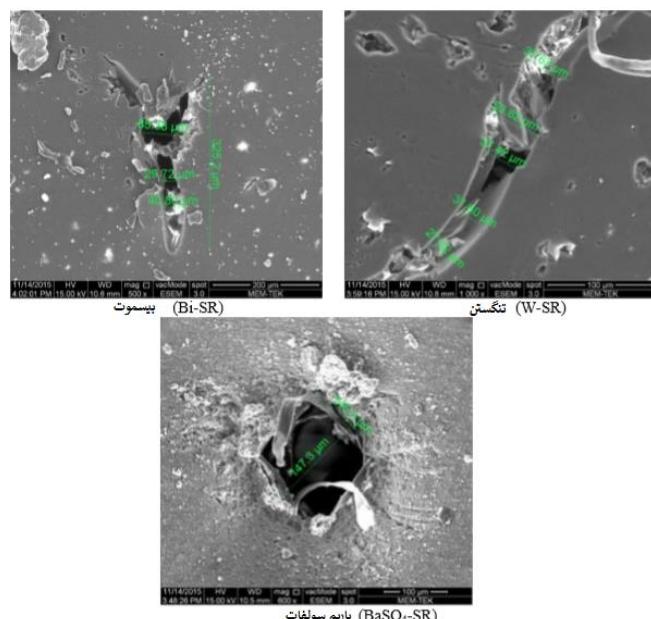
۶- قابلیت دوخت^۱ منسوج محافظ پرتو ایکس

این موضوع که بتوان منسوج محافظ پوشش داده شده با مواد معدنی را به منسوجی پوشیدنی تبدیل کرد، از اهمیت ویژه‌ای برای استفاده از این

¹ Sewability



شکل ۴- طرح‌واره‌ای از چیدمان نخ پود در نمونه‌ها [۱۷].



شکل ۵- تصویر SEM لایه سطحی پوشش داده شده روی پارچه [۱۸].

برای سه نوع پرتو ایکس در طیف‌های تولید شده در ولتاژهای ۷۵ و ۱۲ کیلوولت روش اندام‌های مختلف بدن اندازه‌گیری کردند. آن‌ها ضخامت قلع و قلع/بیسموت را به گونه‌ای انتخاب کردند که معادل 0.35 mm سرب باشد. نتایج آن‌ها نشان داد که میزان محافظت در برابر عدد لنفاوی توسط قلع در مقایسه با سرب در برابر پرتو ایکس به ترتیب برای ولتاژهای KV ۶۰ و ۱۲۰ برابر با 14.3% و 4.5% می‌باشد. همان‌طور که از مشاهدات آن‌ها مشخص است با افزایش انرژی تابش، میزان عبور پرتو ایکس، افزایش می‌یابد [۲۱]. اما در تحقیقی دیگر جمیل^۲ و همکارانش به نتایج متفاوتی رسیدند. شکل ۷ ضریب تضعیف جرمی نمونه‌ها بر حسب انرژی تابش را نشان می‌دهد. همان‌طور که از شکل ۷ مشخص است آن‌ها دریافتند که با افزایش انرژی پرتو ایکس از $8/64$ به $25/2 \text{ KV}$ ، ضریب جذب برای تمام ماده‌های پوششی پرکننده، کاهش می‌یابد که این می‌تواند به علت غالب بودن فرآیند فوتولکتریک در این محدوده انرژی باشد اما آن‌ها از ولتاژ $25/2 \text{ KV}$ $57/53$ یک جهش ناگهانی برای تمام نمونه‌ها مشاهده کردند. این جهش ناگهانی در افزایش میزان ضریب تضعیف را می‌توان به تاثیر لبه جذب کا^۳ عناصر بیسموت و تنگستن نسبت داد [۹]. تاثیر لبه جذب K را می‌توان به این صورت توجیه کرد که در طول موج های پایین (یعنی زمانی که پرتو ایکس انرژی زیادی دارد) مقدار جذب کم است و با افزایش طول موج، به خاطر کم شدن انرژی پرتو، جذب افزایش می‌یابد. میزان جذب متناسب با توان سوم طول موج پرتو ایکس است. وقتی که طول موج پرتو، بیش از لبه جذب مدار باشد، میزان جذب به طور ناگهانی کاهش پیدا می‌کند. بدیهی است که در این حالت، از آنجا که انرژی پرتو آن قدر نیست که بتواند باعث جدا کردن الکترون از مدار K شود، جذب نمی‌شود و بنابراین مقدار بیشتری از پرتو ایکس از ماده عبور می‌کند. به عبارت دیگر، پرتوی که طول موج آن بالاتر از لبه جذب K باشد، چون نمی‌تواند الکترون را از مدار خارج کند صرف این کار نمی‌شود و بنابراین جذب هم نمی‌شود. پس از لبه جذب، با افزایش طول موج، چون انرژی پرتو، کاهش می‌یابد جذب آن دوباره افزایش خواهد یافت [۲۲].

² Jamil³ K edge absorption

نتایج آن‌ها نشان داد که میزان جذب در تمام دستکش به دلیل ساختار باز منافذ به طور پیوسته توزیع نشده است. با توجه به شکل ۶-ب مشخص است که در مناطق روشن در نیمه بالایی و قسمت‌های درز دستکش به دلیل تراکم بیشتر مواد، جذب پرتو ایکس بیشتر است و خواص محافظتی بهتری را نشان می‌دهد. پیشنهاد می‌شود که برای بستن منافذ از منسوجات دوچاره برای افزایش ویژگی‌های محافظتی استفاده شود. شکل ۶-الف تصویری از دستکش تولید شده را نشان می‌دهد. شکل ۶-ب دستکش کامل بازسازی شده از CT را نشان می‌دهد [۱۵]. مطالعات محققین نشان داد که منسوجه‌های محافظ پوشش داده شده با مواد معدنی، قابلیت دوخت خوبی دارند و می‌توان از این منسوجات، در تولید پوشش اکس محافظ پرتو ایکس استفاده کرد.

۷- عوامل موثر در میزان جذب پرتو ایکس پوشش‌های محافظ

برای کنترل میزان یا تابش دریافت شده از چشمۀ انرژی، عواملی مانند زمان، فاصله و حفاظتسازی وجود دارند. هر چه زمان تابش دهی کمتر باشد، میزان مؤثر نیز کاهش می‌یابد. هم‌چنین، هر چه فاصله از چشمۀ پرتوزا بیشتر باشد، خطرات تابشی در محل مورد تابش قرار گرفته، کمتر می‌شود. فاصله گرفتن از چشمۀ یکی از روش‌های آسان برای کم کردن خطرات تابشی است [۱۶]. استفاده از پوشش‌های محافظ، یکی از مواردی است که میزان تابش دریافتی را کاهش می‌دهد. با تولید پوشش محافظ مناسب می‌توان میزان قابل توجهی از پرتوهای ایکس را کاهش داد. پوشش محافظ بسته به شدت تابش، ضخامت ماده پوشش داده شده، نوع ماده و اندازه ذرات مواد پوششی، می‌تواند درصدهای متفاوتی از پرتوهای ایکس را تضعیف کند [۱۶].

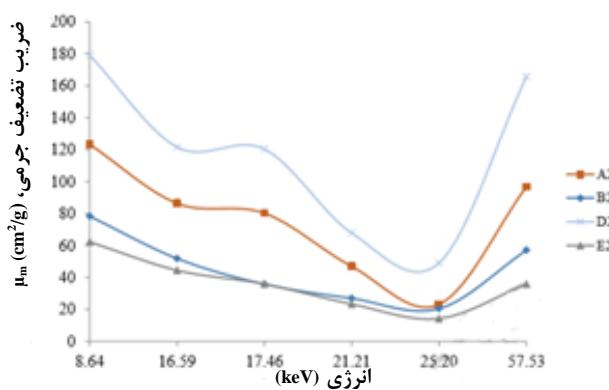
۷-۱- شدت تابش

انرژی تابشی در رادیولوژی معمولاً، در محدوده‌های پایین، بین $40-120 \text{ KV}$ می‌باشد. انرژی تابشی یکی از عواملی است که در جذب یا تضعیف پرتو ایکس تاثیر دارد به طوری که با افزایش شدت تابش، میزان جذب کاهش می‌یابد [۲۰]. برای مثال، اشلاتی^۱ و همکارانش در سال ۲۰۰۷ خواص محافظتی دو ماده غیرسرب (قلع و ترکیبی از $80\% \text{ قلع} \text{ و } 20\% \text{ بیسموت}$) را

¹ Schlatti

شکل ۶- (الف) تصویری از دستکش تولید شده و (ب) نمای حجمی از دستکش بازسازی شده از آزمایش CT [۱۵].

مقاله

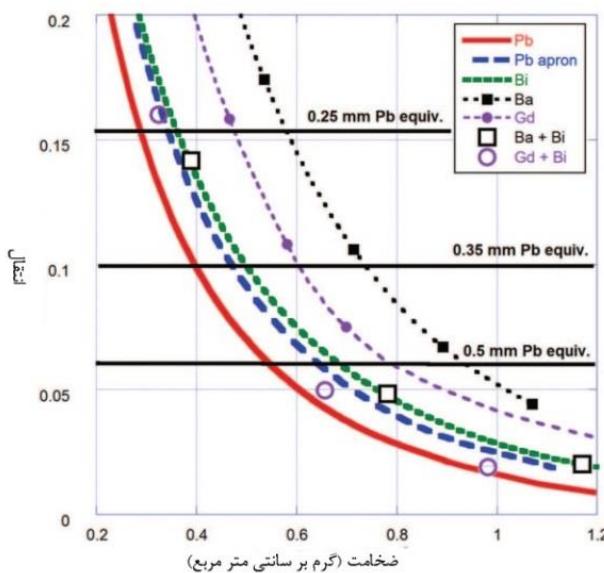


شکل ۷ - ضریب تضعیف جرمی نمونه‌ها بر حسب میزان انرژی [۹].

کارکردند. از نتایج آن‌ها مشخص شد که افزایش ضخامت مواد سربی و غیرسربی تاثیر مستقیمی بر روی میزان تضعیف پرتو ایکس دارد و مواد غیرسربی توانسته‌اند تضعیف مطلوبی بهتر از سرب یا به اندازه سرب را به ارمغان داشته باشند. همان‌طور که از شکل ۸ مشخص است مواد بیسموت اکسید محافظت تابش، برای محدوده انرژی ۶۰ KVp تا ۱۳۰ KVp نتایج یکسانی با نمونه‌های سربی را نشان دادند [۲۶].

جدول ۱ - درصد شدت تضعیف و ضریب تضعیف نمونه تکمیلی با اکسید بیسموت [۲۵].

ضریب تضعیف (μ/cm)	شدت تضعیف (%)	لایه
۱۲/۶۸	۳۷/۹۳	۱
	۴۱/۷۷	۲
	۵۲/۲۵	۳
	۵۶/۷۹	۴



شکل ۸ - مقایسه بین سرب و مواد غیرسربی بر حسب انتقال و ضخامت [۲۶].

کاظم‌پور و همکارانش نشان دادند که در انرژی‌های پایین، (۴۰ KVp) هنوز سرب و کامپوزیت‌های سرب بهترین مواد برای تضعیف تابش W-Sn-Cd-(۶۰KVp و ۹۰KVp) کامپوزیت‌های (EPVC) تضعیف بهتری نسبت به سرب و کامپوزیت‌های سرب نشان دادند. کامپوزیت‌های (W-Sn-Ba-EPVC) نتایج یکسانی با کامپوزیت‌های (W-Sn-Cd-EPVC) داشتند اما در ۹۰ KVp (W-Sn-Cd-EPVC) در ۱۲۰ KVp نتایج بهتری در هردو وضعیت باریک و پهن پرتوها داشتند. با توجه به وزن و سمیت محافظهای سربی رایج، این محافظهای بدون سرب می‌توانند به طور قابل توجهی به جای سرب به عنوان محافظ پرتو در رادیولوژی جایگزین شوند [۲۰].

۷-۲- ضخامت پوشش محافظ

سطح نفوذ پرتو ایکس به عنوان تابعی از میزان پرتو که با موفقیت از یک جسم عبور می‌کند بیان می‌شود. در ارزیابی این مسئله، تضعیف، معکوس نفوذ است و در مرحله آخر به انرژی موجود در فوتون‌ها و ویژگی‌های خود جسم بستگی دارد [۲۲]. بنابراین ضخامت، یک ویژگی مهم در محافظهای پرتو ایکس است، پس، یک پیش‌بند علاوه بر ویژگی‌های دیگر، باید به اندازه کافی ضخیم باشد تا از نفوذ پرتو یونیزه جلوگیری کند. به عنوان مثال، ۱/۰۰ mm سرب بیش از ۹۹٪ محافظت پرتو ایکس را به همراه دارد، در حالی که ۰/۰۱ mm حدود ۰/۲۵٪ پرتو ایکس را تضعیف می‌کند [۲۳]. ایمانی‌پور و همکارانش در سال ۲۰۱۹ به بررسی تاثیر ضخامت و پیدا کردن ضخامت بهینه پارچه‌های پوشش داده شده با نانوماده بیسموت اکسید پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد که ۴ لایه پارچه ۰/۰۴ mm توانایی با اکسید بیسموت به عنوان ضخامت بهینه با ضخامت ۰/۰۴ mm تضعیف ۱/۵۶٪ از پرتو ایکس را دارد. جدول ۱، درصد شدت تضعیف برای ۴ لایه پارچه و ضریب تضعیف بیسموت اکسید را نشان می‌دهد [۲۵]. همچنین، کفری^۱ و همکارانش خواص چند نوع مواد محافظ پرتو شامل سرب و غیرسرب (کادمیم، ایندیم، قلع، آنتیموان، سزیم، باریم، سریم، گادولینیم، بیسموت و تنگستن) به صورت تک‌لایه و چندلایه را مطالعه

^۱ Ceffrey

نکته جالب و قابل توجه این است که فوجیموری^۴ و همکارانش در رابطه با تضعیف پرتو ایکس با نانولوله‌های کربنی (CNTs) گزارش بسیار متفاوتی نسبت به سایر مطالعات دانشمندان درباره تاثیر ضخامت بر میزان تضعیف پرتو ایکس ارائه کردند. آن‌ها مشاهده کردند که ضریب جذب جرم نانولوله‌ها با کاهش ضخامت نمونه‌ها افزایش می‌یابد که این مشاهدات از قوانین کلاسیک فوتون‌های پرانرژی پیروی نمی‌کند. برای اثبات اثر نانولوله‌های کربنی آن‌ها پارچه را با یک فیلم نازکی از نانولوله‌های کربنی پوشاندند و افزایش ۷۰ درصدی تضعیف پرتو ایکس را مشاهده کردند [۳۰]. مواد CNT، به دلیل خواص منحصر بفردی از جمله چگالی پایین، سطح ویژه بالا، تخلل بالا در پوسته کربنی و خواص حرارتی و شیمیایی بالا، ضخامت کم، سبک بودن و استحکام بالا در عین انعطاف‌پذیری و پیچش‌پذیری خوب خودشان، می‌توانند در ساخت تجهیزات و دستگاه‌های سبک وزن کارآمد و ایمن پرتو ایکس به کار بردند [۳۱].

۷-۳- نوع ماده محافظ و ضریب تضعیف آن

ماده‌های معدنی با چگالی و عدد اتمی‌های متفاوت، هرکدام دارای ضریب تضعیف متفاوتی هستند. طبق قانون لمبرت، میزان تضعیف پرتو ایکس به ضریب تضعیف ماده و میزان ماده به کار رفته در پوشش منسوجات بستگی دارد [۳۲]. محققان برای بررسی و اثبات این موضوع، از ماده‌های مختلفی برای پوشش منسوج استفاده و تاثیر آن را بر میزان جذب و تضعیف پرتو ایکس بررسی کردند. برای مثال فوجیموری و همکارانش در تحقیق دریافتند که ضریب تضعیف جرم نانولوله‌های کربنی که برای پیرولیتیک گرافیت بسیار منظم (HOPG) و فلورسانس (C_{60}) مشاهده شد بیشتر از (۱۰۰٪) است [۳۰]. آرال و همکارانش برای بررسی اثر نوع ماده بر میزان جذب پرتو، از پودر فلزاتی مانند بیسیمومت (Bi)، تنگستن (W)، سولفات باریم ($BaSO_4$), قلع (Sn) و مس (Cu) استفاده کردند.

نامبیر^۱ و همکارانش نیز در سال ۲۰۱۲ نانوکامپوزیت‌های پلی دی متیل سیکلوگزان (PDMS) را با درصدی متفاوت وزنی (wt%) نانوپودر اکسید بیسیمومت (BO) ساختند و خواص تضعیف نانوکامپوزیت‌ها برای انرژی‌های تشخیص‌یابی پرتو ایکس از ۴۰-۱۵۰ KV را با مشخصات تضعیف mm ۰/۲۵ ضخامت صفحه سرب خالص مقایسه کردند. طبق نتایج به دست آمده در شکل ۹ آن‌ها دریافتند که نانوکامپوزیت PDMS/BO (۳/۷۳ mm) می‌تواند تمام ۴۴٪ از اکسید بیسیمومت با ضخامت (۳/۷۳ mm) می‌تواند تمام پرتوهای تولید شده در پتانسیل KV ۶۰ که انرژی پرتویی مورد استفاده در رادیولوژی است، را تضعیف کند [۲۷].

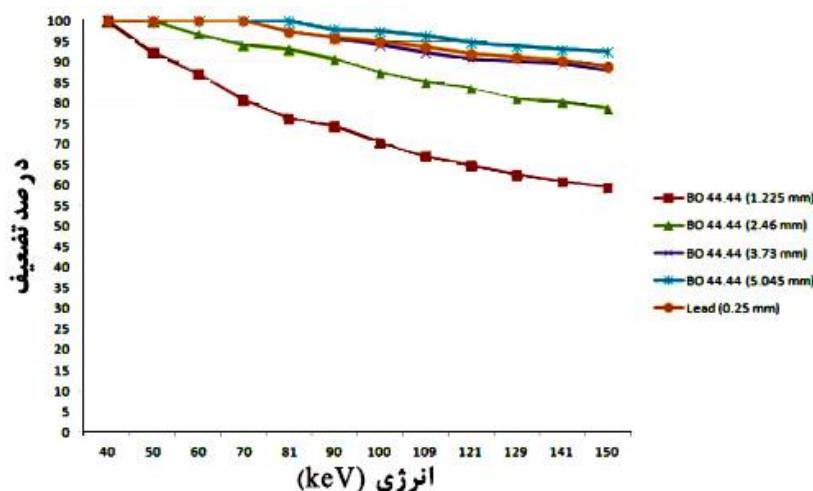
موري^۲ و همکارانش نیز در سال ۲۰۱۳ مطالعات مشابه‌ای انجام دادند. پیش‌بند پوششی غیرسری ALG-L^۳ با ضخامت ۵/۵ میلی‌متر معادل سرب، کمترین نسبت عبور در میان هفت پیش‌بند محافظتی داشت اما به علت سنگین بودن وزن آن (Kg ۱۰/۹) آن‌ها نتیجه گرفتند که ضخامت ۰/۲۵ mm پیش‌بندهای معادل سرب و ۰/۳۵ mm ضخامت پیش‌بند برای اپراتورهای رادیولوژی و پرستاران سی‌تی اسکن به خاطر حفاظت سرب در انرژی بالای ایکس مناسب است [۲۸]. اما در تحقیقی که احمد مغربی و همکارانش، در زمینه اثر ضخامت در میزان تضعیف پرتو ایکس انجام دادند، مشاهدات آنها نشان داد که هرچند ضخامت نقش مهمی برای کاهش پرتو ایکس ایفا می‌کند، اما تنها عامل افزایش میزان جذب نیست بلکه، عامل تعیین‌کننده، میزان ماده جاذب بر روی پارچه پوشش داده شده است که تغییر آن می‌تواند باعث کم یا زیاد شدن میزان تضعیف پرتو ایکس شود [۱۴]. در این خصوص، آل بودیری و همکارانش نیز در بررسی میزان تاثیر ماده تنگستن روی کاهش میزان عبور پرتو ایکس، دریافتند که هرچه میزان تنگستن افزایش می‌یابد، به علت افزایش پیوندهای عرضی تنگستن با سطح منسوج، میزان جذب پرتو ایکس افزایش می‌یابد [۲۹].

⁴ Fujimori

¹ Nambiar

² Mori

³ Alginate Lyase



شکل ۹- درصد تضعیف برای ضخامت‌های متفاوت BO ۴۴/۴۴٪ برای محدوده ۴۰-۱۵۰ KV [۲۷].

مقاله

در انرژی‌های بالاتر، حتی با تغییر غلظت و ضخامت، اندازه ذره در میزان جذب پرتو ایکس تأثیری ندارد [۳۶، ۳۷]. برای مثال، آغاز و همکارانش در سال ۲۰۱۶ در مورد خواص تضعیف محافظه‌های پوشش داده شده با ذرات نانو و میکروی اکسید تنگستن در محدوده انرژی پرتو ایکس تشخیصی تحقیقاتی انجام دادند. پوشش‌های محافظه با استفاده از ذرات میکرو و نانو WO_3 آمیخته شده دریک بستر پلیمر EPVC ساخته شدند. ضریب تضعیف آن‌ها برای انرژی‌های کم پرتو ایکس محاسبه شدند (محدوده انرژی رادیولوژی تشخیصی). نتایج نشان داد که محافظه‌های پوشش داده شده با نانوساختار WO_3/EPVC خواص تضعیف فوتون بیشتری در مقایسه با نمونه‌های اندازه میکرو آن‌ها دارد و اندازه کوچکتر ذرات نانوساختار WO_3 می‌تواند خواص محافظتی بهتری را به همراه داشته باشد [۱۳].

۸- ویژگی‌های فیزیکی و فنی پوشش محافظه

زمانی می‌توان به یک محافظه، منسوج محافظه گفت که علاوه بر خواص محافظتی، دارای ویژگی‌های مکانیکی و فیزیکی پوشش مانند راحتی، مقاومت کششی و خمشی، نفوذپذیری هوا و غیره باشد. مقفقان در این راستا، علاوه بر اندازه‌گیری میزان تضعیف پرتو ایکس به بررسی ویژگی‌های مکانیکی منسوج نیز پرداختند. برای مثال، آرال و همکارانش، مقاومت کششی و سختی خمشی نمونه‌های پوشش داده شده با تنگستن را مورد بررسی قرار دادند. نتایج آن‌ها نشان داد که هیچ‌گونه ترک خودرگی، لایه‌لایه‌شدن و تغییر رنگ روی سطوح پارچه‌های پوشش داده شده مشاهده نشد که نشان می‌دهد مقاومت اولیه نمونه‌ها در نسبت‌های اضافه شده و ضخامت پوشش به اندازه کافی خوب است. هم‌چنین، پارچه‌های تکمیلی با پودرهای بارگذاری شده و ضخامت‌های مختلف، مقاومت خوبی در برابر چروک نشان دادند [۳۲]. کسوکتم^۱ و همکارانش نیز، ثبات مالشی و شستشوی نمونه پارچه‌های پنبه‌ای پوشش داده شده با سولفات‌باریم را مورد بررسی قرار دادند تا پایداری مواد پوشش داده شده روی پارچه را مورد بررسی قرار دهند. نتایج آن‌ها در جدول ۲ نشان داده شده است. طبق جدول ۲ مشخص است که نمونه‌ها درصد کمی از وزن خود را در آزمون‌های ثبات مالشی و شستشوی از دست دادند و توانستند نتایج مطلوبی را ارائه دهند [۳۸].

جدول ۲- نتایج درصد وزنی از دست‌رفته در آزمون ثبات مالشی و شستشوی [۳۸].

آزمون	نمونه	% وزن کم شده	
		حالت خشک	حالت مرطوب
ثبت مالشی	در جهت تار	۰/۰۶	۰/۱۵
	در جهت پود	۰/۰۴	۰/۱۷
ثبت شستشوی	-	-	۰/۲۳

^۱ Kusuktham

به علت اینکه نگهداری پودرهای فلزی در شکل فشرده دشوار است، لازم است تا از رزین‌های مناسب استفاده شود. آن‌ها از حلقه‌های سیلیکونی (SR) به دلیل گرانروی بالا، مقاومت زیاد در برابر شکستن و انعطاف‌پذیری خوب آن بعد از پخت استفاده کردند. آن‌ها دریافتند که ۹۰٪ فوتون‌های پرتو ایکس در سطح KV ۱۰۰ با ۱/۵ mm بیسموت و ۱/۷۳ mm تنگستن (در نسبت وزنی ۰/۶۰٪)، تضعیف می‌شود. در نسبت‌های وزنی یکسان، ترکیب Bi-SR در مقایسه با تنگستن و سولفات‌باریم تضعیف بهتری داشت. برای رسیدن به تضعیف بیشتر می‌توان میزان مواد معدنی که به عنوان جاذب پرتو ایکس عمل می‌کنند را افزایش داد. اما باید توجه داشت که افزودن مواد معدنی به علت جرم مولکولی بالای آن‌ها باعث سنگینی محصول می‌شود. پیشنهاد می‌شود برای کاهش وزن و ضخامت نمونه، نسبت سیلیکون را کاهش داد [۳۲، ۳۳].

جمیل و همکارانش نیز در سال ۲۰۱۹ نانولیاف PVA/ WO_3 و PVA/ Bi_2O_3 را با روش الکتروریسی با غلظت‌های متفاوت (PVA w/w و WO_3 و Bi_2O_3 w/w ۱۰٪ و ۱۵٪) و نسبت‌های متفاوتی از پرکننده‌های (۰-۴۰٪) تولید کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که PVA با نسبت w/w ۱۵٪ اکسید بیسموت بهترین نتیجه را در ضریب تضعیف پرتو ایکس می‌دهد. در الیافی که قطر کمتر داشتند، تراکم کمتر و دانه تسبیحی کمتری نسبت به سایر نمونه‌ها مشاهده شد که از دلایل آن می‌توان به ظرفی‌تر شدن لیف اشاره کرد [۹].

کالکارنی^۲ و همکارانش در سال ۲۰۱۴ نانوکامپوزیت‌هایی بر پایه اکسیدهای فلزی مختلف مانند اکسید آهن، اکسید روی، دی اکسید سیلیکان، دی اکسید زیرکونیوم و دی اکسید تیتانیم در بستر پلی وینیل الكل، به عنوان مواد محافظه پرتو الکترومغناطیسی، EMI^۳، ارایه دادند. نانوکامپوزیت‌ها برای درصدهای مختلف از نانوذرات اکسید فلزی (۰/۱٪، ۰/۵٪، ۱٪ و ۱۰٪ درصد) ساخته شدند که ضخامتی حدود ۰/۵mm داشتند. نتایج نشان داد که نانوکامپوزیت‌هایی بر پایه سیلیکا و اکسید آهن ارزان‌تر، دارای پایداری حرارتی و خواص مکانیکی بالاتر و مواد موثرتری به عنوان لایه محافظه برای EMI هستند [۳۴].

آزمان و همکاران کلرید سرب، اکسید بیسموت، کامپوزیت اپوکسی پرشده با کسرهای وزنی متفاوتی را تولید کردند. مشخصه‌یابی خواص میکروساختاری کامپوزیت‌هایی سنتز شده با استفاده از انکسار تابش سیکروتون انجام شد. آن‌ها دریافتند که عبور پرتو ایکس با افزایش بارگذاری پرکننده کاهش می‌یابد [۳۵].

۷-۴- اندازه ذرات ماده

در بررسی تأثیر اندازه ذرات بر میزان جذب پرتو ایکس، نتایج تحقیقات مقفقان نشان داده است که در انرژی‌های پایین تابش، میزان جذب پرتو ایکس به اندازه ذرات ماده بستگی دارد. نانوذرات به علت سطح به حجم بالا، توانایی بیشتری در جذب فوتون‌های پرتو ایکس دارند، درصورتی که

¹ Kulkarni

² Electromagnetic Interference

کفری و همکاران، در بررسی تاثیر مواد سولفات‌باریم، اکسید بیسموت و دی اکسید کادمیم در میزان جذب پرتو ایکس دریافتند که منسوج محافظ پوشش داده شده با اکسید بیسموت، میزان برابر یا بهتری نسبت به نمونه سربی و مواد غیرسربی برای محدوده انرژی $KVp = 60$ تا 130 دارد [۳۹]. زوگوچی^۱ و همکارانش نیز نشان دادند که با توجه به این که در حال حاضر رادیولوژی تداخلی (IR) به دوره‌های پرتوهای طولانی گرایش دارد و فیزیوتراپ‌ها به منبع انتشار پرتو نزدیک هستند، محافظت از فیزیوتراپ‌ها در برابر پرتوهای مضر، ضروری است. در این مطالعه، تاثیر محافظتی تابش مواد غیرسربی (تنگستن و قلع) با پیش‌بندهای سربی تجاری را مقایسه کردند. با این که طبق نتایج آن‌ها میزان تضعیف برای هر دو پیش‌بندهای سربی و غیرسربی مشابه بود، اما آن‌ها پیش‌بندهای غیرسربی را به دلیل غیرسمی بودن و وزن آن‌ها که $\approx 20\%$ کمتر از پیش‌بندهای سربی است، برای محافظت فیزیوتراپ‌ها توصیه کردند [۴۰]. در تحقیق دیگری، کفری، کفری و همکارانش، بر روی بهینه‌سازی مواد محافظ تابش غیرسربی با تکمیل دولایه تحقیق کردند. هدف این مطالعه، امکان کاهش وزن مواد محافظ با ساختار دو لایه از ترکیب چند فلز (آنتیموان، باریم، تنگستن و بیسموت) بصورت پودر بود. نحوه انتخاب لایه فلزها براساس کم‌هزینه بودن، سمی نبودن و کامل بودن مشخصات جذب فوتوالکتریکی صورت گرفت. برحسب میزان انرژی پرتو ایکس، با انتخاب مناسب لایه‌های فلزی محافظ تا $\approx 20\%$ کاهش در وزن نسبت به پوشش سربی با همان میزان تضعیف بدست آمد [۴۱]. هرچند طبق تحقیقات صورت گرفته منسوجات پوشش داده شده با پودرهای معدنی، میزان تضعیف قابل قبولی را به همراه داشتند و توانستند خواص مکانیکی بهتری نسبت به سرب از خودشان نشان دهند، اما این پوشش‌ها به علت استفاده از درصدهای بالای پودرهای معدنی باعث مشکلاتی از قبیل کاهش چسبندگی پوشش به بسترهای پوشش و کاهش خواص فیزیکی و مکانیکی می‌شوند [۴۲]. جدول ۳، خلاصه‌ای از مطالعات انجام شده پیرامون پوشش‌های محافظ پرتو ایکس را نشان می‌دهد.

² Zuguchi

آzman^۱ و همکارانش نیز در بررسی خواص مکانیکی کامپوزیت‌ها دریافتند که مدول خمشی و سختی کامپوزیت‌ها با افزایش بارگذاری پرکننده‌های معدنی، افزایش می‌یابد. استحکام خمشی نیز، با افزایش بارگذاری پرکننده ($\leq 30\text{ Wt}\%$) کاهش مشخصی را نشان داد. به طور کلی، نتایج آن‌ها نشان داد که کامپوزیت‌های اپوکسی WO_3 یا $Bi_2O_3 \cdot PbCl_2$ بر توانایی محافظتی پرتو ایکس خوب، خواص مکانیکی مطلوبی دارند، از این جهت می‌توانند به عنوان مواد محافظ پرتو ایکس اتاق‌های رادیولوژی در نظر گرفته شوند [۳۶].

میرزابی و همکارانش نیز ریخت‌شناسی، توانایی تضعیف پرتو ایکس، خواص کششی، خمشی و ساختاری نخ‌های مونوفیلامنت و پارچه را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها انعطاف‌پذیری پارچه را براساس رابطه 4 که در زیر آمده است، اندازه‌گیری کردند.

$$G = M \times C^3 \times 10^{-3} \quad (4)$$

که در آن، G میزان انعطاف‌پذیری (mg.cm), M وزن پارچه (g/cm^2) و C طول خمش (cm) می‌باشد. مشاهدات آن‌ها نشان داد که با استحکام و ازدیاد طول تا حد پارگی نخ‌های مونوفیلامنت و نمونه پارچه‌ها با افزایش ذرات فلزی در نخ، افزایش می‌یابد. خواص کششی نخ، با کاهش میزان ذرات فلزی در نخ پلی‌پیروپیلن و بالاتر رفتن میزان بلوری‌شدن نخ، بهبود می‌یابد. در حالی که افزایش میزان ذرات فلزی، باعث افزایش وزن پارچه و کاهش خمش‌دگی پارچه می‌شود و براساس رابطه 4 استحکام خمشی پارچه‌ها را کاهش می‌دهد [۱۷]. گونتر و همکارانش نیز، نفوذ‌پذیری هوا را بررسی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که تفاوت معنی‌داری بین نمونه مرتع و پارچه‌های کامپوزیتی وجود ندارد. این ویژگی نفوذ‌پذیری هوا بهوضوح مربوط به نساجی است زیرا برای یک پیش‌بند سربی احتمال نفوذ هوا صفر است [۱۱].

از جمله مواردی که برای جایگزینی سرب به جای مواد معدنی اهمیت دارد، کاهش وزن پوشش محافظ و سبک‌تر شدن آن است. محققین نیز در مطالعات خود، به این مهم توجه داشته و آن را بررسی کردند. برای مثال

¹ Azman

جدول ۳- چکیده‌ای از مطالعات صورت گرفته در زمینه پوشش‌های محافظ پرتو/ایکس.

مرجع	نتایج	موضوع پژوهش	پژوهشگر	سال
۲۱	استفاده از قلع/بیسموت دارای تضعیف $\approx 35\%$ ، $\approx 15\%$ و $\approx 39\%$ برای ولتاژهای $KV = 60$ ، 75 و 120 می‌باشد	استفاده از بیسموت، قلع	اشلاتی و همکارانش	۲۰۰۷
۲۶	افزایش ضخامت تاثیر مستقیمی بر میزان تضعیف پرتو ایکس دارد	مقایسه مواد سربی و غیرسربی	کفری و همکارانش	۲۰۰۷
۳۹	عملکرد پیش‌بندهای سربی و غیرسربی برای پرتو ایکس در ولتاژ $KV = 60-120$ مشابه بود.	استفاده از قلع و تنگستن	زوگوچی و همکارانش	۲۰۰۸
۴۰	موقعیت پایین به بالا/بالا به پایین از دولایه فلز، تضعیف بیشتری نسبت به موقعیت معکوس دارد	بررسی کاهش وزن مواد محافظ با ایجاد ساختار دولایه از ترکیب چند فلز (Sb, W, Ba) بهصورت پودر	کفری و همکارانش	۲۰۰۹

مقاله

(ادامه جدول ۳)

سال	پژوهشگر	موضوع پژوهش	نتایج	مراجع
۲۰۱۲	کفری	استفاده از BaSO_4 و Cd_2O_3 و Bi_2O_3 در ولتاژ ۶۰ KV نسبت به نمونه سربی	تضعیف بهتر اکسید بیسموت در ولتاژ ۶۰ KV نسبت به نمونه سربی	۳۸
۲۰۱۲	کونزل و همکارانش	استفاده از نانوساختار CuO در منسوج محافظ پرتو ایکس	تضعیف بیشتر پرتو ایکس توسط نانوساختار CuO نسبت به اندازه میکرو	۳۶
۲۰۱۲	نامبیر و همکارانش	ساخت نانوکامپوزیت‌های پلی دی متیل سیکلوکسان، با استفاده از wt % متفاوت BO	PDMS/BO توانایی تضعیف‌سازی تمام پرتوهای تولید شده در ولتاژ ۶۰ KV که انرژی پرتویی است که در IVR استفاده می‌شود دارد.	۲۷
۲۰۱۳	ال بودبری و همکارانش	استفاده از W	افزایش درصد تنگستن و پیوندهای عرضی بین مواد کامپوزیت تضعیف پرتو ایکس را افزایش می‌دهد	۲۹
۲۰۱۴	کالکارنی و همکارانش	بررسی جذب ایکس نانوکامپوزیت‌ها بر پایه اکسیدهای فلزی مختلف (TiO_2 , FeO_2 , ZnO_2 , ZrO_2)	نانوکامپوزیت‌هایی بر پایه سیلیکا و آهن به عنوان محافظ پرتوهای EMI، ارزان‌تر، دارای پایداری حرارتی و خواص مکانیکی بالاتر می‌باشد	۳۳
۲۰۱۵	کاظم‌پور و همکارانش	مقایسه سرب با کامپوزیت‌های W-Sn و W-Sn-Ba-EPVC و W-Sn-Cd-EPVC	در انرژی‌های پایین سرب و کامپوزیت‌های سرب بهترین عملکرد را در جذب پرتو ایکس دارند اما در انرژی‌های بالا، کامپوزیت‌های غیرسربی میزان تضعیف خوبی دارند	۲۰
۲۰۱۵	فوجیموری و همکارانش	استفاده از CNTs در حفاظ پرتو ایکس	افزایش ۷۰٪ در تضعیف پرتو ایکس	۳۰
۲۰۱۵	احمد مغربی و همکارانش	استفاده از Bi_2O_3 به عنوان ماده جاذب	استفاده بیش از ۵۰٪ اکسید بیسموت، خواص حفاظتی مطلوب	۱۴
۲۰۱۵	گونتر و همکارانش	تولید دستکش حاوی مواد BaSO_4 و Bi_2O_3 با استفاده از فرآیند لایوسل	به علت وجود منافذ، میزان جذب در تمام دستکش به طور یکسان توزیع نشده است	۱۱
۲۰۱۵	مهلتیگ و همکارانش	تولید الیاف BaTiO_3 , Bi_2O_3 , BaSO_4	در عبور غیرمستقیم پرتو ایکس، میزان جذب به تعداد لایه‌ها، نوع مواد تکمیلی، تراکم تار و پود و نوع یافت سستگی دارد در عبور مستقیم، Bi_2O_3 بالاترین میزان جذب را دارد	۱۵
۲۰۱۵	آرال و همکارانش	BaSO_4 و W, Bi	۹٪ فوتون‌های پرتو ایکس با $1/5 \text{ mm}$ بیسموت و $1/72 \text{ mm}$ تنگستن تضعیف می‌شوند	۱۰
۲۰۱۶	کسوکتام و همکارانش	تأثیر لایه مواد BaSO_4 به عنوان ماده محافظ	افزایش تعداد لایه با غث افزایش میزان تضعیف پرتو ایکس می‌شود	۳۷
۲۰۱۹	میرزاچی و همکارانش	استفاده از مونوفیلامن‌های ذوب‌رسی شده سرب- قلع به عنوان جاذب پرتو ایکس	مونوفیلامنت با ۵۰٪ نسبت وزنی Pb و ۵۰٪ Sn بیشترین میزان تضعیف پرتو ایکس را داشت	۱۶
۲۰۱۹	جمیل و همکارانش	نانوالیاف $\text{PVA/Bi}_2\text{O}_3$ و PVA/WO_3	۵٪/بایا ۳۵٪/بایا اکسید بیسموت بهترین نتیجه را در ضربیت تضعیف پرتو ایکس می‌دهد	۹
۲۰۱۹	ایمانی‌پور و همکارانش	تأثیر استفاده از نانوماده Bi_2O_3 پوشش داده شده بر روی پارچه بی‌یافت پلی‌استر	بیسموت اکسید با ضخامت ۰.۰۴ mm، میزان ۷۹٪۵۶٪ از پرتو ایکس را تضعیف کرد	۲۵

محافظه پرتو ایکس نشان دهنده نتایج محققان نشان داد که اندازه ذرات در انرژی‌های پایین تاثیرگذار است و نانومواد توانایی تضعیف پرتو ایکس بیشتری نسبت به اندازه میکروماد دارند اما در انرژی‌های زیاد، میزان تضعیف مستقل از اندازه ذرات مواد است. در میان مواد معدنی مطالعه شده، اکسید بیسموت با ضخامت $1/5 \text{ mm}$ با توانایی تضعیف بیش از ۹۰٪ پرتوهای ایکس، به عنوان بهترین ماده محافظه شمار می‌آید. میزان تضعیف پرتو ایکس به عوامل مختلفی از جمله ضخامت پوشش محافظه، ضریب تضعیف ماده پوشش داده شده، شدت تابش، فاصله از منبع تابش و مدت زمان تابش بستگی دارد که با افزودن مواد معدنی و افزایش ضخامت ماده پوشش داده شده روى منسوج، می‌توان به نتایج مطلوبی رسید اما باید توجه داشت که افزایش نسبت مواد معدنی، با اینکه باعث افزایش میزان تضعیف پرتو ایکس می‌شود اما به علت افزایش وزن، باعث کاهش خمش و انعطاف‌پذیری منسوج می‌شود. به طور کلی، منسوج پوشش داده شده با مواد معدنی به عنوان محافظه پرتو ایکس در پزشکی به علت این که انرژی پرتو ایکس در بخش رادیولوژی در محدوده پایینی قرار دارد، می‌تواند جایگزین پوشش‌های سربی شوند.

۹- نتیجه گیری

امروزه محافظت در برابر پرتو به خصوص پرتو یون‌ساز مانند گاما و ایکس از موارد ضروری محسوب می‌شود. به دلیل گستره رو به افزون استفاده از پرتوهای ایکس در صنایع و رشته‌های مختلف به خصوص در بخش‌های مختلف پزشکی مانند رادیولوژی‌ها، سی‌تی اسکن، ماموگرافی و رادیوگرافی و غیره برای جلوگیری از عوارض ناشی از آن، محافظت در برابر این پرتو به عنوان مساله‌ای جدی تلقی می‌شود. هرچند پوشش‌های تکمیلی با سرب، محافظ خوبی در برابر پرتو ایکس است اما سمی بودن، منعطف‌بودن، عدم سازگاری با محیط‌زیست و سنجیگی آن، دلیلی شده است تا محققان به دنبال جایگزین مناسبی برای این ماده باشند. در این میان منسوجات پوشش داده با نانومواد مانند نانولوله‌های کربنی و مواد معدنی با عدد اتمی بالا و فلزات سنتگینی مثل باریم، بیسموت، تنگستن، قلع و غیره توانستند به عنوان جایگزین مناسبی برای سرب مطرح شوند، که علاوه بر غیرسمی بودن، توانستند با وزنی سبک‌تر از سرب و عملکرد فی بهتر به عنوان پوشش محافظه، انعطاف‌پذیری بیشتر، نفوذ‌پذیری و زیردست بهتری را در مقابل سرب داشته و با میزان محافظتی برابر یا بهتر از سرب، جایگاه خوب خود را به عنوان ماده

۱۰- مراجع

- 1- A. Becheri, M. Dürr, P. L. Nostro, P. Baglioni, "Synthesis and characterization of zinc oxide nanoparticles: application to textiles as UV-absorbers", *J. Nanopart. Res.* 10, 679-689, **2008**.
- 2- M. A. Hossain, M. Rahman, "A review of nano particle usage on textile material against ultra violet radiation". *JTST*, 1, 93, **2015**.
- 3- A. Zamanian, C. Hardiman, "Electromagnetic radiation and human health: A review of sources and effects", *high Freq. Des.* 4, 16-26, **2005**.
- 4- M. H. Barcellos-Hoff, C. Park, E. G. Wright, "Radiation and the microenvironment-tumorigenesis and therapy", *Nat. Rev. Cancer*, 5, 867, **2005**.
- 5- ز. قاسمی‌نژاد لیچاهی، "بررسی پرتوگیری کادر پزشکی در مراکز پزشکی هسته‌ای شهر رشت"، پایان نامه ارشد فیزیک هسته‌ای، دانشکده علوم پایه، دانشگاه گیلان، صفحه ۵۸۹، ۱۳۸۹.
- 6- R. A. Scott, "*Textiles for protection*", Elsevier, **2005**.
- 7- N. N. Azman, , S. A. Siddiqui, I. M. Low, "Characterisation of micro-sized and nano-sized tungsten oxide-epoxy composites for radiation shielding of diagnostic X-rays", *Text. Res. J.* 33, 4952-4957, **2013**.
- 8- B. Moore, E. VanSonnenberg, G. Casola, R. A. Novelline, "The relationship between back pain and lead apron use in radiologists", *Am. J. Roentgenol.* 158, 191-193, **1992**.
- 9- M. Jamil, M. H. Hazlan, R. M. Ramli, N. Z. N. Azman, "Study of electrospun PVA-based concentrations nanofibre filled with Bi_2O_3 or WO_3 as potential x-ray shielding material". *Radiat. Phys. Chem.* 156, 272-282, **2019**.
- 10- N. Aral, F. Banu Nergis, C. Candan, "An alternative X-ray shielding material based on coated textiles", *Text. Res. J.* 86, 803-811, **2016**.
- 11- K. Günther, C. Giebing, A. Askani, T. Leisegang, M. Krieg, , Y. Kyosev, B. Mahltig, "Cellulose/inorganic-composite fibers for producing textile fabrics of high X-ray absorption properties", *Mat. Chem. Phys.* 167, 125-135, **2015**
- 12- H. Özdemir, B. Camgöz, "Gamma radiation shielding effectiveness of cellular woven fabrics", *J Ind. Text.* 47, 712-726, **2018**.
- 13- A. Aghaz, R. Faghihi, S. M. J. Mortazavi, A. Haghparast, S. Mehdizadeh, S. Sina, "Radiation attenuation properties of shields containing micro and Nano WO_3 in diagnostic X-ray energy range", *Int. J. Radiat. Res.* 14, 127-131, **2016**.
- 14- H. A. Maghrabi, A. Vijayan, P. Deb, L. Wang, "Bismuth oxide-coated fabrics for X-ray shielding", *Text. Res. J.* 86, 649-658, **2016**.
- 15- B. Mahltig, K. Günther, A. Askani, F. Bohnet, N. Brinkert, Y. Kyosev, T. Leisegang, "X-ray-protective organic/inorganic fiber-along the textile chain from fiber production to clothing application", *J. Text. Inst.* 108, 1975-1984, **2017**.
- 16- M. Mirzaei, M. Zarrebini, A. Shirani, M. Shanbeh, S. Borhani, "X-ray shielding behavior of garment woven with melt-spun polypropylene monofilament", *Powder Technol.* 345, 15-25, **2019**.
- 17- M. Mirzaei, M. Zarrebini, A. Shirani, M. Shanbeh, S. Borhani, "X-ray shielding by a novel garment woven with melt-spun monofilament weft yarn containing lead and tin particles", *Text. Res. J.* 89, 63-75, **2017**.
- 18- N. Aral, B. Nergis, C. Candan, A. O. Tümsek, T. Y. Bozkurt, İ. G. Gür, "An Investigation on Sewability of X-ray Protective Fabrics", *Mat. Sci. Eng.* 254, DOI: 10.1088/1757-899X/254/5/052002, **2017**.
- 19- م. قنادی مراغه، "فتواری هسته‌ای"، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی ایران، ۱۰۱، ۱۳۸۹.
- 20- M. Kazempour, M. Saeedimoghadam, F. S. Shooli, N. Shokrpour, "Assessment of the radiation attenuation

مقاله

- properties of several lead free composites by Monte Carlo simulation", J. Bio. Phys. Eng. 5, 67, **2015**.
- 21- H. Schlattl, M. Zankl, H. Eder, C. Hoeschen, "Shielding properties of lead-free protective clothing and their impact on radiation doses", Med. Phys. 34, 4270-4280, **2007**.
- ۲۲- ف. گلستانی فرد، م. ع. بهرهور، ا. صلاحی، "روش‌های شناسایی و آنالیز مواد"، انتشارات دانشگاه علم و صنعت، ۱۳۹۷.
- 23- P. Sprawls, "Physical principles of medical imaging", WI: Medical Physics Publishing, **1996**.
- 24- SC. Bushong, "Radiologic science for technologists: Physics, biology, and protection", 9th ed. St Louis, MO: Mosby, **2008**.
- ۲۵- ف. ایمانی‌پور، م. خواجه مهریزی، پ. پیوندی، "تأثیر استفاده از نانوماده بیسموت اکسید بر میزان تضعیف پرتو ایکس"، چهارمین همایش ملی و کارگاه‌های تخصصی علوم و فناوری نانو، ۱۳۹۸.
- 26- J. P. McCaffrey, H. Shen, B. Downton, E. Mainegra-Hing, "Radiation attenuation by lead and nonlead materials used in radiation shielding garments", Med. Phys. 342, 530-537, **2007**.
- 27- S. Nambiar, E. K.Osei, J. T.Yeow, "Polymer nanocomposite-based shielding against diagnostic X-rays", J. Appl. Polym. Sci. 127, 4939-4946, **2013**.
- 28- H. Mori, K. Koshida, O. Ishigamori, K. Matsubara, "Evaluation of the effectiveness of X-ray protective aprons in experimental and practical fields", Radio. Phys. Technol. 7, 158-166, **2013**.
- 29- O. H. Al-Bodairy, M. H.Al-Maamorib, A. I. Al-Mosawic, N. A. Saleha, "Effect of tungsten percent on transmission properties for (X-Ray) of styrene butadiene rubber", Int. j. Curr. Eng. 3, 804-808, **2013**.
- 30- T. Fujimori, S.Tsuruoka, B. Fugetsu, S.Maruyama, A.Tanioka, M. Terrones, K. Kaneko, "Enhanced X-ray shielding effects of carbon nanotubes", Mater. Express, 1, 273-278, **2011**.
- ۳۱- س. آ. حدادی، ا. رمضانی سعادت آبادی و م. مهدویان احمدی، "مروی بر روش‌های ساخت نانو کره‌های توخالی کربنی جهت استفاده در پوشش‌های سطح"، نشریه علمی ترویجی مطالعات در دنیای رنگ، ۱-۱۶، ۷.۱، ۱۳۹۶.
- 32- N. Aral, F. B.Nergis, C. Candan, "The X-ray attenuation and the flexural properties of lead-free coated fabrics". J. Ind Text. 47, 252-268, **2017**.
- 33- A. R. A. L.Nebahat, F. B. Nergis, C. Candan, "Investigation of X-ray attenuation and the flex resistance properties of fabrics coated with tungestan and barium sulphate additive", Tekst. Konfeksiyon, 26, 166-171, **2016**.
- 34- R. Singh, S. G. Kulkarni, "Nanocomposites based on transition metal oxides in polyvinyl alcohol for EMI shielding application". Polymbull. 71, 497-513, **2014**.
- 35- N. Z. N. Azman, , S. A. Siddiqui, I. M. Low, "Synthesis and characterization of epoxy composites filled with Pb, Bi or W compound for shielding of diagnostic x-rays", App. Phys A. 110, 137-144, **2013**.
- 36- N. Z. N. Azman, , S. A. Siddiqui, R. Hart, I. M. Low, "Microstructural design of lead oxide–epoxy composites for radiation shielding purposes". Mat. Sci. Eng C. 128, 3213-3219, **2013**.
- 37- R. Künzel, E. Okuno, "Effects of the particle sizes and concentrations on the X-ray absorption by CuO compounds". Appl. Radiat. Isot. 70, 781-784, **2012**.
- 38- B. Kusukham, C. Wichayasiri, S. Udon, "X-Ray attenuation of cotton fabrics coated with barium sulphate". J. Min. Met. Mater. 26, 17-23, **2016**
- 39- J. P. McCaffrey, F.Tessier, H. Shen, "Radiation shielding materials and radiation scatter effects for interventional radiology (IR) physicians", Med. phys. 39, 4537-4546, **2012**.
- 40- M. Zuguchi, , K. Chida, M.Taura, Y. Inaba, A. Ebata, S. Yamada, "Usefulness of non-lead aprons in radiation protection for physicians performing interventional procedures", Radiat. Prot. Dosimetry. 131, 531-534, **2008**.
- 41- J. P. McCaffrey, E. Mainegra-Hing, H. Shen, "Optimizing non-Pb radiation shielding materials using bilayers", Med. Phys. 36, 5586-5594, **2009**.
- ۴۲- م. احسان‌جو، س. محمدی، ناز چایی بخش لنگرودی، "مروی بر نقش نانو مواد در بهبود خواص مقاومت به خوردگی پوشش‌های غنی از روی"، نشریه علمی ترویجی مطالعات در دنیای رنگ، ۹.۳، ۴۴-۲۷، ۱۳۹۸.